

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**



## **Zemní masiv jako zdroj energie**

Katedra mechaniky a strojnictví

Disertační práce

**ING. PAVEL PAULI**

PRAHA 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci zpracovávanou na téma „Zemní masiv jako zdroj energie“ vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Pavla Neubergera, Ph.D. a uvedl jsem veškerou použitou literaturu, kterou uvádím v seznamu použitých zdrojů. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

.....

Ing. Pavel Pauli

V Praze dne 20. 6. 2016

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat firmě Veskom s.r.o., která realizovala experimentální pracoviště a umožnila provést měření, konkrétně panu řediteli Ing. Petru Burešovi.

Děkuji své rodině, která mi poskytla velkou podporu a čas na vypracování této disertační práce. Také bych rád poděkoval mému školiteli doc. Ing. Pavlovi Neubergerovi, Ph.D. a prof. Ing. Radomírovi Adamovskému, DrSc. za odborné rady a debaty vedené v průběhu vypracování disertační práce.

## **Abstrakt**

Disertační práce na téma „Zemní masiv jako zdroj energie“ se zabývá využitím horizontálních tepelných výměníků jako zdrojů nízkopotenciálního tepla pro tepelná čerpadla. V kapitole „Současný stav řešené problematiky“ jsou popsány ekologické vlastnosti tepelných čerpadel, vlivy působící v zemním masivu a jednotlivé typy zemním výměníků tepla.

V kapitole „Cíle a hypotézy disertační práce“ jsou vysloveny jednotlivé hypotézy výzkumu a cíle disertační práce. V kapitole „Metodika“ jsou v teoretické části přiblíženy matematické vztahy, které popisují teorii sdílení tepla v zemním masivu, metody měření, způsob zpracování experimentálních dat a použité měřicí přístroje. V kapitole „Výsledky a diskuze“ jsou uvedeny zásadní poznatky a stanoviska, které byly zpracovány na základě naměřených hodnot.

Závěrečná kapitola „Závěry a doporučení pro využití v praxi“ komentuje dosažení výsledků a upřesňuje využití horizontálních tepelných výměníků v praxi.

**Klíčová slova:** tepelné čerpadlo, horizontální zemní výměník, teplota zemního masivu, topné období

## **Abstract**

The dissertation with the topic “Ground as an Energy Source” discusses the utilisation of horizontal heat exchangers as sources of heat at low temperature for heat pumps. Chapter “Current Situation in the Field” describes the environmental properties of heat pumps, the effects existing in the ground and the individual types of ground heat exchangers.

Chapter “Objectives and Hypotheses of the Dissertation” lays down the individual hypotheses of the research and the objectives of the dissertation. The theoretical part of the “Set of Methods” chapter gives an understanding of the mathematical relationships describing the theory of heat sharing in the ground, the measurement methods, the method of processing experimental data, and the measuring instruments used. The “Results and Discussion” chapter includes the basic findings and opinions processed on the basis of values measured.

The final chapter “Conclusions and Recommendations for Practical Use” comments on the results achieved and elaborates on utilising horizontal heat exchangers in practice.

**Keywords:** Heat pump, horizontal ground exchanger, soil temperature, heating season

# Obsah

<b>PROHLÁŠENÍ</b>	<b>I</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRAKT</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IV</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>VII</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>IX</b>
<b>1. ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Ekologické vlastnosti tepelných čerpadel</b>	<b>3</b>
2.1.1 Používaná chladiva:	3
2.1.2 Kontrola těsnosti chladiv	4
<b>2.2 Topný faktor tepelných čerpadel</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Tepelné vlivy působící v zemním a horninovém masivu</b>	<b>6</b>
2.3.1 Vliv slunečního záření	8
2.3.2 Tepelný tok	9
2.3.3 Tepelná vodivost	9
2.3.4 Tepelná kapacita	11
2.3.5 Teplotní vodivost	12
<b>2.4 Typy zemních výměníků tepla</b>	<b>13</b>
2.4.1 Vertikální horninové výměníky	13
2.4.2 Horizontální zemní výměníky	14
<b>2.5 Hodnocení a praktické zkoušky horizontálních tepelných výměníků</b>	<b>21</b>

<b>3. CÍLE A HYPOTÉZY DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>25</b>
<b>4. METODIKA</b>	<b>26</b>
4.1 Teorie sdílení tepla v zemním masivu	26
4.2 Metodika měření	28
4.3 Metoda stanovení průběhu průměrných denních teplot	32
4.4 Měřicí přístroje	32
<b>5. VÝSLEDKY A DISKUZE</b>	<b>36</b>
5.1 Průběhy teplot v zemním masivu v topných obdobích 2012/2013 a 2013/2014 a navazujících období stagnace	36
5.1.1 Teploty zemního masivu s lineárním a Slinky HGHE	36
5.1.2 Globální záření dopadající na experimentální pozemek	43
5.1.3 Teoretické průběhy teploty zemního masivu s lineárním a se Slinky HGHE	45
5.1.4 Tepelné toky a energie odvedené zemnímu masivu	51
<b>6. ZÁVĚR</b>	<b>55</b>
<b>POUŽITÉ ZDROJE</b>	<b>58</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1	Distribuce sluneční energie.....	7
Obr. 2	Vertikální tepelný výměník .....	14
Obr. 3	Konfigurace horizontálních zemních tepelných výměníků .....	15
Obr. 4	Uložení tepelného výměníku typu Slinky.....	17
Obr. 5	Schéma šroubovitého výměníku.....	18
Obr. 6	Uložení lineárního tepelného výměníku .....	19
Obr. 7	Teploty zemního masivu a měrné tepelné výkony horizontálních výměníků v typickém zimním dnu .....	24
Obr. 8	Půdorysné schéma lineárního HGHE a umístění teplotních senzorů .....	28
Obr. 9	Schéma lineárního HGHE a umístění teplotních senzorů v zemním masivu ....	29
Obr. 10	Půdorysné schéma HGHE typu Slinky a umístění teplotních senzorů .....	30
Obr. 11	Schéma HGHE typu Slinky a umístění teplotních senzorů v zemním masivu ..	30
Obr. 12	Měřicí ústředna ALMENO 5990 .....	33
Obr. 13	Výkopová sonda na experimentálním pracovišti .....	33
Obr. 14	Měřicí přístroj IZOMET .....	34
Obr. 15	Senzor globálního záření .....	35
Obr. 16	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu L1 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	37
Obr. 17	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu L2 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	38
Obr. 18	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu L5 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	38
Obr. 19	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu L9 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	39
Obr. 20	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu S1 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	39



Obr. 21	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu S2 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	40
Obr. 22	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu S6 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	40
Obr. 23	Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí $t_e$ průměrné denní teploty zemního masivu S9 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace .....	41
Obr. 24	Denní měrné hodnoty globálního záření v topném období 2012/2013 a v období stagnace HGHEs v roce 2013 .....	43
Obr. 25	Denní měrné hodnoty globálního záření v topném období 2013/2014 a v období stagnace HGHEs v roce 2014.....	44
Obr. 26	Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro lineární HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013.....	47
Obr. 27	Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro Slinky HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013.....	48
Obr. 28	Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro lineární HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014.....	49
Obr. 29	Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro Slinky HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014.....	50
Obr. 30	Teploty zemního masivu v oblasti HGHEs a teplota okolního prostředí v topném období 2012/2013 .....	52
Obr. 31	Lineární HGHE – průběh tepelných výkonů $q_L$ , $I_{s,r}$ a energií $q_{d,L}$ , $I_{d,s,r}$ v topném období 2012/2013 .....	52
Obr. 32	HGHE Slinky - průběh tepelných výkonů $q_S$ a energií $q_{dS}$ v topném období....	53

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1</b>	Četnost kontrol těsnosti v závislosti na množství látky v náplni .....	5
<b>Tab. 2</b>	Tepelná vodivost zemin .....	11
<b>Tab. 3</b>	Měrné tepelné výkony a teplo odvedené půdnímu masivu za 24 h .....	23
<b>Tab. 4</b>	Geologický popis zemního masivu .....	31
<b>Tab. 5</b>	Tepelné charakteristiky zemního masivu před topnou sezónou 2012/2013 ....	36
<b>Tab. 6</b>	Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu s lineárním HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013 .....	46
<b>Tab. 7</b>	Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu se Slinky HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013 .....	47
<b>Tab. 8</b>	Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu s lineárním HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014 .....	48
<b>Tab. 9</b>	Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu se Slinky HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014 .....	50
<b>Tab. 10</b>	Průměrné a extrémní hodnoty teplot okolního prostředí, měrných tepelných výkonů a energií v topném období 2012/2013 v oblasti HGHEs .....	53

## Seznam zkratek

GWP	Global warming potential
COP	Coefficient of Performance
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
HGHE	Horizontal ground heat exchangers
HGHEs	Horizontal ground heat exchangers linear and Slinky

# 1. Úvod

V dnešní době je stále důležitější řešit otázku alternativních zdrojů tepelné energie. Zásoby fosilních paliv jsou časově omezené. Tato skutečnost vede ke snaze využít alternativní zdroje pro výrobu tepla. Tepelná čerpadla patří mezi zařízení, která dokáží tyto zdroje efektivně využít. Jedná se o moderní, energeticky hospodárná a ekologická zařízení, která do ovzduší neprodukují žádné emise. Emise vznikají pouze při výrobě elektrické energie, která je potřebná pro jejich chod (výjimkou jsou tepelná čerpadla, která pro pohon kompresorů využívají spalovací motory). Tepelná čerpadla odebírají teplo vzduchu, zemi nebo vodě a dokáží jej transformovat z nižší teplotní hladiny na hladinu vyšší. Toto teplo pak slouží k ohřevu teplé vody nebo vytápění občanských, průmyslových i zemědělských objektů.

Na trhu se objevuje stále více firem, které se zabývají kompletní dodávkou různých typů a konstrukcí tepelných čerpadel. Počáteční investice na jejich instalaci se oproti minulým letům podstatně snížila. Po celé Evropě jsou každý rok nainstalovány miliony těchto zařízení a jejich podíl na trhu se neustále zvyšuje.

Nejvíce využívaným tepelným čerpadlem v České republice je čerpadlo pracující s energetickým systémem vzduch – voda. Důvodem jsou nízké pořizovací náklady a snadná instalace tohoto zařízení. Nevýhodou provozu je nízký topný faktor a hluk ventilátorů kondenzační jednotky v zimním období, kdy jsou teploty vzduchu pod bodem mrazu.

Další možností je využití tepelných výměníků, které odebírají nízkopotenciální teplo ze zemního masivu. Jedná se o horizontální nebo vertikální (hlubinné vrty) tepelné výměníky.

Snaha ministerstva životního prostředí podpořit využití těchto ekologických zdrojů, pro vytápění a ohřev teplé vody v rodinných domech je v České republice momentálně vysoká a existují vládní dotační programy. Od roku 2013 probíhají další vlny Zelená úsporám, kde v případě výměny a likvidace kotle na tuhá paliva za tepelné čerpadlo s energetickým systémem vzduch-voda, země-voda, voda-voda, dostane žadatel státní finanční podporu.

Další využití státní dotace bylo na začátku letošního roku 2016 vyhlášeno pod názvem Kotlíková dotace. Tato dotace je určena pro rodinné domy. Žadatel musí splnit minimálně energetickou třídu domu C a dále jsou nutná tzv. mikronergetická opatření

(zateplení střechy nebo půdních prostor, dílčí výměna oken, výměna vstupních dveří, atd.)  
V případě dodržení těchto podmínek může investor na výměnu starého kotle za nový zdroj tepla (např. tepelné čerpadlo s energetickým systémem vzduch-voda, země-voda, voda-voda) dostat až 85 % z uznatelné částky 150 tis. Kč svých nákladů.

Z důvodu těchto státem podporovaných dotací je očekáván velký nárůst instalací všech typů tepelných čerpadel na území České republiky.

## 2. Přehled o současném stavu problematiky

V této kapitole budou popsány ekologické vlastnosti tepelných čerpadel, tepelné vlivy působící v zemním a horninovém masivu a jednotlivé typy zemních výměníků tepla.

### 2.1 Ekologické vlastnosti tepelných čerpadel

Tepelná čerpadla se svojí činností chovají ke svému okolí ekologicky a šetrně pouze v případě, že pracují s pracovním médiem (chladičem), které je vůči životnímu prostředí ekologické. Při úniku některých chladiv (dnes již zakázaných) dochází k narušování ozónové vrstvy Země.

Pro náplně primárních okruhů tepelných čerpadel je využívána nemrzoucí kapalina s nízkým bodem tuhnutí. Většinou se jedná o směs etylalkoholu a vody. Tato náplň musí být přírodně odbouratelná (ekologická).

#### 2.1.1 Používaná chladiva:

- Chladiva HFCKW – halogenové uhlovodíky obsahující chlór (např. R 22, R 124, R 142 b). R22 je jednosložkové chladivo. Toto chladivo je vhodné pro teplotní rozsah  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Od ledna 2010 je toho chladivo zakázáno používat.
- Směsi látek HFCKW – většinou tříložkové směsi R409A. Jedná se o náhradu za chladivo R12. V současné době se používá jen omezeně např. do starých zařízení.
- Chladiva HFKW – halogenové uhlovodíky neobsahující chlór (R 134A, R 143A, R 125). R134A je jednosložkové chladivo. Chladivo je možné používat v rozsahu teplot  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Směsi látek HFKW – většinou tříložkové směsi (R 404A, R 407C, R 507). R 404A je chladivo, které se v chladicím okruhu chová jako směs tří samostatných látek. Z tohoto důvodu je zřetelný teplotní skluz. Rozsah doporučených vypařovacích teplot je  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Směsi HFCKW/HFKW – většinou tříložkové směsi (R 413A, R 401A). R 413A je určeno pro práci v chladicím okruhu v oblasti vypařovacích teplot  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jeho výhodou je skutečnost, že dokáže pracovat s minerálními oleji.
- Ostatní chladiva neobsahující halogeny – čpavek (R 717), propan (R 290),  $\text{CO}_2$  (R 744). Čpavek je jedním z nejstarších a nejpoužívanějších chladiv především v průmyslovém chlazení. Je velmi levný, běžně vyráběný ve vyhovující jakosti a

má velké výparné teplo, hmotnostní i objemovou chladivost. Je výbušný, hořlavý a prudce jedovatý s pronikavým zápachem. S vodou se mísí neomezeně, s olejem téměř vůbec. Napadá stříbro a zinek a za přítomnosti vlhkosti i měď a její slitiny. (Krainer a kol., 2015)

Kritéria, která by měla chladiva splňovat:

- nehořlavost a nejedovatost
- nepůsobit negativně na životní prostředí,
- co největší výparné teplo chladiva,
- v kapalně fázi malá tepelná kapacita, aby se ochladilo z teploty kondenzace na teplotu vypařování,
- vysoký součinitel tepelné vodivosti, aby docházelo k intenzivnímu sdílení tepla,
- co největší viskozitu, aby hydraulické ztráty byly co nejmenší,
- nesmí negativně ovlivňovat mazací oleje, respektive ve styku s mazacími oleji nemá měnit své vlastnosti,
- nepůsobit korozivně na materiály a mělo by být chemicky stabilní vůči konstrukčnímu materiálu,
- umožnit snadné odloučení vzduchu tzn., že má být těžší než vzduch.

### **2.1.2 Kontrola těsnosti chladiv**

Dle nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 517/2014 je nutné provádět kontroly těsnosti zařízení pracující s chladivem (tzv. fluorované skleníkové plyny). Toto nařízení je v platnosti od 9. 6. 2014. V tomto nařízení je uvedena zkratka (GWP), která určuje „potenciál globálního oteplování“. Tento potenciál určuje přepočtené množství na ekvivalent  $\text{CO}_2$  v tunách. Např. 2,82 kg chladiva R407C odpovídá 5 tunám ekvivalentu  $\text{CO}_2$ . Dle množství látky v náplni je daná četnost kontrol instalovaného zařízení (tepelného čerpadla, chladicí techniky, atd.). V tab.1 je uvedena četnost kontrol dle ekvivalentu  $\text{CO}_2$  v tunách dle toho jestli je zařízení vybaveno detekcí uniku nebo nikoliv. Od 1.1.2015 je zakázán servis zařízení s obsahem R22. Jediným povoleným zásahem do okruhu je odsátí chladiva R22 za účelem jeho zneškodnění.

Úmyslné vypouštění fluorovaných skleníkových plynů do atmosféry je zakázáno. Pokud provozovatel zjistí únik skleníkových plynů je povinen zařízení opravit. Po opravě zařízení musí provést revizi certifikovanou osobou do jednoho měsíce od úniku chladiva.

*Tab. 1 Četnost kontrol těsnosti v závislosti na množství látky v náplni (firemní materiály firmy K a S s.r.o.)*

Množství látky v náplni (tun ekvivalentu CO <sub>2</sub> )		Četnost kontrol těsnosti	
		Bez systému detekce úniku	Se systémem detekce úniku
5 a více	méně než 50	Nejméně 1 x za 12 měsíců	Nejméně 1 x za 24 měsíců
50 a více	Méně než 500	Nejméně 1 x za 6 měsíců	Nejméně 1 x za 12 měsíců
500 a více		Nejméně 1 x za 3 měsíce	Nejméně 1 x za 6 měsíců

Poznámka: Pokud je chladiva méně než 5 tun ekvivalentu CO<sub>2</sub> kontrola těsnosti nemusí být prováděna.

## 2.2 Topný faktor tepelných čerpadel

Základním parametrem tepelných čerpadel je topný faktor (COP – Coefficient of Performance). Toto bezrozměrové číslo vypovídá o „účinnosti“ tepelného čerpadla. Jedná se o teoretický poměr mezi vyrobeným teplem a spotřebovanou elektrickou energií. Čím je vyšší topný faktor, tím lepší je tepelné čerpadlo, protože jeho provoz je levnější. (Karlík 2009)

Toto číslo může nabývat u velmi dobrých tepelných čerpadel za optimálních podmínek až hodnoty 7. Běžně se topný faktor pohybuje v rozmezí od 2,5 do 5. Není ovšem veličinou, která by byla k danému tepelnému čerpadlu jednou provždy přiřazena. Mění se dle podmínek, v nichž tepelné čerpadlo pracuje. (Karlík 2009)



Výpočet topného faktoru:

$$\varepsilon_t = \frac{Q_k}{A} \quad [-] \quad (1)$$

Kde:  $Q_k$  - celkový tepelný výkon získaný na kondenzátoru čerpadla [kW];  
 $A$  - elektrický příkon kompresoru potřebný pro provoz čerpadla [kW].

Tento výpočet tedy udává poměr mezi celkovým ziskem tepla, které ze systému během pracovního cyklu získáme, a prací vloženou do procesu.

