

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Teploty a tepelné toky v horizontálních zemních výměnících

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Radomír Adamovský DrSc.

Autor práce: Bc. Petr Vyskočil

PRAHA 2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Petr Vyskočil

Technologická zařízení staveb

Název práce

Teploty a tepelné toky v horizontálních zemních výměnících.

Název anglicky

Temperatures and heat flows in the horizontal ground heat exchangers.

Cíle práce

Porovnání a analýza teplot a tepelných toků dvou konfigurací nízkoteplotních horizontálních zemních výměníků z hlediska jejich vlivu na provoz tepelných čerpadel.

Metodika

1. Rešerše o současném stavu řešení problematiky v ČR a v zahraničí.
2. Metodika ověřování.
3. Výsledky ověřování.
4. Diskuse a závěr.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

nízkoteplotní zdroj energie; výměník tepla; teplota; tepelný tok; tepelný výkon; zemní masiv; tepelné čerpadlo.

Doporučené zdroje informací

ADAMOVSKEÝ, Daniel, NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKEÝ, Radomír. Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers – The energy source for heat pumps. Energy and Buildings. 2015, 92, 107-115. ISSN 0378-7788.

BANKS, David. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. 2nd ed.; Publisher: John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, West Sussex, United Kingdom of Great Britain, 2012. 510 s. ISBN 978-0-470-67034-7.

BRANDL, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique, 2006, 56, 2, 81 – 122. ISSN 0016-8505.

GUSTAFSSON, Anna-Maria. WESTERLUND, Lares. Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger – Investigation of the borehole thermal resistance, Renewable Energy 36 (2011) 2388–2394. ISSN 1214-7044.

Inflow: tzbinfo-stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online časopis]. 2010 – 2016. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/>. ISSN 1801-4399.

NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKEÝ Radomír, ŠEDOÁ Michaela. Temperatures and heat flow in a soil enclosing a slinky horizontal heat exchanger, Energies. 2014, 7, 972-987. ISSN 1996-1073.

SARBU, Ioan, SEBARCHIEVICI, Calin. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings, Energy and Buildings, 2014, 70, 441– 454. ISSN 0378-7788.

Vytápění, Větrání, Instalace. Odborný recenzovaný časopis Společnosti pro techniku prostředí. ISSN 1210-1389.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2017

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 22. 03. 2018

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Teploty a tepelné toky v horizontálních zemních výměnících vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne

.....

Petr Vyskočil

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mi při tvorbě diplomové práce pomohli. Hlavně bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu prof. Ing. Radomíru Adamovskému DrSc. za cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval.

Abstrakt

Tato práce se zabývá horizontálním tepelným výměníkem uloženým v zemním masivu, který slouží jako zdroj energie pro tepelné čerpadlo. Práce vyhodnocuje naměřené teploty teplotonosné kapaliny ve dvou různých horizontálních výměnících v otopném období 2012/2013, tedy od 17. 9. 2012 do 22. 4. 2013. V první části práce je řešerše o současném stavu řešení problematiky týkající se tepelných čerpadel, kde je popsán princip tepelného čerpadla a typy zemních výměníků. Dále jsou zde konkrétněji popsány horizontální zemní výměníky, způsob a geometrie jejich uložení, materiál potrubí a používané teplotonosné kapaliny. Obsahem druhé části práce už je samotné měření. Zde je vysvětlen cíl práce, metodika měření a zpracování výsledků měření. Zakončením práce je diskuze o naměřených výsledcích a závěr.

Klíčová slova

Nízkoteplotní zdroj energie, výměník tepla, teplota, tepelný tok, zemní masiv, tepelné čerpadlo.

Temperatures and heat flows in the horizontal ground heat exchangers

Abstract

The thesis focuses on horizontal heat exchanger in a ground soil, which works as a heat source for a heat pump. It evaluates the measured temperature of the heat transfer fluid in two different horizontal exchangers in the heating season 2012/2013, from 17th September 2012 to 22th April 2013. The first part of the thesis is a research on the current state of the problem solving concerning heat pumps, where the principle of the heat pump and the types of earth exchanger are described. Next in this part of thesis the horizontal earth exchanger, the method and geometry of its storage, the material of the pipeline and the used heat transfer fluid are described more specifically. The content of the second part of the thesis is the measurement itself. Here the aim of the work, the measurement methodology and the processing of the measurement results themselves are explained. In the end of this work there is the discussion of the measured results and the conclusion.

Keywords

Low-temperature energy source, heat exchanger, temperature, heat flow, soil ground, heat pump

Obsah

Obsah	7
1 Úvod	1
2 Současný stav řešené problematiky	3
2.1 Tepelná čerpadla	3
2.1.1 Princip tepelných čerpadel	3
2.1.2 Realizace tepelných čerpadel v ČR a ve světě	4
2.1.3 Tepelná čerpadla země-voda	5
2.2 Typy zemních výměníků tepla	6
2.2.1 Systémy s otevřenou smyčkou	7
2.2.2 Systémy s uzavřenou smyčkou	8
2.3 Horizontální zemní výměníky	11
2.3.1 Podpovrchový zemní masiv jako zásobník energie	12
2.3.2 Geometrie horizontálních zemních výměníků	16
2.3.3 Hloubka uložení výměníku	18
2.3.4 Způsob uložení	18
2.3.5 Materiál potrubí (smyčky)	21
2.3.6 Teplonosná kapalina	21
3 Cíl práce	26
4 Metodika a měření	26
5 Výsledky a diskuze	29
5.1 Teploty venkovního vzduchu	29
5.2 Lineární výměník	30
5.3 Výměník Slinky	33
5.4 Porovnání tepelných charakteristik Slinky/Lineár	36
5.5 Ověření hypotézy	38

6	Závěr a diskuze.....	40
7	Zdroje	42
8	Seznam obrázků.....	45
9	Seznam tabulek.....	46

1 Úvod

Nedostatek přírodních zdrojů a především jejich vysoká či proměnlivá cena vede ke stále se zvyšující poptávce po obnovitelných zdrojích energie, tedy po zdrojích, které jsou pro zemi nevyčerpatelné, jsou volně dostupné a z hlediska provozních nákladů je můžeme považovat za zcela zdarma.

Jedním z nejčastěji aplikovaných zařízení pro využívání obnovitelných zdrojů energie je tepelné čerpadlo. Tepelná čerpadla využívají jako zdroj nízkopotenciální energie vodu, vzduch a zemní či horninový masiv a tuto energii dokáží transformovat z nižší teplotní hladiny na hladinu vyšší.

V posledních letech se na trhu objevuje stále více firem zabývajících se tepelnými čerpadly a díky takto vzniklé konkurenci a neustálému zdokonalování těchto zařízení se jejich cena neustále snižuje. Výhodou takových zařízení je bezobslužný, ekologický a především úsporný provoz. Provozní náklady tepelných čerpadel totiž zahrnují pouze náklady na elektrickou energii potřebnou pro pohon kompresoru a oběhových čerpadel (respektive ventilátorů v případě využívání vzduchu jako nízkopotenciálního zdroje energie).

Při aplikaci tepelného čerpadla získávajícího nízkopotenciální energii ze vzduchu můžeme nalézt jak mnoho předností, tak i nedostatků. Tato čerpadla jsou v České republice stále oblíbenější díky jejich hlavní výhodě, kterou je nízká počáteční investice a s tím související jednoduchá a rychlá instalace. Nedostatkem je jednoznačně menší úspora energie (kvůli nižšímu sezónnímu topnému faktoru – SPF), možný vznik hluku či vznik námrazy. Naproti tomu využití povrchové a podzemní vody je velice efektivní, avšak v našich geografických podmínkách nejsou tyto aplikace až tolik využívány. Důvodem může být složitá legislativa související s pořízením a provozem takového zařízení nebo omezená dostupnost vodních zdrojů právě v místě, kde bychom tento přírodní zdroj potřebovali.

Nejvýhodnějšími tepelnými zdroji se tedy zdá být zemní či horninový masiv, ze kterého je teplo odebíráno pomocí vertikálních či horizontálních výměníků. Využití hlubinných vrtů a vertikálních výměníků je velice efektivní a výrazně méně náročné

na potřebný prostor, nevýhodou je však vysoká počáteční investice. Horizontální tepelné výměníky tak představují jakýsi kompromis mezi efektivitou a investičními náklady.

Tato práce je zaměřená na horizontální zemní výměníky, které využívají nízkopotenciální teplo podpovrchového zemního masivu. Toto teplo je naakumulováno díky slunečnímu záření a zemní masiv tak slouží jako absorbér této energie, z něhož je pomocí tepelných výměníků zakopaných pod povrchem půdy odebíráno teplo, které je přiváděno na výparník v okruhu tepelného čerpadla.

2 Současný stav řešené problematiky

2.1 Tepelná čerpadla

Tepelná čerpadla jsou označována jako ekologické alternativní zdroje energie využívající nízkopotenciální energii, tzn., že odebírají teplo okolního prostředí a převádějí jej na vyšší teplotní hladinu, kterou lze využít k vytápění budov. Jako okolní prostředí, z něhož se získává energie, je používán okolní vzduch, půda nebo voda.

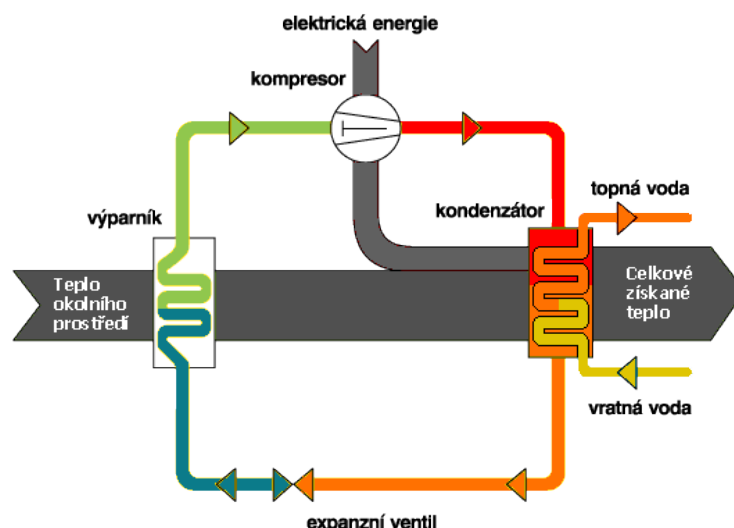
V praxi se můžeme setkat s rozdělením okruhu na dvě části, a to na primární a sekundární okruh. V primárním okruhu dochází k odnímání tepla z nízkopotenciálního zdroje na výparník. V sekundární části okruhu dochází k odnímání získaného tepla pro vytápění. [1]

Mezi základní komponenty tepelných čerpadel patří kompresor, kondenzátor, expanzní ventil a výparník.

2.1.1 Princip tepelných čerpadel

V půdě, vzduchu či vodě je obsaženo velké množství tepla, které bohužel kvůli své nízké teplotní hladině nemůžeme využít pro přímé vytápění nebo ohřev užitkové vody, a tak musíme využívat zařízení nazývané tepelné čerpadlo.

Technický princip je založen na odebírání tepla nízkopotenciálnímu zdroji výparníkem, ve kterém je předáváno teplo pracovní látce (nazývané chladivo) při relativně nízké teplotě (menší teplotě než teplota vytápěného prostoru). Takovýmto zahřátím se chladivo odpařuje a je nasáváno kompresorem, kde dochází ke stlačení plynu a tím k ohřátí chladiva na vyšší teplotní hladinu. Stlačené chladivo se dostává do kondenzátoru, kde se ochlazuje přehřátá pára pracovní látky a uvolňuje teplo, které je z kondenzátoru odváděno do topného systémů vytápěného prostoru. Celý okruh je uzavřen expanzním ventilem, kde dochází ke zpětnému snížení tlaku na původní hodnotu ve výparníku. (viz Obr. 1.) [1]



Obr. 1: Princip tepelného čerpadla [2]

2.1.2 Realizace tepelných čerpadel v ČR a ve světě

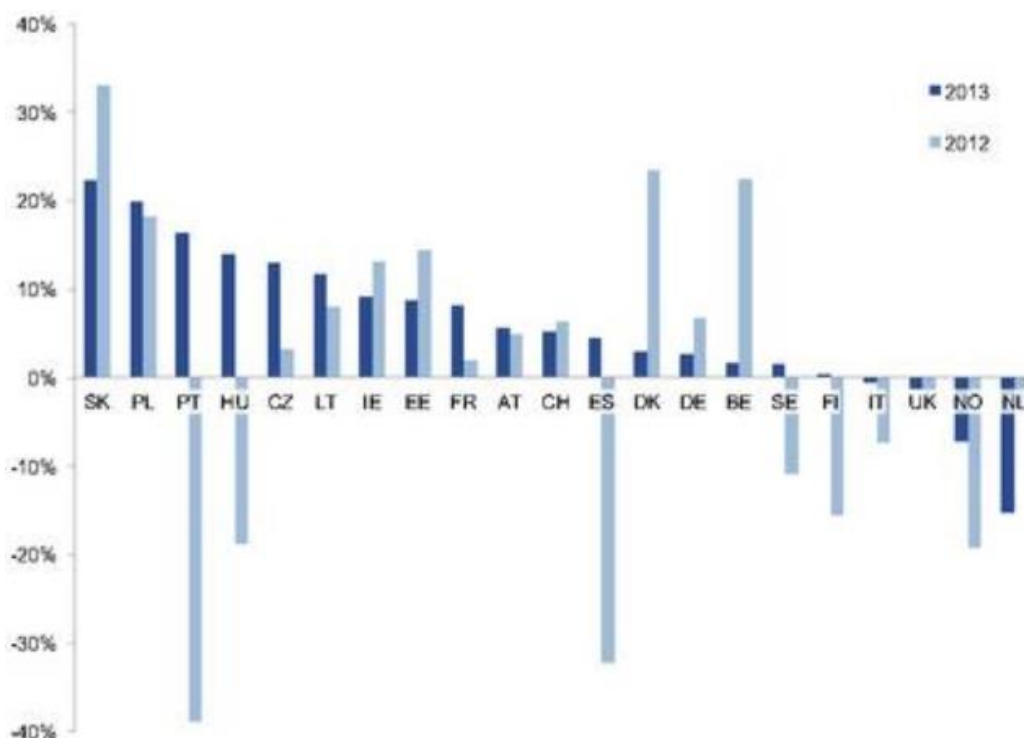
Tepelná čerpadla jsou stále oblíbenějším zdrojem tepla, dokazuje to každoroční statistická zpráva od European heat pump association (European heat pump market and statistic report), která sleduje počty tepelných čerpadel 11 zemí Evropské unie a od roku 2005 dokonce 21 zemí EU. Každoroční nárůst tepelných čerpadel se již 5 let drží na stejné úrovni a rovná se zhruba 800 tisícům nových aplikací ročně (Tab. 1). V roce 2014 bylo v Evropě již 7,5 milionu tepelných čerpadel a předpokládá se, že toto číslo neustále poroste. [3]

Tab. 1: Tepelná čerpadla v Evropě – prodej a celkový počet [3]

	SUM EU-11	SUM EU-21	TOTAL STOCK
2005	446 037		1 015 607
2006	504 428		1 525 401
2007	568 131		2 114 519
2008	770 538		2 918 976
2009	686 076		3 644 998
2010	671 392	800 388	4 437 530
2011	666 873	808 591	5 237 003
2012	621 818	750 436	5 979 042
2013	635 273	769 879	6 741 251
2014	659 911	796 746	7 517 019

Ze statistické zprávy také vyplývá, že dominantním zdrojem nízkopotenciální energie je stále vzduch a tato čerpadla jsou na evropském trhu největším tržním segmentem z hlediska počtu prodejů. V rámci zemí je nejvíce tepelných čerpadel z hlediska počtu aplikací ve Švédsku a ve Francii. Tyto dvě země výrazně ovlivňují většinu celkových statistik, které organizace EHPA zpracovává. [3]

Česká republika je na 5. místě v žebříčku zemí s nejvyšším nárůstem tepelných čerpadel v roce 2013, kdy tento nárůst byl téměř 15 %. Nejvyšší nárůst v letech 2012 a 2013 zaznamenalo Slovensko a Polsko. [3]



Obr. 2: Nárůst tepelných čerpadel v letech 2012 a 2013 (EU) [3]

2.1.3 Tepelná čerpadla země-voda

Obecné označení tepelného čerpadla země-voda značí, že nízkopotenciálním zdrojem tepla je země a voda je medium, kterému je teplo předáváno.

