

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Vertikální zemní výměníky jako zdroj energie

Vertical ground exchangers as a source of energy

Disertační práce

Obor: Energetika
Katedra mechaniky a strojnictví

Vypracoval: **Ing. Lukáš Mašek**
Školitel: **doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.**

PRAHA 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

.....
Ing. Lukáš Mašek

V Praze dne 21.8.2015

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli panu doc. Ing. Pavlu Neubergerovi, Ph.D. za odborné vedení v průběhu celého doktorského studia, za cenné rady a věcné připomínky, které mi poskytl při zpracování disertační práce.

Také bych rád poděkoval panu Ing. Petru Burešovi a firmě VESKOM spol. s r.o. za ochotu a poskytnutí měřicího místa.

V neposlední řadě patří dík i rodině a přátelům za psychickou podporu.

Abstrakt

Disertační práce na téma „Vertikální zemní výměníky jako zdroj energie“ se zabývá problematikou vrtů jako zdroj energie pro tepelné čerpadlo. V kapitole „Současný stav řešené problematiky“ je postupně popsána problematika využívání geotermální energie, otevřených a uzavřených systémů, rozdělení tepelných vrtů dle konstrukce a závěr kapitoly je zaměřen na tepelné zkoušky vrtů.

V kapitole „Metodika“ jsou v teoretické části přiblíženy zjednodušující vztahy, které popisují vedení tepla v okolí vrtu, analytické modely, dále pak numerické modely a kombinace numerických a analytických modelů, které jsou schopny postihnout dvou nebo tří-dimenzionální podmínky. V experimentální části této kapitoly je dán prostor charakteristice místa měření a definování pojmů útlumová hloubka a součinitel přestupu tepla.

Závěrečná kapitola disertační práce „Výsledky a diskuze“ prezentuje konkrétní dosažené výsledky.

Klíčová slova: energie, čerpadlo, tepelný vrt, teplota, zdroj tepelné energie

Abstract

The dissertation on the topic of "vertical ground heat exchangers as a source of energy" deals with boreholes as a source of energy for the heat pump. In the chapter "The current state" is gradually described problems geothermal energy, open and closed systems, the distribution of thermal boreholes by construction and at the end of the chapter focuses on the thermal test wells.

In the chapter "Methodology", in the theoretical part are zoomed simplistic relationships that describe the heat conduction around the borehole, analytical models, numerical models and a combination of numerical and analytical models that are able to describe two or three-dimensional conditions. In the experimental part of this chapter is given space characteristics of the place of measurement and definition of terms attenuation depth and heat transfer coefficient.

The final chapter of the dissertation "Results and discussion" presents concrete results.

Keywords: energy, pump, heat borehole, temperature, source of thermal energy

Obsah

1 ÚVOD.....	1
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	4
2.1 GEOTERMÁLNÍ ENERGIE.....	4
2.1.1 ROZDĚLENÍ GEOTERMÁLNÍCH ZDROJŮ DLE EXERGIE.....	6
2.1.2 TEPELNÉ VLASTNOSTI HORNIN.....	9
2.1.3 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ A GEOTERMÁLNÍ ENERGIE.....	10
2.2 TEPELNÉ ČERPADLO ZEMĚ-VODA.....	12
2.3 VERTIKÁLNÍ ZEMNÍ VÝMĚNÍKY JAKO ZDROJE ENERGIE.....	13
2.3.1 OTEVŘENÉ SYSTÉMY.....	15
2.3.2 UZAVŘENÉ SYSTÉMY.....	16
2.3.3 ROZDĚLENÍ TEPELNÝCH VRTŮ PODLE KONSTRUKCE.....	16
2.3.4 VLIV UMÍSTĚNÍ TRUBIC VE VRTU NA ÚČINNOST VRTU TYPU GLHE.....	20
2.3.5 DISIPATIVNÍ A ZÁSOBNÍKOVÉ SYSTÉMY.....	21
2.3.6 TEPELNÉ ZKOUŠKY VRTŮ METODOU DTRT.....	22
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	26
4 METODIKA	26
4.1 TEORETICKÁ ČÁST.....	26
4.1.1 ANALYTICKÉ METODY.....	27
4.1.2 NUMERICKÉ METODY.....	27
4.1.3 KOMBINACE NUMERICKÝCH A ANALYTICKÝCH METOD.....	28
4.1.4 TEORIE VEDENÍ TEPLA V OKOLÍ SVISLÉHO ZEMNÍHO VÝMĚNÍKU.....	28
4.1.4.1 ZJEDNODUŠENÉ FOURIERO-KIRCHHOFFOVY ROVNICE PRO 1D A 2D PŘÍPADY.....	33
4.1.4.2 NESTACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA $T = f(r, t)$	34
4.1.4.3 NESTACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA $T = f(r, \varphi, t)$	35
4.1.4.4 NESTACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA $T = f(r, z, t)$	36
4.1.4.5 LOKÁLNÍ PROCESY V BLÍZKÉM OKOLÍ U-TRUBICE.....	39
4.2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	42
4.2.1 CHARAKTERISTIKA MÍSTA MĚŘENÍ.....	42
4.2.2 ÚTLUMOVÁ HLOUBKA.....	46
4.2.3 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA A PODOBNOSTNÍ KRITÉRIA.....	48
5 VÝSLEDKY A DISKUZE.....	53
5.1 PRŮBĚH TEPLŮT V OKOLÍ VRTŮ VYSTROJENÝCH JEDNODUCHOU U-TRUBICÍ.....	53
5.2 PRŮBĚH TEPLŮT V OKOLÍ VRTŮ VYSTROJENÝCH DVOJITOU U-TRUBICÍ.....	63
5.3 TEPLŮTNÍ PROFILY VRTŮ.....	72
5.4 PRŮBĚH TEPLŮT V OKOLÍ VRTŮ PODLE ROVNIC VOLNÉHO NETLUMENÉHO KMITÁNÍ.....	78

5.5 POPIS PRŮBĚHU REGENERACE VRTU VT1.....	83
5.6 TEPLoty TEPLONOSNÉ SMĚSI.....	86
5.7 VÝKONY VRTŮ VYSTROJENÝCH JEDNODUCHOU U-TRUBICÍ.....	90
5.8 VÝKONY VRTŮ VYSTROJENÝCH DVOJITOU U-TRUBICÍ.....	93
6 ZÁVĚR.....	96
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	99
8 SEZNAM OBRÁZKŮ.....	104
9 SEZNAM TABULEK.....	107

1 Úvod

Ceny tradičních zdrojů energií dlouhodobě rostou neúměrně nahoru a do budoucna je nutné počítat s tím, že tomu nebude jinak. Jedinou obranou proti vysokým platbám za plyn nebo elektřinu je snížení své závislosti na monopolních dodavatelích těchto energií. Veškeré grafy znázorňující závislost ceny (ropy, uhlí, plynu) na čase, mají vzestupnou tendenci a proto je tento fakt nepopíratelný. V posledních dvou letech cena ropy stagnovala a pohybovala se mezi 90 a 125 dolary za barel. V roce 2014 se s tímto trendem počítá i nadále. Tento fakt je způsoben tím, že ve Spojených státech došlo k prudkému zvýšení produkce, státy patřící do společnosti OPEC (Irák, Irán, Alžírsko, Angola, Indonésie, Nigérie, Saudská Arábie, Katar, Kuvajt, Libye, Spojené arabské emiráty, Venezuela) uvolnily ropu ze svých strategických rezerv a došlo k prudkému zvýšení produkce v Saudské Arábii. Napříč těmito faktům i cena ropy jako strategicky nejdůležitějšího zdroje energie z dlouhodobého hlediska roste a poroste i nadále.

Stejně jako v ostatních odvětvích národního hospodářství jsme také i v zemědělství pod tlakem požadavků na ochranu životního prostředí nuceni zaměřit se na realizaci energetických systémů, které využívají alternativní zdroje energie. Tento bod se státům Evropské unie daří plnit. Například Česká republika se zavázala, že do roku 2010 bude podíl obnovitelných zdrojů energie na výrobu elektřiny dosahovat hodnoty 8 %. Tento údaj byl splněn nejen v České republice, ale i v řadě jiných státech evropské unie. Dále tento fakt potvrzují výsledky evropské agentury pro životní prostředí (EEA – European Environment Agency), které říkají, že emise skleníkových plynů v Evropské unii poklesly v roce 2011 o 2,5 %. Tento jev můžeme z části přičíst k progresivnímu využívání alternativních zdrojů energie.

Je důležité si uvědomit, že objem tradičních zdrojů energie (ropa, uhlí, plyn) uložených v Zemi je konečný a tedy je potřeba těmito zdroji šetřit. I toto je pádným argumentem pro rozšíření technologií využívající obnovitelné, alternativní zdroje energie.

Bohužel proti využívání obnovitelných zdrojů pro výrobu volné energie, tedy energie, která byla získána z nějakého druhu menšího množství energie stojí čtyři faktory, které vývoj těchto technologií brzdí.

Prvním odpůrcem, který způsobuje odkládání dostupnosti takových zdrojů jsou nejzamožnější rodiny světa, vlastníci centrální banky. Jejich motivací je hrabivost a neukojitelná potřeba ovládat vše, vyjma sama sebe. Kdyby se totiž objevil úplně nezávislý

zdroj (energie), mnohé v ekonomice by se rychle změnilo. Pokud by podniky nebo dokonce nějaký stát mohl těžit tímto stylem z doslova volného kapitálu, zbavil by se závislosti na půjčkách od bank a „škrcení“ prostřednictvím úrokových sazeb by bylo neefektivní. Zdržování vývoje nových technologií je dosahováno skupováním a blokadami technologických patentů.

Druhým faktorem usilujícím o neustálé odkládání veřejné dostupnosti volné energie jsou národní vlády. Jedná se doslova o samotnou bezpečnost státu. Technologie, která by poskytovala bezplatnou energii všem je nejhorší scénář všech vlád světa. Totiž přístup ke zdroji neomezené energie vede k nevyhnutelnému přeskupení „rovnováhy sil“ na celé planetě. To by v konečném důsledku mohlo vést k válce, za účelem zabránit „těm ostatním“ v získání výhody neomezené hojnosti poskytované takovým to zdrojem. Obráné prostředky jsou zejména, prevence patentů, úpravy zákonů a obtěžování vynálezců daňovými revizemi. Tato druhá síla se projevila nedávno v září 2012 formou vládního návrhu zákona, kterým se změnil zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, který mimo jiné říká, že zhotovení solární elektrárny pro osobní využití je nelegální činnost a za tento přestupek hrozí pokuta až 100 000 Kč. Tato úprava zákona zavádí tzv. „Osobu oprávněnou provádět instalaci vybraných zařízení využívajících energii z obnovitelných zdrojů“, dle které a až na její pokyn si bude teprve možné takovýto systém postavit.

Třetím faktorem způsobující odklady veřejné dostupnosti volné energie je skupina domnělých vynálezců, jednoznačných podvodníků a nepoctivých. Tito lidé, se svými „zázračnými stroji“, které povětšinou nemají ani správné teoretické základy, škodí svojí neznalostí a snaží se zbohatnout na důvěřivosti lidí a na pojmu volná energie. Příčiny tkví v sebezveličování a falešném sebevědomí. Tito lidé toho dosahují pomocí lží, podvodů, arogancí, často v kombinaci s chatrnými znalostmi.

Čtvrtou okolností, která brání zveřejnění zdrojů laciné energie, jsme my všichni. Jde o jakousi kombinaci pohodlnosti, nenáročnosti, nevědomosti a strachu ze změny. Tato kombinace nechává člověka v apatii v otázkách nových technologií využívající volnou energii a svým způsobem brání jejich rozšíření a odkrytí široké veřejnosti.

Jedním ze zařízení na výrobu volné energie, které dnes můžeme vlastnit je tepelné čerpadlo. Tepelné čerpadlo je technické zařízení sloužící k vytápění, ale i k chlazení rodinných domů, bytových domů, technologických zařízení, hal, škol, atd. V současné době většina tepelných čerpadel pracuje s kompresory poháněnými elektrickou energií. Tepelné čerpadlo umožňuje získávat teplo z tzv. nízkopotenciálních zdrojů. Takovým zdrojem může

být např. voda v řece, země nebo i okolní vzduch. Všechny tyto zdroje mají obvykle nižší teplotu než je ta, která je potřeba pro topný systém, avšak tepelné čerpadlo z nich dokáže pomocí cyklu komprese a expanze plynu získat teplo a vytvořit teplotu topné vody kolem 55 °C. Vzhledem ke svému principu, kdy pro daný tepelný výkon spotřebují 1/2 až 1/6 elektrické energie a zbývající část 1/2 až 5/6 získávají z okolního prostředí (země, voda a vzduch), je lze zařadit mezi technologie využívající alternativní zdroje energie.

2 Současný stav řešené problematiky

Z literatury vyplývají následující vědecké poznatky z oboru geotermální energie a technologická řešení tepelných čerpadel u kterých je kladen důraz na jejich primární strany, především na vertikální zemní výměníky. V závěru této kapitoly jsou popsány tepelné procesy probíhající mezi teplonosnou kapalinou a okolní horninou.

2.1 Geotermální energie

Země je „tepelný motor“. Součástí tohoto tepelného motoru jsou hmota a energie. Tyto dva prvky se podílejí na jejím provozu a vyskytují se v různých formách. Hlavní materiál, který je obsažen v tomto „motoru“ jsou horniny. Tyto horniny zajišťují přenos tepelné energie a mohou se vyskytovat v pevné nebo částečně roztavené podobě. Geotermální energii Země lze tedy považovat za soubor vzájemně propojených částečně izolovaných „tepelných motorů“ (Elder, 1981).

Tato tepelná energie země pochází z mnoha zdrojů. Těmi nejvýznamnějšími zdroji je původní teplo zemského tělesa, které zbylo z kosmické etapy jeho vzniku a radioaktivní rozpadu minerálů, jako je draslík-40, thorium-232 a uran-238 (Delgado, 2010).

Dalšími zdroji tepelné energie Země jsou dle Myslila (2007) tyto:

- sluneční záření, je sice obrovským zdrojem tepelné energie, ohřívá však pouze povrch,
- tepelná energie vznikající přeměnou z kinetické energie při tektonických pohybech v zemské kůře,
- teplo vznikající stlačováním podložních vrstev vahou nadloží a náhlým uvolněním tlaků,
- energie pohlcených seizmických vln,
- fyzikálněchemické reakce, které uvolňují teplo, tedy reakce exotermní, je to běžná oxidace, při které se prvky slučují s kyslíkem a přecházejí z nižších mocností do vyšších,
- energie uvolňující se při dopadu meteoritů, zde se kinetická energie mění na tepelnou,
- energie slapových sil produkovaná třením vodních mas o sebe i o pevný zemský povrch.

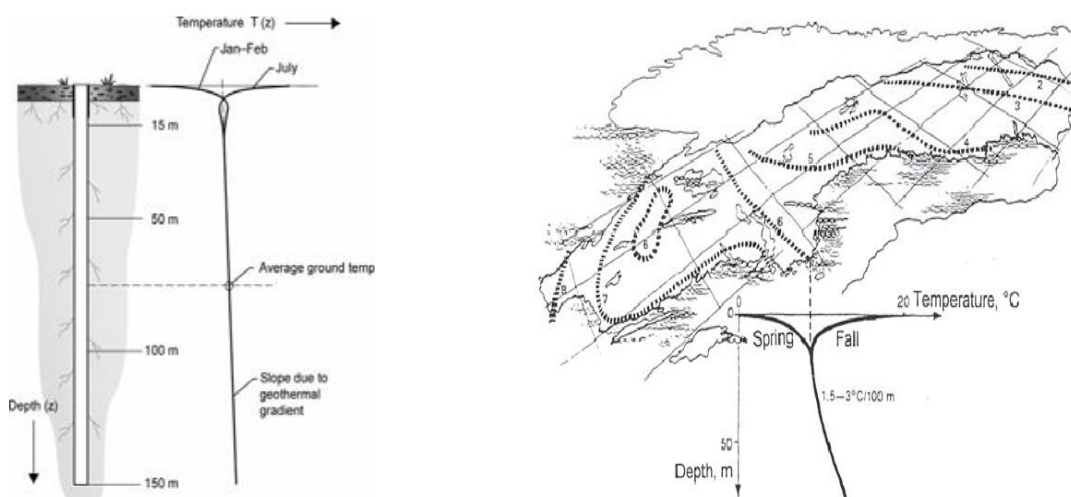
Geotermální energie je odvozena z neustálého tepelného toku pocházející ze Země, jeho celková hodnota se odhaduje na zhruba 30 TW, nebo v měrných jednotkách $82 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Laughton, 1990).

Existují však anomální oblasti zejména v okolí aktivních sopečných zón, kde horniny obsahují velké množství radioaktivních prvků s měrným tepelným tokem dosahujícím hodnoty až $150 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Tyto lokality vytvářejí příznivé podmínky k výstavbě geotermálních elektráren. Ve svrchní části zemské kůry stoupá její teplota podle geotermického stupně, tj. v průměru o $1 \text{ }^\circ\text{C}$ každých 33 m. V hloubce 3 km je to tedy asi $100 \text{ }^\circ\text{C}$ v hloubce 10 km již $300 \text{ }^\circ\text{C}$. To ovšem neplatí obecně. Tak například v České republice mají nejbližší, jen 5 km k horninám o teplotě $130 \text{ }^\circ\text{C}$ obyvatelé Teplic, Karlových Varů a Ostravy. Naopak obyvatelé Brna by museli k dosažení této teploty vrtat do hloubky 13 km (Kamínský a Vrtek, 1998).

Pro Evropu platí, že pod svrchními 10 až 15 metry zeminy, které slouží jako izolant exterierních klimatických podmínek, je teplota v průběhu roku relativně stabilní. Avšak od této hloubky do hloubky 100 metrů, teplota zeminy stoupá a tento jev bývá označován jako geotermický stupeň (Laporthe, 2004)

Autor Granryd (2005) uvádí geotermický stupeň pro Švédsko mezi $1,5$ až $3 \text{ }^\circ\text{C}$ na 100m. Toto reprezentuje Obr.1.

Obr. 1 Teplotní profil země a geotermický stupeň pro Švédsko



Zdroj: Granryd, E. *Refrigerating Engineering. Part II.* Stockholm, 2005.

Existují tři hlavní aplikace pro využití geotermální energie: jde o přímé vytápění, výrobu elektřiny a zdroj nízkopotenciální energie pro tepelná čerpadla země/voda. Přímé vytápění a aplikace tepelných čerpadel mají méně náročné požadavky na teplotu, což je hlavním důvodem, proč jsou úspornější a více rozšířené (Delgado, 2010).

O složení vnitřních částí země příliš mnoho přímých informací nemáme. Hluběji než důlní díla a vrty, k hlubším patřům zemské kůry, pronikají jen geofyzikální aparatury. O vlastnostech ještě hlubších částí Země se dovídáme jen z charakteru magnetického a gravitačního pole.

Tepelný potenciál zemského nitra odhaduje Myslík (2009) na 10^{17} megawattroků (MWr). To odpovídá práci stroje s příkonem 10^{17} megawatt při provozu jeden rok. Tato ohromná zásoba energie není samozřejmě stoprocentně využitelná, avšak přesto představuje energii, jejíž využití je v začátcích a v blízké budoucnosti o ní lidstvo bude bojovat.

2.1.1 Rozdělení geotermálních zdrojů dle exergie

Konkrétní exergie horninového masivu z geotermální stránky závisí na teplotě okolo zemního výměníku, tlaku a složení kapaliny v okolí výměníku a schopnosti okolní horniny nebo kapaliny převést tepelnou energii do výměníku. Čerpání geotermální energie z okolí zemního výměníku často mění tepelné nebo tekutinové vlastnosti okolí do nové rovnováhy v závislosti na metodě čerpání energie (Herman, 2006).

Geotermální zdroje byly rozděleny na zdroje s nízkou, střední nebo vysokou entalpií, podle jejich teploty zásobníku. Avšak tyto používané teplotní rozsahy jsou arbitrární a nejsou obecně dohodnuty. Teplota se používá jako zařazující parametr, protože to je veličina jednoduchá pro měření a pochopení. Kromě toho, určením samotné teploty či entalpie nemusí být jednoznačně vymezen geotermální zdroj, protože až určení dvou na sobě nezávislých veličin definuje termodynamický stav tekutiny. Geotermální energie je již ve formě tepla a z termodynamického pohledu, je práce mnohem užitečnější, než teplo, protože ne všechno teplo může být převedeno na práci. Proto by se geotermální zdroje měly zařazovat podle jejich exergie, čili jejich mírou schopnosti vykonávat práci (Hepbasli, 2006).

Autor Lee (2001) navrhl nový parametr, takzvaný specifický index exergie (SExI) pro lepší klasifikaci a hodnocení geotermálního zdroje (Hepbasli, 2006):

$$\text{SExI} = \frac{h_{brine} - 273,16s_{brine}}{1192} \quad (\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}) \quad (2.1)$$

Po dosazení parametrů h_{brine} a s_{brine} což jsou hodnoty entalpie a entropie použité

solanky, se dostaneme do určité oblasti Mollierova $h - s$ diagramu. Tyto oblasti jsou vymezeny přímkami $SExI = 0,5$ a $SExI = 0,05$. Jednotlivé oblasti pak klasifikují geotermální zdroj takto (Hepbasli, 2006):

- $SExI < 0,05$ pro nízko-potencionální zdroj,
- $0,05 \leq SExI < 0,5$ pro středně-potencionální zdroj,
- $SExI \geq 0,5$ pro vysoko-potencionální zdroj.

Abychom mohli dosadit parametry h_{brine} a s_{brine} , poslouží nám tyto vzorce (Hepbasli, 2006):

$$h_{brine} = \frac{\sum_i^n m_{wi} \cdot h_{wi}}{\sum_i^n m_{wi}} \quad (\text{kJ.kg}^{-1}) \quad (2.2)$$

$$s_{brine} = \frac{\sum_i^n m_{wi} \cdot s_{wi}}{\sum_i^n m_{wi}} \quad (\text{kJ.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2.3)$$

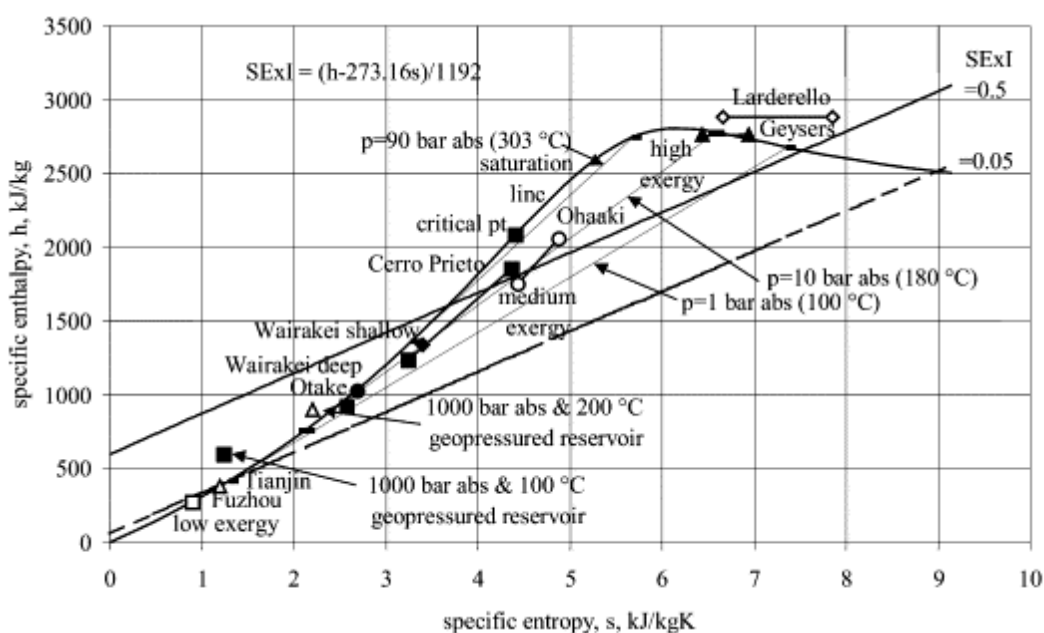
kde: m_{wi} – hmotnostní průtok solanky (kg.s^{-1})
 h_{wi} – entalpie solanky (kJ.kg^{-1})
 s_{wi} – entropie solanky $(\text{kJ.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

Podle výše uvedeného postupu dostaneme konkrétní index exergie (SEI), který nezávisí na tlaku kapaliny a hloubkových podmínkách. V této souvislosti byl vytvořen graf (Obr.2) pro rychlé určení vydatnosti geotermálního zdroje podle specifického indexu exergie (SEI), který využívá konstrukci Mollierova $h - s$ diagramu. Z konstrukce diagramu lze k dvěma libovolným nezávislým termodynamickým vlastnostem tekutiny (p, T, H, S, X, V), snadno určit specifický index exergie (SEI), čímž klasifikujeme geotermální zdroj odpovídajícím způsobem. (LEE, K. C. 2001).

Výše uvedený postup a klasifikace geotermálních zdrojů byla již použita některými vědci ve svých studiích. Analýza exergie byla provedena v okresním městě

Ahuachapa'n (nachází se na západě Salvadoru) a v Berlíně. Vynesení termodynamických podmínek pro obě oblasti do Mollierova $h - s$ diagramu a výpočtu konkrétního indexu exergie, byla obě území klasifikována jako středně-potencionální zdroje geotermální energie. Dále byl použit specifický index exergie na Balcovu oblast, která se nachází v západní části Turecka. Data z této oblasti se měřila v osmi studních, které se v této oblasti vyskytují a v danou chvíli byly v provozu. Pomocí výše uvedených rovnic byla tato oblast shledána jako středně-potencionální, jelikož $SExI$ bylo 0,07. Ozgener a kol. určuje také $SExI$ hodnoty pro geotermální oblasti v Turecku Gonen a Salihli, jako 0,025 a 0,049. Těmito hodnotami se oblasti řadí do nízko-potencionálních geotermálních zdrojů (Hepbasli, 2006).

Obr. 2 Diagram pro klasifikaci geotermálních zdrojů dle specifického indexu exergie (SEI)



Zdroj: LEE. K, C., *Classification of geothermal resources – an engineering approach*. Geothermal Institute The University of Auckland, Private Bag 92019 Auckland, New Zealand. 1996.

2.1.2 Tepelné vlastnosti hornin

Základními tepelnými vlastnostmi hornin jsou tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) – což je schopnost výměny tepla mezi sousedními částicemi horniny, objemová tepelná kapacita $C = c \cdot \rho$ ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) - schopnost jednotkového objemu horniny pohlcovat a vyzařovat tepelnou energii (c = specifické teplo horniny ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ρ = hustota horniny ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)) a teplotní vodivost (tepelná difuzivita) a ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) - charakterizující rychlost šíření teplotních změn.

Protože hornina je nehomogenní trojfázový systém, má jiné tepelné vlastnosti rozlehlý skalní blok, jiné jeho část ležící mezi největšími puklinami a jiné z ní odebrané vrtné jádro. Tepelná a teplotní vodivost horniny závisí kromě petrografického typu, porózy a vlhkosti i na jejím prostorovém uspořádání, proto má velký rozptyl a je v každém směru jiná (Čížek, 2005).

Tepelná vodivost pro některé horniny a zeminy podle Mareše jsou uvedené v tab. 1

Tab. 1 Tepelná vodivost hornin

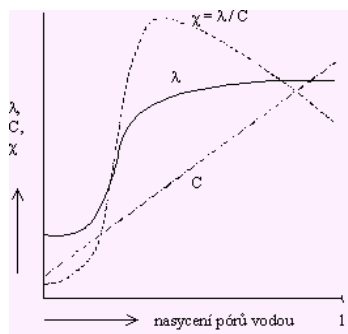
		λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]		
		od	do	
horniny	vyvřelé	granit	2	4
		syenit	1,6	3,3
		diorit	1,9	2,8
		gabro	2,2	2,4
	metamorfované	břidlice	1,3	2,1
		rula	1,7	3,3
		amfibolit	1,9	2,4
	usazené	vápenec	0,8	3
		dolomit	0,8	4,5
		pískovec	0,8	7,1
		prachovec	1,5	2,5
		jílovec	1,8	2,8
		písek	0,3	3,5
jíl	0,4	1,2		

Zdroj: Mareš, S., a kol. *Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii*. SNTL, Praha, 1983. 23-25 s.

Tepelná vodivost je u půd charakteristika závislá na mineralogickém složení, obsahu humusu, vlhkosti a na textuře a struktuře půdy. Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti θ vyplývá ze schematického obr. 3. Při velmi nízké vlhkosti se přenáší teplo na bodových kontaktech vodivých elementů (látek s vysokou hodnotou λ). Při vzniku vodních filmů se

objeví prudký vzrůst dotykových ploch a λ rychle vzrůstá s vlhkostí. Při dalším zvyšování vlhkosti jen pozvolně vzrůstají dotykové plochy a při vysoké vlhkosti je vzrůst λ způsobován pouze zmenšením obsahu vzduchu (Kutílek, 1978).

Obr. 3 Obecná závislost tepelných charakteristik na vlhkosti půdy θ

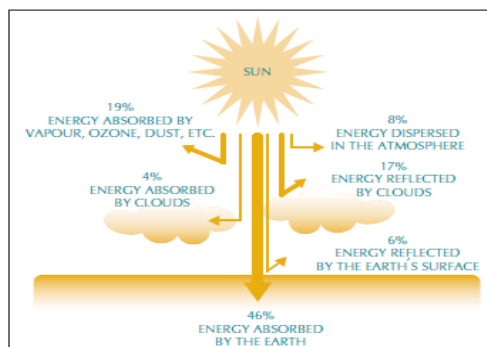


Zdroj: Kutílek, M.. Vodohospodářská pedologie. SNTL, Praha, 1978. 90 s.

2.1.3 Sluneční záření a geotermální energie

Zemní resp. horninové tepelné výměníky mohou využívat dva zdroje energie. Prvním z nich je teplo dodané slunečním zářením. Tento zdroj využívají zejména horizontální zemní výměníky. Druhým zdrojem je geotermální energie. Tento zdroj využívají především hlubinné vrty. Solární energie je trvalým přínosem tepla. Záření dopadající po prostupu tepla na zemský povrch se z části odráží a z části pohlcuje (obr.4).

Obr.4 Rozdělení sluneční energie



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

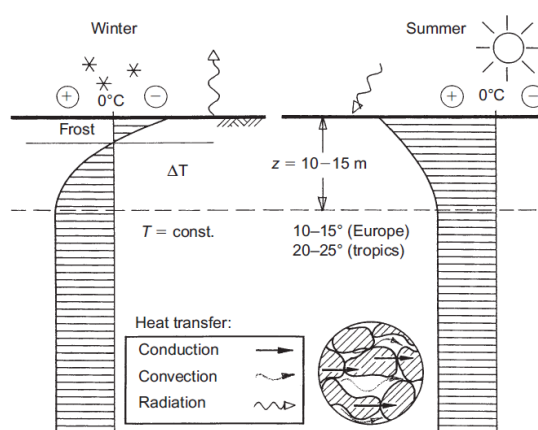
Při dopadu se 46 % slunečního záření přeměňuje přímo na tepelný výkon, 19 % je pohlceno parami, ozonem, prachem atd., 6 % se odrazí od zemského povrchu, 17 % se odrazí od mraků, 4 % mraky absorbují a 8 % se rozptýlí v atmosféře (*Commercial Earth Energy Systems, 2002*).

Sluneční záření dopadající na povrch země však proniká velmi mělce a hloubka tohoto průniku závisí na tepelných vlastnostech hornin, hloubce hladiny spodní vody a na reliéfu území (Mach, 2005).

Sluneční záření dodává na povrch Země v našich podmínkách přibližně 100 až 800 W.m⁻². Toto teplo proniká jen mělce pod povrch. Při teplotě 20 °C na povrchu a 10 °C v hloubce 2 m se do hloubky 1 m pod povrch dostává jen 0,08 W.m⁻², do hloubky 2 m jen 0,04 a do hloubky 4 m pouze 0,01 W.m⁻² (Myslil a kol., 2007).

K obdobným závěrům dospěli i autoři Brandl a Omer. Ve většině regionů Evropy zůstávají sezónní teploty země relativně neměnné od hloubky 10-15 m. Hodnoty mezi 10 °C a 15 °C převládají do hloubky asi 50 m (obr. 5). Tyto teploty umožňují ekonomické vytápění a chlazení pomocí termo-aktivních pozemních staveb a představují ideální podmínky pro tepelná čerpadla. V tropech se konstantní teplota země v hloubce více než 10-15 m pod povrchem pohybuje mezi 20 °C a 25 °C (místy až 28 °C), které ještě umožňují chlazení budovy.

Obr. 5 Přenos tepla a geotermální situace v daných hloubkách



Zdroj: Brandl, H. *Energy foundations and other thermo-active ground structures.*

Geotechnique, 56, 2, 2008. 90 s.

2.2 Tepelné čerpadlo ZEMĚ – VODA

Systém tepelného čerpadla ZEMĚ-VODA je jedním ze systému čerpání nízkopotenciální volné energie z okolního prostředí. Podle toho z jakého prostředí je tepelná energie získávána dále rozlišujeme systémy VZDUCH-VODA, VODA-VODA. Tepelná energie obsažená v zemi - tzv. geotermální teplo - se využívá nepřímo. Získává se ve výměníku tepla - zemním kolektoru, nebo zemním vrtu a převádí se cirkulačním okruhem do výparníku tepelného čerpadla pomocí teplonosné kapaliny. Používaná teplonosná kapalina je nemrznoucí a ekologicky nezávadná. Cirkulaci teplonosné kapaliny zajišťuje oběhové čerpadlo. Cirkulující kapalina se ve výparníku tepelného čerpadla ochlazuje a v zemním kolektoru se znovu ohřívá geotermálním teplem. Výhodou tohoto systému je stálý výkon tepelného čerpadla, nevýhody pak vysoké pořizovací náklady, vysoké nároky na technické řešení kolektoru, teplota primárního okruhu - vertikální kolektor cca 0 °C, horizontální kolektor cca -3 °C, vliv na vegetaci na povrchu kolektoru v případě špatného nadimenzování.

Využití nízkoteplotního geotermálního potenciálu, který je dosažitelný v malých hloubkách pod zemským povrchem z podzemní vody a nebo mělkými geotermálními vrty na "suché" zemské teplo, hlubokými jen desítky nebo stovky metrů, je možné prakticky v neomezeném množství. Tyto vrty totiž odebírají zemské teplo, které jinak uniká do atmosféry (Myslil a kol., 2007).

Uplatnění tepelných čerpadel umožňuje využití ekologického zdroje energie, i když potřebuje dodávat cca 1/3 vyrobené tepelné energie, je přesto již v současné době i ekonomické.

Při využití tepla podzemní vody je nutné potvrdit hydrogeologickým posouzením množství čerpané podzemní vody, její chemismus, plošný rozsah odběru vody (neovlivnění stávajících využívaných zdrojů vody) a fyzikální hodnoty pro správný chod tepelného čerpadla. Pro využití "suchého" zemského tepla je nutné správně ocenit teplotní poměry každé lokality a zajistit ochrannou vzdálenost konstantního odběru tepla každého geotermálního vrtu (Myslil, 2009).

Podle Myslila (2009) Česká republika zaostávala ve využití nízkoteplotních zdrojů za okolními západoevropskými státy, kde je v chodu několik set tisíc tepelných čerpadel, zatímco u nás jen cca 12 tisíc s průměrnou hodnotou 10 kW, představuje již potenciál 1,2 MW.

Uplatnění geotermální energie pro vytápění rodinných domů či jiných objektů nevyžaduje velké prostory kotelny, tepelné čerpadlo je objemově velké jako lednička. Při současném dodržení teplotních norem objektů je významně snížena potřeba tepla a tudíž i velikost tepelného čerpadla. Geotermální systém vytápění objektů uspoří 2/3 energie a tudíž i návratnost vložených finančních prostředků je velmi příhodná. Odběr tepla ze země nebo z vody nijak neovlivní přírodní životní prostředí, ani nenaruší budovy či zahradu, protože primární zdroj je celý pod zemí. V každém případě je nutné volit nejvhodnější řešení pro odběr zemského tepla, aby geotermální zdroj byl správně posouzen. Odběr zemského tepla plošnými či svislými vrtnými kolektory nijak teplotně nenarušuje tepelnou bilanci, protože jen zrychlí tepelný tok v povrchových částech zemské kůry, která je hlavním zdrojem tepla pro tepelné čerpadlo (Myslil, 2009).