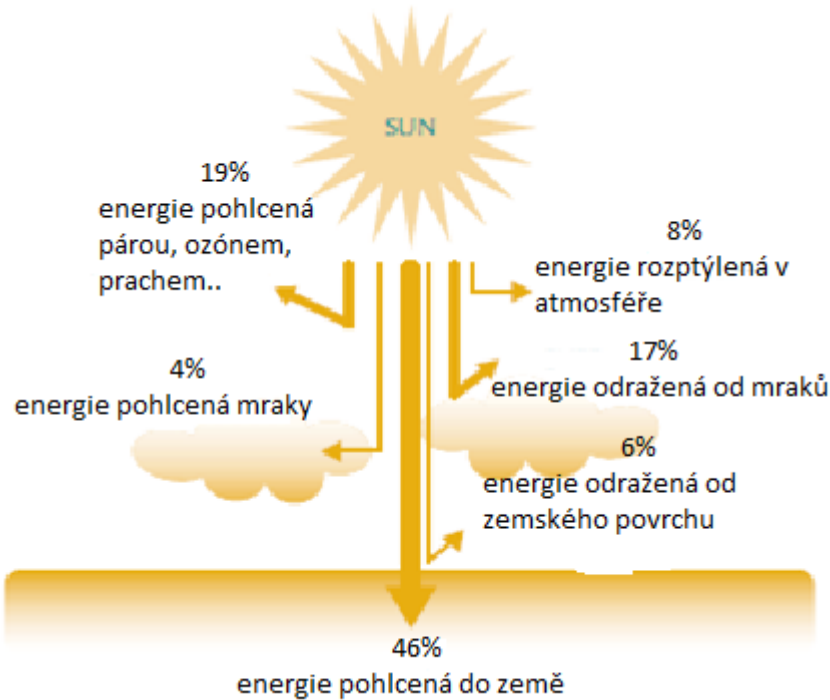
V levotočivém chladícím Carnotově cyklu je efekt, vyjádřený u tepelných čerpadel topným faktorem, tím vyšší čím menší je rozdíl teplot při kterých přivádíme a odvádíme teplo cyklu. Předpokládáme-li konstantní teplotu kondenzace, pak vyššího topného faktoru lze dosáhnout vyšší teplotou vypařování. Výsledky provozních ověřování, ukázaly, že teploty zemního masivu jsou převážnou část topného období vyšší, než teploty okolního prostředí. Naopak v letním období jsou teploty zemního masivu nižší než teploty okolního prostředí. Tyto skutečnosti zvyhodňují zemní masiv jako stabilní nízkoteplotní zdroj tepelných čerpadel v zimním období při vytápění objektů a v letním období při jejich chlazení. (Neuberger a kol., 2014)

### 2.3 Tepelné vlivy působící v zemním a horninovém masivu

V horninách litosféry je akumulováno teplo z vnitřních a vnějších zdrojů. Do vnitřních zdrojů tepla patří teplo uvolněné vlivem tektonických a vulkanických aktivit, radioaktivním rozpadem prvků, při exotermních geochemických reakcích, při stlačení spodních vrstev nadloží (gravitační teplo), při gravitační diferenciaci, při pohlcování energie seismických vln a teplo pasivně vyzařované Zemí. Lze předpokládat, že v oblastech zvýšené sopečné a tektonické aktivity, resp. v horninách se zvýšeným obsahem radioaktivních prvků se procentuální podíl vnitřních zdrojů o jednotky procent zvýší. (Oklahoma State University, 1988). Vnější zdroj je energie slunečního záření (obr.1).

Zemská kůra je významným zdrojem energie prostředí využitelné pomocí tepelných čerpadel, a to hlavně díky teplotní úrovni, mírným výkyvům teplot, všeobecné dostupnosti a neomezené tepelné kapacitě. Zemní masiv tedy představuje velmi kvalitní

zásobník tepla, jeho teplota se po celý rok v hloubce 2 m pod povrchem pohybuje v rozmezí 7 až 13 °C. (Firemní materiály společnosti VESKOM s.r.o)



Obr. 1 Distribuce sluneční energie (Commercial Earth Energy Systems, 2002)

Při dopadu se 46 % slunečního záření přeměňuje přímo na tepelný výkon, 19 % je pohlceno parami, 6 % se odrazí od mraků, 4 % mraky absorbují a 8 % se rozptýlí v atmosféře. (Commercial Earth Energy Systems, 2002)

Nevýhodou těchto zdrojů energie jsou vyšší investiční náklady na získání potřebného tepelného toku ze zemního a horninového masivu dané nenáročnou technickou realizací výměníků tepla pod zemským povrchem. Pro správný návrh a ekonomiku zařízení je nutno znát vlastnosti a složení zemního masivu, roční průběh teplot v jednotlivých hloubkách zemské kůry a průběh procesů určujících přestup tepla v zemním masivu. (Florides a kol., 2007)

Okolní klimatické podmínky ovlivňují teplotní profil pod povrchem zemního masivu a musí být uvažovány při projektování zemních výměníků tepla. Ve skutečnosti je rozdělení teplot zemního masivu ovlivněno strukturou, fyzikálními vlastnostmi, pokrývkou

zemského povrchu (např. obnažený povrch, trávník, sníh, mokřina atd.) a klimatickými interakcemi (tj. mezními podmínkami), které jsou určeny teplotou vzduchu, větrem, slunečním zářením, vlhkostí vzduchu a množstvím srážek. Se vzrůstající hloubkou se teplota zvětšuje přibližně o 30 °C na 1 km. Geotermální odchylky od průměrné hodnoty jsou z části závislé na druhu horniny, která je v dané sekci. (Florides a kol., 2007)

Ve většině oblastí Evropy zůstávají sezónní teploty zemního a horninového masivu poměrně konstantní v hloubce 10 – 15 m. Hodnoty mezi 10 a 15 °C mají převahu do hloubek kolem 50 m. Takové teploty umožňují ekonomické vytápění a chlazení objektů využívajících zemské teplo a reprezentují ideální podmínky pro tepelná čerpadla. Podstatné kolísání teplot během roku by snížilo účinnost jak tepelných čerpadel, tak i absorpčních systémů. V tropech se konstantní teplota zemního masivu v hloubce více než 10 – 15 m pohybuje mezi 20 a 25 °C (lokálně i 28 °C), což stále umožňuje chlazení budov. (Brandl, 2006)

Z pohledu rozdělení teplot se dají rozlišit tři půdní oblasti. Povrchová oblast dosahující hloubky přibližně 1 m, ve které je teplota zemního masivu velmi citlivá na krátkodobé změny vnějších podmínek. Mělká oblast sahající od 1 do 8 m u suchých a lehkých vrstev, nebo až 20 m u vlhkých vrstev zemního masivu, kdy je teplota téměř konstantní a blíží se roční teplotě vzduchu. V této oblasti závisí rozdělení zemního masivu hlavně na sezónním cyklu okolních podmínek. Hluboká oblast (od 8 až 20 m) je oblast, kde je teplota prakticky konstantní a vzhledem ke geotermálnímu gradientu se zvyšuje s rostoucí hloubkou velmi pozvolna. (Florides a kol., 2007)

Mezi základní tepelné vlastnosti hornin patří součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ], dále pak měrná tepelná kapacita  $c$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] a součinitel teplotní vodivosti  $a$  [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ]. Tyto veličiny se označují jako tepelné charakteristiky zemního masivu. (Adamovský a kol., 2009)

### **2.3.1 Vliv slunečního záření**

Sluneční záření je zemním masivem zčásti absorbováno a zčásti odraženo. Největší absorpce je u tmavého drsného povrchu a u terénu s jižní expozicí svahů. Míra zahřátí povrchu zemního masivu dále závisí na tepelné kapacitě, ztrátách energie při výparu vody a na přenosu energie do hlubších vrstev zemního masivu. (Kutílek, 1978)

Hlavním zdrojem obnovitelné nízkopotenciální energie v zemním masivu je sluneční záření. Podíl slunečního záření na akumulaci tepla v zemním masivu činí 97-98%. (Oklahoma State University, 1988)

V našich podmínkách dodává sluneční záření přibližně 100 až 800  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Při teplotě 20 °C na povrchu zemního masivu a 10 °C v hloubce 2 m se do hloubky 1m pod povrch dostává jen 0,08  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  do hloubky 2 m jen 0,04  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  a do hloubky 4 m pouze 0,01  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . (Mach, 2005)

### **2.3.2 Tepelný tok**

Tento termín vyjadřuje množství tepla, které prochází jednotkou plochy za jednotku času. Tepelný tok se vyjadřuje v jednotkách  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Z hodnoty zemského tepelného toku lze částečně odvodit rychlost růstu teploty s hloubkou, neříká však nic o původu tepla. Z hlediska využití geotermální energie jsou potenciální možnosti hlavně tam, kde je vysoká hodnota tepelného toku, což též znamená v místech, kde jsou v malých hloubkách pod povrchem zvýšené teploty. Na zemském povrchu je rozmezí hodnot zemského tepelného toku, až na výjimky, mezi 30 a 120  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Střední hodnota, vypočítaná z několika desítek tisíc měření, je 70  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . V oblastech činných sopek nebo horkých pramenů může být toto číslo mnohem vyšší, až několik tisíc. Na stabilních částech zemské kůry, hlavně na štítech a platformách, obecně platí, že je hodnota tepelného toku nižší. (Brandl, 2006)

### **2.3.3 Tepelná vodivost**

Nejvýznamnějším tepelným parametrem zemního masivu je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Tento součinitel je silně závislý na obsahu vody a hustotě zemního masivu tedy i na minerálních komponentech a na chemických vlastnostech zemní vody. Při mrznutí vody v zemním masivu se jeho tepelná vodivost výrazně zvyšuje. (Congedo a kol., 2012; Brandl, 2006) V tab. 2 jsou uvedeny hodnoty tepelné vodivosti zemin.

(Song a kol., 2006) se věnují analýze nejdůležitějších parametrů ovlivňujících hodnotu součinitele tepelné vodivosti zemního masivu.

Komplexní výzkum ukázal, že tepelná vodivost zemního masivu souvisí velkou měrou s vlhkostí, hustotou a teplotou zemního masivu:

- Z experimentů vyplynulo, že součinitel tepelné vodivosti zemního masivu s teplotou 10 – 40 °C dosahuje při běžné vlhkosti průměrné hodnoty  $2,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , v suchém stavu  $0,55 \sim 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  u půdy vlhké. S nárůstem vlhkosti půdy se součinitel tepelné vodivosti zvyšuje, ale tento trend zvyšování se postupně snižuje. Když vlhkost stoupne nad určitou konkrétní hodnotu, tepelná vodivost je téměř konstantní.
- Při vyšší hustotě půdy je vyšší součinitel tepelné vodivosti půdy, jak vyplývá z níže uvedené rovnice (1). (Song a kol., 2006)

$$\lambda_s = 0,144166 \cdot [0,9 \cdot \log(n \cdot 100) - 0,2] \cdot 10^{0,000024 \cdot \rho_s} \quad (2)$$

V rovnici  $n$  značí vlhkost půdy ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) a  $\rho_s$  je hustota půdy,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

- Zvýšení teploty zemního masivu má za následek zvýšení součinitele tepelné vodivosti. Při zvýšení teploty zemního masivu o 20 K se součinitel tepelné vodivosti zvýší o 0,1 - 0,2  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Zmrzlý zemní masiv má však vlastnosti zcela jiné. Experimentální měření například ukázala, že součinitel tepelné vodivosti jílu je při kladné teplotě  $1,616 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a ve zmrzlém stavu  $2,454 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Součinitel tepelné vodivosti zemního masivu ve zmrzlém stavu je tedy vyšší. Důvodem je rozdíl hodnot součinitelů tepelné vodivosti vody v kapalném stavu ( $0,58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a ledu ( $2,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). (Song a kol., 2006)

Tab. 2 Tepelná vodivost zemin (Drbal, 1969)

Zemina	Součinitel tepelné vodivosti (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
žula	2,90
suchá půda	0,30
suchý písek - hrubozrnný	0,20
- jemnozrnný	0,19
suchá hlinito-písčítá	0,19
suchá hlína	0,14
vlhká půda	1,90
vodou nasycený písek - hrubozrnný	1,72
- jemnozrnný	1,63
vodou nasycená hlinito-písčítá	1,34
vodou nasycená hlína	0,88
vodou nasycená rašelina	0,46

### 2.3.4 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita  $C$  [J·K<sup>-1</sup>] vyjadřuje množství tepla, kterým se ohřeje těleso o 1 K. Měrná tepelná kapacita  $c$  [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>] je množství tepla, které je potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 K. Definuje množství energie uložené v materiálu na jednotku hmoty. Při výpočtech se uvažují měrné objemy minerálních, organických složek a vody. To ukazuje následující vztah (Brandl, 2006):

$$c = 2 \cdot x_{s,min} + 2,5 \cdot x_{s,org} + 4,2 \cdot x_w \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3)$$

Kde:

$x_{s,min}$  – poměrná hodnota objemu minerálních komponent [-],

$x_{s,org}$  – poměrná hodnota objemu organických komponent půdních složek [-],

$x_w$  – poměrná hodnota objemu vody [-].

Jelikož mají minerální a organické komponenty téměř stejnou tepelnou kapacitu, zůstává obsah vody hlavní proměnou, alespoň v krátkodobém hledisku. Při dlouhodobějším spojení či při procesu smršťování zemního masivu (působení vnějších tlaků nebo vlastní síly) mohou minerální a organické komponenty hrát roli, protože se změni jejich měrné objemy. Celková měrná tepelná kapacita se zvýší spolu s obsahem vody a sníží se v případě mrznutí. (Brandl, 2006)

Měrná tepelná kapacita vody je  $c_w = 4186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  v případě mrznutí ledu je  $c_l = 1884 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Objemová kapacita  $C_v$  je odvozena z měrné tepelné kapacity a objemové hustoty zemního masivu podle následujícího vztahu (Brandl, 2006):

$$C_v = \rho_s \cdot \left( c_s + c_w \cdot \frac{w}{100} \right) \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4)$$

Kde:

$\rho_s$  - hustota minerálních složek  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ ,

$c_s$  - měrná tepelná kapacita minerálních složek  $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ,

$c_w$  - měrná tepelná kapacita vody  $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ,

$w$  - obsah vody vztažený k suché hmotnosti [%].

### 2.3.5 Teplotní vodivost

Teplotní vodivost popisuje schopnost látky vést teplo. Uvádí, jak snadno se v ní dokáže vyrovnat teplotní rozdíly. Součinitel teplotní vodivosti  $a$   $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$  je veličinou odvozenou, která bezprostředně závisí na změně součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  a objemové měrné tepelné kapacity  $C_v$ . (Brandl, 2006)

$$a = \frac{\lambda}{C_v} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

Kde:

$\lambda$  - tepelná vodivost  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;

$C_v$  - měrná objemová tepelná kapacita  $[\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;

$c$  - měrná tepelná kapacita  $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;

$\rho$  - měrná hmotnost  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ .

## 2.4 Typy zemních výměníků tepla

Tepelná čerpadla využívající horizontální zemní nebo vertikální horninové tepelné výměníky ve funkci nízkoteplotních zdrojů energie jsou, považovány za nejrychleji se rozvíjející aplikace obnovitelných zdrojů energie na světě. (Adamovský a kol., 2015)

### 2.4.1 Vertikální horninové výměníky

Výkonnostním a ekonomickým porovnáním tepelných čerpadel využívajících různé energetické systémy ve funkci nízkopotenciálních zdrojů energie pro tepelná čerpadla se věnovali (Petit a kol., 1998). Uvádějí, že vertikálními horninovými výměníky se dosáhne nejvyšší tepelný výkon při odběru tepla z vrtu. Horizontálními zemními výměníky se dosáhne příznivější topný faktor a nejlepších ekonomických ukazatelů ze všech 3 zdrojů energie. Vzduch jako zdroj energie pro tepelná čerpadla byl hodnocen nejhůře.

Existují dva základní typy výměníků tepla, uzavřený a otevřený. V otevřeném systému může být hornina použita přímo k chlazení či ohřívání média, které je samotné použito k chlazení či ohřívání prostorů. Hornina může být použita také nepřímo s pomocí teplonosné tekutiny, která cirkuluje v uzavřeném systému. Smyčka výměníku tepla je vyrobena z materiálu, který je neobyčejně odolný, ale dovoluje teplu přestupovat efektivně. Uložení vertikálních tepelných výměníků je znázorněno na obr. 2. Tento materiál má obvykle záruku na 50 let. Tekutina ve smyčce je voda nebo nemrznoucí roztok, který je šetrný k životnímu prostředí. Délka smyčky závisí na mnoha faktorech jako např. na typu použité konfigurace smyčky, zátěži vytápění a klimatizování domu, vlastnosti půdy, místní klima a další. (Florides a kol., 2007)

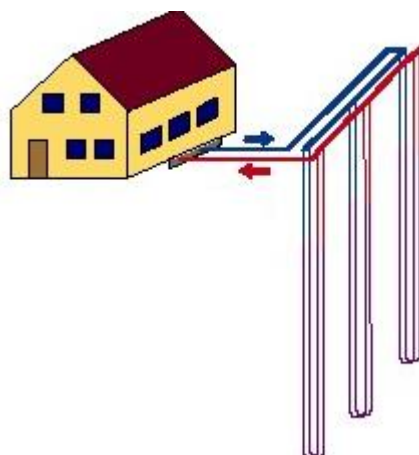
Uzavřený systém je realizován pomocí vertikálního tepelného výměníku neboli hlubinného vrtu. Tyto zemní výměníky využívají tzv. vnitřního výkonu Země. Do vrtu je nainstalováno polyetylenové potrubí ve tvaru „U“, ve kterém proudí teplonosná látka. (Petráš, 2008)

Prostor v okolí trubek je zaplněn materiálem (bentonit, písek), který zajišťuje dobrý kontakt a snížení tepelného odporu mezi trubkou a horninovým masivem. Vertikální horninové výměníky jsou často používány v případě, kde je zapotřebí dosáhnout dostatečné výměny tepla omezené plochou a složením zemního masivu (např. kamenitá půda). Obvykle se hloubka hlubinných vrtů pohybuje od 50 do 150 m. (Florides a kol., 2007)



Někdy mohou vrty dosahovat až 300 m hloubky, takto hluboké vrty vyžadují náročnější technologii vrtání. (Ryška, 2006). Průměr vrtu se pohybuje v rozmezí 0,075 m – 0,15 m. (Ozgener a kol., 2007)

Výhodou těchto výměníků je fakt, že teplota horninového masivu je od určité hloubky (15 – 20 m), konstantní. (Omer, 2008)



Obr. 2 Vertikální tepelný výměník (Omer, 2008)

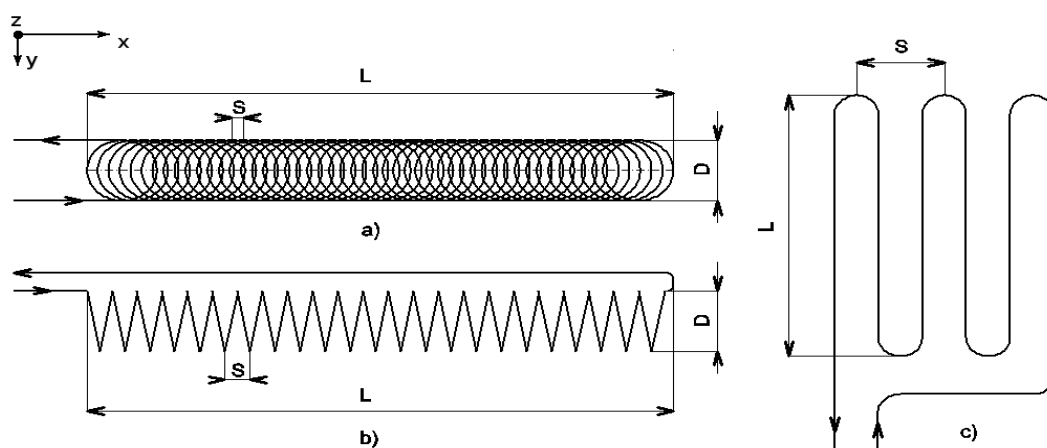
V otevřených systémech je využíván venkovní vzduch, který prochází potrubím uloženým v zemním masivu, aby došlo k jeho předchlazení nebo předehřátí. Pak je tento vzduch upraven na vyšší teplotu nebo zchlazen klimatizační jednotkou a vháněn do budovy. (Florides a kol., 2007)

Podobným způsobem může být použita studniční voda jako chladicí médium tak, že se dá do přímého styku s výparníkem tepelného čerpadla. Ochlazená voda se nesmí vracet zpět do studny ani kanalizace, uvádí (Trnobranský, 2005). Ochlazená voda se vrací do vsakovací studny, která musí být dostatečně vzdálena od studny odběrové.