Tepelná čerpadla získávající nízkopotenciální teplo z půdy se rozdělují na dvě základní konfigurace, a to tepelná čerpadla, které využívají vertikální výměník vložený do vertikálního vrtu o hloubce až 120 metrů, a čerpadla získávající energii z půdy pomocí horizontálních zemních výměníků (kolektorů) vložených pod povrch půdy. [4]

Svým principem jsou kolektory téměř stejné jako vertikální. Horizontální zemní výměníky totiž stejně jako výměníky vertikální také využívají trubkový výměník, ve kterém je napuštěna proudící nemrznoucí směs. Zásadní rozdíl mezi těmito aplikacemi je kromě směrů a způsobu uložení kolektoru především délka výměníku, která je u horizontálního výměníku zhruba třikrát delší než v případě hlubinných vrtů při stejném výkonu. [5]

Horizontální výměníky jsou svinuty pod úroveň terénu (způsoby uložení výměníku jsou popsány v kapitole 2.3.2 *Geometrie horizontálních tepelných výměníků*) do hloubky 1,2 – 2 metry. Vzhledem k tomu, že teplota půdy v okolí výměníku se může pochybovat pod 0 °C, je nutné dbát na to, aby byl výměník umístěn v dostatečné vzdálenosti od stavebních konstrukcí, což by mohlo mít za následek narušení statiky objektu. Výměník nesmí být umístěn ani příliš blízko kanalizačním a splaškovým svodům, které by kvůli nízkým teplotám mohly být narušeny. [5]

Největší výhodou horizontálních výměníků oproti výměníkům vertikálním je nižší pořizovací cena, především díky snadnější realizaci. U novostaveb lze dokonce výkopové práce potřebné pro uložení výměníku spojit s dalšími povrchovými úpravami na pozemku a ušetřit tak výrazně na pořizovacích nákladech. Ovšem nevýhodou tepelných čerpadel využívajících horizontální výměník je nepatrně nižší průměrný topný faktor, který se v průběhu topné sezóny mění kvůli proměnlivé teplotě okolního vzduchu, zatímco u hlubinných výměníků je teplota masivu v okolí vrtu více stabilní. Vždy však platí, že čím větší je plocha výměníku, tím menší jsou tepelné rozdíly v půdě, které udržují biologickou rovnováhu na pozemku. [4]

U horizontálních výměníků jsme také ovlivněni potřebným prostorem. Není-li plocha pozemku dostatečně velká, může být aplikace takového tepelného čerpadla z finančního hlediska značně nevýhodná. Je-li výměník využíván pouze pro vytápění je možné plochu výměníku zmenšit. Půda totiž přes léto dokáže zregenerovat díky absorpci slunečního záření, absorpci tepelné energie z atmosféry a prostupem tepla s okolních vrstev půdy. [4]

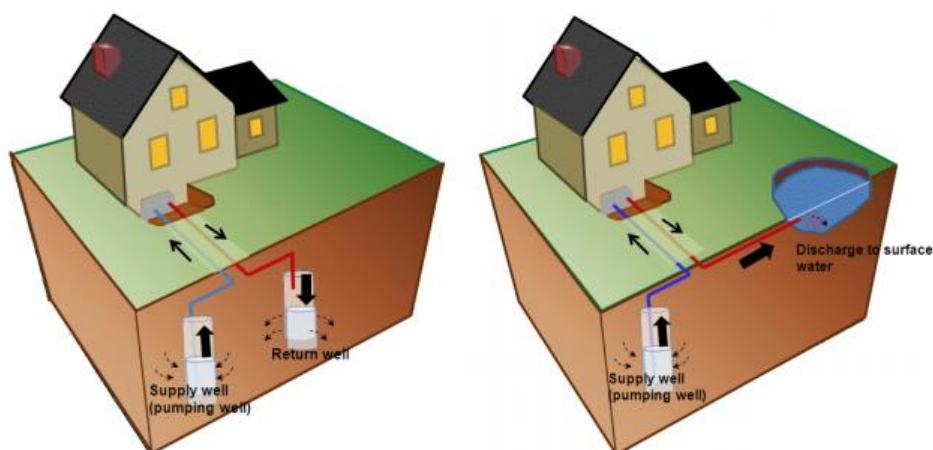
2.2 Typy zemních výměníků tepla

Tepelné výměníky lze rozdělit na dvě základní konfigurace. První konfigurací je systém s otevřenou smyčkou, kde může být půda využita k přímému ohřevu nebo chlazení

média, které je samotné využíváno k ohřevu či chlazení prostorů. Systémy s uzavřenou smyčkou používají také teplotně médium k ohřevu či chlazení prostoru s tím rozdílem, že u uzavřeného systému je teplo z půdy předáváno nepřímo, tedy médium je v uzavřené trubce (smyčce) a díky přestupu tepla přes trubku teplotně látka přijímá nebo odebírá teplo od zemního masivu. [6]

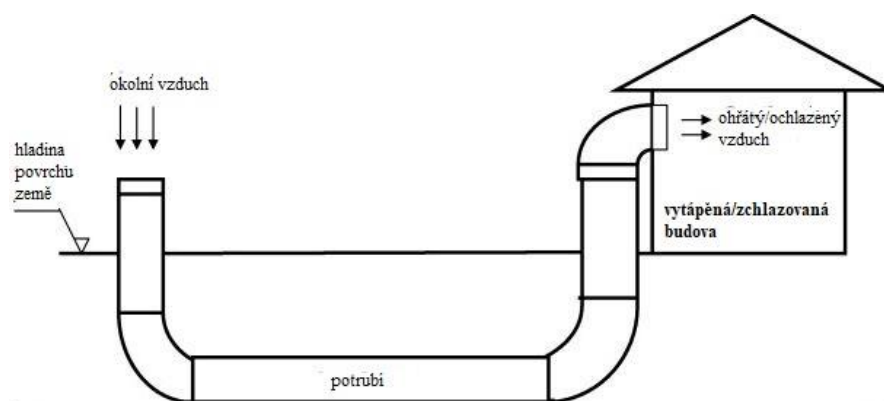
2.2.1 Systémy s otevřenou smyčkou

Tyto systémy pracují převážně s podzemními vodami, které jsou přímo čerpány a využívány na vytápění či chlazení. Princip je založen na hlubinných vrtech a vytvoření dvou studní. V první čerpací studni je čerpána podzemní voda obsahující nízkopotenciální energii a za použití filtračních systémů je nízkopotenciální energie využita na ohřev prostoru. Po snížení teplotní hladiny takové vody je vypouštěna zpět do země, a to do druhé vsakovací studně, která musí být umístěna dostatečně daleko, aby neovlivňovala teplotu vody v čerpacím vrtu. Vypuštěná voda se vsákne do půdy, kde se uzavírá koloběh, tím, že získá zpět teplotu jako před čerpáním z čerpacího vrtu. Můžeme se setkat i s případy, kde je použita pouze čerpací studna a voda vypouštěna do okolí, tj. do řeky, povrchové vody či dokonce může být nadále využita jako užitková voda (pro splachování a mytí). [6]



Obr. 3: Otevřený systém s využitím čerpací a vsakovací studny (vlevo) a systém s využitím jedné čerpací studny a vypuštěním do stojaté vody (vpravo) [6]

Ovšem jsou systémy, kde je předehříván či předchlazován vzduch, který prochází přes trubky zakopané v zemi. Pak může být tento vzduch ohřátý nebo zchlazený klimatizační jednotkou a vháněn do budovy. [7]



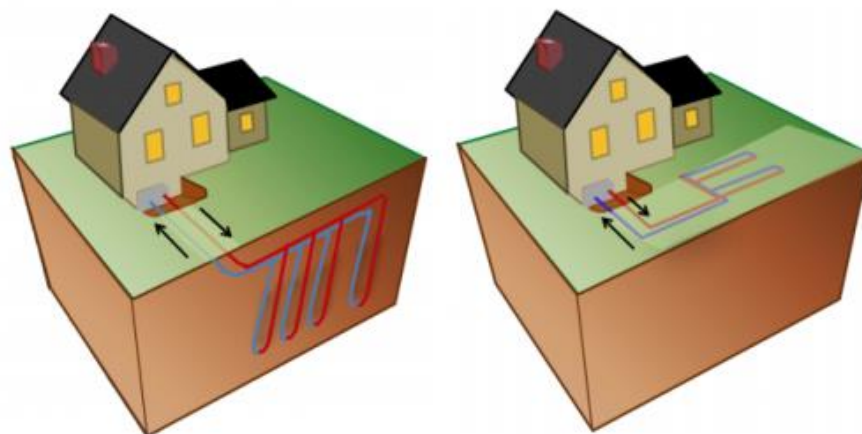
Obr. 4: Systém otevřené smyčky s přehřevem/předchlazením vzduchu [7]

2.2.2 Systémy s uzavřenou smyčkou

Jak již bylo výše zmíněno, systémy s uzavřenou smyčkou jsou systémy, které nepřecherpávají vodu přímo do oběhu, ale pouze využívají teplo okolní půdy k nepřímému získávání tepla. K takovému procesu je nutné uložení tepelného výměníku do půdy, ve kterém proudí teplotonosná látka, která toto teplo přebírá. Teplotonosnou kapalinou v těchto systémech není jen voda, ale voda ve směsi s látkami, které ovlivňují teplotu jejího tuhnutí (nemrznoucí směsi).

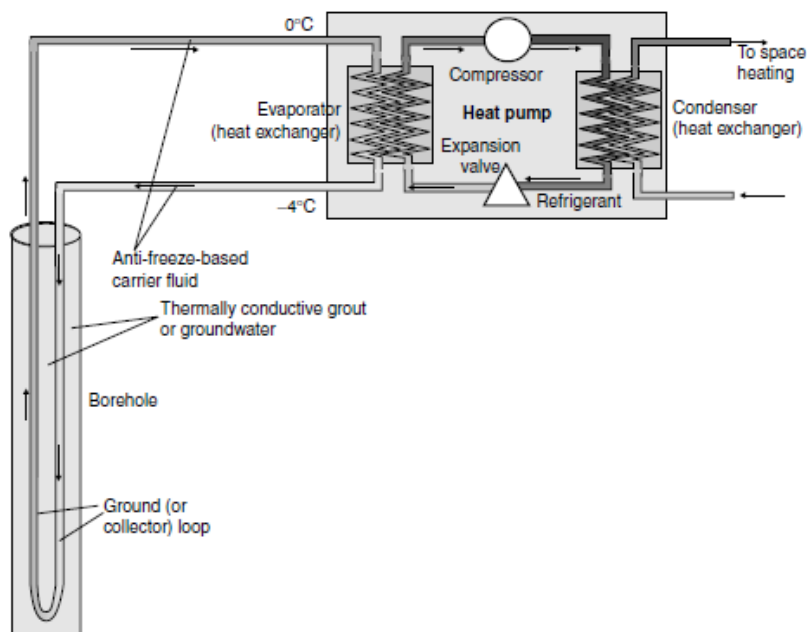
Díky pouze nepřímému kontaktu s okolím mohou být aplikace s uzavřenou smyčkou konstruovány téměř kdekoliv (jílovité půdy, permafrost, žulovité půdy atd.).

