

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Teplotní pole v horizontálním tepelném výměníku

diplomová práce

Vedoucí práce: **prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.**

Autor práce: **Bc. Pavel Pauli**

Praha 2010

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra mechaniky a strojnictví

Akademický rok 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pavel Pauli

obor Technologická zařízení staveb

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze
čl. 17 odst. 2 určuje tuto diplomovou práci.

Název práce: **Teplotní pole v horizontálním tepelném výměníku**

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Literární rešerše
4. Závěr
5. Seznam literatury
6. Přílohy



Rozsah hlavní textové části: 40 - 60 stran

Doporučené zdroje:

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

Georgios, F., Soteris, K. Ground heat exchangers - A review of systems, models and application Renewable Energy 32 (2007) 2461-2478.

Hakon, D., Ahmet, K., Galip, T. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 224-233.

<http://energie.tzb-info.cz>

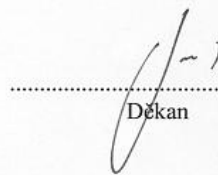
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011



Vedoucí katedry



Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Teplotní pole v horizontálním tepelném výměníku“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne 6. dubna 2011

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat firmě Veskom s.r.o., která realizovala experimentální pracoviště na své finanční náklady a umožnila nám zde provést měření, konkrétně panu řediteli Ing. Petru Burešovi. Dále bych rád poděkoval panu prof. Ing. Radomíru Adamovskému, DrSc. za odborné vedení při zpracování mé diplomové práce a za odborné informace. Také bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Pavlu Neubergerovi, Ph.D., Ing. Tomáši Kotkovi, Ing. Radimovi Matušů a Ing. Michaele Šed'ové za technickou podporu při měření. Dále děkuji Ing. Michaelu Málkovi za jazykovou korekci cizojazyčných článků. Také děkuji celé mojí rodině a přátelům za podporu, kterou jsem od nich dostával.

Abstrakt

Tato práce popisuje horizontální tepelný výměník v zemním masivu jako zdroj tepla pro tepelné čerpadlo. Práce vyhodnocuje vliv tepelného čerpadla na teplotu zemního masivu v dané hloubce při odběru tepelné energie za dobu měření od 7.6. 2010 do 24.2. 2011. V první části je vysvětlen princip tepelného čerpadla, jeho základní parametry, druhy provozu, typy tepelných čerpadel a jejich využívání. Jsou zde popsány vlastnosti půdy a vliv slunečního záření na ohřev země. V další kapitole je již popsáno vlastní měření. Jsou zde vyjádřeny rovnice pro výpočet tepelných toků zemního masivu. Dále je uvedeno místo měření, použité měřicí přístroje a rozmístění teplotních čidel na tepelném výměníku. V poslední části jsou zpracovány naměřené hodnoty a v závěru výsledky vyhodnoceny.

Klíčová slova

tepelné čerpadlo, horizontální zemní výměník, teplota zemního masivu, topné období

Temperature field in a horizontal heat exchanger

Abstract

This work is describing a horizontal heat exchanger in a soil as a heat source for a heat pump. It evaluates the influence of the heat pump on soil temperature in given depth during an experiment from 6th June 2010 till 24th February 2011. In the first part a principle of the heat pump is explained, also its basic parameters, ways of use, types of heat pumps and their utilization. Also described are soil attributes and influence of a solar radiation on soil warming. The next chapter is describing the experiment itself. Equations describing a heat flows in soil are also presented. A description of experiment's location used measuring devices and locations of heat sensor on heat exchanger are also included in the work. In the last part the results are processed and in the conclusion the results are evaluated.

Keywords

Heat pump, horizontal ground exchanger, soil temperature, heating season

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Úvod..... | 1 |
| 2. | Charakteristika současného stavu řešení problematiky po stránce realizace a výzkumu v ČR i zahraničí | 2 |
| 2.1 | Princip tepelného čerpadla..... | 2 |
| 2.1.1 | Ekologické vlastnosti tepelných čerpadel..... | 3 |
| 2.2 | Topný faktor tepelných čerpadel | 4 |
| 2.3 | Provoz tepelných čerpadel..... | 6 |
| 2.3.1 | Monovalentní provoz..... | 6 |
| 2.3.2 | Bivaletní zapojení | 7 |
| 2.4 | Typy tepelných čerpadel..... | 8 |
| 2.4.1 | Tepelné čerpadlo země-voda (země-vzduch) | 8 |
| 2.4.2 | Tepelné čerpadlo vzduch-voda (vzduch-vzduch)..... | 8 |
| 2.4.3 | Tepelné čerpadlo voda-voda (voda-vzduch)..... | 10 |
| 2.5 | Typy zemních výměníků tepla..... | 10 |
| 2.5.1 | Otevřené systémy..... | 11 |
| 2.5.2 | Uzavřené systémy | 12 |
| 2.6 | Horizontální tepelný výměník | 13 |
| 2.7 | Výměník typu Slink | 14 |
| 2.7.1 | Odběr tepla..... | 15 |
| 2.7.2 | Uložení horizontálního tepelného výměníku | 15 |
| 2.7.3 | Materiál horizontálních tepelných výměníků | 18 |
| 2.7.4 | Vlastnosti půdy | 19 |
| 2.8 | Využívání stavebních konstrukcí budov pro ukládání energie..... | 26 |
| 2.8.1 | Konstrukce energetických pilot | 27 |
| 3. | Cíl práce..... | 29 |
| 4. | Postupy a metody měření..... | 29 |
| 4.1 | Teoretický rozbor..... | 29 |
| 4.2 | Metody měření..... | 31 |
| 5. | Dosažené výsledky a diskuze | 36 |
| 5.1 | Horizontální zemní výměník | 36 |
| 5.2 | Zemní výměník typu Slink | 41 |
| 6. | Závěr | 47 |
| 7. | Seznam použité literatury | 48 |
| 8. | Seznam obrázků..... | 50 |
| 9. | Seznam tabulek..... | 51 |

1. Úvod

V dnešní době je stále důležitější řešit otázku alternativních zdrojů energie. Tepelná čerpadla patří mezi zařízení, které dokáží tyto zdroje efektivně využít. Jedná se o moderní, energeticky hospodárné a ekologické zařízení, které do ovzduší neprodukuje žádné emise. Odebírají teplo vzduchu, zemi nebo vodě a dokáží jej transformovat z nižší teplotní hladiny na hladinu vyšší. Toto teplo pak slouží k ohřevu teplé vody nebo vytápění občanských, průmyslových i zemědělských objektů.

Na trhu se objevuje stále více firem, které se zabývají kompletní dodávkou různých tepelných čerpadel. Jejich počáteční investice se oproti minulým letům podstatně snížila.

Po celé Evropě jsou každý rok nainstalovány miliony těchto zařízení a jejich podíl na trhu se neustále zvyšuje. Průzkumy dokazují, že v posledních několika letech se jejich prodej zdvojnásobil. [11]

Výhodou systémů tepelných čerpadel je bezpochyby bezobslužný a úsporný provoz. Provozní náklady představují pouze náklady na spotřebovanou elektrickou energii, která je potřebná pro pohon kompresoru, oběhových čerpadel, respektive ventilátorů.

Stále probíhají různá testování a zdokonalování tepelných čerpadel. Posuzuje se, kolik primární energie spotřebují, jaká chladiva využívají a jaký mají dopad na životní prostředí.

Tato práce je zaměřená na využití horizontálního tepelného výměníku, který využívá teplo naakumulované v povrchovém zemním masivu v důsledku dopadajícího slunečního záření. Teplo odváděné ze zemního masivu slouží jako zdroj energie na výparník tepelného čerpadla.

2. Charakteristika současného stavu řešení problematiky po stránce realizace a výzkumu v ČR i zahraničí

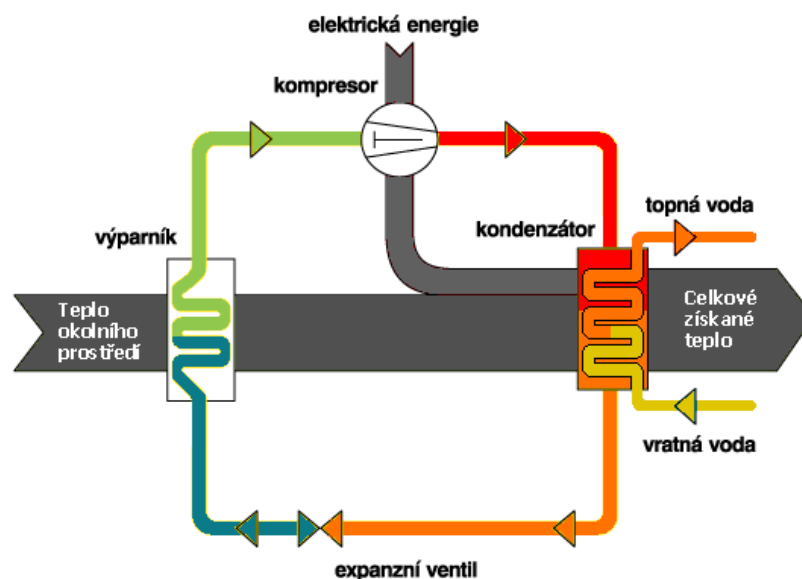
2.1 Princip tepelného čerpadla

Kompresor nasává plyn chladiva, který se vytvoří ve výparníku, ten se prudce stlačí a díky fyzikálnímu principu komprese, kdy při vyšším tlaku stoupá teplota, zvedne teplotu par na vyšší teplotní hladinu, cca na 80 °C. Z kompresoru chladivo putuje do kondenzátoru, zde předá teplo a změní svoje skupenství na kapalné (obr. 1). Z kondenzátoru je kapalné chladivo vedeno přes expanzní ventil, ve kterém se sníží teplota a tlak, potom jde zpět do výparníku. [15]

Tento cyklus se stále a rychle opakuje, což způsobuje, že tepelné čerpadlo skutečně přečerpává teplo z vnějšího prostředí do vytápěného domu. V praxi se také můžeme setkat s označením primární a sekundární okruh. Primární okruh je ta část tepelného čerpadla, ve které přivádíme nízkopotencionální teplo na výparník tepelného čerpadla, sekundární okruh je okruh, ze kterého odvádíme teplo. [15]

V případě tepelných čerpadel vzduch-voda je primární okruh nahrazen přívodem venkovního vzduchu do zařízení pomocí ventilátoru, který je jejich nutnou součástí. [15]

Obr. 1 Princip tepelného čerpadla [9]



2.1.1 Ekologické vlastnosti tepelných čerpadel

Tepelná čerpadla se svojí činností chovají ke svému okolí ekologicky a šetrně pouze v případě, že pracují s pracovním médiem (chladičem), které je vůči životnímu prostředí ekologické.

Při úniku některých chladiv dochází k narušování ozónové vrstvy Země a k tvorbě vrstvy, která vytváří skleníkový efekt. Mezi tyto látky patří stále používané R22.

Používaná chladiva:

- Chladiva HFCKW – halogenové uhlovodíky obsahující chlór (např. R 22, R 124, R 142 b). R22 je jednosložkové chladivo. Toto chladivo je možné používat v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Od ledna 2010 se nesmí používat.
- Směsi látek HFCKW – většinou tříložkové směsi R409A. Jedná se o náhradu za chladivo R12. V současné době se používá jen omezeně např. do starých zařízení.
- Chladiva HFKW – halogenové uhlovodíky neobsahující chlór (R 134A, R 143A, R 125). R134A je jednosložkové chladivo. Chladivo je možné používat v rozsahu teplot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeho využití je hlavně v oblasti autoklimatizace, kde se počítá s omezením tohoto chladiva od roku 2011.
- Směsi látek HFKW – většinou tříložkové směsi (R 404A, R 407C, R 507). R 404A je chladivo, které se v chladícím okruhu chová jako směs tří samostatných látek. Z tohoto důvodu je zřetelný teplotní skluz. Rozsah doporučených vypařovacích teplot je $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Směsi HFCKW/HFKW – většinou tříložkové směsi (R 413A, R 401A). R 413A je určeno pro práci v chladícím okruhu v oblasti vypařovacích teplot $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeho výhodou je skutečnost, že dokáže pracovat s minerálními oleji.
- Ostatní chladiva neobsahující halogeny – čpavek (R 717), propan (R 290), CO_2 (R 744). Čpavek je jedním z nejstarších a nejpoužívanějších chladiv především v průmyslovém chlazení. Je velmi levný, běžně vyráběný ve vyhovující jakosti a má velké výparné teplo, hmotnostní i objemovou chladivost.. Je výbušný, hořlavý a prudce jedovatý s pronikavým zápachem. S vodou se mísí neomezeně, s olejem téměř vůbec. Napadá stříbro a zinek a za přítomnosti vlhkosti i měď a její slitiny.

Kritéria, která by měla chladiva splňovat:

- mělo by být nehořlavé a nejedovaté,
- nemá negativně působit na životní prostředí,
- výparné teplo chladiva by mělo být co největší,
- v kapalně fázi má mít malou tepelnou kapacitu, aby se ochladilo z teploty kondenzace na teplotu vypařování,
- součinitel tepelné vodivosti má být vysoký, aby docházelo k intenzivnímu sdílení tepla,
- viskozita by měla být co nejvyšší, aby byly co nejmenší hydraulické ztráty,
- nemá negativně ovlivňovat mazací oleje, respektive ve styku s mazacími oleji nemá měnit své vlastnosti,
- nemá působit korozivně na materiály a mělo by být chemicky stabilní vůči konstrukčnímu materiálu,
- má být snadno indikovatelné,
- má umožnit snadné odloučení vzduchu tzn., že má být těžší než vzduch.

2.2 Topný faktor tepelných čerpadel

Základním parametrem tepelných čerpadel je topný faktor (COP – Coefficient of Performance). Toto bezrozměrové číslo vypovídá o „účinnosti“ tepelného čerpadla. Jedná se o teoretický poměr mezi vyrobeným teplem a spotřebovanou elektrickou energií. Čím je vyšší topný faktor, tím lepší je tepelné čerpadlo, protože jeho provoz je levnější. [15]

Toto číslo může nabývat u velmi dobrých tepelných čerpadel za optimálních podmínek až hodnoty 7. Běžně se topný faktor pohybuje v rozmezí od 2,5 do 5. Není ovšem veličinou, která by byla k danému tepelnému čerpadlu jednou provždy přiřazena. Mění se dle podmínek, v nichž tepelné čerpadlo pracuje. [15]

Výpočet topného faktoru:

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

Kde: Q_k - celkový tepelný výkon získaný na kondenzátoru čerpadla [kW];

A - elektrický příkon kompresoru potřebný pro provoz čerpadla [kW].

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

Topný faktor se velmi výrazně mění dle teplot na primární a sekundární straně tepelného čerpadla (TČ). Pokud je např. teplota nemrznoucí směsi na výstupu z vrtu 0 °C a teplota topné vody na výstupu z TČ 45 °C, topný faktor bude 3,9. Pokud ovšem při stejných podmínkách ve vrtu bude teplota topné vody jen 35 °C, topný faktor se zvýší až na 5,02, tedy o 28 %. Z těchto skutečností vyplývá zásada, že čím je nižší teplota vody v topném systému, tím lépe. [20] Z tohoto důvodu je praktické instalovat s tepelnými čerpadly podlahové topení, kterému stačí pro provoz nižší teplota než radiátorům. [15]

Při výběru tepelného čerpadla je důležité, aby byl kladen důraz na provozní topný faktor. Ten je ovlivněn nejen samotným topným faktorem tepelného čerpadla, ale i dalšími faktory, které se často podceňují. [16]

Další faktory: [16]

- nutnost stanovení správného topného výkonu tepelného čerpadla, který by neměl poklesnout pod 60 % pokrytí tepelné ztráty objektu,
- stanovení provozní teploty nízkopotencionálního zdroje (pokud klesne provozní teplota chladícího média o 1 °C, sníží se celkový topný výkon o 4 %),
- sladění provozní teploty tepelného čerpadla s teplotou otopného systému s vazbou na zachování tepelné pohody,
- regulace systému vytápění,
- ovládání dohřevu (bivalencí),
- zajištění ohřevu teplé vody,
- vytápění bazénu.