#### 2.4.2 Horizontální zemní výměníky

Výměníky tepla využívající horizontální zemní výměníky „horizontal ground heat exchangers“ (HGHE) se realizují se ve třech základních konfiguracích (Brandl, 2006). Jako lineární, šroubovitě a typu Slinky. Trubky těchto výměníků o průměrech 30-50 mm bývají, v závislosti na tepelných charakteristikách zemního masivu uloženy v hloubce 1,0-2,0 m. Průměry smyček výměníku typu Slinky se pohybují v rozmezí 0,5-2,0 m a rozteč bývá 0,1-0,5 m. U lineárních výměníků je rozteč trubek 1,0-1,5 m. Lineární výměníky

(obr. 3c) čerpají teplo ze zemního masivu rovnoměrně. Vyžadují větší plochy pozemků, přesto jsou v ČR nejrozšířenější. Šroubovitě (obr. 3b) a spirálové výměníky typu Slinky (obr. 3a) se používají v lokalitách s omezenou plochou pozemku. Výjimečně, v případě skrývky, se používají výměníky ve tvaru meandru. Potřebná plocha pozemku je stejná jako u lineárního výměníku. Při této konfiguraci výměníku se vedle sebe střídají trubky vstupující a vystupující z výparníku. (Omer, 2008) Smyčka výměníku tepla je vyrobena z materiálu, který je neobyčejně odolný, ale dovoluje teplu přestupovat efektivně. (Florides a kol., 2007)



Obr. 3 Konfigurace horizontálních zemních tepelných výměníků (Congedo a kol., 2012):

- a) typ Slinky,
- b) šroubovitý,
- c) lineární.

Veličinou limitující efekt zemního výměníku může být součinitel přestupu tepla  $\alpha_s$  mezi vnitřní stěnou potrubí výměníku a proudící teplonosnou kapalinou (Congedo a kol., 2012). Vzhledem k tomu, že teplonosnou kapalinu tvoří většinou směs vody a glycerinu, polypropylen glykolu, etylenglykolu nebo etylalkoholu, která má vysokou kinematickou viskozitu, je dosaženo převážně laminárního proudění a tedy nízké hodnoty součinitele přestupu tepla. Při laminárním proudění součinitel přestupu tepla  $\alpha_s$  dosahuje hodnot 40 –

$60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  (Šedová a kol., 2013). Vliv turbulentního proudění však nelze přeceňovat. Dosažení turbulentního proudění pro nemrznoucí teplotné kapaliny vyvolává výrazné zvýšení výkonu oběhových čerpadel a tedy snížení energetického efektu celého systému (Brandl, 2006).

Na Universitě v Buffalo byl sledován vliv různých pokrytí povrchu zemního masivu s horizontálním výměníkem na rozdělení teplot a tepelné toky odvedené zemnímu masivu. Byl prokázán pozitivní vliv pokrytí. Např. při pokrytí povrchu masivu izolační vrstvou z recyklovaných pneumatik se zvýšil v zimním období tepelný tok odvedený ze zemního masivu o 17 %. (Rezaei a kol., 2012)

Výzkumné studie horizontálních tepelných výměníků typu Slinky a šroubovitých výměníků jsou poměrně omezené z důvodu menších počtů instalací oproti „klasickým“ lineárním výměníkům tepla. Důvodem jsou vyšší náklady spojené s hloubkou uložení těchto výměníků a většího množství spotřebovaného polyethylenového potrubí. (Congedo a kol., 2012)

Pro zajištění dlouhodobé udržitelnosti tepelného zdroje se v Německu (VDI, 2010) doporučuje, aby celkové množství tepla extrahovaného ze zemního masivu nepřesáhlo  $50\text{--}70 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$  za rok ( $180\text{--}205 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ ). U tepelného čerpadla pracujícího se sezónním topným faktorem 3,5 to odpovídá  $70\text{--}98 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Tyto údaje je třeba vnímat v kontextu typických mírných evropských klimatických podmínek.

#### **2.4.2.1 Horizontální tepelný výměník typu Slinky**

Jedná se o druh zemních výměníků tepla, který se ukládá do větší hloubky než lineární horizontální výměníky tepla. Výměník bývá uložen v hloubce 1,5 m pod úroveň terénu (obr.5). Šířka výkopu výměníku se pohybuje okolo 1 m. Výkopy jsou provedeny v délce až 35 m. (Fujii a kol., 2012)

Slinky, umožňují na poměrně malé ploše instalovat velkou teplosměnnou plochu zemního výměníku. Důležitým cílem systému horizontálních zemních výměníků je zajistit, abychom v průběhu letního období získali dostatečné množství energie ze slunečního záření a okolního prostředí, které využijeme v zimním období. Tepelná energie, kterou získáme je limitována plochou zemního masivu s výměníkem. Tato plocha závisí na klimatu, druhu terénu, odvodnění a dalších faktorech lokality.

Z praktického hlediska byly postupy instalace výměníků Slinky dobře zdokumentovány (Jonesem, 1995).

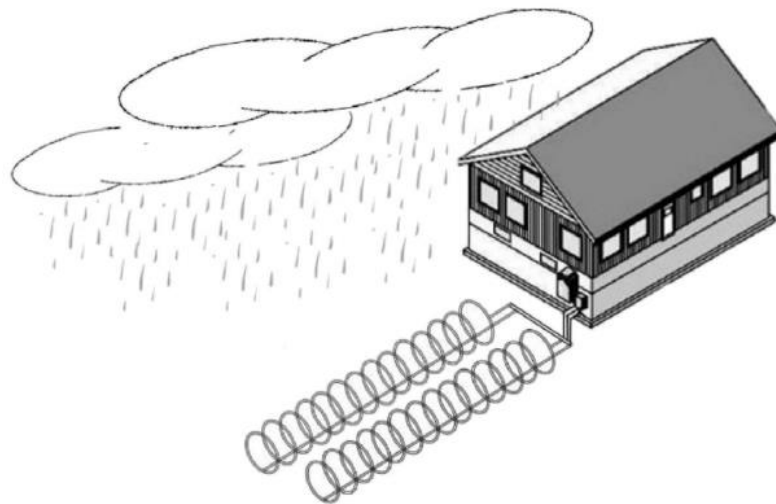


Obr. 4 Uložení tepelného výměníku typu Slinky (Fujii a kol., 2010)

#### 2.4.2.2 Šroubovitý horizontální tepelný výměník

Šroubovitý výměník připomíná válcovou pružinu (obr.5), jejíž hlavní osa leží horizontálně. Potrubí vytváří šroubovici. Jednotlivé smyčky šroubovice leží v rovině  $y - z$ . Délka výměníku  $L$  je dána rozměrem v ose  $x$ .

Schéma výměníku je znázorněno na obr. 3b. Při použití těchto typů výměníků cirkuluje teplotně medium ve výměníku tepla a přenáší teplo ze zemního masivu na výparník tepelného čerpadla a naopak. (Florides a kol., 2007)



Obr. 5 Schéma šroubovitého výměníku (Go a kol., 2015)

#### **2.4.2.3 Lineární horizontální tepelný výměník**

Horizontální zemní tepelné výměníky tzv. lineární tepelné výměníky (obr.6) jsou využívány v mnoha zemích jako zdroj tepla pro systémy tepelných čerpadel. (Fujii a kol.,2010) Tyto systémy jsou aplikovány za účelem získání energie z malé hloubky zemního masivu s vysokou mírou energetické účinnosti. (Skhan a kol., 2013) Pokud je dostatek pozemního prostoru dostupného pro instalaci horizontálních zemních tepelných výměníků, umožňují efektivní alternativu z hlediska nákladů. Ty jsou podstatně nižší než u vertikálních zemních tepelných výměníků. (Fujii a kol., 2010)



Obr. 6 Uložení lineárního tepelného výměníku (archiv autora)

V systémech zemního zdroje pro tepelné čerpadlo využívající lineární horizontální tepelné výměníky je polyetylenové potrubí uloženo v 1 až 2 m hlubokých zákopech. (Kavanaugh a kol., 1995). Při dimenzování horizontálních tepelných výměníků je důležitá plošná výměra zemního výměníku více než systém položení a vzdálenosti jednotlivých smyček. (Trs, 2007). Plocha pozemku potřebná pro vytápění daného objektu je přibližně 2,5 násobkem plochy vytápěné. Přesněji ji lze vypočítat dle uvedeného vztahu (6). (Petráš, 2008)

$$A_{zk} = \frac{\theta_0 \cdot k_b}{q_z} \quad [\text{m}^2] \quad (6)$$

Kde:

$\theta_0$  – potřebný tepelný výkon [W];

$k_b$  – součinitel charakterizující bivalentní provoz [-];

$$k_b = 0,3 \text{ až } 0,5$$

$q_z$  – tepelný tok ze země [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q_z = 6 \text{ až } 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  u masivní, kamenité půdy;

$q_z = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  u suché písčité půdy;

$q_z = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  u vlhké písčité půdy;

$q_z = 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  u suché hlinité půdy;

$q_z = 35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  u vlhké hlinité půdy;

$q_z = 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  u půdy s přítomností spodní vody.

Z tohoto vztahu můžeme usuzovat, že vlhké půdy s větším obsahem jílových částic jsou pro horizontální tepelný výměník vhodnější než půdy suché. (Petráš, 2008)

Doporučená ideální délka jednotlivých okruhů je vzhledem ke snížení tlakových ztrát 100 až 200 m. Smyčky potrubí se sdružují ve venkovní jímce, kde jsou umístěné rozdělovače, sběrače média s možností uzavření jednotlivých smyček, odvodušnění, případně regulace průtoku. Jednotlivá vedení zemního výměníku nebo páteřní vedení od sběrné jímky smí křížovat ostatní vedení, jako je kanalizace, dešťové svody, pouze v případě izolování obou těchto vedení. Teplota v kolektoru může ke konci topné sezóny klesnout pod bod mrazu a chladem tak ovlivnit funkčnost těchto přípojek. Izolace nesmí být nasákavá vodou (doporučuje se kaučuk) a musí ji chránit odolná chránička PVC, která zabrání její destrukci. (Trs, 2007)

Vedení polyetylénového potrubí se nedoporučuje pokládat pod objekt nebo je vést podél základů. Médium v kolektoru může v extrémním případě dosahovat až  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  a v případě namrznutí ledu na potrubí může dojít k porušení stavebních konstrukcí. (projekční podklady IVT verze 6.1)

Bezpečná vzdálenost vedení kolektorů od základů budov je 1,5 m. Izolované musí být také prostupy do objektu, aby byla zajištěna těsnost proti vnikání vody. (Trs, 2007)

## 2.5 Hodnocení a praktické zkoušky horizontálních tepelných výměníků

Pro prostředí do něhož jsou zemní výměníky ukládány je charakteristické, že s hloubkou zemního masivu klesají amplitudy změn teplot zemního masivu. Příčinou je vliv nízké tepelné vodivosti zemního masivu a jeho vysoké měrné tepelné kapacity ve srovnání s teplotou vzduchu nad povrchem země. Tyto vlastnosti podporují využití zemního masivu pro vytápění v zimním období, kdy má zemní masiv vyšší teplotu než okolní vzduch, a k chlazení v letním období, kdy má zemní masiv nižší teplotu než okolní vzduch.

Na Univerzitě ve Firatu v Turecku bylo uskutečněno technicko-ekonomické vyhodnocení energetických systémů s tepelnými čerpadly využívanými pro chlazení laboratoří v období června až září. Analyzovány byly energetické systémy s tepelným čerpadlem typu vzduch - zemní masiv a vzduch - vzduch. Horizontální zemní výměníky byly uloženy v hloubkách 1 m a 2 m. U tepelného čerpadla vzduch-zemní masiv se chladicí faktor pohyboval v rozmezí 3,85 – 4,26 a u vzduch-vzduch 3,17. Technicko-ekonomické vyhodnocení prokázalo vyšší provozní i ekonomický efekt u tepelných čerpadel pracujících s energetickým systémem vzduch - zemní masiv, využívaných pro chlazení budov. (Esen a kol.,2007)

Z hlediska energetického potenciálu zdroje a jeho životnosti je důležité porovnání počátečních a konečných teplot zemního masivu v oblasti výměníku v několika topných obdobích. V průběhu letního období by se měl v zemním masivu obnovit energetický potenciál potřebný pro zimní období. Pracovníky Hokkaido University (Tarnawski a kol., 2009) byl ověřován horizontální zemní výměník pro vytápění (5,5 kW) a chlazení (3,3 kW). Při ověřování byla prokázána nízká tepelná degradace zemního masivu v průběhu topného období. Výsledek ověřování sloužil jako podklad pro plošnou realizaci v rezidenční a komerční zóně v severním Japonsku.

V literatuře můžeme najít několik výpočtových modelů pro zemní výměníky tepla. Hlavní vstupní data jsou tepelné vlastnosti zemního masivu, tepelné vlastnosti potrubí a nenarušená teplota zemního masivu během provozu systému. Během prvních fází studií systémů tepelných výměníků tepla byly navrženy jednodimenzionální modely, které byly nahrazeny dvojdimenzionálními během devadesátých let minulého století a



trojdimenzionálními v posledních letech. Současné modely jsou dále zlepšovány a vyhovují jakémukoliv typu a tvaru sítě a mohou poskytnout podrobnější pohled na teplotní kolísání kolem potrubí a v zemním masivu. Byly zřízeny monitorovací systémy pro testování různých konstrukcí se zaznamenanými výsledky. (Florides., 2007)

Typickými klasickými modely zemních tepelných výměníků jsou modely zdroje liniového drátu (Carslaw, Jaeger, 1947; Eskilson, 1987) a model válcovitého (cylindrického) zdroje. (Ingersoll a kol., 1954; Lamarche, Beauchamp, 2007) Model liniového drátu byl později vylepšen a bere v úvahu účinky geotermického stupně (gradientu) a změny teploty na zemském povrchu. (Bandos a kol., 2009). Hojně užívaným modelem je model nekonečného liniového zdroje, který aplikuje Kelvinovu teorii tepelného zdroje na zemní tepelné výměníky. (Carslaw, 1947) Dále byl vyvinut model nekonečného válcovitého (cylindrického) zdroje, který dosáhl zlepšené rychlosti výpočtu číselným invertováním Laplaceovy transformace. (Baudoin, 1988)

Několik výzkumných studií bylo vypracováno za účelem prognózy výkonu tradičních lineárních horizontálních tepelných výměníků. (Piechowski, 1998) Byly provedeny zkoušky tepelné reakce („thermal response tests“, TRT) s použitím horizontálních tepelných výměníků při hloubkách 1,6 m a 2,0 m s délkou 12 m. Vyvinul se model číselné simulace užívající 2D metodu konečného rozdílu a ověřila se platnost modelu s výsledky zkoušek tepelné reakce. (Piechowski, 1999)

Výsledky provozních ověřování a analýza vědeckých a odborných publikací ukazují (Banks, 2012), že pro zajištění spolehlivosti zemního výměníku ve funkci nízkoteplotního zdroje energie a spolehlivosti celého energetického systému je nutné zohlednit následující faktory:

- Plocha zemního masivu s výměníkem musí být dostatečně velká, aby došlo v letním období k regeneraci energie odvedené v zimním období akumulací solárního a atmosférického tepla. Pro regeneraci může být rovněž důležitá tepelná energie dodávaná 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 (abychom měli dostatečný objem zemního masivu jako

zdroje tepla), tak i z hlediska akumulace tepla do zemního masivu během teplejších měsíců v roce.

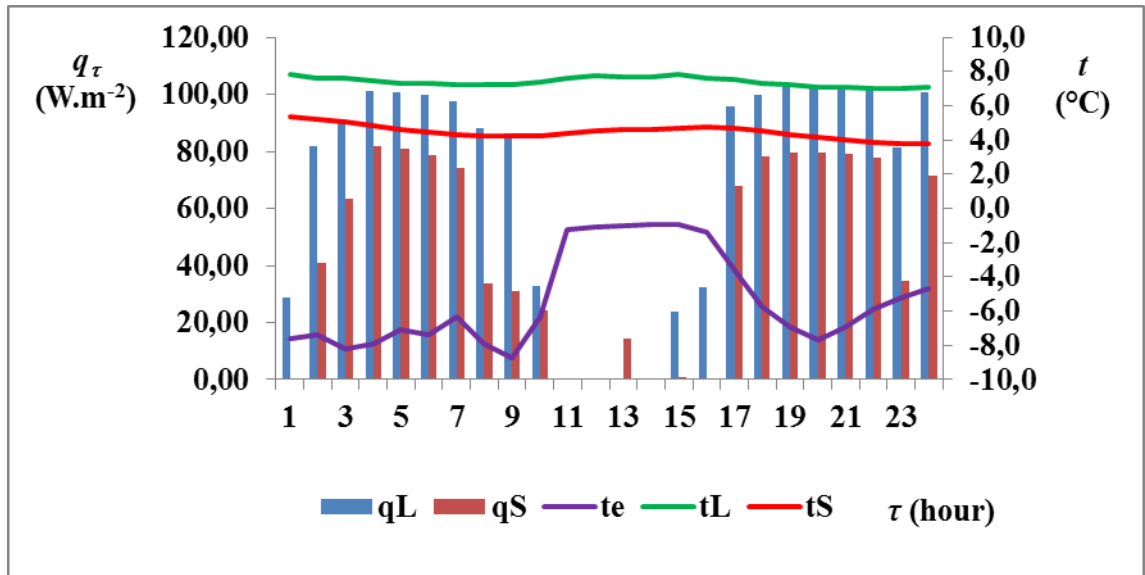
- Půda by měla být dostatečně tepelně vodivá, aby efektivně přenášela teplo do teplosměnné plochy výměníku.
- Kontakt mezi zemním masivem a potrubím výměníku musí být efektivní z hlediska sdílení tepla.
- Potrubí výměníku by mělo být vyrobeno z materiálu, který je odolný, pevný a dostatečně tepelně vodivý.
- Teplonosná kapalina by měla účinně sdílet teplo ze stěny potrubí, neměla by být příliš viskózní, v ideálním případě by měla být nehořlavá a biologicky odbouratelná, měla by mít nízkou toxicitu a teplotu tuhnutí pod minimální provozní teplotou systému.
- 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 teplonosné kapaliny 2-5 K.

