

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



**Analýza nízkoteplotních zdrojů energie – výměník
typu Slinky, výměník typu U, vzduch**

Diplomová práce

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

Diplomant: Jan Jindra

PRAHA 2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Jindra

Technologická zařízení staveb

Název práce

Analýza nízkoteplotních zdrojů energie – výměník typu Slinky, výměník typu U, vzduch

Název anglicky

Analysis of the low-temperature energy sources – slinky heat exchanger, single U tube heat exchanger, air

Cíle práce

Analýza a komparace nízkoteplotních zdrojů energie z hlediska jejich vlivu na provoz tepelných čerpadel, topný faktor, efektivnost a životní prostředí.

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

tepelná čerpadla; výměník tepla; nízkoteplotní zdroj energie; zemní masiv; teplota; tepelný tok; topný faktor

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, Lars. 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 – 2014. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/>. ISSN 1801-4399.

NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKEÝ Radomír, ŠEDOVIÁ 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* 70, (2014) 441– 54. ISSN 0378-7788.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2016

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 01. 2017

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Analýza nízkoteplotních zdrojů energie – výměník typu Slinky, výměník typu U, vzduch 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 31.3.2017

.....

Podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Radomíru Adamovskému, DrSc.za jeho cenné rady a čas, který se mnou velmi ochotně strávil. Dále bych chtěl poděkovat všem ostatním, kteří mi poskytli cenné informace ohledně tohoto tématu z jiných pracovišť. V neposlední řadě musím poděkovat svým blízkým, kteří mě po celou dobu psaní této práce podporovali.

Analýza nízkoteplotních zdrojů energie – výměník typu Slinky, výměník typu U, vzduch

Abstrakt

Cílem této práce je analyzovat přehled a porovnat typy tepelných čerpadel podle jejich zdroje nízkoteplotní energie. Hlavní část práce je věnovaná porovnání horizontálních výměníků Slinky, vertikálních U výměníků a vzduchu v reálném provozu za jednu topnou sezónu. Výměníky a vzduch se porovnávají z hlediska jejich vlivu na topný faktor nebo-li účinnost tepelného čerpadla. V topném období byly měřeny každou hodinu teploty vstupující na výparník tepelného čerpadla a následně statisticky zpracovány a vyhodnoceny. Provedeným výzkumem bylo zjištěno, že z hlediska účinnosti a topného faktoru vychází jednoznačně nejlépe vertikální U výměník, následuje horizontální Slinky výměník a poslední nejméně účinný je okolní vzduch kvůli své nestabilitě a velmi nízkým teplotám. Hlavním přínosem této práce jsou výsledky porovnání tepelných čerpadel v reálném provozu, které mohou být podkladem při jejich výběru pro vytápění nebo chlazení.

Klíčová slova: tepelná čerpadla; výměník tepla; nízkoteplotní zdroj energie; zemní masiv; teplota; tepelný tok; topný faktor

Analysis of the low-temperature energy sources – slinky heat exchanger, single U tube heat exchanger, air

Abstract

The aim of the thesis is to present an overview and to compare heat pumps by their sources of low-temperature energy. The main part of thesis is devoted to compare horizontal Slinky heat exchangers, vertical single tube U exchangers and ambient air by their COP (coefficient of performance) in real conditions during heating season. Temperature of inlet medium to evaporator was measured every hour during whole heating season. After that, all values were statistically evaluated. It was carried out research that in terms of efficiency and COP a single U tube heat exchanger is most efficiency followed by Slinky heat exchanger and last ambient air is much less efficiency due to its very low temperatures. The main contribution of this thesis is to compare sources of low-temperature energy for heat pumps, which could be the basis for making a choice between each one for heating and air-conditioning.

Keywords: heat pumps, heat exchanger, low-temperature energy sources, rock massif, temperature, heat flow, COP (Coefficient of performance)

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 1 |
| 2 | Cíle práce | 2 |
| 3 | Současný stav řešení problematiky v ČR a zahraničí..... | 3 |
| 3.1 | Tepelná čerpadla | 3 |
| 3.1.1 | Vývoj a současný stav v České republice..... | 4 |
| 3.1.2 | Vývoj a současný stav ve Světě..... | 6 |
| 3.1.3 | Princip tepelného čerpadla..... | 7 |
| 3.2 | Parametry pro hodnocení tepelných čerpadel | 8 |
| 3.3 | Typy tepelných čerpadel | 10 |
| 3.3.1 | Tepelné čerpadlo typu vzduch/voda | 10 |
| 3.3.2 | Tepelné čerpadlo země/voda | 10 |
| 3.4 | Nízkopotencionální zdroje tepla pro tepelná čerpadla | 11 |
| 3.4.1 | Zemní plošný kolektor | 12 |
| 3.4.2 | Vertikální horninové výměníky | 20 |
| 3.4.3 | Porovnání nízkoteplotních zdrojů tepla | 28 |
| 4 | Metodika ověřování | 29 |
| 4.1 | Měření | 30 |
| 4.1.1 | Podmínky měření..... | 31 |
| 5 | Výsledky ověřování | 32 |
| 6 | Závěr a diskuze | 37 |

1 Úvod

Obsahem této práce je obecný přehled vývoje a použití tepelných čerpadel na našem území a v zahraničí. Dále je práce zaměřena zejména na zemní výměníky, konkrétně na horizontální výměníky Slinky a vertikální U výměníky, které jsou zdrojem nízkopotencionální energie pro tepelná čerpadla. V první části je v jednotlivých podkapitolách popsán základní princip funkce tepelných čerpadel a přehled zemních výměníků, jejich instalace, výhody a nevýhody při jejich použití. Druhá část práce se věnuje porovnání horizontálních výměníků Slinky, vertikálních U výměníků a vzduchu jako zdroje nízkopotencionální energie pro tepelná čerpadla v reálném provozu. Hlavním výsledkem porovnání je jejich vliv na topný faktor a tím pádem i na efekt provozu tepelných čerpadel.

V dnešní době, kdy ceny energií stále rostou a je kladen velký důraz na ekologii a obnovitelné zdroje, je tepelné čerpadlo jednou z nejlepších možností pro vytápění. Tepelné čerpadlo teplo nevyrábí, ale pouze přečerpává pomocí kompresoru z nižší teplotní hladiny na vyšší. Tímto způsobem je možné získat z nevyužitelného tepla jako je podzemní nebo říční voda, zemní masiv nebo vzduch teplo využitelné k vytápění nebo pro ohřev teplé vody.

Za prostředek umožňující využít obnovitelný zdroj energie pro tepelná čerpadla je možné považovat vertikální horninové výměníky. Tyto výměníky se mohou v letním období používat jako zdroj chladu pro klimatizování budov v režimu pasivního chlazení. Teplá voda se v zemi ochlazuje a elektrická energie se spotřebovává pouze pro chod oběhových čerpadel.