Podle normy EN 255-2 je stanovena metodika měření topných faktorů tepelných čerpadel. U tepelných čerpadel země-voda je měřen na jedné straně topný výkon a na straně druhé elektrický příkon chladícího kompresoru a příkon oběhových čerpadel, který je stanoven dopočítáváním. Pro celkový provozní topný faktor je zapotřebí k elektrickému

příkonu tepelného čerpadla přičíst elektrickou energii potřebnou na pohon oběhových čerpadel. [16]

U tepelného čerpadla vzduch-voda je zapotřebí k elektrické spotřebě tepelného čerpadla přičíst příkon oběhového čerpadla na straně topné vody. Provozní topný faktor je dále výrazně ovlivněn požadavkem na odtávání výparníku. Mezi faktory, které významně ovlivní časté odtávání venkovního výparníku a ekonomiku provozu, se řadí:

- Vysoká hustota lamel. Pokud se na lamelách venkovního výparníku zachytí jínovatka, dochází k výraznému snížení průtoku vzduchu - téměř ucpání. Jínovatka na výparníku (s větší roztečí lamel než 3,7 mm) zvýší do určitého okamžiku jeho topný výkon až o 10 %. Pokud jsou však rozestupy lamel blíže než 2,5 mm, není možné tohoto příznivého jevu využít.
- Regulace odtávání venkovního výparníku. Příroda mění provozní podmínky a je obtížné stanovit optimální okamžik odtávání. Je několik způsobů řešení. Nejčastěji se jedná o časové odtávání. Tento způsob patří mezi nejhorší. Časové odtávání snižuje topný faktor především tím, že:
 - výparník odtává, i když nemusí,
 - výparník ještě neodtával, i když už je ucpáný a bez výkonu (v době mlh),
 - chladič kompresor je nadměrně zatěžován. [16]

2.3 Provoz tepelných čerpadel

2.3.1 Monovalentní provoz

V tomto případě je tepelné čerpadlo jediným vytápěcím zařízením daného objektu. Monovalentní provoz je vhodný pro nízkoteplotní vytápění s teplotou topné vody max. 60 °C. Aby tepelné čerpadlo hradilo celou potřebu tepla, tj. krylo tepelné ztráty objektu i při nejnižších teplotách (cca -15 až -20 °C), je zapotřebí výrazně zvýšit výkon a to i o více než 50 % oproti bivalentnímu provozu. Se zvýšením výkonu tepelného čerpadla je spojeno zvětšení výkonu zdroje nízkopotenciálního tepla (NPT), a zejména těch částí vně TČ, které odběr NPT zajišťují. Například u systému tepelného čerpadla země-voda zvětšením kolektoru, u systému voda-voda zvětšením vydatnosti zdroje. Nejnižší venkovní teploty

trvají jen krátkou část otopného období. Pokud by se tepelné čerpadlo dimenzovalo na celý potřebný výpočtový topný výkon, bylo by zbytečně velké a nákladné. Převážnou část otopného období se potřebuje topný výkon menší, než je výpočtový. [21]

2.3.2 Bivaletní zapojení

Toto zapojení se používá nejčastěji. Zde samotné tepelné čerpadlo hradí potřebu tepla jen do určité vnější teploty, cca 0 až -5 °C, tzv. teploty bivalence, a pod touto teplotou spolupracuje s druhým doplňkovým zdrojem, např. elektrokotlem. Doplňkový zdroj pracuje většinou souběžně s TČ, někdy také i samostatně.[21]

2.3.2.1 Monoenergetický provoz

Vytápěcí systém nevyžaduje žádné další vytápěcí zařízení. Tepelné čerpadlo vzduch - voda pracuje běžným způsobem až do venkovní teploty cca -20 °C, ale od určité venkovní teploty, kdy již jeho výkon nestačí, se připne přídatný, zpravidla elektrický, ohřev. [21]

2.3.2.2 Alternativně bivalentní provoz

Tepelné čerpadlo pokrývá potřebu tepla až do určité, předem stanovené teploty venkovního vzduchu (např. 0 °C). Poklesne-li teplota pod tuto hodnotu, tepelné čerpadlo se vypne a produkci tepla přebírá další tepelný zdroj. Tento způsob je možný u všech vytápěcích systémů pracujících s teplotou topné vody do max. 90 °C. [21]

2.3.2.3 Paralelně bivalentní provoz

Až do určité venkovní teploty produkuje potřebné teplo tepelné čerpadlo samo. Při nízkých teplotách se připojí druhý tepelný zdroj, oproti alternativně bivalentnímu provozu je samozřejmě podíl tepelného čerpadla na celoroční produkci tepla větší. Tento způsob je vhodný pro podlahové či stěnové vytápění a pro vytápění pomocí radiátorů do teplot topné vody max. 60 °C. Při alternativně bivalentním zapojení, kdy se TČ dimenzuje na 60 až 70 % výpočtového topného výkonu, TČ kryje více než 90 % a doplňkový zdroj méně než 10 % potřeby tepla. [21]

2.3.2.4 Částečně paralelně bivalentní provoz

Až do určité venkovní teploty produkuje potřebné teplo tepelné čerpadlo samo. Poklesne-li teplota pod tuto hodnotu, připne se k němu další tepelný zdroj. Pokud tepelné čerpadlo neprodukuje vodu o teplotě odpovídající teplotě topné vody, tepelné čerpadlo se vypne. Tento provozní způsob je vhodný pro všechny vytápěcí systémy pracující s teplotou topné vody přes 60 °C. [21]

2.4 Typy tepelných čerpadel

2.4.1 Tepelné čerpadlo země-voda (země-vzduch)

Jedná se o tepelná čerpadla využívající teplo obsažené v zemi. Výměník, tedy kolektor, se zhotovuje z plastových trubek a ukládá se v hlubinných vrtech (hloubka až 150 m), nebo jako horizontální tepelný výměník v hloubce 1,5 až 2 m.[21]

Pro použití tepelného čerpadla země-voda s horizontálním tepelným výměníkem je zapotřebí mít použitelný, nezastavěný pozemek. Ten by měl být nejméně dvakrát větší než vytápěná plocha v objektu. [21]

Podmínky pro volbu kolektorů jsou dány především geologickou situací a dále také umístěním budovy v zástavbě. Nové domy, které jsou postavené na zelené louce a mají dostatečný venkovní prostor, využívají kolektory horizontální. V případě, že plocha není dostatečná, používají se vertikální kolektory. Teplo z horizontálního kolektoru či vrtu je možné odebírat po celý rok, tzn. i v letních měsících, kdy využíváme tepelné čerpadlo hlavně pro ohřev teplé vody. V případě volby geotermálního vrtu je možné využití chladícího výkonu v letních měsících. [15]

2.4.2 Tepelné čerpadlo vzduch-voda (vzduch-vzduch)

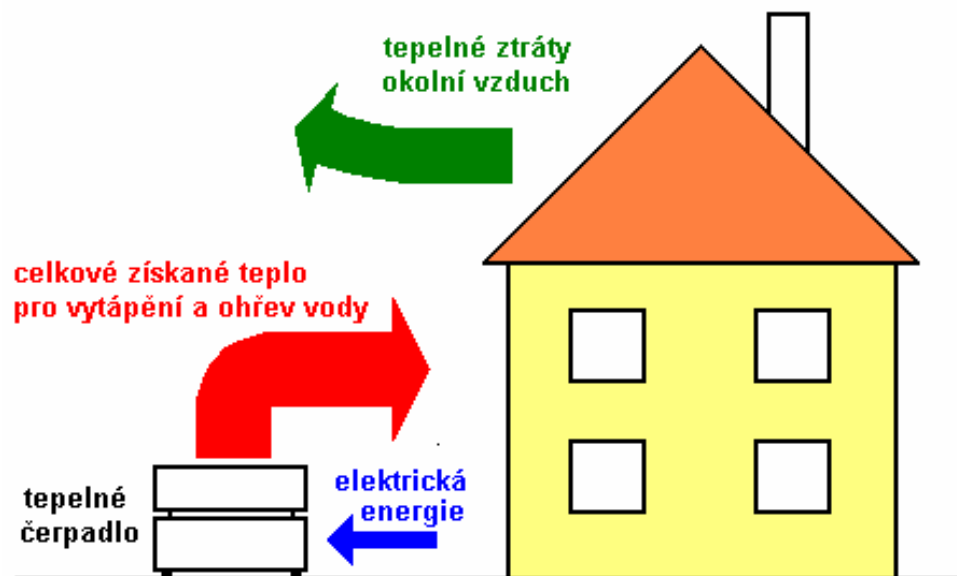
Tento systém má mnoho výhod vyplývajících ze snadné instalace a velké univerzálnosti. Tepelné čerpadlo tohoto typu lze použít prakticky na jakoukoliv stavbu, a to velmi jednoduše (obr.2). Při použití tohoto typu odpadají zemní práce, takže pořizovací náklady jsou samozřejmě nižší než u tepelného čerpadla typu země-voda. Výkon tepelného

čerpadla se mění s teplotou venkovního vzduchu. Pokud teplota venkovního vzduchu roste je výkon tepelného čerpadla vyšší, s klesající teplotou výkon klesá. [15]

Nové generace kompresorů zcela změnili provozní charakteristiky tohoto systému tepelných čerpadel a posunuly jejich provozní schopnost až do venkovních teplot $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Venkovní teplota v topném období se u nás na převážné většině území pohybuje v rozmezí $3\text{ až }4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při těchto teplotách kvalitní tepelné čerpadlo vzduch – voda s podlahovým vytápěcím systémem přesahuje hranici topného faktoru 3. [21]

Systém vzduch-voda umožňuje dvě varianty řešení. První je kompaktní tepelné čerpadlo vnitřního provedení. V tomto provedení se vzduch k tepelnému čerpadlu přivádí přes stěnu hlukově a tepelně izolovanými hadicemi. Vstupy do objektu, určené pro nasávání a vyfukování vzduchu, jsou z vnější strany opatřeny žaluziemi. Kompaktní zařízení může být umístěno ve sklepě, v dílně nebo např. garáži. Druhé řešení je tepelné čerpadlo pro venkovní instalaci. Zde je zařízení umístěno mimo dům a uvnitř objektu je jen akumulční zásobník topné vody, řídicí automatika, elektrické a hydraulické příslušenství. [21]

Obr. 2 Tepelné čerpadlo odebírající energii ze vzduchu [21]



2.4.3 Tepelné čerpadlo voda-voda (voda-vzduch)

Toto tepelné čerpadlo se používá tam, kde je k dispozici povrchová nebo podzemní, tedy studniční, voda. Teplo ze studniční vody se může využívat v případě, kdy je voda dostatečně čistá, má vhodné složení, její teplota je celoročně min 8 až 10 °C a je k dispozici v dostatečném množství. Energetický efekt tepelných čerpadel voda – voda je vysoký díky tomu, že podzemní voda má ze všech zdrojů nízkopotencionálního tepla nejvyšší teplotu v otopném období. Dostupnost tohoto zdroje však nebývá příliš četná. [21]

Povrchová voda musí splňovat stejné požadavky jako voda podzemní. Problémy bývají nejen s čistotou nebo množstvím, ale zejména s teplotou, protože v tocích, které nejsou ohřívány odpadním teplem z průmyslových závodů, klesá teplota v zimních měsících na hodnotu, kterou tepelné čerpadlo nemůže využít. [21]

Odpadní teplo z různých technologických procesů může být v řadě případů vhodným zdroje NPT. Uplatnění nachází především při vytápění průmyslových i sportovních objektů a přípravě teplé vody. Řešení se musí přizpůsobit konkrétnímu případu. [21]

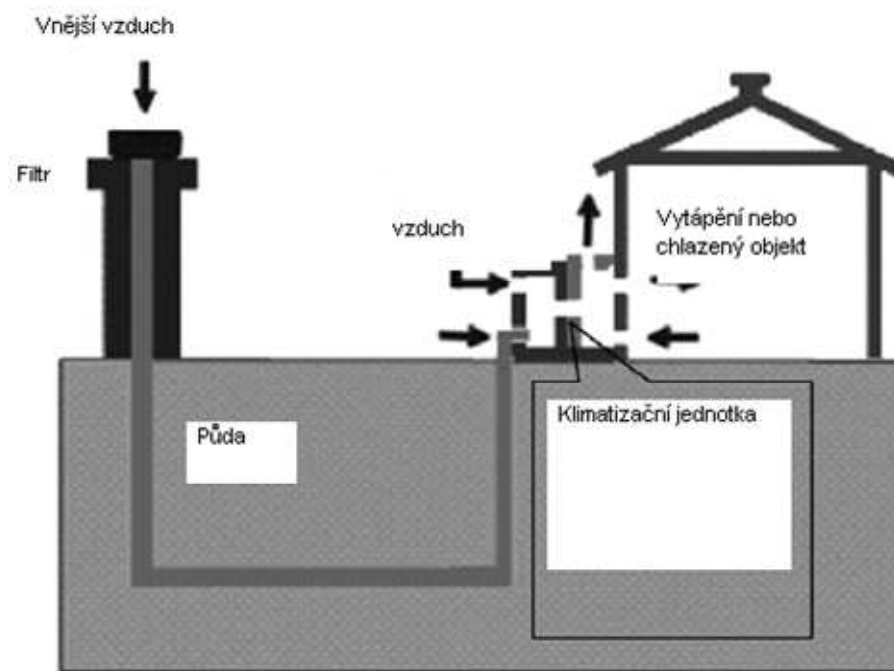
2.5 Typy zemních výměníků tepla

Existují dva základní typy zemních výměníků tepla. Jedná se o uzavřený a otevřený systém. V otevřeném systému může být půda použita přímo k chlazení či ohřívání média, které je samotné použito k chlazení či ohřívání prostorů. Půda může být použita také nepřímo s pomocí teplonosné tekutiny, která cirkuluje v uzavřeném systému. Smyčka výměníku tepla je vyrobena z materiálu, který je neobyčejně odolný, ale dovoluje teplotu přestupovat efektivně. Tento materiál má obvykle záruku na 50 let. Tekutina ve smyčce je voda nebo nemrznoucí roztok, který je šetrný k životnímu prostředí. Délka smyčky závisí na mnoha faktorech jako např. na typu použité konfigurace smyčky, zátěži vytápění a klimatizování domu, vlastnosti půdy, místní klima a další. [14]

2.5.1 Otevřené systémy

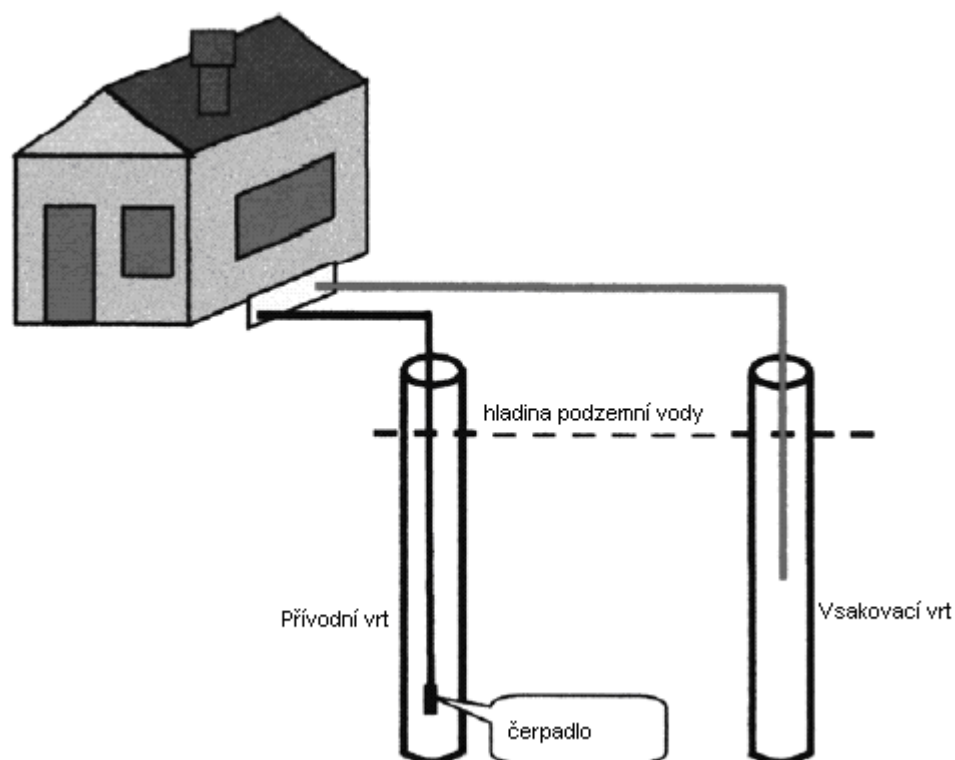
V otevřených systémech prochází okolní vzduch přes trubky, které jsou zakopány v zemi, aby došlo k předchlazení nebo předehřátí. Pak je tento vzduch ohřán nebo zchlazen klimatizační jednotkou a vháněn do budovy (obr. 3). [14]