Příklad tepelných výkonů  $q_L$ ,  $q_S$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) odváděných zemnímu masivu horizontálními výměníky, teploty  $t_L$ ,  $t_S$  zemního masivu v oblasti výměníků a teploty okolního vzduchu  $t_e$  v zimním dnu s nejnižší průměrnou denní teplotou  $-5,33$  °C v topném období 2012/2013 jsou uvedeny v grafu na obr. 7. V průběhu dne (8. 12. 2012, 83. den topné sezóny) byla minimální teplota okolního vzduchu  $-8,70$  °C, maximální  $-0,90$  °C. Teplota půdního masivu v oblasti výměníku reaguje na denní změny měrného tepelného výkonu u lineárního výměníku v rozmezí  $t_L = 7,41 \pm 0,26$  °C a u výměníku typu Slinky  $t_S = 4,48 \pm 0,4$  °C. (Adamovský a kol., 2015)

Tab. 3 Měrné tepelné výkony a teplo odvedené půdnímu masivu za 24 h  
(Adamovský a kol., 2015)

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

Hodnoty měrných tepelných výkonů a tepla odvedeného za 24 h (8. 12. 2012) půdnímu masivu, přepočtené na 1 m<sup>2</sup> teplosměnné plochy výměníku, jsou uvedeny v tab. 3. (Adamovský a kol., 2015)



Obr. 7 Teploty zemního masivu a měrné tepelné výkony horizontálních výměníků v typickém zimním dnu (Adamovský a kol., 2015)

$q_L$  – měrný tepelný výkon lineárního výměníku ( $W \cdot m^2$ );  $q_S$  – měrný tepelný výkon výměníku typu Slinky ( $W \cdot m^2$ );  $t_L$ ,  $t_S$  – teploty zemního masivu v oblasti tepelných výměníků ( $^{\circ}C$ );  $t_e$  – teplota okolního vzduchu ( $^{\circ}C$ )

### 3. Cíle a hypotézy disertační práce

#### Sledováním ověřovat hypotézy:

- **Hypotéza a):** Teploty zemního masivu v topném období budou u obou typů výměníků převážně kladné. Teploty masivu v oblasti výměníků budou záporné jen výjimečně;
- **Hypotéza b):** Teploty zemního masivu v topném období v oblasti lineárního tepelného výměníku budou vyšší než u výměníku typu Slinky;
- **Hypotéza c):** Rozdíly teplot zemního masivu na počátcích topných období nebudou, u obou typů výměníků, významné;
- **Hypotéza d):** Energie odvedené zemnímu masivu budou splňovat doporučení VDI (2001).

#### Disertační práce si klade za cíl:

- Analyzovat změny teplot a jejich rozdělení v zemním masivu v oblasti experimentálního lineárního tepelného výměníku a výměníku typu Slinky a na referenčním pozemku;
- Vyhodnotit energetický potenciál zemního masivu v blízkosti tepelných výměníků;
- Zaznamenat a vyhodnotit intenzitu dopadajícího slunečního záření v oblasti experimentálních HGHEs;
- Posoudit vliv dopadajícího slunečního záření na energetický potenciál zemního masivu zkušebního polygonu;
- Zhodnotit regeneraci teplot zemního masivu v průběhu stagnace tepelných výměníků;
- Posoudit vliv konfigurace tepelných výměníků na měrné tepelné toky a měrné energie odvedené zemnímu masivu.

## 4. Metodika

### 4.1 Teorie sdílení tepla v zemním masivu

V zemním masivu a na jeho rozhraní s atmosférou probíhají složité procesy sdílení tepla, které zahrnují kondukcii, konvekci a radiaci. Dalšími tepelnými procesy sdílení tepla jsou změny skupenství, tj. vypařování, kondenzace, tání, tuhnutí.

Rovnici pro celkový měrný tepelný tok v zemním masivu lze zapsat ve tvaru:

$$q_{\tau, t} = q_{\tau, \lambda} + q_{\tau, a, w} + q_{\tau, a, v} + q_{\tau, r} + q_{\tau, lat} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (7)$$

Kde:

$q_{\tau, t}$  - celkový měrný tepelný tok v zemním masivu [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q_{\tau, \lambda}$  - měrný tepelný tok sdělený kondukcí [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q_{\tau, a, w}$  - měrný tepelný tok sdělený konvekcí mezi vodou a zeminou [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q_{\tau, a, v}$  - měrný tepelný tok sdělený konvekcí mezi parou a zeminou [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q_{\tau, r}$  - měrný tepelný tok sdělený radiací [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q_{\tau, lat}$  - měrný tepelný tok sdělený při změně skupenství vody [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Měrný tepelný tok  $q_{\tau, \lambda}$  sdělený kondukcí v homogenním izotropním materiálu je ve smyslu Fouriérova zákona vyjádřen vztahem:

$$q_{\tau, \lambda} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (8)$$

Kde:

$\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$T$  – termodynamická teplota [K];

$\frac{\partial T}{\partial x}$  - teplotní gradient ve směru tepelného toku  $x$ .

Rozdíl tepelných toků, které přivedeme a odvedeme kontrolnímu objemu materiálu za časový úsek je roven akumulovanému tepelnému toku:

$$-\frac{\partial q_{\tau, \lambda}}{\partial x} = \rho \frac{c_p \partial T}{\partial \tau} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (9)$$

Kde:

$\rho$  – měrná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ];

$c_p$  – měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ];

$\tau$  – čas [s].

Dosazením rovnice (8) do rovnice (9) dostaneme:

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \rho \cdot \frac{c_p \cdot \partial T}{\partial \tau} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (10)$$

Předpokládáme-li konstantní  $\lambda$  a  $\rho \cdot c_p$ , můžeme rovnici (10) upravit do tvaru:

$$\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (11)$$

Rovnici pro tepelný tok sdělený kondukcí ve třírozměrném prostoru (x, y, z) můžeme pak zapsat ve tvaru:

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (12)$$

Zavedeme-li součinitel teplotní vodivosti:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Pak:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = a \operatorname{div} \operatorname{grad} T = a \Delta T \quad [\text{K}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (13)$$

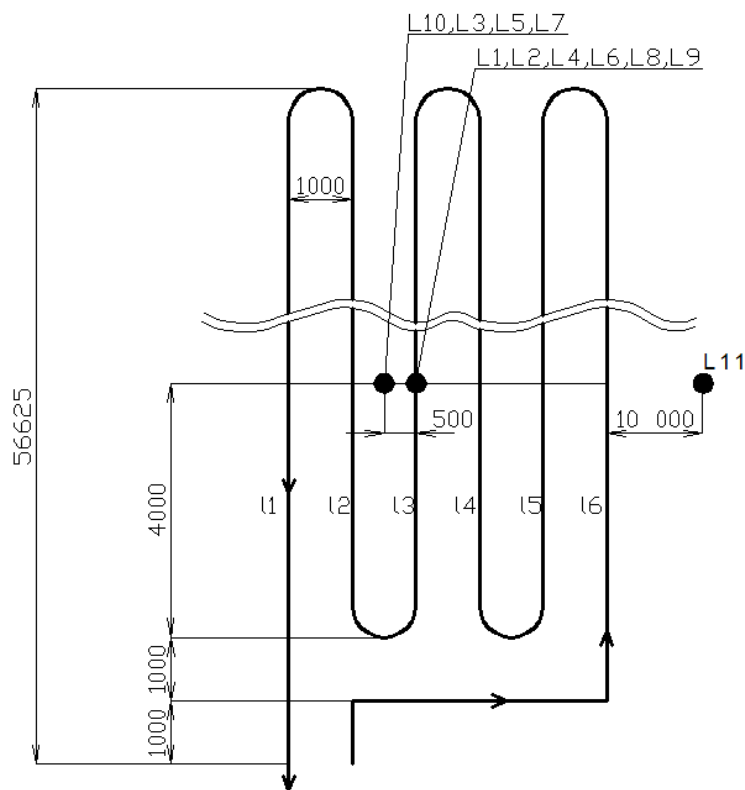
Jestliže v daném kontrolním objemu je zdroj tepla  $q_{\tau,i}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ], pak základní rovnice kondukce tepla má tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \Delta T + \frac{q_{\tau,i}}{\rho \cdot c} \quad [\text{K}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (14)$$

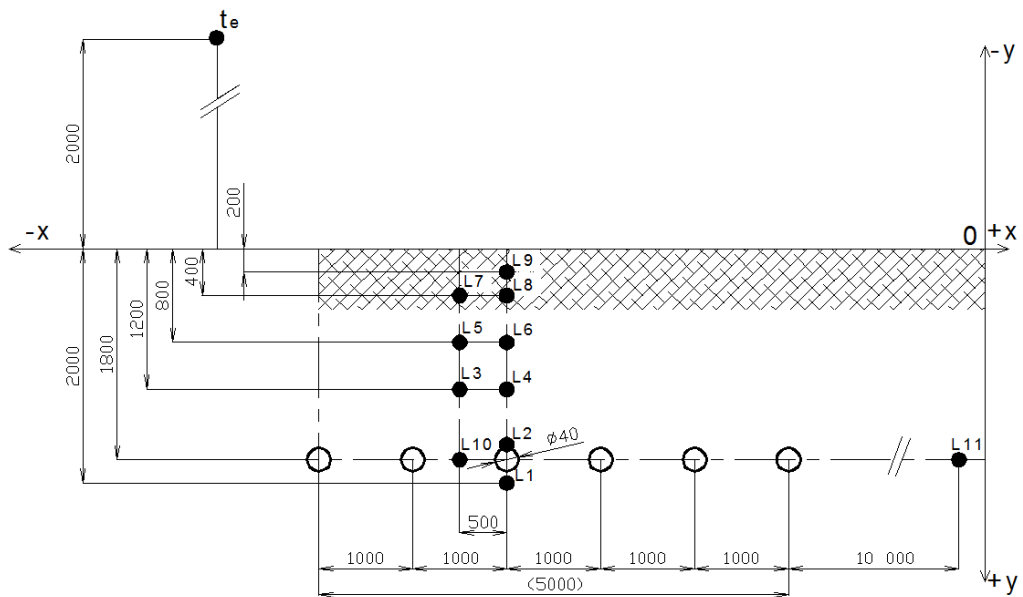
## 4.2 Metodika měření

Lokalita měření a ověřování výsledků se nachází na pozemku společnosti VESKOM s.r.o., okres hlavního města Praha v katastrálním území Dolní Měcholupy (ulice Dolnoměcholupská 522/12a) v nadmořské výšce 258 m. V této oblasti se uvažuje výpočtová venkovní teplota  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  a průměrná teplota v otopném období  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Lineární HGHE byl vyroben z polyetylénového potrubí PE 100 RC 40 x 3,7 mm (LUNA PLAST a.s., Hořín, Czech Republic) odolného proti bodovému zatížení a vzniku trhlin. Potrubí výměníku o celkové délce 330 m ( $41.473\text{ m}^2$ ) je instalováno v hloubce 1,8 m ve 3 smyčkách s roztečí 1 m. Délka jednotlivých smyček činí 54,625 m. Schéma HGHE a umístění teplotních senzorů jsou uvedeny na obr. 8 a obr. 9.



Obr. 8 Půdorysné schéma lineárního HGHE a umístění teplotních senzorů



Obr. 9 Schéma lineárního HGHE a umístění teplotních senzorů v zemním masivu

L1, L2, L3, L4, L5, L6 – linie 1 až 6 horizontálního tepelného výměníku;

L1- teplotní čidlo instalované na linii L3 v hloubce 2 m pod povrchem;

L2- teplotní čidlo instalované na linii L3 v hloubce 1,8 m pod povrchem;

L3 - teplotní čidlo instalované mezi linií L2 a L3 v hloubce 1,2 m pod povrchem;

L4 - teplotní čidlo instalované na linii L3 v hloubce 1,2 m pod povrchem;

L5 - teplotní čidlo instalované mezi linií L2 a L3 v hloubce 0,8 m pod povrchem;

L6 - teplotní čidlo instalované na linii L3 v hloubce 0,8 m pod povrchem;

L7 - teplotní čidlo instalované mezi linií L2 a L3 v hloubce 0,4 m pod povrchem;

L8 - teplotní čidlo instalované na linii L3 v hloubce 0,4 m pod povrchem;

L9 - teplotní čidlo instalované na linii L3 v hloubce 0,2 m pod povrchem;

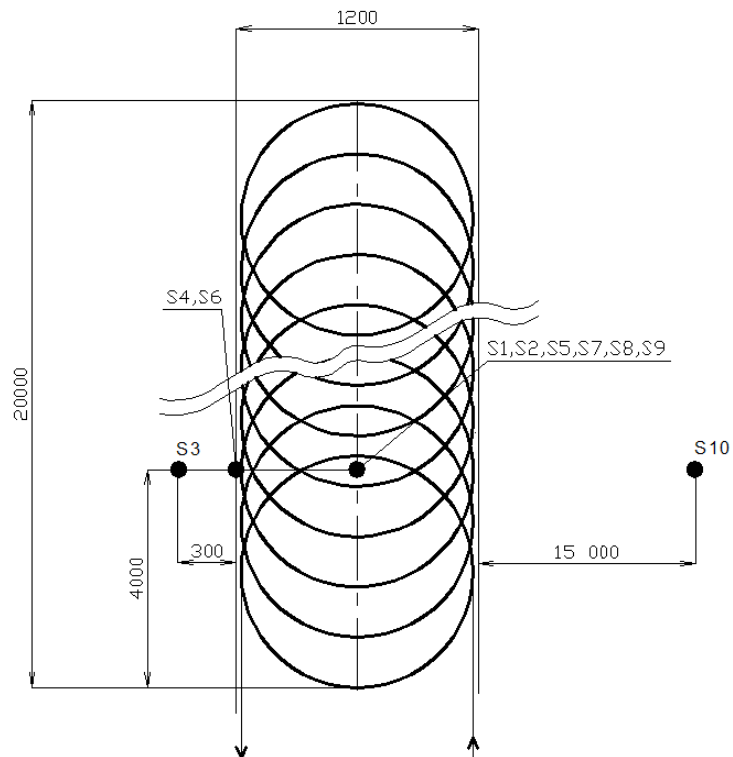
L10 - teplotní čidlo instalované mezi linií L2 a L3 v hloubce 1,8 m pod povrchem;

L11- teplotní čidlo instalované 10 m od kolektoru v hloubce 2 m pod povrchem;

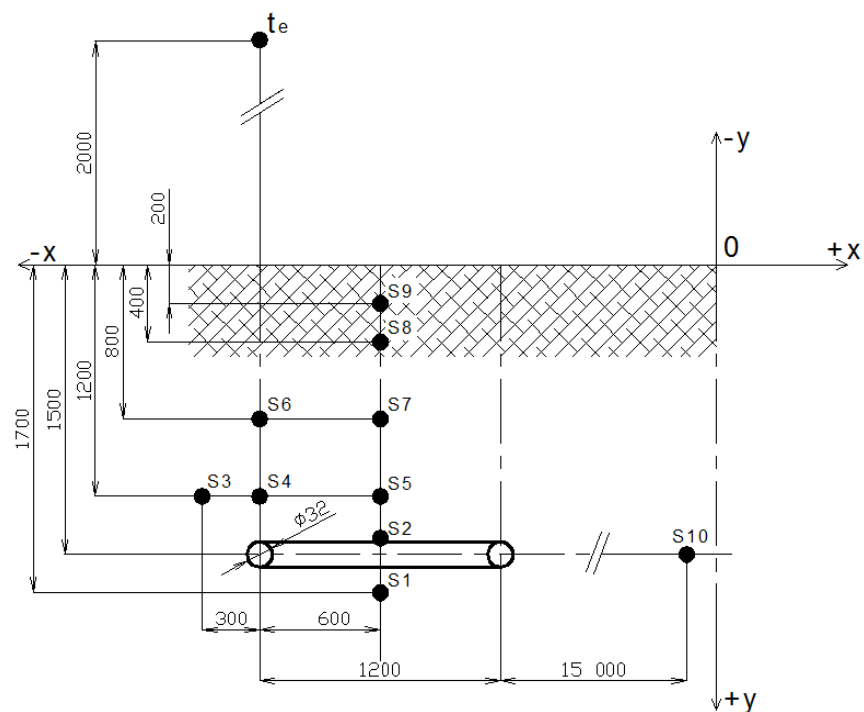
$t_e$  – teplotní čidlo venkovního vzduchu.

Schéma HGHE Slinky a umístění senzorů jsou uvedena na obr. 10 a obr. 11. Výměník byl vyroben z polyetylénového potrubí PE 100RC 32 x 2.9 mm (LUNA PLAST a.s., Hořín, Czech Republic) odolného proti bodovému zatížení a vzniku trhlin. Potrubí výměníku o celkové délce 200 m ( $20 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ ) je instalováno v hloubce 1.5 m v 53 smyčkách stočených do kruhu s roztečí smyček 0.38 m.





Obr. 10 Půdorysné schéma HGHE typu Slinky a umístění teplotních senzorů



Obr. 11 Schéma HGHE typu Slinky a umístění teplotních senzorů v zemním masivu

S1 – teplotní čidlo instalované v ose výměníku Slink v hloubce 1,7 m pod povrchem;  
 S2 - teplotní čidlo instalované v ose výměníku Slink v hloubce 1,5 m pod povrchem;  
 S3 - teplotní čidlo instalované 0,3 m od výměníku Slink v hloubce 1,2 m pod povrchem;  
 S4 - teplotní čidlo instalované na okraji výměníku Slink v hloubce 1,2 m pod povrchem;  
 S5 - teplotní čidlo instalované v ose výměníku Slink v hloubce 1,2 m pod povrchem;  
 S6 - teplotní čidlo instalované na okraji výměníku Slink v hloubce 0,8 m pod povrchem;  
 S7 - teplotní čidlo instalované v ose výměníku Slink v hloubce 0,8 m pod povrchem;  
 S8 - teplotní čidlo instalované v ose výměníku Slink v hloubce 0,4 m pod povrchem;  
 S9 - teplotní čidlo instalované v ose výměníku Slink v hloubce 0,2 m pod povrchem;  
 S10 - teplotní čidlo instalované 15 m od výměníku Slink v hloubce 1,7 m pod povrchem;  
 $t_e$  – teplotní čidlo venkovního vzduchu.