2 Cíle práce

Analýza a komparace nízkoteplotních zdrojů energie z hlediska jejich vlivu na provoz tepelných čerpadel, topný faktor, efektivnost a životní prostředí. Těchto cílů by se mělo dosáhnout následujícími kroky:

- Analýza vstupních teplot na výparník tepelného čerpadla z výměníku Slinky, vertikálního U výměníku a okolního vzduchu;
- Zhodnocení vlivu těchto teplot na topný faktor;
- Grafické zpracování těchto hodnot;
- Celkové vyhodnocení.

3 Současný stav řešení problematiky v ČR a zahraničí

Tato kapitola se zabývá historií a přehledem současného stavu nízkopotencionálních zdrojů tepla pro tepelná čerpadla a popisuje jejich vlastnosti a možnosti využití. Dále uvádí používané metody pro testování výměníků.

3.1 Tepelná čerpadla

Tepelné čerpadlo je v dnešní době alternativním zdrojem energie k fosilním palivům a elektrické energii. Pracuje na principu odebírání energie okolnímu prostředí, jako je vzduch, země nebo voda. Takto získanou energii můžeme využít k ohřevu teplé vody, vytápění soukromých či administrativních budov a v neposlední řadě k vyhřívání bazénů. Tepelné čerpadlo nevyrábí teplo jako ostatní zdroje, ale pouze ho přečerpává z tepla o nízké teplotě na teplotu vyšší pomocí kompresoru. [1]

První zmínka o tepelných čerpadlech je z roku 1852, kdy základní princip funkce tepelného čerpadla popsal William Thomson Kelvin v druhé termodynamické větě. První tepelné čerpadlo na světě postavil Peter von Rittinger (narodil se v Čechách) v roce 1857. Vodou poháněné tepelné čerpadlo stlačovalo vodní páru, tím stoupla teplota páry. Tento předchůdce tepelného čerpadla byl využíván pro odpařování solanky a výrobu soli. Podle Rittingera je pojmenovaná mezinárodní cena Petera von Rittingera, která se uděluje nejlepším výrobkům z oblasti tepelných čerpadel a klimatizace. [2, 3]

Podobný prototyp zařízení, jaké známe dnes, sestrojil Američan Robert Webber v roce 1945, který prováděl pokusy s hlubokým zmražením. Jednou se omylem dotkl výstupního potrubí a popálil se. Tato událost se stala první myšlenkou o dalším použití tohoto zařízení. Propojil výstupní potrubí mrazáku se zásobníkem na teplou vodu a poté pomocí dalšího potrubí a větráku vháněl teplý vzduch do domu. Na základě tohoto objevu postavil jednoúčelové tepelné čerpadlo s freonovým chladivem a půdním výměníkem, který byl zakopaný 1-2 metry pod zem ve třech výkopech o délce 36 m. Tímto systémem mohl ohřívat vzduch až na teplotu 43 °C a dosáhl topného faktoru 3,61. V letním období bylo možné změnit chod tepelného čerpadla a chladit vzduch

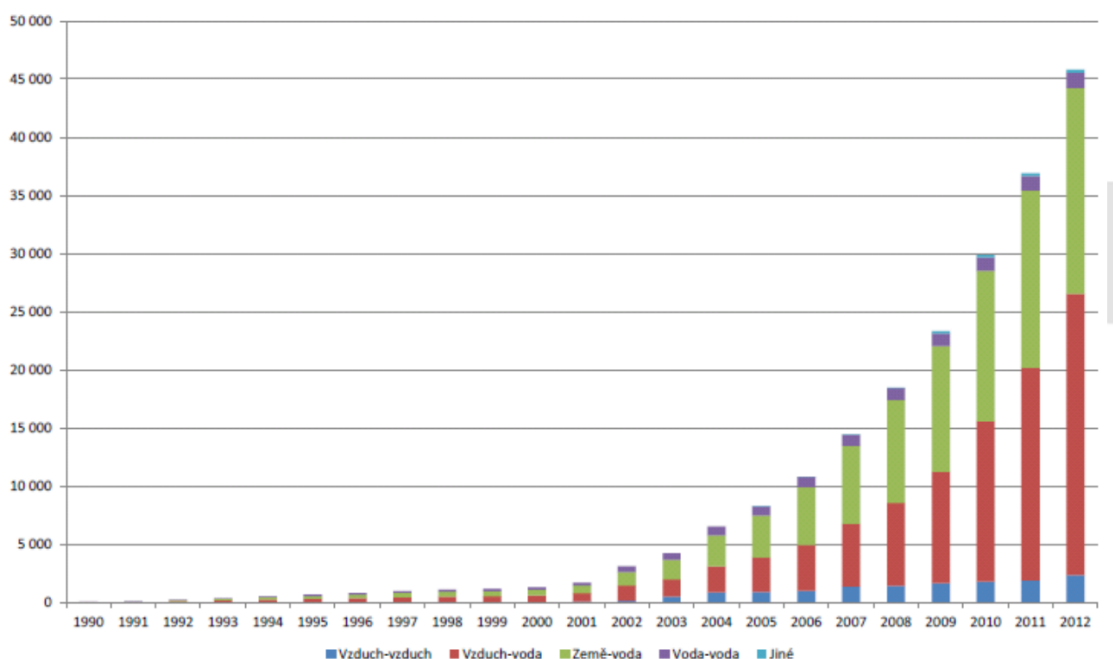
v domě. Webberovo zařízení bylo jedno z prvních tepelných čerpadel využívajících půdních výměníků. [2, 4]

3.1.1 Vývoj a současný stav v České republice

První tepelné čerpadlo bylo nainstalováno v 80. letech dvacátého století v tehdy ještě Československé republice. Vůbec první tepelné čerpadlo, které bylo nainstalováno v rodinném domě v roce 1990, bylo od firmy IVT. Instalace proběhla nedaleko Prahy a byl použit systém země/voda s plošným kolektorem o délce 450 m. Za celých dvacet let provozu nebyl s tímto čerpadlem žádný větší problém, vyměnilo se pouze oběhové čerpadlo, přepínací ventil pro ohřev teplé vody a ocelový zásobník teplé vody byl vyměněn za nerezový. Ostatní komponenty jsou stále původní, což svědčí o kvalitě celého zařízení. Plošný kolektor umístěný v zahradě funguje také bez problémů, nedošlo k vyčerpání energie nebo podchlazení půdy a jeho výkon je stále stejný jako v době instalace. [5]