U tohoto systému se využívají dva zdroje nízkopotenciální tepelné energie:

- zeminy: jedná se o horniny do hloubky cca 2m
- horniny: jedná se o hloubkové vrty do hornin

2.3 Vertikální zemní výměníky jako zdroj energie

Využití hornin jako zdrojů tepla je velmi rozšířené po celém světě, zvláště pak v USA, Švédsku, Švýcarsku a Německu. Vrty (obr. 6) jsou prováděny do hloubek většinou do 150m, s aplikací finančně náročnějších technologií vrtání až 300m (Skandinávie, západní Evropa) (Ryška, 2006).

Trubka je obvykle vyrobena z plastu polyethylenu nebo mědi. Tyto materiály umožňují účinný přenos tepla z půdy do média. Svislá potrubí mohou dosahovat hloubky přibližně 150 až 300 m. Připomeňme si, že se zvyšující hloubkou se nejenom zvyšuje teplota, ale stává se stále více stabilnější. Tato skutečnost činí vertikální potrubní systémy mnohem účinnější než horizontální.

Tepelná čerpadla se systémem země/voda s použitím hloubkových vrtů jsou zvláště výhodná pro větší stavební objekty (školy, nemocnice, domovy důchodců, penziony, hotely, apod.). U těchto typů objektů všechny výše uvedené systémy většinou vykazují četná omezení, a to z hlediska (Ryška, 2006):

- přírodních podmínek (např. nízká teplota vzduchu v zimním období, požadavek na

vysoký a stálý přítok podzemní vody nelze na většině pozemků splnit),

- technických požadavků (stálý topný faktor, instalace tepelného čerpadla nesmí narušovat vzhled budovy nebo pozemku),
- velikosti pozemku, která je k dispozici.

Obr. 6 Schéma napojení hloubkových vrtů pro tepelné čerpadlo



Výhody:

- téměř stabilní topný faktor tepelného čerpadla bez ohledu na klima nebo střídání ročních období (nelze použít pouze v oblastech s permafrostem až stovky metrů hluboko - např. Sibiř, Kanada),
- výskyt podzemní vody není podmínkou fungování této aplikace,
- primární výměník z polyetylenových trubek je zapouštěn do hloubkových vrtů, jejichž nároky na velikost pozemku jsou velmi nízké,
- nejuniverzálnější použití - nejsou vázány na žádné specifické geologické/hydrogeologické podmínky.

Nevýhody:

- relativně nejvyšší investiční náklady z důvodu realizace vrtů,
- některé pozemky jsou nedostupné z hlediska dojezdu vrtné techniky,
- vrty pro tepelné čerpadlo nelze realizovat tam, kde jsou pozemky legislativně chráněny (např. lázně, vodní zdroje pro hromadné zásobování obyvatel vodou, podzemní přivaděče vody, důlní díla).

Při přenosu tepla vzniká na vnitřním tepelném odporu vrtu teplotní rozdíl, o který se zmenší rozdíl teplot mezi stěnou vrtu a okrajem tepelně neovlivněné horniny. Tím se snižuje výměna tepla mezi horninou a vrtem, zvětšuje se jeho potřebná délka a narůstá cena počáteční investice nutné k pořízení systému země–voda. Protože vysoké ceny odrazují potenciální zákazníky, je snaha jednotlivé složky vnitřního odporu vrtů co nejvíce omezit. V ČR se většinou používají jenom BHE (Borhole Heat Exchanger – dále jen BHE) s jednoduchým, anebo dvojitým U-smyčkovým kolektorem v zaplněném stvolu, ale jejich škála je mnohem větší. V zásadě se konstrukční systémy BHE rozdělují na otevřené a uzavřené (Čížek, 2012).

2.3.1 Otevřené systémy

Otevřený systém používá vodu ze země, jezera, řeky, jako zdroj tepla. Tato voda je čerpána přímo do tepelného čerpadla. Po předání tepelné energie je tato voda vypuštěna zpět do jezera nebo řeky (obr.7). Hlavní výhodou tohoto uspořádání je skutečnost, že teplota vody je mnohem vyšší (4-5 °C). Velkou nevýhodou tohoto systému je hlavně koroze kovových částí výměníků (nutnost použití nerezových materiálů) a nečistoty (písek, štěrk, atd.), které jsou unášeny čerpanou vodou a které se mohou dostat do čerpadla a zanášet výměníky (Delgado, 2010).

Obr. 7 Schéma napojení otevřeného systému na tepelné čerpadlo



Obdobně lze přehřívat či předchlazovat okolní vzduch. Okolní vzduch prochází přes trubky uložené v zemi a potom je ohřát nebo ochlazen klimatizační jednotkou na požadovanou teplotu a vháněn do budovy.

2.3.2 Uzavřené systémy

Tento druh systému zapojení získává teplo ze země pomocí sekundární kapaliny, která cirkuluje v zemním výměníku. Jelikož se jedná o uzavřený systém a k čerpání energie dochází přestupem mezi okolní horninou/vodou přes uzavřený zemní výměník do sekundární kapaliny, nedochází k zanášení výměníků tepelného čerpadla, korozi a mechanickému poškození jako u otevřených systémů. V tomto ohledu je toto zapojení bezpečnější a výkon tepelného čerpadla je stabilnější. Oproti otevřeným systémům jsou však teploty primární strany zpravidla nižší.

2.3.3 Rozdělení tepelných vrtů podle konstrukce

Podle výměňkových kanálů se tepelné vrtů rozdělují na 4 hlavní druhy: GLHE (U smyčkové – Ground Loop Heat Exchangers), TIL (koaxiální mnohasmyčkové se společným tepelně izolovaným středem - Thermal Insulated Leg), koaxiální trubkové, koaxiální s kolmatovanou horninovou stěnou a SCW (se stálým vodním sloupcem – Stab Water Column). Názorně to ukazuje tabulka 2.

Tab. 2 Rozdělení tepelných vrtů

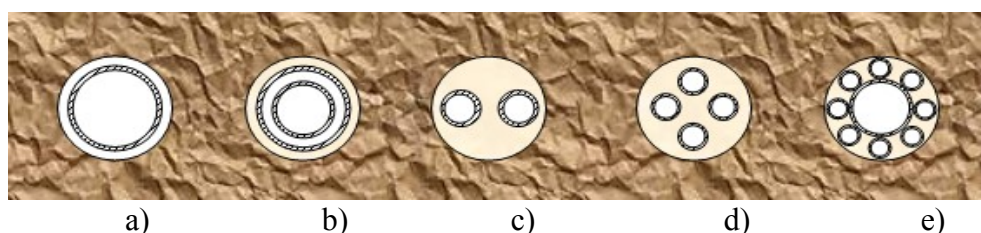
Systémy	Druh vrtaného podzemního výměníku (BHE)			Teplonosné médium	
	typ	výplň vrtu	materiál kolektoru		
Uzavřené	GLHE	bez výplně	podzení voda	HD PE	nemrznoucí směs
		se zaplněným stvolem vrtu	vrtná drť nebo injektáž	HD PE	nemrznoucí směs
			injektáž	Cu	chladivo tep. Čerpadla
	koaxiální uzavřené	TIL	HD PE, PE	nemrznoucí směs	
		trubkový	HD PE	nemrznoucí směs	
Otevřené	koaxiální otevřené	s kolmatovanou horninovou stěnou		pitná voda	
	SCW	bez odpouštění vody		podzemní voda	
		s odpouštěním vody			

Zdroj: Čížek, P. Základní vlastnosti vrtů pro tepelná čerpadla [online]. 5. listopadu 2012 [cit 2011-2-15]. Dostupné z <<http://www.tzb-info.cz/9245-zakladni-vlastnosti-vrtu-pro-tepelna-čerpadla>>

Typ GLHE (Ground Loop Heat Exchangers)

Vrty GLHE jejichž půdorys je zobrazen na (obr. 8) varianta c, d, jsou ve světě nejrozšířenější. Tepelný výměník tvoří jedna nebo dvě U smyčky vytvořené z dvojice polyetylenových trubic, dole spojených propojkou tvaru U. Protože souběžně vedené trubice U smyčky představují proti sobě protiproudý výměník, je výměna tepla takového vrtu s horninou nesymetrická. Asi 75 % užitečné výměny tepla probíhá již v jeho sestupné trubici, ale ta musí vyměnit více tepla, nežli je celý výsledný výkon vrtu. Může za to přenos tepla mezi trubicemi v horní části vrtu. (Acuna, Palm, 2010).

Obr. 8 Nejčastější půdorysné uspořádání výměňkových kanálů v BHE. a) otevřený koaxiál, b) uzavřený koaxiál, c) jednoduchá U smyčka, d) dvojitá U smyčka, e) mnohosmyčkový koaxiál TIL.

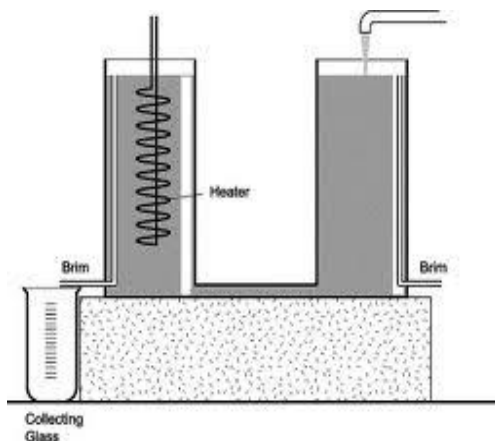


Zdroj: ČÍŽEK, P. Základní vlastnosti vrtů pro tepelná čerpadla [online]. 5. listopadu 2012. Dostupné z <<http://www.tzb-info.cz/9245-zakladni-vlastnosti-vrtu-pro-tepelna-cerpadla> >

Autoři (Gehlin a Hellström, 2002) popisují využití **nevyplněných GLHE vrtů** a tzv. princip termosifonu. Ve Švédsku, v pevných skalních horninách s jednotnou zvodní s hladinou mělce pod terénem, se většinou nechávají trubice volně viset ve vodě ve vrtu. Při takovém uložení trubic je však nutné horní část vrtu spolehlivě a bezpečně zapažit, aby nedošlo ke zborcení vrtu. Při provozu takových vrtů se pozitivně uplatňuje vysoká tepelná kapacita vody vyplňující vrt, která vyrovnává teplotní nerovnoměrnosti při čerpání tepla a princip tzv. termosifonu. Termosifon (obr. 9) podstatně zlepšuje účinnost tepelného vrtu při ukládání tepelné energie (chlazení budovy). Termosifon vznikne tlakovým rozdílem, který je vytvořen rozdílem teploty vody která vyplňuje vrt a teplotou podzemní vody uvnitř vzdálenější, tepelně méně ovlivněné horniny. Voda ve vrtu, ohřátá trubicemi (chlazení), anebo naopak ochlazená (topení) pod/nad +4 °C, odtéká z horní části vrtu do horniny, jelikož je vytlačována těžší okolní podzemní vodou, která se tlačí do spodní části vrtu. Při topném módu

tepelného čerpadla je zlepšení účinnosti vrtu termosifonovým efektem mnohem méně markantní, nežli při ukládání tepla, protože kolem +4 °C, jsou rozdíly v hustotě vody mnohem menší, nežli při jejím ohřátí.

Obr. 9 Laboratorní model termosifonu



Zdroj: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148103001290>

Za výhodu těchto vrtů lze označit i možnost výměny trubíc po skončení jejich životnosti. V podmínkách České republiky je možné U smyčkové vrty s vodní výplní použít jenom výjimečně, ve většině případů by došlo k propojení různých útvarů podzemní vody které mění vodní poměry, ohrožuje podzemní vodu kontaminací a v mnoha případech osuší blízké studny. Tam, kde se naskytne k provedení takového vrtu příhodný terén, je nutné zajistit rozvětralý vršek vrtu až do čerstvé skály zacementovanou silnostěnnou zárubnicí z PVC. Do ní se zapustí jednoduchá U trubice z materiálu PE-RC rezistentního proti protlakům trhlínám, vybavená rozpěrkami, které její větve přidržují u protějšších stěn vrtu. Rozpěrky mohou ve vodě zkrátit nutnou délku vrtu až o 30 % (Čížek, 2012).

Ve světě jsou U-trubice ve **vyplněných GLHE** tepelných vrtech nejčastěji utěšňovány injektáží bentonitu, čistého cementu, anebo jejich směsí. Jedná se o hydraulické pojivo s optimalizovanou tepelnou vodivostí a vysokou odolností proti vlivům prostředí. Jednak zvyšuje účinnost tepelného čerpadla díky lepšímu přenosu tepla z horninového prostředí a především spolehlivě těsní konstrukci vrtu a zabraňuje nežádoucím hydrogeologickým změnám.

Typ TIL (Thermal Insulated Leg)

Snaha o snížení ztrát tepla na nechtěném vnitřním protiproudém tepelném výměníku, který vzniká u vrtů GLHE mezi vzestupnou a sestupnou trubicí, vedla k návrhu tepelných vrtů TIL, jejichž půdorys je znázorněn na (obr. 8) varianta e. Někdy jsou řazeny mezi koaxiální vrty, protože v jejich ose je široká středová tepelně izolovaná „noha“. Z její paty vycházejí aktivní tenčí trubice, které stoupají k terénu kolem stěny vrtu a rovnoměrně ji obklopují. Tím se potlačuje nežádoucí výměna tepla uvnitř vrtu a zmenšuje se tepelný odpor mezi vnější stěnou aktivních trubic a horninou (Čížek, 2012).

Hlavní nevýhodou tohoto typu konstrukce vrtu je komplikovaná montáž a s tím spojené vysoké finanční náklady. Oproti typu GLHE je tento typ konstrukce náchylnější k poruše díky množství tenkých obvodových trubic.

Typ uzavřený trubkový koaxiál

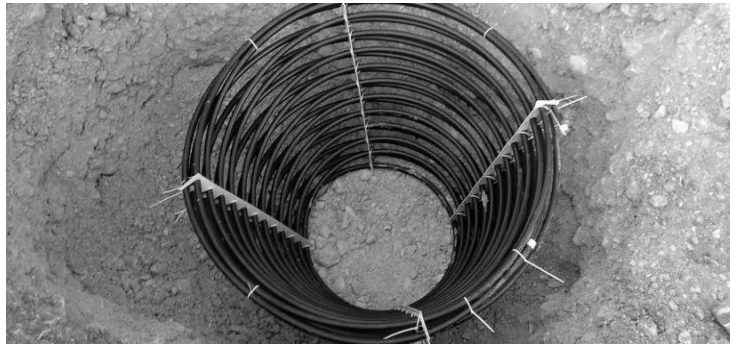
Koaxiální vrt Groundhit, na jehož vývoji a zkoušení participovala Evropská Unie, se snaží prosadit ještě snadnější montáží, než jakou vyžadují U smyčky. Do vyhloubeného vrtu se pomocí závaží, anebo pažicím zařízením vrtné soupravy, zatlačí vnější trubice 63 × 5,3 mm, uzavřená dole zapouštěcí hlavicí. Vrt je tím zajištěn a vrtná souprava s ním už nemusí ztrácet drahocenný strojní čas: okamžitě jede jinam, hloubit další vrty. Teprve až se to hodí, přijedou montéři a vrt dokončí: do již zapuštěné vnější trubice odvinou vnitřní trubku 40 × 3,7 mm a nahoru přivaří přípojovací nástavec. Ochranu podzemní vody před kontaminací, ani odtěsnění jejich různých útvarů, tato technologie neřeší. Prostor mezi vnější trubicí a okolní horninou nechává volný, bez injektáže, která by ostatně obchodní výhody této metody zhatila (Čížek, 2012).

GEK (geotermální energetický koš)

Jako kompromis mezi vertikálním a horizontálním zemním výměníkem se podařilo vyvinout tzv. geotermální energetický koš obr. 10. Tato aplikace je vhodná tam, kde není prostor pro klasický horizontální výměník a není možné z jakéhokoliv důvodu provádět hlubinné vrty. Velmi dobrá účinnost je v oblastech s výskytem vyšší hladiny spodní vody. Horní průměr geotermálního koše bývá 2,4 m, dolní průměr 1,4 m a výška se pohybuje od 1,2 m do 2,7 m

Kónický tvar GEK umožňuje pro realizaci využít běžně dostupnou technologii bagru. Hloubené výkopy tak lze realizovat i v hůře soudržném podloží.

Obr. 10 GEK – geotermální energetický koš

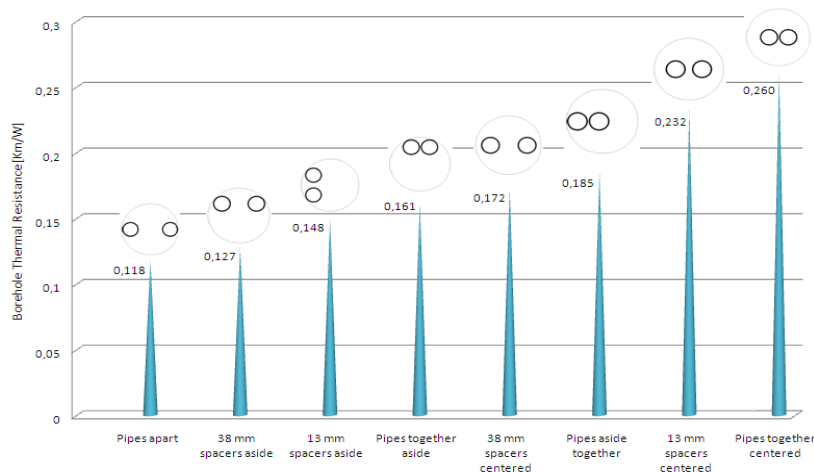


2.3.4 Vliv umístění trubic ve vrtu na účinnost vrtu typu GLHE

Uvnitř vrtu dochází k nežádoucí tepelné výměně mezi sestupnou a vzestupnou větví U-trubicového kolektoru. Tato výměna způsobuje velké ztráty výkonu a ty se projevují jako faktické navýšení vnitřního odporu vrtu. Výsledná hodnota odporu vrtu potom závisí nejen na použité výplňové směsi stvolu vrtu, ale i na tom, jak jsou ve vrtu kolektorové trubice umístěny.

Ze závěrů autorů (Acuna, 2010) vyplývá, že nejlepší umístění nastává, když jsou obě větve co nejdále od sebe (obr. 11). V tuto chvíli vrt dosahuje nejmenší hodnoty tepelného odporu o velikosti $0,118 \text{ K.m.W}^{-1}$. Tohoto umístění trubic je však v praxi těžké dosáhnout. Velmi dobrých čísel se rovněž dosahuje při použití 38 mm rozpěrek, navíc kdy obě trubice jsou vybočené mimo osu vrtu. Toto uspořádání trubic je v praxi pravděpodobnější a vrt dosahuje tepelného odporu o velikosti $0,127 \text{ K.m.W}^{-1}$. Je vidět, že nejhorších čísel tepelného odporu vrtu se dosahuje při svázaném zapuštění trubic, které jsou vycentrovány na střed vrtu.

Obr. 11 Velikost tepelného odporu v závislosti na zapuštění



Zdroj: Acuna, J., *Local Conduction Heat Transfer in U-pipe Borehole Heat Exchangers*. The Royal Institute of Technology KTH. Stockholm. Sweden

Při injektáži běžným bentonitem lze použitím rozpěrek zkrátit aktivní délku vrtu (t.j. délku vrtu pod hladinou hluboké podzemní vody) na 77 % délky, kterou by musely mít volně zapuštěné trubice, zatímco svázané trubice by musely být oproti volně zapuštěným trubicím o 25 % delší. Názory na rozpěrky trubic byly od počátku odtažité. Vrtařům přidělávají práci a ubírají metry a nejsou jim nakloněni ani mnozí američtí geologové. Zredukování vrstvy bentonitu mezi trubicí a okrajem tepelného vrtu podle nich příliš zvyšuje riziko kontaminace podzemních vod nemrznoucí směsí při protržení trubic. Příznivci rozpěrek na to namítají, že nelze očekávat, že by ve stometrovém vrtu mohly být volně zapuštěné trubice zainjektovány centricky a že by se měl do všech tepelných vrtů používat jediné speciálně větvený polyetylén odolný proti protlakům a proti vzniku a šíření trhlin (Čížek, 2012).

2.3.5 Disipativní a zásobníkové systémy

Disipativní systémy jsou navrženy pro maximální přenos tepla mezi zemním výměníkem a okolní horninou. Naproti tomu zásobníkové systémy, jsou navrženy tak, aby akumulovaly tepelnou energii v zemi v době přebytku energie a extrahovaly ji později.

Systémy, u kterých stálý přísun tepla nepřinese přirozenou cestou podzemní voda, a to nejen svým prouděním, ale i kondenzací vodní páry, se musí rozdíl mezi teplem odebraným za celý rok a jeho přirozeným přísunem uměle doplnit. Podle toho lze rozdělit zemní systémy

tepelných čerpadel na disipativní a akumulaci. Disipativní systémy čerpají rozptýlené zemské teplo a ukládané teplo rozptylují do horniny, zatímco pro akumulaci systémy se vytvářejí tepelné zásobníky s teplotou vysoko převyšující teplotu okolní horniny. Počet a rozmístění tepelných vrtů se musí řídit tím, o jaký systém půjde. U disipativních systémů je třeba provést nejlépe jenom jeden, anebo co nejméně vrtů a co nejdále od sebe, aby se co nejméně ovlivňovaly a za klidovou teplotu horniny se u nich obvykle považuje místní průměrná roční teplota vzduchu. Naproti tomu u akumulaci systémů je třeba vyplnit celou plochu tepelného zásobníku velkým množstvím vrtů, uspořádaných v pravidelných rozstupech několika málo metrů, a za klidovou teplotu horniny se u nich považuje místní průměrná teplota tepelného zásobníku. U obytných budov, kde bývá tepelná zátěž více homogenní a periodická nežli u veřejných budov, lze skutečné rozložení teplot kolem vrtu zjednodušit na čárový či válcový objekt s homogenní teplotou a teplotní reakci horniny na dlouhodobé tepelné pulzy v řádu měsíců odhadnout nějakou aplikací neustáleného proudění. Obvykle se k tomu používá metoda, založená na předpokladu konstantní teploty teplotnosného média během celého tepelného pulsu a svazek Eskilsonových standardních křivek, vyjadřujících pro různá uspořádání vrtů změnu teploty jejich stěny v bezrozměrném čase. I zde se ale musí brát v úvahu tektonika území, protože skalní pukliny jsou zpravidla preferenční cestou podzemní vody a ta může odnosem tepla blízké vrtů od sebe oddělit a vzdálené naopak tepelně propojovat (Čížek, 2012).

2.3.6 Tepelné zkoušky vrtů metodou DTRT

Při umístění většího počtu vrtů a pro velmi výkonná tepelná čerpadla by se měl vždycky provádět geologický průzkum, zaměřený na zjištění nejdůležitějších fenoménů, které určují geotermické poměry zájmového prostoru. Zájmovou oblast je napřed nutné prozkoumat povrchovou geofyzikou a pak podobně jako při průzkumu ložisek nerostných surovin rozčlenit na jednotlivé bloky s podobnými vlastnostmi, jejichž hydrogeologii a vnitřní a hraniční tepelné vlastnosti ověří nejprve mělké a potom i hluboké vrtů. Pouhé provedení tepelné zkoušky TRT (Thermal Response Test) nějakého hotového BHE (Borehole Heating Exchanger), aniž by byly známy hydrogeologické a tektonické poměry lokality, není dostačující. Nemůže přinést potřebné informace, protože její výsledky jsou průměrem za celý vrt a také dosah teplotní změny od stěny vrtů do horniny je kvůli krátké době testu (48 až 52

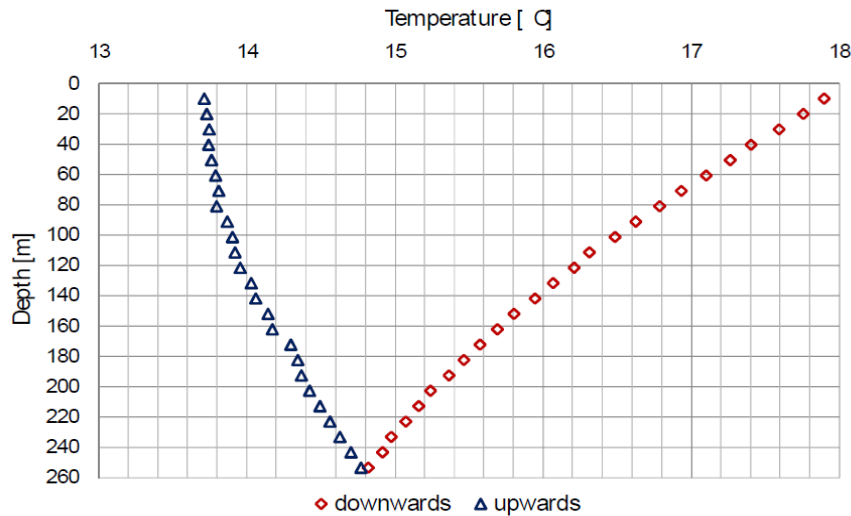
hodin) velice malý. Může být doplňkem poznatků o geologické stavbě, pohybu podzemní vody a tepelných vlastnostech hornin v zájmovém prostoru, avšak k jejich získání je třeba provést jádrové, anebo alespoň karotáží proměřené hydrogeologické vrty a tepelné proměření vzorků horniny v laboratoři. Podstatný přelom v užitečnosti tepelných zkoušek vrtů mohou znamenat zkoušky tepelné distribuce DTRT (Distributed Thermal Response Test). Na rozdíl od klasického TRT testu nezkouší jenom celkový krátkodobý výkon jednoho vrtu, ale měří skutečné teploty po celé délce výměňkového kanálu a po celé délce stěny vrtu. Průběh křivek naměřených teplot vykazuje anomálie, které pokud nejsou vázány na změny průměru vrtu, indikují tepelně důležité změny v blízkosti jeho stěny. Jejich vyhodnocení tak může doplnit výsledky klasického karotážního proměření vrtu a poskytnout pro návrh mnohavrtoých systémů důležitá data (Čížek, 2012).

Jde o přímé měření rozdělení teplot v kapalině a na stěně vrtu při ukládání konstantního množství tepla vyhodnocením Ramanova jevu. Do kabelů z optických vláken, spuštěných do trubek výměníku, se vysílají laserové impulsy. Interakcí fotonů dopadajícího záření s vibračními a rotačními stavy atomů nebo molekul získává odražené světlo jinou vlnovou délku, resp. energii fotonů nežli dopadající záření a tento tzv. Ramanův rozptyl světla je funkcí teploty. Teplotu vyhodnocuje čtecí zařízení a hloubku ke které ji přiřadí, zjišťuje z rychlosti světla a ze zpoždění odrazu pulzu (Acuna, 2010).

První DTRT test provedli autoři Acuna, Palm. Odzkoušen byl jeden U-smyčkový vrt a jeden koaxiální vrt.

Výsledek DTRT testu U-smyčkové instalace je na (obr. 12). Teplota kapaliny na vstupu do vrtu byla udržována při 18 °C. Cestou ke dnu se ochladila na 14,8 °C a opouštěla vrt s teplotou 13,7 °C. Změna teploty o zhruba 3 °C v sestupné trubici a jenom o 1 °C ve výstupní trubici znamená, že nejvíce tepla se s horninou vyměňuje v sestupné trubici, ze které pochází asi 75 % užitečného výkonu výměníku. Téměř vertikální sklon křivky teplot naměřených v teplonosné kapalině v posledních osmdesáti metrech před jejím výstupem z vrtu znamená, že se tato část U-smyčky kvůli vysokému teplotnímu rozdílu směsí a velkému přenosu tepla mezi vstupní a výstupní trubicí na tepelném výkonu vrtu vůbec nepodílí. Acuna, J., Palm, B. (2010) soudí, že by se při nízkých objemových průtocích kapaliny mohl tento jev ještě zhoršit a vyústit až do úplného tepelného zkratu mezi vstupní a výstupní trubicí.

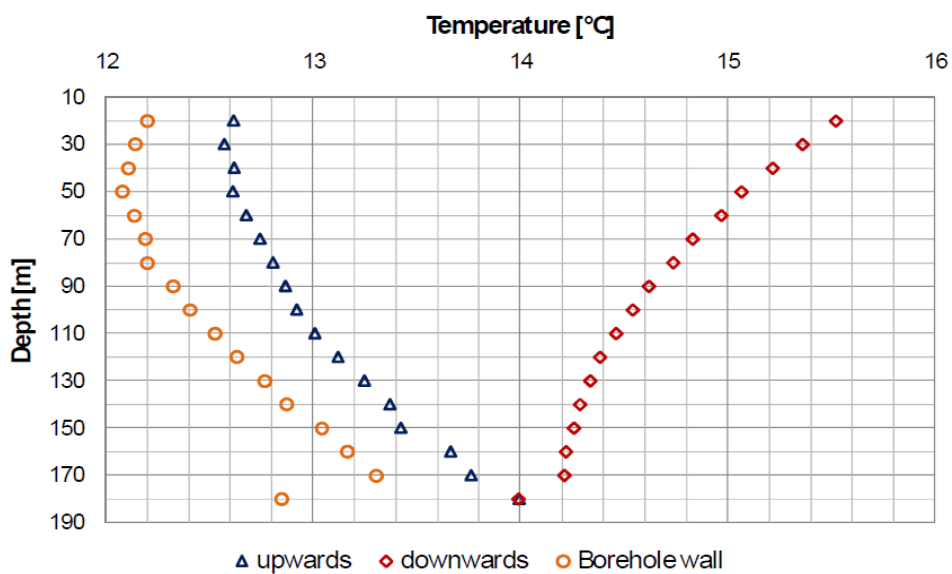
Obr.12 Průměrný teplotní profil v U-smyčkovém tepelném vrtu. Během 48 hodin nepřetržitého vypouštění konstantního množství tepla do vrtu bylo každých 5 minut prováděno měření teploty v bodech, vzdálených od sebe vertikálně 10 m.



Zdroj: Acuna, J. Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia: 2010.

Měření provedená v koaxiálním vrtu o průměru 115 mm se 189 m dlouhým tepelným výměníkem, zahrnovala kromě měření teploty směsi také měření teploty stěny vrtu. Aby ji bylo možno provést, tvořila koaxiální instalaci centrální trubka vložená do tak tzv. energetické kapsle. Tou je tenkostěnná (0,4 mm) polyetylenová hadice, která byla po zapuštění do vrtu naplněna vodou. Tím nabyla průměr 114 mm, přitiskla optický kabel k hornině a oddělila koaxiální tepelný výměník od okolní horniny a podzemní vody. Teplota na vstupu kapaliny do vrtu byla udržována při 15,5 °C. V centrální trubici se cestou ke dnu ochladila na 14 °C a když opouštěla vrt, měla teplotu 12,6 °C. Významná část tepla (asi 50%) se přenášela z kapaliny při její cestě centrální trubici ke dnu vrtu a zbytek při jejím výstupu mezikružím. Na (obr. 13) je jasně vidět, jak křivka teploty stěny vrtu sleduje s odstupem asi 0,4 °C křivku teploty kapaliny, stoupající mezikružím.

Obr. 13. Průměrný teplotní profil v koaxiálním tepelném vrtu. Během 56 hodin nepřetržitého vypouštění konstantního množství tepla do vrtu bylo každých 5 minut prováděno měření teploty v bodech, vzdálených od sebe vertikálně 10 m.



Zdroj: Acuna, J. Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia: 2010.

3 Cíle disertační práce

Souhrnným cílem disertační práce je získání nových poznatků o možnostech efektivního využívání vertikálních horninových tepelných výměníků jako zdrojů energie pro tepelná čerpadla v podmínkách České republiky. Souhrnného cíle bude dosaženo splněním následujících dílčích cílů:

- analýzou změn teplot v horninovém masivu v průběhu topného období,
- analýzou diferencí teplot mezi aktivním vrtem a referenčním vrtem v různých hloubkách,
- popisem průběhů teplot ve vrtech v jednotlivých sledovaných hloubkách, zejména pak na počátku a na konci topného období,
- návrhem matematického modelu průběhu teplot v jednotlivých hloubkových úrovních vertikálního zemního výměníku,
- analýzou teplotních polí při procesu regenerace horninového masivu v okolí vrtu,
- stanovením útlumové hloubky horninového masivu v měřené lokalitě a její komparací s experimentálně stanovenými údaji,
- stanovením tepelných výkonů vrtů a jejich souvislosti s průběhem teplot ve vrtech.

4 Metodika

Tato kapitola se ve své první části zabývá současnými postupy pro návrh tepelných čerpadel se svislými vrty, dále pak shrnuje teoretické poznatky z oblasti přenosu tepla v horninách a uvádí základní výpočtové vztahy. Ve druhé části této kapitoly je prostor věnován místnímu šetření, vlastnímu měření a metodice zpracování dat.

4.1 Teoretická část

Reálné vedení tepla v okolí vrtu je tří-dimenzionální, pro zjednodušený výpočet jsou využívány upravené jedno-dimenzionální analytické modely. Dále pak numerické modely a kombinace numerických a analytických modelů, které jsou schopny postihnout dvou nebo tří-dimenzionální podmínky.

4.1.1 Analytické metody

Analytické modely jsou vypočteny rychle, nicméně s nižší přesností, neboť zanedbávají mnoho parametrů ve srovnání s numerickými metodami. Proto je přenos tepla v horninovém masivu v současné době většinou kombinací numerických a analytických metod.

Velké množství výpočetních metod se zakládá na dvou základních modelech a to na "lineárním zdroji" a "cylindrickém zdroji". Z disertační práce autora (Yavuzturk, 1999) níže uvádím nejdůležitější z nich:

Lineární zdroj

Tyto modely vychází z jednorozměrného nestacionárního vedení tepla, kde teplota v okolí zemního svislého výměníku v průběhu času závisí pouze na souřadnici r (poloměr). Rovnice pro výpočet je uvedena v kapitole „4.1.4.1 Zjednodušené Fourier-Kirchofovy rovnice pro 1D a 2D případy“. Tyto modely jsou vhodné, pokud se jedná o vedení tepla v okolí koaxiální-trubice nebo U-trubice v delším časovém období (několik hodin až několik let).

Válcový zdroj

Druhým směrem, kterým se vyvíjel výpočet teploty v okolí zemního výměníku v závislosti na čase, zavedli v roce 1947 autoři (Carslaw and Jaeger, 1948), kteří pracovali s tzv. "G-factorem". Tento faktor je závislý na dvou veličinách, a sice na Fourierově čísle a na bezrozměrném poloměru. Rovnice pro výpočet jsou také uvedeny v kapitole „4.1.4.1 Zjednodušené Fourier-Kirchofovy rovnice pro 1D a 2D případy“.

4.1.2 Numerické metody

Teoreticky nejpřesnější, ale také časově nejnáročnější jsou numerické metody výpočtu rozložení teplot v okolí zemní sondy (mezi potrubím a stěnou vrtu). Tyto metody se využívají zejména pro výpočet vlivu uložení potrubí a vlivu výplňového materiálu na předaný výkon

mezi zemínou a tekutinou proudící ve vrtu, tedy pro stanovení tepelného odporu vrtu. Pro tuto práci nejsou takto složité a na výpočet časově náročné metody vhodné (Krainer, 2011).

Jedna z využívajících metod je metoda konečných rozdílů (Finite difference method – FDM). Metodu konečných prvků (Finite element method – FEM) použil ve své práci autor (Muraya, 1994). Další významnou práci publikoval autor (Yavuzturk, 1999), který prováděl výpočet metodou konečných objemů (Finite volume method – FVM).

4.1.3 Kombinace numerických a analytických metod

S prudkým vývojem výpočetní techniky v posledních letech se do popředí využívání dostaly na řadu numerické metody řešení rozložení teplot v okolí zemního výměníku. Nicméně numerický výpočet je stále ještě velice náročný na čas. Z tohoto důvodu vznikly modely kombinující analytické a numerické metody. Níže uvádím nejdůležitější z nich.

Model zavádějící tzv. „g-function long-term” (g-funkce z dlouhodobého hlediska), jehož autorem je (Eskilson, 1987), řeší dvou-dimenzionální rozložení teplot v okolí vrtu. Model je kombinací metody konečných diferencí a lineárního segmentového zdroje.

Ve své práci autor (Yavuzturk, 1999) vychází také z kombinace numerických a analytických metod tentokrát z krátkodobého hlediska. Opět je použita „g-function“, tentokrát ovšem v krátkodobém hledisku a autor ji tedy nazývá „g-function short-term“. Jeho řešení rozložení teplot v okolí vrtu je dvou-dimenzionální metodou konečných objemů.