Uzavřené smyčky, které používají půdu jako zdroj nízkopotenciální energie, se dají rozdělit na dva základní typy. Horizontální zemní výměníky, využívající pouze podpovrchový zemní masiv, a vertikální horninové výměníky, využívající hlubinný vrt k získání geotermální energie. [8]



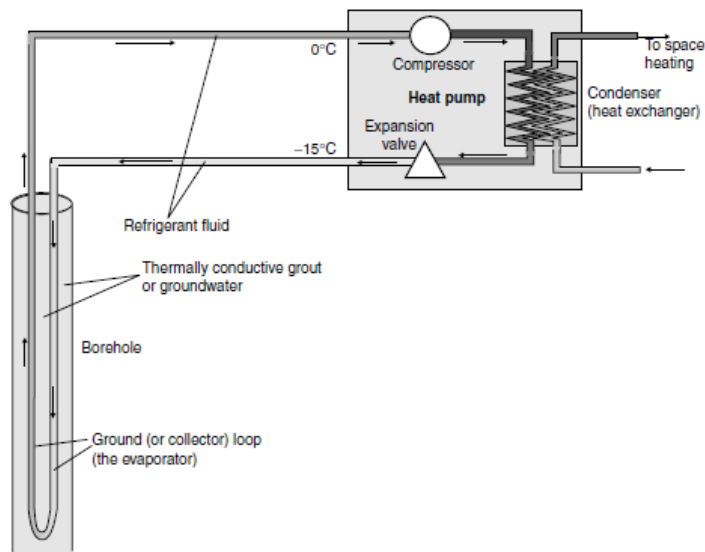
Obr. 5: Vertikální uzavřená smyčka (vlevo) a horizontální uzavřená smyčka (vpravo) [6]

Uzavřené smyčky (ať vertikálních či horizontálních kolektorů) se dále dělí na přímé a nepřímé konfigurace. Při nepřímé cirkulaci předává teplonosná látka přijímající teplo na výparníku (horizontální či vertikální kolektor) energii pracovní látce přes tepelný výměník na povrchu uvnitř vytápěného objektu. Pracovní látka přijímá toto teplo nepřímým kontaktem, tedy přestupem tepla přes výměník, a tato ohřátá pracovní látka jde přes kompresor do kondenzátoru a přes expanzní ventil je opět přivedena na výměník tepla, kde se celý cyklus ukončuje a neustále se opakuje (viz obr. 6). [8]



Obr. 6: Schéma nepřímé cirkulace v uzavřené smyčce použitý při vertikálním hlubinném vrtu [8]

Při přímé cirkulaci teplonosná látka proudící v kolektoru (výparníku) je přímo využívána na kondenzátoru uvnitř vytápěného objektu. V takovémto oběhu tedy není potřeba tepelný výměník, který předává teplo z výparníku. Hlavní výhodou tohoto systému je, že může pracovat s nižšími teplotami ve výparníku, čímž získáme velký teplotní spád mezi kolektorem a okolní půdou. Ovšem nevýhodou je zde riziko úniku chladiva do podzemních vod a následná kontaminace půdy. Proto se od tohoto systému spíše ustupuje (viz obr. 7). [8]



Obr. 7: Schéma přímé cirkulace v uzavřené smyčce použitý při vertikálním kolektoru [8]

2.2.2.1 Vertikální horninové výměníky

Při použití systému vertikálních horninových výměníků je na odběr tepla nutno udělat několik hloubkových vrtů, do kterých se uloží nejčastěji plastové trubky odolné proti mechanickému poškození. Vrty by měly být od sebe 10 – 15 metrů a mezery mezi jednotlivými vrty by měly být vyplněné jílem, bentonitem nebo pískem pro lepší přestup tepla. Průměr takových hloubkových vrtů je do 150 milimetrů a hloubky se pohybují kolem 40 – 150 metrů. [9]

Pro příklad uvádí Fūri a kol., že pro vytápění rodinného domu se spotřebou tepla 12 kW je potřeba dvou vrtů o hloubce 120 metrů, které vykazují hustotu tepelného toku na jeden metr běžné hloubky uvedených vrtů přibližně 50 W. [9]

2.3 Horizontální zemní výměníky

Horizontální výměníky se dají rozdělit na tři druhy, a to lineární, spirálovité (slinky) a šroubovitě konfigurace. Zpravidla se průměr trubek pohybuje v rozmezí 30 – 50 milimetrů, konkrétní hodnoty průměrů a velikostí (délek) se určují dle tepelných charakteristik zemního masivu a prostředí, ve kterém je tepelný výměník uložen. [10]

Výhodou systému je především skutečnost, že při použití podpovrchového systému odpadávají problémy s vyhloubením hlubinného vrtu a možné komplikace s tvrdostí zemního masivu (naražení na skálu). Vertikální systém je také výrazně dražší z hlediska pořizovací investice, avšak je méně náročný na prostorové dispozice. Nejsme omezeni ani dostupností vody jako u systému voda-voda a i sezónní topný faktor dosahuje dobrých výsledků, a tak aplikace založené na podpovrchových výměnících tepla představují kompromis mezi vysokou účinností a investičními náklady výměníku. [10]

Princip horizontálních zemních výměníků je založen na zimním a letním období, kdy přes zimní otopnou sezónu ze zemního masivu energii čerpáme, v letním období půda absorbuje energii, kterou dostaneme především ze slunce v podobě solární energie. Půdní masiv tedy slouží jako absorbér (kolektor) tepla. Tuto absorbovanou energii ovlivňují následující faktory:

- Oblast pokrývaná smyčkou musí být dostatečně velká, aby v letním období mohla dostatečně absorbovat atmosférické a solární teplo.
- Zem musí mít dostatečnou vodivost pro účinný přenos energie do smyčky.
- Musí být zajištěn dostatečný kontakt mezi zemí a trůbkou, tak aby docházelo k účinnému přenosu tepla.
- Potrubí by mělo být vyrobeno z materiálu, který je odolný, tvrdý a dostatečně tepelně vodivý.
- Teplonosná kapalina by měla účinně vyměňovat teplo se stěnou smyčky, neměla by být příliš viskózní, měla by mít nízkou toxicitu (pro případ úniku), měla by mít bod tuhnutí pod minimální provozní teplotou systému a v ideálním případě by neměla být hořlavá.

[11]

2.3.1 Podpovrchový zemní masiv jako zásobník energie

Podpovrchový zemní masiv může být chápán jako velký zásobník energie. Ten lze využít jako akumulární prvek, ze kterého v případě potřeby (při vytápění) můžeme čerpat energii. Mezi jednotlivé složky tepla, které můžou být akumulovány do země, patří:

- přirozené sluneční záření absorbované přes povrch země
- geotermální energie z jádra země
- sluneční energie ze solárních panelů, která je záměrně předávána do země
- odpadní teplo z klimatizace a odvlhčování komerčních budov či skleníků
- odpadní teplo z průmyslového zpracování
- přebytečné teplo z kombinované výroby elektřiny a tepla

[8]

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 určují tepelnou charakteristiku půdy. [12]

2.3.1.1 Tepelná vodivost

Většina hornin je na bázi křemičitanu a má tak velmi vysoký potenciál, stejně jako například cihla, ukládat teplo. Součinitel tepelné vodivosti λ je nejvýznamnější tepelný parametr. Vyjadřuje schopnost materiálu přenášet teplo pomocí vedení (popsáno Fourierovým zákonem). Měrná tepelná vodivost λ je tedy rovna množství tepla [J], které projde 1 metrem tloušťky prostředí za jednotku času při jednotkovém teplotním rozdílu (ve vzorci – $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Zjištění konkrétního součinitele tepelné vodivosti dané horniny je velice významné pro následující výpočty a návrhy tepelných čerpadel a výměníků pracujících s takovou horninou. Závisí na mnoha faktorech a vlastnostech horniny jako je hustota, pórovitost, obsah vody atd. [13]

Tepelná vodivost křemičitých hornin lze považovat za optimální. Není totiž tak vysoká, aby se ukládané teplo okamžitě rozptýlilo do okolí, ale zároveň ani tak nízká, aby nebylo možné tuto energii čerpat pomocí optimálně navržených tepelných čerpadel a tepelných výměníků. [8]

Tepelnou vodivost výrazně ovlivňuje zamrzání půdy, kvůli vysoké tepelné vodivosti ledu ($2,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Tepelná vodivost také klesá s vyšším obsahem pórů v hornině,

tedy pórovitostí. V následující tabulce jsou uvedeny nejčastější zeminy a horniny a jejich součinitelé tepelné vodivosti. [14]

Tab. 2: Součinitele tepelné vodivosti zemin a hornin [14]

Součinitel tepelné vodivosti λ				
hornina	$W.m^{-1}.K^{-1}$		zemina	$W.m^{-1}.K^{-1}$
	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

2.3.1.2 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita C popisuje schopnost média (tuhého, kapalného, plynného) ukládat teplo. Respektive měrná tepelná kapacita c je to množství tepla, které je nutné ke změně teploty (ohřátí, ochlazení) 1 kilogramu látky o 1 Kelvin [jednotka: $J. K^{-1}. kg^{-1}$]. Měrná tepelná kapacita vody je velmi vysoká a pohybuje se okolo $4180 J. K^{-1}. kg^{-1}$. Většina hornin má měrnou tepelnou kapacitu kolem $800 J. K^{-1}. kg^{-1}$. To znamená, že kdybychom snížili teplotu jednoho kilogramu takové horniny ze $13\text{ }^{\circ}C$ na $11\text{ }^{\circ}C$, získali bychom teplo o hodnotě 1600 Joulů. [8]

Ve většině případů je dostačující vypočítat měrnou tepelnou kapacitu půdy pouze z měrných tepelných kapacit jednotlivých složek podle jejich měrných objemů (počítají se složky minerální, organické a vody). Vycházíme-li z faktu, že minerální a organické

složky mají velmi podobnou měrnou tepelnou kapacitu, tak jediné, co výrazně ovlivňuje výsledek celkové měrné tepelné kapacity horniny je obsah vody. [15]

V mnoha výpočtech je potřeba objemová tepelná kapacita vody C_V . Ta je odvozena z měrné hmotnosti a měrné tepelné kapacity minerálních složek, měrné tepelné kapacity vody a obsahu vody vztaženého k suché hmotnosti v procentech dle následujícího vzorce:

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

Kde:

ρ_s – měrná hmotnost minerálních složek [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

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

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

w – obsah vody vztažený k suché hmotnosti [%]

[15]

2.3.1.3 Teplotní vodivost

Teplotní vodivost je veličina znázorňující schopnost látky vést teplo, tzn. schopnost látky vyrovnat teplotní rozdíly. Odvozenou veličinou je součinitel teplotní vodivosti a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], který závisí na změně součinitele tepelné vodivosti λ a objemové měrné tepelné kapacitě c_v .

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

2.3.1.4 Vliv intenzity slunečního záření

Přirozené sluneční záření absorbované přes povrch země je jednou z nejpodstatnějších částí energie, kterou lze využívat ve formě tepla z podpovrchového výměníku. Do masivu se tato solární energie absorbuje v průběhu celého roku (zejména však v letním období) a výrazně ovlivňuje teplotu půdy, a tím usnadňuje podmínky pro lepší efektivnost tepelného čerpadla. Má také zásadní vliv pro regeneraci zemního masivu, ze kterého teplo pomocí kolektorů odebíráme. [16]

Celková intenzita slunečního záření (neboli globální intenzita slunečního záření) je energie dopadající na povrch a je dána součtem difúzní a přímé intenzity slunečního záření. (Podle Vrtka se dá počítat i s třetí složkou, a to je intenzita záření odraženého od okolních ploch. [17])

$$I = I_p + I_d \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

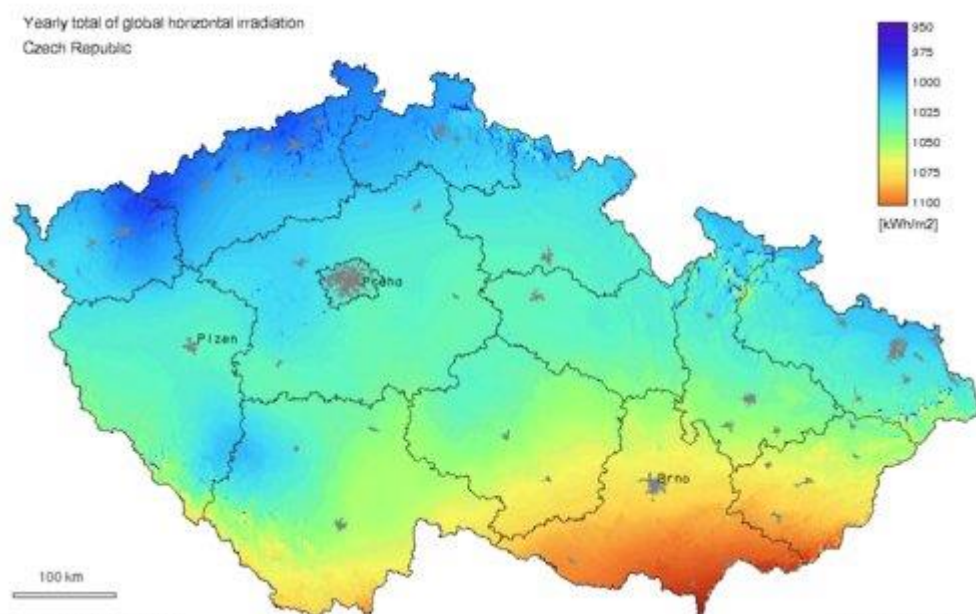
Kde:

I_p – intenzita přímého slunečního záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

I_d – intenzita difúzního slunečního záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Intenzita přímého slunečního záření na jakkoli orientovanou plochu je závislá na úhlu dopadajícího záření, tzn., že je ovlivněna výškou slunce na obloze. [16]

Difúzní záření působí na všechny plochy, ať jsou či nejsou osvětlené přímým slunečním svitem. Jedná se o záření, které se odrazilo od částecek v atmosféře (vodní kapky, prach, aerosoly atd.). Je závislé na obsahu a znečištění atmosféry, takže například při vysoké oblačnosti dopadá na zem pouze difúzní záření a téměř žádné přímé záření. [18]



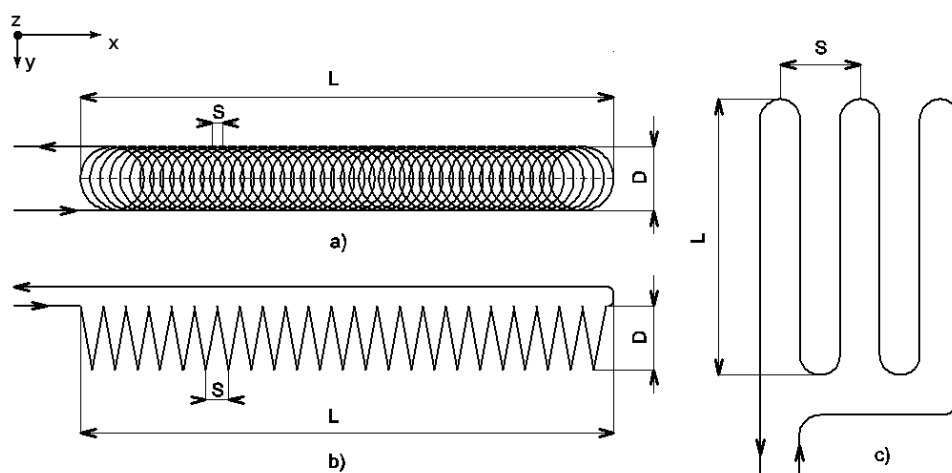
Obr. 8: Střední hodnoty úhrnů globálního záření dopadajícího v průběhu jednoho roku na území různých regionů v Česku [19]

2.3.2 Geometrie horizontálních zemních výměníků

V našich geografických podmínkách existuje celá řada způsobů, jak uložit zemní kolektor pod povrch půdy. Z doposud nainstalovaných aplikací vyplývá, jak uvádí Rosén a kol., že když je instalace kolektoru příliš hluboko (více než 2 metry), doba „dobíjení“ může trvat déle než jen jedno léto. Pokud je však potrubí uloženo zase příliš mělce pod povrchem (méně než 0,8 metru), tak může ohrozit kořenové systémy vegetace na povrchu kvůli nízkým teplotám ve špičkách otopného období. [20]

Existují tři základní způsoby uložení a to:

- lineární systém
- Slinky systém (stočené, překrývající se trubky)
- šroubovitý systém

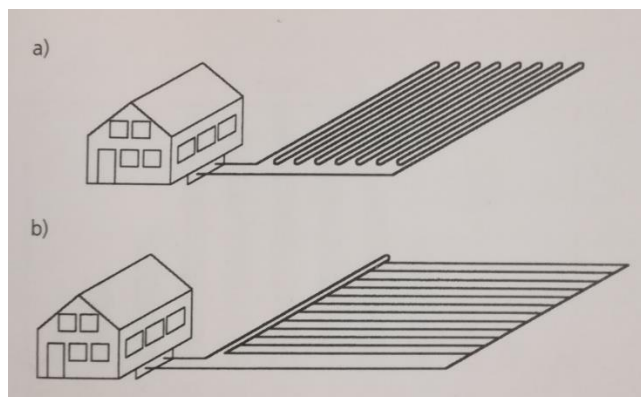


Obr. 9: Systémy uložení výměníku: a) Slinky, b) šroubovité, c) lineární [21]

2.3.2.1 Lineární výměník

Lineární výměník je používán pro získávání energie z podpovrchového zemního masivu v mnoha zemích světa a v České republice je dokonce nejpoužívanější právě tento typ výměníku. Tento způsob instalace je určen především pro získávání tepla z menších hloubek, ovšem jeho použití je limitováno větší plochou potřebnou pro uložení. [22]

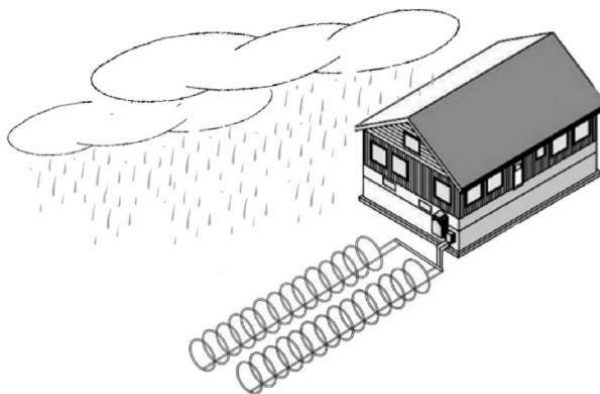
Lineární výměník má dvě konfigurace zapojení, sériové a paralelní (viz obr. 10), přičemž rozteč trubek se pohybuje kolem 1 – 1,5 metru, záleží především na vlastnostech půdy.