Hlavním milníkem pro rozšíření tepelných čerpadel na našem území byl rok 2000, kdy se na trhu objevila tepelná čerpadla vzduch/voda s Scroll kompresory pracující i při venkovních teplotách -20°C a produkující teplou vodu až o teplotě 80°C . Díky tomu se nemusejí využívat pouze pro podlahové vytápění. Další z důvodů, proč se tato technologie tak rozšířila je, že distributoři energií začali nabízet speciální tarify pro majitele tepelných čerpadel s podporou dotací na tepelná čerpadla Státního fondu pro životní prostředí České republiky. Před tímto milníkem se instalovala hlavně tepelná čerpadla země/voda. Tento vývoj instalací tepelných čerpadel je vidět na obr. 1. Nejvíce instalovaných systémů je v dnešní době vzduch/voda a naopak nejméně vzduch/vzduch. Jednotky vzduch/vzduch jsou málo využívány z důvodů nemožnosti ohřevu teplé vody jednotkou, dále omezeného počtu vnitřních jednotek připojitelných k venkovní jednotce a v poslední řadě z důvodu nevhodnosti pro větší počet malých místností. [6, 7, 8]

Obr. 1 Vývoj instalací tepelných čerpadel v ČR od roku 1990



Zdroj: [7]

V České republice je od roku 2009 přijato mezinárodní značení kvalitních tepelných čerpadel EHPA (European Quality Label for Heat Pumps), které může získat jakýkoliv výrobek na základě žádosti podané výrobcem nebo dovozcem zařízení po provedení testu v akreditované zkušebně EHPA. U takto označených zařízení má zákazník garantované parametry, může získat dotaci na takové zařízení, zaručenou servisní síť s 24 hodinovou reakční dobou a v neposlední řadě i s dodávkou náhradních dílů nejméně deset let po ukončení výroby a další garantované výhody. Značka EHPA je vidět na obr. 2. V České republice dostalo tuto značku kvality 355 tepelných čerpadel od 14 dodavatelů a v seznamu NZÚ (Nová Zelená Úsporám) je zapsáno 634 tepelných čerpadel. [7]

Obr. 2 EHPA

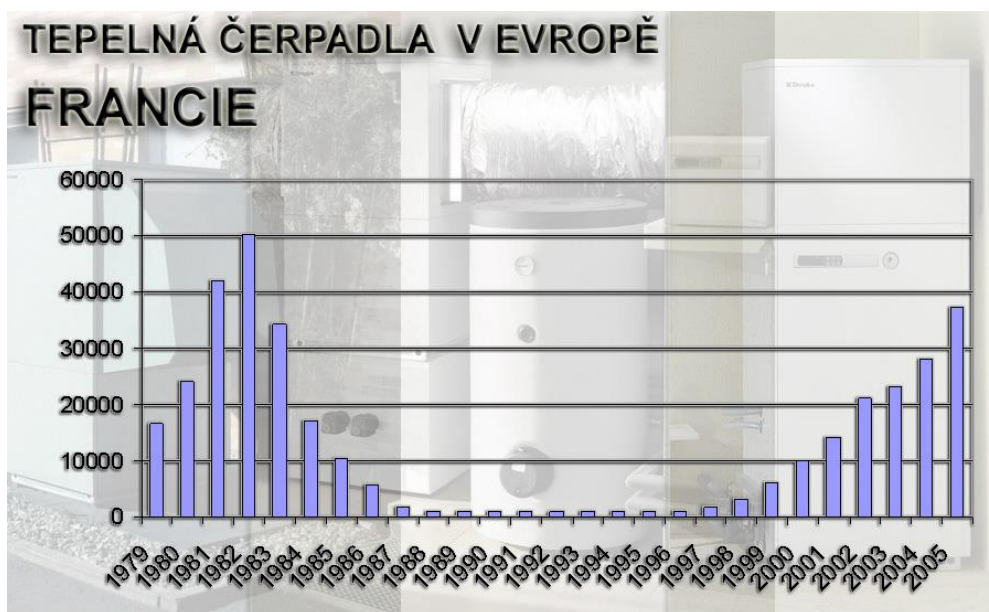


Zdroj: [7]

3.1.2 Vývoj a současný stav ve Světě

V Evropě se tepelná čerpadla dostala rychle na trh v osmdesátých letech minulého století v době ropné krize. Následoval rychlý propad a až po necelých dvaceti letech opět prudký nárůst. Tato situace je vidět na obr. 3. Graf zobrazuje počet tepelných čerpadel ve Francii, kde vývoj probíhal podobně jako v ostatních zemích Evropy. Důvodem velkého propadu instalací tepelných čerpadel před rokem devadesát byla nedokonalost zařízení, která nebyla dostatečně technicky vyspělá a tedy i vysoce poruchová. Předpokládané ekonomické úspory využitím tepelných čerpadel bohužel také nebyly naplněny. Dalším důvodem byla nepřipravenost montážních firem, které si neuvědomovaly, že k instalacím tepelných čerpadel je potřeba přistupovat jinak než při instalaci běžného kotle. Návrat tepelných čerpadel trval poměrně dlouho až do doby, kdy přišla na trh dostupnější řešení, obnovila se důvěra a v neposlední řadě také zájem o ekologické vytápění. [9]

Obr. 3 Tepelná čerpadla v Evropě



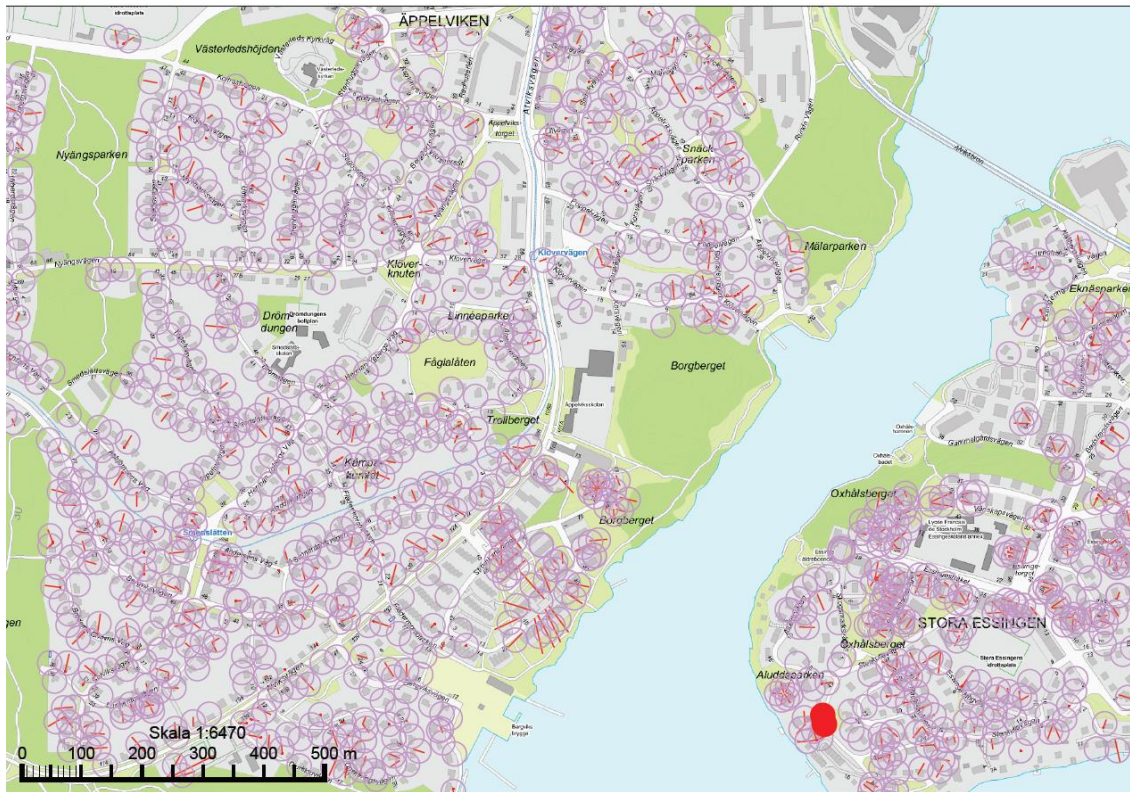
Zdroj: [9]