Autor (Hellström, 1982) řeší teplotní pole v okolí vrtu dvou-dimenzionální metodou konečných diferencí a lineárního zdroje tepla. Tento model se nazývá „DST model“.

4.1.4 Teorie vedení tepla v okolí svislého zemního výměníku

Přenos tepla v půdě se uskutečňuje zejména vedením a prouděním. V případě, že je v určité hloubce vodní hladina, může docházet k přestupu tepla formou odpařování či kondenzace. V půdě záření přispívá jen nepatrně k přenosu tepla, podíl přestupu tepla v písku činí 1 % z celkového přenosu tepla. Zmrazováním a rozmrazováním může rovněž docházet ke sdílení tepla, ale těmito způsoby je dobré se vyvarovat v souvislosti s termo-aktivními podzemními stavbami jako jsou vrty (Brandl, 2006).

Přenos tepla prouděním dochází v termo-dynamických systémech, které se vůči sobě

pohybují. V zemi, kde statickou složkou je půda, tvoří dynamickou složku voda nebo plyn. Prouděním těchto dvou medií dochází k přestupu tepla. Přenos tepla proudící tekutiny může být popsán (Brandl, 2006):

$$\dot{q}_{1, \text{conv}} = c_w \cdot \rho_w \cdot \bar{v}_w (T - T') \quad (4.1)$$

kde:	c_w – je měrná tepelná kapacita vody v půdě	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
	ρ_w – je hustota vody v půdě	(kg.m ⁻³)
	\bar{v}_w – je vektor rychlosti proudící vody	(m.s ⁻¹)
	T' – je referenční teplota vody v půdě	(K)
	T – je aktuální teplota vody v půdě	(K)

Podobnou rovnici můžeme napsat pro přenos tepla proudícího plynu (páry) (Brandl, 2006):

$$q_{v, \text{conv}} = c_v \cdot \rho_v \cdot \bar{v}_v (T - T') \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (4.2)$$

kde:	c_v – je měrná tepelná kapacita par obsažených v půdě	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
	ρ_v – je hustota par v půdě	(kg.m ⁻³)
	\bar{v}_v – je vektor rychlosti proudící páry	(m.s ⁻¹)
	T' – je referenční teplota	(K)
	T – je aktuální teplota páry v půdě	(K)

K latentnímu přestupu tepla dochází v důsledku změny skupenství vody (odpařování) a závisí především na množství vodních par vyskytujících se v půdních pórech. Tento obsah se zvětšuje úměrně s klesajícím obsahem vody. Tento přestup může být vyjádřen takto (Brandl, 2006):

$$\dot{q}_{\text{lat}} = L_0 \cdot \rho_w \cdot \bar{v}_v \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (4.3)$$

kde:	L_0 – je latentní teplo vypařování při teplotě T'	(J.kg ⁻¹)
------	---	-----------------------

Vedení tepla je proces, při němž energie přechází z jednoho regionu do jiného molekulárním převodem, kdy prostřednictvím srážek jednotlivých částic se předává pohybová energie. Podle Fourierova zákona, množství tepla Q , které projde plochou S za čas τ se

označuje jako hustota tepelného toku a proto můžeme psát (Brandl, 2006):

$$\dot{q}_{\text{cond}} = \frac{Q}{A \cdot t} = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4.4)$$

kde: λ – je tepelná vodivost $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

$\partial T / \partial n$ – je teplotní gradient ve směru proudění n $(\text{K} \cdot \text{m}^{-1})$

Celkový přenos tepla v půdě q_{tot} tak můžeme definovat jako:

$$\dot{q}_{\text{tot}} = \dot{q}_{\text{cond}} + \dot{q}_{1, \text{conv}} + \dot{q}_{\text{v, conv}} + \dot{q}_{\text{lat}} \quad (4.5)$$

kde: \dot{q}_{cond} – je tepelný tok způsobený vedením tepla v půdě $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$

$\dot{q}_{1, \text{conv}}$ – je tepelný tok způsobený prouděním vody v půdě $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$

$\dot{q}_{\text{v, conv}}$ – je tepelný tok způsobený prouděním plynu v půdě $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$

\dot{q}_{lat} – je tepelný tok způsobený změnou skupenství vody v

půdě $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$

Pokud rovnici číslo 4.4 napíšeme v pravoúhlých souřadnicích, dostaneme tvar (Brandl, 2006):

$$\dot{q} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z \right) = -\lambda \text{grad } T \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4.6)$$

Pokud je tepelná vodivost a teplotní gradient konstantní v průběhu celého území a je ve svém normálním směru, je možné rovnici 4.4 upravit pro energetické piloty (vrty) s poloměrem R a délkou l (Brandl, 2006):

$$Q = 2R \lambda l \frac{\partial T}{\partial r} \quad (\text{W}) \quad (4.7)$$

Pro energetické piloty (vrty) využívané pro chlazení (předávání tepla do půdy) nebo vytápění (odběrem tepla ze země) (obr. 14), popisuje ustálený stav, kdy se teplota již nemění v době t . Změna teploty je způsobena střídáním hustoty tepelného toku v průběhu této doby, což vede ke změně vnitřní energie (Brandl, 2006):

$$-\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} \quad (\text{J.m}^{-3}.\text{s}^{-1}) \quad (4.8)$$

Pokud diferenciální rovnici 4.4 rozšířenou o zohlednění prostorových souřadnic skombinujeme s rovnicí 4.8 dostaneme (Brandl, 2006):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) = a \Delta T \quad (\text{K.s}^{-1}) \quad (4.9)$$

kde: a – je teplotní vodivost $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

λ – je tepelná vodivost ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

c – je měrná tepelná kapacita ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

ρ – je hustota pevného media (kg.m^{-3})

Jestliže v daném kontrolním objemu je zdroj tepla, pak základní rovnice kondukce má tvar (Brandl, 2006):

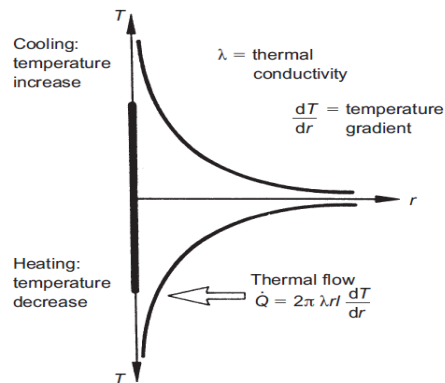
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T + \frac{Q_i}{\rho c} \quad (\text{K.m}^3.\text{s}^{-1}) \quad (4.10)$$

kde: Q_i – je tepelný výkon ve sledovaném objemu (W)

Rovnici 4.9 v pravoúhlých souřadnicích lze transformovat do válcových souřadnic s poloměrem r , azimutem φ a osou z . Výsledkem je obecná rovnice vedení tepla tzv. Fourier-Kirchhoffova. Ve válcových souřadnicích má tento tvar (Brandl, 2006):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.11)$$

Obr. 14 Teplotní křivky v půdě kolem energetické piloty využívané pro vytápění nebo chlazení, předpokládá se stálý tepelný tok



Zdroj: Brandl, H. *Energy foundations and other thermo-active ground structures.*

Géotechnique, 56, 2, 2008. 86 s.

Okrajové podmínky neboli podmínky jednoznačnosti:

Počáteční podmínky

$$t = f(r, \varphi, z, 0) \text{ pro } T = 0 \quad (4.12)$$

Okrajové podmínky

1. druhu (Dirichletova)

$$t = f(r, \varphi, z, T) \quad (4.13)$$

2. druhu (Neumannova)

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = -\left(\frac{q}{\lambda_{st}}\right) = \text{konst.} \quad (4.14)$$

speciální případ

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \quad (4.15)$$

3. druhu (Fourierova)

$$-\lambda_{st} \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \alpha (t_p - t_e) \quad (4.16)$$

po úpravě pak:

$$-\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \frac{t_p - t_e}{\frac{\lambda s t}{a}} \quad (4.17)$$

4.1.4.1 Zjednodušené Fourier – Kirchhoffovy rovnice pro 1D a 2D případy

Stacionární vedení tepla

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (4.18)$$

Nestacionární vedení tepla

1) Nestacionární vedení tepla $T = f(r, t)$

Pokud jsou počáteční i okrajové podmínky nezávislé na φ a z (např. vedení tepla v okolí koaxiální-trubice nebo U-trubice ve střednědobém hledisku (několik hodin až několik let) (Krainer, 2011).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}\right) = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right)\right] \quad (4.19)$$

2) Nestacionární vedení tepla $T = f(r, \varphi, t)$

Pokud jsou počáteční nebo okrajové podmínky závislé na r , φ , τ (např. vedení tepla v okolí U-trubice v krátkodobém hledisku) (Krainer, 2011).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}\right) \quad (4.20)$$

3) Nestacionární vedení tepla $T = f(r, z, t)$

Pokud jsou počáteční i okrajové podmínky nezávislé na φ (vedení tepla v okolí koaxiální-trubice nebo U-trubice z dlouhodobého hlediska (roky) (Krainer, 2011).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.21)$$

4.1.4.2 Nestacionární vedení tepla $T = f(r, t)$

Fourier – Kirchhoffova rovnice pro 1D:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rt)}{\partial r^2} \right] \quad (4.22)$$

1) Analytické řešení podle teorie lineárního zdroje (Ingersoll a kol., 1954) je:

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda} \int_{r/2\sqrt{at}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad \text{platí pro: } \frac{at}{R^2} > 20 \quad (4.23)$$

$$\text{kde: } \beta = \frac{r}{2\sqrt{a(t-t_1)}}$$

2) Analytické řešení vycházející z válcového zdroje (Ingersoll a kol., 1954):

rozdíl teploty na povrchu vrtu a teploty v neovlivněném okolí je:

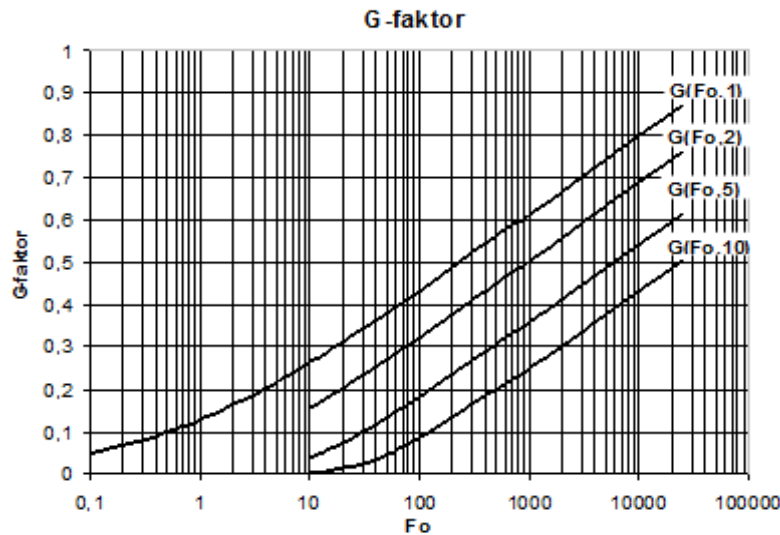
$$\Delta T = T_z - T_{vrt} \quad [-] \quad (4.24)$$

Tento rozdíl odpovídá zavedením G-faktoru závislým na bezrozměrných kritériích Fo a p rovnicí:

$$\Delta T = \frac{Q}{\lambda} G(Fo, P) = \frac{2\pi R w}{\lambda} G(Fo, P) \quad [-] \quad (4.25)$$

Na (obr. 15) je znázorněna závislost G-faktoru na bezrozměrných parametrech Fo a p , pro bezrozměrný poloměr $p = 1, 2, 5$ a 10 (Krainer, 2011).

Obr. 15 G-faktor v závislosti na Fourierově čísle Fo a bezrozměrném poloměru p (1,2,5 a 10)



Zdroj: Krainer, R. *Nové metody hospodárného dimenzování systémů s tepelným čerpadlem a svislými zemními vrty*, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Praha, 18 s.

4.1.4.3 Nestacionární vedení tepla $T = f(r, \varphi, t)$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) \quad (4.26)$$

Analytické řešení:

výše uvedená rovnice popisuje vedení tepla v okolí U-trubice v krátkém časovém intervalu. Pro tento případ není v současné době známo analytické řešení.

Numerické řešení:

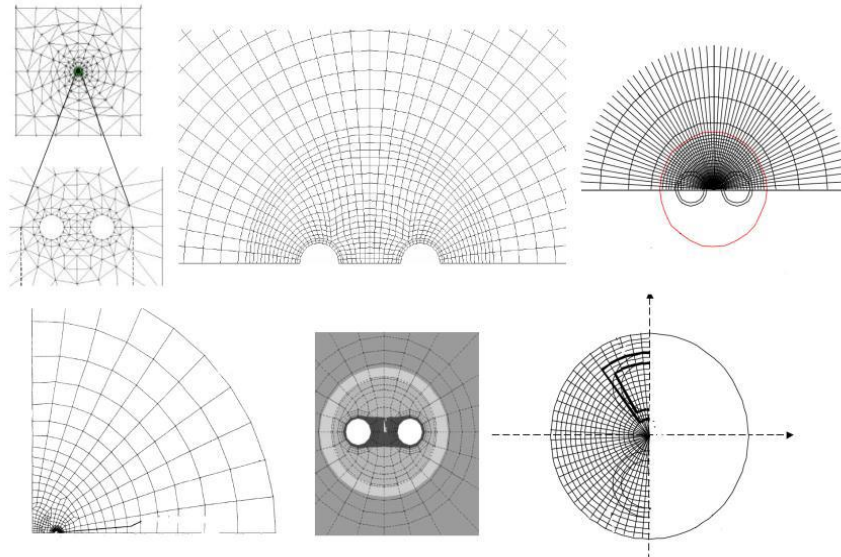
metoda konečných rozdílů (Finite difference method – FDM)

metoda konečných prvků (Finite element method – FEM)

metoda konečných objemů (Finite volume method – FVM)

Některé příklady řešení numerickými metodami jsou zobrazeny na (obr. 16).

Obr. 16 Příklady řešení numerickými metodami a zasítování modelů v okolí středu vrtu



Zdroj: Krainer, R. *Nové metody hospodárného dimenzování systémů s tepelným čerpadlem a svislými zemními vrty*, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Praha, 18 s.

4.1.4.4 Nestacionární vedení tepla $T = f(r, z, t)$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.27)$$

Analyticko-numerické řešení této rovnice využívá ve své práci (Eskilson, 1987) tzv. G-funkce.

Počáteční podmínky

$$T(r, z, 0) = T_{\infty} \quad (\text{K}) \quad (4.28)$$

Okrajové podmínky

Bylo experimentálně ověřeno, že s dostatečnou přesností lze teplotu $T_{\mathcal{G}}$ vztáhnout k teplotě v polovině hloubky celého vrtu.

Zjednodušená hraniční podmínka pro povrch terénu je (Ryška, 2006):

$$T(r, 0, t) = T_g \quad (\text{K}) \quad (4.29)$$

kde: T – je teplota hornin (K)

T_g – je průměrná teplota hornin v okolí vrtu
neovlivněném odběrem tepla (K)

Přičemž teplota na povrchu terénu pro danou lokalitu je ve skutečnosti o něco nižší.

Výpočtem bylo ověřeno, že chyby pro odběr tepla z hornin vzniklé zanedbáním geotermického gradientu a teplotních sezónních změn pro $z = 0$ pro výše uvedené podmínky jsou menší jak 1% (Bujok a kol., 2005).

Základní hraniční podmínky ve vrtu jsou následující (Bujok a kol., 2005):

$$T(r, z, t) = T_b(t) \quad (\text{K}) \quad (4.30)$$

kde: r – je poloměr vrtu (m)

$T_b(t)$ – je teplota podél stěny vrtu v závislosti na čase (K)

a tedy:

$$q_t = \frac{1}{H} \int_0^H 2\pi r_b \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{r=r_b} dz \quad (\text{W.m}^{-1}) \quad (4.31)$$

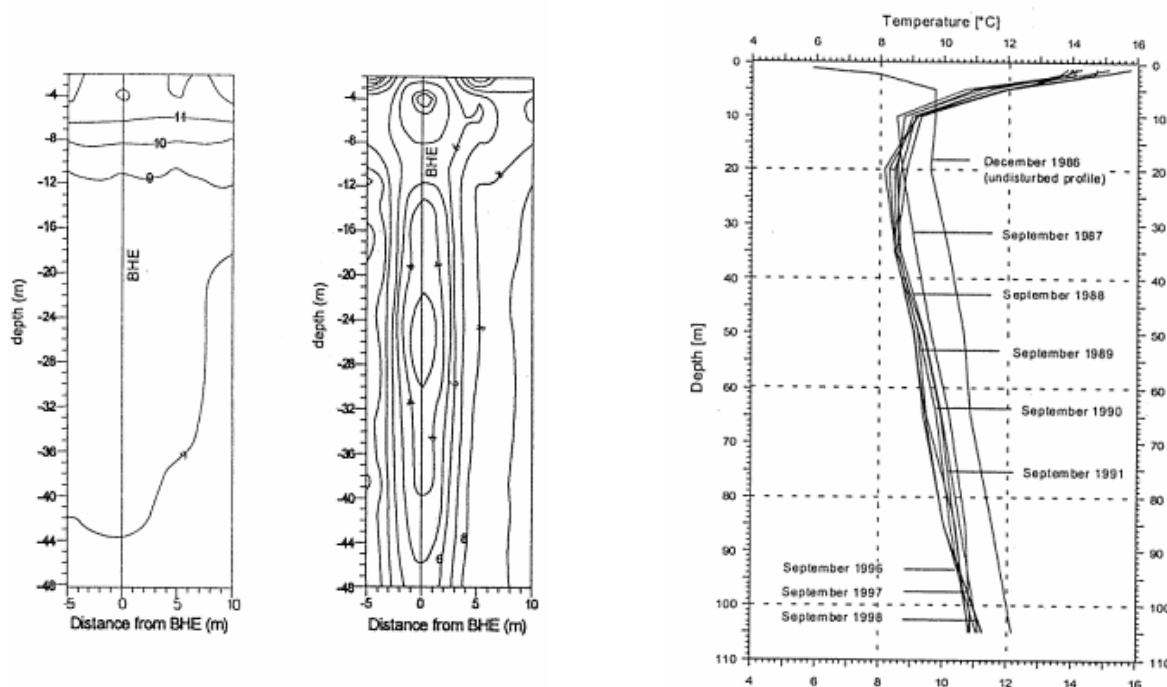
kde: q_t – je průměrný měrný tepelný výkon odvedený z vrtu (W.m⁻¹)

λ - je tepelná vodivost hornin (W.m⁻¹.K⁻¹)

H – je hloubka vrtu (m)

Při odběru tepla z vrtu za výše uvedených podmínek mají izolinie teploty hornin v okolí vrtu tvar rotačních elipsoidů – viz (obr. 17). Měření teplot bylo prováděno jednak ve vrtu vystrojeném pro tepelné čerpadlo, jednak ve speciálních měřících vrtech (Bujok a kol., 2005).

Obr. 17 Izolinie teploty naměřené ve vrtu teplotně neovlivněném (vlevo) a během chodu tepelného čerpadla



Zdroj: Bujok, P. Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2005, 35-36 s.

Teplotní odezva v horninách v okolí vrtu na určitý odběr tepla z vrtu pro daný časový interval je převedena na soubor bezrozměrných koeficientů teplotní odezvy, které se označují jako g-funkce. Celkový odběr tepla z vrtu je převeden na soubor časově omezených tepelných pulsů, které jsou skládány na principu superpozice. Teplota hornin na stěně vrtu v kterémkoli čase je pak stanovena přiřazením g-funkcí těmto odběrovým pulsům (Bujok a kol., 2005).

Rozměrová analýza:

$$r' = \frac{r}{H} \quad z' = \frac{z}{H} \quad t' = \frac{at}{H^2} \quad t' = \frac{2\pi\lambda_z}{q_t} T b(t) \quad (4.32)$$

Z výsledků rozměrové analýzy vyplyne závislost tepelného odporu zeminy na těchto dvou bezrozměrných parametrech, které popisují výše uvedenou g-funkci $g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right)$ (obr. 18).

Teplotný odpor zeminy lze poté vypočítat ze vztahu:

$$R_z = \frac{1}{2\pi\lambda_z} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) \quad (\text{K.m.W}^{-1}) \quad (4.33)$$

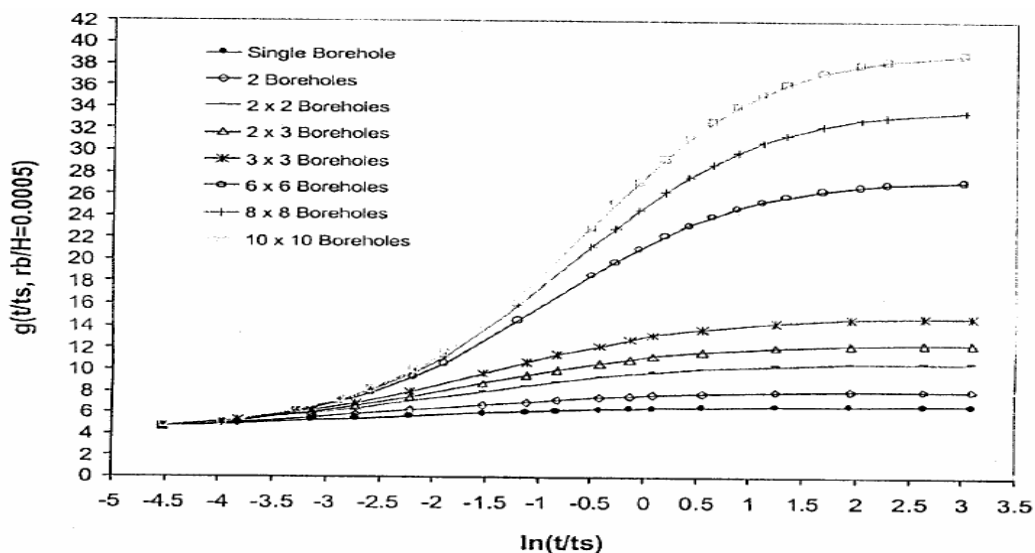
kde: t_s – je stacionární čas odběru tepla z vrtu, $t_s = \frac{H^2}{9a}$ (s)

Teplotu na povrchu vrtu popisuje potom rovnice:

$$T_b(t) = T_z - q_t \cdot R_z \quad (\text{K}) \quad (4.34)$$

g -funkce popisující teplotní odezvu v horninách způsobenou odběrem tepla z vrtu v určitém časovém intervalu (Bujok a kol., 2005):

Obr. 18 Průběh g -funkcí v závislosti na počtu vrtů



Zdroj: Bujok, P. Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2005, 37 s.

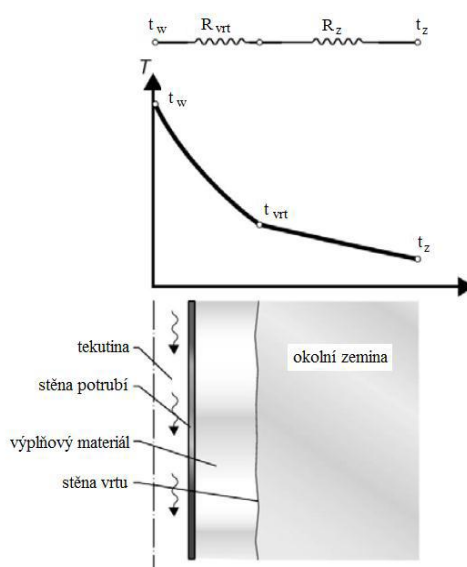
4.1.4.5 Lokální procesy v blízkém okolí U-trubice

V předchozích kapitolách jsou popsány globální změny teploty v okolí vrtu kdy $r > r_{\text{vrt}}$, tedy mezi stěnou vrtu a neovlivněným okolím. V této kapitole jsou probrány lokální procesy v blízkém okolí zemního výměníku tedy mezi teplotonosnou kapalinou proudící v potrubí a stěnou vrtu tedy když $r < r_{\text{vrt}}$.

Důležitým parametrem pro dimenzování vrtů je celkový teplotní odpor R_{vrt} vrtu vůči přestupu tepla z hornin do nemrznoucí směsi proudící v kolektoru (obr. 19). Z podstaty této veličiny je žádoucí z hlediska efektivního přestupu tepla z hornin do kolektoru, aby R_{vrt} byl co nejnižší. Tato podmínka je splněna, pokud:

- materiál výplně vrtu má co nejvyšší tepelnou vodivost,
- trubky kolektoru mají po celé délce vrtu stejnou rozteč a jsou co nejbližně stěně vrtu,
- a režim proudění nemrznoucí směsi v kolektoru je turbulentní (Bujok a kol., 2005).

Obr. 19 Tepelný odpor vrtu R_{vrt} a zeminy R_z



Zdroj: Krainer, R. *Nové metody hospodárného dimenzování systémů s tepelným čerpadlem a svislými zemními vrtů*, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Praha, 18 s.

Střední teplota teplonosné látky podle teploty v místě vrtu a celkového tepelného odporu vrtu se vypočte ze vztahu:

$$t_w = t_{vrt} - q_t \cdot R_{vrt} \quad (\text{K}) \quad (4.35)$$

Celkový tepelný odpor vrtu R_{vrt} je součtem tepelného odporu výplňového materiálu R_{vm} a poloviny tepelného odporu potrubí R_p a tepelného odporu konvekce R_{konv} na vnitřní straně potrubí jak je patrné v následujícím vztahu.

$$R_{vrt} = R_{vm} + \frac{R_p + R_{konv}}{2} \quad (\text{K.m.W}^{-1}) \quad (4.36)$$

Pro tepelný odpor výplňového materiálu mezi U-trubicí a vrtem můžeme psát například dle autora (Paula, 1996), následující vztahu pro jednoduchou U-trubicí.

$$R_{vm} = \frac{1}{\lambda_{vm} \cdot \beta_0 \cdot \left(\frac{d_{vrt}}{d_p}\right)^{\beta_1}} \quad (\text{K.m.W}^{-1}) \quad (4.37)$$

kde: λ_{vm} – je součinitel tepelné vodivosti výplňového materiálu ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

d_{vrt} – je průměr hloubeného vrtu (m)

d_p – je vnitřní průměr U-trubice (m)

Tab. 3 Parametry pro výpočet tepelného odporu výplňového materiálu dle autora Paula

	A0	A1	B	C
β_0	14.450872	20.100377	17.44268	21.90587
β_1	-0.8176	-0.94467	-0.605154	-0.3796
R	0.997096	0.992558	0.999673	0.9698754

Zdroj: Paul, N. D., *The Effect of Grout Thermal Conductivity on Vertical Geothermal Heat Exchanger Design and Performance*, M.Sc. thesis, South Dakota University. 1996

V tabulce 3 uvedené výše označují hodnoty A0, A1, B a C různé uspořádání potrubí ve vrtu. Velikost tepelného odporu v závislosti na umístění potrubí ve vrtu je vidět na obr. 11.

Pro tepelný odpor potrubí R_p U-trubice můžeme psát jednoduchý vztah vedení tepla válcovou stěnou:

$$R_p = \frac{\ln \frac{r_p}{r_0}}{2\pi \lambda_p} \quad (\text{K.m.W}^{-1}) \quad (4.38)$$

kde: r_p – je vnější poloměr U-trubice (m)

r_0 – je vnitřní poloměr U-trubice (m)

λ_p – je součinitel tepelné vodivosti materiálu U-trubice ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Pro tepelný odpor konvekce na vnitřní straně potrubí můžeme psát:

$$R_{konv} = \frac{1}{2\pi d_0 \alpha_0} \quad (\text{K.m.W}^{-1}) \quad (4.39)$$

kde: $\alpha_0 = \frac{Nu \lambda_w}{d_0}$ - je součinitel přestupu tepla z proudící teplotnosné kapaliny do stěny

U-trubice $(\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$ (4.40)

d_0 – je vnitřní průměr U-trubice (m)

λ_w – je součinitel tepelné vodivosti teplotnosné směsi $(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$

4.2 Experimentální část

V této části práce je blíže specifikováno místo měření. V této souvislosti jsou uvedeny výsledky provedeného geologického průzkumu a TRT testu. Dále je zde uveden přehled a vystrojení měřených vrtů, způsob a umístění teplotních čidel ve vrtech.

4.2.1 Charakteristika místa měření

- pozemek na parcelách č.661/4 a 661/5; k.ú. Dolní Měcholupy, okres Hl. m. Praha,
- GPS: 50°3'24,084"N, 14°32'51,468"E,
- pozemek okolo nové budovy školícího centra společnosti VESKOM s.r.o.,
- Dolnoměcholupská 522/12a, 102 00 Praha 10, poblíž železniční trati Praha Hostivař – Říčany, cca 560 m.n.m.,
- povrch terénu je plochý.

Geologický průzkum provedla firma GESTEC, s.r.o. ve spolupráci s firmou STAVEBNÍ GEOLOGIE – Geosan s.r.o., která realizovala vrtné práce. V rámci průzkumu bylo vyhloubeno 9 vrtů V1-V9 do hloubky 113 m pro tepelná čerpadla. Dále byl vyhlouben průzkumný vrt HV-1 pro budoucí vrtanou studnu.

Geologický profil byl zdokumentován na vrtech VT1, VT2, VT3 a VT9. Nejsvrchnější část profilu je tvořena navážkami (násyp), jejichž mocnost se mírně zmenšuje směrem k severu. V nejjihnější části pozemku dosahují navážky mocnosti 9,5 m, v severní části pak kolem 4 m. V podloží navážek se nachází šedočerné jílovité břidlice letenského souvrství. Břidlice jsou ve svrchních cca 5 m silně až mírně navětralé. Dále do hloubky jsou břidlice již pevné. V hlubších partiích jsou horniny masivní a místy silně rozpukané, čemuž nasvědčují

silné přítoky podzemní vody do vrtů a výrazně menší odpor kladený vrtné soupravě při hloubení. Rozpukané polohy se nacházejí v hloubkách od 30 do cca 80 m pod terénem. Geologický popis hornin s grafickým znázorněním je uveden v příloze. Hladina podzemní vody byla ve všech vrtech naražena v hloubkách 10-12 m pod terénem.

V rámci průzkumu geologických poměrů v dané lokalitě byla provedena zkouška teplotní odezvy horninového prostředí (Thermal Response Test – TRT). Tuto zkoušku provedla opět firma GESTEC, s.r.o. Z této zprávy vyplývá, že průměrné hodnoty tepelné vodivosti, resp. tepelného odporu vrtu jsou:

$$\lambda = 2,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$R_b = 0,137 \text{ K.m.W}^{-1}$$

kde: λ – tepelná vodivost hornin (W.m⁻¹.K⁻¹)
 R_b – celkový vnitřní tepelný odpor vrtu (K.m.W⁻¹)

Nad každým vrtem je umístěno čidlo v hloubce 0,2 m pod povrchem pro sledování teploty těsně pod povrchem. Ve vrtech VT1, VT2, VT3, VT4 a VT9 byla nainstalována 4-vodičová teplotní čidla, každé s vlastním elektrickým vodičem pro přenos měřených dat. Hloubkové rozmístění čidel je navrženo tak, aby byl co nejlépe pokryt celý zastížený geologický profil. Čidla byla instalována vždy mezi vzestupnou a sestupnou větev HDPE potrubí (obr. 20), s výjimkou monitorovacího vrtu VT9, který nebyl vystrojen geotermální sondou a kde byla čidla osazena přímo na injektážní potrubí bez další výstroje. V každém vrtu jsou čidla umístěna v těchto hloubkách:

- 1.čidlo – hloubka 8-9 m pod terénem – nezvodnělý kvartérní pokryv,
- 2.čidlo – hloubka 20 m pod terénem – zvodnělé jílovité břidlice,
- 3.čidlo – hloubka 50 m pod terénem – rozpukaný masiv, polovina vrtu,
- 4.čidlo – hloubka 100 m pod terénem – rozpukaný masiv, poloha blízko dna vrtu.

Vystrojení jednotlivých vrtů je uvedeno v následující tabulce 4.

Tab. 4 Přehled vrtů a jejich finální úprava

VRT	VÝSTROJ	POZNÁMKA
VT1	GEROTOP 2x40x3,7 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt je napojen na tepelné čerpadlo a využíván pouze k vytápění
VT2	GEROTOP 4x32x2,9 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt je napojen na tepelné čerpadlo a využíván pouze k vytápění
VT3	GEROTOP 2x40x3,7 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt je napojen na tepelné čerpadlo a využíván pouze k vytápění
VT4	GEROTOP 4x32x2,9 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt je napojen na tepelné čerpadlo a využíván pouze k vytápění
VT9	bez výstroje, osazena 4 teplotní čidla na injektážní potrubí, tlaková injektáž	bez výstroje, vrt bude sloužit pro monitorování šíření teplotních změn do okolí vrtů V1-4

Obr. 20 Způsob umístění čidel mezi jednotlivé větve HDPE potrubí

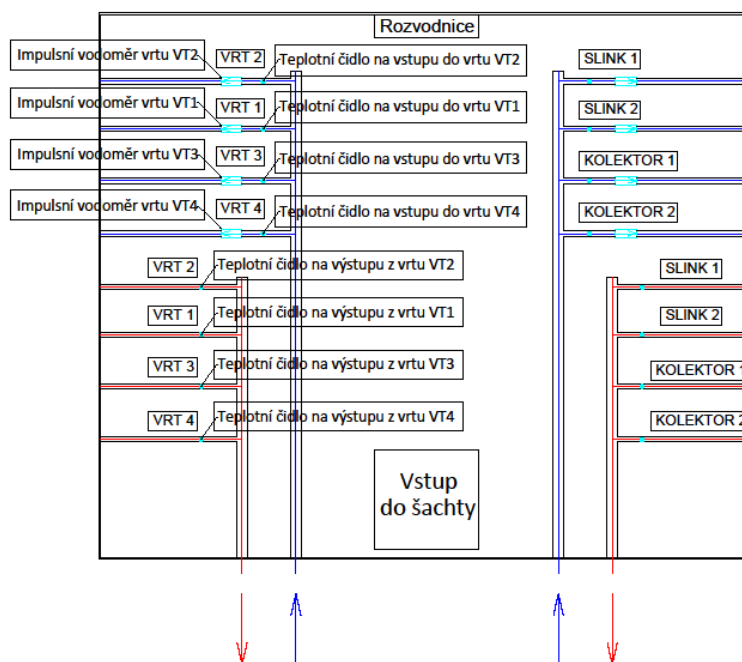


Použitá čidla jsou typu Pt1000 A s rozlišením 0,1 °C absolutně a citlivostí až 0,01 °C s délkou přívodního kabelu, odpovídající hloubce jeho uložení. Tento kabel je odolný proti mechanickému poškození a pronikání vlhkosti.

Teplota vzduchu nad povrchem byla zaznamenávána čidlem typu ATF 2 KTY 81.210 umístěným na východní fasádě budovy ve výšce 2,5 metru.

Teplotní čidla měřící teplotu teplotnosné směsi na vstupu/výstupu do jednotlivých vrtů jsou typu Pt100. Impulsní vodoměry, které se nachází na vstupu do jednotlivých vrtů jsou typu GWF MTW3 (obr.21). Umístění jednotlivých měřících prvků je znázorněno na (obr 23).

Obr. 21 Schéma umístění teplotních čidel a impulsních vodoměrů



Tyto vrty odebírají nízkopotenciální energii ze země a přivádějí ji na výparníky třech tepelných čerpadel:

2x IVT GREENLINE HT PLUS E17 – tepelný výkon 16,2 kW,

1x IVT PREMIUMLINE EQ E13 – tepelný výkon 13,3 kW.

Sledované vrty jsou využívány v zimních měsících pro vytápění. V letních měsících se těmito vrty budova nechladí, čili nedochází k „nabíjení“ horninového masivu.

V primárním okruhu je použito jako teponosné médium voda s 33% nemrznoucí směsí v podobě ethylalkoholu.

Tento systém je v provozu od září 2008 a měření se provádí od 1.3.2011, čili provedená měření zachytí teplotní změny tohoto systému od čtvrté do šesté topné sezóny. Poslední zpracovaná data jsou z 31.8.2014.

Signály jakož to výstupy z teplotních čidel jsou zpracovávány a poté číselně prezentovány na rozvaděči umístěném na povrchu v jiho-východní části monitorovaného pozemku (obr.22). Veškerá naměřená data se uchovávala na server umístěný v místě měření, ze kterého bylo umožněno následně data uložit do souboru typu excel.