Obr. 3 Základní princip zemního předehřevu nebo předchlazení vzduchu v otevřeném systému [14]



Podobným způsobem může být použita studniční voda jako chladicí médium tak, že se dá do přímého styku se spirálou tepelného čerpadla. [14] Ochlazená voda se nesmí vracet zpět do studny ani kanalizace. Vrací se do vsakovací studny, která musí být dostatečně vzdálena od studny odběrové, jak ukazuje (obr. 4). [21]

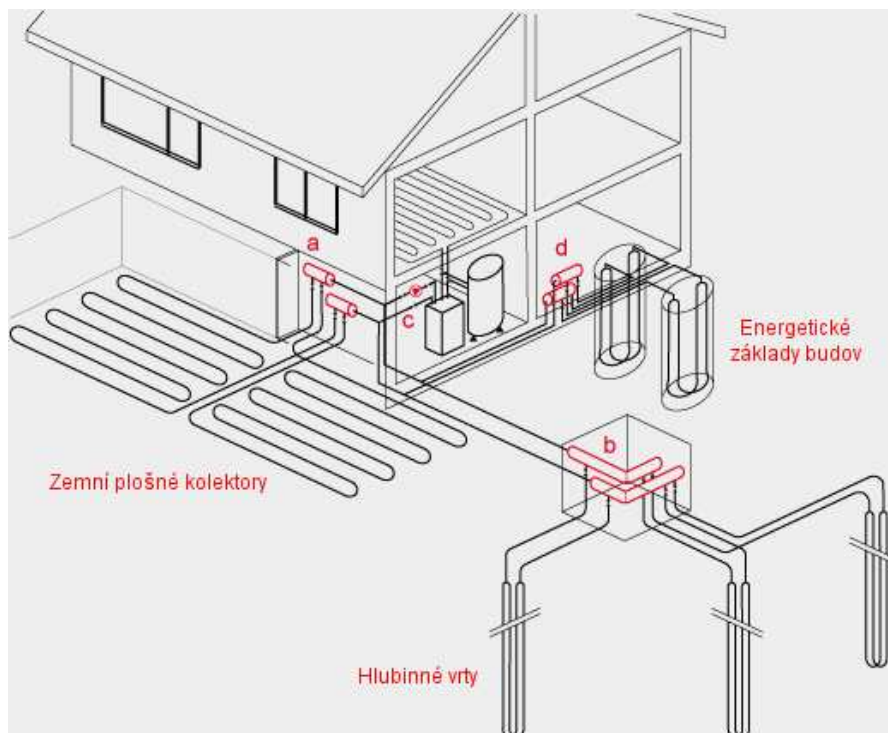
Obr. 4 Tepelné čerpadlo využívající studniční vodu [14]



2.5.2 Uzavřené systémy

Tento systém je již částečně popsán v bodě 2.4.1 u tepelného čerpadla země-voda. Jak již bylo řečeno, u tohoto systému jsou výměníky tepla umístěné pod zemí a to buď horizontálně nebo vertikálně (obr. 5). Teplonosné medium cirkuluje ve výměníku tepla a přenáší teplo z půdy do tepelného čerpadla a naopak. [14]

Obr. 5 Provedení zemního horizontálního kolektoru a geotermální vertikální sondy [13]



2.6 Horizontální tepelný výměník

Horizontální tepelný výměník je jedním z nejlepších způsobů odběru tepla. Tepelné čerpadlo využívající tento tepelný výměník dosahuje stejných nebo lepších provozních nákladů jako při využití vrtů, ale při výrazně nižších pořizovacích nákladech (20 – 50 % ceny vrtů). Stejně jako u hlubinných vrtů umožňuje tepelnému čerpadlu pracovat bez ohledu na teplotu venkovního vzduchu. Systémů uložení horizontálního tepelného výměníku je více druhů. Obecně platí, že čím větší je zabraná plocha, tím lepších výsledků je dosaženo. Tyto výměníky odebírají většinu tepla z vrstvy mezi trubkami a povrchem země, která je zásobovaná energií ze slunečního záření, proto je vhodné, aby byly umístěny v hloubkách 1 až 1,5 m. [20]

2.7 Výměník typu Slink

Jedná se o druh zemních výměníků tepla (obr. 6), které se ukládají do větší hloubky než horizontální výměníky tepla. Hloubka uložení se pohybuje okolo 2 m. Šířka výkopu je cca 0,9 – 1,2 m. Délka výkopu bývá okolo 20 m. Na jeden běžný metr výkopu připadá 10 metrů potrubí, které je na dno výkopu uloženo ve spirálách. Osová vzdálenost jednotlivých výkopů musí být minimálně 5 metrů. [12]

Výhodou výměníků typu Slink je jejich uložení do výkopu, kde není zapotřebí taková plocha jako u horizontálních tepelných výměníků. Protože zde dochází k vyššímu podchlazování zemního masivu a využití menší plochy pozemku, jsou tyto výměníky vhodné pouze do suchých půd. Při dimenzování výměníků typu Slink platí orientační hodnota získaného tepla přibližně 100 W na 1 metr výkopu. [12]

Obr. 6 Uložení výměníku typu Slink [13]



2.7.1 Odběr tepla

U horizontálního tepelného výměníku je třeba zohlednit, že může být zanedbán geologický proud tepla ($0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Při použití tohoto tepelného výměníku se hlavně využívá proud tepla, který přichází ze shora a je přijímán svrchní vrstvou země nad ním, z přímé nebo nepřímé sluneční energie (záření, déšť atd.). [24]

Horizontální tepelný výměník odebírá 98 % energie z vrstvy zeminy, která je nad ním, a pouze dvě 2 % energie jsou odebrány ze zeminy pod kolektorem. Tento výměník tepla je tedy v podstatě rozměrný sluneční kolektor s nízkou účinností, který je doplněn o obrovský akumulátor tepla (zemský povrch), s ročním cyklem nabíjení a vybíjení. [4]

Tím jsou při instalaci a plánování rozhodující nejen termické vlastnosti půdy, ale i poloha místa a jejího okolí. Z těchto uvedených důvodů nesmějí být uloženy výměníky zemního tepla zakryty, např. střechou nebo jinou zástavbou. [24]

2.7.2 Uložení horizontálního tepelného výměníku

Kolektor je vyroben z polyethylenového potrubí, které se klade do výkopů v nezamrzlé hloubce, v našich geografických podmínkách se doporučuje hloubka 1,2 – 1,5 m. Při dimenzování je především důležitá plošná výměra zemního výměníku více než systém položení a vzdálenosti jednotlivých smyček. [24] Plocha pozemku potřebná pro vytápění daného objektu je přibližně 2,5 násobkem plochy vytápěné. Přesněji ji lze vypočítat dle uvedeného vztahu (2). [17]

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

Kde:

θ_0 – potřebný tepelný výkon [W],

k_b – součinitel charakterizující bivalentní provoz [-],

$$k_b = 0,3 \text{ až } 0,5$$

| | |
|---|-----------------------------------|
| q_z – tepelný tok ze země [W.m ⁻²], | |
| $q_z = 6$ až 10 W.m ⁻² | u masivní, kamenité půdy, |
| $q_z = 20$ W.m ⁻² | u suché písčité půdy, |
| $q_z = 25$ W.m ⁻² | u vlhké písčité půdy, |
| $q_z = 30$ W.m ⁻² | u suché hlinité půdy, |
| $q_z = 35$ W.m ⁻² | u vlhké hlinité půdy, |
| $q_z = 40$ W.m ⁻² | u půdy s přítomností spodní vody. |

Z tohoto vztahu můžeme usuzovat, že vlhké půdy s větším obsahem jílových částic jsou pro horizontální tepelný výměník vhodnější než půdy suché. [17]

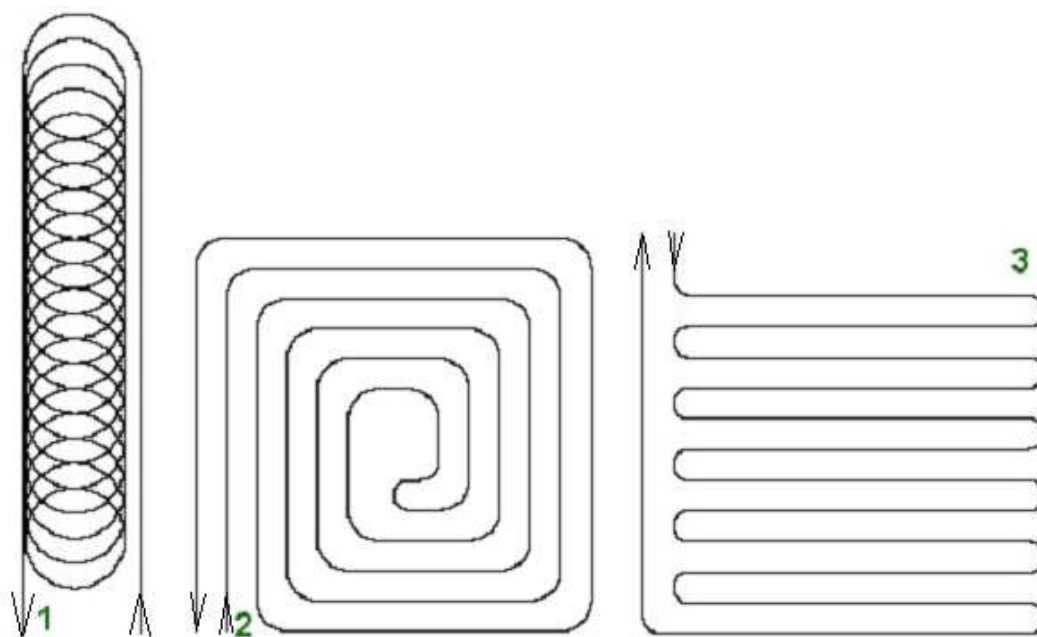
Doporučená ideální délka jednotlivých okruhů je vzhledem ke snížení tlakových ztrát 100 až 200 m. Smyčky potrubí se sdružují ve venkovní jímce, kde jsou umístěny rozdělovače, sběrače média s možností uzavření jednotlivých smyček, odzdušnění, případně regulace průtoku. [24]

Jednotlivá vedení zemního výměníku nebo páteřní vedení od sběrné jímky smí křížovat ostatní vedení, jako je kanalizace, dešťové svody, pouze v případě izolování obou těchto vedení. Teplota v kolektoru může ke konci roku klesnout pod bod mrazu a chladem tak ovlivnit funkčnost těchto přípojek. Izolace nesmí být nasákavá vodou (doporučuje se kaučuk) a musí chránit odolná chránička PVC, která zabrání její destrukci. [24]

Vedení kolektoru se nedoporučuje pokládat pod objekt nebo je vést podél základů. Médium v kolektoru může v extrémním případě dosahovat až -10 °C a v případě namrznutí ledu na potrubí může dojít k porušení stavebních konstrukcí. [20]

Bezpečná vzdálenost vedení kolektorů od základů budov je 1,5 m. Izolované musí být také prostupy do objektu, aby byla zajištěna těsnost proti vnikání vody. [24] Na (obr. 7) jsou znázorněny možnosti uložení horizontálního tepelného výměníku.

Obr. 7 Možnosti uložení horizontálního tepelného výměníku [24]



- 1 – speciální uložení kolektoru tzv. slinky, vhodné do lokalit, kde je prostorové omezení pro pokládku
- 2 – uložení do spirály ideálně rozloží čerpání energie, kdy je nejstudenější potrubí ohříváno nejteplejším (ideální v případě skrývky)
- 3 – klasické uložení potrubí, které rovnoměrně čerpá energii z plochy

Podle vlastnosti a druhu půdy kolísá výkon tepla získaný ze země mezi $8 - 32 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ při 2 400 provozních hodinách tepelného čerpadla za rok. Přiřazení možného výkonu je možné zcela laicky z tabulky č. 1. Tabulka platí pro tepelného čerpadla pracující v monovalentním provozu. Sloupec provozních 1 800 hodin platí pro tepelná čerpadla pokrývající pouze potřebu vytápění objektu, požadavek na teplou vodu je pokryt jiným zdrojem tepla (solárními kolektory, elektrokotle, atd.). Sloupec 2 400 provozních hodin se vztahuje na většinu instalací, kde je použito tepelné čerpadlo jak na vytápění, tak na ohřev teplé vody. [15]

Tab. 1 Směrné hodnoty pro návrh horizontálního tepelného výměníku [15]

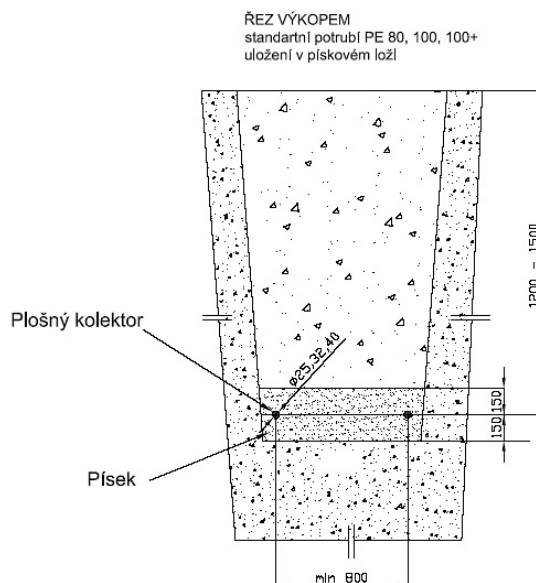
| podloží | možný odběr (W.m ⁻²) | |
|--|----------------------------------|-------------------------|
| | pro 1800 hodin provozu | pro 2 400 hodin provozu |
| suchá nesoudržná hornina | 100 | 8 |
| zvodnění štěrky a písky | 20-30 | 16-24 |
| protékající spodní voda štěrky a písky | 40 | 32 |

2.7.3 Materiál horizontálních tepelných výměníků

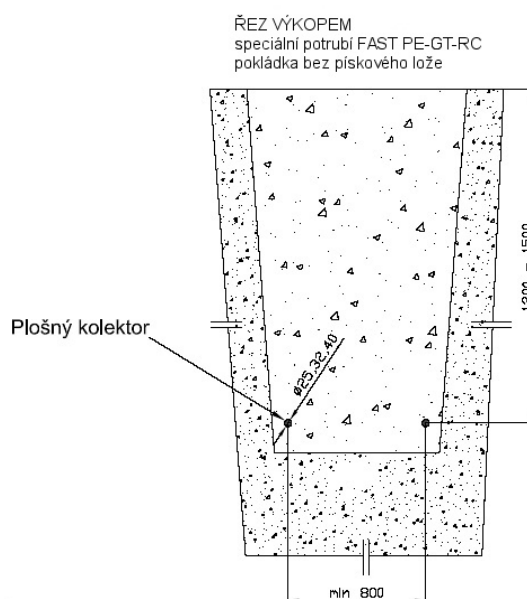
Pro realizaci horizontálních tepelných výměníků se běžně používají potrubí z vysokohutního polyethylenu (HDPE), PE 100, nebo PE 100+, které je nutno ukládat do pískového lože (obr. 8). Tento fakt podmiňují výrobci potrubí stejně jako stavební normy pro ukládku PE potrubí. Zbytky stavebních sutí, střepy, kameny, které přímo tlačí na vnější povrch, mohou narušit stěnu potrubí tak, že dojde ke ztrátě tlaku. U horizontálních tepelných výměníků pro tepelná čerpadla je obsyp mnohdy podceňován, přestože síla stěny potrubí je u těchto aplikací minimální (2,3 – 2,9 mm) a možnost proražení potrubí velmi vysoká. Proto tam, kde chceme zajistit vysoký faktor bezpečnosti, je nutné zajistit výkopy tak, že potrubí nebude v kontaktu s okolní zeminou. [22]