V současné době se v Evropě nejvíce instalují tepelná čerpadla vzduch/vzduch. Největší meziroční nárůst je v Irsku a Litvě. Pokud by v celé Evropě bylo zastoupení tepelných čerpadel stejné jako např. ve Švédsku, tak by celkový objem byl pětkrát větší než je dnes. Pro představu jaká je situace ve Švédsku, je na obr. 4 plán západního předměstí Stockholmu s vrty a jejich okolním rádiem 20 m, aby se vzájemně

neovlivňovaly. Vývoj situace je už tak daleko, že 1/3 rodinných domů v tomto městě je vytápěna tepelným čerpadlem s půdním vrtem. [10]

Celkový instalovaný výkon jednotek v Evropě do roku 2014 byl 133,4 TWh z čeho je 85,8 TWh obnovitelná energie. Díky tepelným čerpadlům se nevyprodukovalo 22,1 Mt CO₂. [10, 11]

Obr. 4 Vrty v oblasti Stockholmu



Zdroj: [10]

3.1.3 Princip tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo využívá nízkopotencionální energie (vzduch, voda, země), kterou přečerpává na vyšší teplotní úroveň pro nás využitelnou. Pro pohon potřebuje energii, většinou se využívá elektrická. Tepelné čerpadlo teplo nevyrábí, pouze jej přečerpává z nižší úrovně na vyšší.

Jak je vidět na obr. 5, skládá se z výparníku, kompresoru, kondenzátoru a expanzního ventilu. Velmi důležité je také chladiivo, které odebírá nízkopotencionální teplo okolí a předává ho například do otopné soustavy.

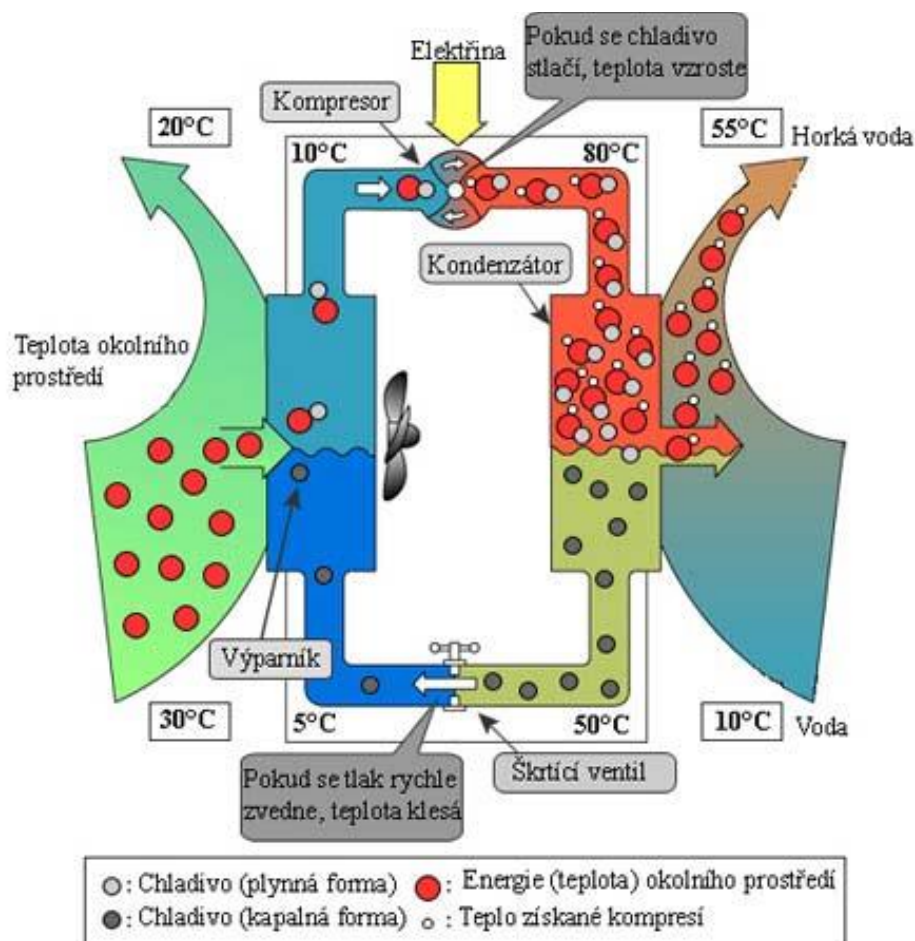
Na vstupní straně tepelného čerpadla neboli na primárním okruhu je výparník, na který je přiváděno nízkopotencionální teplo pomocí teplotnosného média (vzduch,

nemrzoucí směs). Na druhou stranu výparníku se pomocí trysky expanzního ventilu vstříkuje kapalné chladivo pod velkým tlakem. Tlak ve výparníku je díky expanznímu ventilu nižší a tak se chladivo rychle odpařuje. Výparník se tím celý ochladí na nižší teplotu, než je teplota prostředí, ze kterého se teplo odebírá. Podchlazené plynné chladivo se ve výparníku ohřeje nízkopotencionálním teplem a je dále nasáváno kompresorem. Díky druhému termodynamickému zákonu obsahuje nasávaný plyn stále tu energii, kterou získal ve výparníku. K této energii se v kompresoru přidá další část energie vzniklá kompresí, ztrátovým teplem elektromotoru a teplem vzniklým třením mechanických částí. Na výtlaku kompresoru získá stlačený plyn vyšší teplotu než voda v otopném systému. Chladivo je dále vedeno do kondenzátoru, kde proudí voda z otopného systému. Horké plyny chladiva zde zkapalní a předají teplo chladnější topné vodě. Poté je chladivo vedeno opět do expanzního ventilu a celý cyklus se neustále opakuje dokola. Tento princip je znázorněn na obr. 5. [4, 12]