Obr. 22 Venkovní rozvaděč



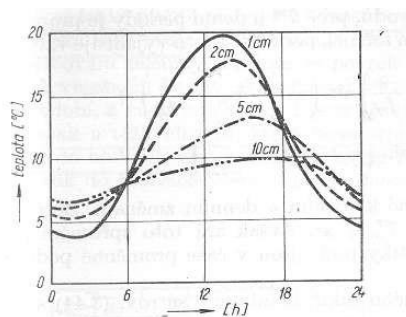
Obr. 23 Impulsní vodoměr a teplotní čidla



4.2.2 Útlumová hloubka

Pro útlum tepelné vlny v půdě je charakteristická tzv. útlumová hloubka L (obr. 24), která závisí na vlastnostech půdy a na periodě kolísání teploty. Pro roční kolísání teploty je hodnota L zhruba 19x větší, než je útlumová hloubka pro denní kolísání. V hloubce $z = L$ je amplituda 0,37 amplitudy povrchu a v hloubce $z = 3L$ se amplituda snižuje zhruba na 0,05 amplitudy povrchu. Vezmeme-li jako střední hodnoty půdy tepelnou vodivost $0,95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ a tepelnou kapacitu $C = 1,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$, potom pro denní kolísání teploty je $L = 12 \text{ cm}$, pro roční $L = 229 \text{ cm}$ a při denním kolísání teploty na povrchu se prakticky neprojeví denní výkyvy teploty již v hloubce 36 cm (Kutílek, 1978.)

Obr.24 Kolísání teploty v závislosti na hloubce



Zdroj: Kutílek, M.. Vodohospodářská pedologie. SNTL, Praha, 1978. 93 s.

Pro výpočet útlumové hloubky lze využít vzorce podle Kutílka (1978):

$$L = \left(\frac{2a}{\omega}\right)^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (4.41)$$

kde: a – teplotní vodivost $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
 ω – úhlová frekvence (s^{-1})

Za úhlovou frekvenci pro roční kolísání teplot lze dosadit podle (Kutílka, 1978) údaj $1,99 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Teplotní vodivost lze určit ze vztahu:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (4.42)$$

kde: λ – součinitel tepelné vodivosti hornin $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
 ρ – objemová hmotnost $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
 c – měrná tepelná kapacita $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

Pro znázornění rytmického průběhu teplot v různých hloubkách v půdě lze využít rovnice (4.43) dle autora Kutílka (1978). Tato rovnice ve svém výpočtu využívá výrazu $T_{AO} \exp\left(\frac{-z}{L}\right)$, který počítá s rozkmitem venkovní teploty a dále počítá s útlumovou hloubkou a s danou hloubkou v půdě. Z tohoto důvodu je vhodné tuto rovnici využít pro znázornění průběhu teplot ve vrtu, který není zasažen odběrem tepla tepelnými čerpadly.

$$T(z, t) = T^* + T_{AO} \exp\left(\frac{-z}{L}\right) \sin\left(\omega t - \frac{z}{L}\right) \quad (\text{K}) \quad (4.43)$$

kde: T^* - střední hodnota teploty během periody (K)
 T_{AO} – amplituda teploty na povrchu (K)
 z – hloubka (m)
 L – útlumová hloubka (m)
 ω – úhlová frekvence (s^{-1})
 t – čas (s)

Pro znázornění rytmického průběhu teplot v různých hloubkách v půdě okolo vrtů zasažených odběrem tepla tepelných čerpadel je vhodné využít rovnici volného netlumeného kmitání. Tato rovnice (4.44) počítá s výrazem Δt_{Az} , který lépe vyjadřuje průběh teplot v daných hloubkách okolí vrtu, ve kterém teplota půdy kolísá vlivem odběru tepelných čerpadel, respektive vlivem střídání teplot venkovního vzduchu.

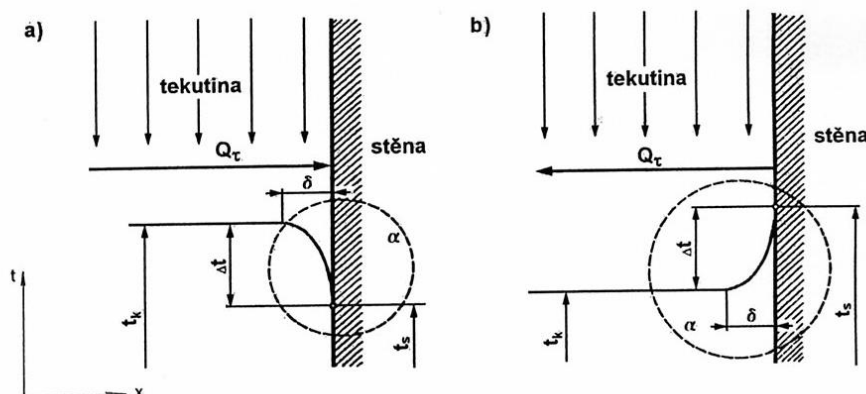
$$t_z = t_z^* + \Delta t_{Az} \cdot \sin(\Omega \cdot \tau - \varphi_z) \quad (\text{K}) \quad (4.44)$$

- kde: t_z – teplota horninového masivu v hloubce z (K)
 t_z^* – střední teplota horninového masivu v hloubce z (K)
 Δt_{Az} – amplituda oscilace kolem teploty t_z^* (K)
 τ – pořadové číslo dne v roce (den)
 φ_z – počáteční fáze kmitu (rad)
 Ω – úhlová rychlost ($2 \cdot \pi / 366 \text{ rad} \cdot \text{den}^{-1}$)

4.2.3 Součinitel přestupu tepla a podobnostní kritéria

Ke sdílení tepla prouděním (konvekci) dochází například i při styku kapaliny s pevnou stěnou. Při tom dochází k ochlazování nebo ohřívání tenké vrstvy tekutiny při stěně podle toho, zda je teplota stěny vůči tekutině vyšší nebo nižší. Tento rozdíl teplot vrstev pak způsobuje přirozené proudění. Na (obr. 25) v případě a) je znázorněna situace, kdy sdílení tepla nastává prouděním z tekutiny do stěny, a v případě b) je znázorněn průběh, kdy sdílení tepla prouděním probíhá ze stěny do tekutiny. Rovnice, která vyjadřuje tepelný tok při sdílení tepla prouděním, je dána vztahem (4.45).

Obr. 25 Sdílení tepla prouděním



Zdroj: Adamovský, R., Neuberger, P. 2003. Termomechanika II, termodynamika par, vlhký vzduch, sdílení tepla. Česká zemědělská univerzita v Praze – technická fakulta, Praha, 122 s.

$$Q_t = \alpha \cdot S (t_s - t_k) \quad (\text{W}) \quad (4.45)$$

kde: Q_t – tepelný tok (W)
 α – součinitel přestupu tepla (W.m⁻².K⁻¹)
 t_s – teplota teplosměnné plochy (K)
 t_k – teplota tekutiny mimo termokinetickou mezní vrstvu δ (K)

Součinitel přestupu tepla α udává tepelný tok sdělený povrchem $S = 1\text{m}^2$ při rozdílu teplot 1K mezi teplotou tekutiny t_k a teplotou teplosměnné plochy t_s za 1s. Součinitel přestupu tepla je funkcí mnoha proměnných.

$$\alpha = f(w, t_s, t_k, \lambda, c_p, \phi, L_1, L_2, L_3, \dots) \quad (\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}) \quad (4.46)$$

Z tohoto důvodu se v praxi pro určení součinitele přestupu tepla využívá teorie podobnosti.

Geometrická podobnost

Vyjadřuje podobnost tvaru teplosměnné plochy. Geometrické kritérium podobnosti je zde tvořeno poměrem charakteristických rozměrů teplosměnné plochy. Geometrické kritérium podobnosti pro proudění tekutiny trubkou vyjadřuje poměr $D \cdot L^{-1}$.

Hydrodynamická podobnost

Vyjadřuje podobnost volného nebo nuceného proudění tekutin. Je určena hydrodynamickým kritériem podobnosti. Základní hydrodynamické kritérium pro nucené proudění tekutiny je Reynoldsovo kritérium.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (-) \quad (4.47)$$

kde: w – rychlost proudící tekutiny $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
 d – průměr potrubí (m)
 ν – kinematická viskozita proudící tekutiny $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

Fyzikální podobnost tekutin při sdílení tepla vyjadřuje Prandtlovo kritérium.

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (-) \quad (4.48)$$

kde: ν – kinematická viskozita proudící tekutiny $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
 a – teplotní vodivost $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

Teplotní vodivost je definována vztahem.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (4.49)$$

kde: λ – součinitel tepelné vodivosti $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
 ρ – hustota proudící tekutiny $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
 c_p – měrná tepelná kapacita proudící tekutiny
za stálého tlaku $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

Termokinetická podobnost

Vyjadřuje podobnost transportu tepla mezi stěnou a proudící tekutinou. Základní termokinetické kritérium vyjadřující podobnost přenosu tepla prouděním a vedením v termokinetické mezní vrstvě tekutiny je Nusseltovo kritérium.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (-) \quad (4.50)$$

kde: α – součinitel přestupu tepla (W.m⁻².K⁻¹)
 d – průměr potrubí (m)
 λ – součinitel tepelné vodivosti (W.m⁻¹.K⁻¹)

Úpravou rovnice 4.47 lze dostat vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4.51)$$

Obecná kritériální rovnice pro sdílení tepla prouděním, při kterém nedochází ke změně skupenství má tvar v případě nuceného proudění tekutiny:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (-) \quad (4.52)$$

Přestup tepla v případě laminárního proudění trubkou o délce L (m) a průměru d (m) vyjadřuje rovnice (4.53) dle autora (Sazima et. al, 1993).

$$Nu = \frac{\alpha_s \cdot d_1}{\lambda_s} = \left[3,65 + \frac{0,0668 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{d_1}{L}}{1 + 0,045 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_1}{L} \right)^{\frac{2}{3}}} \right] \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{st}} \right)^{0,14} \quad (-) \quad (4.53)$$

kde: λ_s – součinitel tepelné vodivosti teplotnosné kapaliny (W.m⁻¹.K⁻¹)
 Re – Reynoldsovo kritérium (-)
 Nu – Nusseltovo kritérium (-)
 Pr – Prandtlovo kritérium (-)
 Gr – Grashofovo kritérium (-)
 d_1 – vnitřní průměr potrubní sondy (m)
 L – délka potrubní sondy (m)
 μ_s – dynamická viskozita při střední teplotě teplotnosné kapaliny (Pa.s)

μ_{st} – dynamická viskozita při střední teplotě vnitřní stěny
trubky výměníku (Pa.s)

Rovnice 4.53 má platnost v mezích:

$$Re < 2300; Gr > 25000; 10^4 > Re.Pr \cdot \frac{d_1}{L} > 10^{-1}$$

Přestup tepla v případě turbulentního proudění trubkou o délce L (m) a průměru d (m) vyjadřuje rovnice (4.54) dle autora (Pethukova, 1970).

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (-) \quad (4.54)$$

$$\text{kde: } f = [1,82 \cdot \log(Re) - 1,64]^{-2} \quad (-) \quad (4.55)$$

Rovnice 4.54 má platnost v mezích:

$$10^4 < Re < 5 \cdot 10^6 ; 0,5 < Pr < 200$$

5 Výsledky a diskuze

V této kapitole jsou uvedeny výsledky z jednotlivých měření. Jelikož měření probíhalo na různě vstrojených vrtech, kapitoly jsou členěny podle vstrojení vrtů. Největší prostor zaujímá problematika teplotních změn v okolí vrtů v celém průběhu měření. Zejména pak na začátku a na konci topných sezón. Dále jsou uvedeny výsledky z měření průběhu regenerace vrtu VT1, výsledky z měření teplot teplotnosné směsi a výsledky z měření výkonů jednotlivých vrtů.

5.1 Průběh teplot v okolí vrtů vstrojených jednoduchou U-trubicí

VRT VT1

Topné období 2011/2012

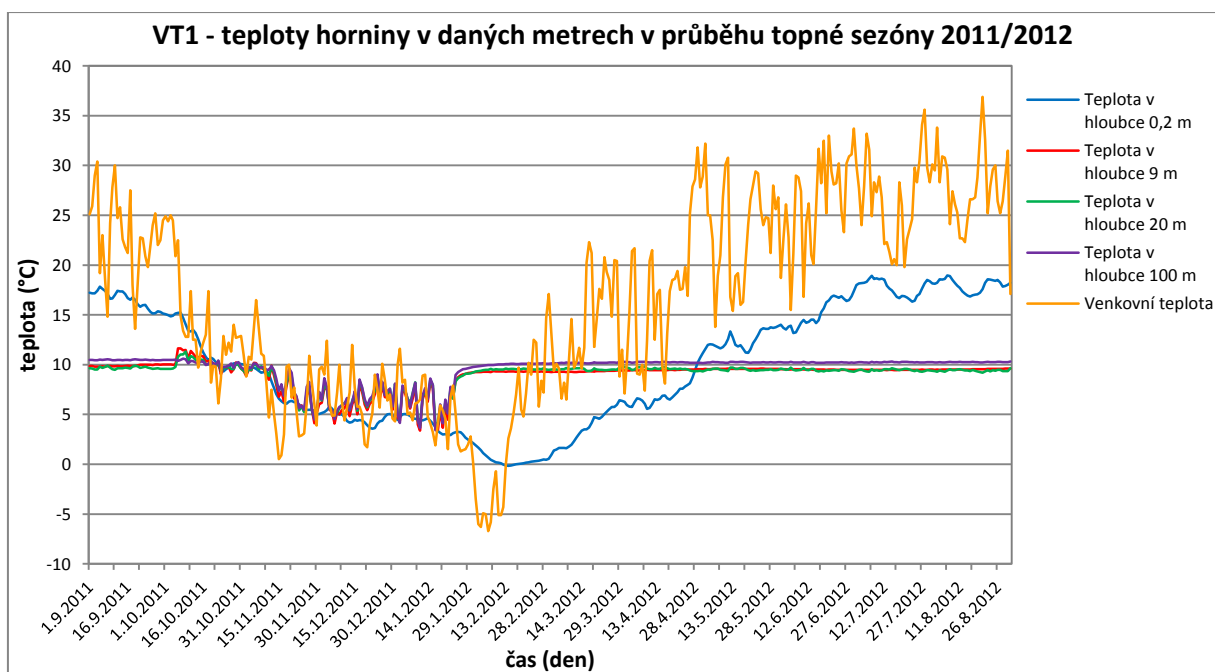
Topné období 2011/2012 začalo 15. 9. 2011 kdy venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 19 °C a noční teploty dosahovaly hodnoty 7 °C. V tento den v 15:00 hodin byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 17,1 °C, v 9 m 9,9 °C, ve 20 m 9,7 °C, ve 100 m 10,5 °C. Naproti tomu teploty v tento den a čas v referenčním vrtu VT9 byly následující: v 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,1 °C, ve 100 m 10,8 °C. Tedy oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT1 k poklesu teploty na začátku topné sezony 2011/2012 o hodnoty: v 9 m o 0,8 K, ve 20 m o 0,4 K, ve 100 m o 0,3 K.

Po tomto datu byl zahájen odběr tepla tepelnými čerpadly. Topná sezóna trvala do 26. 4. 2012, to je 225 dní. Křivky shodně klesají vlivem klesající venkovní teploty a odběrem tepelného čerpadla. Minimální hodnoty v této topné sezóně pro jednotlivé měřené hloubky byly následující. V 0,2 m byla minimální teplota -0,2 °C 14. 2. 2012. V 9 m byla minimální teplota 2,1 °C 16. 1. 2012. Ve 20m byla minimální teplota 2,7 °C rovněž 16. 1. 2012. Ve 100 m byla minimální teplota 2,3 °C také 16. 1. 2012. Z těchto hodnot je patrné, že teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m reflektuje spíše venkovní teplotu. Zatímco teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m reagují na odběr tepelného čerpadla a dosahují svého minima ve stejný den.

Od 10. 1. 2012 do 20. 1. 2012 se teploty v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m pohybují mírně nad svými minimy. Od dne 20. 1. 2012 do 19. 11. 2012 se uzavírací armaturou uzavřel průtok vrtem VT1. Od tohoto data mají křivky teplot v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m vzrůstající tendenci. Tento experiment je blíže popsán v kapitole 4.2.4. Zajímavé je, že minimum venkovní teploty nastává až od 31. 1. 2012 do 13. 2. 2012, kdy se venkovní teploty pohybovali i přes den pod bodem mrazu. I přes tento fakt teploty ve sledovaných hloubkách stoupají. Naproti tomu teplota v hloubce 0,2 m dále klesá a s určitým zpožděním spíše kopíruje průběh venkovní teploty. Od 10. 1. 2012 do 9. 2. 2012 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 96 % svých hodnot na začátku topné sezony 2011/2012.

Všechna tato data odpovídají průběhu zimního období, kdy je možno říci, že zima 2011/2012 byla mírnější a celkově zimní období bylo kratší. Počet dní, kdy bylo přes den pod 2 °C bylo 20. Významné teploty jsou uvedeny v tabulce 5. Průběh je znázorněn na (obr. 26).

Obr. 26 Teploty horniny ve vrtu VT1 v průběhu topné sezóny 2011/2012



Topné období 2012/2013

Topné období 2012/2013 začalo 19. 9. 2012 kdy venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 17 °C a noční teploty dosahovaly hodnoty 8 °C. Před zahájením topné sezony byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 15,9 °C, v 9 m 9,7 °C, ve 20 m 9,7 °C,

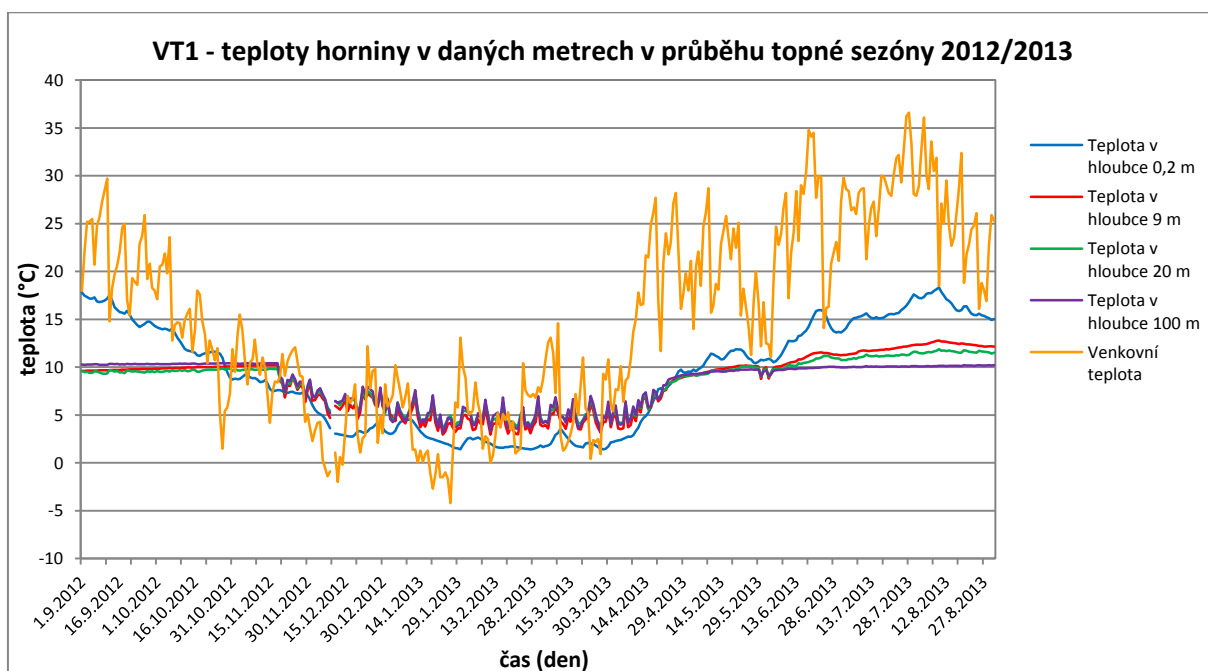
ve 100 m 10,4 °C. Teploty v referenčním vrtu VT9 ke dni 19. 9. 2012 byly následující. V 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,2 °C, ve 100 m 10,9 °C. Oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT1 k poklesu teploty na začátku topné sezóny 2012/2013 o hodnoty: v 9 m o 1 K, ve 20 m o 0,5 K a ve 100 m o 0,5 K.

Po tomto datu tepelná čerpadla zahájila odběr tepla. Topná sezóna trvala do 22. 4. 2013, to je 216 dní. Křivky mají klesající tendenci vlivem klesající venkovní teploty a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2012/2013 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující. V 0,2 m byla minimální teplota 1,42 °C 30. 1. 2013. V 9 m byla minimální teplota 2,95 °C 23. 1. 2013. Ve 20 m byla minimální teplota 3,5 °C rovněž 23. 1. 2013. Ve 100 m byla minimální teplota 3,2 °C také 23. 1. 2013. Opět je možno konstatovat, že teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m kopíruje spíše venkovní teplotu. Zatímco teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m reagují na odběr tepelného čerpadla a dosahují svého minima ve stejný den.

Po 23. 1. 2013 se teploty v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m drží nad svými minimálními hodnotami, avšak žádný výrazný růst teplot není sledován. Teploty oscilují těsně nad svými minimy až do cca 8. 4. 2013. Po tomto datu je vidět, že odběry tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu a teploty v jednotlivých hloubkách stoupají a můžeme sledovat pozvolný růst teplot. V topné sezóně 2012/2013 je zaznamenán jeden teplotní výkyv který nastal od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. V tomto období venkovní teploty přes den klesaly na hodnoty okolo 2 °C. Tento fakt podpořilo měření, kde teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m naměřilo minimální hodnotu. Od 8. 4. 2013 do 8. 5. 2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 95 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2012/2013.

Všechna tato data odpovídají průběhu zimního období, kdy je možné říci, že zima 2012/2013 byla celkově delší a ucelenější oproti předchozí sezóně. V celém sledovaném období jsem zaznamenal jeden teplotní výkyv který proběhl od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. Významné teploty pro tuto topnou sezónu, které probíhaly ve vrtu VT1 jsou uvedeny v tabulce 5. Vše je znázorněno na (obr. 27).

Obr. 27 Teploty horniny ve vrtu VT1 v průběhu topné sezóny 2012/2013



Topné období 2013/2014

Topné období 2013/2014 začalo 18. 9. 2013 kdy venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 16 °C a noční teploty dosahovaly hodnoty 6 °C. Před zahájením topné sezóny byly ve sledovaných metrech naměřeny následující hodnoty: v 0,2 m 14 °C, v 9 m 11,6 °C, ve 20 m 11,3 °C, ve 100 m 10,2 °C. Zároveň byly zjištěny teploty v referenčním vrtu VT9 ke dni 18. 9. 2013, které byly následující. V 9 m 10,6 °C, ve 20 m 10,2 °C, ve 100 m 10,7 °C. Je možné říci, že oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT1 k růstu teploty na začátku topné sezóny 2013/2014 o hodnoty: v 9 m o 1 K, ve 20 m o 1,1 K. Naproti tomu v hloubce 100 m došlo k poklesu o 0,5 K. Tento jev lze přisoudit k tomu, že ve vrtu po topné sezóně 2012/2013 po celou dobu proudila teplotně stabilizovaná kapalina, která po čas teplejších měsíců vrt zregenerovala lépe. Částečný průtok vrtem vznikl netěsností servoventilů.

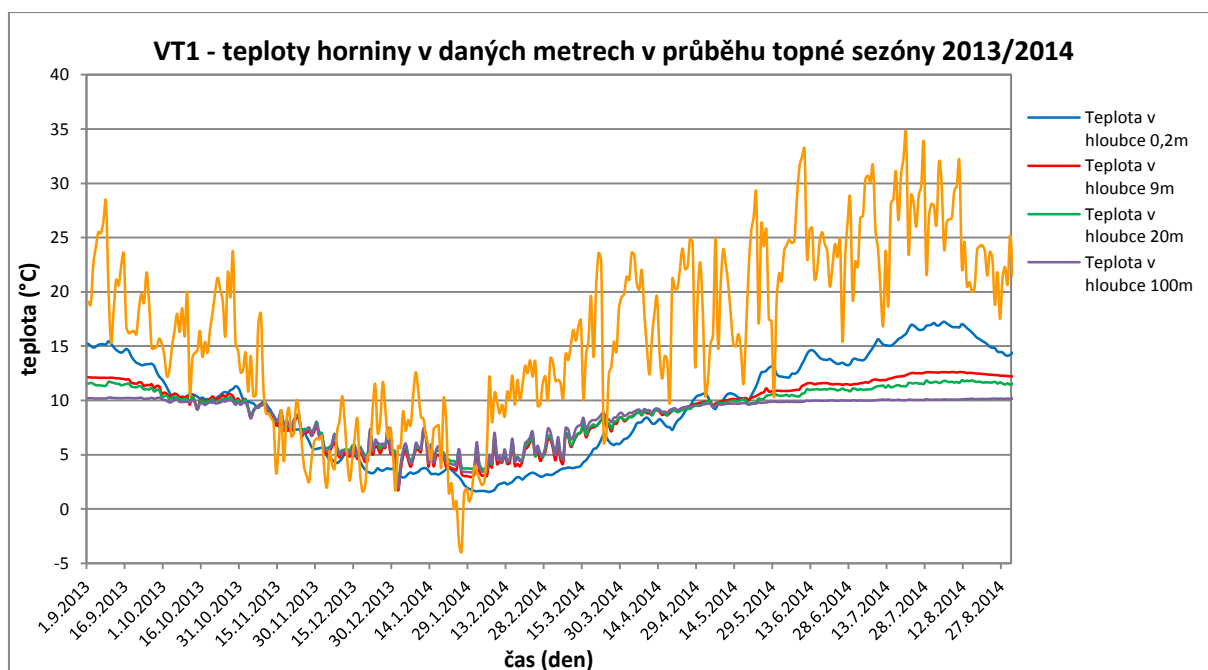
Po 18. 9. 2013 tepelná čerpadla zahájila odběr tepla a pracovala až do 23. 5. 2014, to je 249 dní. Křivky mají klesající tendenci v závislosti na klesající venkovní teplotě a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2013/2014 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující. V 0,2 m byla minimální teplota 1,58 °C 6. 2. 2014. V 9 m byla minimální teplota 1,7 °C 1. 1. 2014. Ve 20 m byla minimální teplota 2,1 °C rovněž 1. 1. 2014. Ve 100 m byla minimální teplota 1,9 °C také 1. 1. 2014. Zde je vidět stejný závěr jako v předchozích sezónách. Teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m kopíruje spíše venkovní

teplotu. Naproti tomu teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m reagují na odběr tepelných čerpadel a dosahují svého minima ve stejný den.

Po 1. 1. 2014 teploty v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m vzrůstají a odběry tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu. V topné sezóně 2013/2014 není možné sledovat žádný razantní teplotní výkyv. Zároveň je vidět, že minimální hodnoty v měřených hloubkách odpovídají období největších mrazů, kdy venkovní teploty dosahovaly i přes den záporných hodnot. Opět je zde možné říci, že zimní sezóna 2013/2014 byla „ucelená“ nedocházelo k výrazným teplotním výkyvům a nejnižší venkovní teploty se dosáhlo pozvolna. Rovněž příchod teplejšího období byl pozvolný a nebylo možné sledovat teplotní skoky. V období největšího nárůstu teplot v měřených hloubkách, od 1. 3. 2014 do 31. 3. 2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 76 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2013/2014.

Tyto závěry odpovídají průběhu zimního období, kdy je možné říci, že zima 2013/2014 byla podobná sezóně 2012/2013. Nástup chladných dní byl pozvolný, rovněž i příchod teplejších dní byl postupný. V celém měřeném období nejsou sledovány žádné výrazné teplotní výkyvy. Významné teploty tohoto topného období ve vrtu VT1 jsou uvedeny v tabulce 5. Vše je znázorněno na obr. 28.

Obr. 28 Teploty horniny ve vrtu VT1 v průběhu topné sezóny 2013/2014



Tab.5 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT1

		VRT VT1								
		Topné období 2011/2012			Topné období 2012/2013			Topné období 2013/2014		
		Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)
Hloubka [m]	0,2	19,8	-0,2	9,3	19,1	1,4	9,8	18,4	1,6	10,5
	9	14,8	2,1	8,9	10,2	2,95	7,4	12,8	1,7	9,2
	20	14,7	2,7	9,2	10	3,5	7,6	12,1	2,1	9,2
	100	14,6	2,3	9,4	10,5	3,2	8	11,5	1,9	8,6

VRT VT3

Topné období 2011/2012

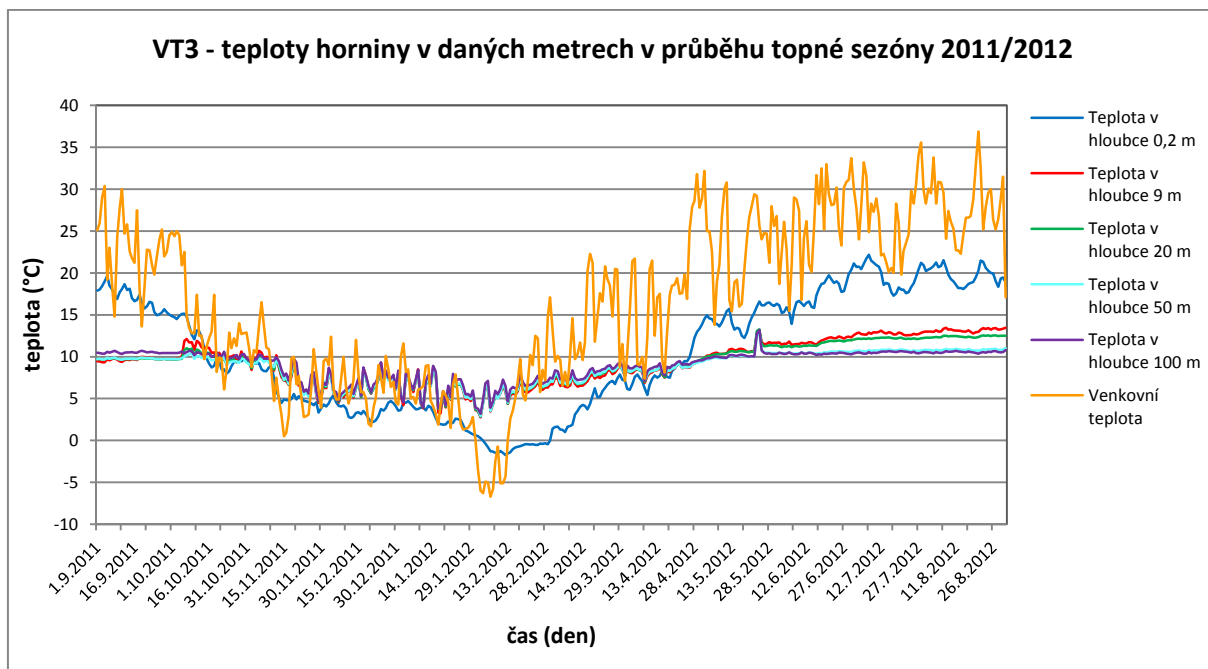
Topné období 2011/2012 začalo 15. 9. 2011 kdy venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 19 °C, noční teploty nabývaly hodnot okolo 7 °C. V tento den byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 17,0 °C, v 9 m 9,7 °C, ve 20 m 9,7 °C, v 50 m 9,8 °C, ve 100 m 10,5 °C. Naproti tomu teploty v tento den v referenčním vrtu VT9 byly následující: v 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,1 °C, v 50 m 10,1 °C, ve 100 m 10,8 °C. Tedy oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT3 k poklesu teploty na začátku topné sezóny 2011/2012 o hodnoty: v 9 m o 1,0 K, ve 20 m o 0,4 K, v 50 m o 0,3 K, ve 100 m o 0,3 K.

Po 15. 9. 2011 byl zahájen odběr tepla tepelnými čerpadly. Topná sezóna trvala do 26. 4. 2012, to je 225 dní. Křivky shodně klesají vlivem klesající venkovní teploty a vlivem odběrů tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v této topné sezóně pro jednotlivé měřené hloubky byly tyto. V 0,2 m byla minimální teplota -1,74 °C 12. 2. 2012. V 9 m byla minimální teplota 2,8 °C 2. 2. 2012. Ve 20 m byla minimální teplota 2,8 °C rovněž 10. 1. 2012. V 50 m byla minimální teplota 2,9 °C 10. 1. 2012 a ve 100 m byla minimální teplota 3,2 °C také 10. 1. 2012. Opět je vidět, že čidlo instalované v hloubce 0,2 m kopíruje s určitým zpožděním spíše venkovní teplotu. Zatímco teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m reagují na odběr tepelného čerpadla a dosahují svého minima ve stejný den.

Od 10. 1. 2012 do 15. 2. 2012 se teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m pohybují okolo 5 °C. Vrt VT3 byl po celou dobu měření otevřen a proudila jím teplotná kapalina. Ode dne 10. 1. 2012 do 9. 2. 2012 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují

v průměru již 60 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2011/2012. Významné teploty tohoto topného období ve vrtu VT3 jsou uvedeny v tabulce 6. Vše je znázorněno na (obr. 29).

Obr. 29 Teploty horniny ve vrtu VT3 v průběhu topné sezóny 2011/2012



Topné období 2012/2013

Topné období 2012/2013 začalo 19. 9. 2012, venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 17 °C a noční teploty klesaly na hodnoty okolo 8 °C. Před zahájením topné sezóny byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 16,1 °C, v 9 m 13,0 °C, ve 20 m 12,3 °C, v 50 m 11 °C a ve 100 m 10,8 °C. Teploty v referenční vrtu VT9 ke dni 19. 9. 2012 byly následující. V 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,2 °C, v 50 m 10,1 °C a ve 100 m 10,9 °C. Oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT1 k růstu teploty na začátku topné sezóny 2012/2013 o hodnoty: v 9 m o 2,3 K, ve 20 m o 2,1 K a v 50 m o 0,9 K. Naproti tomu v hloubce 100 m došlo k poklesu o 0,1 K.

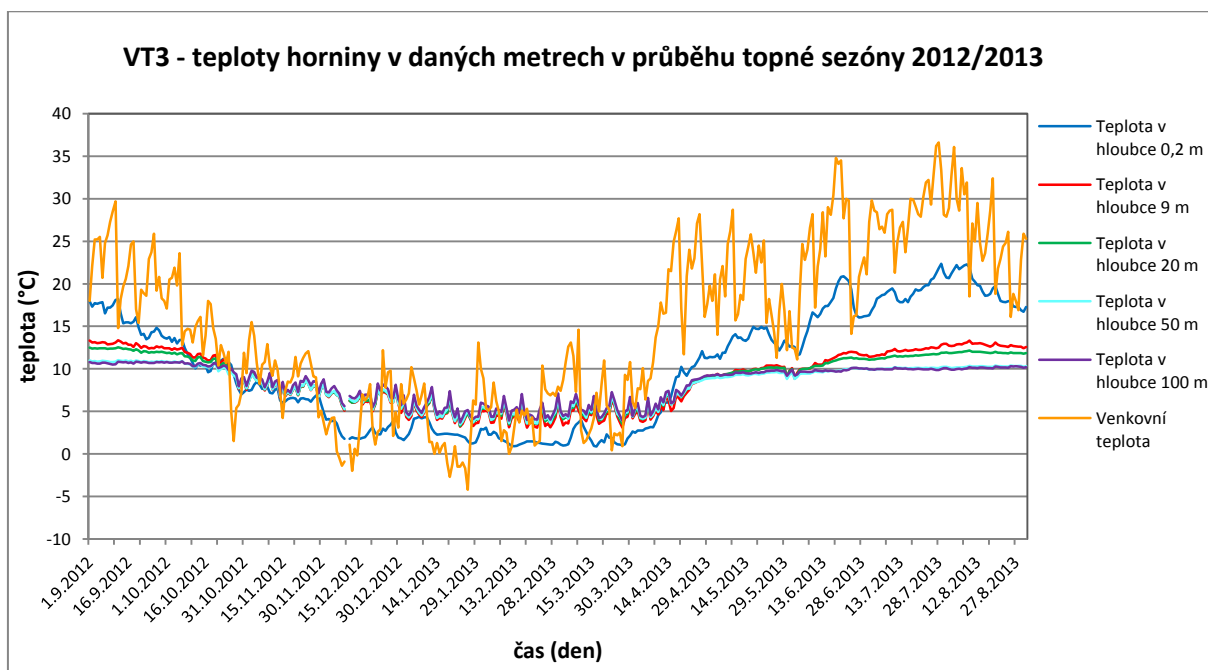
Po dni 19. 9. 2012 tepelná čerpadla zahájila odběr tepla. Topná sezóna trvala do 22. 4. 2013, to je 216 dní. Křivky mají klesající tendenci vlivem klesající venkovní teploty a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2012/2013 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující. V 0,2 m nastala minimální teplota 0,85 °C až 17. 3. 2013. V 9 m byla minimální teplota 3,1 °C 27. 3. 2013. Ve 20 m byla minimální teplota 3,3 °C 23. 1. 2013. V 50 m byla minimální teplota 3,5 °C dne 23. 1. 2013. Ve 100 m byla minimální

teplota 3,7 °C také 23. 1. 2013. V tomto případě je vidět u teplotních čidel instalovaných v hloubkách 0,2 m a 9 m, že dosahují svých minimálních hodnot ve stejném období. Proto je zde možné říci, že teplotní čidlo v 9 m je více ovlivněno venkovní teplotou než v předešlých případech. Teplotní čidla instalovaná v hloubkách 20 m, 50 m a 100 m reagují na odběr tepelného čerpadla a dosahují svého minima ve stejný den, tedy 23. 1. 2013.