Obr. 10: a) sériové zapojení b) paralelní zapojení [23]

2.3.2.2 Šroubovitý výměník

Šroubovitý horizontální zemní výměník je možné si představit jako běžnou válcovou pružinu, jejíž osa je horizontálně uložena pod povrchem. Stejně jako výměníky typu Slinky se používají při omezené ploše pozemku.



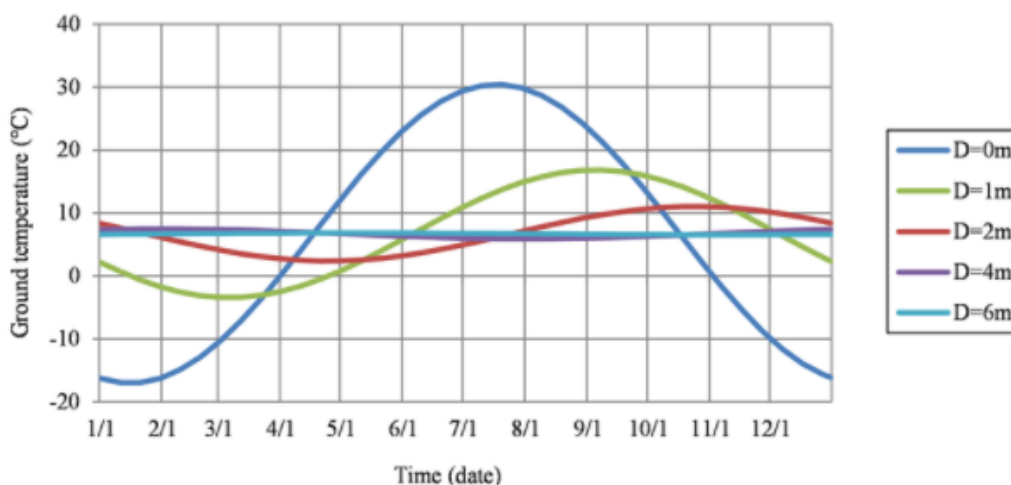
Obr. 11: Šroubovitý výměník [24]

2.3.2.3 Výměník Slinky

Jedná se o typ výměníku, který je stejně jako šroubovitý výměník používán při omezených možnostech využití pozemku. Tento výměník se ukládá do větší hloubky než oba předchozí systémy (jedná se o hloubky okolo 1,5 metru). Průměr smyček se pohybuje okolo 0,5 – 2 metrů a rozteč jednotlivých smyček je 0,1 – 0,5 metru (ukázka smyčky je na obr. 9). [24]

2.3.3 Hloubka uložení výměníku

Hloubka uložení smyčky horizontálních podpovrchových výměníků by se měla pohybovat, jak již bylo výše zmíněno, mezi 1,2 – 2 metry pod povrchem půdy. Touto hodnotou je zajištěno, že v okolí trubek nebude docházet k velkým výkyvům teplot, díky izolaci, kterou vytváří masiv půdy nad trubkami. Dále je zajištěno, že smyčka se nachází v nezamrzné hloubce, a tak nezamrzá i při velmi nízkých teplotách vzduchu v okolí výměníku (i když stále může zamrznat vlivem odběru tepla). Zároveň je i dostatečně blízko povrchu, aby půda v okolí výměníku dokázala v letním období dostatečně zregenerovat. [11]



Obr. 12: Závislost teploty zemního masivu (vertikální osa) v průběhu roku (horizontální osa) na hloubce měření teploty [25]

Na obr. 12 je vidět regenerace teploty půdy v různých hloubkách v průběhu celého roku. Je tedy zřejmé, že čím níže je provedeno měření, tím méně je masiv ovlivňován solární a atmosférickou tepelnou energií. Je také vidět, že teplota půdy ve 4 metrech pod povrchem už je téměř neměnná v průběhu roku (tzn., že v letním období půda mnohem pomaleji regeneruje). [25]

2.3.4 Způsob uložení

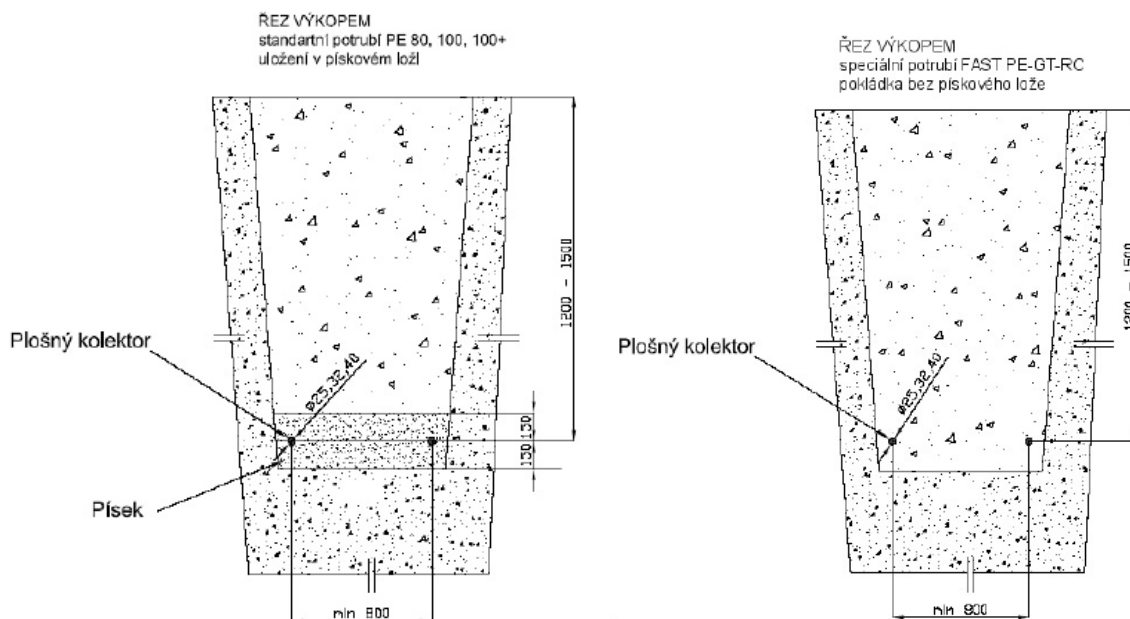
Uložení primárního okruhu se rozděluje podle toho, do jakého materiálu uložíme trubky výměníku. V dnešní době, kdy se na trhu objevují stále kvalitnější materiály již obsypání hrubějším materiálem s kameny nemusí vždy znamenat fatální následky a poškození trubky, takže se stále více objevují aplikace uložení výměníku bez pískového lože. [26]

Pískové lože

Jedná se o starší způsob uložení, který se používá pro méně odolné materiály. Potrubí se pokládá do vrstvy cca 15 centimetrů a následně je zasypáno další vrstvou 15 centimetrovou vrstvou písku, což zabrání mechanickému poškození především při hutnění. [26]

Bez pískového lože

Jak již bylo výše zmíněno, uložení bez pískového lože se používá v případech, kdy je použit odolnější materiál potrubí (často označován jako RC – Resistance to Crack), který je možno uložit přímo do výkopu a zahrnout zpět vykopanou zeminou. Taková aplikace je levnější díky odstranění nákladů na písek a odvoz přebytečné zeminy. [26]



Obr. 13: Řez výkopem horizontálního výměníku s pískovým ložem (vlevo) a bez pískového lože (vpravo) [27]

2.3.4.1 Způsoby provedení výkopu

Klasický výkop

Klasický výkop se provádí klasickým zemním rypadlem na šířku lžice cca 60 – 80 centimetrů. Na jednu stranu výkopu je uložena jedna trasa a na druhou stranu je uložena trubka vedoucí zpět. [26]

Drážky

Drážky se provádějí pomocí zemní rýhovačky, kdy na každou trubku je provedena jedna drážka o šířce 10 – 15 centimetrů až do konečné hloubky uložení. Výhodou tohoto systému oproti klasickému výkopu je jednoznačně rychlejší realizace a výrazně menší prostor zasažený výkopem. Dokonce existují způsoby ukládky, kdy se odstraní vrchní část zeleného porostu, který se položí vedle výkopu, vytvoří se drážka, do které se položí trubka a zasype se. Následně se vrchní část zeleného živého porostu usadí opět na místo odkud byl odstraněn, čímž získáme výrazně kratší obnovu vegetace v místě ukládky celého horizontálního výměníku. [26]



Obr. 14: Zemní rýhovačka [26]

2.3.5 Materiál potrubí (smyčky)

Potrubí může být vyrobeno z mnoha materiálů, které se můžou i výrazně lišit svými vlastnosti. Jedním ze základních materiálů je měď, ta má vysokou tepelnou vodivost, ale je poměrně drahá, podléhá korozi a není tak pružná jako varianty plastového potrubí, takže může dojít k narušení potrubí pozdějšími výkopovými pracemi. Z těchto důvodů se u výměníků tepla používají především plastické hmoty.

Z běžně dostupných plastů je využíván hlavně polyetylen, který je používán ve více variantách rozlišených podle hustoty materiálu. Polyetylen je velice vhodný, díky své vysoké tepelné vodivosti, tvrdosti a zároveň vysokou životnosti. Další plastickou hmotou využívanou ve výměnících je polypropylen. Ten má sice o trochu nižší tepelnou vodivost, ale může být využíván i při vyšších teplotách než polyetylen. [8]

Tab. 3: Tepelných vodivosti materiálů používaných pro potrubí v podpovrchových horizontálních výměnících tepla [8]

Materiál	Tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
Polyetylen (PE) – vysoká hustota	0,45
Polyetylen (PE) – střední hustota	0,4
Polypropylen (PP)	0,22
Polybuten	0,22
Polyvinylchlorid (PVC)	0,23
Měď	395

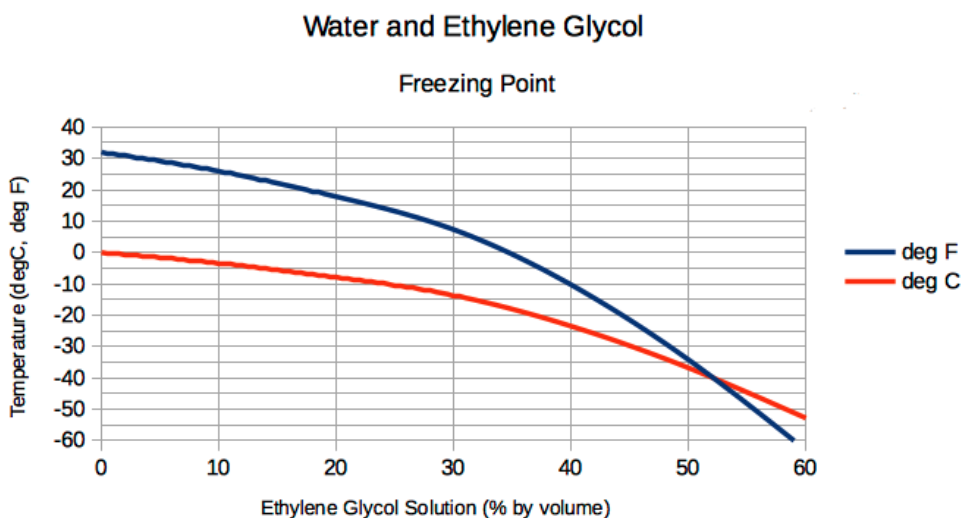
Potrubí se navrhuje tak, aby dokázalo odolat tlakům tekutiny 10 až 16 barů, přičemž tlaky při provozu čerpadla dosahují přibližně jen 2 – 3 barů. Tato rezerva je především kvůli případným unikům látek do prostředí a ekologické kontaminaci půdy v okolí výměníku. [11]

2.3.6 Teplonosná kapalina

Z hlediska ekologie považujeme tepelná čerpadla za velice ekologické řešení vytápění. Ovšem zařízení jsou šetrná k životnímu prostředí pouze v případě, jestliže je použito takové chladivo, které nemá žádný (nebo alespoň co nejmenší) negativní vliv na okolní prostředí.

Pro uzavřené smyčky výměníků bývá teplonosnou kapalinou voda, ovšem voda může být používána pouze při teplotách nad 0 °C, tedy jen tehdy, je-li potřeba dostat teplo (chlad) z masivu do objektu (jen u chladicích systémů). U vytápění se můžou teploty dostávat pod bod tuhnutí vody, a tak je teplonosnou kapalinou běžná dopravní kapalina jako je např. voda doplněna o nemrznoucí směs. Tato nemrznoucí směs může být roztok anorganické soli (chlorid sodný, chlorid hořečnatý, chlorid vápenatý nebo uhličitan draselný), organická sůl (octan draselný), alkohol nebo glykol (metanol, etanol, etylenglykol nebo propylenglykol).