3.2 Parametry pro hodnocení tepelných čerpadel

Základním ukazatelem pro hodnocení tepelných čerpadel je topný faktor COP (Coefficient of Performance). Tento parametr vychází z poměru mezi vyprodukovaným teplem a spotřebovanou energií pro jeho výrobu. V zásadě platí, čím větší je COP, tím je tepelné čerpadlo účinnější. Hodnoty topného faktoru se běžně pohybují mezi 2,5 až 5, ale jsou i zařízení, která dosahují hodnoty 7. Topný faktor závisí na okolních podmínkách, a proto se hodnoty udávají při konkrétních teplotách jako např. COP při 0°C/35°C je 4,5 dle EN 15 511 znamená: teplota média vstupujícího na výparník z primárního okruhu je 0°C a na výstupu do sekundárního okruhu je teplota 35°C při topném faktoru 4,5. Hodnota COP je jen hodnotou teoretickou a nezohledňuje kolísání v průběhu roku při různých teplotách a režimech. [12]

Obr. 5 Princip tepelného čerpadla



Zdroj: [13]

Pro lepší posouzení efektu tepelného čerpadla se používá sezónní topný faktor SCOP (Seasonal Coefficient of Performance). Výpočet SCOP závisí na konkrétní tepelné ztrátě budovy, typu standardizované otopné soustavy (podlahová na 35°C nebo radiátory 55°C) a také na klimatických podmínkách konkrétní oblasti použití. Postup výpočtu je dán normou ČSN a zohledňuje mnohem více faktorů než COP a proto je při porovnávání tepelných čerpadel mnohem přesnější. [14]

Pro přesnější určení účinnosti celé soustavy se používá sezónní topný faktor SPF (Seasonal Performance Factor), který se počítá pro konkrétní projekt před realizací nebo se získává měřením na již realizované soustavě. Podle různých norem se do topného faktoru počítá i spotřeba oběhového čerpadla, pomocných zařízení a elektrokotle. Nejdříve je tedy potřeba zjistit, jaká zařízení jsou zahrnuta ve výpočtu, aby bylo možné účinnosti porovnat. Pro porovnání efektivity soustav tepelného čerpadla s ostatními zdroji pro vytápění se používá faktor využití primární energie PER (Primary energy ratio). [15]

3.3 Typy tepelných čerpadel

Systemy tepelných čerpadel se rozdělují podle toho, odkud získávají energii (země, voda, vzduch) a na druhé straně jak tuto energii dodávají do objektu. Údaj je vyjádřen v zápisu např. vzduch/voda. Používá se mnoho druhů tepelných čerpadel a na obr. 1 je vidět poměr využití instalovaných typů. Následující podkapitoly popisují některé z těchto používaných typů a zabývají se zejména těmi nepoužívanějšími. [12]

3.3.1 Tepelné čerpadlo typu vzduch/voda

Tento systém je v dnešní době čím dál více používán díky nižším pořizovacím nákladům a schopnosti fungovat i při nízkých teplotách. Instalace tohoto systému je velmi jednoduchá a není třeba provádět výkopové práce pro plošný kolektor nebo vrt. Výkon systému vzduch/voda je závislý na teplotě okolního prostředí. Při poklesu okolní teploty vzduchu klesá výkon a také topný faktor čerpadla, a proto se tepelná čerpadla instalují v bivalentním provozu, aby byla spotřeba elektrické energie optimální. Z tohoto důvodu není vhodné tyto jednotky instalovat v horských oblastech, protože ohřev zajišťuje elektrický kotel z větší části při nízkých teplotách a tím by rostly provozní náklady. Při poklesu venkovní teploty pod teplotu bivalence, která se pohybuje okolo -5°C až -10°C , se připne doplňkový zdroj tepla. Nejčastěji se používá elektrokotel, který současně s tepelným čerpadlem zajišťuje ohřev teplé vody. Nejnižší teplota pro provoz tepelného čerpadla vzduch/voda je přibližně -20°C při dlouhodobém provozu a nárazově zařízení dokáže fungovat i při nižších teplotách. Tepelné čerpadlo může být v kompaktním provedení, kdy jednotka je venku nebo uvnitř, a nebo v provedení split s vnitřní a venkovní jednotkou. [12]

3.3.2 Tepelné čerpadlo země/voda

Tento typ tepelného čerpadla se považuje za nejstabilnější díky nízkému vlivu okolních klimatických podmínek. Z tohoto důvodu má rozsáhlé využití v horských a chladnějších oblastech. Teplo se získává buď ze zemního kolektoru nebo ze zemního vrtu, ve kterém obíhá nemrzoucí médium, poháněné oběhovým čerpadlem a vedené na výparník tepelného čerpadla. V obou případech se musejí provádět zemní práce, které jsou nákladné, obzvláště v případě zemního vrtu. V případě dostatečného prostoru u

objektu se používají horizontální výměníky a v případě nedostatku prostoru se doporučují vertikální výměníky. [12]

Další variantou využívání geotermální energie je systém s přímým odparem, kdy zemní kolektor slouží přímo jako výparník, do něhož se rozstříkuje chladivo. Potrubí vyrobené většinou z mědi se ukládá do hloubky 0,6 m až 1,2 m a pro bezpečnost se při dokončování zemních prací vkládá 20 cm pod povrch žlutá výstražná folie. Oběh chladiva je zajišťován přímo kompresorem a není potřeba dodatečné oběhové čerpadlo. Výhodou systému s přímým odparem je mnohem nižší potřebná plocha pro zemní kolektor a s tím spojené náklady na jeho výstavbu. Odpadají také náklady na výměník mezi chladivem a médiem kolujícím v kolektoru, na oběhové čerpadlo a náklady na jeho provoz. Kvůli nízkým teplotám chladiva v kolektoru dochází při provozu k velkému podchlazování půdy až k zamrznání a vzniku ledového obalu kolem trubek kolektoru. V letním období mimo topnou sezonu je nutné nechat půdu v okolí kolektoru zregenerovat, aby se půda prohřála před topnou sezónou. K ohřevu teplé vody a případnému vytápění se v letním období používá solárních panelů nebo jiného zdroje energie. Nevýhodou systémů přímého odpařování jsou mechanické poruchy na výměníku, které nelze opravit nebo jen velmi těžko a také nemožnost jejich využití v létě z důvodu regenerace výměníku. [16]

Hlavními přednostmi tohoto systému je stálost a účinnost i při velmi nízkých teplotách. Podrobně se geotermálními systémy budeme věnovat v dalších kapitolách.