Po 23. 1. 2013 se teploty v hloubkách 9 m, 50 m, 20 m a 100 m drží nad svými minimálními hodnotami. Teploty se pohybují těsně nad svými minimy až do cca 8. 4. 2013. Po tomto datu je vidět, že odběry tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu a teploty v jednotlivých hloubkách stoupají a můžeme sledovat pozvolný růst teplot. V topné sezóně 2012/2013 je sledován jeden teplotní výkyv který nastal od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. V tomto období venkovní teploty přes den klesaly na hodnoty okolo 2 °C až 7 °C. Tento fakt podpořilo měření, kde teplotní čidla instalovaná v hloubce 0,2 m a 9 m naměřila minimální hodnoty. Od 8.4.2013 do 8.5.2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 80 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2012/2013.

Všechna tato data odpovídají průběhu zimního období. V celém sledovaném období jsem zaznamenal jeden teplotní výkyv, který proběhl od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. Významné teploty vrtu VT3 v průběhu této topné sezony jsou uvedeny v tabulce 6. Vše je znázorněno na (obr. 30).

Obr. 30 Teploty horniny ve vrtu VT3 v průběhu topné sezóny 2012/2013



Topné období 2013/2014

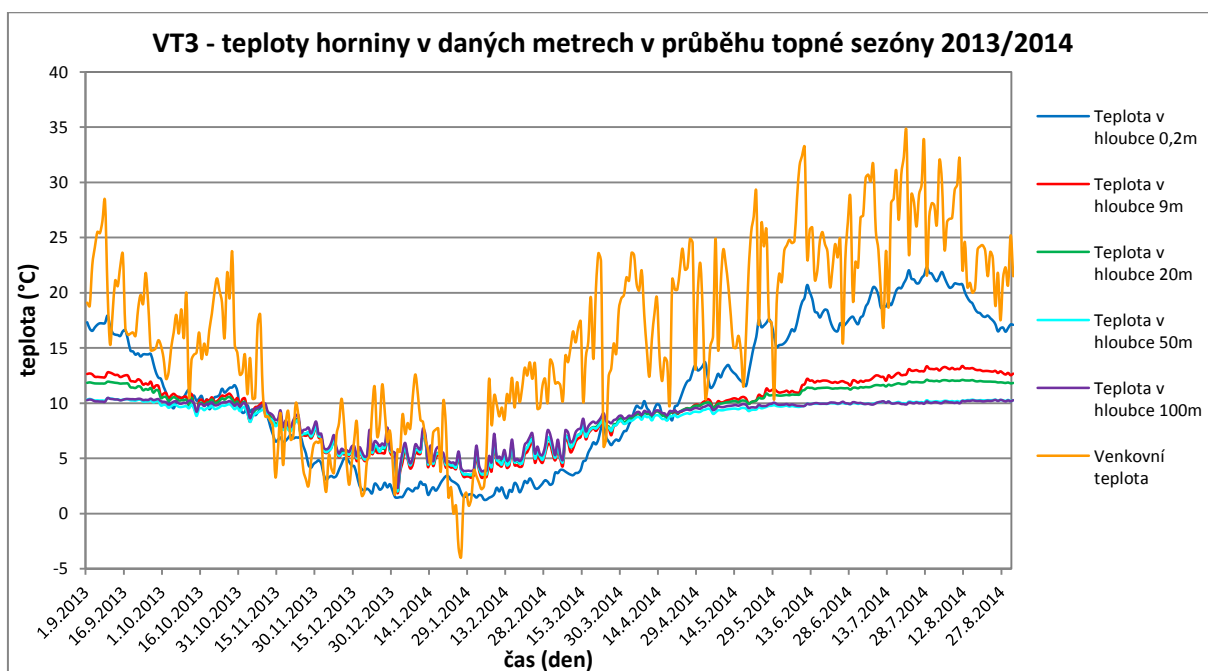
Topná sezóna 2013/2014 začala 18. 9. 2013 kdy venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 16 °C a noční teploty dosahovaly hodnoty 6 °C. Před topnou sezónou 2013/2014 byly ve sledovaných metrech naměřeny následující hodnoty: v 0,2 m 14,8 °C, v 9 m 12 °C, ve 20 m 11,4 °C, v 50 m 10,3 °C, ve 100 m 10,4 °C. Zároveň byly zjištěny teploty v referenční vrtu VT9 ke dni 18. 9. 2013, které byly následující: v 9 m 10,6 °C, ve 20 m 10,2 °C, v 50 m 9,9 °C ve 100 m 10,7 °C. Je možné říci, že oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT3 k růstu teploty na začátku topné sezony 2013/2014 o hodnoty: v 9 m o 2,4 K, ve 20 m o 1,2 K, v 50 m o 0,4 K. Naproti tomu v hloubce 100 m došlo k poklesu o 0,3 K.

Po 18. 9. 2013 tepelná čerpadla zahájila odběr tepla a pracovala až do konce topného období, které nastalo 23. 5. 2014, to je 249 dní. Křivky mají klesající tendenci v závislosti na klesající venkovní teplotě a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2013/2014 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující. V 0,2 m byla minimální teplota 1,25 °C 5. 2. 2014. V 9 m byla minimální teplota 1,9 °C 1. 1. 2014. Ve 20 m byla minimální teplota 2 °C rovněž 1. 1. 2014. V 50m byla minimální teplota 2 °C 1. 1. 2014. Ve 100 m byla minimální teplota 2,3 °C také 1. 1. 2014. Zde je vidět stejný závěr jako v některých předchozích sezónách. Teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m kopíruje spíše venkovní teplotu. Naproti tomu teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m reagují na odběr tepelných čerpadel a dosahují svého minima ve stejný den.

Po 1. 1. 2014 teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m vzrůstají a odběry tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu. V topné sezóně 2013/2014 není možné sledovat žádný razantní teplotní výkyv. Zároveň je vidět, že minimální hodnoty v měřených hloubkách odpovídají období největších mrazů, kdy venkovní teploty dosahovaly i přes den záporných hodnot. Opět je možno říci, že zimní sezóna 2013/2014 byla „ucelená“, nedocházelo k výrazným teplotním výkyvům a nejnižší venkovní teploty se dosáhlo pozvolna. Rovněž příchod teplejšího období byl pozvolný a nebylo možné sledovat teplotní skoky. V období největšího nárůstu teplot v měřených hloubkách, od 1. 3. 2014 do 31. 3. 2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 76 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2013/2014.

Tyto závěry odpovídají průběhu zimního období. V celém měřeném období nejsou sledovány žádné výrazné teplotní výkyvy. Významné teploty probíhající ve vrtu VT3 v průběhu této topné sezóny jsou uvedeny v tabulce 6. Vše je znázorněno na (obr. 31).

Obr. 31 Teploty horniny ve vrtu VT3 v průběhu topné sezóny 2013/2014



Tab.6 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT3

		VRT VT3								
		Topné období 2011/2012			Topné období 2012/2013			Topné období 2013/2014		
		Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)
Hloubka [m]	0,2	22,9	-1,74	10	23,2	0,85	10,3	23,3	1,25	12,4
	9	14,5	2,8	8,5	13,9	3,1	8,7	13,5	1,9	9,6
	20	14,8	2,8	8,5	13,6	3,3	8,5	12,2	2	9,3
	50	14,4	2,9	8,5	13,2	3,5	8	11	2	8,6
	100	14,7	3,2	8,9	13,5	3,7	8,1	11,3	2,3	8,7

5.2 Průběh teplot v okolí vrtů vystrojených dvojitou U-trubicí

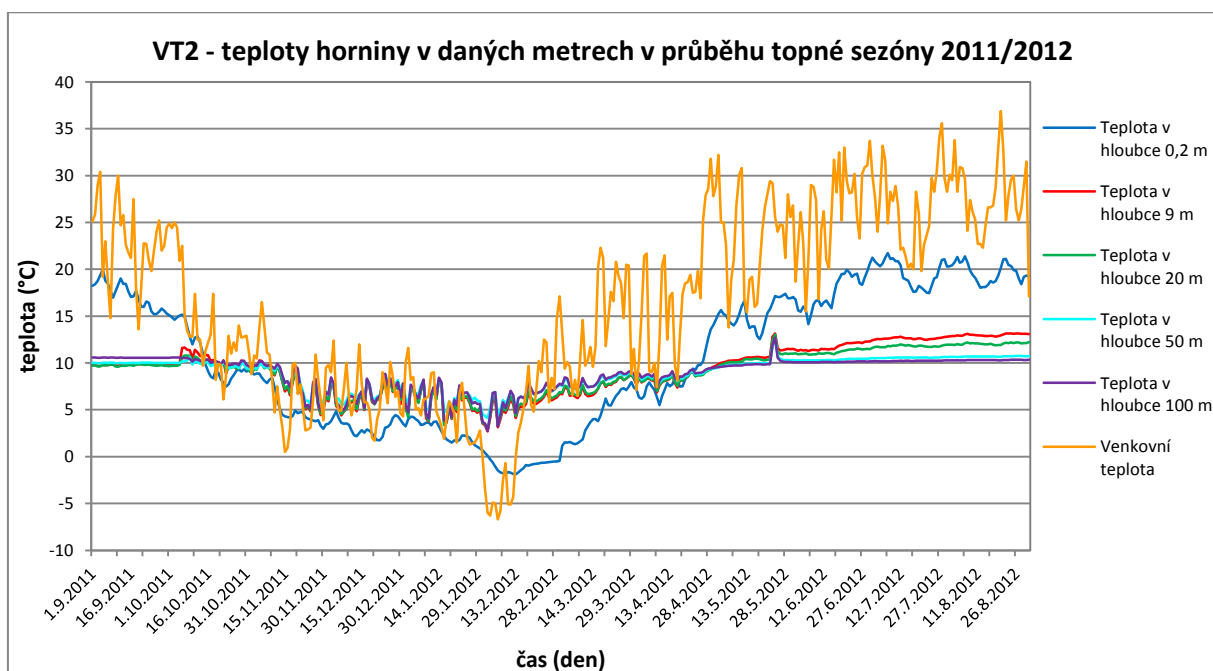
VRT VT2

Topné období 2011/2012

Topné období 2011/2012 začalo 15. 9. 2011, v tento den venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 19 °C a noční teploty dosahovaly hodnoty 7 °C. Na začátku topné sezóny byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 17,6 °C, v 9 m 9,8 °C, ve 20 m 9,8 °C, v 50 m 10 °C, ve 100 m 10,6 °C. Naproti tomu teploty v tento den v referenčním vrtu VT9 byly následující: v 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,1 °C, v 50 m 10,1 °C, ve 100 m 10,8 °C. Tedy oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT2 k poklesu teploty na začátku topné sezóny 2011/2012 o hodnoty: v 9 m o 0,9 K, ve 20 m o 0,3 K, v 50 m o 0,1 K, ve 100 m o 0,2 K.

Po 15. 9. 2011 byl zahájen odběr tepla tepelnými čerpadly. Topná sezóna trvala do 26. 4. 2012, to je 225 dní. Křivky shodně klesají vlivem klesající venkovní teploty a vlivem odběrů tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v této topné sezóně pro jednotlivé měřené hloubky byly tyto. V 0,2 m byla minimální teplota -1,9 °C 13. 2. 2012. V 9 m byla minimální teplota 2,7 °C 2. 2. 2012. Ve 20 m byla minimální teplota 2,8 °C rovněž 2. 2. 2012. V 50 m byla minimální teplota 4,1 °C 2. 2. 2012 a ve 100 m byla minimální teplota 2,8 °C také 2. 2. 2012. V hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m jsou naměřena minima ve stejný den 2. 2. 2012. Od 10. 1. 2012 do 15. 2. 2012 se teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m pohybují okolo 5 °C. Vrt VT2 byl po celou dobu měření otevřen a proudila jím teplotonosná kapalina. Ode dne 10. 1. 2012 do 9. 2. 2012 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 51 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2011/2012. Významné teploty vrtu VT2 této topné sezóny jsou uvedeny v tabulce 7. Vše je znázorněno na (obr. 32).

Obr. 32 Teploty horniny ve vrtu VT2 v průběhu topné sezóny 2011/2012



Topné období 2012/2013

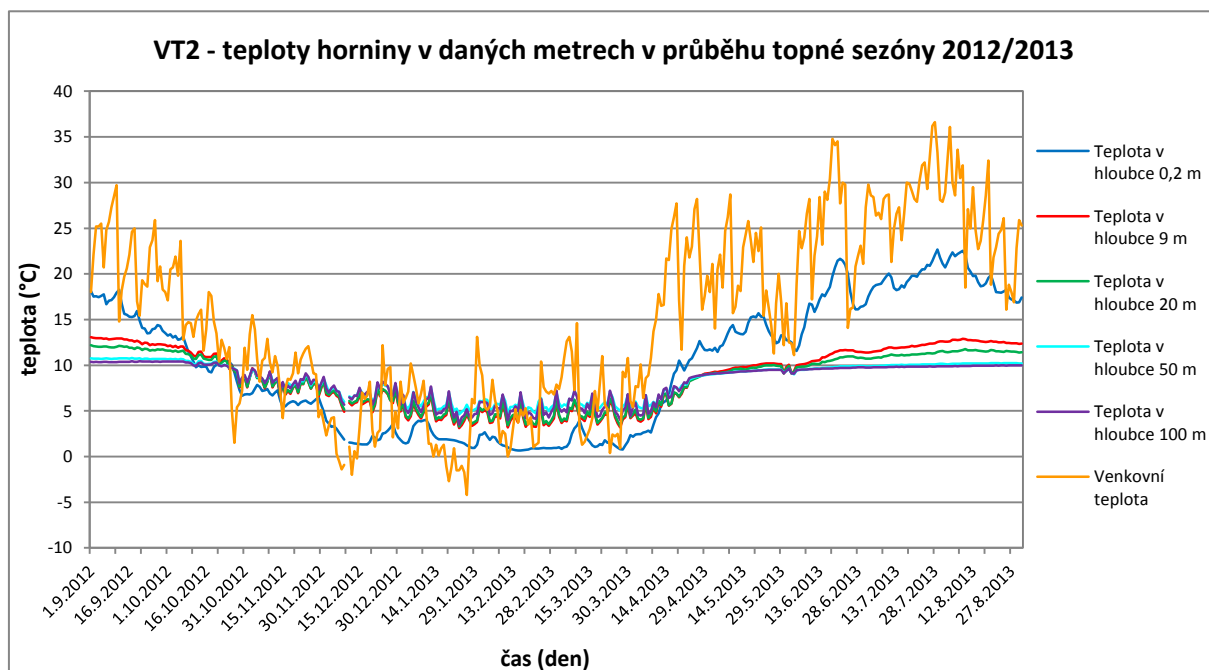
Topné období 2012/2013 začalo 19. 9. 2012, venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 17 °C a noční teploty klesaly na hodnoty okolo 8 °C. Před zahájením topné sezóny byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 15,9 °C, v 9 m 12,7 °C, ve 20 m 12 °C, v 50 m 10,7 °C a ve 100 m 10,4 °C. Teploty v referenční vrtu VT9 ke dni 19. 9. 2012 byly následující. V 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,2 °C, v 50 m 10,1 °C a ve 100 m 10,9 °C. Oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT2 k růstu teploty na začátku topné sezóny 2012/2013 o hodnoty: v 9 m o 2 K, ve 20 m o 1,8 K a v 50 m o 0,6 K. Naproti tomu v hloubce 100m došlo k poklesu o 0,5 K.

Po dni 19. 9. 2012 tepelná čerpadla zahájila odběr tepla. Topná sezóna trvala do 22. 4. 2013, to je 216 dní. Křivky mají klesající tendenci vlivem klesající venkovní teploty a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2012/2013 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující. V 0,2 m nastala minimální teplota 0,8 °C až 28. 3. 2013. V 9 m byla minimální teplota 3,1 °C 23. 1. 2013. Ve 20 m byla minimální teplota 3,3 °C 23. 1. 2013. V 50 m byla minimální teplota 4,6 °C dne 23. 1. 2013. Ve 100 m byla minimální teplota 3,5 °C také 23. 1. 2013. Teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m reagují na odběr tepelného čerpadla a dosahují svého minima ve stejný den, tedy 23. 1. 2013. Oproti čidlu v hloubce 0,2 m, které naměřilo nejnižší hodnotu dne až 28. 3. 2013.

Po 23. 1. 2013 se teploty v hloubkách 9 m, 50 m, 20 m a 100 m drží nad svými minimálními hodnotami. Teploty se pohybují těsně nad svými minimy až do cca 8. 4. 2013. Po tomto datu je vidět, že odběry tepla tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu a teploty v jednotlivých hloubkách stoupají a je možné sledovat pozvolný růst teplot. V topné sezóně 2012/2013 je zaznamenán jeden teplotní výkyv, který nastal od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. V tomto období venkovní teploty přes den klesaly na hodnoty okolo 2 °C až 7 °C. Tento fakt podpořilo měření, kde teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m naměřilo minimální hodnotu. Od 8. 4. 2013 do 8. 5. 2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 82 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2012/2013.

Všechna tato data odpovídají průběhu zimního období. V celém sledovaném období je zaznamenán jeden teplotní výkyv, který proběhl od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. Významné teploty vrtu VT2 pro tuto topnou sezónu jsou uvedeny v tabulce 7. Vše je znázorněno na (obr. 33).

Obr. 33 Teploty horniny ve vrtu VT2 v průběhu topné sezóny 2012/2013



Topné období 2013/2014

Topná sezóna 2013/2014 začala 18. 9. 2013 kdy venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 16 °C a noční teploty dosahovaly hodnoty 6 °C. Před topnou sezónou 2013/2014 byly

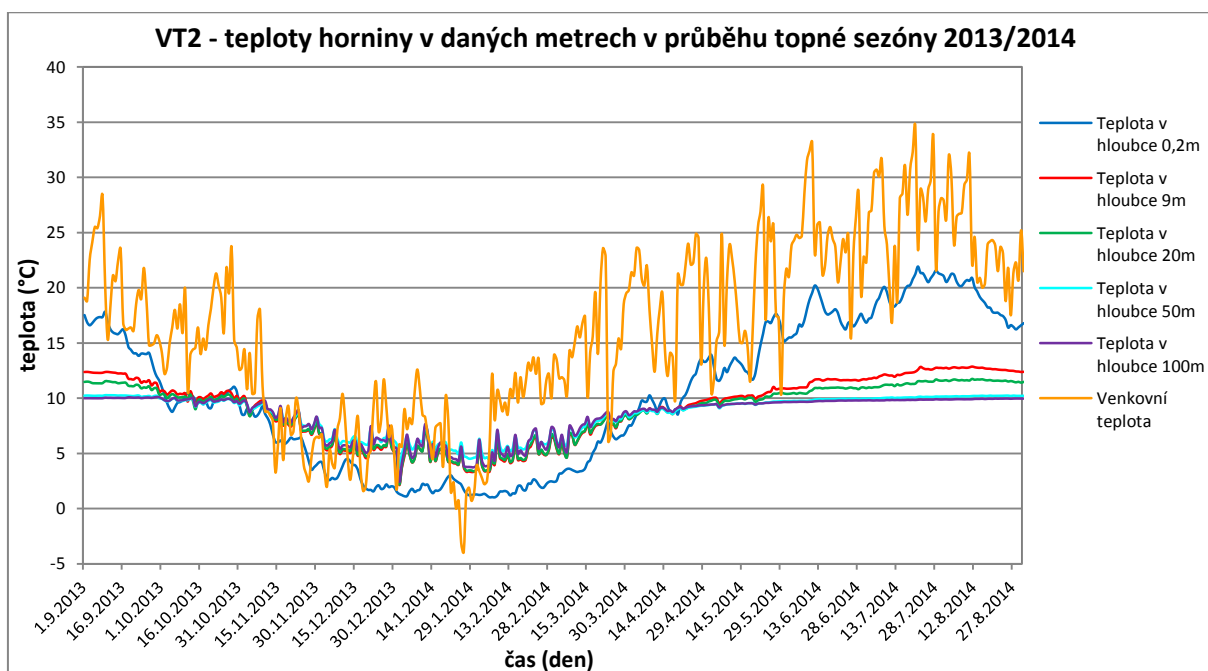
ve sledovaných metrech naměřeny následující hodnoty: v 0,2 m 14,7 °C, v 9 m 11,8 °C, ve 20 m 11,1 °C, v 50 m 10,2 °C, ve 100 m 10,1 °C. Zároveň byly zjištěny teploty v referenční vrtu VT9 ke dni 18. 9. 2013, které byly následující. V 9 m 10,6 °C, ve 20 m 10,2 °C, v 50 m 9,9 °C ve 100 m 10,7 °C. Je možné říci, že oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT2 k růstu teploty na začátku topné sezóny 2013/2014 o hodnoty: v 9 m o 1,2 K, ve 20 m o 0,9 K a v 50 m o 0,3 K. Naproti tomu v hloubce 100 m došlo k poklesu o 0,6 K.

Po 18. 9. 2013 tepelná čerpadla zahájila odběr tepla a pracovala až do konce topného období, které nastalo 23. 5. 2014, to je 249 dní. Křivky mají klesající tendenci v závislosti na klesající venkovní teplotě a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2013/2014 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující. V 0,2 m nastala minimální teplota 5. 2. 2014 a 7. 2. 2014 shodně o hodně 1,01396 °C. V 9m byla minimální teplota 2,2 °C 1. 1. 2014. Ve 20 m byla minimální teplota 2,2 °C rovněž 1. 1. 2014. V 50 m byla minimální teplota 3,8 °C 1. 1. 2014. Ve 100 m byla minimální teplota 2,4 °C také 1. 1. 2014. Zde je vidět stejný závěr jako v některých předchozích sezónách. Teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m kopíruje spíše venkovní teplotu. Naproti tomu teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m reagují na odběr tepelných čerpadel a dosahují svého minima ve stejný den.

Po 1. 1. 2014 teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m vzrůstají a odběry tepla tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu. V topné sezóně 2013/2014 není možné sledovat žádný razantní teplotní výkyv. Zároveň je vidět, že minimální hodnoty v měřených hloubkách odpovídají období největších mrazů, kdy venkovní teploty dosahovaly i přes den záporných hodnot. Opět je vidět, že zimní sezóna 2013/2014 byla „ucelená“ nedocházelo k výrazným teplotním výkyvům a nejnižší venkovní teploty se dosáhlo pozvolna. Rovněž příchod teplejšího období byl pozvolný a nebylo možné sledovat teplotní skoky. V období největšího nárůstu teplot v měřených hloubkách, od 1. 3. 2014 do 31. 3. 2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9m, 20m, 50m a 100m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 77 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2013/2014.

Tyto závěry odpovídají průběhu zimního období. V celém sledovaném období nesledují žádné výrazné teplotní výkyvy. Významné teploty vrtu VT2 probíhající v tomto topném období jsou uvedeny v tabulce 7. Vše je znázorněno na (obr. 34).

Obr. 34 Teploty horniny ve vrtu VT2 v průběhu topné sezóny 2013/2014



Tab.7 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT2

		VRT VT2								
		Topné období 2011/2012			Topné období 2012/2013			Topné období 2013/2014		
		Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)
Hloubka [m]	0,2	23,3	-1,9	10,1	22,3	0,8	10,2	23,3	1	12,3
	9	14,6	2,7	8,4	13,4	3,1	8,5	13	2,2	9,4
	20	14,6	2,8	8,5	13,3	3,3	8,3	11,9	2,2	9,1
	50	13,9	4,1	8,8	12,7	4,6	8,3	10,9	3,8	8,7
	100	14	2,8	8,8	12,8	3,5	7,9	10,7	2,4	8,5

VRT VT4

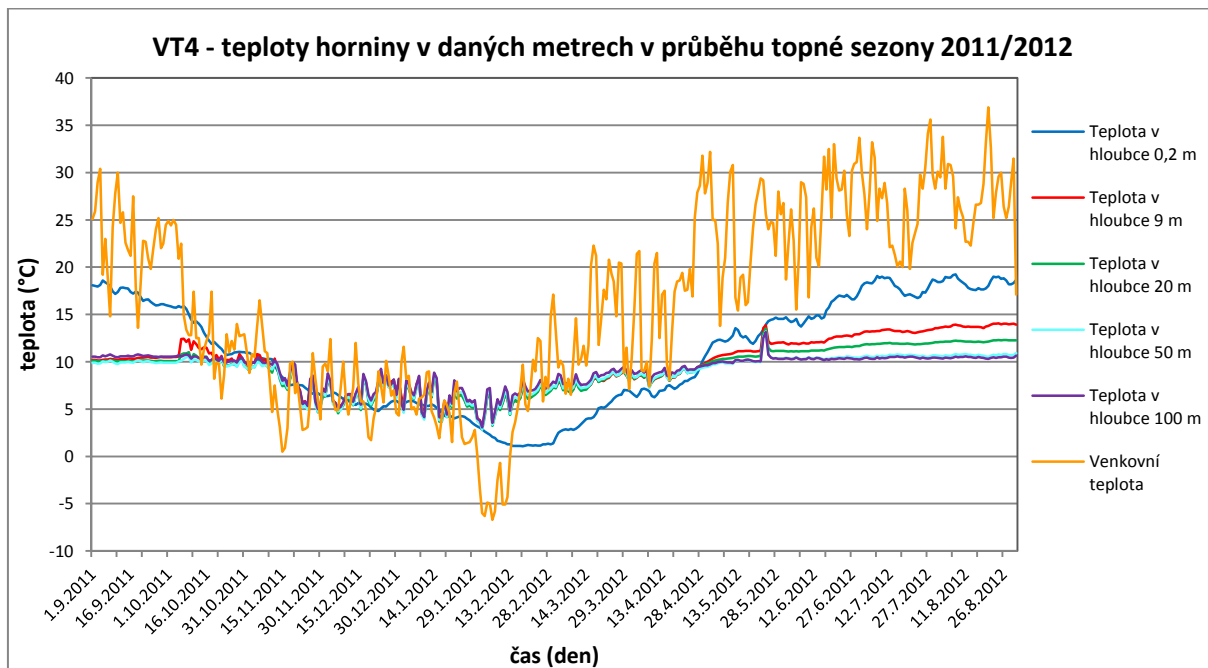
Topné období 2011/2012

Topná sezóna 2011/2012 začala 15. 9. 2011. V těchto dnech venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 19 °C a noční teploty se pohybovaly okolo 7 °C. Na začátku topné sezóny byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 17,7 °C, v 9 m 10,3 °C, ve 20 m 10 °C, v 50 m 10 °C, ve 100 m 10,6 °C. Naproti tomu teploty v tento den v referenčním vrtu VT9 byly následující: v 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,1 °C, v 50 m 10,1 °C, ve 100 m 10,8 °C. Oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT4 k poklesu teploty na začátku topné

sezóny 2011/2012 o hodnoty: v 9 m o 0,4 K, ve 20 m o 0,1 K, v 50 m o 0,1 K ve 100 m o 0,2 K.

Po 15. 9. 2011 byl zahájen odběr tepla tepelnými čerpadly. Topná sezóna trvala do 26. 4. 2012, to je 225 dní. Křivky shodně klesají vlivem klesající venkovní teploty a vlivem odběrů tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v této topné sezóně pro jednotlivé měřené hloubky byly tyto: v 0,2 m byla minimální teplota 1,07 °C 18. 2. 2012. V 9 m byla minimální teplota 3,2 °C 2. 2. 2012. Ve 20 m byla minimální teplota 2,8 °C rovněž 2. 2. 2012. V 50 m byla minimální teplota 2,8 °C 2. 2. 2012 a ve 100m byla minimální teplota 3,1 °C také 2. 2. 2012. V hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m jsou naměřena minima ve stejný den 2. 2. 2012. Od 10. 1. 2012 do 15. 2. 2012 se teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m pohybují okolo 5 °C. Vrt VT4 byl po celou dobu měření otevřen a proudila jím teplotonosná kapalina. Ode dne 10. 1. 2012 do 9. 2. 2012 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 51 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2011/2012. Významné teploty ve vrtu VT4 pro tuto topnou sezónu jsou uvedeny v tabulce 8. Vše je znázorněno na (obr. 35).

Obr. 35 Teploty horniny ve vrtu VT4 v průběhu topné sezóny 2011/2012



Topné období 2012/2013

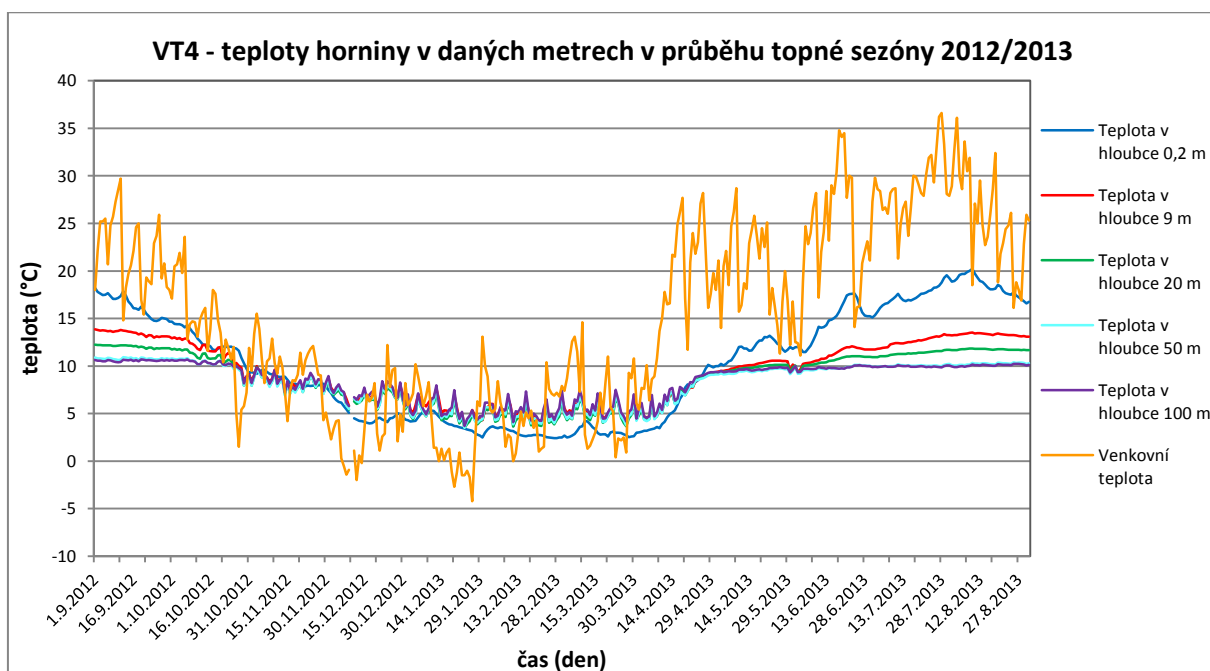
Začátek topného období 2012/2013 nastal 19. 9. 2012, venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 17 °C a noční teploty klesaly na hodnoty okolo 8 °C. Před zahájením topné sezóny byly teploty ve sledovaných metrech následující: v 0,2 m 16,3 °C, v 9 m 13,4 °C, ve 20 m 12 °C, v 50 m 11 °C a ve 100 m 10,7 °C. Teploty v referenční vrtu VT9 ke dni 19. 9. 2012 byly následující: v 9 m 10,7 °C, ve 20 m 10,2 °C, v 50 m 10,1 °C a ve 100 m 10,9 °C. Oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT4 k růstu teploty na začátku topné sezóny 2012/2013 o hodnoty: v 9 m o 2,7 K, ve 20 m o 1,8 K a v 50 m o 0,9 K. Naproti tomu v hloubce 100 m došlo k poklesu o 0,2 K.

Po dni 19. 9. 2012 tepelná čerpadla zahájila odběr. Topná sezóna trvala do 22. 4. 2013, to je 216 dní. Křivky mají klesající tendenci vlivem klesající venkovní teploty a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2012/2013 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující: v 0,2 m nastala minimální teplota 2,4 °C dne 28. 2. 2013. V 9 m byla minimální teplota 3,8 °C 23. 1. 2013. Ve 20 m byla minimální teplota 3,5 °C 23. 1. 2013. V 50 m byla minimální teplota 3,5 °C dne 23. 1. 2013. Ve 100 m byla minimální teplota 3,7 °C také 23. 1. 2013. Teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m reagují na odběr tepelného čerpadla a dosahují svého minima ve stejný den, tedy 23. 1. 2013. Oproti čidlu v hloubce 0,2 m, které naměřilo nejnižší hodnotu dne až 28. 2. 2013.

Po 23. 1. 2013 teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m kolísají nad svými minimálními hodnotami. Teploty se pohybují těsně nad svými minimy až do cca 8. 4. 2013. Po tomto datu je vidět, že odběry tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu a teploty v jednotlivých hloubkách stoupají a je možné sledovat pozvolný růst teplot. V topné sezóně 2012/2013 je zaznamenán jeden teplotní výkyv který nastal od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. V tomto období venkovní teploty přes den klesaly na hodnoty okolo 2 °C až 7 °C. Tento fakt podpořilo měření, kde teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m naměřilo druhou nejnižší teplotu topné sezony 2012/2013. Od 8. 4. 2013 do 8. 5. 2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 81 % svých hodnot na začátku topné sezony 2012/2013.

Všechna tato data odpovídají průběhu zimního období. V celém sledovaném období jsem zaznamenal jeden teplotní výkyv, který proběhl od 11. 3. 2013 do 24. 3. 2013. Významné teploty vrtu VT4 pro toto topné období jsou uvedeny v tabulce 8. Vše je znázorněno na (obr. 36).

Obr. 36 Teploty horniny ve vrtu VT4 v průběhu topné sezóny 2012/2013



Topné období 2013/2014

Topná sezóna 2013/2014 začala 18. 9. 2013, kdy venkovní teplota dosahovala hodnoty okolo 16 °C a noční teploty dosahovaly hodnoty 6 °C. Před topnou sezónou 2013/2014 byly ve sledovaných metrech naměřeny následující hodnoty: v 0,2 m 15,5 °C, v 9 m 12,6 °C, ve 20 m 11,4 °C, v 50 m 10,4 °C, ve 100 m 10,3 °C. Zároveň byly zjištěny teploty v referenční vrtu VT9 ke dni 18. 9. 2013, které byly následující: v 9 m 10,6 °C, ve 20 m 10,2 °C, v 50 m 9,9 °C ve 100 m 10,7 °C. Je možné říci, že oproti referenčnímu vrtu VT9 došlo ve vrtu VT4 k růstu teploty na začátku topné sezóny 2013/2014 o hodnoty: v 9 m o 2 K, ve 20 m o 1,2 K a v 50 m o 0,5 K. Naproti tomu v hloubce 100m došlo k poklesu o 0,4 K.