Teplonosná kapalina se posuzuje z mnoha hledisek. Mezi sledované vlastnosti patří viskozita, hořlavost, teplota bodu mrazu (viz obr. 15), stabilita a tepelné vlastnosti (objemová, hmotnostní chladivost) a v neposlední řadě cena. Tekutina by také měla mít nízkou toxicitu, aby se zabránilo poškození životního prostředí, které může vzniknout únikem chladiva do okolního prostředí. Používané látky by měly být také lehce biologicky odbouratelné, právě kvůli případnému úniku. [11]



Obr. 15: Závislost teploty bodu tuhnutí na koncentraci ethylen-glykolu ve vodě [ve stupních Celsia a stupních Fahrenheita][28]

Základní dělení pracovních látek (chladiv) je na chladiva přírodní a na chladiva syntetická.

Chladiva přírodní

- **Voda H_2O** (R 718) – Má vysokou hmotnostní chladivost a nízkou objemovou chladivost. Největší zastoupení má voda v paroproudých a absorpčních zařízeních.
- **Čpavek NH_4** (R 717) – Má vysokou hmotnostní a objemovou chladivost, používá se pro teploty -50 až $+50$ °C, je levný, ale je výbušný, hořlavý, prudce jedovatý a v bezvodém stavu netečný k materiálům.
- **Oxid uhličitý CO_2** (R 744) – Jeho užívání je bezpečné, ale konstrukce zařízení je nevhodná, díky nutnosti použití jen za vysokých tlaků.
- **Vzduch** (R 729) – Použití vzduchu jako chladiva je možné při použití plynového Ericssonova chladicího oběhu.
- **Organické uhlovodíky** (etan R 170, cyklopropan RC 270, propan R 290, isobutan R 600a, propylen R1270) – Společným znakem uhlovodíků je vysoká hořlavost a výbušnost.

Chladiva syntetická

Halogenované uhlovodíky mají jeden až všechny atomy vodíku nahrazeny halovými prvky (Cl, Br, Z). Mezi jejich typické vlastnosti patří neznatelný zápach, nehořlavost, nevýbušnost, vysoká prolínavost, téměř minimální rozpustnost vody, neomezená rozpustnost olejů a tuků, vyšší výrobní náklady a to, že mají negativní vliv na ozónovou vrstvu, téměř nejsou jedovaté, a nejsou agresivní vůči materiálům.

- **Plně halogenové pracovní látky (CFC)** – „Tvrde freony“. Některé atomy vodíku jsou nahrazeny atomy chloru, bromu nebo fluoru (R 11, R 12, R 113, R 115, R 13). Výroba i použití těchto chladiv jsou zakázány, kvůli velkému vlivu na ozónovou vrstvu Země.
- **Částečně halogenovaná chladiva s atomy chlóru nebo fluoru (HCFC)** – Některé atomy vodíku jsou nahrazeny atomy chloru nebo fluoru. Jedná se o nahrazení „tvrdých freonů“ (R 22, R 123, R 124, R 142). Výroba HCFC ukončena k 1. 1. 2010, použití do 31. 12. 2014. Toto chladivo je možné používat v rozsahu -40 °C až $+15$ °C

- **Halogenovaná chladiva bez chlóru (HFC)** – Některé atomy vodíku jsou nahrazeny atomy fluoru (F-plyny). U těchto halogenových chladiv jsou odstraněny negativní dopady na ozonovou vrstvu, ovšem není eliminován vliv na skleníkový efekt (R 23, R 32, R 125, R 152a, R 134a , R 227ea, R 236fa),
- **Směsná chladiva:** R 407C ; R 410A ; R 417A; R 507 [29]

2.3.6.1 Podmínky proudění

Tepelná čerpadla používající jako zdroj energie půdní masiv často pracují s teplotním rozdílem na výparníku (Δt) kolem 4 – 5 K. Předpokládejme, že tepelná kapacita teplotnosné kapaliny (c) je okolo $3,8 \text{ KJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, pak bude průtok (m) okolo $3,2 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ na každý kW přenosu tepla (Q). Vycházíme z následujícího vztahu:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad [\text{J}] \quad (4)$$

Pro efektivní přenos tepla z trubky potrubí do tekutiny by měl tok být turbulentní. Například pokud budeme zvažovat typický 25 metrů Slinky výkop, navržený k získání 2 kW tepla ze zemního zdroje, s využitím potrubí o průměru 26 milimetrů, vidíme, že průtok $6,4 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ ($2 \times 3,2 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$) nebude stačit k vytvoření turbulentního toku, pokud je 30 % chladicí kapalinou etylenglykol (viz tab. 4). Tím pádem musí být náš první odhad průtoku teplotnosné kapaliny změněn směrem vzhůru k vytvoření turbulentního toku. Proto je potřeba pečlivě zvážit průměr potrubí, typ teplotnosné kapaliny, provozní požadavky tepelného čerpadla a délku zemního výměníku tak, abychom navrhli optimálně fungující systém. [11]

Tab. 4: Vlastnosti vody a různých nemrznoucích roztoků při různých teplotách a potřebné rychlosti proudění (F_{turb}) pro $Re > 3000$ (turbulentní průtok) pro potrubí o vnitřním průměru 35,4 mm a 26 mm (odpovídá 32 mm vnějšího průměru potrubí o tloušťce stěny 3 mm). [30]

Látka	Bod mrznutí [°C]	Viskozita [$\frac{kg}{m \cdot s}$]	Hustota [$\frac{kg}{m^3}$]	F_{turb} 35.4 mm [$\frac{l}{min}$]	F_{turb} 26 mm [$\frac{l}{min}$]
Voda - 5 °C	0	0,00152	1000	7,6	5,6
Voda - 10 °C	0	0,001308	999,8	6,5	4,8
Voda - 15 °C	0	0,001139	999,2	5,7	4,2
Voda - 20 °C	0	0,001003	998,3	5,0	3,7
Voda - 25 °C	0	0,000891	997,2	4,5	3,3
Voda - 30 °C	0	0,000798	995,8	4,0	2,9
Voda - 35 °C	0	0,00072	994,1	3,6	2,7
30.5% Etylene glykol - 0 °C	-15	0,00438	1046	21,0	15,4
32.9% Propylene glykol - 0 °C	-15	0,00812	1034	39,3	28,9
24.4% Etanol - 0 °C	-15	0,00585	972	30,1	22,1
19.9% Metanol - 0 °C	-15	0,00326	973	16,8	12,3
18.8% Chlorid sodný - 0 °C	-15	0,00257	1146	11,2	8,2
24.0% Octan draselný - 0 °C	-15	0,00336	1130	14,9	10,9

Obecně se teplota teplosné kapaliny pohybuje v rozmezí od 0 °C do 5 °C (ovšem může být i nižší, a to při krátkodobých špičkových podmínkách). V Německu je doporučení přesnější, kdy se uvádí, že teplota kapaliny vracející se ze smyčky do tepelného čerpadla by se neměla lišit o ± 12 °C od běžné teploty země při běžném zatížení (tzn. týdenní průměr), nebo o více než ± 18 °C za špičkových podmínek. Předpokládáme-li teplotu země 10 °C v mírném pásmu (včetně České republiky), tak typická přijatelná teplota při běžném zatížení je -2 °C při vytápění a 22 °C při využití čerpadla pro chlazení objektu, přičemž při extrémních špičkových podmínkách tyto teploty nepřesahují -8 °C a 28 °C. [11]

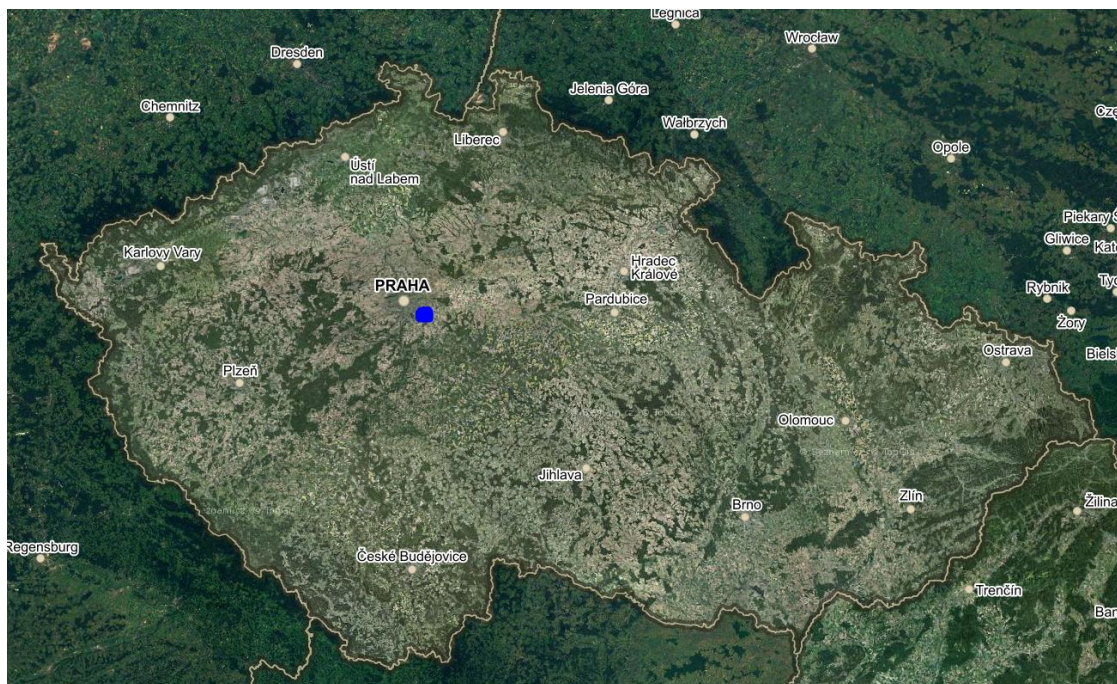
3 Cíl práce

Cílem práce je porovnání a analýza teplot a tepelných toků u dvou různých konfigurací nízkoteplotních horizontálních zemních výměníků (Slinky a lineární) z hlediska jejich vlivu na provoz tepelných čerpadel.

Dílčím cílem práce je ověřit za jakých okolností a s jakou pravděpodobností bude teplota teplotonosné látky přiváděné z výměníku na výparník alespoň o 2 K vyšší než teplota vypařování pracovní látky ve výparníku, tedy 0 °C. Tato teplota má výrazný vliv na efektivitu celé aplikace tepelného čerpadla (respektive na topný faktor). Topný faktor je totiž tím vyšší, čím menší je rozdíl mezi teplotou, při které odvádíme teplo na kondenzátoru tepelného čerpadla a právě teplotou při které přivádíme teplo na výparník tepelného čerpadla. Teplotu při, které odvádíme teplo z kondenzátoru lze ovlivnit pomocí otopné soustavy (konvenční otopné plochy, sálavé otopné plochy atd.), tedy například čím větší je plocha otopné soustavy tím nižší může být teplota otopných ploch použitých pro vytápění. Teplota na výparníku je ovlivněna především použitým nízkoteplotním zdrojem (v našem případě podpovrchový zemní masiv či vzduch).

4 Metodika a měření

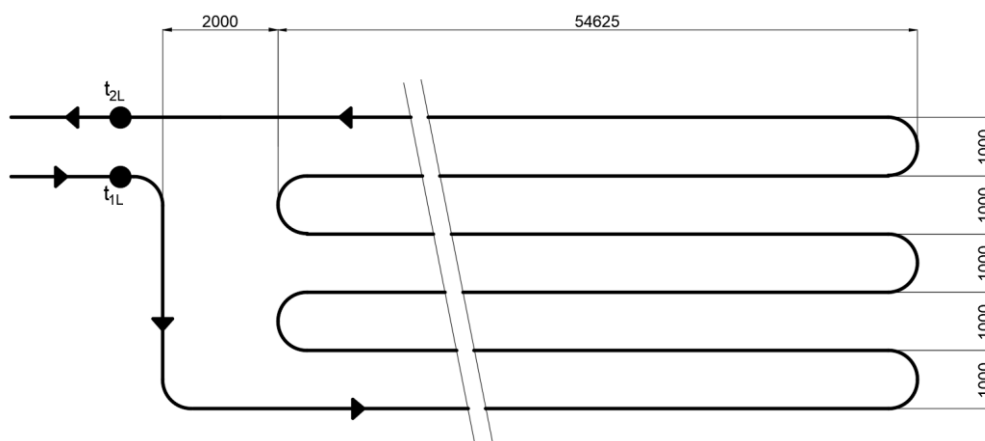
Měření a ověřování výsledků probíhalo na pozemku společnosti Veskom s. r. o. se sídlem v Dolních Měcholupech (Dolnoměcholupská 522/12a, Okres Praha), kde jsou sledované výměníky používány pro provoz tepelných čerpadel IVT PremiumLine EQ Q17 (Industriell Värme Teknik, Tnanas, Sweden), které slouží k vytápění a ohřevu teplé vody v administrativní budově v sídle firmy. (Sídlo firmy je vyznačené na mapě modrou barvou.)



Obr. 16: Umístění měřené lokality v rámci ČR

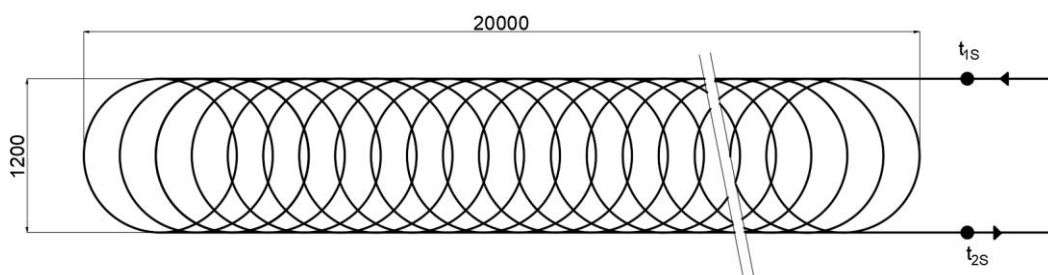
Měřené území se nachází ve výšce 256 metrů nad mořem a výpočtová teplota se v této lokalitě uvažuje $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lineární horizontální zemní výměník je vyroben z polyetylenového potrubí PE 100 RC 40 x 3,7 mm (LUNA PLAST a. s., Hořín, Česká republika). Tento materiál vykazuje vysokou odolnost vůči bodovému zatížení a vzniku trhlin. Celková délka trubek výměníku je 330 m (délka jednotlivých smyček je 54,625 m), které vytvářejí plochu $41,469\text{ m}^2$. Výměník je instalován bez pískového lože systémem tří smyček uložených v hloubce 1,8 m a vzdálenost jednotlivých trubek od sebe je 1 m. Okolní zemní masiv je složen z tmavě hnědé písčitohlinité půdy, hrubozrnného štěrku, kamenné drtě a úlomků cihel. Použitou teplonosnou kapalinou je 33 % etylalkohol ve směsi se 67 % vody. Výsledné teploty jsou naměřeny pomocí odporových teplotních čidel Pt 1000/A (výrobce GREISINGER electronics GmbH, Regenstauf Germany) umístěných dle obrázku:



Obr. 17: Schéma měřeného lineárního horizontálního zemního výměníku

Horizontální výměník typu Slinky je také vyrobeno z polyetylenového potrubí PE 100 RC o průměru 32 mm a tloušťce stěny 2,9 mm (LUNA PLAST a. s., Hořín, Česká republika), které je opět opatřeno vysokou odolností proti bodovému zatížení a odolností proti vzniku trhlin. Celková délka výměníku je 200 m a vytváří plochu 20,107 m². Potrubí vytváří 53 smyček stočených do kruhu s roztečí 0,38 m a je uloženo do hloubky 1,5 m. Teplonosnou kapalinou použitou ve výměníku je rovněž směs 33 % etylalkoholu s 67 % vody. Výsledné teploty jsou naměřeny pomocí odporových teplotních čidel Pt 1000/A umístěných dle obrázku:



Obr. 18: Schéma měřeného horizontálního zemního výměníku typu Slinky

Teplota venkovního vzduchu t_e je naměřena pomocí teplotního čidla KTY 81.210, které je umístěno ve vzdálenosti 20 m od horizontálního zemního výměníku na fasádě budovy ve výšce 2 m.