Teplonosnou kapalinou protékající oběma výměníky je směs 33 % etylalkoholu a 67 % vody. Ověřované HGHE jsou zdroji energie pro tepelná čerpadla IVT Premium Line EQ E17 (Industriell Värme Teknik, Tnanas, Sweden) o nominálním tepelném výkonu 17 kW (0/35 °C). Tepelná čerpadla jsou spolu s dalšími třemi využívána pouze pro vytápění, nikoliv pro chlazení, administrativní budovy a provozních hal firmy VESKOM s.r.o. se sídlem v Praze Dolních Měcholupech. Pracovní médium jednotek je chladivo R 407 C.

U hloubkových vrtů byl proveden geologický průzkum, který ukazuje na následující složení zemního masivu v oblasti uložení tepelných výměníků (tab.4).

*Tab. 4 Geologický popis zemního masivu (Firemní materiály společnosti VESKOM s.r.o)*

hloubka (m)	Typy výměníků	
	Výměník typu Slinky	Horizontální tepelný výměník
1	Navážka, tmavě hnědý, hlinito-písčité šterk, obsahuje úlomky cihel a stavební suti.	Navážka, hrubozrný šterk, kamenná drť, úlomky cihel.
2	Navážka, tmavě hnědá, písčito-jílovitá hlína, bez šterkové příměsi.	
3,5		

### 4.3 Metoda stanovení průběhu průměrných denních teplot

Při vyjádření závislosti průměrných denních teplot horninového masivu v topné sezóně vychází (Neuberger a kol., 2014) z rovnice pro volné netlumené kmitání hmotného bodu:

V rovnici (15) je:

$$t_{GR} = \bar{t}_G + \Delta t_{am} \cdot \sin(\Omega \tau + \varphi) \quad (^\circ\text{C}) \quad (15)$$

Kde:

$t_{GR}$  - teplota zemního masivu ( $^\circ\text{C}$ );  $\bar{t}_G$  - střední teplota zemního masivu ( $^\circ\text{C}$ );

$\Delta t_{am}$  - amplituda oscilace kolem teploty  $\bar{t}_G$  (K);  $\tau$  - počet dní od počátku měření (den);

$\varphi$  - počáteční fáze kmitu (rad);  $\Omega$  - úhlová rychlost ( $2 \cdot \pi / 365 \text{ rad} \cdot \text{den}^{-1}$ ).

$\Omega$  - úhlová rychlost ( $2 \cdot \pi / 364 \text{ rad} \cdot \text{den}^{-1}$ ) pro topnou sezónu 2012/2013

$\Omega$  - úhlová rychlost ( $2 \cdot \pi / 383 \text{ rad} \cdot \text{den}^{-1}$ ) pro topnou sezónu 2013/2014

Podle Bowermana a kol., (1997) používáme pro stanovení míry těsnosti závislosti mezi oběma náhodnými veličinami index determinace  $I_{yx}^2$  (-).

### 4.4 Měřicí přístroje

Teploty zemního masivu byly měřeny senzory GKF 125 (výrobce GREISINGER electronic GmbH, Regenstauf Germany) a zaznamenávány v půlhodinových intervalech měřícími ústřednami ALMEMO 5990 a ALMEMO 2890-9 (výrobce AHLBORN Mess- und Regelungstechnik, Holzkirchen, Germany). Měřící ústředna ALMEMO 5990 je vidět na obr.12.



Obr. 12 Měřicí ústředna ALMEMO 5990 (archiv autora)

Senzory GKF 125 zaznamenávají teploty zemního masivu v různých hloubkách a vzdálenostech od horizontálního tepelného výměníku. Pro měření teploty zemního masivu bylo v době instalace tepelných výměníků umístěno celkem 10 teplotních odporových čidel PT1000A. Pro ověření naměřených teplot a kontrolu hloubky uložení tepelných výměníků byly na pozemku provedeny výkopové sondy (obr. 13).

Kontrolní měření tepelných charakteristik zeminy bylo provedeno přístrojem IZOMET (obr.14). Jedná se o mikroprocesorově řízené ruční zařízení určené pro přímé měření objemové měrné tepelné kapacity  $C$  ( $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ), součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) a součinitele teplotní vodivosti  $a$  ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) kompaktních, syvkých a kapalných materiálů pomocí výměnných jehlových, resp. plošných sond. V sondách je zabudovaná paměť, na které jsou uloženy kalibrační konstanty.



Obr. 13 Výkopová sonda na experimentálním pracovišti (archiv autora)

Do těchto sond jsme k horizontálnímu tepelnému výměníku a výměníku typu Slinky, umístily celkem 21 teplotních senzorů typu GKF 125. K horizontálnímu lineárnímu tepelnému výměníku bylo nainstalováno 11 teplotních senzorů L1 až L 11 a k výměníku typu Slinky 10 teplotních senzorů S 1 až S 10 (obr. 8 až 11). Teplotní čidla L 11 a S 10 slouží pro měření referenční teploty zemního masivu ve vzdálenosti 10 m od horizontálního tepelného výměníku a 15 m od výměníku typu Slinky.



Obr. 14 Měřicí přístroj IZOMET (archiv autora)

Teploty okolního vzduchu  $t_e$  byly měřeny ve výšce 2 m nad povrchem půdy a ve vzdálenosti 20 m od horizontálních zemních výměníků senzorem ALMEMO FHA646AG (výrobce AHLBORN Mess-und Regelungstechnik, Holzkirchen, Germany).

Senzor globálního záření (obr.15) typ FLA613GS (výrobce AHLBORN Mess-und Regelungstechnik, Holzkirchen, Germany) byl použit pro měření intenzity dopadajícího slunečního záření. Senzor měří globální záření zahrnující přímé a rozptýlené sluneční záření. Je vybaveno eloxovaným hliníkovým pouzdem a poklopem z umělé hmoty propouštějící UV-záření. Snímač slunečního záření je napájen přímo z Dataloggeru ALMEMO 5990 – 2.



*Obr. 15    Senzor globálního záření (archiv autora)*

Pro měření celkového tepelného toku odváděného horizontálními výměníky byly použity elektronické měřiče spotřeby tepla MTW 3 (výrobce Itron Inc. Liberty Lake, USA).

## 5. Výsledky a diskuze

Teplotní změny v zemním masivu jsou charakterizovány tepelnými charakteristikami zeminy. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ , objemové měrné kapacity  $C$  a teplotní vodivosti  $a$ , které byly zjištěny na experimentálním pozemku s HGHEs přístrojem IZOMET před topným obdobím 2012/2013, shrnuje tab. 5.

Tab. 5 Tepelné charakteristiky zemního masivu před topnou sezónou 2012/2013

Hloubka (m)	$t$ (°C)	$w$ (%)	$\lambda$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$C$ (MJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$a$ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
0,22	12,36	26,20	1,28	2,14	0,600
0,30	11,31	30,30	1,38	2,24	0,617
0,60	11,90	27,29	1,15	1,73	0,666
0,90	12,16	32,30	1,41	2,12	0,667
1,20	12,29	34,9	1,50	1,99	0,755
1,50	13,37	40,50	1,76	2,40	0,733
1,60	13,68	37,50	1,65	2,27	0,724

### 5.1 Průběhy teplot v zemním masivu v topných obdobích 2012/2013 a 2013/2014 a navazujících období stagnace

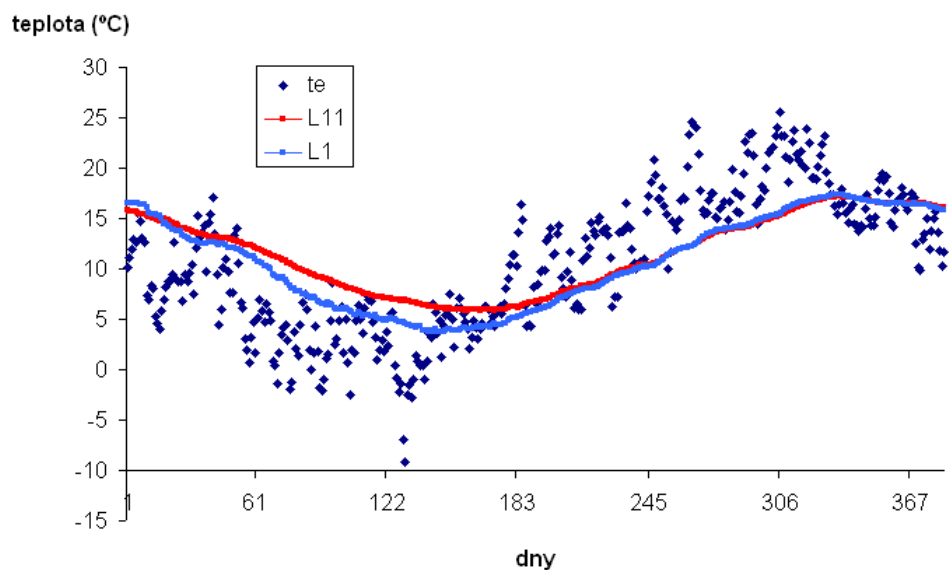
HGHEs s uspořádáním lineárním a Slinky byly sledovány v topném období 2012/2013 (od 17. 9. 2012 do 22. 4. 2013; 218 dní) a v topném období 2013/2014 (od 18. 9. 2013 do 23. 5. 2014; 248 dní). V roce 2013 trvalo období stagnace 146 dní. Období stagnace v roce 2014 skončilo 5. 10. 2014; 135 dní.

#### 5.1.1 Teploty zemního masivu s lineárním a Slinky HGHE

Průběh průměrných denních teplot zemního masivu v okolí HGHEs, teploty průměrné denní zemního masivu v referenčním bodě a průměrné denní teploty okolního prostředí zobrazují grafy na obr. 16-23. Grafy dokládají vliv průběhu teploty okolního prostředí na teplotu zemního masivu. Průměrná teplota zemního masivu v referenčním

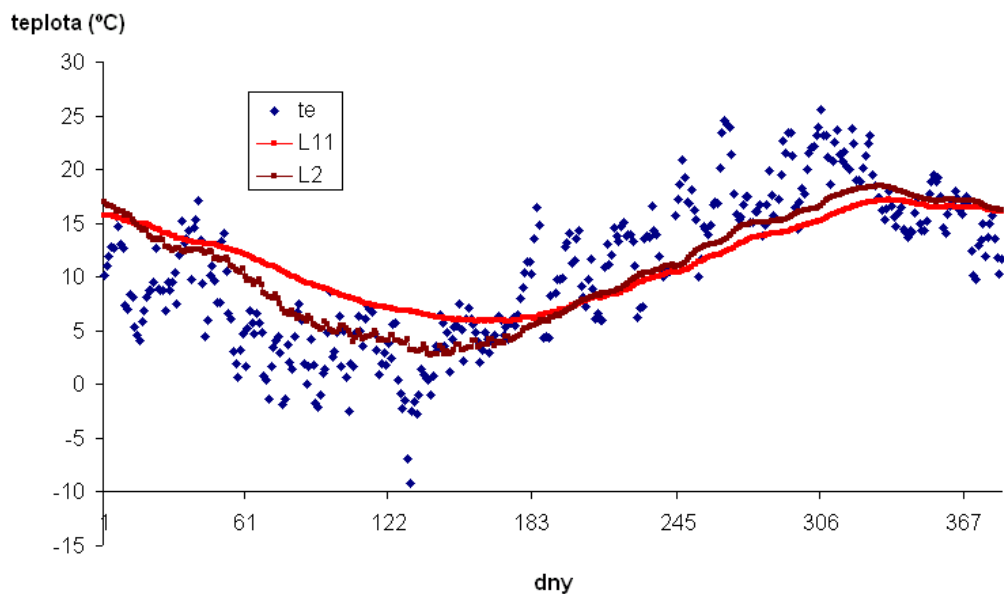
bodě sleduje průběh průměrné teploty okolního prostředí. Počátek soustavy grafů je shodný s počátkem topného období.

Z grafů na obr. 16, 17, 20, 21 je dále patrný vliv ochlazování zemního masivu prostřednictvím HGHEs. Čidla v těsné blízkosti HGHEs zaznamenala oproti referenčnímu bodu významný pokles teploty zemního masivu. Z grafů je patrné též vyrovnání teplot v referenčním bodě a v okolí HGHEs v průběhu období stagnace.

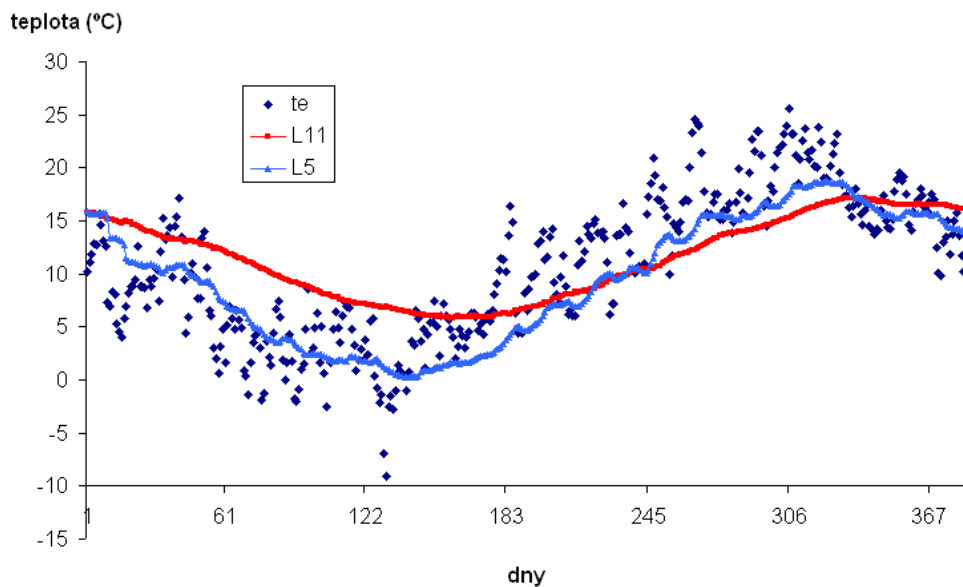


*Obr. 16 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu L1 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace*

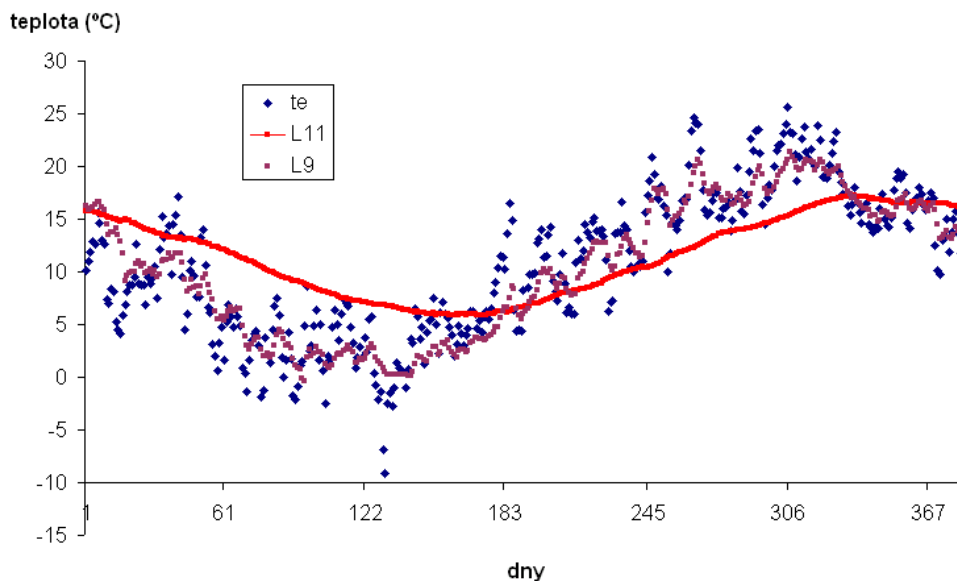




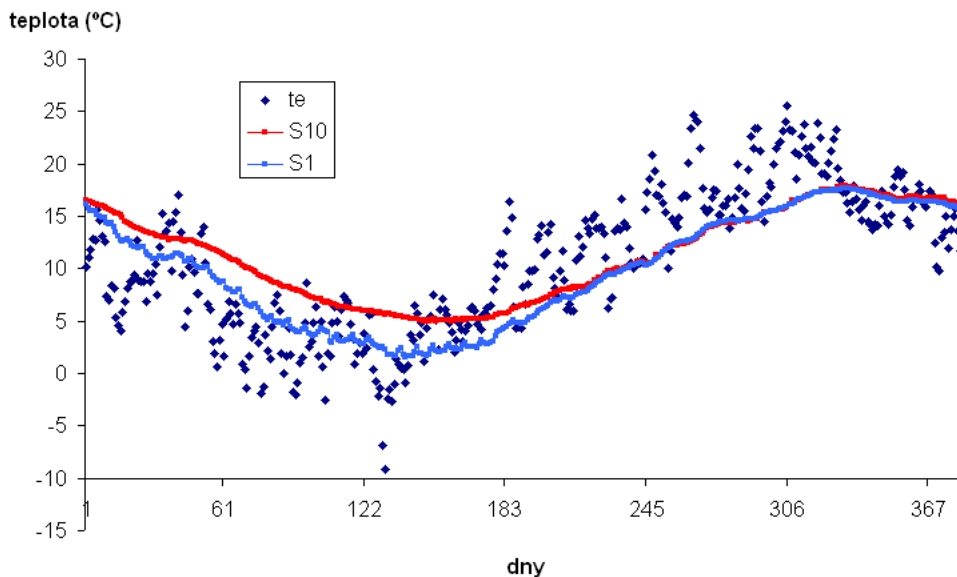
Obr. 17 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu L2 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace



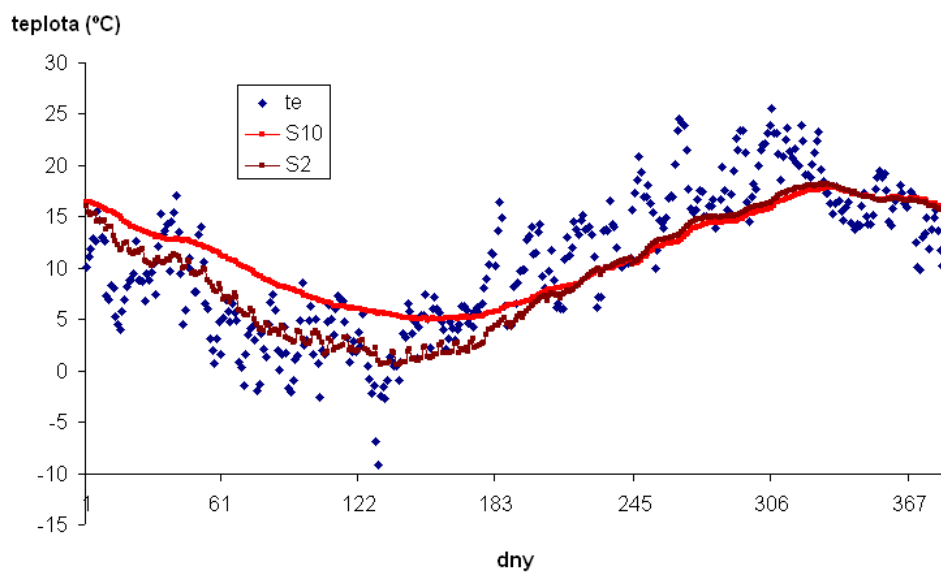
Obr. 18 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu L5 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace