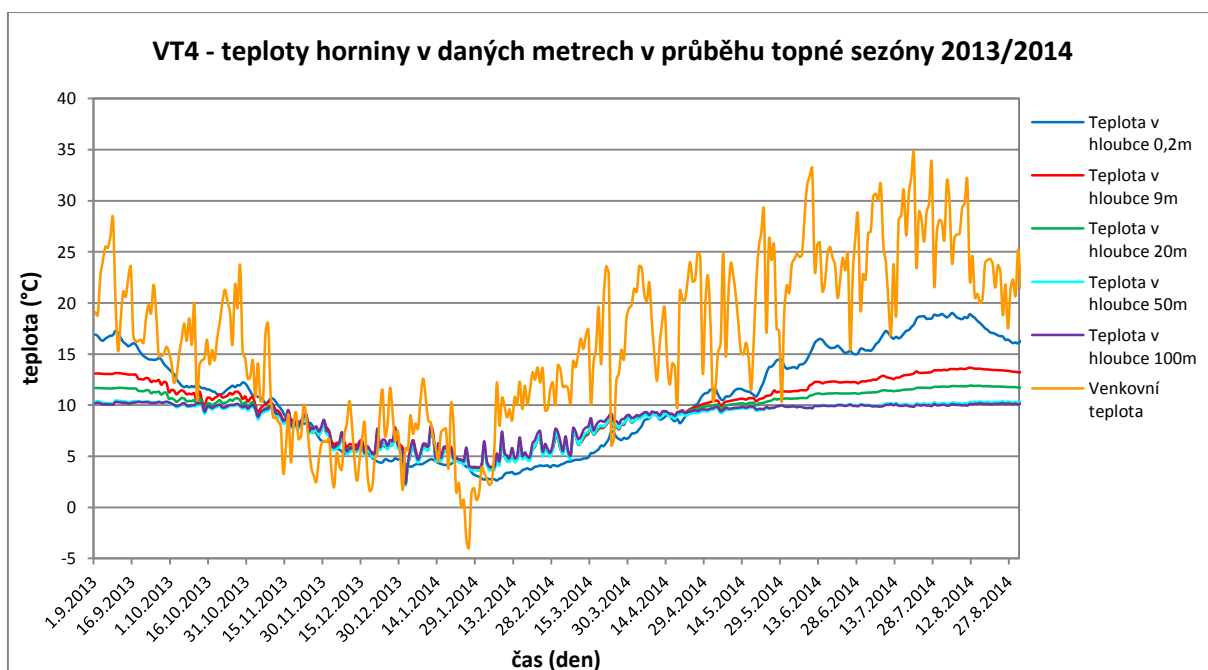
Po 18. 9. 2013 tepelná čerpadla zahájila odběr tepla a pracovala až do konce topného období, které nastalo 23. 5. 2014, to je 249 dní. Křivky mají klesající tendenci v závislosti na klesající venkovní teplotě a vlivem odběru tepelných čerpadel. Minimální hodnoty v topné sezóně 2013/2014 pro jednotlivé měřené hloubky byly následující: v 0,2 m nastala minimální teplota 6. 2. 2014, naměřeno byla hodnota 2,6 °C. V 9 m byla minimální teplota 3,5 °C 1. 1. 2014. Ve 20 m byla minimální teplota 2,4 °C rovněž 1. 1. 2014. V 50 m byla minimální teplota 2,1 °C 1. 1. 2014. Ve 100 m byla minimální teplota 2,3 °C také 1. 1. 2014. Zde je vidět stejný závěr jako v některých předchozích sezónách. Teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m kopíruje spíše venkovní teplotu. Naproti tomu teplotní čidla instalovaná v hloubkách 9 m,

20 m, 50 m a 100 m reagují na odběr tepelných čerpadel a dosahují svého minima ve stejný den.

Po 1. 1. 2014 teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m vzrůstají a odběry tepelných čerpadel klesají s ohledem na vzrůstající venkovní teplotu. V topné sezóně 2013/2014 není možné sledovat žádný razantní teplotní výkyv. Zároveň je vidět, že minimální hodnoty v měřených hloubkách odpovídají období největších mrazů, kdy venkovní teploty dosahovaly i přes den záporných hodnot. Znovu mohu uvést, že zimní sezóna 2013/2014 byla „ucelená“ nedocházelo k výrazným teplotním výkyvům a nejnižší venkovní teploty se dosáhlo pozvolna. Příchod teplejšího období byl rovněž pozvolný a nebylo možné sledovat teplotní skoky. V období největšího nárůstu teplot v měřených hloubkách, od 1. 3. 2014 do 31. 3. 2014 (31 dní) teploty v hloubkách 9 m, 20 m, 50 m a 100 m stoupají a po tomto období je možné říci, že teploty v jednotlivých hloubkách dosahují v průměru již 76 % svých hodnot na začátku topné sezóny 2013/2014.

Tyto závěry odpovídají průběhu zimního období. V celém sledovaném období nesledují žádné výrazné teplotní výkyvy. Významné teploty probíhající ve vrtu VT4 v této topné sezóně jsou uvedeny v tabulce 8. Vše je znázorněno na (obr. 37).

Obr. 37 Teploty horniny ve vrtu VT4 v průběhu topné sezóny 2013/2014



Tab.8 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT4

		VRT VT4								
		Topné období 2011/2012			Topné období 2012/2013			Topné období 2013/2014		
		Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Minimální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)
Hloubka [m]	0,2	20,3	1,1	10,1	19,5	2,4	10,4	20,3	2,6	11,9
	9	15,4	3,2	8,9	14,1	3,8	9,3	13,7	3,5	10
	20	15	2,8	8,6	13,8	3,5	8,5	12	2,4	9,3
	50	14,8	2,8	8,7	13,5	3,5	8,1	11,3	2,1	8,7
	100	14,6	3,1	8,9	13,4	3,7	8,2	11,1	2,3	8,8

5.3 Teplotní profily vrtů

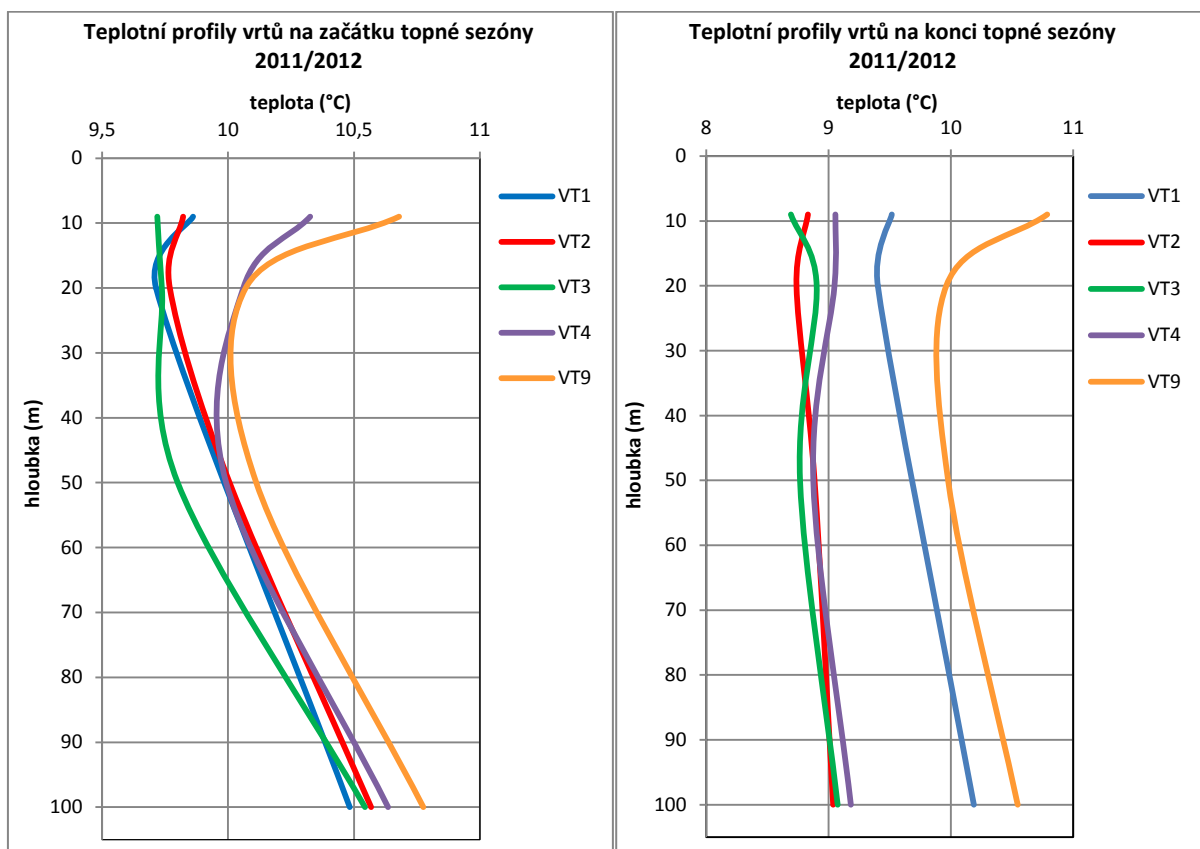
Topné období 2011/2012

Topná sezóna začala dne 15. 9. 2011. Na začátku této topné sezóny jsou teplotní profily všech měřených vrtů shodné. V hloubce 9 m pod povrchem byla zaznamenána hodnota okolo 9,8 °C, v hloubce 20m hodnota shodně okolo 9,7 °C, v 50 m 10 °C a ve 100 m teplota okolo 10,5 °C. Tyto hodnoty se nijak výrazně neliší od hodnot referenčního vrtu VT9. Na (obr. 38) je vidět, že všechny sledované vrty jsou plně „nabity“ před topnou sezónou. V tento moment jsou vrty používány pouze k topení teprve druhým rokem.

Na konci topné sezóny 26. 4. 2012 bylo naměřeno ve vrtech VT2, VT3, VT4 v jednotlivých měřených hloubkách řádově pouze o 1 °C menší hodnota teploty oproti referenčnímu vrtu VT9. Tedy v 9 m 8,8 °C, ve 20 m 8,9 °C, v 50 m 8,9 °C a ve 100 m 9 °C. Tento fakt je dán tím, že ke konci topné sezóny už odběr tepelných čerpadel není tak razantní a vrty se již částečně regenerují. Nejmenší teplotní odchylku v celém profilu vrtu měl vrt VT1. Naměřené hodnoty na konci topné sezóny ve vrtu VT1 jsou: v 9 m 9,5 °C, ve 20 m 9,4 °C, a ve 100 m 10,2 °C. Ve vrtu VT1 byly naměřeny teploty pouze o 0,5 °C nižší než jsou v referenčním vrtu VT9. Toto bylo způsobeno tím, že vrtem VT1 byl v období od 20. 1. 2012 do 19. 11. 2012 zavřen průtok a nedocházelo k tepelnému odběru. Proto se vrt VT1 samovolně dobíjel teplotou okolní horniny o 3 měsíce dříve než zbývající vrty a teplotní profil na konci topné sezóny 2011/2012 se nejvíce přibližuje teplotnímu profilu v referenčním vrtu VT9. Zajímavý je shodný průběh profilů vrtů VT3, VT4 na konci topné sezóny 2011/2012 v celém sledovaném profilu, ačkoliv jde o vrty s rozdílným vystrojením. Tento jev lze přisoudit půdorysnému rozmístění jednotlivých vrtů na pozemku a patřičným hloubkovým

poměrům v daných místech pozemku. Kde vrty VT1 a VT2 jsou umístěny v nejjihnější části pozemku, 5 metrů od hranice pozemku a vrty VT3, VT4 jsou umístěny blíže do středu pozemku k budově společnosti VESKOM, spol. s r.o. Naměřené teploty ve vrtu VT2 se nijak výrazně neliší od teplot ve vrtech VT3, VT4. Křivka teplotního profilu se svým průběhem velice blíží křivkám vrtů VT3 a VT4. Veškeré teplotní difference jsou uvedeny v tabulce 9.

Obr. 38 Teplotní profily sledovaných vrtů na začátku a na konci topné sezóny 2011/2012



Tab.9 Teplotní diference mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2011/2012

Teplotní diference mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2011/2012																
Topné období 2011/2012	VT1 vs VT9				VT2 vs VT9				VT3 vs VT9				VT4 vs VT9			
	Hloubka (m)				Hloubka (m)				Hloubka (m)				Hloubka (m)			
	9	20	50	100	9	20	50	100	9	20	50	100	9	20	50	100
Diference teplot na začátku topného období (°C)	0,82	0,36	nefunkční čidlo vrtu VT1	0,29	0,86	0,3	0,11	0,21	0,96	0,33	0,31	0,23	0,35	0,01	0,12	0,14
Diference teplot na konci topného období (°C)	1,27	0,56	nefunkční čidlo vrtu VT1	0,34	1,96	1,22	1,09	1,51	2,09	1,06	1,21	1,47	1,73	0,91	1,1	1,36

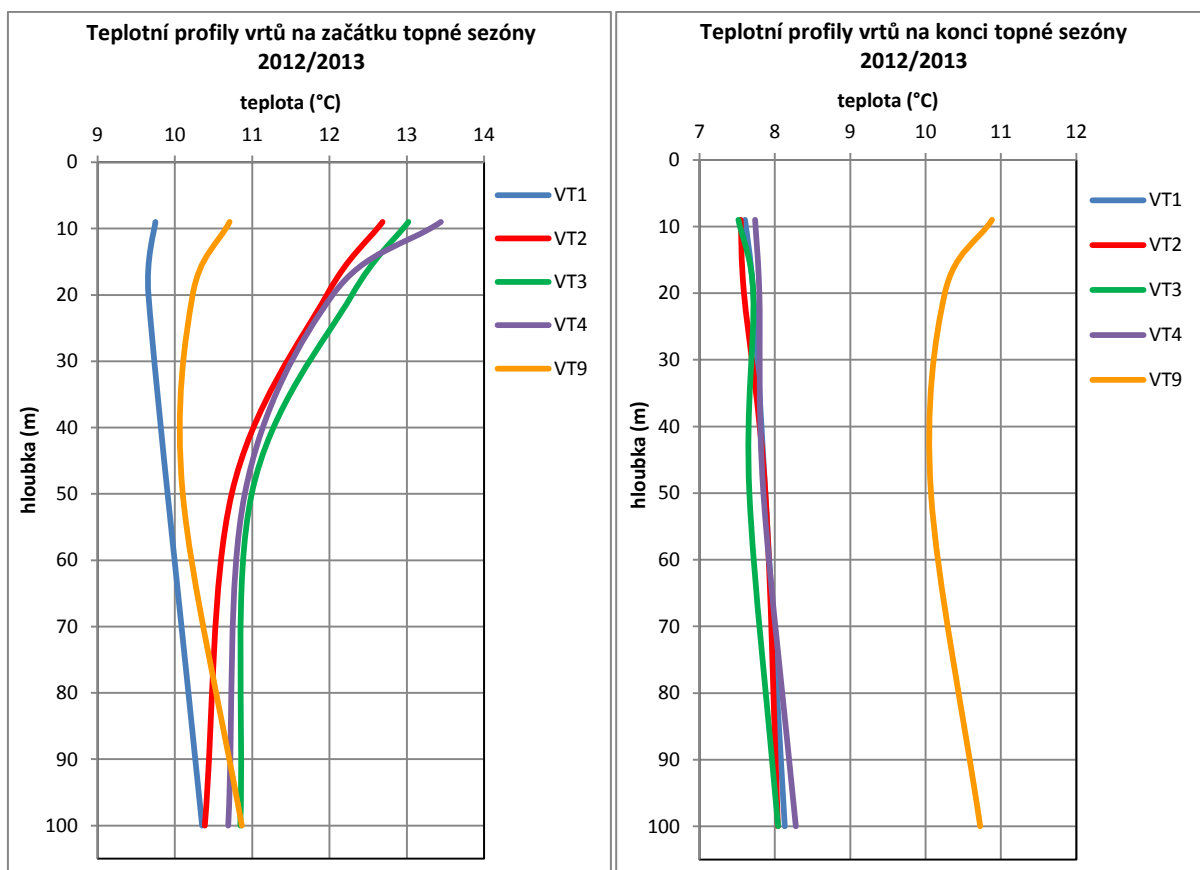
Topné období 2012/2013

Topná sezóna začala dne 19. 9. 2012. Na začátku této topné sezóny jsou teplotní profily vrtů VT2, VT3, VT4 shodné. V hloubce 9 m pod povrchem byla zaznamenána hodnota okolo 13 °C, v hloubce 20 m hodnota shodně okolo 12 °C, v 50 m 11 °C a ve 100 m teplota okolo 10,5 °C. Tyto hodnoty teplot jsou vyšší oproti hodnotám teplot v referenčním vrtu VT9 následovně: v 9 m o 3 °C, ve 20 m o 2 °C, v 50 m o 1 °C a ve 100 m se teploty neliší. Na (obr. 39) je vidět, že na začátku topné sezóny 2012/2013 ve vrtech VT2, VT3, VT4 jsou vyšší teploty v celém profilu vrtu než v referenčním vrtu VT9. V letním období muselo dojít k netěsnosti automatických uzavíracích ventilů, které uzavírají průtok vrty v období letních měsíců a vrty byly částečně dotovány energií v rámci pasivního chlazení administrativní budovy. Z tohoto důvodu dosahují teploty ve vrtech VT2, VT3, VT4 vyšších hodnot. Hodnoty teplot v celém profilu vrtu VT1 na začátku této topné sezóny oproti referenčnímu vrtu VT9 jsou nižší. V jednotlivých sledovaných metrech jsou hodnoty teplot nižší řádově o 0,5 °C. Tento pokles byl způsoben tím, že do vrtu VT1 byl zavřen průtok v období od 20. 1. 2012 do 19. 11. 2012 a tedy přes letní období se neměl možnost dobít reverzibilním chodem tepelného čerpadla Č.2. Proto se ve vrtu VT1 dosáhlo pouze hodnot teplot okolní horniny.

Na konci topné sezóny 22. 4. 2013 jsou hodnoty teplot v jednotlivých měřených hloubkách ve vrtech VT1, VT2, VT3, VT4 shodné. V měřených hloubkách jsou následující: v 9 m okolo 7,5 °C, ve 20 m 7,7 °C, v 50 m 7,8 °C a ve 100 m 8 °C. Tyto hodnoty znamenají

pokles oproti referenčnímu vrtu VT9 v 9 m o 3,4 °C ve 20 m o 2,5 °C, v 50 m o 2,2 °C a ve 100 m o 2,7 °C. Oproti konci topné sezóny 2011/2012 se dosáhlo nižších hodnot ve všech hloubkách o 1 °C. Je vidět, že i vrt VT1 se teplotně srovnal s ostatními vrty, jelikož jím byl zajištěn plný průtok po čas celé topné sezóny jako v ostatních vrtech. Na (obr. 39) opět zajímavý shodný průběh profilů vrtů VT3, VT4 na konci topné sezóny 2012/2013. Opět se jedná o vrty s rozdílným vystrojením a opět tento jev můžeme přičíst půdorysnému rozmístění jednotlivých vrtů na pozemku a patřičným hloubkovým poměrům v daných místech pozemku. Od hloubky 20 metrů se všechny vrty průběhem křivek srovnávají a až do hloubky 100 metrů žádná z křivek nikterak výrazně teplotně nevybočuje. Teplotní diference za topné období 2012/2013 jsou uvedeny v tabulce 10.

Obr. 39 Teplotní profily sledovaných vrtů na začátku a na konci topné sezóny 2012/2013



Tab.10 Teplotní diference mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2012/2013

Teplotní diference mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2012/2013																
Topné období 2012/2013	VT1 vs VT9				VT2 vs VT9				VT3 vs VT9				VT4 vs VT9			
	Hloubka (m)				Hloubka (m)				Hloubka (m)				Hloubka (m)			
	9	20	50	100	9	20	50	100	9	20	50	100	9	20	50	100
Diference teplot na začátku topného období (°C)	0,96	0,57	nefunkční čidlo vrtu VT1	0,51	-1,98	-1,74	-0,63	0,48	-2,31	-2,06	-0,89	0,02	-2,73	-1,81	-0,80	0,18
Diference teplot na konci topného období (°C)	3,28	2,54	nefunkční čidlo vrtu VT1	2,59	3,34	2,67	2,20	2,69	3,37	2,54	2,41	2,68	3,15	2,46	2,22	2,45

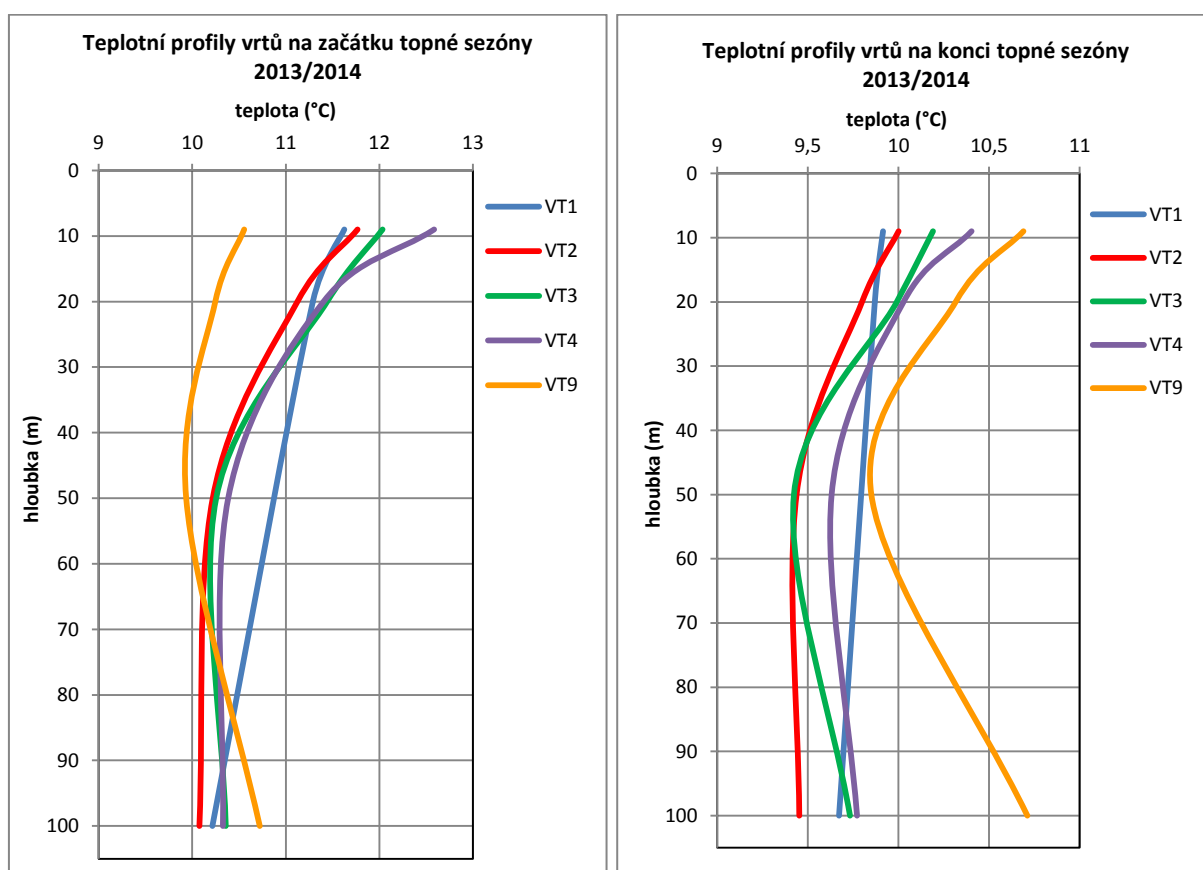
Topné období 2013/2014

Topná sezóna začala dne 18. 9. 2013. Na začátku této topné sezóny se teplotní profily vrtů VT1, VT2, VT3, VT4 od sebe liší vždy maximálně o 0,5 °C. Maximální odchylka nastává v hloubce 50m, kde vrt VT1 dosahuje o 0,6 °C vyšší hodnoty teploty než ostatní vrty. Po této teplotní odchylce se opět srovnává s ostatními vrty. Naměřené hodnoty teplot v jednotlivých hloubkách jsou následující: v hloubce 9 m pod povrchem byla zaznamenána hodnota v průměru okolo 11,8 °C, v hloubce 20 m hodnota shodně okolo 11,3 °C, v 50 m 10,3 °C a ve 100 m teplota okolo 10,3 °C. Tyto hodnoty teplot jsou vyšší oproti hodnotám teplot v referenčním vrtu VT9 následovně: v 9 m o 1,3 °C, ve 20 m o 1,1 °C, v 50 m o 0,3 °C a ve 100 m je dokonce průměrná teplota v měřených vrtech nižší o 0,4 °C oproti referenčnímu vrtu VT9. Znovu (obr. 40) dokazuje, že na začátku topné sezóny 2013/2014 ve vrtech VT1, VT2, VT3, VT4 ve vrchních 70 metrech jsou vyšší teploty než v referenčním vrtu VT9. V letním období opět docházelo k podcházení automatických uzavíracích ventilů, které uzavírají průtok vrty v období letních měsíců a vrty byly částečně dotovány energií v rámci pasivního chlazení administrativní budovy. Zde nevybočuje ani vrt VT1 jako tomu bylo na začátku topné sezóny 2012/2013. Energie z částečného pasivního chlazení budovy využívaly všechny vrty včetně vrtu VT1, který byl již plně pod průtokem teplonosné směsi a tedy teplotní profil se shoduje s teplotními profily ostatních vrtů.

Na konci topné sezóny 23. 5. 2014 jsou hodnoty teplot v jednotlivých měřených hloubkách ve vrtech VT1, VT2, VT3, VT4 shodné v maximální odchylce 0,3 °C. Hodnoty

teplot v měřených hloubkách jsou následující: v 9 m okolo 10 °C, ve 20 m 9,9 °C, v 50 m 9,4 °C a ve 100 m 9,5 °C. Tyto hodnoty znamenají pokles oproti referenčnímu vrtu VT9 v 9 m o 0,7 °C ve 20 m o 0,4 °C, v 50 m o 0,5 °C a ve 100 m o 1,2 °C. Oproti konci topných sezón 2011/2012 a 2012/2013 se dosáhlo nejnižších poklesu teplot oproti referenčnímu vrtu VT9. Na konci topné sezóny 2013/2014 je vyzorována opět podobnost průběhu křivek profilů vrtů. Tentokrát jde o vrty VT2, VT3 a VT4, kde ve svrchních 20 metrech mají křivky podobný charakter směru. Nyní se jedná o dva vrty vystrojené dvojitou U-trubicí (VT2 a VT4) a jeden vrt vystrojený jednoduchou U-trubicí (VT3). Vrt VT1 ve vrchních 20 metrech dosahuje nižších teplot, po té se teplotně srovnává s ostatními vrty a až do hloubky 100 metrů žádná z křivek nikterak výrazně teplotně nevybočuje. Teplotní difference za topné období 2013/2014 jsou uvedeny v tabulce 11.

Obr. 40 Teplotní profily sledovaných vrtů na začátku a na konci topné sezóny 2013/2014



Tab.11 Teplotní diference mezi měřenými vrtvy a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2013/2014

Teplotní diference mezi měřenými vrtvy a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2013/2014																
Topné období 2013/2014	VT1 vs VT9				VT2 vs VT9				VT3 vs VT9				VT4 vs VT9			
	Hloubka (m)				Hloubka (m)				Hloubka (m)				Hloubka (m)			
	9	20	50	100	9	20	50	100	9	20	50	100	9	20	50	100
Diference teplot na začátku topného období (°C)	-1,1	-1	nefunkční čidlo vrtu VT1	0,51	-1,21	-0,88	-0,28	0,65	-1,48	-1,20	-0,32	0,36	-2,03	-1,16	-0,45	0,39
Diference teplot na konci topného období (°C)	0,77	0,45	nefunkční čidlo vrtu VT1	1,04	0,69	0,52	0,41	1,26	0,50	0,32	0,43	0,98	0,29	0,29	0,22	0,94

5.4 Průběh teplot v okolí vrtů podle rovnic volného netlumeného kmitání

Pro porovnání naměřených údajů je nejprve výpočtem určena tzv. útlumová hloubka blíže popsaná v kapitole 4.2.2. Tento údaj je zjišťován, aby bylo známo do jaké hloubky ovlivňuje teplotu půdy sluneční záření.

Pro tepelnou vodivost je dosazován údaj z provedeného TRT testu ($2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Součinn $\rho\cdot c$ je nahrazen objemovým teplem zeminy podle autora Čížka (2005) pro jíl nasycený vodou, který se vyskytuje prakticky v celém profilu všech sledovaných vrtů $\rho\cdot c = 3,47\cdot 10^6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$

Z těchto hodnot vychází:

teplotní vodivost $a = 8,357\cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

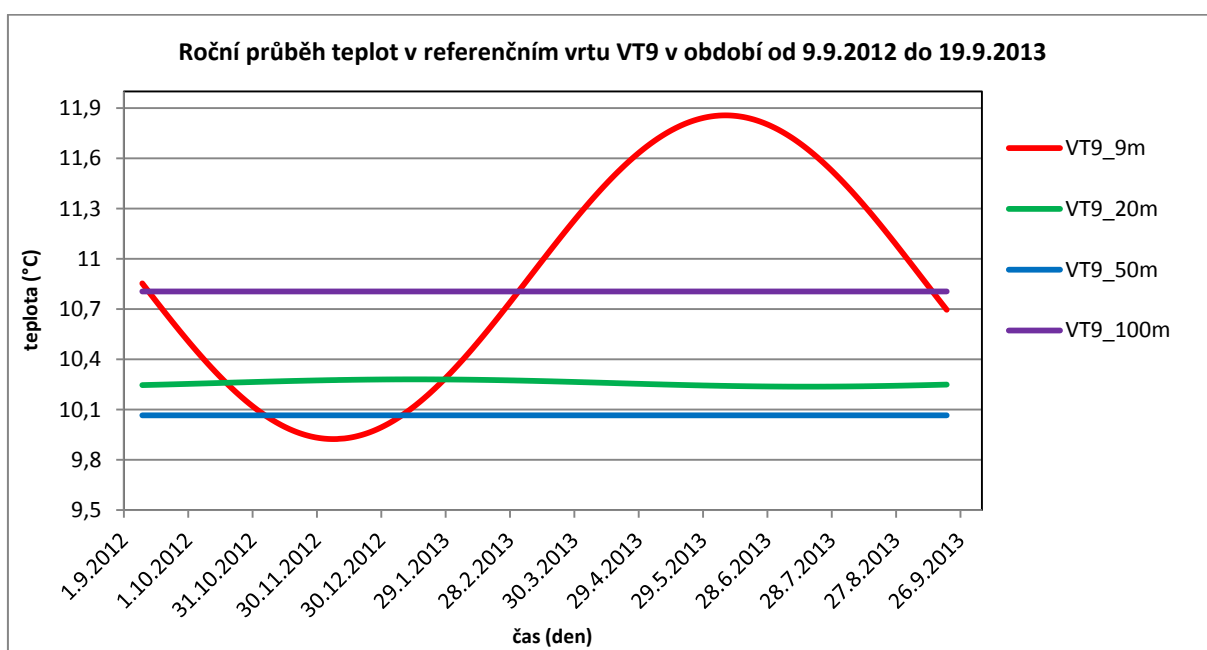
a tedy útlumová hloubka $L = 2,9 \text{ m}$

Z provedeného výpočtu vyplývá, že amplituda teploty v hloubce 2,9 m je 0,37 amplitudy teploty povrchu a amplituda teploty v hloubce $3L$ (cca 9 m) klesá na 0,05 amplitudy teploty povrchu. Tedy pro roční kolísání teplot na povrchu v důsledku střídání ročních období se tyto výkyvy téměř neprojeví již v hloubce 9 m. Tento závěr dokazuje i provedené měření a graf (obr. 41). Tento graf znázorňuje rytmickou změnu teploty během

sledovaného období v měřených hloubkách vrtu VT9 vlivem střídání ročních období. Výsledkem jsou sinusoidy závislé na změně venkovní teploty s časem a hloubkou v zemině. V hloubce 9 m teplota mírně kolísá po dobu celého roku v rozmezí maximálně 2 K. V hloubkách 20, 50 a 100 metrů jsou výkyvy teplot řádově v desetinách, setinách stupně. Pro výpočet je využíváno rovnice 4.43 podle autora Kutílka (1978).

Z výše uvedeného vzorce 4.43 a (obr.41) je vidět, že se vzrůstající hloubkou je amplituda v hloubce z menší než amplituda na povrchu a to přesně o hodnotu $\exp(-z/L)$. Dále pak, že se vzrůstající hloubkou dochází také ke stále silnějšímu fázovému posunu. To znamená, že okamžitá změna teploty na povrchu, je v dané hloubce časově posunuta. Jde tedy o posun ve fázi a jeho hodnota je $-z/L$.

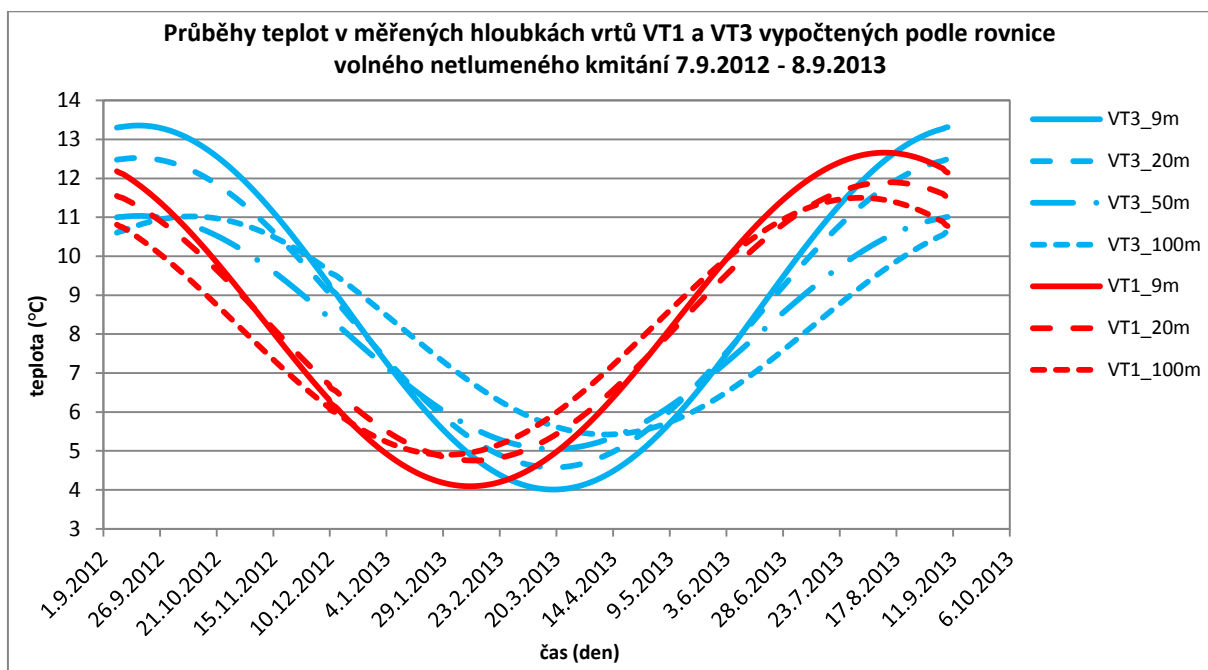
Obr. 41 Roční průběh teplot v jednotlivých měřených hloubkách vrtu VT9



Pro zachycení ročního průběhu teplot v různých hloubkách ve vrtech, které byly zasaženy odběrem tepla tepelných čerpadel je potřeba použít rovnici volného netlumeného kmitání. Rovnice volného netlumeného kmitání 4.44 na rozdíl od rovnice podle autora Kutílka (1978) 4.43 nepracuje s útlumovou hloubkou, ale s amplitudou oscilace vždy pro danou hloubku. To je pro znázornění rytmického průběhu teplot v různých hloubkách ve vrtech, ze kterých se přes zimní období čerpá nízkopotenciální energie směrodatnější.

Výsledkem jsou opět sinusoidy závislé na změně odběru tepla tepelného čerpadla, vlivem potřeby vytápět přes období zimních měsíců. Na (obr. 42) jsou znázorněny průběhy teplot ve vrtech VT1 a VT3 (jednoduchá U-trubice), podle rovnice 4.44 volného netlumeného kmitání. Zachycena je zejména topná sezóna 2012/2013, graf je potom vytvořen pro období od 7. 9. 2012 do 8. 9. 2013. Je vidět, že největší amplitudu oscilace mají křivky znázorňující průběh teplot v 9 metrech. Naproti tomu nejmenší amplitudu oscilace mají křivky znázorňující průběh teplot ve 100 metrech. To je způsobeno tím, že k největšímu odběru tepla dochází v sestupné větvi U-trubice a s rostoucí hloubkou se teplotní diference mezi proudícím teplotním médiem a okolní horninou zmenšuje. Proto je výchylka od střední teploty horninového masivu ve 100 metrech menší, než je výchylka od střední teploty horninového masivu v 9 metrech. To dokazují i provedená měření autorů Acuny a Palma (2010), uvedená v kapitole 2.3.6. Maxima a minima v jednotlivých hloubkách v příslušném vrtu nastávají vždy přibližně ve stejném období v závislosti na největších odběrech v zimě a na úplné regeneraci vrtů v letních měsících.