Měření probíhalo v otopné sezóně 2012/1013, konkrétně v době od 17. 9. 2012 do 22. 4. 2013. Měření se zaznamenávalo každou hodinu, tzn., že celkový počet měření se rovnal 5 232 hodnotám ke každému teplotnímu čidlu.

5 Výsledky a diskuze

Průběh měření a výsledky jednotlivých teplot jsou ovlivněny především venkovní teplotou vzduchu. Otopná sezóna 2012/2013 byla průměrná či lehce nadprůměrná, jak uvádí TZB-info.cz, takže měřené hodnoty by měly odpovídat průměrné topné sezóně v České republice. [31]

5.1 Teploty venkovního vzduchu

Tab. 5: Četnosti naměřených venkovních teplot

Název intervalu	Dolní hranice intervalu	Horní hranice intervalu	Četnost n_i	Četnost w_i [%]	Kumulativní w_i [%]
A	-17,99	-16,00	6	0,11	0,11
B	-15,99	-14,00	4	0,08	0,19
C	-13,99	-12,00	4	0,08	0,27
D	-11,99	-10,00	2	0,04	0,31
E	-9,99	-8,00	41	0,78	1,09
F	-7,99	-6,00	89	1,70	2,79
G	-5,99	-4,00	285	5,45	8,24
H	-3,99	-2,00	419	8,01	16,25
CH	-1,99	0,00	666	12,73	28,98
I	0,01	2,00	643	12,29	41,27
J	2,01	4,00	567	10,84	52,10
K	4,01	6,00	668	12,77	64,87
L	6,01	8,00	566	10,82	75,69
M	8,01	10,00	469	8,96	84,65
N	10,01	12,00	273	5,22	89,87
O	12,01	14,00	183	3,50	93,37
P	14,01	16,00	134	2,56	95,93
Q	16,01	18,00	89	1,70	97,63
R	18,01	20,00	52	0,99	98,62
S	20,01	22,00	41	0,78	99,41
T	22,01	24,00	20	0,38	99,79
U	24,01	26,00	8	0,15	99,94
V	26,01	28,00	3	0,06	100,00

Z naměřených hodnot venkovního vzduchu vyplývá, že teplota se během topné sezóny pohybovala nejčastěji v intervalu K (tedy teploty od 4,01 do 6,00 °C). V tomto intervalu bylo celkem 12,77 % naměřených hodnot. Dokonce když vezmeme v úvahu interval F-Q (od -5,99 do 18 °C), tak celkem 96,54 % všech naměřených hodnot se nachází právě

v tomto intervalu. Za teplotní extrémny můžeme považovat hodnoty klesající pod -10 °C , kterých v celém otopném období bylo pouze 16 a celkově nejnižší naměřená teplota je z 26. 1. 2013 a měla hodnotu $-17,23\text{ °C}$.

Mezi další statistické údaje vycházející z měření patří především průměrná teplota v celém otopném období, která se rovná $3,98\text{ °C}$. Mediánem je hodnota $3,69\text{ °C}$. Celkové variační rozpětí je $43,79\text{ K}$. Horním kvartilem je hodnota $7,92\text{ °C}$ a dolním kvartilem je $-0,65\text{ °C}$, tedy 50 % procent všech naměřených dat lišících se o $\pm 25\%$ od mediánu je v intervalu od $-0,65$ do $7,92\text{ °C}$. (Statistické údaje jsou v následující tabulce).

Tab. 6: Statistické hodnoty naměřených hodnot venkovního vzduchu

Průměr \bar{x} [$^{\circ}\text{C}$]	3,98
Směr. odchylka σ [K]	6,21
Maximum x_{max} [$^{\circ}\text{C}$]	26,57
Minimum x_{min} [$^{\circ}\text{C}$]	-17,23
Medián [$^{\circ}\text{C}$]	3,69
Dolní kvartil Q_1 [$^{\circ}\text{C}$]	-0,65
Horní kvartil Q_2 [$^{\circ}\text{C}$]	7,92
Rozptyl S^2 [K^2]	38,59
Variační rozpětí R_v [K]	43,79
Kvartilové rozpětí R [K]	8,56
$Q_1 - x_{min}$	16,58
Počet hodnot v souborech	5 232

5.2 Lineární výměník

Z naměřených hodnot lineárního výměníku vyšlo najevo, že teploty teplotnosné kapaliny na výstupu výměníku (vstupu do výparníku tepelného čerpadla) za dané otopné období ani jednou neklesly pod 0 °C . Dokonce ani v období konce ledna, kdy se teploty venkovního vzduchu pohybovaly pod hranicí -10 °C , se teploty na výstupu z výměníku nedostaly pod hodnotu 2 °C , což může svědčit o správné aplikaci výměníku v optimální hloubce, jelikož ani takovéto teplotní extrémny nijak výrazně neovlivňují teploty pod povrchem. Nejnižší naměřená teplota $1,67\text{ °C}$ je z 1. 4. 2013, tedy téměř na konci topné sezóny, kdy už je teplotní potenciál zemního masivu téměř vyčerpán. Teploty na výstupu

z výměníku se nejčastěji pohybovaly v intervalu K (od 4,01 do 6 °C), ve kterém bylo naměřeno přes jednu třetinu všech hodnot.

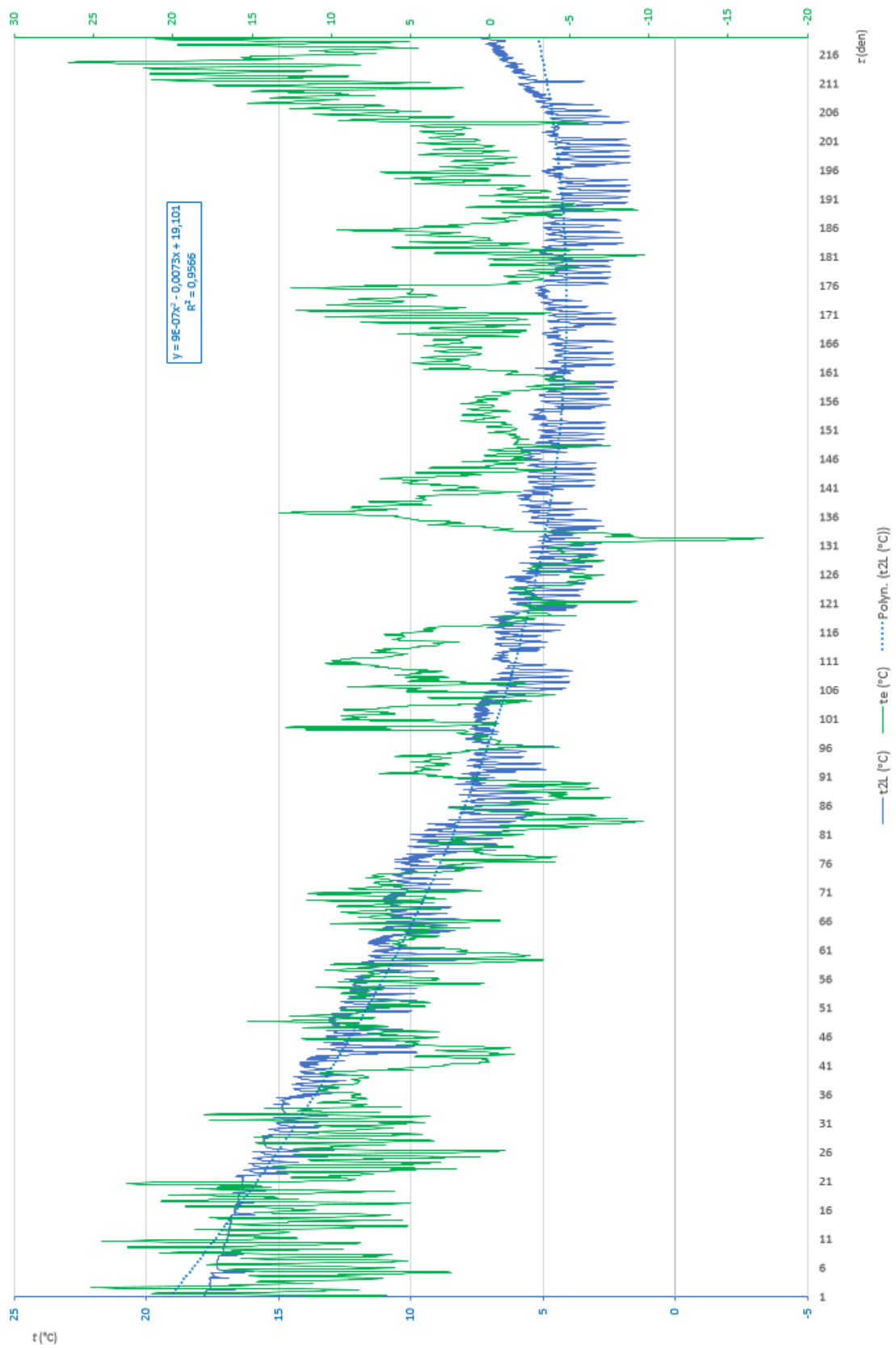
Tab. 7: Četnosti naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2L})

Název intervalu	Dolní hranice intervalu	Horní hranice intervalu	Četnost n_i	Četnost w_i [%]	Kumulativní w_i [%]
I	0,01	2,00	44	0,84	0,84
J	2,01	4,00	613	11,72	12,56
K	4,01	6,00	1 781	34,04	46,60
L	6,01	8,00	855	16,34	62,94
M	8,01	10,00	261	4,99	67,93
N	10,01	12,00	471	9,00	76,93
O	12,01	14,00	344	6,57	83,51
P	14,01	16,00	350	6,69	90,19
Q	16,01	18,00	513	9,81	100,00

Průměrná teplota t_{2L} za otopné období 2012/2013 je 8,13 °C. Medián naměřených hodnot je 6,39 °C. Za zmínku stojí jednoznačně poměrně nízké variační rozpětí 16,15 K, které má vyznaný vliv na topný faktor tepelného čerpadla a čím nižší je toto variační rozpětí, tím stabilnější může být i topný faktor, což umožňuje jednodušší výpočet a návrh celého systému. (Další statistické hodnoty lineárního výměníku v tab. 8)

Tab. 8: Statistické hodnoty naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2L})

Průměr \bar{x} [°C]	8,13
Směr. odchylka S [K]	4,50
Maximum x_{max} [°C]	17,82
Minimum x_{min} [°C]	1,67
Medián [°C]	6,39
Dolní kvartil Q_1 [°C]	4,63
Horní kvartil Q_2 [°C]	11,40
Rozptyl S^2 [K ²]	20,23
Variační rozpětí R_v [K]	16,15
Kvartilové rozpětí R [K]	6,77
$Q_1 - x_{min}$	2,95
Počet hodnot v souborech	5 232



Obr. 19: Výsledky měření teplot teplotné kapaliny výstupu lineárního výměníku a teploty venkovního vzduchu

Naměřené hodnoty lineárního výměníku z celého otopného období (od 17. 9. 2012 do 22. 4. 2013) jsou zaznamenány na obr. 19. Teploty teplotnosné kapaliny t_{1L} a t_{2L} lze na základě naměřených teplot vyjádřit rovnicí:

$$t_{1L} = 1 \cdot 10^{-06} n^2 - 0,0094n + 18,433 \quad (R^2 = 0,8381) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5)$$

$$t_{2L} = 9 \cdot 10^{-07} n^2 - 0,0073n + 19,101 \quad (R^2 = 0,9566) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6)$$

Kde:

t_{1L} – teplota teplotnosné kapaliny na vstupu do výměníku [$^{\circ}\text{C}$],

t_{2L} – teplota teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku [$^{\circ}\text{C}$],

n – pořadí měření od začátku topné sezóny (17.09.2012) [-]

5.3 Výměník Slinky

Z naměřených hodnot výměníku typu Slinky je zřejmé, že teploty stejně jako u výměníku lineárního se nepohybovali pod hranicí 0 $^{\circ}\text{C}$, přesto jsou teploty na výstupu z výměníku oproti lineárnímu výměníku nižší. Nejnižší naměřená teplota na výstupu z výměníku byla 0,39 $^{\circ}\text{C}$ (ze 2. 4. 2013), tedy téměř na bodu mrznutí vody, což by při dlouhodobých extrémních teplotách mohlo znamenat mrznutí půdy v okolí výměníku a muselo by se dávat pozor na vlastnosti teplotnosné kapaliny, aby byla patřičně snížena teplota bodu tuhnutí. Oproti lineárnímu výměníku se posunul interval nečastější naměřené teploty o -2 $^{\circ}\text{C}$ (nejčastější interval je od 2,01 do 4 $^{\circ}\text{C}$).