[16]

3.4 Nízkopotencionální zdroje tepla pro tepelná čerpadla

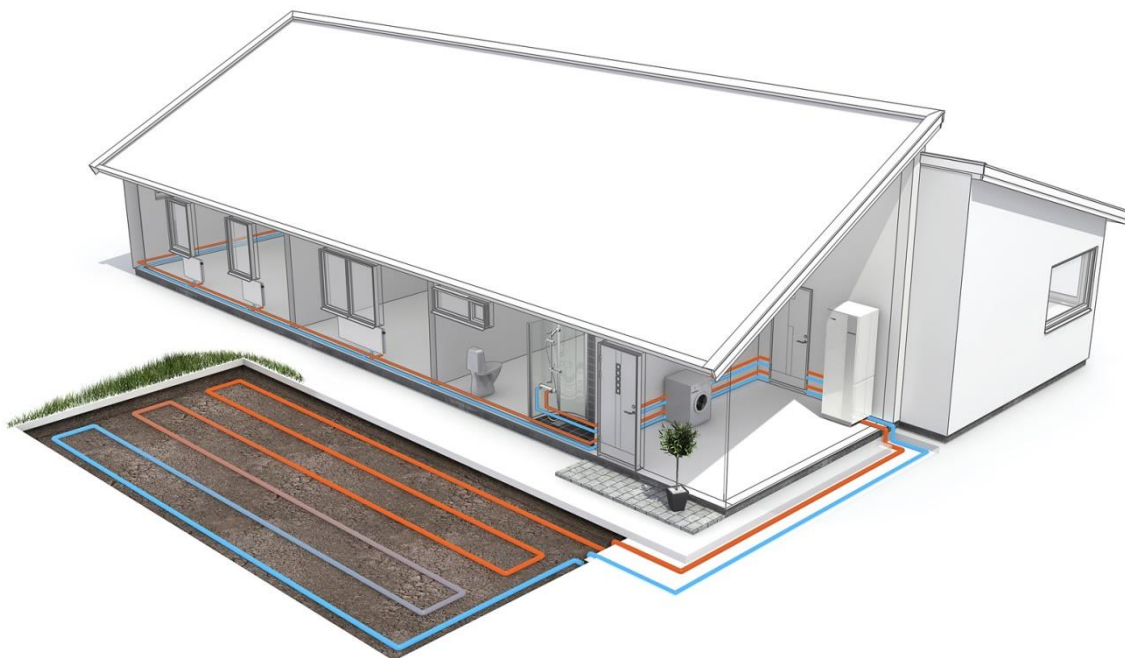
Geotermální energie a vzduch jsou obnovitelnými zdroji, kterých tepelná čerpadla využívají. Tepelné čerpadlo se nemůže považovat za obnovitelný zdroj energie, i když ho využívá, protože odebírá energii pro pohon kompresoru, oběhového čerpadla a ostatních součástí z neobnovitelných zdrojů.

3.4.1 Zemní plošný kolektor

Zemní plošný kolektor je jednou z možností jak odebírat teplo ze země. V letním období se do země naakumuluje slunečním zářením do vrchních vrstev země, a pak tuto tepelnou energii můžeme využívat v zimě. [12]

Tento typ kolektoru potřebuje velkou plochu u vytápěného objektu od 10 m²/kW u suché půdy až po 40 m²/kW u půdy s výskytem spodních vod. Pro stavbu kolektoru není třeba stavební povolení jako u vrtů, ale pouze ohlášení na stavebním úřadě. V případě nedostatku místa nebo většího odběru energie je výhodnější zvolit vertikální geotermální vrt. Zapojení zemního plošného kolektoru je uvedeno na obr. 6. [12]

Obr. 6 Schéma tepelného čerpadla země/voda s plošným kolektorem



Zdroj: [17]

3.4.1.1 Instalace plošného zemního kolektoru

Správná instalace je velmi důležitá, aby tepelné čerpadlo fungovalo bez problémů po mnoho let, v případě kolektoru i desítek let třeba i s novou jednotkou.

Jednotlivé části zemního plošného kolektoru jsou:

Kolektorové potrubí se vyrábí z polyethylenu v několika provedeních. Od nejlevnějšího PE 100, které je nutné uložit do pískového lože pro delší životnost, až po velice odolné

PE 100 RC, které je odolné proti kaménkům, promáčknutí, bodové zátěži a dlouhodobému zatížení na malou plochu.

Sběrač a rozdělovač zajišťuje sběr a distribuci teplotnosného média do jednotlivých větví. Rozdělovač a sběrač je tvořen řadou uzavíracích armatur umístěných v šachtě pro snadnou obsluhu a kontrolu.

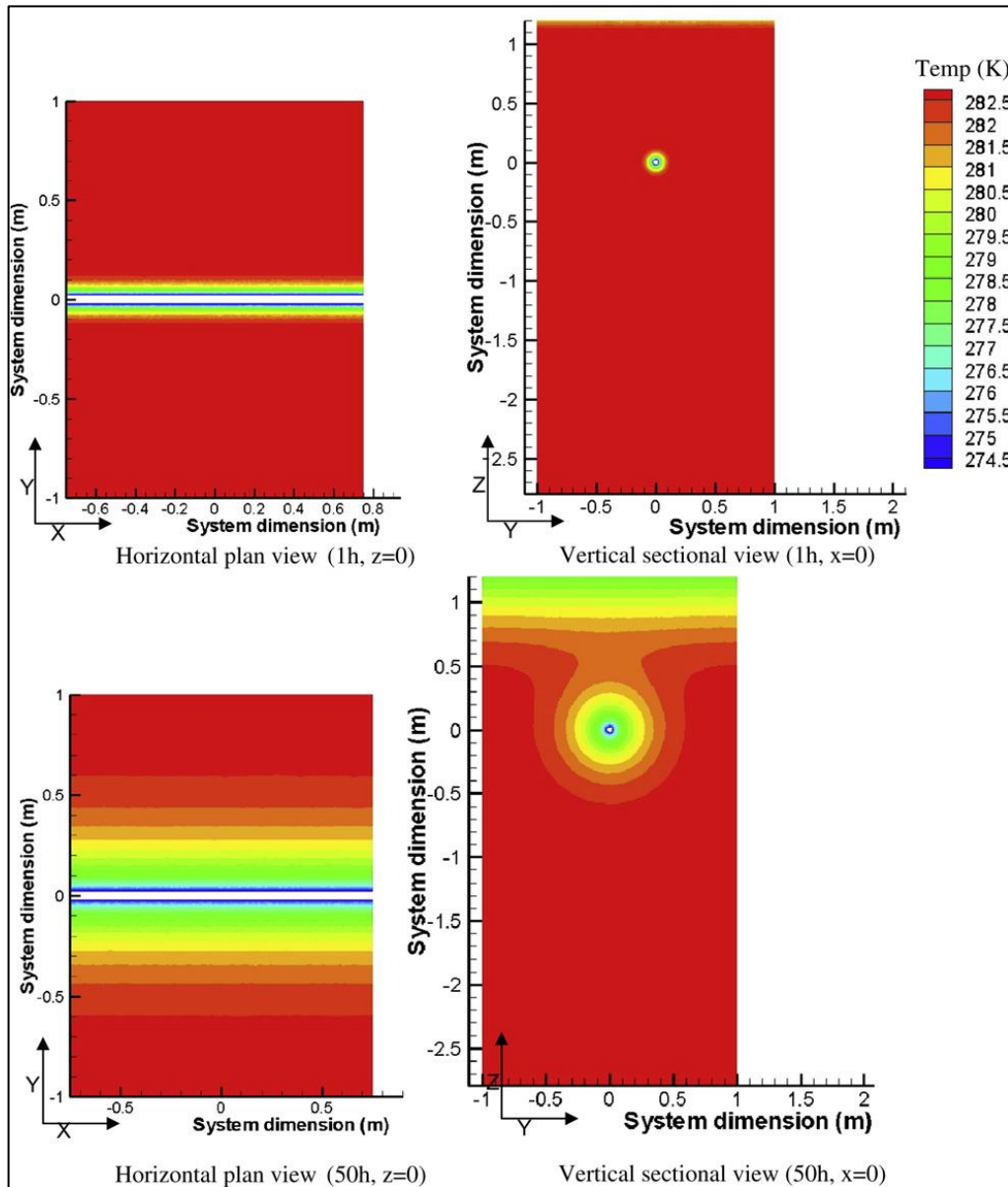
Sběrné potrubí propojuje sběrač nebo rozdělovač s primární stranou tepelného čerpadla. Potrubí se dimenzuje jednou až dvakrát větší než potrubí zemního výměníku, aby nezvyšovalo tlakovou ztrátu. Dalším aspektem při návrhu systému je dosažení rychlosti proudění teplotnosného média u hranice turbulence při zachování potřebného průtoku a přijatelné tlakové ztráty. [18, 12]