Obr. 42 Průběhy teplot ve vrtech VT1 a VT3 podle rovnice volného netlumeného kmitání



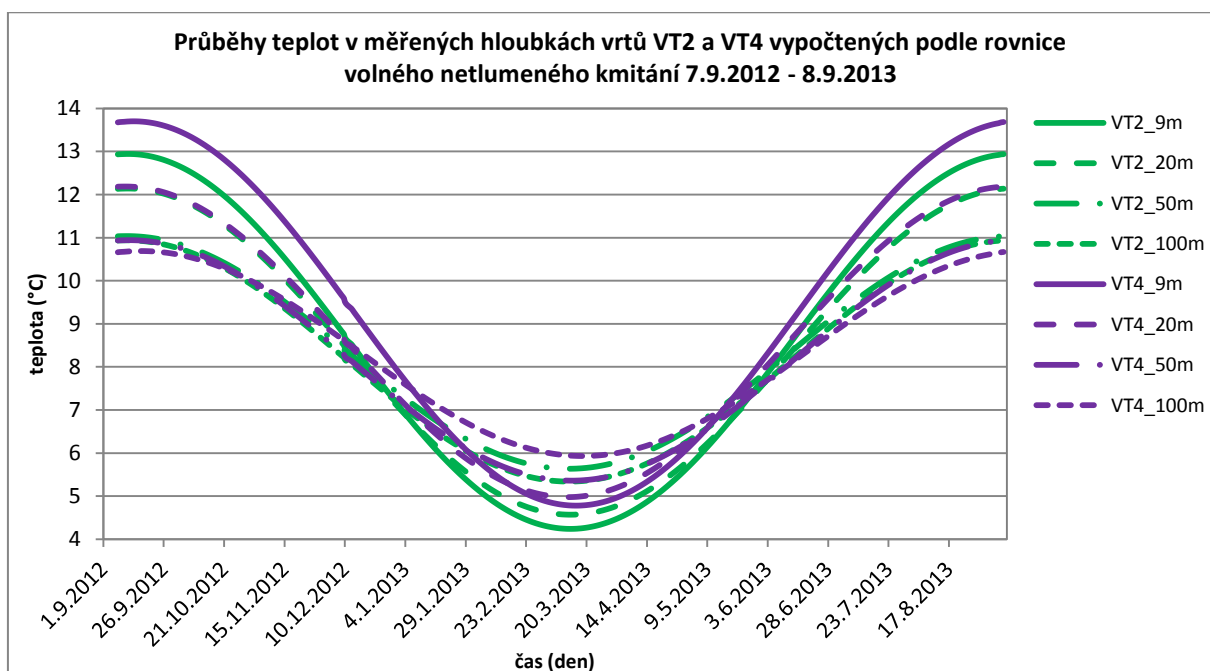
V následující tabulce 12 jsou uvedeny parametry rovnice 4.44 pro vrty VT1 a VT3, které jsou osazeny jednoduchou U-trubicí.

Tab.12 Parametry rovnice 4.44 pro vrty VT1 a VT3

Hloubka (m)	Vrt VT1			Vrt VT3		
	t_z^* - Střední teplota horninového masivu (°C)	Δt_{Az}^* - Amplituda oscilace kolem teploty t_z^* (°C)	φ_z - Počáteční fáze kmitu (rad)	t_z^* - Střední teplota horninového masivu (°C)	Δt_{Az}^* - Amplituda oscilace kolem teploty t_z^* (°C)	φ_z - Počáteční fáze kmitu (rad)
9	8,37692014	4,28283833	2,03	8,683133	4,673967	1,4
20	8,3280103	3,5725897	2,001	8,550714	3,973586	1,4
50	<i>nefunkční čidlo</i>			8,04308	2,99222	1,4
100	8,20107011	3,3	2,212	8,222139	2,8	1

Na (obr. 43) jsou znázorněny průběhy teplot ve vrtech VT2 a VT4 (dvojitá U-trubice), podle rovnice volného netlumeného kmitání. Opět se jedná o sinusoidy závislé na změně odběru tepla tepelného čerpadla vlivem potřeby vytápet přes období zimních měsíců. Zachyceno je období od 7. 9. 2012 do 8. 9. 2013, tedy topná sezóna 2012/2013. Znovu je vidět, že největší amplitudu oscilace mají křivky znázorňující průběh teplot v 9 metrech a nejmenší amplitudu oscilace mají křivky znázorňující průběh teplot ve 100 metrech. Opět je to způsobeno tím, že největší teplotní difference mezi teplotním médiem a okolní horninou je ve svrchních metrech a s rostoucí hloubkou se teplotní difference mezi proudícím teplotním médiem a okolní horninou zmenšuje. Z těchto důvodů je výchylka od střední teploty horninového masivu ve 100 metrech menší, než je výchylka od střední teploty horninového masivu v 9 metrech. Proto křivky sledující průběh teplot ve 100 metrech mají menší rozkmit (amplitudu oscilace), než křivky sledující průběh teplot v 9 metrech. Maxima a minima v jednotlivých hloubkách v příslušném vrtu nastávají vždy přibližně ve stejném období v závislosti na největších odběrech v zimě a na úplné regeneraci vrtů v letních měsících. Z průběhů křivek mezi vrty osazenými jednoduchou U-sondou a dvojitou U-sondou není vyzorován žádný rozdíl.

Obr. 43 Průběhy teplot ve vrtech VT2 a VT4 podle rovnice volného netlumeného kmitání



V následující tabulce 13 jsou uvedeny parametry rovnice 4.44 pro vrty VT2 a VT4, které jsou osazeny dvojitou U-trubicí.

Tab.13 Parametry rovnice 4.44 pro vrty VT2 a VT4

Hloubka (m)	Vrt VT2			Vrt VT4		
	t_z^* - Střední teplota horninového masivu (°C)	Δt_{Az} - Amplituda oscilace kolem teploty t_z^* (°C)	φ_z - Počáteční fáze kmitu (rad)	t_z^* - Střední teplota horninového masivu (°C)	Δt_{Az} - Amplituda oscilace kolem teploty t_z^* (°C)	φ_z - Počáteční fáze kmitu (rad)
9	8,591785	4,350615	1,49	9,24066156	4,45975839	1,45
20	8,35564325	3,78485675	1,49	8,58249596	3,60430404	1,51
50	8,33660374	2,7	1,5	8,15123803	2,79066197	1,48
100	8,13928372	2,8	1,5	8,31085219	2,37874781	1,4

V tabulce 14 jsou uvedeny hodnoty indexu determinace, které nám říkají z kolika procent se shoduje sinusovitý průběh teplot v jednotlivých hloubkách ve vrtech se skutečnými naměřenými hodnotami. Tedy jaká je procentuální závislost zvoleného modelu průběhu teplot podle rovnice 4.44 na skutečném průběhu teplot, které reprezentují naměřené hodnoty.

Tab.14 Hodnota indexu determinace $I_{tz\tau}^2$ nelineární regrese t_z

	Hodnota indexu determinace $I_{tz\tau}^2$ nelineární regrese t_z			
Hloubka	VRT VT1	VRT VT2	VRT VT3	VRT VT4
9m	0,995	0,894	0,988	0,995
20m	0,965	0,886	0,919	0,821
50m	nefunkční čidlo	0,948	0,81	0,75
100m	0,948	0,919	0,798	0,64

5.5 Popis průběhu regenerace vrtu VT1

Průběhy teplot ve vrtu VT1, kterým byl uzavíracími armaturami uzavřen průtok od dne 23. 1. 2012 do 19. 11. 2012 mají 2 charakteristické fáze. Fáze A – regenerace (od 23. 1. 2012 do 9. 2. 2012), kdy dochází v horninovém masivu k prudkému zvýšení teploty. Fáze B – stagnace (od 10. 2. 2012 do 15. 11. 2012), ve které dochází k plné regeneraci vrtu. Od 16. 11. 2012 došlo k opětovnému otevření průtoku vrtem a dochází ke snižování teploty v horninovém masivu.

Na (obr. 44) je zachycena počáteční fáze A (od 23. 1. 2012 do 9. 2. 2012), tedy po zavření průtoku vrtem VT1. Jelikož se průběhy teplot v jednotlivých měřených metrech od sebe výrazně neliší, na obr. 44 je znázorněn pro přehlednost pouze průběh teploty ve 100 metrech. Průtok vrtem byl zavřen 23. 1. 2012 ve 14:00 hodin. Je vidět, že již před uzavřením průtoku teplota ve vrtu roste. Od 9:00 hodin do 14:00 hodin vystoupala teplota z $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento nárůst lze přičíst k cyklickému spínání kompresoru tepelného čerpadla, resp. v časovém úseku od 9:00 do 14:00 hodin nebyl odběr tepelného čerpadla a vlivem toho teplota ve vrtu stoupala. Po uzavření průtoku vrtem má teplota v okolí vrtu rostoucí charakter. Růst teploty má logaritmický trend a trvá až do 9. 2. 2012. Nejprudší nárůst teploty je sledován v prvních 106 hodinách. V tomto časovém úseku se vrt zregeneruje z hodnoty $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na hodnotu $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ to je o 3 K. V následujících 17 dnech (od 28. 1. 2012 do 9. 2. 2012) dochází k pozvolnému růstu teploty z hodnoty $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy o 0,5 K. Z výše popsaného plyne, že k největšímu růstu teploty a tedy k největší regeneraci dochází v prvních 4 dnech od uzavření průtoku vrtem. Vždy na začátku topné sezóny, kdy je vrt plně regenerován, dosahují teploty ve vrtu hodnot okolo $10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, zároveň je známa nejnižší

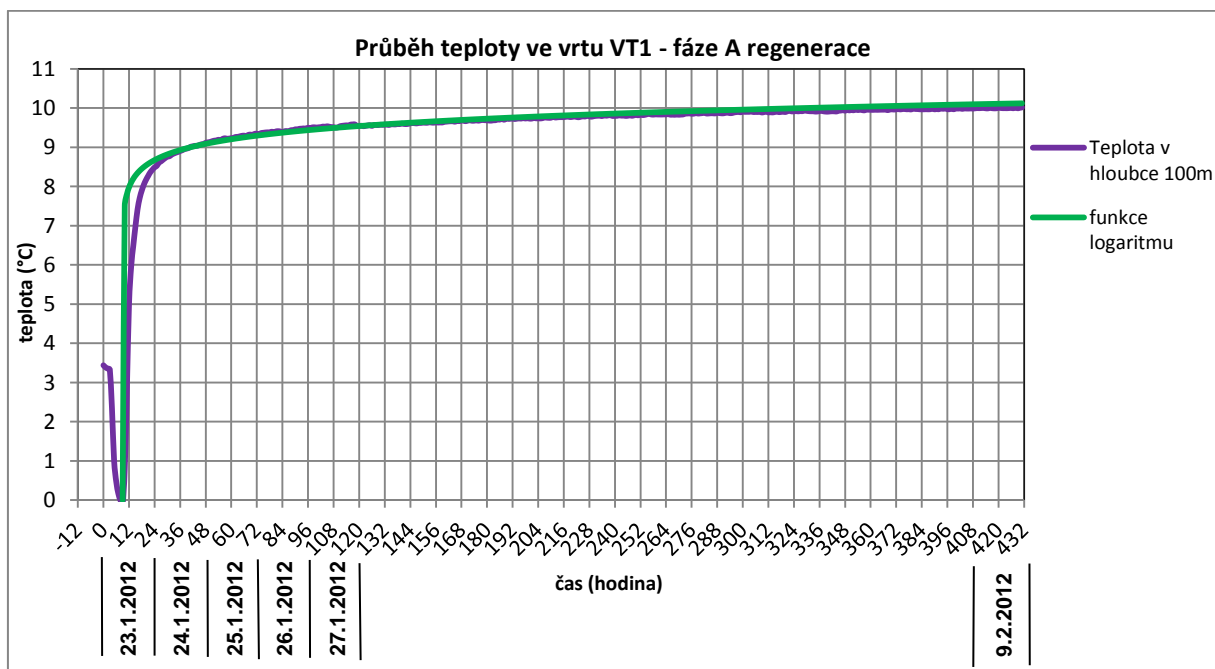
naměřená hodnota ve vrtu o hodnotě $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výše popsáno je, že průtok vrtem byl zavřen v době kdy byla teplota ve vrtu $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z těchto údajů plyne, že před uzavřením průtoku, nebyl vrt úplně vybitý a stále ještě disponoval svým teplotní potenciálem z 62 %. To je dáno tím, že průtok vrtem byl zastaven v průběhu topné sezóny. Následná regenerační teplotní expanze v prvních 4 dnech znamená, že vrt teplotně zregeneroval na hodnotu 90 % a v dalších 17 dnech o dalších 5 % na konečnou hodnotu teplotního potenciálu ve fázi A 95 %. Růst teploty ve vrtu ve fázi A má logaritmický trend a jeho rovnici lze charakterizovat vztahem:

$$t_{100VT1A} = 0,6982 \cdot \log_5(x) + 7,5 \quad ({}^{\circ}\text{C}) \quad (4.56)$$

$$I_{t_{100VT1A}}^2 = 0,94 \quad (-)$$

kde: x – počet hodin od uzavření průtoku vrtem (n)

Obr. 44 Průběhy teplot ve vrtu VT1 v období fáze A



Na obr. 45 je zachycena sekundární fáze B (od 10. 2. 2012 do 15. 11. 2012). Opět je na obr. 45 zachycen průběh teploty pouze ve 100m. V průběhu fáze B, která trvá 279 dní teplota pomalu roste a v závěru fáze dosahuje maximálních hodnot. V celém průběhu fáze B teplota pomalu roste z hodnoty $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ na konečnou hodnotu $10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, to je růst teploty o 0,4 K. V této

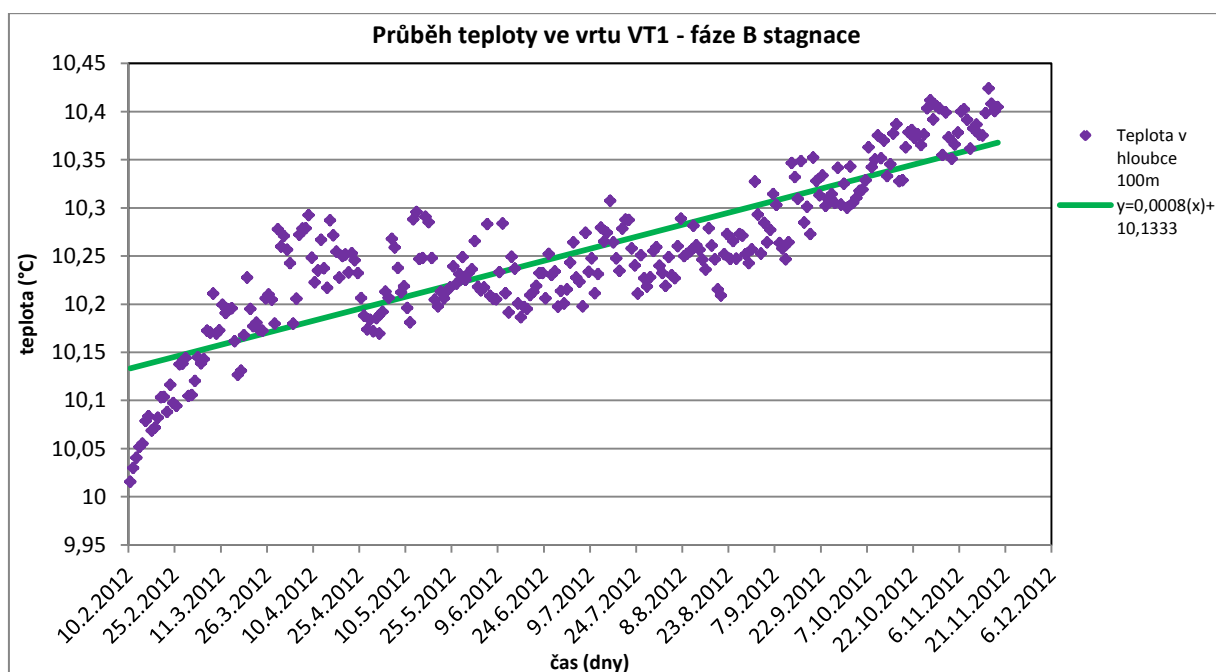
fázi se vrt VT1 zregeneruje o 4 % na konečných 99 %. Růst teploty ve vrtu VT1 ve fázi B má lineární trend a jeho rovnici lze charakterizovat vztahem:

$$t_{100VT1B} = 0,0008(x) + 10,1333 \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.57)$$

$$R^2_{t_{100VT1B}} = 0,73 \quad (-)$$

kde: x – počet dnů od uzavření průtoku vrtem (n)

Obr. 45 Průběhy teplot ve vrtu VT1 v období fáze B



Dne 19. 11. 2012 byl opět plně otevřen průtok vrtem. Teplota ve vrtu opět klesá vlivem odběru tepelným čerpadlem a potřeby vytápět.

5.6 Teploty teplotnosné směsi

Měření teplot teplotnosné směsi proudící ve vrtech, se provádělo za rozdělovačem/sběračem primární strany topného systému větve vrtů, vždy na vstupu/výstupu příslušného vrtu viz obr. 21. Zároveň byl měřen i průtok příslušným vrtem. Impulsní vodoměry byly osazeny na vstupech do vrtů. Jako teplotnosné medium se využívá směs 33 % etylenu a 67 % vody. Tato směs má při průměrné teplotě 10 °C následující parametry:

měrná hustota – 961 kg.m⁻³

měrná tepelná kapacita – 4201 J.kg⁻¹.K⁻¹

tepelná vodivost – 0,407 W.m⁻¹.K⁻¹

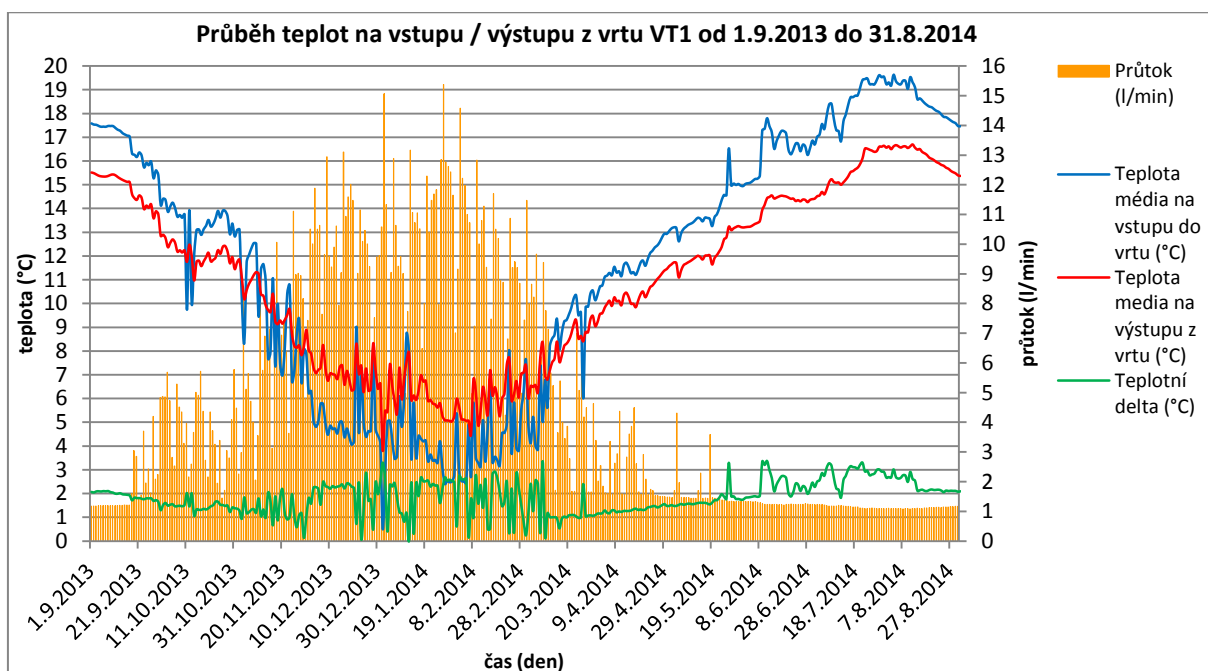
dynamická viskozita – 3,96.10⁻³ Pa.s

kinematická viskozita – 4,12.10⁻⁶ m²/s

VRT VT1, VT3

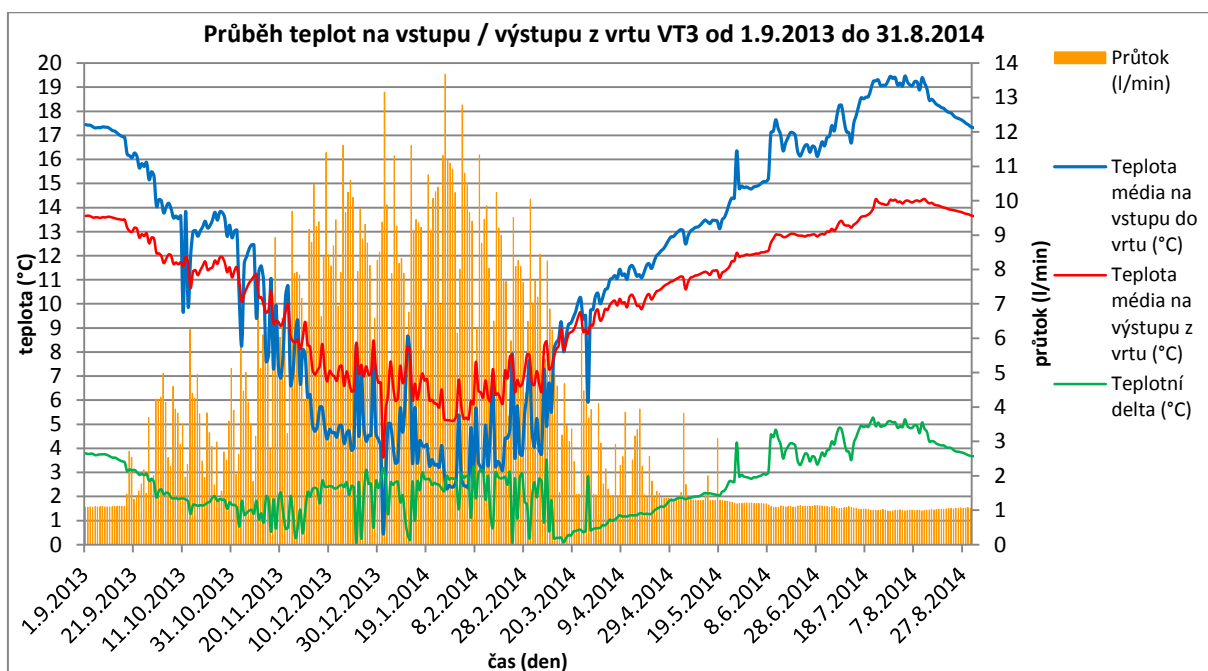
Topná sezóna 2013/2014 začala 18. 9. 2013. Před tímto datem teplota teplotnosné kapaliny na vstupu do vrtů dosahuje vyšších teplot než na výstupu z vrtů. Konkrétně teplota na vstupu do vrtů byla jak u vrtu VT1 tak VT3 shodně 17,5 °C a teplota na výstupu byla 15,5 °C u vrtu VT1 a 13,7 °C u vrtu VT3. Teplotní delta v této fázi dosahuje hodnoty 2 K pro vrt VT1 a 3,8 K pro vrt VT3. Je vidět, že i přes uzavření automatických ventilů, které měly zabránit průtoku vrty, aby nedocházelo přes letní období k regeneraci vrtů, dochází k mírnému průtoku. Průtok v tento moment činí 1,5 l.min⁻¹. Díky netěsnostem automatických ventilů docházelo přes letní období k průtoku vrty a vrty se mírně regenerovaly. Z těchto důvodů je teplota teplotnosné směsi, která vstupuje do vrtů vyšší, než teplota směsi vystupující z vrtů. Po 18. 9. 2013 automatické ventily otevírají plně cestu vrty, ve vrtech se dosahuje průtoku v průměru 5 l.min⁻¹ a tepelná čerpadla zahajují odběr tepla. Teploty teplotnosné směsi shodně klesají a dne 26. 11. 2013 teplotní delta dosahuje hodnoty 0,58 K pro vrt VT1 a 0,28 K pro vrt VT3. V tento moment teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů dosahuje vyšších hodnot než teplota na výstupu z vrtů viz (obr.46), (obr.47).

Obr. 46 Průběh teplot teplotnosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT1



Po 26. 11. 2013 oběhové čerpadlo primární strany zvyšuje průtok na hodnotu 10 až 15 l.min⁻¹. Teploty teplotnosné směsi klesají, přičemž teplotní delta se drží v průměru na hodnotě 2 K. Minimálních teplot se dosahuje dne 27. 1. 2014, kdy teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů byla shodně 2,4 °C a na výstupu z vrtů rovněž shodně 5,1 °C. Od 27. 1. 2014 teploty teplotnosné směsi shodně rostou a dne 10. 3. 2014 teplotní delta dosahuje hodnoty 0,17 K pro vrt VT1 a 0,57 K pro vrt VT3. Po tomto dni opět dosahuje teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů vyšších hodnot než na výstupu z vrtů. Průtok vrty klesá, automatické ventily uzavírají průtok vrty, avšak vlivem jejich netěsností můžeme sledovat průtok o hodnotě 1,3 l.min⁻¹ u vrtu VT1 a 1 l.min⁻¹ u vrtu VT3. Maximálních teplot se dosahuje dne 28. 7. 2014. Teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů byla shodně 19,6 °C a teplota na výstupu 16,6 °C pro vrt VT1 a 14,3 °C pro vrt VT3. Tomu odpovídá teplotní delta 3 K pro vrt VT1 a 5,3 K pro vrt VT3. Vyšší teplotní delta pro vrt VT3 odpovídá nižšímu průtoku vrtem 1 l.min⁻¹.

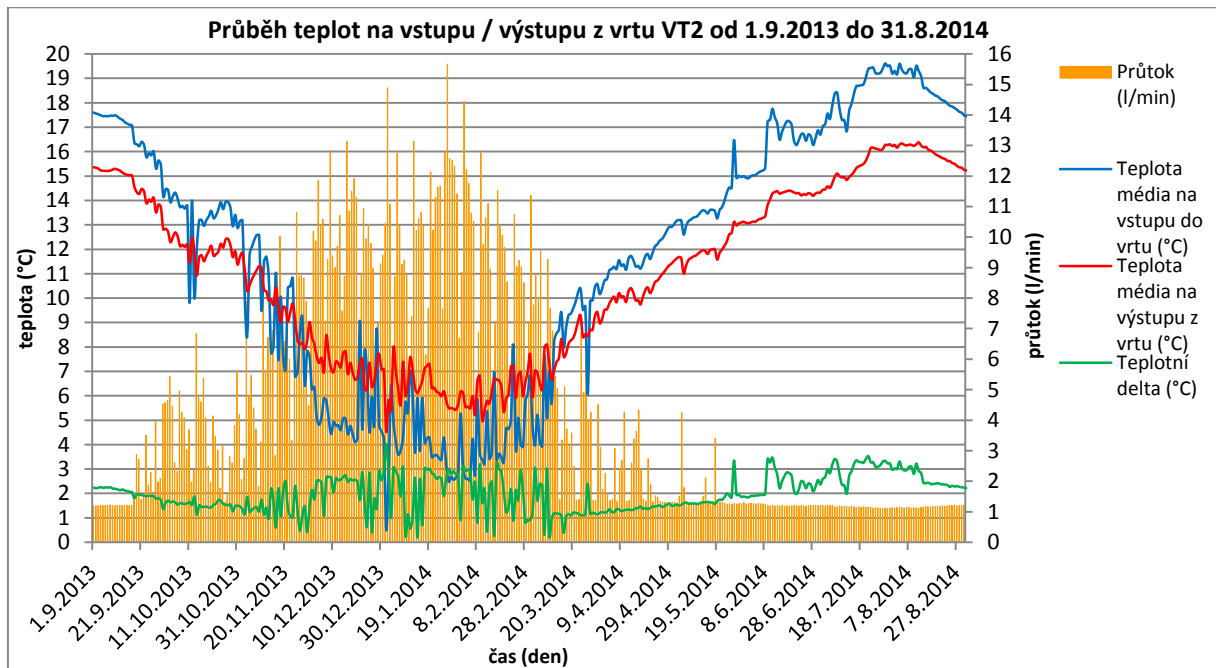
Obr. 47 Průběh teplot teplotnosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT3



VRT VT2, VT4

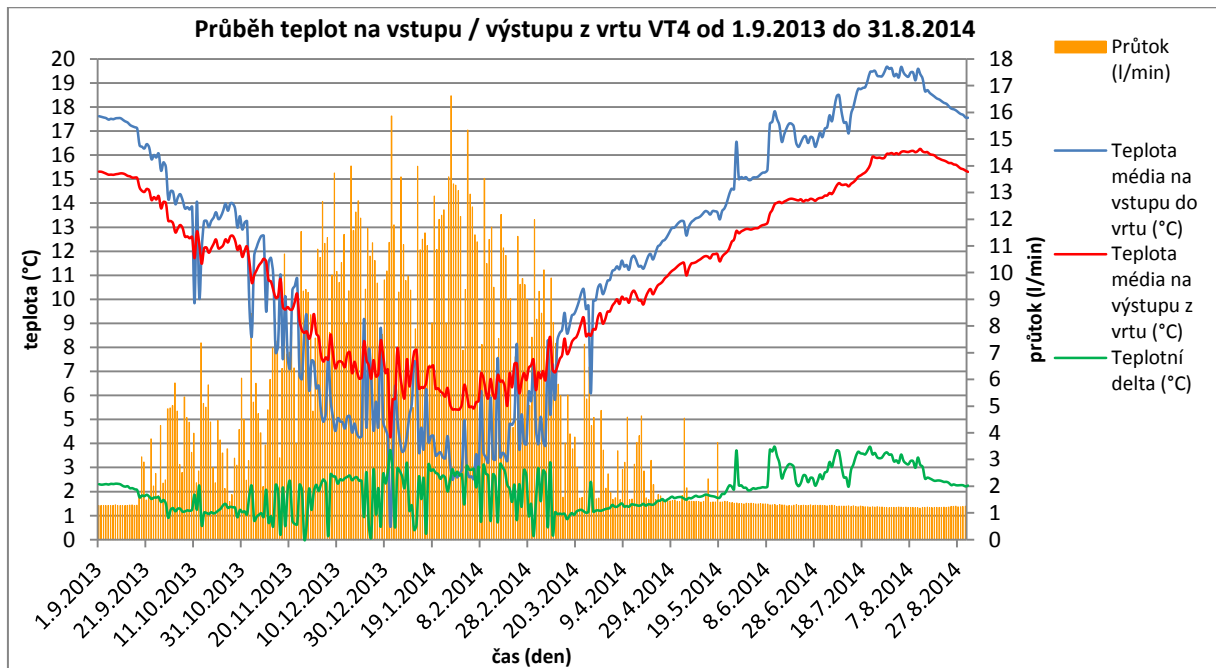
Před začátkem topné sezóny 2013/2014 18. 9. 2013 teplota teplotnosné kapaliny na vstupu do vrtů VT2 a VT4 dosahuje vyšších teplot než na výstupu z vrtů. Konkrétně teplota na vstupu do vrtů byla jak u vrtu VT2 tak VT4 shodně 17,6 °C a teplota na výstupu z vrtů byla shodně 15,3 °C. Teplotní delta v této fázi v obou vrtech dosahuje hodnoty 2,3 K. Průtok v tomto období dosahoval hodnot 1,5 l.min⁻¹. Opět je vidět, že i přes uzavření automatických ventilů, dochází ve vrtech vlivem netěsností k mírnému průtoku. Proto je teplota teplotnosné směsi, která vstupuje do vrtů vyšší, než teplota směsi vystupující z vrtů. Po 18. 9. 2013 automatické ventily otevírají plně cestu vrty. Ve vrtech se dosahuje průtoku v průměru 5 l.min⁻¹ a tepelná čerpadla zahajují odběr. Teploty teplotnosné směsi shodně klesají a dne 29. 11. 2013 teplotní delta dosahuje hodnoty 0,41 K pro vrt VT2 a dne 26.11.2013 0,02 K pro vrt VT4. Po těchto datech teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů dosahuje vyšších hodnot než teplota na výstupu z vrtů viz (obr.48), (obr.49).

Obr. 48 Průběh teplot teplotnosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT2



Po 26. 11. 2013 resp. 29. 11. 2013 oběhové čerpadlo primární strany zvyšuje průtok na hodnotu 10 až 15 l.min⁻¹. Teploty teplotnosné směsi začínají klesat, přičemž teplotní delta se drží v průměru na hodnotě 2 K. Minimální teploty nastávají dne 27. 1. 2014, kdy teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů byla shodně 2,5 °C a na výstupu z vrtů rovněž shodně 5,5 °C. Od 27. 1. 2014 teploty teplotnosné směsi shodně rostou a dne 10. 3. 2014 teplotní delta dosahuje hodnoty 0,26 K pro vrt VT2 a 0,22 K pro vrt VT4. Po tomto datu teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů dosahuje vyšších hodnot než na výstupu z vrtů. Následně klesá průtok vrty, automatické ventily uzavírají průtok vrty. Ovšem vlivem jejich netěsností můžeme sledovat shodný průtok vrty VT2 a VT4 o hodnotě 1,3 l.min⁻¹. Maximální teploty nastávají dne 28. 7. 2014. Teplota teplotnosné směsi na vstupu do vrtů byla shodně 19,6 °C a teplota na výstupu 16,3 °C pro vrt VT2 a 16,1 °C pro vrt VT4. Tomu odpovídá teplotní delta 3,3 K pro vrt VT2 a 3,5 K pro vrt VT4.

Obr. 49 Průběh teplot teplotnosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT4



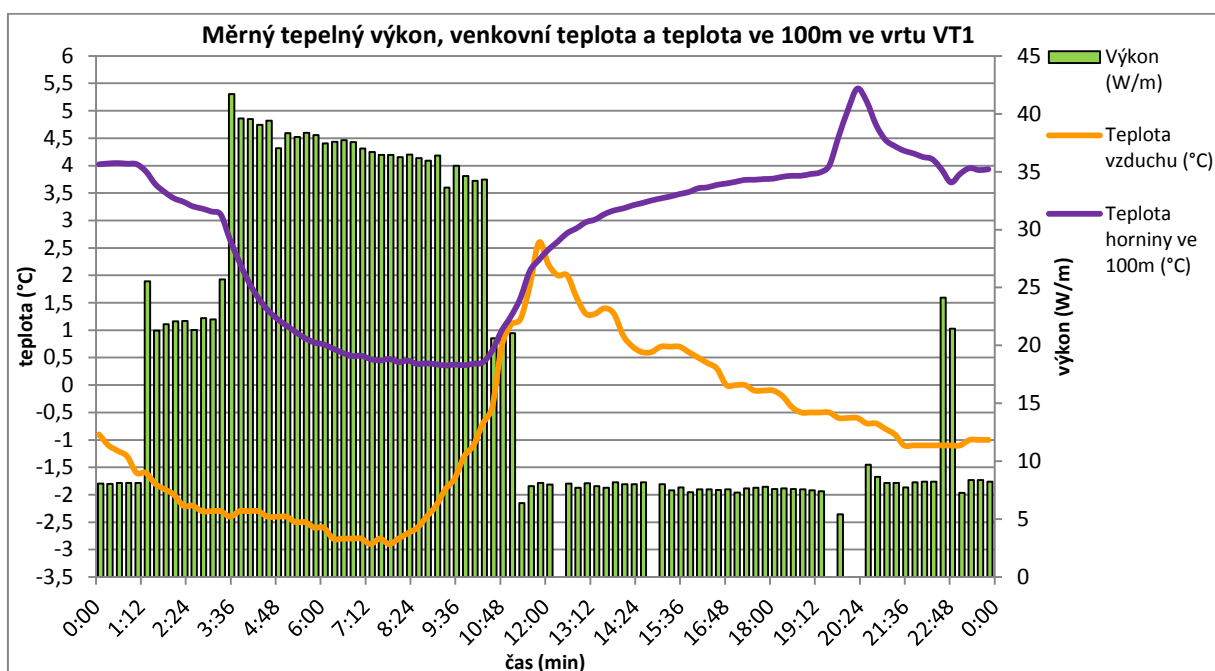
5.7 Výkony vrtů vystrojených jednoduchou U-trubicí

Měrné tepelné výkony jednotlivých vrtů byly stanoveny na základě měření objemového toku a rozdílu teplot teplotnosné směsi na vstupu a výstupu z příslušného vrtu. Oběhové čerpadlo teplotnosné směsi pracovalo ve dvou stupních při $4,99 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ a $19,8 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Termodynamické veličiny teplotnosné směsi potřebné pro výpočty byly stanoveny s využitím interních dokumentů společnosti VESKOM spol. s r.o. Průběhy měrných tepelných toků q jsou znázorněny pro topnou sezónu 2013/2014, konkrétně pro 29. 1. 2014. Tento den představuje běžný provoz v administrativní budově společnosti VESKOM v topné sezóně.