Dalším řešením, jak zajistit bezpečné položení horizontálního výměníku, je pomocí potrubí z materiálu označeného PE 100 FAST (obr. 9). U tohoto materiálu jsou molekulové vazby provázány tak, že odolávají přímému a dlouhodobému tlaku kamenů na stěnu potrubí, a proto se nemusí pokládat do pískového lože. [7] Použití tohoto materiálu je velmi výhodné, protože můžeme položené potrubí kolektoru rovnou zahrnout zeminou z výkopu a nemusíme tedy zbytečně platit za materiál ve formě písku a odvoz zeminy. Celkově se také zvyšuje bezpečnost. Možnost nasadit potrubí, které snese i drsnější zacházení, umožňuje montážním firmám přenechat nainstalované kolektory investorům bez rizika, že po letech provozu budou muset řešit problém s únikem tlaku v systému. [24]

Obr. 8 Řez výkopem u horizontálního tepelného výměníku s obsypem [15]



Obr. 9 Řez výkopem u horizontálního tepelného výměníku bez obsypu [15]



2.7.4 Vlastnosti půdy

Zemské teplo je jedním z nejatraktivnějších zdrojů obnovitelné alternativní energie. Využívání zemské energie neprovázejí žádné nepříznivé důsledky jako např. spalování fosilních paliv, a proto jde o energii čistou a ekologickou. [18] Zemská kůra je významným

zdrojem energie prostředí využitelné pomocí tepelných čerpadel, a to hlavně díky teplotní úrovni, mírným výkyvům teplot, všeobecné dostupnosti a neomezené tepelné kapacitě. Nevýhodou tohoto zdroje energie jsou vysoké investiční náklady na získání potřebného tepelného toku ze Země dané náročnou technickou realizací výměníků tepla pod zemským povrchem. Pro správný návrh a ekonomiku zařízení je nutno znát vlastnosti půdy, roční průběh teplot v jednotlivých hloubkách zemské kůry a průběh procesů určujících přestup tepla v půdě. [14]

Okolní klimatické podmínky ovlivňují teplotní profil pod povrchem půdy a musí být uvažovány při projektování zemních výměníků tepla. Ve skutečnosti je rozdělení teplot půdy ovlivněno strukturou a fyzikálními vlastnostmi půdy, pokrývkou povrchu půdy (např. obnažená půda, trávník, sníh, atd.) a klimatickými interakcemi (tj. mezní podmínky), které jsou určeny teplotou vzduchu, větrem, slunečním zářením, vlhkostí vzduchu a množstvím srážek. Se vzrůstající hloubkou se teplota zvětšuje přibližně o 30 °C na 1 km. Geotermální odchylky od průměrné hodnoty jsou z části závislé na druhu horniny, která je v dané sekci. [14]

Ve většině oblastí Evropy zůstávají sezónní teploty půdy poměrně konstantní v hloubce 10 – 15 m. Hodnoty mezi 10 a 15 °C mají převahu do hloubek kolem 50 m. Takové teploty umožňují ekonomické vytápění a chlazení za pomoci tepelně aktivních půdních objektů a reprezentují ideální podmínky pro tepelná čerpadla. Podstatné kolísání teplot během roku by snížilo účinnost jak tepelných čerpadel, tak i absorpčních systémů. V tropech se konstantní teplota půdy v hloubce více než 10 – 15 m pohybuje mezi 20 a 25 °C (lokálně i 28 °C), což stále umožňuje chlazení budov. [5]

Z pohledu rozdělení teplot se dají rozlišit tři půdní oblasti. Povrchová oblast dosahující hloubky přibližně 1 m, ve které je teplota půdy velmi citlivá na krátkodobé změny vnějších podmínek. Mělká oblast sahající od 1 do 8 m u suchých a lehkých půd, nebo až 20 m u půd vlhkých, kdy je teplota téměř konstantní a blíží se roční teplotě vzduchu. V této oblasti závisí rozdělení teploty půdy hlavně na sezónním cyklu okolních podmínek. Hluboká oblast (od 8 až 20 m) je oblast, kde je teplota prakticky konstantní a vzhledem ke geotermálnímu gradientu se zvyšuje s rostoucí hloubkou velmi pozvolna. [14]

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

2.7.4.1 Tepelná vodivost

Nejvýznamnější tepelný parametr půdy je součinitel tepelné vodivosti λ . [5] Zjištění tepelné vodivosti hornin je důležité pro úvahy i modelové výpočty rozmístění teplot v zemské kůře. Měrná tepelná vodivost hornin λ je pro danou horninu v izotropním homogenním prostředí konstantou, která charakterizuje schopnost horniny vést teplo. Je rovna množství tepla, které projde jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém teplotním rozdílu. Tento parametr je složitou funkcí především mineralogického složení, strukturně texturních vlastností horniny, její hustoty, pórovitosti a obsahu vody v hornině. [19]

Každý druh horniny má rozdílnou tepelnou vodivost. Horniny bohaté na křemenec, např. pískovce, mají vysokou tepelnou vodivost, takže teplo těmito horniny prochází snadněji. Naopak horniny, které obsahují jílu nebo organický materiál, jako např. břidlice a uhlí, mají nízkou tepelnou vodivost, a proto přes tyto vrstvy je teplo sdělováno pomaleji. [14]

Pro tepelný režim zemského povrchu platí rovnice:

$$Q_a = Q_p + Q_s \quad [J] \quad (3)$$

Teplo Q_s je teplo sdělené resp. odvedené zemnímu masivu radiací zemského povrchu, ochlazením půdy okolní atmosférou, ochlazením při odpařování vody, sdílením tepla prosakující gravitační vodě, sdílením tepla do vrstev s nižší teplotou, endotermickými chemickými a biologickými reakcemi, spotřebou tepla na tání sněhu a ledu. Teplo přivedené zemnímu masivu Q_p je teplo získané působením slunečního záření, ohřevem půdy okolní atmosférou, adsorpcí plynů a vodní páry a jejich kondenzací, ohřevem masivu artézskou vodou, sdílením tepla z vrstev s vyšší teplotou, exotermickými chemickými a biologickými reakcemi, sdílením skupenského tepla vody při změně fáze na led a sdělené tepelným tokem Země. [1,8]

Tepelnou vodivost výrazně zvyšuje zamrznutí půdy, protože tepelná vodivost vody $\lambda = 0,57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ se změní na tepelnou vodivost ledu $\lambda = 2,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Díky tomu může být tepelná vodivost půdy vyjádřena pouze přibližně. [5] Tepelná vodivost klesá s rostoucí pórozitou a zvyšuje se s rostoucím obsahem vody. [18] V tabulce č. 2 jsou uvedeny součinitele tepelné vodivosti λ pro horniny a zeminy.

Tab. 2 Tepelná vodivost zemin a hornin [7]

| Součinitel tepelné vodivosti λ | | | | |
|--|---------------------------------|-----|--------------------------------|---------------------------------|
| hornina | $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | | zemina | $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| | od | do | | |
| granit | 1,9 | 4 | žula | 2,9 |
| syenit | 1,6 | 3,3 | suchá půda | 0,3 |
| diorit | 1,9 | 2,8 | suchý písek hrubozrný | 0,2 |
| gabro | 2,2 | 2,4 | suchý písek jemnozrný | 0,19 |
| čedič | 1,7 | 1,7 | suchá hlína písčítá | 0,19 |
| břidlice | 1,3 | 2,1 | suchá hlína | 0,14 |
| rula | 1,7 | 3,3 | vlhká půda | 1,9 |
| amfibolit | 1,9 | 2,4 | vodou nasycený písek hrubozrný | 1,72 |
| vápenec | 0,8 | 3 | vodou nasycený písek jemnozrný | 1,63 |
| dolomit | 0,8 | 4,5 | vodou nasycená hlína písčítá | 1,34 |
| pískovec | 0,8 | 7,1 | vodou nasycená hlína | 0,88 |
| prachovec | 1,5 | 2,5 | vodou nasycená rašelina | 0,46 |
| jílovec | 1,8 | 2,8 | vzduch | 0,02 |
| jíl | 0,4 | 1,2 | voda | 0,5 |
| písek | 0,3 | 3,5 | led | 2,1 |

2.7.4.2 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita C [J.K^{-1}] vyjadřuje množství tepla, kterým se ohřeje těleso o 1 K. Měrná tepelná kapacita c [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] je množství tepla, které je potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 K. Definuje množství energie uložené v materiálu na jednotku hmoty, která je navíc proměnná s časem. Vyžaduje se u nestabilních řešení. Nezávisí však na mikrostruktuře půdy. Ve většině případech je dostačující počítat měrnou tepelnou kapacitu půdy z měrných tepelných kapacit různých složek podle jejich měrných objemů. Při výpočtech se uvažují měrné objemy minerálních, organických složek a vody. To ukazuje následující vztah [5]:

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

Kde:

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

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

x_w – poměrná hodnota objemu vody [-]

Jelikož mají minerální a organické komponenty téměř stejnou tepelnou kapacitu, zůstává obsah vody hlavní proměnou, alespoň v krátkodobém hledisku. Při dlouhodobějším spojení či při procesu smršťování půdy (působení vnějších tlaků nebo vlastní síly) mohou hrát roli, protože se změní měrné objemy. Celková měrná tepelná kapacita se zvýší spolu s obsahem vody a sníží se v případě mrznutí. [5]

Měrná tepelná kapacita vody je $c_w = 4186 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ v případě mrznutí ledu je $c_l = 1884 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Objemová kapacita C_v je odvozena z měrné tepelné kapacity a objemové hustoty půdy podle tohoto vzorce [5]:

$$c_v = \rho_s \cdot \left(c_s + c_w \cdot \frac{w}{100} \right) \quad [\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}] \quad (5)$$

Kde:

ρ_s - měrná hmotnost minerálních složek [kg.m^{-3}],

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

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

w - obsah vody vztažený k suché hmotnosti v procentech.

2.7.4.3 Teplotní vodivost

Teplotní vodivost ukazuje, jak je látka schopna vést teplo. Znamená to, jak snadno se v ní dokážou vyrovnat teplotní rozdíly. Součinitel teplotní vodivosti a [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] je veličinou odvozenou, která bezprostředně závisí na změně součinitele tepelné vodivosti λ a objemové měrné tepelné kapacity c_o . [5]

$$a = \frac{\lambda}{c_o} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad [\text{m}^2.\text{s}^{-1}] \quad (6)$$

Kde:

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

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

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

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

2.7.4.4 Vliv slunečního záření

Solární energie je trvalým přínosem tepla. V našich podmínkách dodává sluneční záření přibližně 100 až $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Toto teplo proniká jen mělce pod povrch. Při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ na povrchu a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ v hloubce 2 m se do hloubky 1 m pod povrch dostává jen $0,08 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ do hloubky 2 m jen $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a do hloubky 4 m pouze $0,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. [16]

Tuto závislost vyjadřuje vzorec: [18]

$$T_{(x)} = T_0 \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot x \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

Kde:

T_0 - povrchová teplota ($^\circ\text{C}$),

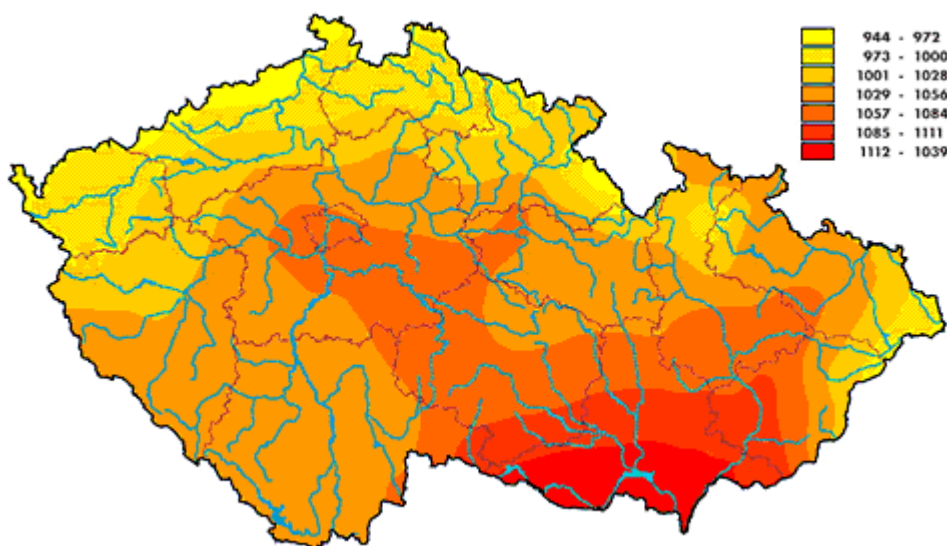
q - měrný tepelný tok dopadajícího slunečního záření ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),

x - hloubka pod povrchem (m),

λ - hodnota vodivosti hornin či zemin $0,8 - 1,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$.

Intenzita slunečního záření na horní hranici atmosféry se nazývá solární konstanta. Toto záření není ovlivňováno atmosférou, je konstantní, a proto se nazývá konstanta. Velikost solární konstanty závisí na schopnosti Slunce vyzařovat energii a na vzdálenosti Země od Slunce. Při střední vzdálenosti Země od Slunce je hodnota solární konstanty blízká $1400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozmezí naměřených hodnot je od $1,36$ do $1,42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, za standardní hodnotu se pokládá $1,38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. [18] Na (obr. 10) je znázorněn průměrný roční dopad slunečního záření v ČR.