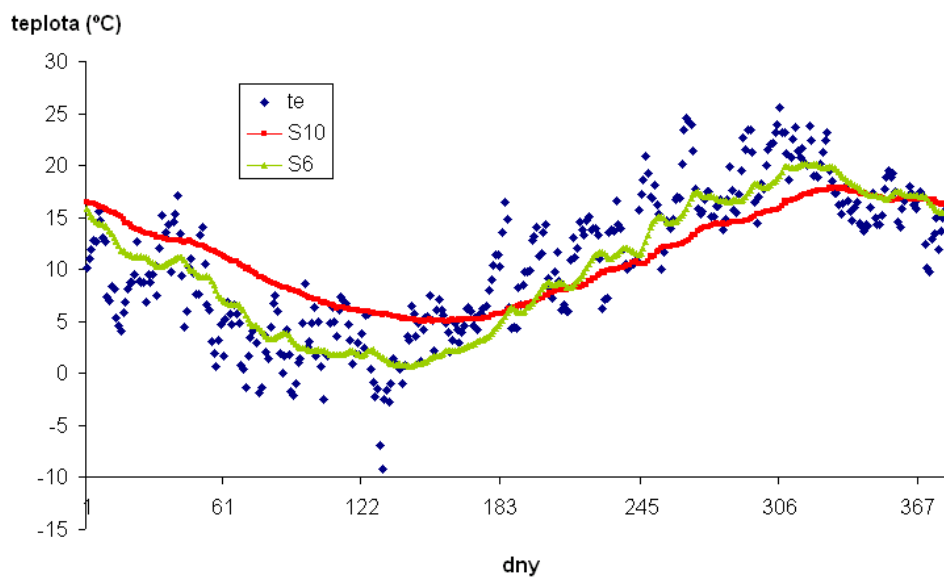
Obr. 19 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu L9 a průměrné denní teploty v referenčním bodě L11 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace



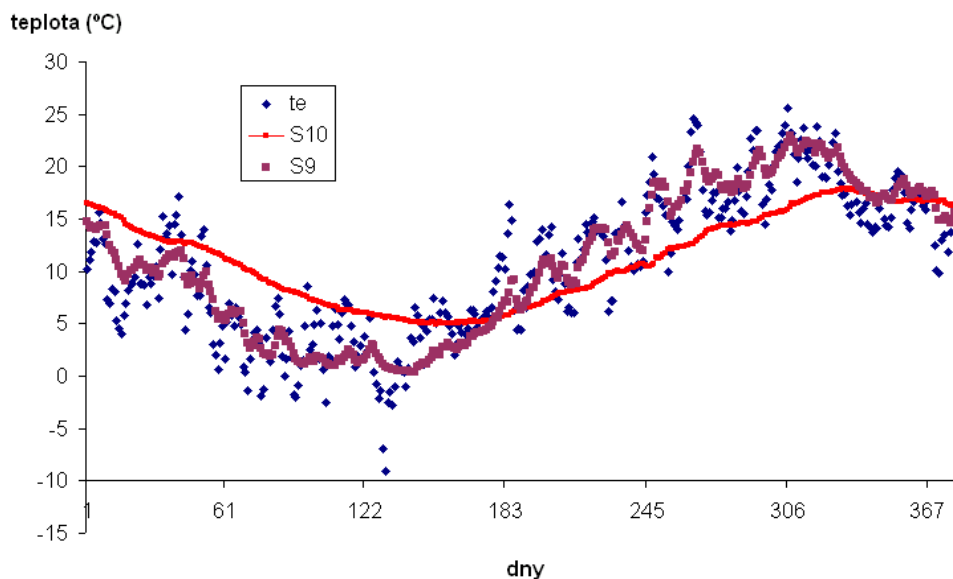
Obr. 20 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu S1 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace



Obr. 21 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu S2 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace



Obr. 22 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu S6 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace



Obr. 23 Průběh průměrné denní teploty okolního prostředí  $t_e$  průměrné denní teploty zemního masivu S9 a průměrné denní teploty v referenčním bodě S10 v topném období 2013/2014 a navazujícím období stagnace

Z grafů na obr. 18, 19, 22, 23 je možno vysledovat, že průběh průměrné denní teploty zemního masivu dále od HGHEs a současně blíže k povrchu země podléhá kromě vlivu HGHEs také vlivu okolního prostředí. Současně je možno na konci období stagnace v menších hloubkách zaznamenat vyšší teploty zemního masivu oproti referenčnímu bodu. Toto je možno opět vysvětlit vlivem okolního prostředí.

Lze konstatovat, že:

- Dominantní vliv na průměrné denní teploty zemního masivu u obou typů HGHEs má teplota okolního prostředí  $t_e$ . Průměrné denní teploty zemního masivu nad HGHEs klesají v topném období ve směru od povrchu zemního masivu. Citlivost zemního masivu na krátkodobé změny teploty okolí potvrzují v publikacích (Hepburn a kol., 2016), (Popiel a kol., 2001) a (Inalli, Esen, 2004).
- Teploty zemního masivu v oblasti lineárního HGHE byly v 68,8 % a u HGHE Slinky v 53,6 % topného období 2012/2013 vyšší než teplota okolního prostředí  $t_e$ .
- Teploty okolního prostředí byly vyšší než teploty zemního masivu zejména na konci topného období v obou sledovaných topných obdobích. Význam vyšších

teplot nízkoteplotního zdroje tepelného čerpadla dokládají (De Swardt, Meyer, 2001) i (Hepburn a kol., 2016).

- Průměrné denní teploty zemního masivu v oblasti HGHEs byly záporné pouze u HGHE Slinky a to zejména na konci topného období 2012/2013. Tímto byla potvrzena hypotéza označená a). V topném období 2013/2014 nebyly záporné průměrné denní teploty zemního masivu v oblasti HGHEs zaznamenány.
- V oblasti lineárního HGHE byly v topném období 2012/2013 průměrné denní teploty zemního masivu vyšší o  $1,97 \pm 0,77$  K než v oblasti HGHE Slinky. Rovněž minimální denní teploty zemního masivu byly u lineárního HGHE vyšší. Tímto byla potvrzena hypotéza označená b).
- Referenční průměrná denní teplota zemního masivu mimo oblast HGHE byla v topném období 2012/2013 jen o  $2,22 \pm 1,23$  K vyšší než teplota v oblasti lineárního HGHE a o  $3,05 \pm 1,41$  K vyšší než v oblasti HGHE Slinky. Rozdíly referenčních teplot zemního masivu a teplot v oblasti HGHEs odpovídají doporučení VDI (2001). Tímto byla potvrzena hypotéza označené d).

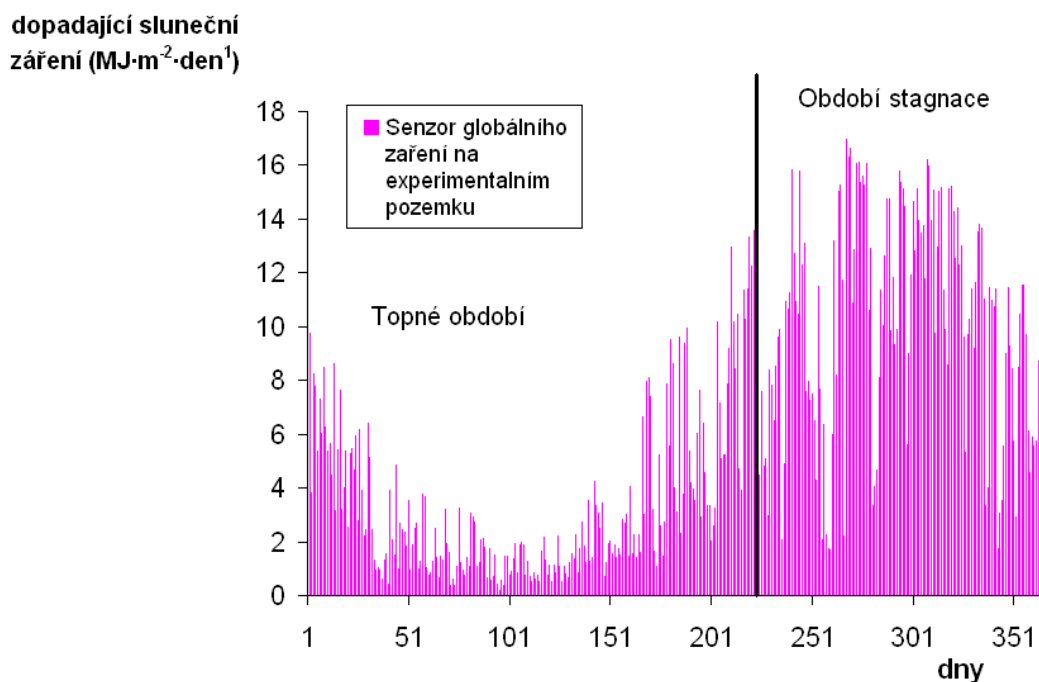
Sledování a vyhodnocení změn teplot zemního masivu v průběhu období stagnace HGHE ukázalo, že:

- Dopadající sluneční záření a teploty okolního prostředí v době stagnace HGHEs významně ovlivňují teploty zemního masivu;
- Rozdíly průměrných denních teplot zemního masivu v oblasti HGHEs a referenční teploty masivu na počátku následujícího topného období nepřesáhnou 1 K. Rozdíl průměrných denních teplot zemního masivu s lineárním HGHE a HGHE Slinky byly na počátku následujícího topného období menší než 0,5 K. Tím je potvrzena hypotéza označená c). Výsledky věrohodně naznačují, že HGHEs lze považovat za stabilní, udržitelné nízkoteplotní zdroje tepelných čerpadel s dlouhou životností.

### 5.1.2 Globální záření dopadající na experimentální pozemek

Součástí experimentu bylo i sledování množství dopadajícího globálního záření. Průměrné denní měrné hodnoty globálního záření v topném období 2012/2013 a v období stagnace HGHE v roce 2013 jsou znázorněny v grafu na obr. 24.

V topném období 2012/2013 byla zjištěna maximální měrná denní hodnota globálního záření  $12,974 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$  a minimální denní hodnota byla naměřena  $0,169 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ . V období stagnace byla zjištěna maximální měrná denní hodnota globálního záření  $16,984 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ , minimální denní hodnota byla naměřena  $1,692 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ . Za topné období 2012/2013 (218 dní) byla na experimentálním pozemku naměřena celková hodnota dopadu slunečního záření  $701,586 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , v období stagnace byla naměřena celková hodnota dopadu slunečního záření  $1478,513 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ .

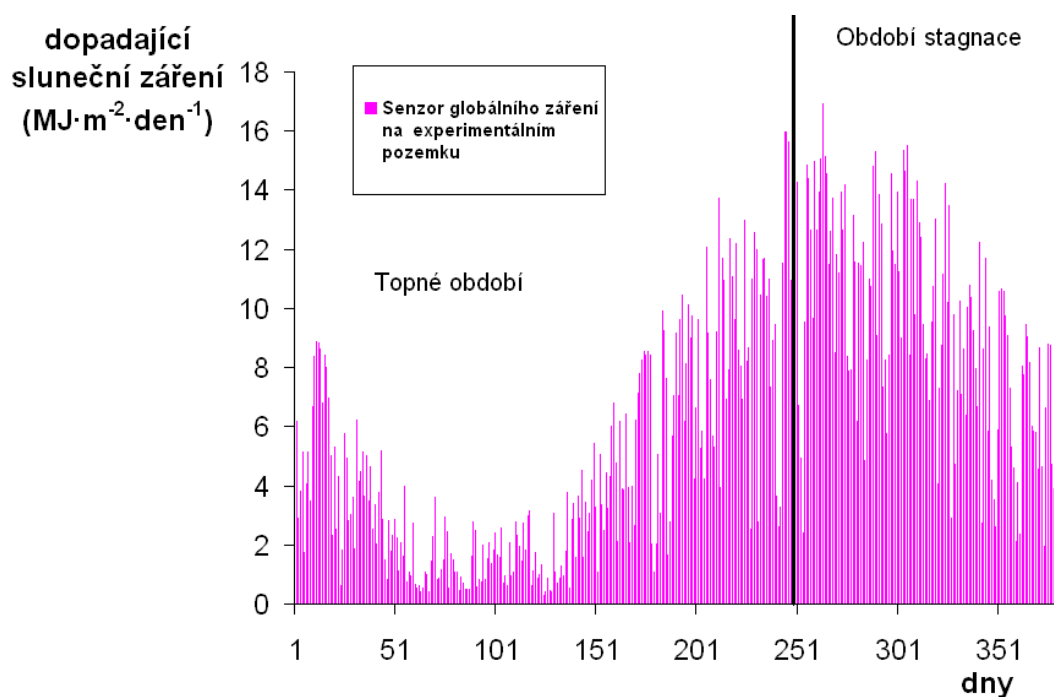


Obr. 24 Denní měrné hodnoty globálního záření v topném období 2012/2013 a v období stagnace HGHEs v roce 2013

V grafu na obr. 25. jsou znázorněny průměrné denní měrné hodnoty globálního záření v topném období 2013/2014 a v období stagnace HGHE v roce 2014.

V topném období 2013/2014 byla zjištěna maximální měrná denní hodnota globálního záření  $15,984 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$  a minimální denní hodnota  $0,289 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ . V období stagnace byla zjištěna maximální měrná denní hodnota globálního záření  $16,941 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ , minimální denní hodnota  $1,949 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ . Za topné období 2013/2014 (248 dní) byla na experimentálním pozemku naměřena celková hodnota dopadu slunečního záření  $1102,321 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , v období stagnace byla naměřena celková hodnota dopadu slunečního záření  $1271,692 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Z výsledků je patrné, že proměnlivá délka topného období a období stagnace má vliv na množství energie dopadlé v nabíjecím a vybíjecím cyklu na zemský povrch nad HGHEs.



Obr. 25 *Denní měrné hodnoty globálního záření v topném období 2013/2014 a období stagnace HGHEs v roce 2014*

### **5.1.3 Teoretické průběhy teploty zemního masivu s lineárním a se Slinky HGHE**

V tab. 6 jsou zpracovány parametry rovnice (15), kterými lze vypočítat průměrné denní teploty zemního masivu v topném období 2012/2013 i období stagnace 2013 v oblasti lineárního HGHE. Graf na obr. 26 znázorňuje průběh průměrných denních teplot zemního masivu s HGHE ve sledovaných hloubkách vypočtený z rovnice (15).

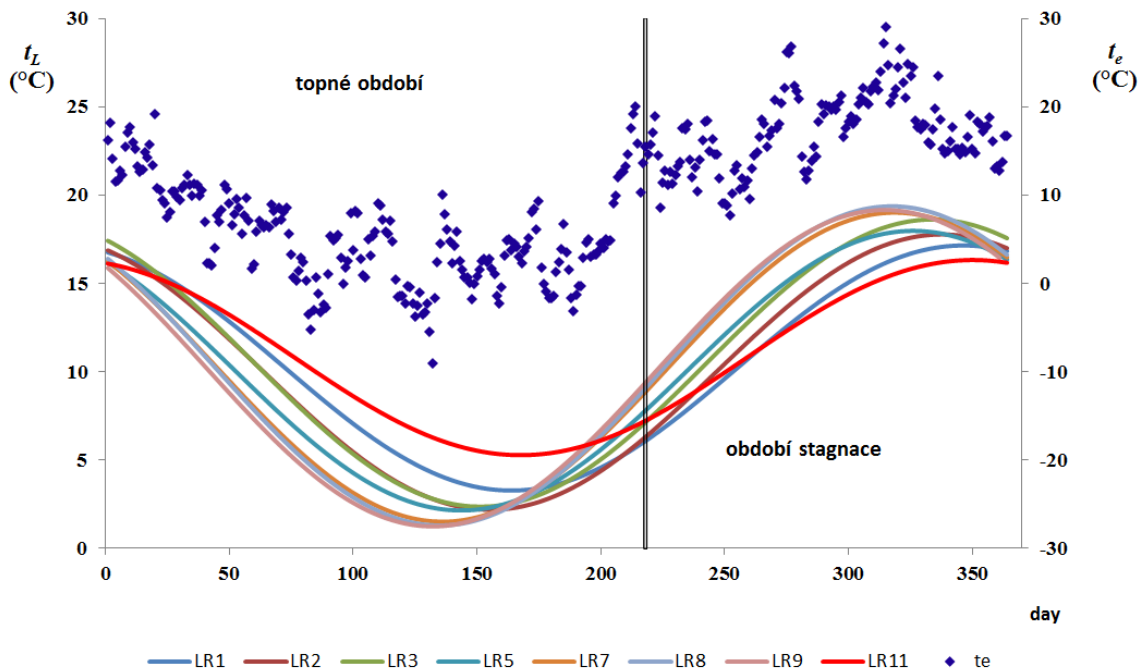
V grafu na obr. 26 je přímkou rovnoběžnou s vertikální osou odděleno topné období (218 dní) od období stagnace HGHE (146 dní). Z grafu je patrné, že průměrná denní teplota zemního masivu s lineárním HGHE v topném období klesá směrem k povrchu zemního masivu. Minimálních teplot není dosaženo v oblasti HGHE, ale v blízkosti povrchu masivu. Rovněž amplitudy oscilace  $\Delta t_A$  kolem střední teploty zemního masivu  $\bar{t}_G$  se zvyšují směrem k povrchu masivu. Tyto trendy potvrzují vliv teploty okolního prostředí  $t_e$ . Důležité teploty zemního masivu v oblasti HGHE ( $t_{L1}, t_{L2}$ ) klesají z teploty 17,11 °C rovnoměrně, přibližně 1 K za 13 dní až do 192 dne topného období na teplotu 2,42 °C. Následně teploty masivu rostou a na konci topného období dosáhnou hodnoty 5,54 °C. Od začátku období stagnace se teploty masivu v oblasti HGHE zvyšují, přibližně o 1 K za 9,8 dne. Již ve 105. dnu období stagnace dosahují teploty zemního masivu hodnoty před topným obdobím. Na konci období stagnace teploty masivu u HGHE mírně klesají vlivem snížení teplot okolního prostředí. Rozdíl teplot zemního masivu v oblasti lineárního HGHE na počátku topných období 2013/2014 a 2012/2013 byl zcela nevýznamný, činil 0,05 K. Teploty zemního masivu v oblasti lineárního HGHE byly v 68,8 % topného období vyšší než teplota okolního prostředí  $t_e$ .