Tab. 9: Četnosti naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2S})

Název intervalu	Dolní hranice intervalu	Horní hranice intervalu	Četnost n_i	Četnost w_i [%]	Kumulativní w_i [%]
I	0,01	2,00	668	12,77	12,77
J	2,01	4,00	1 722	32,91	45,68
K	4,01	6,00	834	15,94	61,62
L	6,01	8,00	440	8,41	70,03
M	8,01	10,00	447	8,54	78,57
N	10,01	12,00	231	4,42	82,99
O	12,01	14,00	269	5,14	88,13
P	14,01	16,00	218	4,17	92,30
Q	16,01	18,00	403	7,70	100,00

Průměrná teplota t_{s2} za topnou sezónu 2012/2013 je 6,36 °C, tedy v průměru je výstupní teplota z výměníku Slinky o necelé 2 °C nižší než výstupní teplota u výměníku lineárního. (Další statistické hodnoty výměníku typu Slinky v tab. 10)

Tab. 10: Statistické hodnoty naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2S})

Průměr \bar{x} [°C]	6,36
Směr. odchylka S [K]	4,79
Maximum x_{max} [°C]	17,97
Minimum x_{min} [°C]	0,39
Medián [°C]	4,59
Dolní kvartil Q_1 [°C]	2,78
Horní kvartil Q_2 [°C]	8,92
Rozptyl S^2 [K ²]	22,95
Variační rozpětí R_v [K]	17,59
Kvartilové rozpětí R [K]	6,15
$Q_1 - x_{min}$	2,39
Počet hodnot v souborech	5 232

Naměřené hodnoty výměníku typu Slinky z celého otopného období (od 17. 9. 2012 do 22. 4. 2013) jsou zaznamenány v grafu 5. Teploty teplotnosné kapaliny t_{1S} a t_{2S} lze na základě naměřených teplot vyjádřit rovnicí:

$$t_{1S} = 1 \cdot 10^{-06} n^2 - 0,0094n + 18,478 \quad (R^2 = 0,8361) \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

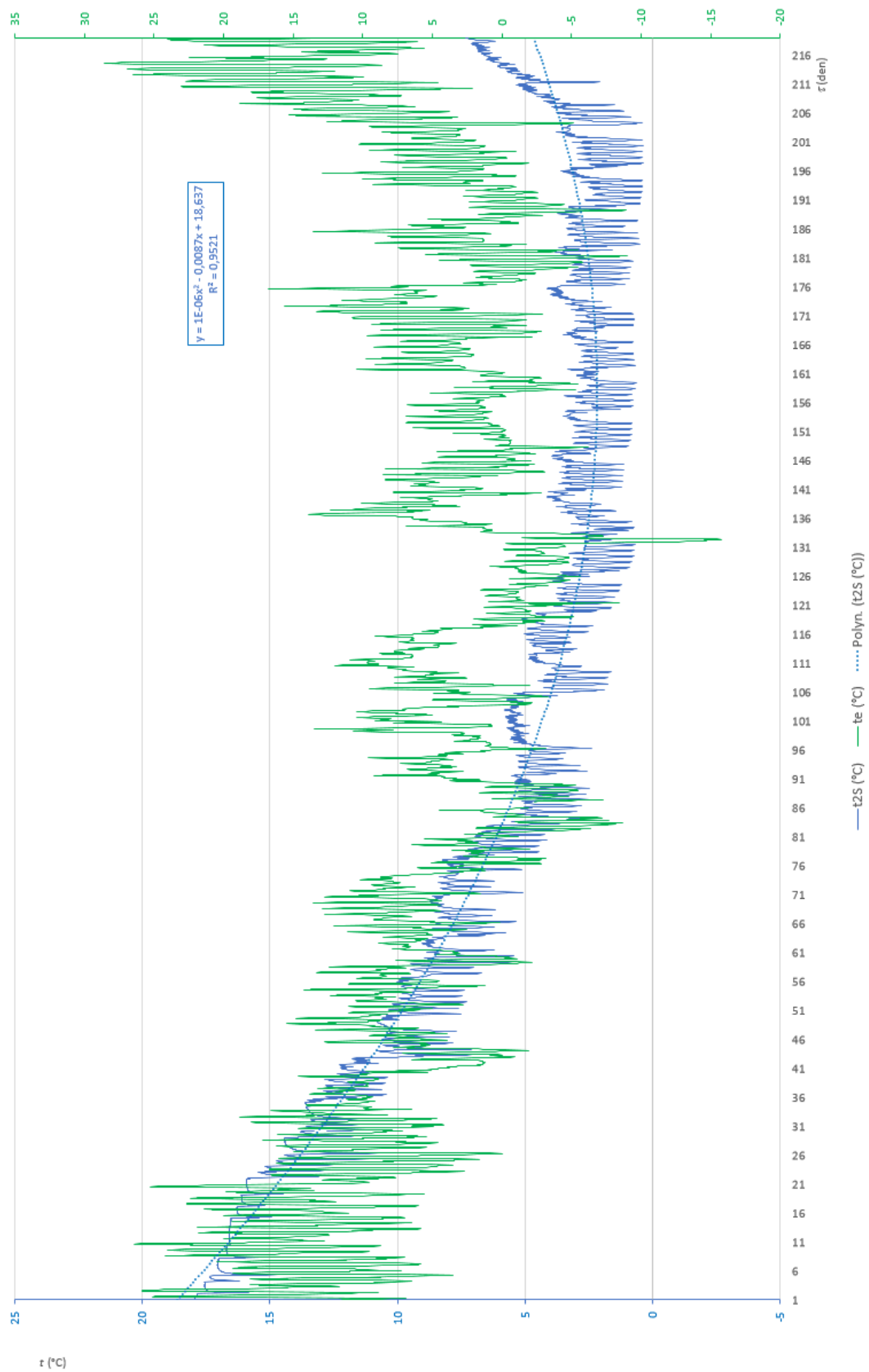
$$t_{2S} = 1 \cdot 10^{-06} n^2 - 0,0087n + 18,637 \quad (R^2 = 0,9521) \quad [^\circ\text{C}] \quad (8)$$

Kde:

t_{1S} – teplota teplotnosné kapaliny na vstupu do výměníku [°C],

t_{2S} – teplota teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku [°C],

n – pořadí měření od začátku topné sezóny (17.09.2012) [-]



Obr. 20: Výsledky měření teplot teplotné kapaliny na výstupu výměníku typu Slinky a teploty venkovního vzduchu

5.4 Porovnání tepelných charakteristik Slinky/Lineár

Při zpracování tepelných vlastností jednotlivých výměníků je vycházeno především z následující rovnice:

$$Q = (m \cdot c \cdot \Delta t) / 1000 \quad [\text{J}] \quad (9)$$

Kde:

Q – teplo předané teplotonosnou kapalinou do výparníku tepelného čerpadla [kJ],

m – hmotnost teplotonosné kapaliny [kg],

Δt – rozdíl teplot na vstupu do výměníku a na výstupu z výměníku ($t_2 - t_1$) [K]

Hmotnost teplotonosné kapaliny (m) se přitom vypočte pomocí hustoty teplotonosné kapaliny za dané teploty (ρ) a jejího objemu dle:

$$m = V \cdot \rho \quad [\text{kg}] \quad (10)$$

Výsledné teplo poté pomocí plochy výměníku přepočteme na 1 m^2 , pro lepší porovnání obou výměníků dle:

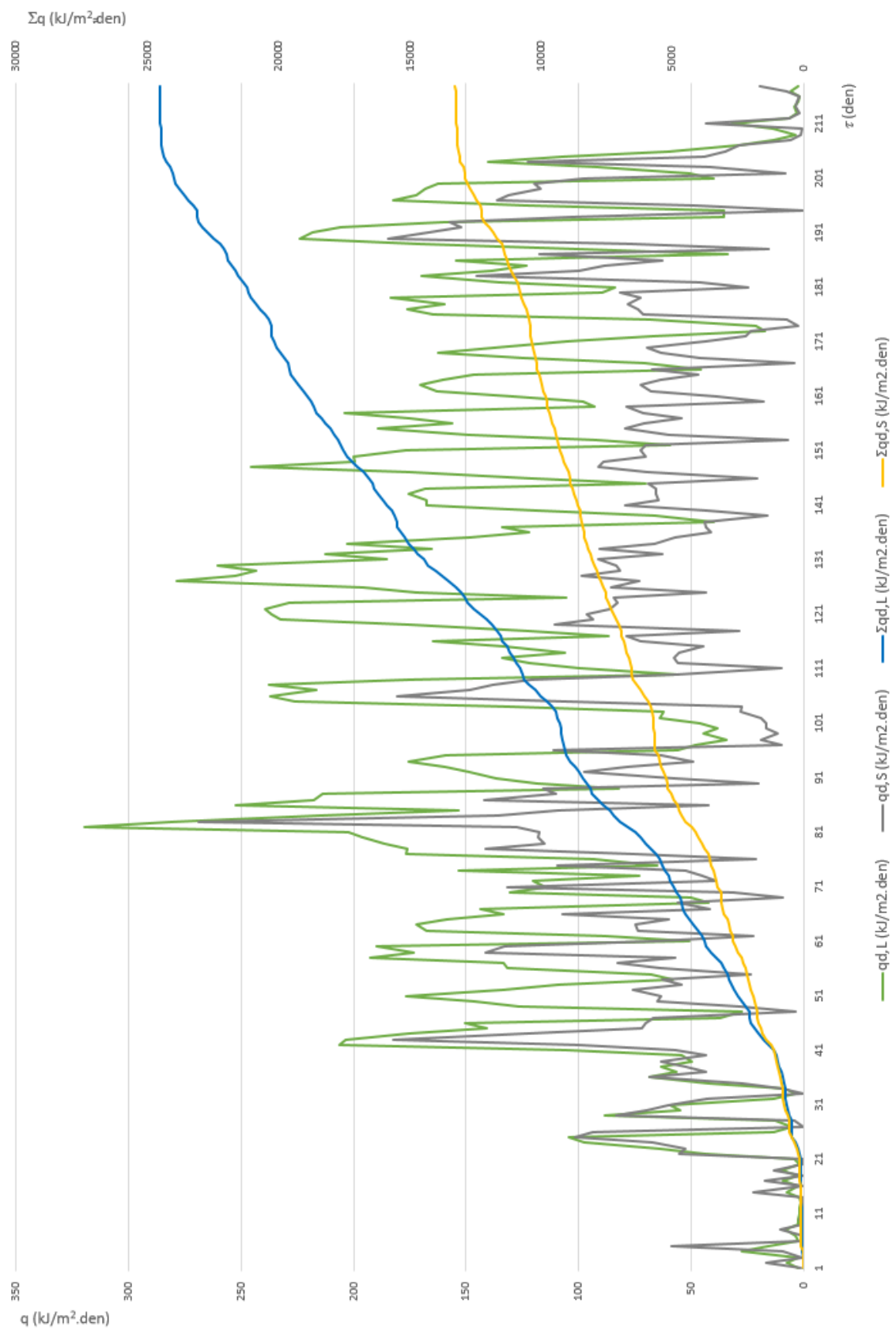
Lineární výměník:

$$q_L = Q / 41,469 \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (11)$$

Výměník Slinky:

$$q_S = Q / 20,107 \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (12)$$

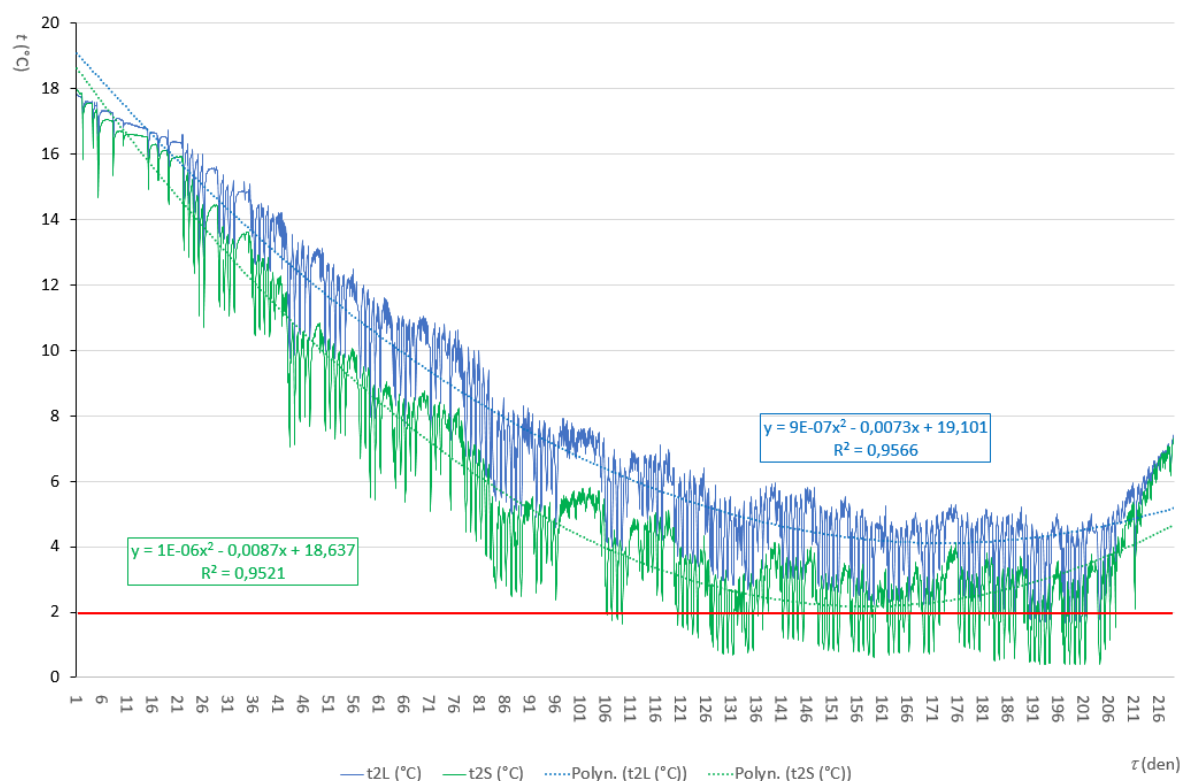
Vypočtené hodnoty jsou zpracovány v obr. 21, ze kterého vyplývá, že lineární výměník předá za celé otopné období poměrně výrazně více tepla než výměník typu Slinky. U Lineárního výměníku za celé otopné období odebereme z 1 m^2 ze zemního masivu $24\,538,85 \text{ kJ/m}^2$, zatímco u výměníku typu Slinky je hodnota odebraného tepla téměř o polovinu nižší, a to $13\,271,16 \text{ kJ/m}^2$. Také je patrné, že oba výměníky na začátku a na konci otopné sezóny odebírají výrazně méně tepla, což je způsobené především vyššími teplotami venkovního vzduchu a tím menší potřebě tepla ve vytápěném objektu.



Obr. 21: Průběh využitého tepla jednotlivými typy výměníků vztáženého na plochu 1 m²

5.5 Ověření hypotézy

Dílčím cílem této diplomové práce bylo ověřit hypotézu, zda a za jakých podmínek bude teplota teplotnosné kapaliny přivedená na výparník tepelného čerpadla z jednotlivých výměníků o 2 K vyšší než teplota vypařování pracovní látky ve výparníku, jestliže teplota vypařování pracovní látky je 0 °C.