Obr. 10 Průměrný roční dopad slunečního záření [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$] [6]



2.7.4.5 Tepelný tok

Tento termín vyjadřuje množství tepla, které prochází jednotkou plochy za jednotku času. Tepelný tok se vyjadřuje v jednotkách $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Z hodnoty zemského tepelného toku lze částečně odvodit rychlost růstu teploty s hloubkou, neříká však nic o původu tepla. Z hlediska využití geotermální energie jsou potenciální možnosti hlavně tam, kde je vysoká hodnota tepelného toku, což též znamená v místech, kde jsou v malých hloubkách pod povrchem zvýšené teploty. Na zemském povrchu je rozmezí hodnot zemského tepelného toku, až na výjimky, mezi 30 a 120 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Střední hodnota, vypočítaná z několik desítek tisíc měření, je 70 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. V oblastech činných sopek nebo horkých pramenů může být toto číslo mnohem vyšší, až několik tisíc. Na stabilních částech zemské kůry, hlavně na štítech a platformách, obecně platí, že je hodnota tepelného toku nižší. Naopak je tomu v částech zemské kůry s aktivním vulkanismem, kde jsou hodnoty vyšší. [5]

2.8 Využívání stavebních konstrukcí budov pro ukládání energie

K získání nízkopotencionální energie pro tepelné čerpadlo využíváme řadu zdrojů. Vhodný systém vždy podmiňuje místní situace stavby. U většiny instalací jsou navrženy hlubinné vrty. V případě možnosti záběru velké plochy pozemku je možné realizovat horizontální tepelný výměník. [23]

Možnost využití stavebních konstrukcí budov nebo jejich základů je investičně velmi výhodná. Tento způsob instalování registru potrubí do základů budov je nazýván energetické piloty (obr. 11), energetické stěny nebo energetické základy. Jde o to, jaký je zvolen způsob instalace, která je možná pouze u novostaveb. Nutností je, aby projekty těchto systémů a schvalovací procesy byly již s minimálně půlročním předstihem vyřešeny. Instalace této technologie chlazení a klimatizování budov musí být v souladu s projektem celé budovy. [23]

Obr. 11 Vizualizace energetických pilot pod objektem [23]



Stavby, kde jsou instalovány energetické piloty, se provádí zpravidla v místech, kde je nezpevněné podloží, které by neumožňovalo použití klasických základů pro uložení budovy. Hlavně jde o místa vodních toků anebo místa se zvýšenou hladinou spodní vody. Piloty staticky zajišťují většinu výškových budov, kde slouží jako kotvy. Jejich počet, velikost a hloubku uložení provádí specialista na obor statiky. Při stavbách se můžeme setkat s piloty o průměru 120 – 1 200 mm a hloubek uložení od 3 do 30 m. [23]

Objem betonu a zeminy, která je pod objektem, je možné využívat jako akumulátor chladu nebo tepla. V zimním období tepelné čerpadlo vychlazuje systém pilot a tím

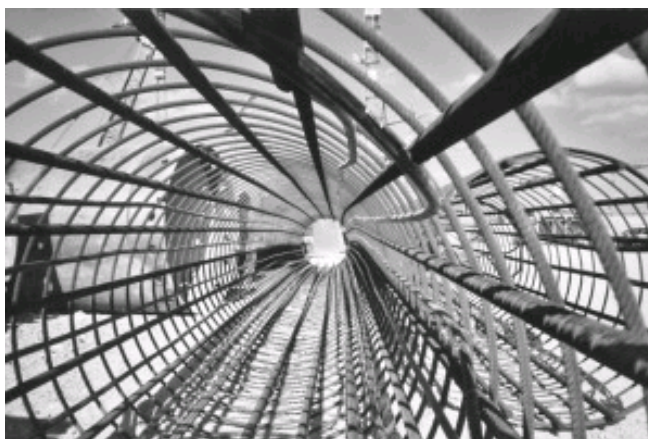
získává potřebné teplo pro vytápění objektu. Naopak je tomu v letním období, kdy se uložený chlad využívá na chlazení objektu. Uložený chlad je možno využívat bez použití tepelného čerpadla. Pokud vyřadíme práci kompresorů a použijeme pouze oběhová čerpadla, je možné, aby uložený chlad cirkuloval z energetických pilot přímo do otopného systému. Pokud takto využíváme zemní teploty a nevyužíváme tepelné čerpadlo, je tento systém nazýván jako „free cooling“. Spotřeba elektrické energie oběhových čerpadel je minimální a v porovnání s výkonem chlazení, které nám energetický systém pilot umožňuje, můžeme říci, že je z ekonomického hlediska velmi výhodný. Pokud dojde v průběhu léta k vyčerpání chladu, musíme do systému zapojit tepelné čerpadlo, které samozřejmě zvýší náklady na provoz. Systém energetických pilot je možné využívat pouze v případě, že budeme provozovat vytápění i chlazení daného objektu. Základy budovy nejsou ovlivňovány přímým nebo nepřímým slunečním zářením jako v případě horizontálních výměníků tepla. Jejich tepelná kapacita je omezená a můžeme ji snadno vyčerpat. Pokud se bude jednat o lokalitu, kde je pohyb spodní vody, je možné energii čerpat bez omezení. Kombinace silně zvodněného a štěrkového podloží s pohybem vod zaručuje neomezený přísun energie. V opačném případě další energie již nepřichází. [23]

2.8.1 Konstrukce energetických pilot

Konstrukce pilotů (obr. 12) je vytvořena pomocí ocelové armatury, na kterou je navinuto potrubí ve smyčce, v níž obíhá nemrznoucí kapalina. Meziprostor mezi armaturou a potrubní smyčkou je vyplněn betonem. Jednotlivé smyčky potrubí jsou vedeny základy energetických pilot až do technické místnosti, kde se spojují v rozdělovačích a sběračích. Dále je pak chladící médium vedeno hlavním potrubním rozvodem až do tepelného čerpadla. Jako materiál potrubí se používá vysokohustotní polyethylen se zvýšenou odolností dimenze 25 x 2,3 mm. Při navrhování a montáži tohoto zařízení je snaha dosáhnout co nejnížší tlakové ztráty, je tedy navržen s minimálním nárokem práce oběhových čerpadel celého systému. [23]

Pro správný návrh systému energetických pilot je nutné znát počet, průměr a délky jednotlivých pilot v základech budovy, druh použitého betonu na vylití pilot a také geologické poměry. Velmi důležitou skutečností je to, že v zimním období nesmí docházet k promrzání základů budovy. Povolená teplotní hranice je $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nižší teplota by mohla u stavby způsobit veliké problémy. [23]

Obr. 12 *Konstrukce energetického pilotu [23]*



3. Cíl práce

Cílem práce bylo analyzovat změny teplot a jejich rozdělení v zemním masivu v oblasti horizontálního tepelného výměníku a výměníku typu Slink. Dále pak porovnat teploty masivu v blízkosti kolektoru a na referenčním pozemku.

4. Postupy a metody měření

4.1 Teoretický rozbor

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

Rovnici pro celkový měrný tepelný tok v zemním masivu lze zapsat ve tvaru:[1,8]

$$q_{\tau, t} = q_{\tau, \lambda} + q_{\tau, \alpha, w} + q_{\tau, \alpha, v} + q_{\tau, r} + q_{\tau, lat} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (8)$$

Kde:

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

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

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

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

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

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

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

$$q_{\tau, \lambda} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (9)$$

Kde:

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

T – termodynamická teplota [K];

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

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

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

Kde:

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

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

τ – čas [s].

Dosazením rovnice (9) do rovnice (10) dostaneme:

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

Předpokládáme-li konstantní λ a $\rho \cdot c_p$, můžeme rovnici (11) upravit do tvaru:

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

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

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (13)$$

Zavedeme-li součinitel teplotní vodivosti:

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

Pak:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \operatorname{div} \operatorname{grad} T = a \Delta T \quad [\text{K} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (14)$$

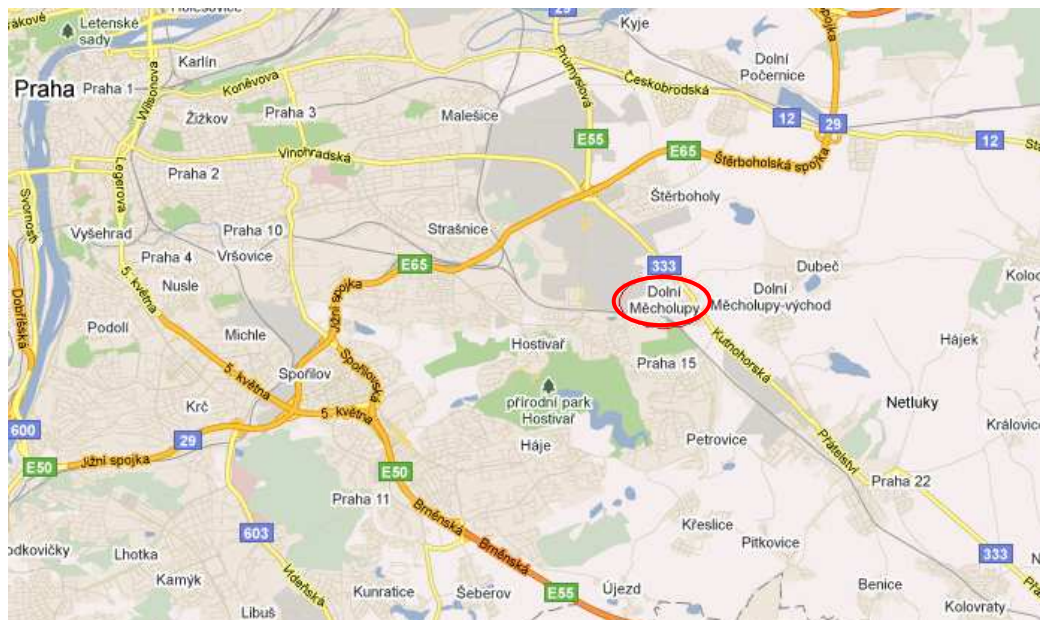
Jestliže v daném kontrolním objemu je zdroj tepla $q_{\tau, i}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], pak základní rovnice kondukce tepla má tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \Delta T + \frac{q_{\tau, i}}{\rho \cdot c} \quad [\text{K} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (15)$$

4.2 Metody měření

Lokalita měření a ověřování výsledků se nachází na pozemku společnosti VESKOM s.r.o., okres Hlavního města Praha (obr. 13) v katastrálním území Dolní Měcholupy (ulice Dolnoměcholupská 522/12a) v nadmořské výšce 258 m. V této oblasti se uvažuje výpočtová venkovní teplota $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota v otopném období $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Obr. 13 Situační mapa místa měření



Horizontální tepelný výměník je v zemním masivu tvořen polyetylenovými trubkami (průměru 40 mm, tloušťky stěny trubky 3,7 mm a celkové délky 368 m) a výměník typu Slink trubkami stejného materiálu (průměru 32 mm, tloušťky stěny trubky

2,9 mm a celkové délky 200 m). Zemní výměníky jsou určeny jako zdroj tepla pro výparníky celkem třech tepelných čerpadel, které slouží pro vytápění a ohřev teplé vody v administrativní budově s užitnou plochou 1 480 m². Dvě tepelná čerpadla jsou stejného typu a provedení o výkonu 17 kW a jedno tepelné čerpadlo o výkonu 15 kW. Pracovní médium jednotek je chladivo R 407 C.

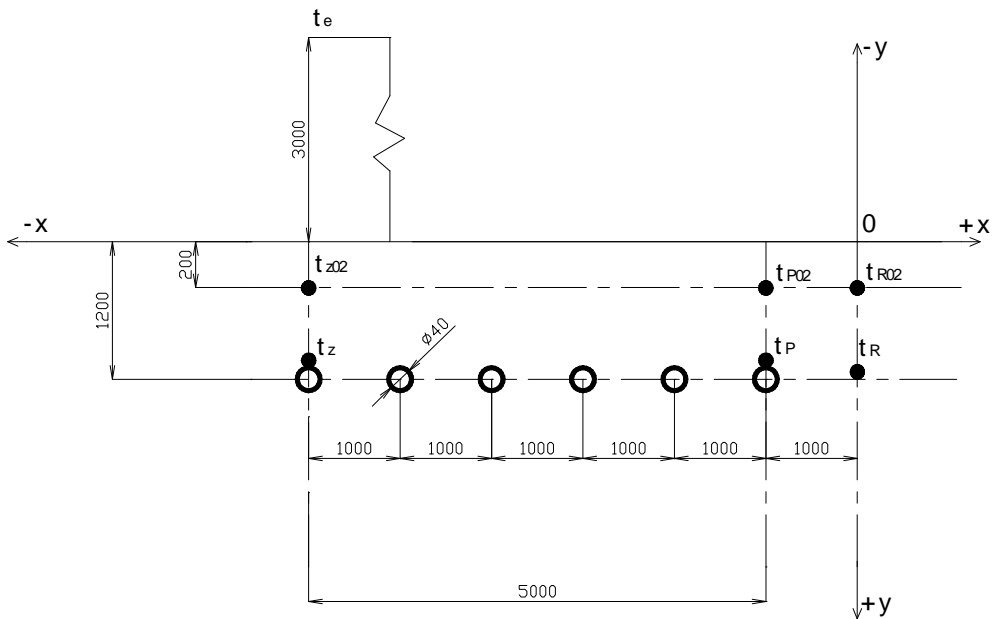
Teploty zemního masivu byly měřeny odporovými čidly typu Pt 1000/A, určené pro sledování teplot půdy a odečítány z displeje na venkovním rozvaděči, který je umístěn na referenčním pozemku. Ve vzdálenosti cca 6 m od uložení horizontálního výměníku tepla je proveden hloubkový vrt. Další hloubkový vrt je umístěn ve vzdálenosti cca 18 m od výměníku typu Slink. Tyto vrty slouží jako další zdroj tepla pro tepelná čerpadla. U těchto vrtů byl proveden geologický průzkum, který ukazuje na následující složení půdního masivu v oblasti uložení tepelných výměníků (tab.3).

Tab. 3 *Geologický popis půdního masivu [13]*

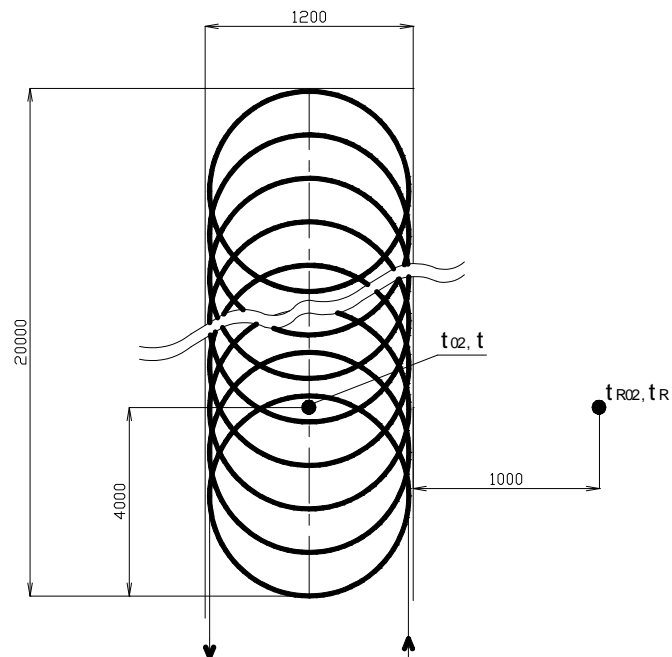
| hloubka zkoumání (m) | oblast uložení | |
|-------------------------|--|---|
| | Výměník typu Slink | Horizontální tepelný výměník |
| 1 | Navážka, tmavě hnědý, hlinito-písčité štěrky, obsahuje úlomky cihel a stavební suti. | Navážka, hrubozrný štěrky, kamenná drť, úlomky cihel. |
| 2 | Navážka, tmavě hnědá, písčito-jílovitá hlína, bez štěrkové příměsi. | |
| 3,5 | | |

Jednotlivá místa měření jsou specifikována na (obr. 14 až 17). Teplota vzduchu t_e byla měřena mimo ověřovací pozemek pomocí teplotního čidla KTY 81.210, které bylo umístěno na fasádě budovy ve výšce 3 m nad povrchem půdy.

Obr. 15 Řez půdním masivem u horizontálního tepelného výměníku

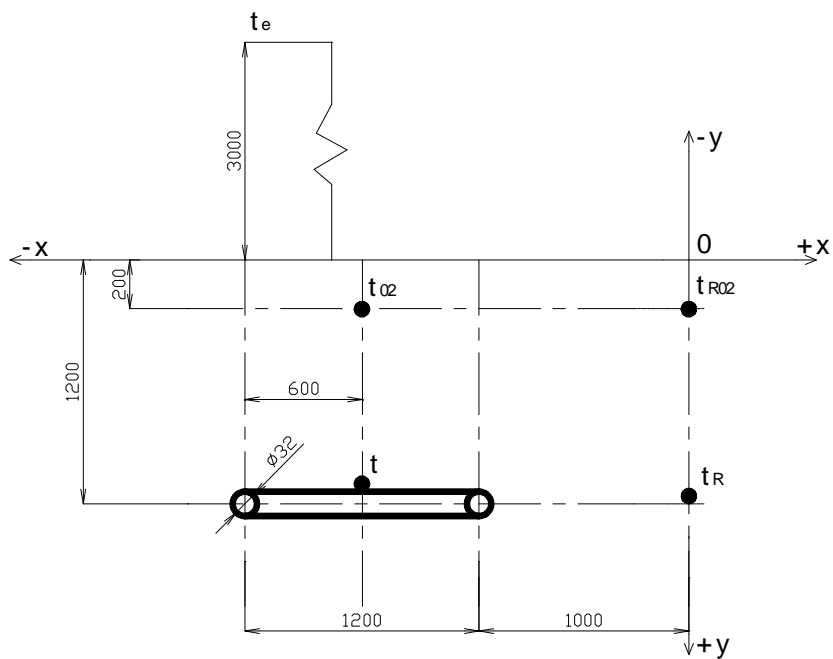


Obr. 16 Půdorysný pohled na výměník typu Slink



- t_{02} – teplotní čidlo instalované nad přívodním potrubím v hloubce 0,2 m pod povrchem;
- t – teplotní čidlo instalované v oblasti potrubí v hloubce 1,2 m pod povrchem;
- t_{R02} – teplotní čidlo instalované 1 m od výměníku Slink v hloubce 0,2 m pod povrchem;
- t_R – teplotní čidlo instalované 1 m od výměníku Slinku v hloubce 1,2 m pod povrchem;
- t_e – teplotní čidlo venkovního vzduchu.