Tab. 6 Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu s lineárním HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013

	$\Delta t_A$	$\varphi$	$\bar{t}$	$I_{yx}^2$
$t_{L1}$	6,938	1,892	10,217	0,976
$t_{L2}$	7,797	2,039	9,984	0,982
$t_{L3}$	8,131	2,105	10,495	0,975
$t_{L5}$	7,961	2,24	10,066	0,953
$t_{L7}$	8,752	2,369	10,264	0,945
$t_{L8}$	9,038	2,389	10,338	0,941
$t_{L9}$	8,958	2,438	10,205	0,926
$t_{L11}$	5,525	1,826	10,806	0,988
$t_e$	9,542	2,563	10,137	0,776

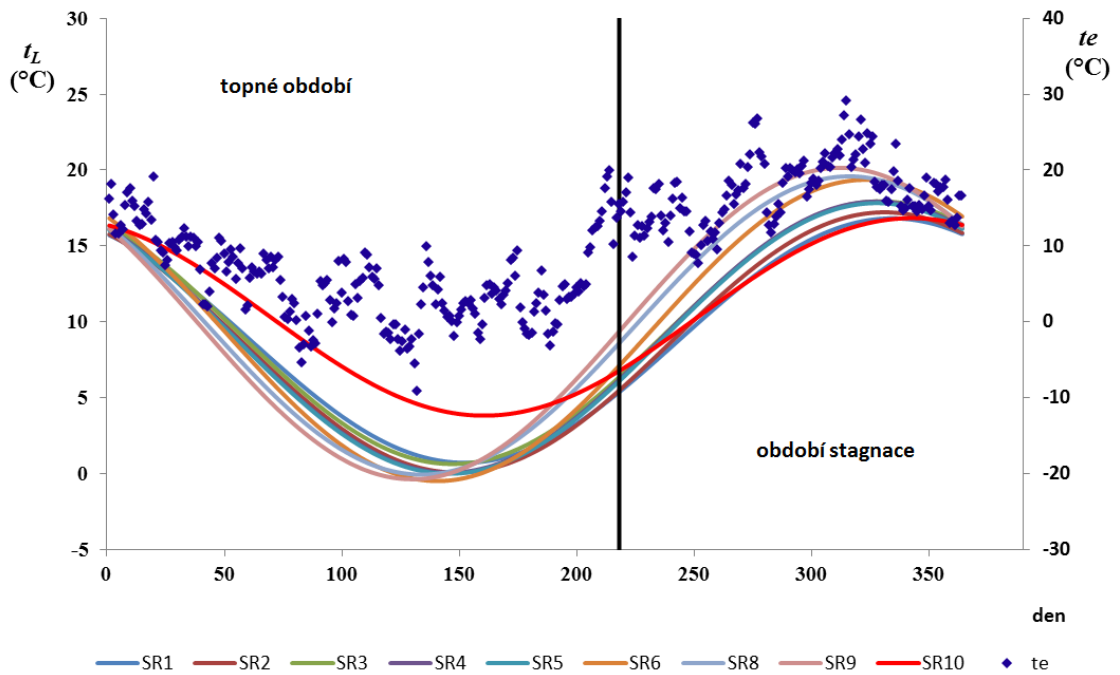
V tab. 7 jsou zpracovány parametry rovnice (15), kterými lze vypočítat průměrné denní teploty zemního masivu v topném období 2012/2013 i období stagnace 2013 v oblasti HGHE Slinky. Graf na obr. 27 znázorňuje průběh průměrných denních teplot zemního masivu s HGHE ve sledovaných hloubkách vypočtený z rovnice (15).



Obr. 26 Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro lineární HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013

Tab. 7 Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu se Slinky HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013

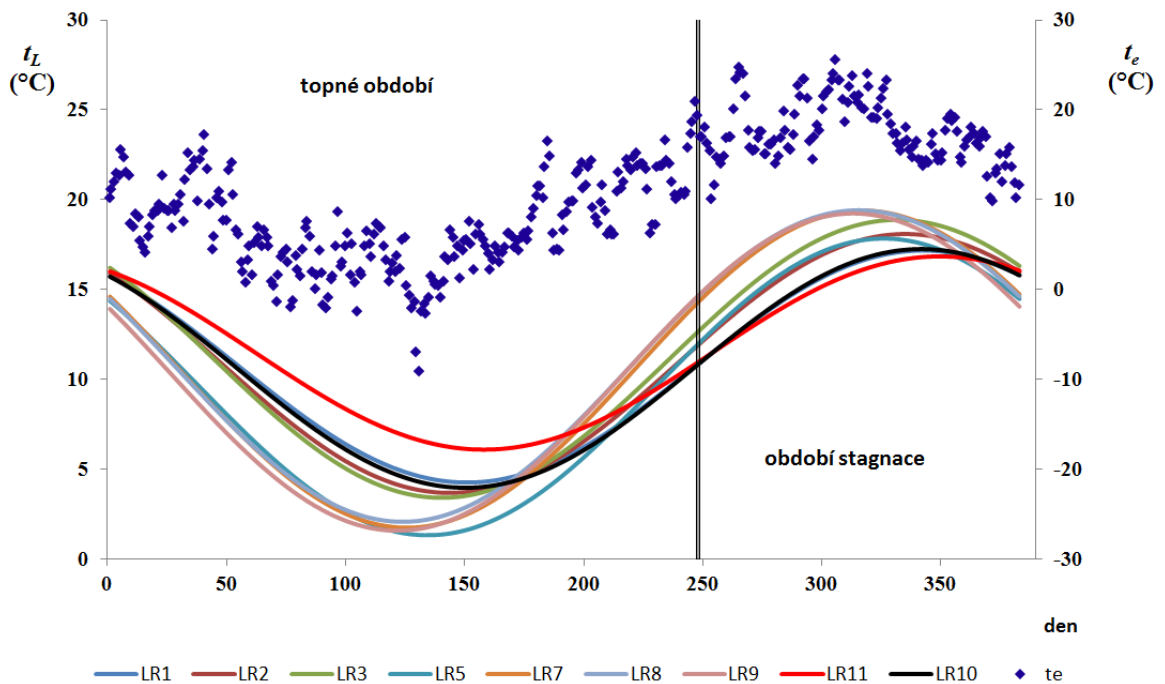
	$\Delta t_A$	$\varphi$	$\bar{t}$	$I_{yx}^2$
$t_{S1}$	8.050	2.085	8.774	0,979
$t_{S2}$	8.573	2,143	8,649	0,968
$t_{S3}$	8,654	2,175	9.293	0,977
$t_{S4}$	8.93	2,201	9.000	0,975
$t_{S5}$	8,914	2,199	8,915	0,974
$t_{S6}$	9,922	2,284	9.441	0,966
$t_{S8}$	9,826	2,401	9,767	0,949
$t_{S9}$	10,259	2,470	9.894	0,937
$t_{S10}$	6,504	1,942	10,332	0,984
$t_e$	9,542	2,563	10,137	0.776



Obr. 27 Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro Slinky HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2012/2013 a období stagnace v roce 2013

Tab. 8 Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu s lineárním HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014

	$\Delta t_A$	$\varphi$	$\bar{t}$	$I_{yx}^2$
$t_{L1}$	6,456	2,235	10,712	0,993
$t_{L2}$	7,204	2,357	10,883	0,990
$t_{L3}$	7,736	2,411	11,142	0,989
$t_{L5}$	8,257	2,507	9,578	0,983
$t_{L7}$	8,825	2,650	10,566	0,968
$t_{L8}$	8,670	2,679	10,739	0,968
$t_{L9}$	8,828	2,716	10,402	0,950
$t_{L10}$	6,643	2,248	10,606	0,950
$t_{L11}$	5,377	2,120	11,464	0,996
$t_e$	8,505	2,863	10,712	0,785



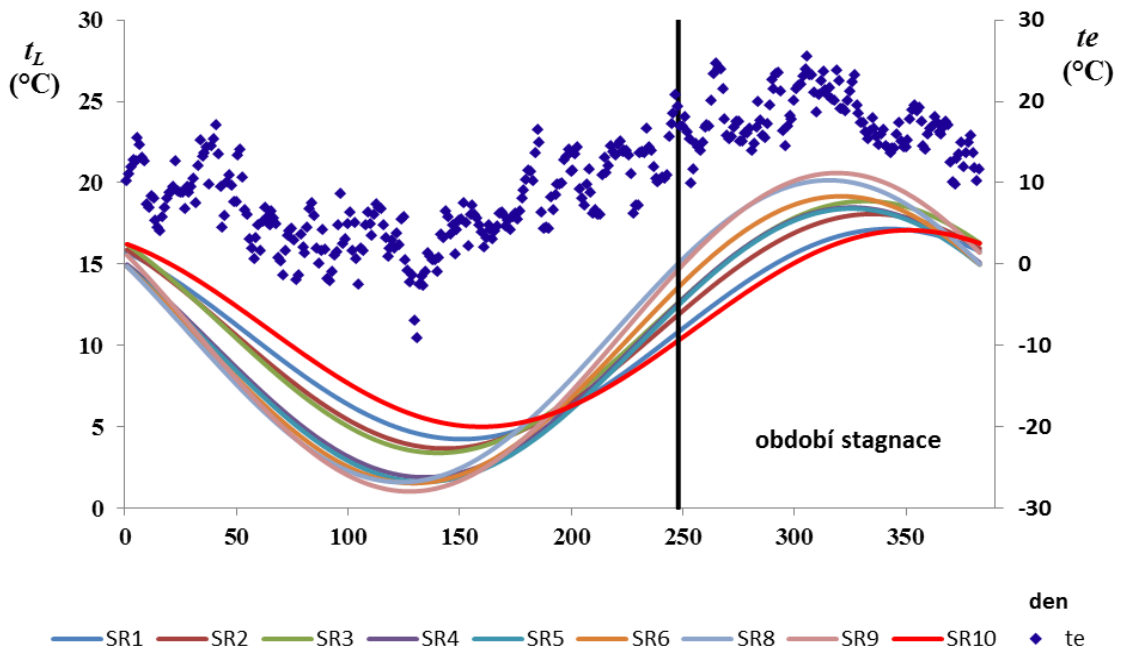
Obr. 28 Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro lineární HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014

V tab. 8 jsou zpracovány parametry rovnice (15), kterými lze vypočítat průměrné denní teploty zemního masivu v topném období 2013/2014 i období stagnace 2014 v oblasti lineárního HGHE. Graf na obr. 28 znázorňuje průběh průměrných denních teplot zemního masivu s HGHE ve sledovaných hloubkách vypočtený z rovnice (15).

V tab. 9 jsou zpracovány parametry rovnice (15), kterými lze vypočítat průměrné denní teploty zemního masivu v topném období 2013/14 i období stagnace 2014 v oblasti HGHE Slinky. Graf na obr. 29 znázorňuje průběh průměrných denních teplot zemního masivu s HGHE ve sledovaných hloubkách vypočtený z rovnice (15).

Tab. 9 Parametry rovnice (15) pro výpočet průměrné denní teploty okolního prostředí, průměrných denních teplot zemního masivu se Slinky HGHE a průměrné denní referenční teploty v zemním masivu v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014

	$\Delta t_A$	$\varphi$	$\bar{t}$	$I_{yx}^2$
$t_{S1}$	7,483	2,399	9,863	0,991
$t_{S2}$	8,034	2,465	9,733	0,998
$t_{S3}$	8,079	2,485	10,361	0,991
$t_{S4}$	8,289	2,509	10,198	0,990
$t_{S5}$	8,393	2,511	10,025	0,990
$t_{S6}$	8,813	2,589	10,363	0,986
$t_{S8}$	9,276	2,681	10,884	0,978
$t_{S9}$	9,622	2,759	10,993	0,965
$t_{S10}$	6,072	2,234	11,286	0,995
$t_e$	8,505	2,863	10,712	0,785



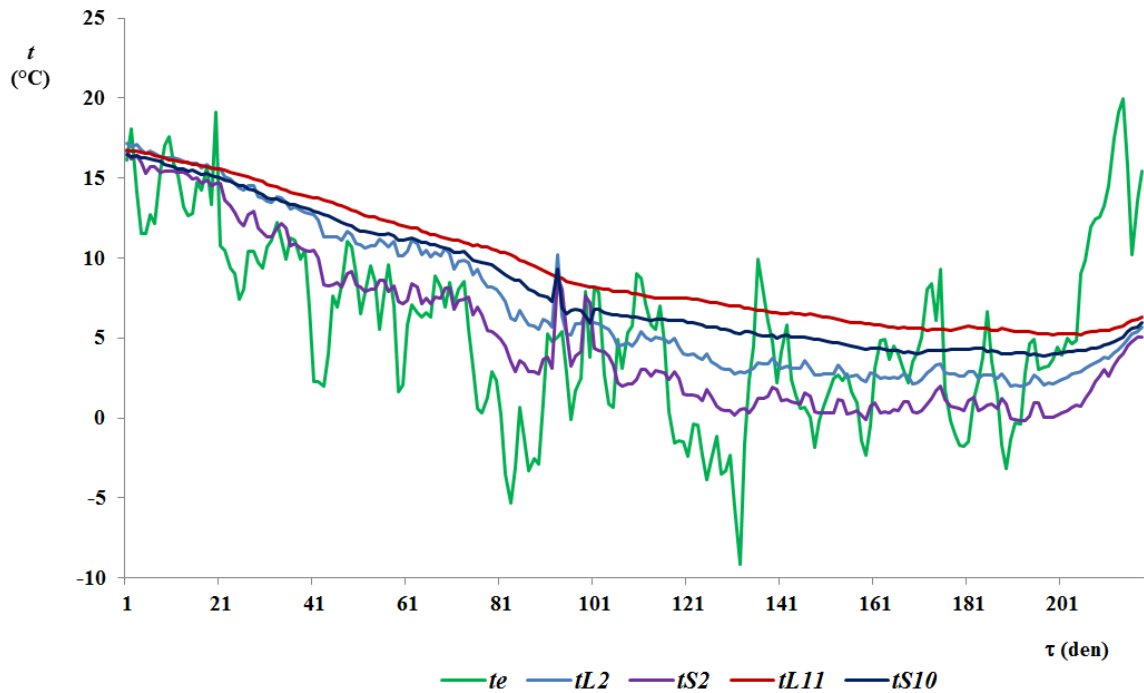
Obr. 29 Průměrné denní teploty zemního masivu vypočtené z rovnice (15) pro Slinky HGHE a průměrné teploty okolního prostředí v topném období 2013/2014 a období stagnace v roce 2014

Srovnáme-li parametry rovnice (15) vypočtené pro topné sezony 2012/2013 a 2013/2014 pro jednotlivé teploty zemního masivu a okolního prostředí (pro lineární HGHE údaje z tab. 6 a 8; pro Slinky HGHE údaje z tab. 7 a 9), můžeme z nich usuzovat pro zimní období 2013/2014 (topná období byla zahájena téměř ve shodném kalendářním dni) na pozvolnější nástup nižších teplot okolního prostředí (vyšší hodnoty  $\varphi$ ) a mírnější průběh zimy (vyšší hodnoty  $\bar{t}$  a nižší hodnoty  $\Delta t_A$ ). Ke stejným závěrům došel ve svých pracích Tintěra (2013 a 2014).

Vypočtená hodnota indexu determinace  $I_{yx}^2$  potvrzuje, že lze průměrné denní teploty zemního masivu s HGHEs v průběhu topných období a období stagnace vyjádřit rovnicí (15) a parametry v tab. 6-9.

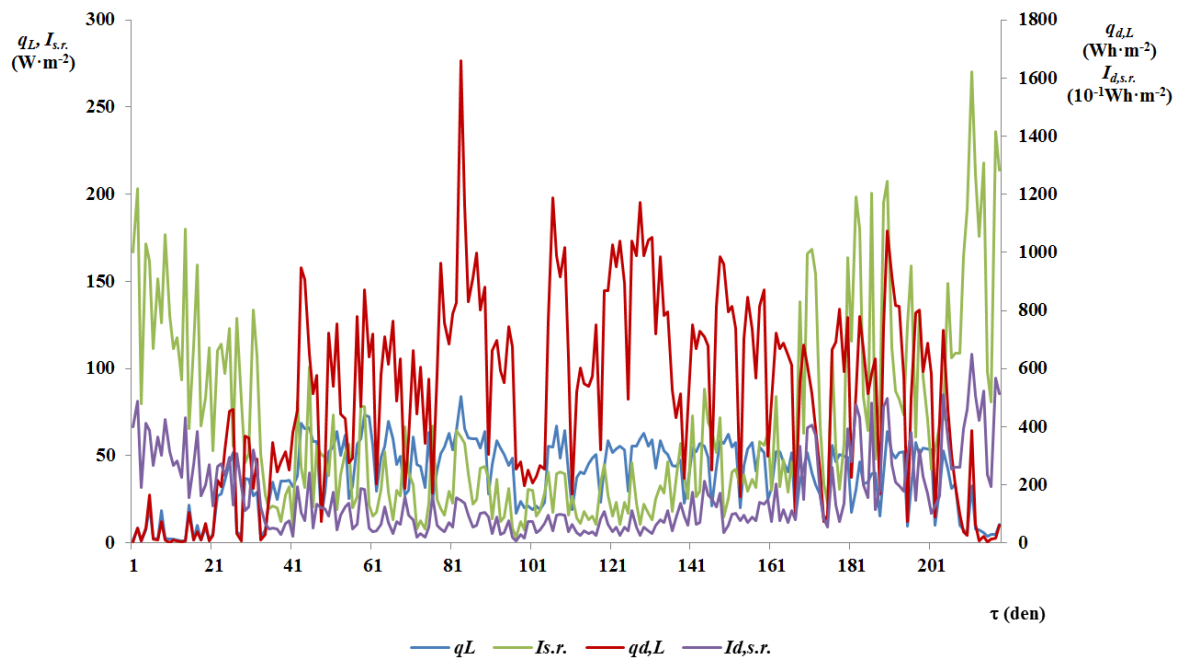
#### **5.1.4 Tepelné toky a energie odvedené zemnímu masivu**

V grafu na obr. 30 jsou znázorněny průběhy teplot  $t_{L2}$ ,  $t_{S2}$  zemního masivu v oblasti HGHEs, referenční teploty  $t_{L11}$ ,  $t_{S10}$  masivu mimo HGHE a teploty okolního prostředí  $t_e$  v topném období. Rovněž jsou v grafech na obr. 31 a obr. 32 uvedeny průběhy tepelných výkonů  $q_{s,s}$ ,  $q_{s,l}$  a měrných energií  $q_{d,s}$ ,  $q_{d,l}$  přepočtené na  $1 \text{ m}^2$  vnější teplosměnné plochy HGHEs. Výsledky jsou shrnuty v tab. 10.