Uložení kolektoru se provádí asi 40 cm pod nezámrznou hloubkou v dané lokalitě a to odpovídá hloubce 1,2 m – 1,5 m. Pro snížení tlakových ztrát je omezená délka jednoho okruhu na 100 až 300 m. Rozteč jednotlivých okruhů se doporučuje 0,8 – 1,1 m. Vzdálenosti mezi jednotlivými okruhy jsou velmi důležité, aby se jednotlivé větve příliš neovlivňovaly a tím neklesal výkon celého systému. Na obr. 7 a 8 je znázorněno, jak se teplo šíří v zemi okolo lineárního zemního výměníku a výměníku typu Slinky po 1 hodině provozu a po 50 hodinách provozu. Teplota zemního masivu v klidovém stavu byla 9,35 °C a po jedné hodině provozu lineárního zemního výměníku klesla na 1 °C ve vzdálenosti 0,1 m od středu od a po 50 hodinách provozu do vzdálenosti 0,6 m od středu lineárního zemního výměníku. U výměníku typu Slinky to je podobné, ovlivněná vzdálenost po 50 hodinách provozu je o 0,2 m rozsáhlejší, konkrétně 0,8 m od středu výměníku. Dalším kritériem pro správnou instalaci je vzdálenost od základů budovy nejméně 1,5 m. Pokud je nutné vést potrubí v blízkosti budovy, kanalizace, vodovodního potrubí nebo při prostupu zdí je nutné jej tepelně izolovat. Typy uložení horizontálních výměníků jsou vidět na obr. 9. [18, 12, 19]

Země nemá nekonečné zásoby energie, a proto je při návrhu půdního kolektoru důležité dodržovat určité zásady. Jednou z možností je řídit se německou normou VDI 4640 – 1, která určuje podmínky správného návrhu a pokládky kolektoru. Norma vychází z praxe a vznikla na základě dlouholetých zkušeností. V tab. 1 jsou sepsány maximální povolené hodnoty touto normou. Doba provozu ve výši 1800 h/rok je uvedena pro případ pouhého vytápění tepelným čerpadlem a hodnota 2400 h/rok je

v případě, že se kromě vytápění tepelné čerpadlo používá také pro ohřev teplé vody.
[18]

Obr. 7 Šíření tepla v okolí lineárního zemního výměníku.



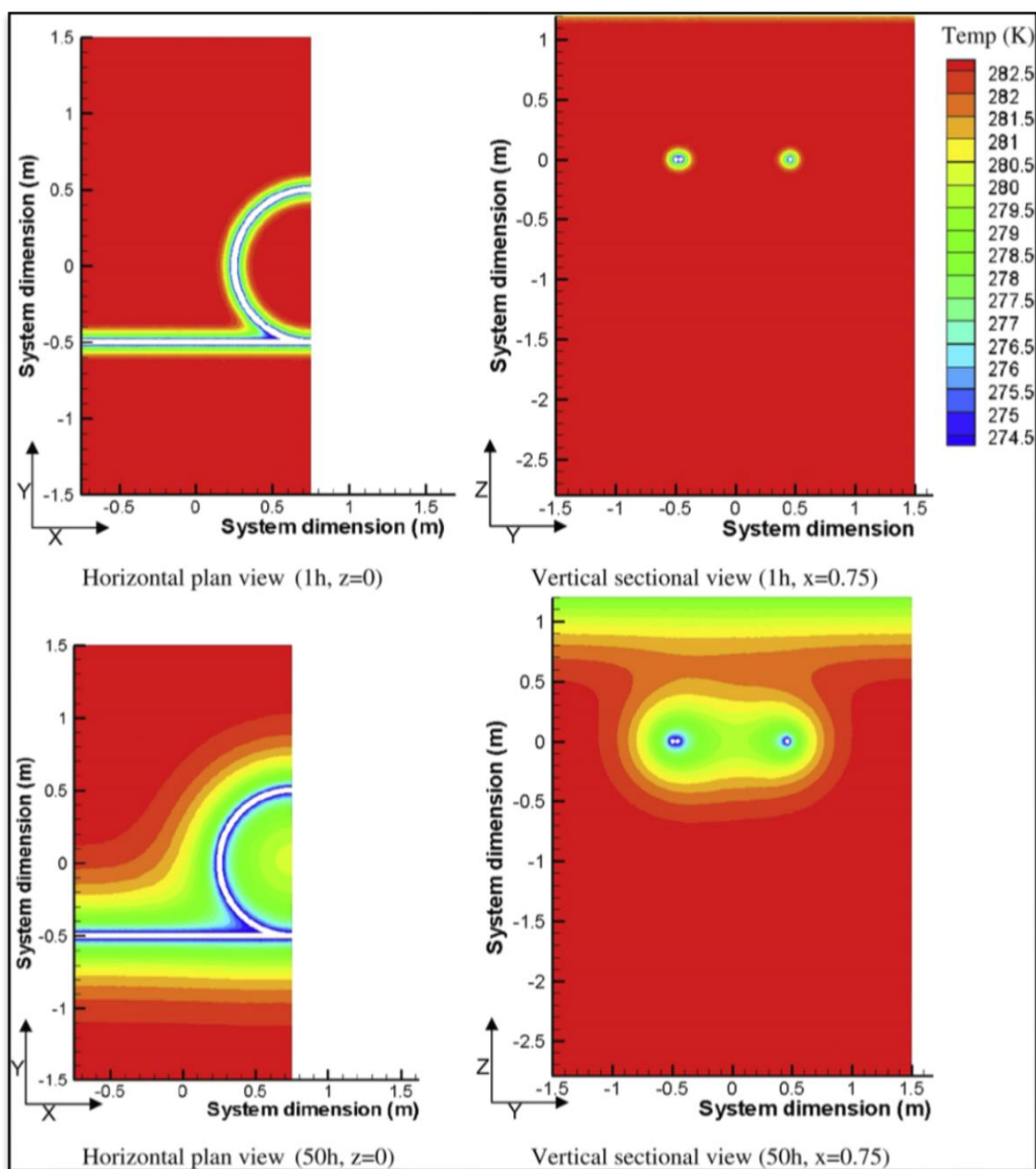
Zdroj: [19]