Obr. 17 Řez půdním masivem u výměníku typu Slink



Před vlastním měřením byly zemní výměníky spolu s tepelnými čerpadly v provozu od roku 2008. Měření probíhalo od června 2010 do února 2011 a to vždy nejméně třikrát do měsíce.

5. Dosažené výsledky a diskuze

5.1 Horizontální zemní výměník

Hodnoty naměřených teplot zemního masivu v jednotlivých hloubkách na ověřovacím pozemku jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Teploty v zemním masivu s horizontálním výměníkem

| rok | měsíc | týden | měřené dny | čidla teploty Pt 1000/A | | | | | | venkovní vzduch | |
|----------|----------|-------|------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|--|
| | | | | t _{p02} [°C] | t _z [°C] | t _{R02} [°C] | t _R [°C] | t _{z02} [°C] | t _p [°C] | t _e [°C] | |
| 2010 | červen | 23 | 7.6 | 17,5 | 11,4 | 16,9 | 11,8 | 15,7 | 11,8 | 29 | |
| | | 25 | 21.6 | 16,4 | 13,5 | 16,9 | 14,1 | 16,8 | 14 | 23,6 | |
| | | 26 | 28.6 | 20 | 13,9 | 19,9 | 14,4 | 18,6 | 14,3 | 26,2 | |
| | červenec | 28 | 15.7 | 24,1 | 16 | 23,4 | 16,6 | 22,6 | 16,5 | 34,8 | |
| | | 29 | 19.7 | 21,1 | 16,5 | 21,8 | 17,2 | 21,8 | 17,1 | 26,1 | |
| | | 30 | 26.7 | 18,9 | 17,3 | 19,9 | 18 | 19,9 | 17,7 | 25,8 | |
| | srpen | 31 | 2.8 | 21,4 | 17,2 | 21,2 | 17,6 | 20,3 | 17,5 | 32,7 | |
| | | 32 | 9.8 | 19,6 | 17,3 | 19,8 | 17,8 | 19,4 | 17,9 | 22 | |
| | | 33 | 16.8 | 20,8 | 17,4 | 21 | 17,8 | 20,4 | 17,8 | 26,5 | |
| | | 34 | 23.8 | 21,1 | 17,2 | 20,8 | 17,6 | 20 | 17,6 | 30,4 | |
| | | 35 | 30.8 | 17,2 | 17,3 | 18,1 | 17,7 | 18,3 | 17,7 | 16,9 | |
| | září | 36 | 6.9 | 15,9 | 16,8 | 16,7 | 17 | 16,9 | 17,1 | 21 | |
| | | 37 | 13.9 | 16,3 | 16,2 | 16,8 | 16,4 | 16,6 | 16,5 | 19,7 | |
| | | 38 | 20.9 | 13,7 | 15,9 | 14,6 | 16 | 15 | 16,1 | 22,4 | |
| | | 39 | 27.9 | 13,6 | 15,4 | 14,4 | 15,5 | 14,7 | 15,5 | 12,4 | |
| | říjen | 40 | 4.10 | 12,2 | 14,7 | 12,7 | 14,6 | 12,9 | 14,6 | 13,9 | |
| | | 41 | 11.10 | 10,6 | 14,2 | 11,9 | 14,2 | 12,4 | 14,3 | 14,7 | |
| | | 42 | 19.10 | 9,4 | 13,4 | 10,3 | 13,2 | 10,7 | 13,2 | 12,1 | |
| | | 43 | 25.10 | 8 | 12,7 | 8,9 | 12,5 | 9,4 | 12,6 | 10,1 | |
| | listopad | 44 | 1.11 | 6,6 | 11,9 | 7,6 | 11,7 | 8,1 | 11,7 | 15,5 | |
| | | 45 | 8.11 | 9,2 | 11,3 | 9,7 | 11,1 | 9,8 | 11,1 | 7,3 | |
| 46 | | 16.11 | 8,7 | 11 | 9,1 | 10,8 | 9,1 | 10,8 | 8,5 | | |
| 47 | | 22.11 | 6,9 | 10,8 | 7,4 | 10,6 | 7,9 | 10,5 | 10,6 | | |
| 48 | | 29.11 | 3,6 | 9,6 | 4,4 | 9,3 | 5,1 | 9,3 | 1,5 | | |
| prosinec | 49 | 10.12 | 2,9 | 8,7 | 3,5 | 8,3 | 4,3 | 8,3 | 1 | | |
| | 50 | 17.12 | 2,3 | 7,9 | 3 | 7,4 | 3,4 | 7,3 | -2,4 | | |
| | 51 | 21.12 | 2,3 | 7,5 | 2,9 | 7,1 | 3,3 | 6,9 | 3 | | |
| 2011 | leden | 1 | 3.1 | 1,6 | 6,6 | 2,2 | 6,2 | 2,5 | 6 | 2,4 | |
| | | 2 | 11.1 | 1,3 | 5,9 | 1,9 | 5,5 | 1,9 | 5 | 4,7 | |
| | | 3 | 19.1 | 3,1 | 5,7 | 3,5 | 5,5 | 3,3 | 5,1 | 4,4 | |
| | | 4 | 27.1 | 1,4 | 5,7 | 2 | 5,4 | 2,2 | 5,1 | 2,7 | |
| | únor | 5 | 2.2 | 0,6 | 5,4 | 1,3 | 5,1 | 1,6 | 4,8 | 2,6 | |
| | | 6 | 9.2 | 1,5 | 5 | 2,1 | 4,7 | 1,9 | 4,4 | 8,5 | |
| | | 7 | 17.2 | 1,3 | 5 | 1,9 | 4,7 | 2 | 4,4 | 5,2 | |
| | | 8 | 24.2 | 0,3 | 4,8 | 1,1 | 4,5 | 1,4 | 4,3 | 2,1 | |

Průběh teplot zemního masivu na (obr. 18) potvrzuje, že výměník byl v topné sezóně 2010/2011 uveden do provozu 30. 8. 2010. Teplota venkovního vzduchu mezi 14. h a 15. h byla $t_e = 16,9$ °C. V této době dochází ke změně poměru naměřených teplot v hloubkách 0,2 m (t_{P02} , t_{Z02} , t_{R02}) a 1,2 m (t_P , t_Z , t_R). Do tohoto data byly teploty v hloubkách 0,2 m vyšší než v hloubkách 1,2 m. V dalším období, až do konce měření, tomu bylo naopak. Tato změna byla ovlivněna poklesem venkovní teploty t_e .

Mimo topné období kopírují teploty zemního masivu v hloubce 0,2 m průběh teploty okolního vzduchu t_e . Teploty v hloubkách 1,2 m se mimo otopné období zvyšují. Ve sledovaném období od 7. 6. 2010 do 30. 8. 2010 stoupaly na ověřovacím pozemku s horizontálním výměníkem z 11,4 °C na 17,7 °C. Nárůst teploty zemního masivu na ověřovacím pozemku lze na základě naměřených teplot vyjádřit rovnicí:

$$t_p = -0,1105n^2 + 1,8495n + 10,34 \quad (R^2 = 0,9664) \quad [^\circ\text{C}] \quad (16)$$

V rovnici je:

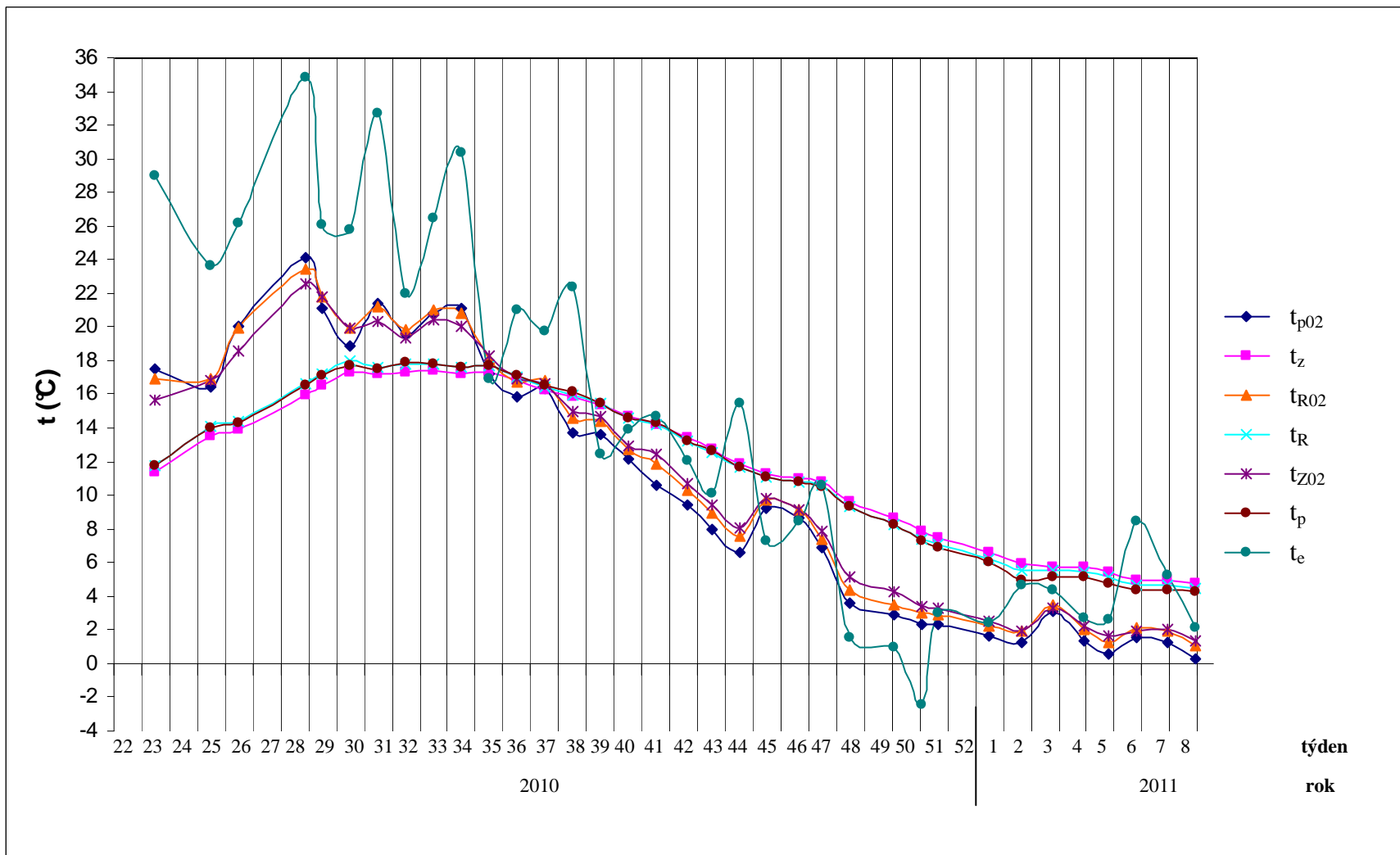
t_p – teplota zemního masivu v hloubce 1,2 m na ověřovacím pozemku se zemním výměníkem mimo topné období [°C];

n – pořadí týdnů od 7. 6. 2010 do 31. 8. 2010 [-].

Na teplotním čidle umístěném 1 m od krajní trubky horizontálního výměníku v hloubce 1,2 m byla na začátku ověřování 7. 6. 2010 naměřena teplota $t_R = 11,8$ °C a na konci 30. 8. 2010 pak $t_R = 17,7$ °C. Výsledky měření před začátkem topného období naznačují, že zemní masiv se v oblasti výměníku v průběhu letního období ohřívá na přibližně stejnou teplotu, jaká je ve stejné hloubce mimo tento pozemek. Ke stejnému závěru dospěli autoři [3]. Při ověřování obdobného horizontálního zemního výměníku s roztečí trubek 1,5 m naměřili v kritickém období topné sezóny v prosinci až únoru rozdíly teplot v hloubce 1 m na ověřovacím a referenčním pozemku 2,79 – 3,80 K.

Po skončení topného období se postupně v červenci až září rozdíl teplot snižoval a před začátkem další topné sezóny činil pouze 1,35 K. Do dalšího topného období tedy vstupuje energetický systém s tepelným čerpadlem se zanedbatelným deficitem tepelného obsahu v zemním masivu.

Obr. 18 Průběh teplot v zemním masivu s horizontálním výměníkem



Trend snižování teploty zemního masivu v hloubkách 1,2 m v topném období je v podstatě shodný na pozemku se zemním výměníkem i ve vzdálenosti 1 m od tohoto pozemku. V úseku sledovaného topného období, tj. 30. 8. 2010 do 24. 2. 2011, klesla teplota na pozemku se zemním výměníkem z teploty 17,7 °C na 4,3 °C. Pokles teploty zemního masivu na ověřovacím pozemku lze na základě naměřených teplot vyjádřit rovnicí:

$$t_p = 0,008n^2 - 0,841n + 19,17 \quad (R^2 = 0,987) \quad [^\circ\text{C}] \quad (17)$$

V rovnici je:

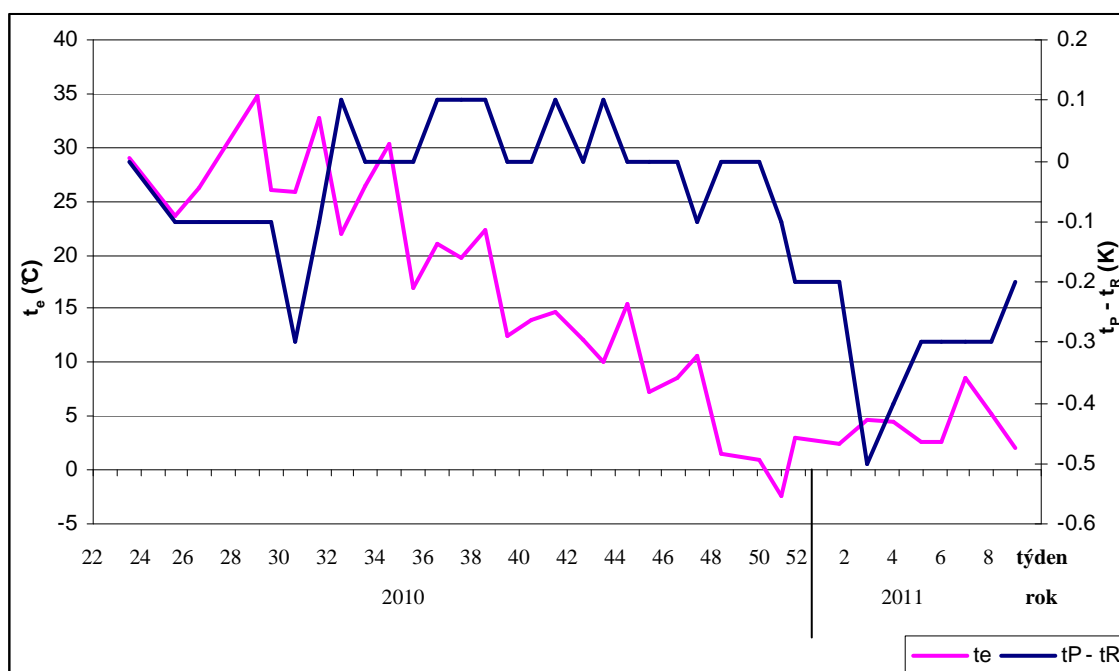
t_p – teplota zemního masivu v hloubce 1,2 m na ověřovacím pozemku se zemním výměníkem v topném období [°C];

n – pořadí týdnů topného období od 31. 8. 2010 do 24. 2. 2011 [-].

Z výsledků ověřování vyplývá, že pokles teploty t_p není ovlivněn změnami teploty okolního prostředí. V průměru teplota t_p klesá o 0,0753 K za 1 den. Dosazením do rovnice (17) můžeme vypočítat, že na konci topného období 1. 5. 2011, po 35 týdnech provozu topného systému, bude v oblasti horizontálního zemního výměníku v hloubce 1,2 m teplota $t_p = -0,5^\circ\text{C}$. Autoři [2] uvádějí, že u horizontálního výměníku uloženého v hloubce 1 m s roztečí trubek 1,5 m na konci topného období v oblasti výměníku naměřili teplotu $-0,8^\circ\text{C}$.