Na (obr.50) a (obr.51) je znázorněn průběh závislosti tepelného výkonu na teplotě venkovního vzduchu pro vrt VT1 a VT3. Je vidět, že průběh křivky tepelného výkonu rovněž reaguje na provoz budovy a pobytu zaměstnanců v kancelářích. Nejvyšší hodnoty měrného tepelného výkonu $35\text{--}40 \text{ W/m}$ pro VT1 a $32,5\text{--}35 \text{ W/m}$ pro VT3 se dosahuje v časovém úseku od 3:30 do 10:30. V tomto období teplota venkovního vzduchu klesá na minimální hodnotu $-3 \text{ }^\circ\text{C}$. Zároveň klesá teplota horniny okolo vrtů na hodnotu $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pro VT1 a $1 \text{ }^\circ\text{C}$ pro VT3. Těmto měrným tepelným výkonům odpovídá tepelný výkon vrtu v rozsahu $3,5\text{--}4 \text{ kW}$ pro VT1 a $3,25\text{--}3,5 \text{ kW}$ pro VT3. Tyto naměřené údaje odpovídají návrhovému zvyklostem, kde se

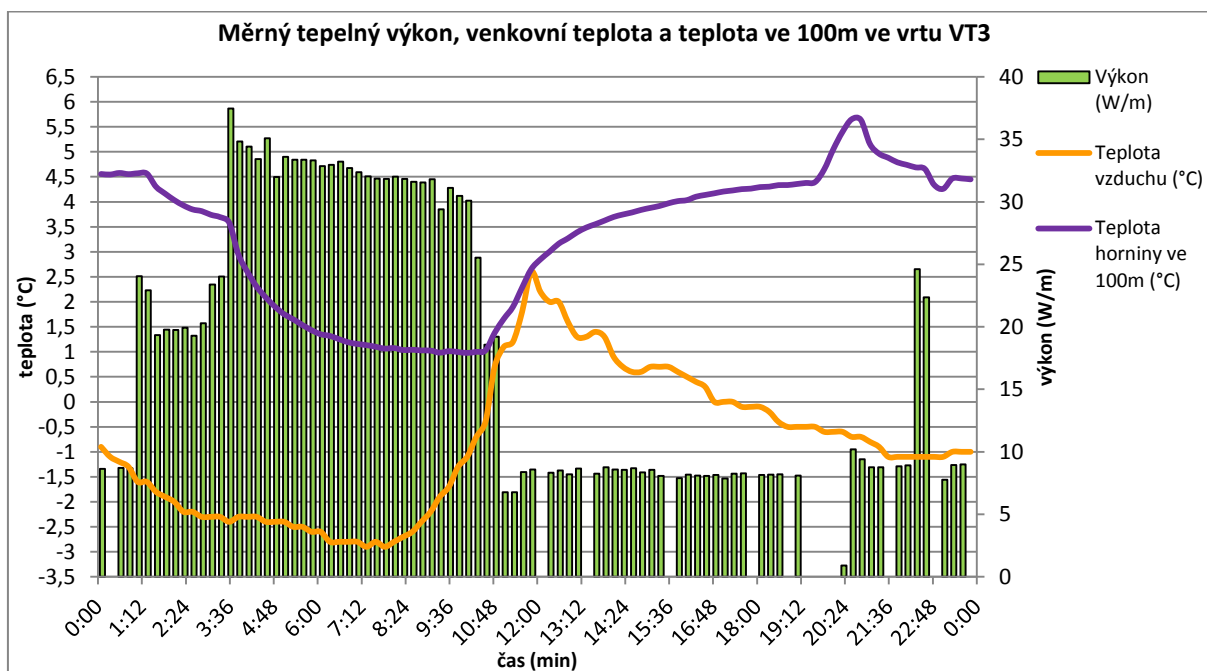
uvažuje, že 34 metrů vrtu osazeného jednoduchou U-sondou dodá 1 kW tepelného výkonu. Od 11:00 do 24:00 přechází tepelná čerpadla do útlumového režimu a měrný tepelný výkon klesá pro VT1 i pro VT3 shodně na hodnotu 7,5 W/m. Zároveň teplota venkovního vzduchu klesá z hodnoty 2,5 °C na hodnotu -1 °C a teplota horniny okolo vrtů vlivem minimálního odběru tepla tepelných čerpadel roste na hodnotu 4 °C pro VT1 a 4,5 °C pro VT3.

Obr. 50 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT1 dne 29. 1. 2014



Směs 33 % etylalkoholu a 67 % vody, sloužící jako teponosná kapalina, ovlivňuje tepelný výkon přiváděný na výparníky tepelných čerpadel. Zároveň ovlivňuje i hodnotu součinitele přestupu tepla α_s mezi vnitřní stěnou potrubí výměníku a proudící teponosnou kapalinou. Teponosná kapalina vlivem přimíchání 1/3 etylalkoholu má menší měrnou hmotnost než voda. Rovněž měrná tepelná kapacita směsi je nižší než měrná tepelná kapacita vody. Obě tyto skutečnosti negativně ovlivňují tepelný výkon přiváděný na výparníky tepelných čerpadel. Zároveň nižší hodnota součinitele tepelné vodivosti směsi oproti vodě pozitivně ovlivňuje výši Nusseltova kritéria a tudíž i součinitele přestupu tepla α_s . Naproti tomu vyšší hodnota kinematické viskozity směsi má za následek snížení Reynoldsova kritéria, což má negativní vliv na Nusseltovo kritérium a tedy i hodnotu součinitele přestupu tepla α_s .

Obr. 51 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT3 dne 29. 1. 2014



Ve vrtu VT1 a VT3 bylo Reynoldsovo číslo při prvním stupni provozu oběhového čerpadla $Re_1 = 599,26$ a $Re_2 = 2157$ ve stupni druhém. Jelikož se jedná o laminární proudění v obou případech, pro výpočet Nusseltova kritéria resp. střední hodnoty součinitele přestupu tepla α_s se využije vztah 4.53 pro nucené laminární proudění v potrubí.

Z rovnice (4.51) vychází součinitel přestupu tepla $\alpha_{s1} = 48,95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro první stupeň provozu oběhového čerpadla $\alpha_{s2} = 57,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro stupeň druhý, viz tabulka 15. Je patrné, že součinitel přestupu tepla α_s je závislý na rychlosti proudění teplotonosné kapaliny w v potrubní sondě. Při turbulentním proudění je součinitel přestupu tepla vždy vyšší než u proudění laminárního. Ovšem dosažení turbulentního proudění nemrznoucí teplotonosné kapaliny se docílí pouze zvýšením výkonu oběhových čerpadel. Tento krok by však vedl ke snížení energetického efektu celého systému vytápění a prodloužil by dobu návratnosti investice do systému.

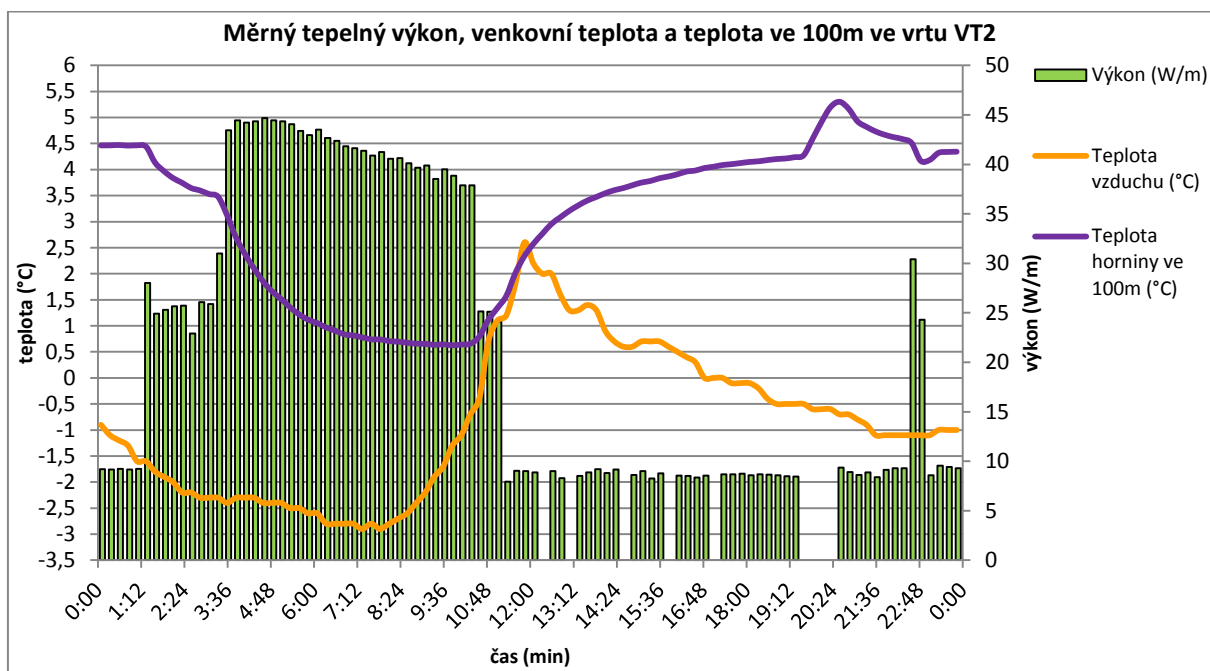
Tab.15 Měrné tepelné výkony a součinitelé přestupu tepla vrtů osazených jednoduchou U-trubicí

Měrné tepelné výkony a součinitelé přestupu tepla vrtů VT1 a VT3						
	q - Maximální měrný tepelný výkon	q - Minimální měrný tepelný výkon	Re - Reynoldsovo kritérium pro průtok 4,99 l.min ⁻¹	Re - Reynoldsovo kritérium pro průtok 19,8 l.min ⁻¹	α_{s1} - součinitel přestupu tepla pro průtok 4,99 l.min ⁻¹	α_{s2} - součinitel přestupu tepla pro průtok 19,8 l.min ⁻¹
	(W/m)	(W/m)	(-)	(-)	(W.m ⁻² .K ⁻¹)	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
VRT VT1	40	7,5	599,26	2157	48,95	57,11
VRT VT3	35	7,5				

5.8 Výkony vrtů vystrojených dvojitou U-trubicí

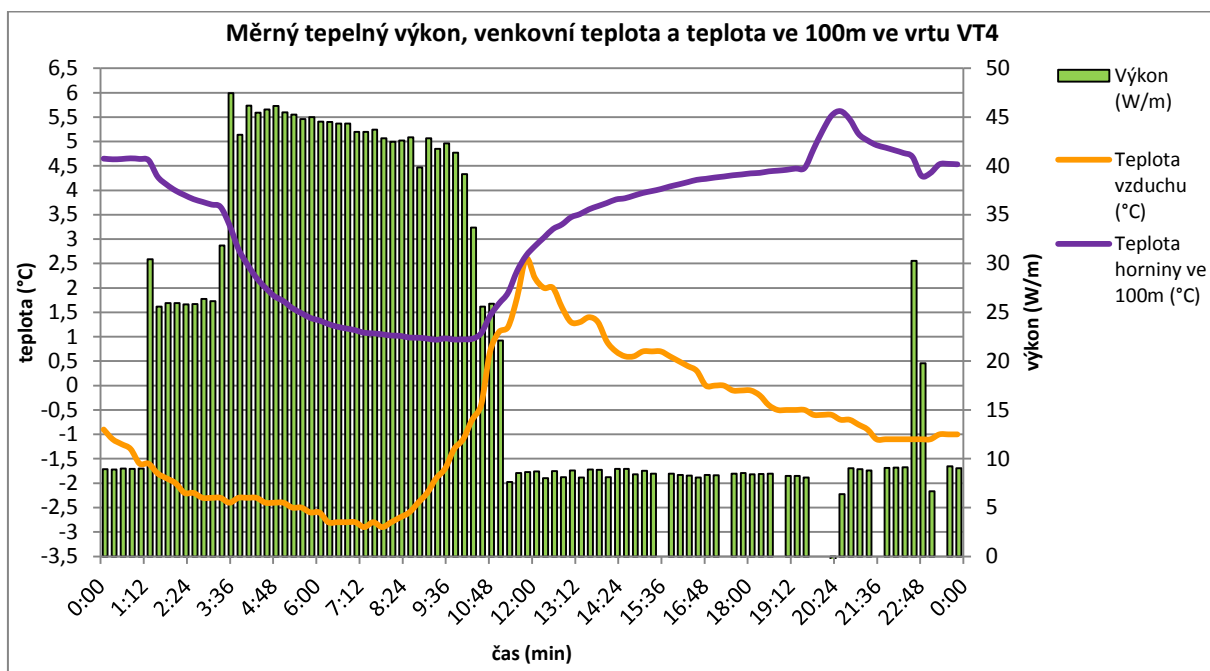
Na (obr.52) a (obr.53) je znázorněn průběh závislosti tepelného výkonu na teplotě venkovního vzduchu pro vrt VT2 a VT4. Opět je patrné, že průběh křivky tepelného výkonu reaguje na provoz budovy a pobyt zaměstnanců v kancelářích. Ovšem maximální hodnoty měrného tepelného výkonu jsou vyšší než v případě jednoduché U-sondy. Konkrétně dosahují hodnot 42–45 W/m pro VT2 i pro VT4. Těchto maximálních hodnot se dosahuje v časovém úseku od 3:30 do 10:30. V tomto období teplota venkovního vzduchu klesá na minimální hodnotu -3 °C. Zároveň klesá teplota horniny okolo vrtů na hodnotu 0,5 °C pro VT2 a 1 °C pro VT4. Těmto měrným tepelným výkonům odpovídá tepelný výkon vrtu v rozsahu 4,2–4,5 kW pro VT2 i pro VT4. Tyto naměřené údaje odpovídají návrhovému zvyklostem, kde se uvažuje, že 34 metrů vrtu osazeného dvojitou U-sondou dodá 1,5 kW tepelného výkonu. Od 11:00 do 24:00 přechází tepelná čerpadla do útlumového režimu a měrný tepelný výkon klesá pro VT2 i pro VT4 shodně na hodnotu 8-9 W/m. Zároveň teplota venkovního vzduchu klesá z hodnoty 2,5 °C na hodnotu -1 °C a teplota horniny okolo vrtů vlivem minimálního odběru tepla tepelných čerpadel roste na hodnotu 4,5 °C pro VT2 i VT4.

Obr. 52 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT2 dne 29. 1. 2014



Ve vrtu VT2 a VT4 bylo Reynoldsovo číslo při prvním stupni provozu oběhového čerpadla $Re_1 = 337,13$ a $Re_2 = 1252,2$ ve stupni druhém. V obou případech se opět jedná o laminární proudění, jelikož $Re < 2320$. Pro výpočet Nusseltova kritéria resp. střední hodnoty součinitele přestupu tepla α_s je opět využit vztah 4.53 dle autora (Sazima et. al, 1993), pro nucené laminární proudění v potrubí.

Obr. 53 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT4 dne 29. 1. 2014



Z rovnice (4.51) vychází součinitel přestupu tepla $\alpha_{s1} = 58,45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro první stupeň provozu oběhového čerpadla, $\alpha_{s2} = 63,83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro stupeň druhý, viz tabulka 16. Opět se dosáhlo závěru, že součinitel přestupu tepla α_s je závislý na rychlosti proudění teplotnosné kapaliny w v potrubní sondě. Při turbulentním proudění je součinitel přestupu tepla vždy vyšší než u proudění laminárního.

Tab.16 Měrné tepelné výkony a součinitelé přestupu tepla vrtů osazených dvojitou U-trubicí

Měrné tepelné výkony a součinitelé přestupu tepla vrtů VT2 a VT4						
	q - Maximální měrný tepelný výkon	q - Minimální měrný tepelný výkon	Re - Reynoldsovo kritérium pro průtok 4,99 l.min ⁻¹	Re - Reynoldsovo kritérium pro průtok 19,8 l.min ⁻¹	α_{s1} - součinitel přestupu tepla pro průtok 4,99 l.min ⁻¹	α_{s2} - součinitel přestupu tepla pro průtok 19,8 l.min ⁻¹
	(W/m)	(W/m)	(-)	(-)	(W.m ⁻² .K ⁻¹)	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
VRT VT2	47	9	337,13	1252,2	58,45	63,83
VRT VT4	48	9				

6 Závěr

Disertační práce se zabývá analýzou teplot horninového masivu s vertikálními zemními výměníky zejména během topných období 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014. Jsou v ní prezentovány průběhy teplot měřených vrtů VT1, VT2, VT3, VT4 po celé měřené období. Na základě těchto měření jsou vyhodnoceny teplotní difference masivu na začátku a na konci jednotlivých topných období mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9. Dále byly zaznamenány průtoky a teploty teplotnosné kapaliny proudící v jednotlivých vrtech.

V teoretické části práce je postupně popsána problematika geotermální energie, otevřených a uzavřených systémů, rozdělení tepelných vrtů dle konstrukce a tepelných zkoušek vrtů.

V experimentální části práce je podrobně charakterizováno místo měření, vyzbrojení jednotlivých vrtů a umístění teplotních čidel a vodoměrů. Jednotlivé závěry jsou členěny do kapitol 5.1 až 5.8.

Výsledkem hlavního měření jsou poznatky o průbězích teplot v jednotlivých hloubkách horninového masivu s vertikálními zemními výměníky. Vzhledem k ucelenému průběhu měření od 1. 9. 2011 do 27. 8. 2014, mohl být specifikován teplotní vývoj horninového masivu jak v topném období, tak i v období letních měsíců.

Díky zaznamenávání teploty horninového masivu okolo referenčního vrtu VT9, byly zjištěny jednotlivé teplotní difference. Teplotní difference byly sledovány mezi vrtem VT9 a jednotlivými měřenými vrty vždy na začátku a na konci topných sezón. Hodnoty na začátcích a koncích jednotlivých topných období jsou přehledně uvedeny v tabulkách 9, 10 a 11. Z dosažených výsledků lze horninový masiv považovat za stabilní zdroj energie pro tepelné čerpadlo.

Pro znázornění rytmického průběhu teplot v jednotlivých hloubkových úrovních v půdě okolo vertikálních zemních výměníků zasažených odběrem tepla tepelných čerpadel byl navržen matematický model. Výsledkem matematického modelování je funkční závislost teploty horninového masivu na čase. Tyto funkční závislosti byly modelovány pro různé hloubky horninového masivu a jejich průběh popisuje rovnice 4.44. Výsledkem jsou sinusoidy závislé na změně odběru tepla tepelného čerpadla, vlivem potřeby vytápět přes období zimních měsíců. Průběh těchto sinusoid prezentují obrázky 41, 42 a 43. Z dosaženého vyplývá, že u referenčního vrtu VT9 je funkce tvaru sinusovky výrazněji ovlivňována pouze do hloubky 9 m pod povrchem převážně změnami teploty vzduchu nad horninovým masivem.

U vrtů, které jsou zdrojem energie pro tepelná čerpadla, je funkce ovlivněna změnami odběru tepla tepelnými čerpadly. Procentuální závislost zvoleného modelu průběhu teplot podle rovnice 4.44 na skutečném průběhu teplot, které reprezentují naměřené hodnoty zobrazuje tabulka 14.

Proces dobití vrtu VT1, kterým byl dne 23. 1. 2012 uzavřen průtok má dvě charakteristické fáze. Bylo zjištěno, že ve fázi A (regenerace), která trvala od 23. 1. 2012 do 9. 2. 2012 má průběh teplot horninového masivu v okolí vertikálního zemního výměníku logaritmický trend. Tento průběh popisuje rovnice 4.56. Dále bylo zjištěno, že v prvních čtyřech dnech fáze A vrt zregeneroval z hodnoty teplotního potenciálu 62 % na hodnotu 90 % a v následných 17 dnech na konečných 95 % teplotního potenciálu. Ve fázi B (stagnace), která trvala od 10. 2. 2012 do 15. 11. 2012, tedy 279 dní, vrt pomalu regeneruje na konečnou hodnotu teplotního potenciálu 99 %. Průběh teploty ve fázi B má lineární trend a popisuje rovnice 4.57.

Kromě teplot byly měřeny i objemové toky teplotního média, díky nimž byly vypočteny měrné tepelné výkony horninového masivu (obr. 50 až obr. 53). Z provedených výpočtů byl zjištěn vliv součinitele tepelné vodivosti a součinitele přestupu tepla mezi vnitřní stěnou trubky výměníku a proudící kapalinou na proces získávání tepelného výkonu vertikálním zemním výměníkem. Podle vztahů 4.53 resp. 4.51 bylo zjištěno, že nižší hodnoty měrné hmotnosti a měrné tepelné kapacity teplotního média oproti vodě, negativně ovlivňují tepelný výkon přiváděný na výparník tepelného čerpadla. Zároveň nižší hodnota součinitele tepelné vodivosti směsi oproti vodě pozitivně ovlivňuje hodnotu součinitele přestupu tepla α_s . Naproti tomu vyšší hodnota kinematické viskozity směsi má negativní vliv na hodnotu součinitele přestupu tepla α_s .

Za zásadní výsledky disertační práce lze považovat:

- konkretizaci změny teploty horninového masivu v okolí vertikálního zemního výměníku v topném období i v období letních měsíců,
- stanovení difference teplot mezi referenčním vrtem VT9 a měřeními vrty na začátku a na konci topných období,
- sestavení matematického modelu, který funkčními závislostmi teploty horninového masivu na čase, prezentovány rovnicí 4.44, popisuje rytmický průběh teplot v jednotlivých hloubkových úrovních v půdě okolo vertikálních zemních výměníků,
- sestavení matematického modelu popisující proces dobíjení vertikálního zemního výměníku,

- stanovení vazeb mezi teplotou kapaliny proudící ve vertikálním zemním výměníku a součinitelem přestupu tepla.

Tyto výsledky mohou sloužit jako podklad pro navrhování matematických modelů průběhů teplot v jednotlivých hloubkových úrovních v horninovém masivu s vertikálním zemním výměníkem využívaným pro vytápění a chlazení budov.

Pro projekční a realizační praxi mají výsledky následující přínos:

- vertikální zemní výměníky byly shledány jako stabilní zdroj energie pro tepelná čerpadla,
- byly potvrzeny správné projekční zvyklosti pro návrh délky vertikálního zemního výměníku a jeho měrného tepelného výkonu,
- byly analyzovány termodynamické vlastnosti teploty kapaliny a jejich vliv na součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a proudící teplotou kapaliny.

Pro další rozvoj popsané problematiky v této disertační práci by bylo vhodné sledovat vliv například složení horninového masivu a vliv spodní vody na výsledný průběh teplot v jednotlivých úrovních vertikálního zemního výměníku. Dále pak zmapovat proces dobití vertikálního zemního výměníku od doby, kdy teploty horninového masivu v okolí výměníku dosahovaly minimálních hodnot.

7 Seznam použité literatury

ACUNA, J., PALM, B., A. *Local Conduction Heat Transfer in U-pipe Borehole Heat Exchangers*. The Royal Institute of Technology KTH. Stockholm. Sweden.

ACUNA, J., PALM, B., A. 2010. *Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements*. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia: 2010.

ADAMOVSKEÝ, R., NEUBERGER, P. 2003. *Termomechanika II, termodynamika par, vlhký vzduch, sdílení tepla*. Česká zemědělská univerzita v Praze – technická fakulta, Praha, 122 s.

BRANDL, H. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56, 2, 81-122 s.

BUJOK, P., VRTEK, M., HORÁK, B., HÁJOVSKÝ, R., HELLSTRÖM, G. 2005. Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 151 s.

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

CARSLAW, H., S., JAEGER, J. C., 1948. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford at the Clarendon press. Second ed.

ČÍŽEK, P. *Zemní tepelné výměníky tepelných čerpadel se neobejdou bez podzemní vody* [online]. 19. září 2005 [cit 2011-2-15]. Dostupné z http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm

ČÍŽEK, P. *Základní vlastnosti vrtů pro tepelná čerpadla* [online]. 5. listopadu 2012 [cit 2011-2-15]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/9245-zakladni-vlastnosti-vrtu-pro-tepelna-čerpadla>

DELGADO, M., P. 2010. *Experimental evaluation of heat extraction along U-pipe borehole heat exchangers*. Master of science of Thesis, Stockholm, Sweden, 94 s.

ELDER, J. 1981. *Geothermal systems*. Academic Press, London, 508 s.

ESKILSON, P. 1987. Thermal analysis of heat extraction boreholes. *Theses*. University of Lund, Department of Mathematical Physics, Lund, Sweden.

Firemní materiály společnosti VESKOM spol. s r.o.

GEHLIN, S., HELLSTRÖM, G. 2002. Influence on Thermal Response Tests by Groundwater Flow in Vertical Fractures in Hard Rock. *In Doctoral Thesis*. Lulea: University of Technology.

GEHLIN, S., HELLSTRÖM, G., NORDELL, B., 2003, The influence of the thermosiphon effect on the thermal response test. *Renewable energy*. 28, 14, s. 2239–2254.

GRANRYD, E. 2002. *Refrigerating Engineering. Part II*. Department of Energy Technology. Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

HEPBASLI, A. 2006. *A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future* [online]. [cit 2011-3-10]. Dostupné z <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ryanr3/EP/papers/Hepbasli.pdf>

HERMAN, WA. 2006. Quantifying global exergy resources. *Energy*. 31(12):1685–702.

INGERSOLL, L., R., ZOBEL, O., J., INGERSOLL, A., C., 1954. *Heat conduction with engineering, geological, and other applications*. Madison The University of Wisconsin press. revised edition.

JETEL, J. 1982. Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. Academia, Praha, 246 s.

KAMÍNSKÝ, J., VRTEK, M. 1998. *Možnosti obnovitelné energie*. Vysoká škola báňská – technická univerzita, Ostrava, 96 s.

KOPECKÝ, P. 2008. Tepelně vlhkostní chování výměníků tepla, numerický model, analytická a experimentální validace, měření in-situ, navrhování, *Disertační práce*, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha, 137 s.

KRAINER, R. 2011. Nové metody hospodárného dimenzování systémů s tepelným čerpadlem a svislými zemními vrty, *Disertační práce*, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Praha, 105 s.

KUTÍLEK, M. 1978. *Vodohospodářská pedologie*. SNTL, Praha, 295 s.

LAPORTHE, S. *Petit guide des pompes à chaleur géothermales*. Valbonne: Centre scientifique et technique du bâtiment, 2004. 23 s.

LAUGHTON, M., A. 1990. *Renewable energy sources*.

LEE, K., C. *Classification of geothermal resources – an engineering approach*. Geothermal Institute The University of Auckland. Private Bag 92019 Auckland, New Zealand. 1996.

LEE, K.C. 2001. Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30, 42-431 s.

MACH, S. Tepelná čerpadla a topné faktory. *TZB-info* [online]. 8.3.2005, [cit. 2011-06-30]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/2410-tepelna-cerpadla-a-topne-factory>

MAREŠ, S., KAROUS, M., LANDA, I., MAZÁČ, O., MÜLLER, K., MÜLLEROVA, J. 1983. *Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii*. SNTL, Praha, 197 s.

MURAYA, N., K. 1994. Numerical modeling of the transient interference of vertical U-tube heat exchangers, *Ph.D. Dissertation*, Texas A&M University.

MYSLIL, V., KUKAL, Z., POŠMOURNÝ, K., FRYDRYCH, V. 2007. Geotermální energie ekologická energie z hlubin Země – současné možnosti využívání. *Planeta*, 15, 4, 2-30 s.

MYSLIL, V. *Zajem o využívání geotermální energie roste* [online]. 27. dubna 2009 [cit 53 2013-3-10]. Dostupné z <http://oze.tzb-info.cz/geotermalni-energie/5589-zajem-o-vyuzivani-geotermalni-energie-roste>

NEUBERGER, P., ADAMOVSÝ, D., ADAMOVSÝ, R. 2007. *Termomechanika*. Česká zemědělská univerzita v Praze Technická fakulta, Praha, 191 s.

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

PAUL, N., D. 1996. The Effect of Grout Thermal Conductivity on Vertical Geothermal Heat Exchanger Design and Performance, *M.Sc. Thesis*, South Dakota University.

PETUKHOV, B.,S. 1970. Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties, in *Advances in Heat Transfer*, Volume 6., Academic Press N.Y., London, (Editors: Hartnet J.P., Irvine T.F. jr.)

RYŠKA, J. *Vrty do horninového masivu – zdroj energie pro tepelná čerpadla* [online]. 23. října 2006 [cit 2013-1-5]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/3609-vrty-do-horninovehomasivu-zdroj-energie-pro-tepelna-cerpadla-iii>

RYŠKA, J. *Vrty do horninového masivu – zdroj energie pro tepelná čerpadla* [online]. 23. října 2006 [cit 2013-1-5]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/3609-vrty-do-horninovehomasivu-zdroj-energie-pro-tepelna-cerpadla-v>

RYŠKA, J. *Vrty do horninového masivu – zdroj energie pro tepelná čerpadla* [online]. 23. října 2006 [cit 2013-1-5]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/3609-vrty-do-horninovehomasivu-zdroj-energie-pro-tepelna-cerpadla-vi>

SAZIMA, M. et al. 1993. Sdílení tepla. (Transmission of heat). Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury: 720.

YAVUZTURK, C. 1999. Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems, *Thesis*, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University, 251 s.

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Teplotní profil země a geotermický stupeň pro Švédsko	5
Obr. 2 Diagram pro klasifikaci geotermálních zdrojů dle specifického indexu exergie (SEI).....	8
Obr. 3 Obecná závislost tepelných charakteristik na vlhkosti půdy θ	10
Obr. 4 Rozdělení sluneční energie.....	10
Obr. 5 Přenos tepla a geotermální situace v daných hloubkách.....	11
Obr. 6 Schéma napojení hloubkových vrtů pro tepelné čerpadlo.....	14
Obr. 7 Schéma napojení otevřeného systému na tepelné čerpadlo.....	15
Obr. 8 Nejčastější půdorysné uspořádání výměňkových kanálů v BHE. a) otevřený koaxiál, b) uzavřený koaxiál, c) jednoduchá U smyčka, d) dvojitá U smyčka, e) mnohosmyčkový koaxiál TIL.....	17
Obr. 9 Laboratorní model termosifonu.....	18
Obr. 10 GEK – geotermální energetický koš.....	20
Obr. 11 Velikost tepelného odporu v závislosti na zapuštění.....	21
Obr. 12 Průměrný teplotní profil v U-smyčkovém tepelném vrtu. Během 48 hodin nepřetržitého vypouštění konstantního množství tepla do vrtu bylo každých 5 minut prováděno měření teploty v bodech, vzdálených od sebe vertikálně 10 m.....	24
Obr. 13 Průměrný teplotní profil v koaxiálním tepelném vrtu. Během 56 hodin nepřetržitého vypouštění konstantního množství tepla do vrtu bylo každých 5 minut prováděno měření teploty v bodech, vzdálených od sebe vertikálně 10 m.....	25
Obr. 14 Teplotní křivky v půdě kolem energetické piloty využívané pro vytápění nebo chlazení, předpokládá se stálý tepelný tok.....	32
Obr. 15 G-faktor v závislosti na Fourierově čísle Fo a bezrozměrném poloměru p (1,2,5 a 10).....	35
Obr. 16 Příklady řešení numerickými metodami a zasítování modelů v okolí středu vrtu	36
Obr. 17 Izolinie teploty naměřené ve vrtu teplotně neovlivněném (vlevo) a během chodu tepelného čerpadla	38
Obr. 18 Průběh g-funkcí v závislosti na počtu vrtů.....	39

Obr. 19 Tepelný odpor vrtu R_{vrt} a zeminy R_z	40
Obr. 20 Způsob umístění čidel mezi jednotlivé větve HDPE potrubí.....	44
Obr. 21 Schéma umístění teplotních čidel a impulsních vodoměrů.....	45
Obr. 22 Venkovní rozvaděč.....	46
Obr. 23 Impulsní vodoměr a teplotní čidla.....	46
Obr. 24 Kolísání teploty v závislosti na hloubce.....	46
Obr. 25 Sdílení tepla prouděním.....	49
Obr. 26 Teploty horniny ve vrtu VT1 v průběhu topné sezóny 2011/2012.....	54
Obr. 27 Teploty horniny ve vrtu VT1 v průběhu topné sezóny 2012/2013.....	56
Obr. 28 Teploty horniny ve vrtu VT1 v průběhu topné sezóny 2013/2014.....	57
Obr. 29 Teploty horniny ve vrtu VT3 v průběhu topné sezóny 2011/2012.....	59
Obr. 30 Teploty horniny ve vrtu VT3 v průběhu topné sezóny 2012/2013.....	60
Obr. 31 Teploty horniny ve vrtu VT3 v průběhu topné sezóny 2013/2014.....	62
Obr. 32 Teploty horniny ve vrtu VT2 v průběhu topné sezóny 2011/2012.....	64
Obr. 33 Teploty horniny ve vrtu VT2 v průběhu topné sezóny 2012/2013.....	65
Obr. 34 Teploty horniny ve vrtu VT2 v průběhu topné sezóny 2013/2014.....	67
Obr. 35 Teploty horniny ve vrtu VT4 v průběhu topné sezóny 2011/2012.....	68
Obr. 36 Teploty horniny ve vrtu VT4 v průběhu topné sezóny 2012/2013.....	70
Obr. 37 Teploty horniny ve vrtu VT4 v průběhu topné sezóny 2013/2014.....	71
Obr. 38 Teplotní profily sledovaných vrtů na začátku a na konci topné sezóny 2011/2012.....	73
Obr. 39 Teplotní profily sledovaných vrtů na začátku a na konci topné sezóny 2012/2013.....	75
Obr. 40 Teplotní profily sledovaných vrtů na začátku a na konci topné sezóny 2013/2014.....	77
Obr. 41 Roční průběh teplot v jednotlivých měřených hloubkách vrtu VT9.....	79
Obr. 42 Průběhy teplot ve vrtech VT1 a VT3 podle rovnice volného netlumeného kmitání.....	80
Obr. 43 Průběhy teplot ve vrtech VT2 a VT4 podle rovnice volného netlumeného kmitání.....	82
Obr. 44 Průběh teplot ve vrtu VT1 v období fáze A.....	84
Obr. 45 Průběh teplot ve vrtu VT1 v období fáze B.....	85
Obr. 46 Průběh teplot teplotnosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT1.....	87

Obr. 47 Průběh teplot teplonosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT3.....	88
Obr. 48 Průběh teplot teplonosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT2.....	89
Obr. 49 Průběh teplot teplonosné směsi na vstupu/výstupu z vrtu VT4.....	90
Obr. 50 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT1 dne 29. 1. 2014.....	91
Obr. 51 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT3 dne 29. 1. 2014.....	92
Obr. 52 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT2 dne 29. 1. 2014.....	94
Obr. 53 Průběh měrného tepelného výkonu, teploty okolního vzduchu a teploty horninového masivu v okolí vrtu VT4 dne 29. 1. 2014.....	95

9 Seznam tabulek

Tab. 1 Tepelná vodivost hornin.....	9
Tab. 2 Rozdělení tepelných vrtů.....	16
Tab. 3 Parametry pro výpočet tepelného odporu výplňového materiálu dle autora Paula.....	41
Tab. 4 Přehled vrtů a jejich finální úprava.....	44
Tab. 5 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT1.....	58
Tab. 6 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT3.....	62
Tab. 7 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT2.....	67
Tab. 8 Významné teploty v jednotlivých hloubkách vrtu VT4.....	72
Tab. 9 Teplotní difference mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2011/2012.....	74
Tab. 10 Teplotní difference mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2012/2013.....	76
Tab. 11 Teplotní difference mezi měřenými vrty a referenčním vrtem VT9 na začátku a na konci topného období 2013/2014.....	78
Tab. 12 Parametry rovnice 4.44 pro vrty VT1 a VT3.....	81
Tab. 13 Parametry rovnice 4.44 pro vrty VT2 a VT4.....	82
Tab. 14 Hodnota indexu determinace I^2_{zt} nelineární regrese t_z	83
Tab. 15 Měrné tepelné výkony a součinitelé přestupu tepla vrtů osazených jednoduchou U-trubicí.....	93
Tab. 16 Měrné tepelné výkony a součinitelé přestupu tepla vrtů osazených dvojitou U-trubicí.....	95