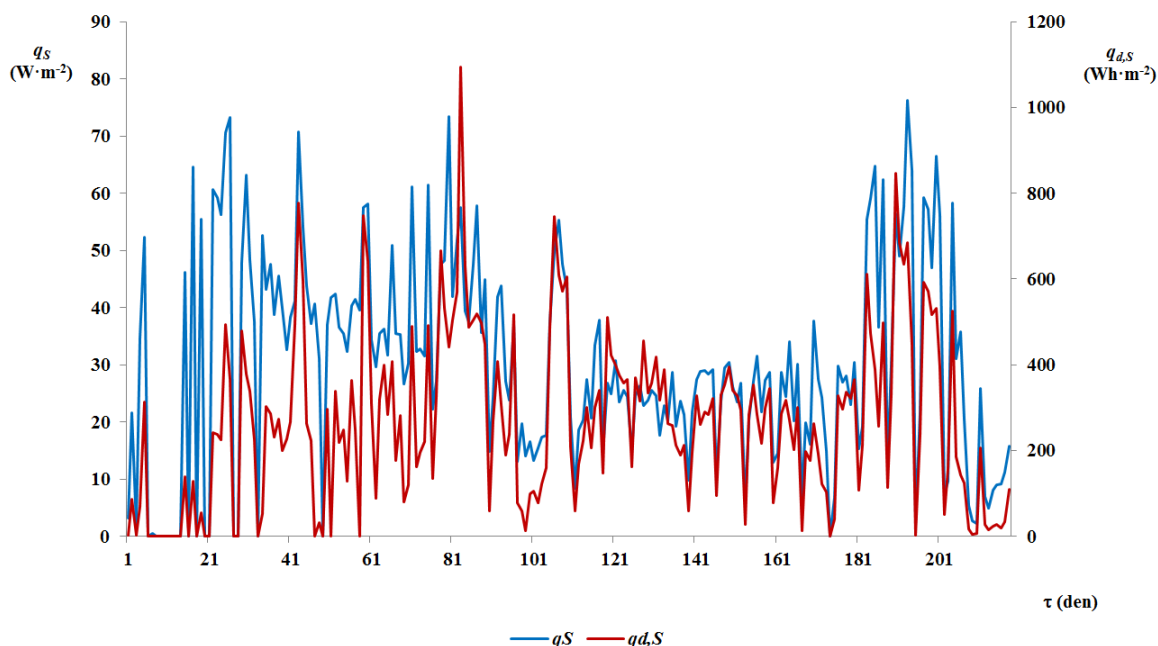


Obr. 30 Teploty zemního masivu v oblasti HGHEs a teplota okolního prostředí v topném období 2012/2013

Z grafů na obr. 30 a souhrnu v tab. 10 je patrné, že průměrné denní teploty zemního masivu v oblasti HGHEs byly záporné pouze u HGHE Slinky, na konci topného období.



Obr. 31 Lineární HGHE – průběh tepelných výkonů  $q_L$ ,  $I_{s,r}$  a energií  $q_{d,L}$ ,  $I_{d,s,r}$  v topném období 2012/2013



Obr. 32 HGHE Slinky - průběh tepelných výkonů  $q_s$  a energií  $q_{d,S}$  v topném období

Tab. 10 Průměrné a extrémní hodnoty teplot okolního prostředí, měrných tepelných výkonů a energií v topném období 2012/2013 v oblasti HGHEs

	Topné období		
	Min.	Průměrná hodnota	Max.
$t_e$ (°C)	-9,15	$5,44 \pm 5,57$	19,99
$q_L$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	1,36	$38,49 \pm 19,74$	84,17
$q_S$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	0,00	$30,08 \pm 18,47$	76,21
$q_{d,L}$ ( $kWh \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}$ )	2,22	$0,51 \pm 0,33$	1,66
$q_{d,S}$ ( $kWh \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}$ )	0,00	$0,27 \pm 0,20$	1,09

Průměrné denní teploty zemního masivu v oblasti lineárního HGHE byly o  $1,97 \pm 0,77$  K vyšší než u HGHE Slinky. Přičemž celková měrná energie odvedená v průběhu topného období lineárnímu HGHE byla téměř dvakrát vyšší než u HGHE



Slinky. Teploty zemního masivu v oblasti lineárního HGHE byly v 68,8 % a u HGHE Slinky v 53,6 % topného období vyšší než teplota okolního prostředí  $t_e$ .

Referenční denní teplota horninového masivu  $t_{L11}$  měřená 12,5 m od středu teplosměnné plochy lineárního HGHE byla v průměru o  $2,22 \pm 1,23$  K vyšší než teplota  $t_{L2}$  v oblasti lineárního HGHE. Teplota  $t_{S10}$  měřená 15,6 m od středu teplosměnné plochy HGHE Slinky byla v průměru vyšší o  $3,05 \pm 1,41$  K než teplota  $t_{S2}$ .

Výsledky ukazují, že měrné energie  $q_d$  odvedené za den v topném období byly u lineárního HGHE v průměru o  $239,91 \pm 198,35$  Wh·m<sup>-2</sup>·den<sup>-1</sup> vyšší, než u HGHE Slinky. Měrné energie odvedené masivu za celé topné dosahovaly u lineárního HGHE 110,15 kWh·m<sup>-2</sup> a u HGHE Slinky 57,85 kWh·m<sup>-2</sup>. Rovněž průměrné měrné tepelné výkony  $q_L$  odvedené masivu lineárním HGHE byly vyšší o  $8,45 \pm 16,57$  W·m<sup>-2</sup> než  $q_S$  u HGHE Slinky.

Lepší výsledky u lineárního HGHE vyplývají zřejmě z většího objemu zemního masivu, ze kterého je nízkoteplotní energie extrahována.

Ověřování měrných tepelných toků a měrných energií odvedených v průběhu topných období prokázalo, že:

- Měrné energie  $q_d$  odvedené za den v topném období 2012/2013 byly u lineárního HGHE v průměru o  $239,91 \pm 198,35$  Wh·m<sup>-2</sup>·den<sup>-1</sup> vyšší, než u HGHE Slinky. Měrné energie odvedené masivu za celé topné období dosahovaly u lineárního HGHE 110,15 kWh·m<sup>-2</sup> a u HGHE Slinky 57,85 kWh·m<sup>-2</sup>. Tímto byla potvrzena hypotéza označená d);
- Průměrné měrné tepelné výkony  $q_L$  odvedené masivu lineárním HGHE byly vyšší o  $8,45 \pm 16,57$  W·m<sup>-2</sup> než HGHE Slinky. Tímto byla opět potvrzena hypotéza označena d). Obdobné hodnoty tepelných výkonů sledovaných HGHEs uvádí (Wu a kol., 2013);
- Pro energetický potenciál zemního masivu má významnou roli dopadající sluneční záření. Celková energie slunečního záření dopadající na povrch masivu v topném období 2012/2013 dosáhla hodnoty 701,586 MJ·m<sup>-2</sup> a v období stagnace v roce 2013 hodnoty 1478,513 MJ·m<sup>-2</sup>. Celková energie slunečního záření dopadající na povrch masivu v topném období 2013/2014 dosáhla hodnoty 1102,321 MJ·m<sup>-2</sup> a v období stagnace v roce 2014 hodnoty 1271,692 MJ·m<sup>-2</sup>. Vliv dopadajícího slunečního záření na energetický potenciál zemního masivu obdobně zhodnotili (Hepburn a kol., 2016) a (Wu a kol., 2013).

## 6. Závěr

Cíle specifikované v kap. 3 byly v rámci disertační práce splněny. Byly analyzovány změny teplot zemního masivu s oběma typy HGHEs v topném období a období stagnace a vyhodnocen energetický potenciál masivu v oblasti výměníků i schopnost regenerace teplot masivu v období stagnace HGHEs (kap. 5.1.1, 5.1.3). Sledován a vyhodnocen byl vliv dopadajícího slunečního záření na energetický potenciál masivu (kap. 5.1.1, 5.1.2). Rovněž byl posouzen vliv konfigurace HGHEs na měrné tepelné toky a měrné energie odvedené zemnímu masivu (kap. 5.1.4).

Výsledky provozních ověřování ukazují, že pro zajištění spolehlivosti zemního výměníku ve funkci nízkoteplotního zdroje energie a spolehlivosti celého energetického systému je nutné zohlednit následující faktory:

- Plocha zemního masivu s výměníkem musí být dostatečně velká, aby došlo v letním období k regeneraci energie odvedené v zimním období akumulací solárního a atmosférického tepla;
- 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 (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.

Provozní ověřování HGHEs umožnilo získat nové poznatky využitelné v projekční i realizační praxi.

Využitelné v projekční a realizační praxi jsou poznatky:

- Potvrzující výhodnost tepelných čerpadel země-voda ve srovnání s tepelnými čerpadly vzduch-voda zejména z hlediska topného faktoru;
- Specifikující stabilitu a udržitelnost zemního masivu jako nízkoteplotního zdroje energie tepelných čerpadel;

- Prokazující výhodnost lineárního HGHE oproti HGHE typu Slinky jak z hlediska teplot zemního masivu, tak i tepelných výkonů. Lineární HGHE vyžadují však pro extrakci energie větší plochu pozemku;
- O regeneraci zemního masivu v období stagnace HGHE, sloužící jako podklady pro využití těchto energetických systémů v režimu chlazení, který může zvýšit energetický potenciál zemního masivu a poskytnout další výhody jako je kratší doba návratnosti investice a zvýšení tepelné pohody v letním období.

K rozvoji vědního oboru přispívají poznatky týkající se specifikace:

- Průběhu teplot zemního masivu v topném období a období stagnace u obou typů HGHEs;
- Podkladů pro navrhování matematických modelů teplotních polí v zemním masivu s HGHEs;
- Schopnosti akumulace tepla zemním masivem v průběhu období stagnace HGHEs;
- Teplot zemního masivu na začátcích a koncích topného období;
- Vztahu mezi tepelnými výkony odvedenými HGHEs, okolním prostředím a teplotou zemního masivu.

Získané poznatky inspirují další směry výzkumu v oblasti využití zemního masivu jako nízkoteplotního zdroje energie tepelných čerpadel. Jedná se zejména o ověření:

- Možností využití zemního masivu pro chlazení budov v reverzním chodu tepelného čerpadla;
- Vlivu odběru tepla zemnímu masivu v letním období pro ohřev teplé vody pro sociální účely na teploty zemního masivu;
- Možností zvýšení tepelného výkonu HGHE zvýšením součinitele tepelné vodivosti zemního masivu instalací hydroizolace pod HGHE.

Výsledky ověřování upozornili rovněž na základní nedostatek energetických systémů s HGHEs využívaných v ČR, ale i v zahraničí. Jedná se o vysokou koncentraci etylalkoholu (33 %) v teplotosné kapalině. Vysoká koncentrace způsobuje nárůst kinematické viskozity teplotosné kapaliny a omezuje možnost dosažení turbulentního proudění, které je nutné pro dosažení efektivního sdílení tepla mezi vnitřní stěnou trubky výměníku a teplotosnou kapalinou a tím i vyššího výkonu HGHE.

## Použité zdroje

Adamovský R., Neuberger P., Kodešová R. Metodika pro využití půdy jako nízkoteplotního zdroje energie tepelných čerpadel. *Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd.* (2015), ISBN 978-80-213-2559-3

Adamovský R., Neuberger P., Šedřová M. Změny teplot půdy v zemním tepelném výměníku. Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů. Univerzita Hradec Králové : *Nakladatelství Gaudeamus.* (2009), s. 7-10. ISBN 978-80-7041-611-2.

Bandos T., Montero A., Fernandez E., Santander J., Isidro J., Perez J., a kol. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics.* (2009), **38**:263–70.

Banks D. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. *Garsington Road, Oxford: John Wiley & Sons, Ltd.* (2012), ISBN 978-0-470-67034-7.

Baudoin A. Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par batterie d'échangeurs baionnette verticaux: *modele de predimensionnement. Ph.D.Thesis. France: Universite de Reims* (1988).

Bowerman B. L., O'Connell R. T. Applied Statistics: Improving Business Processes, *1st ed.; Richard D. Irvin Inc.: Boston, MA, USA* (1997), pp. 712-723.

Brandl H., Energy foundations and other thermo-active ground structures. In *Géotechnique.* (2006), s. 81-122. ISSN 0016-8505.

Carslaw H., Jaeger J., *Conduction of heat in solids.* Oxford (1947).

*Commercial Earth Energy Systems : a Buyer's Guide.* Ottawa : Natural Resources Canada (2002), 95 p. ISBN 0-662-32808-6.

Congedo P. M., Colangelo G., Starage G. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: *A comparison among different configurations*. *Applied Thermal Engineering* (2012), s. 33–34: 24–32.

De Swardt C. A., Meyer J.P. A performance comparison between an air-coupled and a ground-coupled reversible heat pump. *International Journal of Energy Research* (2001), **25**, 810–899.

Esen H., Inalli M., Esen M. A techno-economic comparison of ground-coupled and air-coupled heat pump system for space cooling. *Building and Environment*. (2007), **42**: 1955 – 1965.

Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. *Ph.D. thesis. Sweden: University of Lund* (1987).

Firemní materiály společnosti AHLBORN, měřicí a regulační technika, spol. s r.o. *Katalog 2010*. [s.15]

Firemní materiály firmy K a S s.r.o. *Katalog 2015*. [s.21]

Firemní materiály firmy Veskom s.r.o. Projekční podklady 5.1. [s.42] Tepelná čerpadla IVT,s.r.o., ©2005.

Florides G., Kalorigou S. Ground heat exchangers : A review of systems, models and applications. In *Renewable Energy*. Elsevier (2007), s. 2461-2478. ISSN 0960-1481.

Fujji H., Nishi K., Komaniwa Y., Chou N. Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers. *Geothermics* (2012), **41**: 55-62.

Fujji H., Okubo H., Cho N., Ohyama K. Field tests of horizontal ground heat exchangers. In: *Proceedings of the 2010 World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*. (2010), April 25–29, Paper No. 2904, p. 6

Go G.H., Lee S.R., Nikhil N.V., Yoon S. A new performance evaluation algorithm for horizontal GCHPs (ground coupled heat pump systems) that considers rainfall infiltration. *Energy* 83. (2015), 766-777.

Hepburn B.D.P., Sedighia M., Thomas H. R., Manju. Field-scale monitoring of a horizontal ground source heat system. *Geothermics* (2016). **61**, 86–103.

Inalli M., Esen H. Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump systém. *Applied Thermal Engineering*. (2004), **24**, 2219-2232.

Ingersoll L., Zobel O., Ingersoll A. Heat conduction with engineering geological and other applications. New York: *McGraw-Hill*. (1954).

Jonesem F. Closed loop geothermal systems –slinky installation guide. *Rural Elektrick Research Project 86-1*, IGSHPA (1995), 58 pp.

Karlík R., Tepelné čerpadlo pro váš dům. 1. vydání Praha Grada Publishing, a.s. (2009), ISBN 978-80-247-2720-2

Kavanaugh S.P., Rafferty K. *Ground-Source Heat Pumps*. Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. (1995).

Krainer R., Duda J. Chladiva používaná v tepelných čerpadlech. *TZB-info*. [online]. [cit. 2015-08-22] Dostupný z:<http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/12647-chladiva-pouzivana-v-tepelnych-cerpadlech>

Kutílek M., *Vodohospodářská pedologie*. Vyd. 2. Bratislava (1978), 296 s.

Lamarche L., Beauchamp B. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy Build* (2007), **39**:188–98.

Mach S. Tepelná čerpadla a topné faktory. *TZB-info* [online]. [cit. 2013-06-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/2410-tepelna-cerpadla-a-topne-factory>>

Neuberger P., Adamovský R., Šedřová M. Temperatures and Heat Flows in a Soil Enclosing a Slinky Horizontal Heat Exchanger. *Energies* (2014), 7/2, 972-978. ISSN 1996-1073

Ozgener O., Hepbasli A. Modeling and performance evaluation of ground source (geothermal) heat pump systems. In *Energy and Buildings*. Elsevier. (2007), p. 66-75. ISSN 0378-7788.

Petráš D., a kol. Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie. *JAGA group*. (2008), 216 s. ISBN 978-80-8076-069-4.

Petit P.J., Meyer J.P. Techno-economic analysis between the performances of heat source air conditioners in South Africa. *Energy Conversion and Management*. (1998), **39**, 661–669. ISSN 0196-8904.

Tepelná čerpadla IVT. *Projekční podklady 6.1* [s.43] Tepelná čerpadla IVT, s.r.o., ©2008.

Popiel C., Wojtkowiak J., Biernacka B. Measurements of temperature distribution in ground. *Experimental Thermal and Fluid Science*. (2001), **25**, 301–309.

Oklahoma State University (1988), *Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems*. Installation Guide.

Omer A.M., Ground - source heat pumps systems and applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier. (2008), s. 344-371. ISSN 1364-0321.

Piechowski M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: validation and sensitivity analysis. *International Journal of Energy Research*. **22** (1998), 965–979.

Piechowski M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: theoretical development. *International Journal of Energy Research*. **23** (1999), 571–588.



Rezaei B. A., Kolahdouz E. M., Dargush G. F., Weber, A. S. Ground source heat pump pipe performance with Tire Derived Aggregate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. (2012), **55**/11-12: 2844-2853

Ryška J., Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (III). *TZB-info* [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/3658-vrty-do-horninoveho-masivu-zdroj-energie-pro-tepelna-čerpadla-iii>>

Skhan P. Characteristics of an analytical solution for a spiral coil type ground heat Exchange: *Computers and Geotechnics* (2013), **49**: 18-24

Song Y., Yao Y., NA W. Impacts of soil pipe thermal conductivity on performance of horizontal pipe in a ground-source heat pump. *Proceeding of the Sixth International Conference for Enhanced Building Operations, Shenzhen, China*, (2006), November 6 – 9 <http://esl.tamu.edu>.

Šed'ová M., Adamovský R., Neuberger P. Analysis of ground massif temperatures with horizontal heat Exchange: *Research in Agricultural Engineering*. (2013), **59**, in press.

Tarnawski V. R., Leong W. H., Momose T., Hamada Y. Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan. *Renewable Energy*. (2009), **34**: 127–134.

Tintěra L. Vyhodnocení otopného období 2013/2014 v Praze. *Tzb-info* [online]. 24. 11.2014 [citováno 8. 3. 2016]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/12032-vyhodnoceni-otopneho-obdobi-2013-2014-v-praze>

Tintěra L. Vyhodnocení otopného období 2012/2013 v Praze. *Tzbinfo* [online], 2. 12.2013 [citováno 8. 3. 2016]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/10648-vyhodnoceni-otopneho-obdobi-2012-2013-v-praze>

Trs M. Využívání stavebních konstrukcí budov pro ukládání energie, organizace Gerotop spol. s.r.o, *Tzbinfo* [online]. 2007 [cit. 2013-06-30]. Dostupný z: <http://www.tzbinfo.cz/4977-vyuzivani-stavebnich-konstrukci-budov-pro-ukladani-energie>

VDI 4640-3:06-2010. *Thermal use of the underground – Fundamentals, approvals, environmental aspects*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure. (2010).

VDI 4640-2:09-2001. *Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure. (2001), 43 p.

Wu W., Wang B., You T., Shi W, Li X. A. Potential solution for thermal imbalance of ground source heat pump systems in cold regions: Ground source absorption heat pump. *Renewable Energy*. (2013), **59**, 39–48