Na teplotním čidle umístěném 1 m od krajní trubky horizontálního výměníku klesala teplota t_R v zemním masivu v hloubce 1,2 m z teploty 17,7 °C na 4,5 °C. Přibližně stejný pokles teplot t_R a t_p , t_Z znamená, že teplota t_R je ovlivněna odvodem tepla zemním výměníkem, protože je od potrubí výměníku vzdáleno pouze 1 m. Tento názor podporuje i průběh rozdílu teplot $t_p - t_R$ zemního masivu v hloubce 1,2 m znázorněný na (obr. 19).

Obr. 19 Rozdíl teplot $t_P - t_R$ zemního masivu v hloubce 1,2 m na pozemku s horizontálním výměníkem.

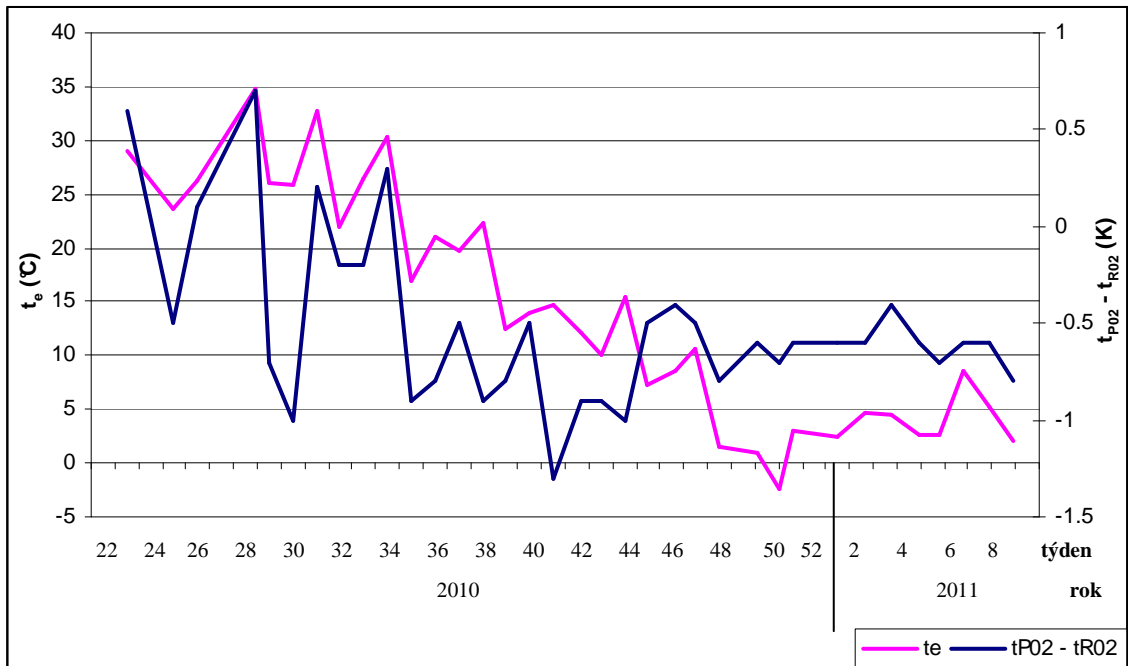


V dalším ověřování horizontálního výměníku předpokládáme sledovat rozdíly teplot zemního masivu na ověřovacím pozemku a na referenčním pozemku. Teplotní čidla na referenčním pozemku musí být instalována v dostatečné vzdálenosti (min. 5 m) od ověřovacího pozemku.

Rozdíl teplot $t_P - t_R$ je od počátku topného období až do 1. 11. 2010 větší nebo roven 0. Pohybuje se v rozmezí 0,0 K až 0,1 K. Dále pak až do konce sledovaného úseku topného období platí $t_P - t_R \leq 0$. Rozdíl teplot se pohybuje v rozmezí 0,0 K až -0,5 K. Lze tedy konstatovat, že naměřené difference teplot $t_P - t_R$ se pohybují v rozsahu přesnosti měření teploty.

Na obr. 20 jsou znázorněny rozdíly teplot zemního masivu v hloubce 0,2 m na ověřovacím (t_{P02}) pozemku a ve vzdálenosti 1m od krajní trubky horizontálního výměníku (t_{R02}).

Obr. 20 Rozdíl teplot $t_{P02} - t_{R02}$ zemního masivu v hloubce 0,2 m na pozemku s horizontálním výměníkem



Mimo topné období činily rozdíly teplot $t_{P02} - t_{R02}$ 0,7 až -1,0 K. V topném období pak -0,4 K až -1,3 K. Rozdíl teplot $t_{P02} - t_{R02}$ lze tedy považovat za nevýznamný.

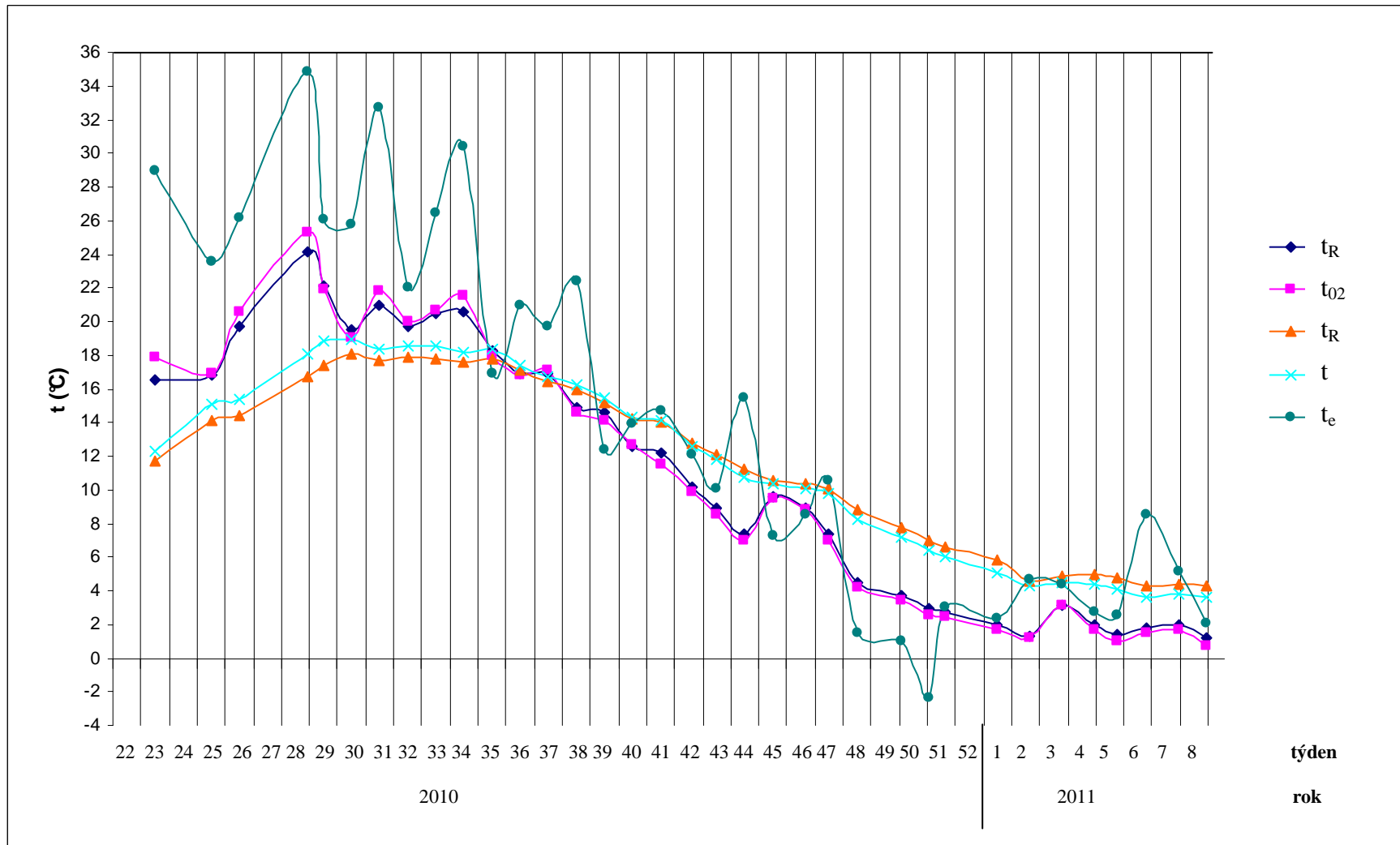
5.2 Zemní výměník typu Slink

Hodnoty naměřených teplot zemního masivu v jednotlivých hloubkách na ověřovacím pozemku jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Teploty v zemním masivu s výměníkem typu Slink

| rok | měsíc | týden | měřené dny | čidla teploty Pt 1000/A | | | | venkovní vzduch |
|----------|----------|-------|------------|-------------------------|----------------------|---------------------|-------|---------------------|
| | | | | t _{RO2} [°C] | t _{O2} [°C] | t _R [°C] | t[°C] | t _e [°C] |
| 2010 | červen | 23 | 7.6 | 16,5 | 17,9 | 11,7 | 12,3 | 29 |
| | | 25 | 21.6 | 16,8 | 16,9 | 14,1 | 15,1 | 23,6 |
| | | 26 | 28.6 | 19,7 | 20,6 | 14,4 | 15,4 | 26,2 |
| | červenec | 28 | 15.7 | 24,1 | 25,3 | 16,7 | 18,1 | 34,8 |
| | | 29 | 19.7 | 22,1 | 21,9 | 17,4 | 18,8 | 26,1 |
| | | 30 | 26.7 | 19,5 | 19 | 18,1 | 18,9 | 25,8 |
| | srpen | 31 | 2.8 | 21 | 21,8 | 17,7 | 18,4 | 32,7 |
| | | 32 | 9.8 | 19,7 | 20 | 17,9 | 18,6 | 22 |
| | | 33 | 16.8 | 20,5 | 20,7 | 17,8 | 18,6 | 26,5 |
| | | 34 | 23.8 | 20,6 | 21,5 | 17,6 | 18,2 | 30,4 |
| | | 35 | 30.8 | 18,3 | 18 | 17,8 | 18,4 | 16,9 |
| | září | 36 | 6.9 | 16,9 | 16,8 | 17,1 | 17,4 | 21 |
| | | 37 | 13.9 | 16,9 | 17,1 | 16,4 | 16,7 | 19,7 |
| | | 38 | 20.9 | 14,9 | 14,6 | 16 | 16,2 | 22,4 |
| | | 39 | 27.9 | 14,6 | 14,1 | 15,2 | 15,5 | 12,4 |
| | říjen | 40 | 4.10 | 12,6 | 12,7 | 14,2 | 14,3 | 13,9 |
| | | 41 | 11.10 | 12,2 | 11,5 | 14 | 14,1 | 14,7 |
| | | 42 | 19.10 | 10,2 | 9,9 | 12,8 | 12,6 | 12,1 |
| | | 43 | 25.10 | 8,9 | 8,5 | 12,1 | 11,8 | 10,1 |
| | listopad | 44 | 1.11 | 7,4 | 7 | 11,2 | 10,7 | 15,5 |
| | | 45 | 8.11 | 9,6 | 9,5 | 10,6 | 10,4 | 7,3 |
| 46 | | 16.11 | 8,9 | 8,8 | 10,4 | 10,1 | 8,5 | |
| 47 | | 22.11 | 7,4 | 7 | 10,1 | 9,8 | 10,6 | |
| 48 | | 29.11 | 4,5 | 4,2 | 8,8 | 8,2 | 1,5 | |
| prosinec | 49 | 10.12 | 3,7 | 3,4 | 7,8 | 7,2 | 1 | |
| | 50 | 17.12 | 2,9 | 2,6 | 7 | 6,4 | -2,4 | |
| | 51 | 21.12 | 2,7 | 2,5 | 6,6 | 6 | 3 | |
| 2011 | leden | 1 | 3.1 | 2 | 1,7 | 5,8 | 5,1 | 2,4 |
| | | 2 | 11.1 | 1,3 | 1,2 | 4,6 | 4,3 | 4,7 |
| | | 3 | 19.1 | 3,1 | 3,1 | 4,9 | 4,5 | 4,4 |
| | | 4 | 27.1 | 2 | 1,7 | 5 | 4,4 | 2,7 |
| | únor | 5 | 2.2 | 1,4 | 1 | 4,8 | 4,1 | 2,6 |
| | | 6 | 9.2 | 1,8 | 1,5 | 4,3 | 3,6 | 8,5 |
| | | 7 | 17.2 | 2 | 1,7 | 4,4 | 3,8 | 5,2 |
| | | 8 | 24.2 | 1,2 | 0,7 | 4,3 | 3,6 | 2,1 |

Obr. 21 Průběh teplot zemního masivu s výměníkem typu Slink



Průběh teplot zemního masivu na obr. 21 potvrzuje, že výměník byl v topné sezóně 2010/2011 uveden do provozu 30. 8. 2010. Teplota venkovního vzduchu mezi 14. h a 15. h byla $t_e = 16,9$ °C. Mimo topnou sezónu jsou opět teploty zemního masivu v hloubce 0,2 m (t_{02} , t_{R02}) vyšší než teploty v hloubkách 1,2 m (t , t_R). V dalším období, až do konce měření, tomu bylo opět naopak. Tato změna byla ovlivněna poklesem venkovní teploty t_e .

Mimo topné období teploty zemního masivu v hloubce 0,2 m rovněž jako u horizontálního výměníku kopírují průběh teploty okolního vzduchu t_e .

Teploty zemního masivu v hloubkách 1,2 m se mimo topné období postupně zvyšovaly. Ve sledovaném období od 7. 6. 2010 do 30. 8. 2010 stoupaly v oblasti zemního výměníku z teploty 12,3 °C až na 18,4 °C. Nárůst teploty zemního masivu na ověřovacím pozemku lze na základě naměřených teplot vyjádřit rovnicí:

$$t_p = -0,1372n^2 + 2,1289n + 10,882 \quad (R^2 = 0,9185) \quad [^\circ\text{C}] \quad (18)$$

V rovnici je:

t_p – teplota zemního masivu v hloubce 1,2 m na ověřovacím pozemku se zemním výměníkem mimo topné období [°C];

n – pořadí týdnů od 7. 6. 2010 do 31. 8. 2010 [-].

Na teplotním čidle umístěném 1 m od trubek výměníku v hloubce 1,2 m byla z počátku měření teplota 11,7 °C a na počátku topného období 17,8 °C. Výsledky měření mimo topné období opět naznačují, že zemní masiv se v oblasti zemního výměníku v průběhu letního období ohřeje na přibližně stejnou teplotu, jaká je mimo tento pozemek.