Obr. 22: Teploty teplotnosné kapaliny vstupující do výparníku tepelného čerpadla u lineárního výměníku (modrá) a Slinky (zelená)

Na obr. 22 si lze všimnout, že pokud bychom vzali spojnici trendu hodnot z jednotlivých měření, tak by teplotnosná kapalina přicházející na výparník vždy splňovala podmínky, tedy byla by vždy alespoň o 2 K vyšší než teplota vypařování pracovní látky.

Pokud bychom vzali v úvahu všechny naměřené teploty, tak u lineárního výměníku se pod hranici 2 °C pohybovalo pouze 44 hodnot, což je necelé 1 % všech měření (konkrétně 0,84 % – viz tab. 7). U výměníku typu Slinky je ovšem poněkud rozdílná situace a hodnot, které by nesplňovaly podmínku hypotézy je mnohem více. 668 naměřených teplot teplotnosné kapaliny na vstupu do výparníku tepelného čerpadla menších než 2 °C znamená, že pravděpodobnost výskytu takové hodnoty je 12,77 % (viz tab. 8). To znamená, že teplotu vypařování pracovní látky ve výparníku by v případě Slinky

výměníku bylo vhodné upravit na alespoň $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, protože při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bychom v mnoha případech nedosáhli dostatečného rozdílu teplot mezi teplotou teplotnosné kapaliny vystupující ze Slinky výměníku a teplotou vypařování pracovní látky v oběhu tepelného čerpadla.

6 Závěr a diskuze

V diplomové práci byly sledovány a analyzovány teploty vzduchu a především jejich vliv na teploty teplotnosné na výstupu z horizontálního lineárního výměníku a výměníku typu Slinky po dobu zimního otopného období 2012/2013, konkrétně od 17. 9. 2012 do 22. 4. 2013.

Výsledky měření prokázali, že hodnoty teplotnosné kapaliny na výstupu z lineárního výměníku se chovají podle rovnice (6) a na výstupu z výměníku typu Slinky podle rovnice (8). Ani v jednom případě neklesají tyto hodnoty teplot teplotnosných kapalin přivedených na výparník pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, i když u výměníku typu Slinky se dá předpokládat, že pokud by nastala dlouhá a teplotně podprůměrná zima, tak tyto teploty budou klesat i pod tuto hranici. Zatímco u lineárního výměníku byli nejnižší teploty na výstupu kolem $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, takže i při extrémnějších podmínkách by neměla tato teplota klesat pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato teplota je velice důležitá pro porovnání efektu tepelného čerpadla. Z měření vyplývá, že lepší topný faktor a tedy lepší efekt vykazuje aplikace s lineárním výměníkem, se kterým získáme menší rozdíl mezi teplotou při odvodu tepla na kondenzátoru a teplotou přívodu tepla na výparník tepelného čerpadla. Tento rozdíl je cca o $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ menší právě u lineárního výměníku než u výměníku Slinky pro téměř celé otopné.

Kdybychom uvažovali vzduch jako nízkopotenciální zdroj energie pro tepelné čerpadlo, byl by topný faktor kvůli proměnlivým teplotám vzduchu v celém otopném období při porovnání se zemním masivem nízký a výrazně nestabilní. Teploty vzduchu se totiž můžou dlouhodobě dostat i výrazně pod hranici $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, při kterých je užívání tepelného čerpadla pro vytápění velice neefektivní a bylo by tak nutné použití takového čerpadla pouze jako druhotný zdroj energie, který by byl doplněn špičkovým zdrojem tepla.

Z hlediska získaných teplotních toků z obou výměníků ve sledovaném období vychází výrazně lépe výměník lineární, kterým jsme při vytápění sledovaného objektu získali téměř dvojnásobnou hodnotu oproti výměníku Slinky. U Slinky byl naměřen celkový tepelný tok získaný za celé otopné období $13\,271,16\text{ kJ/m}^2$ a u lineárního $24\,538,85\text{ kJ/m}^2$.

Ovšem tyto hodnoty jsou zhodnoceny pouze pro jedno poměrně teplotně průměrné otopné období. Pro ověření výsledků by bylo potřeba zaměřit teploty ve více otopných obdobích, především při extrémních podmínkách, a to jak nadprůměrných, tak i podprůměrných. Při dalších měřeních by bylo vhodné sledovat, zda teplotní masiv dokáže přes letní období dostatečně zregenerovat a dosáhnout opět obdobných hodnot jako ve sledovaném období.

7 Zdroje

- [1] HOŘEJŠÍ M. *Tepelná čerpadla pro každého (I)*, [online]. 2002 [Citováno 2017-12-10]. Dostupný z <<http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/953-tepelna-cerpadla-pro-kazdeho-i>>
- [2] Firemní materiály společnosti EKO VY s.r.o, [online]. [cit. 2018-1-2]. Dostupný z <www.ekovy.cz/funkce.htm>
- [3] EHPA. *European Heat pump market and statistic report 2015*, [online]. [Citováno 2017-12-7]. Dostupný z <<http://www.ehpa.org>>
- [4] SRDEČNÝ, K. - TRUXA, J. *Tepelná čerpadla*. 1. vydání. Brno: ERA, 2005. 68 s. ISBN 80-7366-031-8.
- [5] ŠMÍDA, I. *Tepelná čerpadla a jejich použití v otopných soustavách (I)*, [online]. Český instalatér, 2002. 38 s. Dostupné z <<https://www.tzb-info.cz/1271-tepelna-cerpadla-a-jejich-pouziti-v-otopnych-soustavach-i>>
- [6] HARRIS R. *Locating a Geothermal Heating System*, [online]. 2015 [Citováno 2017-12-10]. Dostupný z <<https://undergrounddetective.com/locating-a-geothermal-heating-system>>
- [7] OZGENER L. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online]. 2011 [citováno 2018-2-15]. Dostupný z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111003480>>
- [8] BANKS, D. *An Introduction to Thermogeology: Ground source heating and cooling*. 2. vydání, Malaysia: Vivar printing, 2012. 526 s. ISBN: 978-0-470-67034-7
- [9] FÜRI B., HAVELSKÝ V., MASARYK M., MEČÁRIK K. *Tepelné čerpadlá*. 1. vydání. Bratislava: Alfa, 1995. 328 s.
- [10] ADAMOVSKEÝ, R. *Analýza teploty zemního masivu při použití horizontálního spirálového výměníku*, [online]. 2013 [Citováno 2018-1-30]. Dostupný z <<http://www.stpcr.cz/>>

- [11] BANKS, D. *An Introduction to Thermogeology: Ground source heating and cooling*. 1. vydání, Oxford: Blackwell Publishing, 2008. 339 s. ISBN: 978-1-4051-7061-1
- [12] ADAMOVSÝ R., NEUBERGER P., ŠEĐOVÁ M. *Analyzing temperature changes in the ground massif with a horizontal heat exchanger in the course of the heating season*. Krakow: Polish Academy of Sciences, 2010. Dostupný z <<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.dl-catalog-5d1202c4-33f4-4a3b-84e0-aed21a3dad6/c/Adamovsky.pdf>>
- [13] RYŠKA J., BROŽ K. *Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (V)*, [online]. 2006 [cit. 2018-1-2]. Dostupný z <<http://www.tzb-info.cz/3665-vrty-dohorninoveho-masivu-zdroj-energie-pro-tepelna-čerpadla-v>>
- [14] ČÍŽEK, P. *Zemní tepelné výměníky tepelných čerpadel se neobejdou bez podzemní vody*, [online]. 2005 [cit. 2018-5-12]. Dostupný z <http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm>
- [15] BRANDL, H. *Energy foundation and other thermo-active ground structures*. [online]. 2006 [Citováno 2018-5-2]. Dostupný z <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/geot.2006.56.2.81>>
- [16] KOLEKTIV. *Topenářská příručka*. Svazek 1. Praha: GAS s.r.o., 2001. ISBN 80-86176-82-7.
- [17] VRTEK M. *Sluneční energie*, [Online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012 [Citováno 2018-2-15]. Dostupný z <https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/21/IUT/140_Slunecni_energie_-_Vrtek_-_P3.pdf>
- [18] ŠKORPÍK J. *Sluneční záření jako zdroj energie*, [online]. Brno: Jiří Škorpík, 2006 [Citováno 2018-20-12]. Dostupný z <<http://www.transformacni-technologie.cz/02.html>>
- [19] Firemní materiály společnosti ETRACOM s.r.o., [online]. 2018 [Citováno 2018-1-2]. Dostupný z <<http://www.etracom.cz>>
- [20] ROSEN B., GABRIELSSON A., FALLSVIK J., HELLSTROM G., NILSSON, G. *Systems for ground source heating and cooling – a status report – in Swedish*. 2001

- [21] CONGEDO P. M., COLANGELO G., STARAGE G. *CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations*. [online]. 2011 [citováno 2018-2-25]. Dostupný z <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.005>>
- [22] Firemní materiály společnosti SOLARENVI a.s., [online]. 2018 [Citováno 2018-1-2]. Dostupný z <<http://www.solarencvi.cz/a-46-tepelna-čerpadla-zeme-voda-zemni-plosny-kolektor.html>>
- [23] PETRÁŠ D. a kol. *Nizkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie*. 1. vydání. Praha: Jaga, 2010. 207 s. ISBN 978-80-8076-069-4
- [24] GO G.H., LEE S.R., NIKHIL N.V., YOON S. *A new performance evaluation algorithm for horizontal GCHPs (ground coupled heat pump systems) that considers rainfall infiltration*, [online]. 2015 [citováno 2018-3-18] Dostupný z <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.086>>
- [25] NAKAGAVA, M. *Geothermal heat pump system assisted by geothermal hot spring*, [online]. 2016 [Citováno 2018-3-5]. Dostupný z https://www.researchgate.net/figure/292188296_fig8_Figure-8-Ground-temperature-as-a-function-of-time-and-depth
- [26] GEROTop. *Primární okruhy, Odborný seminář pro pokročilé*, [online]. 2012 [Citováno 2018-3-3]. Dostupný z <<http://www.gerotop.cz>>
- [27] KARLÍK R., *Tepelné čerpadlo pro váš dům*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009. ISBN 978-80-247-2720-2
- [28] Engineering ToolBox. *Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid*, [online]. 2003 [Citováno 2018-11-20]. Dostupný z <https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html>
- [29] ADAMOVSKEÝ R. *Přednáška aplikovaná termomechanika č. 11 - Tepelná čerpadla, pracovní látky, principy, zdroje, zapojení, příklady využití*. Praha: Zemědělská univerzita v Praze, 2017 [citováno 2018-2-2].

[30] ESKILSON, P., HELLSTROM, G., CLAESSION, J., BLOMBERG, T. SANNER, B. *Earth Energy Designer (software parameter database)*, 2. verze, Sweden: Blocon software. 2000

[31] ČTK. *Topná sezona 2012-2013 končí, byla jen mírně nadprůměrná*, [online]. 2013 [Citováno 2018-3-17]. Dostupný z <<https://vytapani.tzb-info.cz/112284-topna-sezona-2012-2013-konci-byla-jen-mirne-nadprumerna>>

8 Seznam obrázků

Obr. 1: Princip tepelného čerpadla [2].....	4
Obr. 2: Nárůst tepelných čerpadel v letech 2011 a 2013 (EU) [3]	5
Obr. 3: Otevřený systém s využitím čerpací a vsakovací studny (vlevo) a systém s využitím jedné čerpací studny a vypuštěním do stojaté vody (vpravo) [6]	7
Obr. 4: Systém otevřené smyčky s předehřevem/předchlazením vzduchu [7].....	8
Obr. 5: Vertikální uzavřená smyčka (vlevo) a horizontální uzavřená smyčka (vpravo) [6]..	9
Obr. 6: Schéma nepřímé cirkulace v uzavřené smyčce použitý při vertikálním hlubinném vrtu [8]	9
Obr. 7: Schéma přímé cirkulace v uzavřené smyčce použitý při vertikálním kolektoru [8]	10
Obr. 8: Střední hodnoty úhrnů globálního záření dopadajícího v průběhu jednoho roku na území různých regionů v Česku [19].....	15
Obr. 9: Systémy uložení výměníku: a) Slinky, b) šroubovitě, c) lineární [21].....	16
Obr. 10: a) sériové zapojení b) paralelní zapojení [23]	17
Obr. 11: Šroubovitý výměník [24].....	17
Obr. 12: Závislost teploty zemního masivu (vertikální osa) v průběhu roku (horizontální osa) na hloubce měření teploty [25]	18
Obr. 13: Řez výkopem horizontálního výměníku s pískovým ložem (vlevo) a bez pískového lože (vpravo) [27].....	19
Obr. 14: Zemní rýhovačka [26]	20
Obr. 15: Závislost teploty bodu tuhnutí na koncentraci ethylen-glykolu ve vodě [ve stupních Celsia a stupních Fahrenheita][28].....	22
Obr. 16: Umístění měřené lokality v rámci ČR	27
Obr. 17: Schéma měřeného lineárního horizontálního zemního výměníku	28

Obr. 18: Schéma měřeného horizontálního zemního výměníku typu Slinky	28
Obr. 19: Výsledky měření teplot teplotnosné kapaliny výstupu lineárního výměníku a teploty venkovního vzduchu	32
Obr. 20: Výsledky měření teplot teplotnosné kapaliny na výstupu výměníku typu Slinky a teploty venkovního vzduchu	35
Obr. 21: Průběh využitého tepla jednotlivými typy výměníků vztaženého na plochu 1 m ²	37
Obr. 22: Teploty teplotnosné kapaliny vstupující do výparníku tepelného čerpadla u lineárního výměníku (modrá) a Slinky (zelená)	38

9 Seznam tabulek

Tab. 1: Tepelná čerpadla v Evropě – prodej a celkový počet [3]	4
Tab. 2: Součinitele tepelné vodivosti zemin a hornin [14]	13
Tab. 3: Tepelných vodivosti materiálů používaných pro potrubí v podpovrchových horizontálních výměnících tepla [8]	21
Tab. 4: Vlastnosti vody a různých nemrznoucích roztoků při různých teplotách a potřebné rychlosti proudění (F_{turb}) pro $Re > 3000$ (turbulentní průtok) pro potrubí o vnitřním průměru 35,4 mm a 26 mm (odpovídá 32 mm vnějšího průměru potrubí o tloušťce stěny 3 mm). [30]	25
Tab. 5: Četnosti naměřených venkovních teplot	29
Tab. 6: Statistické hodnoty naměřených hodnot venkovního vzduchu	30
Tab. 7: Četnosti naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2L})	31
Tab. 8: Statistické hodnoty naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2L})	31
Tab. 9: Četnosti naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2S})	33
Tab. 10: Statistické hodnoty naměřených teplot teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (t_{2S})	34