Naměřený trend snižování teploty zemního masivu v hloubkách 1,2 m je v průběhu topného období v podstatě shodný na pozemku s výměníkem i 1 m od trubek výměníku. V úseku sledovaného topného období (30. 8. 2010 – 24. 2. 2011) klesala teplota na pozemku s výměníkem z teploty 18,4 °C na 3,6 °C. Pokles teploty zemního masivu na ověřovacím pozemku lze na základě naměřených teplot vyjádřit rovnicí:

$$t_p = 0,014n^2 - 1,050n + 19,95 \quad (R^2 = 0,99) \quad [^\circ\text{C}] \quad (19)$$

V rovnici je:

t_p – teplota zemního masivu v hloubce 1,2 m na ověřovacím pozemku se zemním výměníkem v topném období [°C];

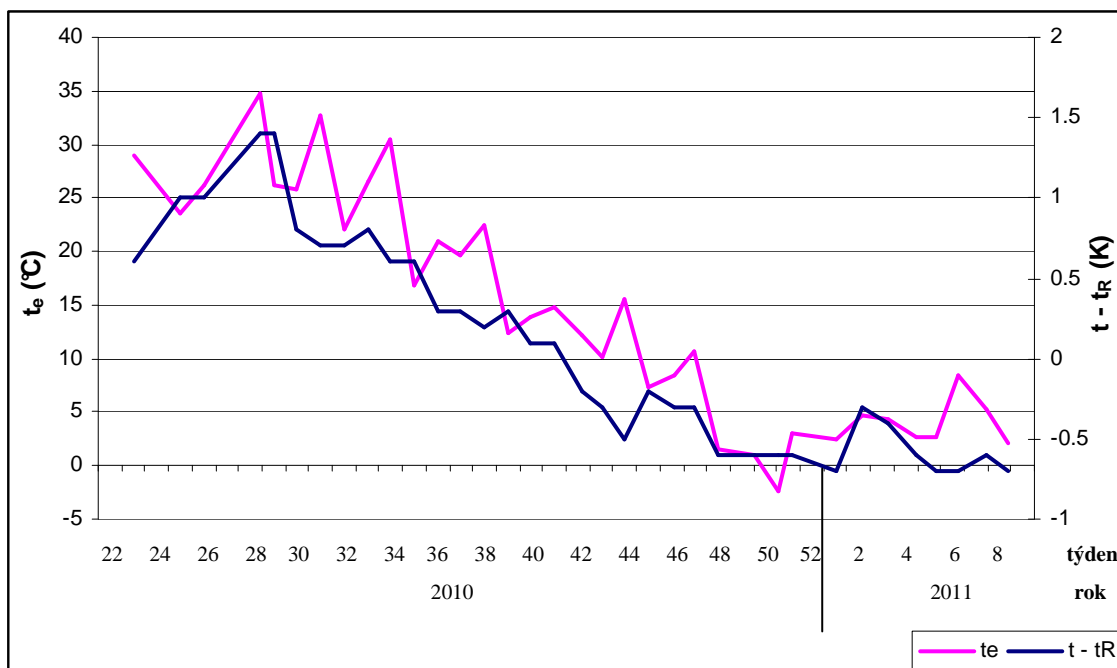
n – pořadí týdnů topného období od 31. 8. 2010 do 24. 2. 2011 [-].

Teplota zemního masivu t v hloubce 1,2 m klesá na pozemku s výměníkem typu Slink v průměru o 0,0831 K za 1 den. Dosazením do rovnice (19) můžeme vypočítat, že na konci topného období 1. 5. 2011, po 35 týdnech provozu topného systému, bude v oblasti výměníku v hloubce 1,2 m teplota $t = 0,35$ °C.

Na teplotním čidle umístěném 1 m od trubek výměníku klesala teplota zemního masivu v hloubce 1,2 m z teploty 17,8 °C na 4,3 °C. Opět je zde reálný předpoklad, že teplota zemního masivu ve vzdálenosti 1 m od výměníku je ovlivňována odváděním tepla výměníkem z ověřovacího pozemku.

Průběh rozdílu teplot $t - t_R$ zemního masivu v hloubce 1 m na ověřovacím pozemku s výměníkem typu Slink je znázorněn na obr. 22.

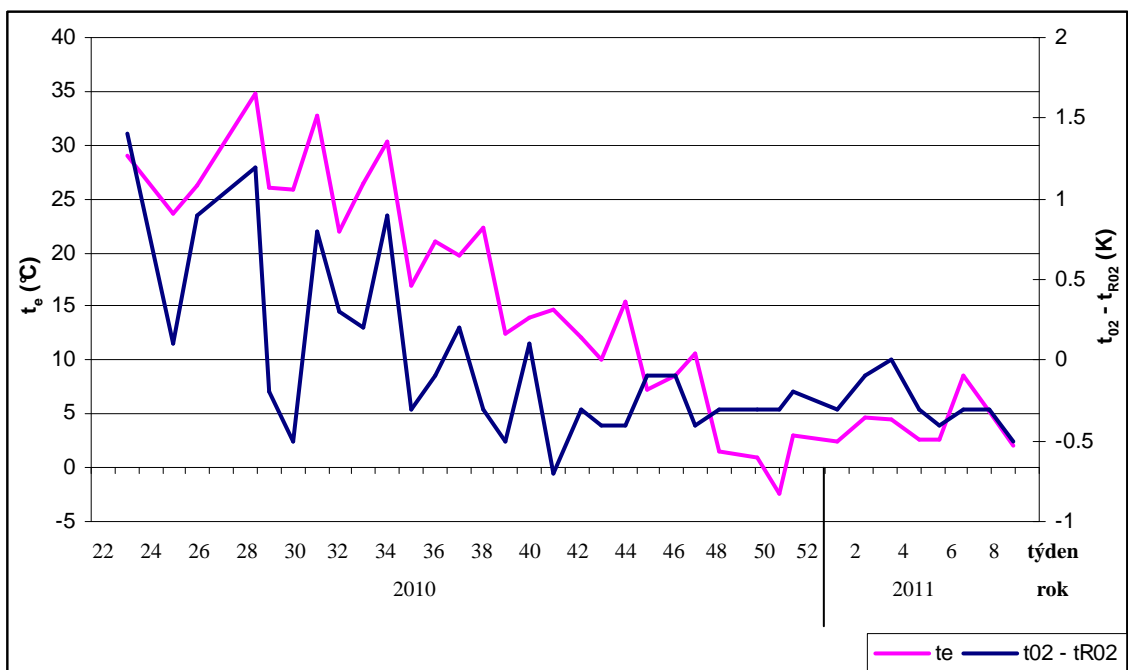
Obr. 22 Rozdíl teplot $t - t_R$ zemního masivu v hloubce 1,2 m na pozemku s výměníkem typu Slink



Teplota (t) na ověřovacím pozemku je od počátku topného období až do 15. 10. 2010 vyšší než teplota (t_R). Rozdíl teplot $t - t_R$ se pohybuje v rozmezí 0,0 až 0,3 K. Dále pak až do konce sledovaného úseku topného období platí $t - t_R < 0$. Rozdíl $t - t_R$ se pohybuje v rozmezí -0,2 až -0,7 K.

Na obr. 23 jsou znázorněny rozdíly teplot $t_{02} - t_{R02}$ zemního masivu v hloubce 0,2 m na ověřovacím pozemku.

Obr. 23 Rozdíl teplot $t_{02} - t_{R02}$ zemního masivu v hloubce 0,2 m na pozemku s výměníkem typu Slink



Mimo topné období rozdíly teploty $t_{02} - t_{R02}$ kopírují průběh venkovní teploty. Nabývají hodnot -0,5 až 1,4 K. V otopném období činí rozdíl $t_{02} - t_{R02}$ 0,0 K až -0,7 K.

6. Závěr

Výsledky sledování teplot půdního masivu v oblasti horizontálního tepelného výměníku ukazují, že nárůst teplot zemního masivu v hloubce 1,2 m mimo topné období probíhá podle rovnice (16). Pokles teploty zemního masivu ve stejné hloubce v topném období podle rovnice (17). V průměru teplota klesala v oblasti výměníku o 0,0753 K za den. Výsledky měření před počátkem topného období ukazují, že zemní masiv v oblasti výměníku se v průběhu letního období ohřívá na přibližně stejnou teplotu, jaká je ve stejné hloubce mimo tento pozemek. Naměřené difference rozdílů teplot zemního masivu v hloubce 1,2 m v oblasti horizontálního výměníku a 1 m od krajní trubky výměníku se v topném období pohybují v rozsahu přesnosti měření teplot.

Výsledky sledování teplot zemního masivu v oblasti výměníku typu Slink ukazují, že nárůst teplot zemního masivu v hloubce 1,2 m mimo topné období probíhá podle rovnice (18). Pokles teploty zemního masivu v topném období ve stejné hloubce je podle rovnice (19). V průměru teplota klesala v oblasti výměníku o 0,0831 K za 1 den. Opět lze reálně předpokládat, že zemní masiv se v oblasti výměníku v průběhu letního období ohřívá na přibližně stejnou teplotu, jaká je ve stejné hloubce mimo tento pozemek. Naměřené difference rozdílů teplot zemního masivu v hloubce 1,2 m v oblasti výměníku a 1 m od krajních trubek výměníku se v topném období pohybují v rozsahu přesnosti měření teplot.

V budoucnu bude potřeba instalovat teplotní senzor ve vzdálenosti minimálně 5 m od trubky výměníku na referenčním pozemku. V průběhu dalšího zkoumání budeme sledovat, s jakým teplotním deficitem vstupuje zemní masiv do následujících po sobě jdoucích topných sezón.

7. Seznam použité literatury

- [1] ADAMOVSKEÝ R., NEUBERGER P., ŒEĎOVÁ M. 2010. Analyzing temperature changes in the ground massif with a horizontal heat exchanger in the course of the heating season. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr 2010/ 11
- [2] ADAMOVSKEÝ R., NEUBERGER P., ŒEĎOVÁ M. Temperature field in ground including horizontal earth-to-liquid heat exchanger. *Media4u Magazine*, 2010, (7): 17 – 20
- [3] ADAMOVSKEÝ R., NEUBERGER P., ŒEĎOVÁ M. Změny teplot půdy v zemním tepelném výměníku. *Media4u Magazine*, 2009, (6): 7 – 9
- [4] BLÁHA M. Jak fungují plošné zemní kolektory pro tepelná čerpadla v praxi. Organizace: Asociace pro využití tepelných čerpadel, [online]. 2009 [cit. 2010-11-10]. Dostupný z <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/5719-jak-funguji-plosne-zemni-kolektory-pro-tepelna-cerpadla-v-praxi>
- [5] BRANDL, H. Energy foundation and other thermo-active ground structures. [s.l.] : [s.n.], 2006. 122 s.
- [6] Český hydrometeorologický ústav, [online]. [cit. 2010-10-22]. Dostupný z <http://www.chmi.cz/>
- [7] ČÍŽEK, Petr. Zemní tepelné výměníky tepelných čerpadel se neobejdou bez podzemní vody [online]. 2005 [cit. 2010-05-21]. Dostupný z WWW: <http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm>.
- [8] DRBAL, J. Melirační pedologie. 2. vyd. Praha, Nakladatelství VŠZ Praha, 1969, 167 s.
- [9] Firemní materiály společnosti EKO VY s.r.o, [online]. [cit. 2011-1-2]. Dostupný z www.ekovy.cz/funkce.htm
- [10] Firemní materiály společnosti GEROTOP spol. s r.o. [online]. [cit. 2010-3-22]. Dostupný z <http://www.gerotop.cz/cz/home/clanek1/>
- [11] Firemní materiály HUMAD s.r.o., [online]. [cit. 2010-12-12]. Dostupný z <http://www.humad.cz/tepelna-cerpadla/>
- [12] Firemní materiály společnosti SOLARENVI a.s, [online]. [cit. 2011-2-2] Dostupný z <http://www.solarencvi.cz/tepelna-cerpadla/typy-tepelnych-cerpadel/zeme-voda-zemni-kolektory/>
- [13] Firemní materiály společnosti VESKOM s.r.o.

- [14] FLORIDES, Goergious, KALOGIROU, Soteris. Ground heat exchangers : A review of systems, models and applications. [s.l.] : [s.n.], 2006. 18 s.
- [15] KARLÍK R., Tepelné čerpadlo pro váš dům. 1. vydání Praha Grada Publishing, a.s., 2009. ISBN 978-80-247-2720-2
- [16] MACH S. Tepelná čerpadla a topné faktory, Organizace: TC MACH, s.r.o. [online]. 2005 [cit. 2010-11-10]. Dostupný z <http://www.tzb-info.cz/2410-tepelna-cerpadla-a-topne-faktory>
- [17] PETRÁŠ, Dušan, et al. Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie. Bratislava: Jaga group, 2008. 207 s. ISBN 978-80-8076-0.
- [18] Planeta: Geotermální energie. Ministerstvo životního prostředí. 2007, roč. XV, č. 4. ISSN 1801-6898.
- [19] RYŠKA J. Brož K. Vrtý do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (V), [online]. 2006 [cit. 2010-6-8]. Dostupný z <http://www.tzb-info.cz/3665-vrty-do-horninoveho-masivu-zdroj-energie-pro-tepelna-cerpadla-v>
- [20] Tepelná čerpadla IVT – Projektční podklady verze 6.1
- [21] TRNOBRANSKÝ, Karel, et al. *Hospodárné využití a výroba energie vedoucí ke snížení zátěže životního prostředí*. [s.l.] : [s.n.], 2005. 140 s. Dostupný z WWW: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/5073.pdf>>.
- [22] TRS M. FAST kolektor - úspora investic a jistota při realizaci plošného kolektoru pro tepelná čerpadla, organizace Gerotop, [online]. 2007 [cit. 2010-6-8]. Dostupný z <http://www.tzb-info.cz/4156-fast-kolektor-uspora-investic-a-jistota-pri-realizaci-plosneho-kolektoru-pro-tepelna-cerpadla>
- [23] TRS M. Využívání stavebních konstrukcí budov pro ukládání energie, organizace Gerotop spol. s.r.o, [online]. 2008 [cit. 2010-9-9]. Dostupný z <http://www.tzb-info.cz/4977-vyuzivani-stavebnich-konstrukci-budov-pro-ukladani-energie>
- [24] TRS M. Zemní plošný kolektor a jeho instalace, organizace Gerotop, [online]. 2009 [cit. 2010-05-15]. Dostupný z <http://www.gerotop.cz/cz/home/zemni-plosny-kolektor/>

8. Seznam obrázků

| | | |
|----------------|--|----|
| Obr. 1 | Princip tepelného čerpadla [9] | 2 |
| Obr. 2 | Tepelné čerpadlo odebírající energii ze vzduchu [21]..... | 9 |
| Obr. 3 | Základní princip zemního přehřevu nebo předchlazení vzduchu v otevřeném systému [14]..... | 11 |
| Obr. 4 | Tepelné čerpadlo využívající studniční vodu [14]..... | 12 |
| Obr. 5 | Provedení zemního horizontálního kolektoru a geotermální vertikální sondy [13]..... | 13 |
| Obr. 6 | Uložení výměníku typu Slink [10]..... | 14 |
| Obr. 7 | Možnosti uložení horizontálního tepelného výměníku [24] | 17 |
| Obr. 8 | Řez výkopem u horizontálního tepelného výměníku s obsypem [15]..... | 19 |
| Obr. 9 | Řez výkopem u horizontálního tepelného výměníku bez obsypu [15]..... | 19 |
| Obr. 10 | Průměrný roční dopad slunečního záření [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$] [6] | 25 |
| Obr. 11 | Vizualizace energetických pilot pod objektem [23] | 26 |
| Obr. 12 | Konstrukce energetického pilotu [23]..... | 28 |
| Obr. 13 | Situační mapa místa měření..... | 31 |
| Obr. 14 | Půdorysný pohled na horizontální tepelný výměník..... | 33 |
| Obr. 15 | Řez půdním masivem u horizontálního tepelného výměníku..... | 34 |
| Obr. 16 | Půdorysný pohled na výměník typu Slink | 34 |
| Obr. 17 | Řez půdním masivem u výměníku typu Slink..... | 35 |
| Obr. 18 | Průběh teplot v zemním masivu s horizontálním výměníkem..... | 38 |
| Obr. 19 | Rozdíl teplot $t_p - t_R$ zemního masivu v hloubce 1,2 m na pozemku s horizontálním výměníkem. | 40 |
| Obr. 20 | Rozdíl teplot $t_{p02} - t_{R02}$ zemního masivu v hloubce 0,2 m na pozemku s horizontálním výměníkem..... | 41 |
| Obr. 21 | Průběh teplot zemního masivu s výměníkem typu Slink..... | 43 |
| Obr. 22 | Rozdíl teplot $t - t_R$ zemního masivu v hloubce 1,2 m na pozemku s výměníkem typu Slink | 45 |
| Obr. 23 | Rozdíl teplot $t_{02} - t_{R02}$ zemního masivu v hloubce 0,2 m na pozemku s výměníkem typu Slink | 46 |

9. Seznam tabulek

| | | |
|---------------|---|----|
| Tab. 1 | Směrné hodnoty pro návrh horizontálního tepelného výměníku [15] | 18 |
| Tab. 2 | Tepelná vodivost zemin a hornin [7] | 22 |
| Tab. 3 | Geologický popis půdního masivu | 32 |
| Tab. 4 | Teploty v zemním masivu s horizontálním výměníkem..... | 36 |
| Tab. 5 | Teploty v zemním masivu s výměníkem typu Slink..... | 42 |