Tab. 1 Maximální extrakční kapacita půdy podle normy VDI 4640

| Typ podloží | Max. specifická extrakční kapacita při 1800 prov. h/ročně | Max. specifická extrakční kapacita při 2400 prov. h/ročně |
|----------------------------|---|---|
| Suchá, nesoudržná půda | 10 W/m ² a 5 W/bm | 8 W/m ² a 4 W/bm |
| Soudržná, vlhká půda | 20–30 W/m ² a 15 W/bm | 16–24 W/m ² a 12 W/bm |
| Vodou nasycený písek/štěrk | 40 W/m ² a 20 W/bm | 32 W/m ² a 16 W/bm |

Zdroj: [18]

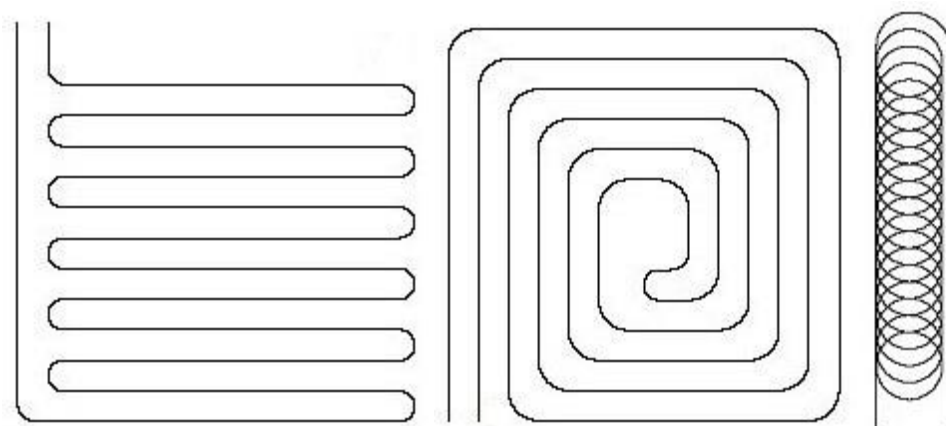
Obr. 8 Šíření tepla v okolí horizontálního výměníku Slinky.



Zdroj: [19]

Podle typu kolektoru jsou různé možnosti pokládky potrubí do země. V místech, kde se plánují úpravy terénu nebo navážky je možné provést kompletní skrývku. Celá plocha pro kolektor se odkryje a připraví na pokládku, jak je vidět na obr. 10. Na připravenou plochu se položí potrubí v daných roztečích a ukotví se do země. Díky volné ploše je možné potrubí pokládat do tvaru meandru nebo spirály. [20]

Obr. 9 Typy horizontálních výměníků: klasické uložení; spirálové uložení; Slinky



Zdroj: [20]

Obr. 10 Pokládka plošného kolektoru – skrývka

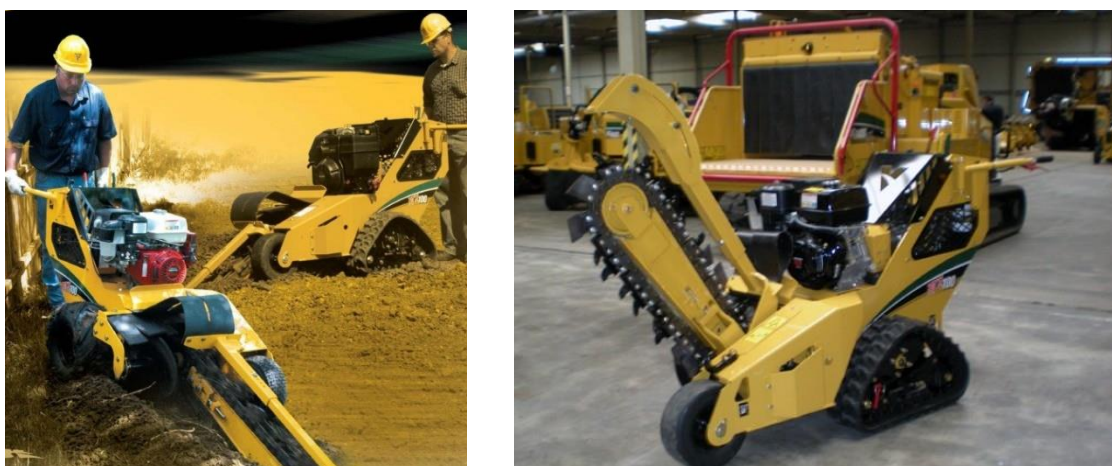


Zdroj: [21]

Výkop provedený klasickým bagrem na širší bagrové lžíce je další možností pokládky kolektoru. Šíře výkopu závisí na šířce lžíce bagru, obvykle 0,6-0,8 m. Na jedné straně výkopu se pokládá přívodní část a na druhou stranu vratná část. [12]

Zemní rýhovač je další volbou při provádění výkopových prací. Rýhovač funguje na principu velké řetězové pily a ta vyřezává rýhu do země a vynáší zeminu na povrch. Vyřezává drážky o šířce 10-15 cm, které jsou ideální pro pokládku potrubí kolektoru. Výhodou rýhovače je rychlé provedení výkopu, kdy po zahrnutí sesedá pouze tato úzká drážka, která se po roce dosype a dorovná. Problémy mohou nastat v případě nevhodného skalnatého podloží nebo podloží obsahujícího velké kameny, které není řetěz rýhovače schopen vynést na povrch. Rýhovače jsou různého typu, od ručně ovládaných s pásovým pojezdem a vysokou mobilitou až po rýhovače připojitelné za traktor. Jednoduchost práce se zemním rýhovačem je vidět na obr. 11. [12, 21]

Obr. 11 Zemní rýhovač

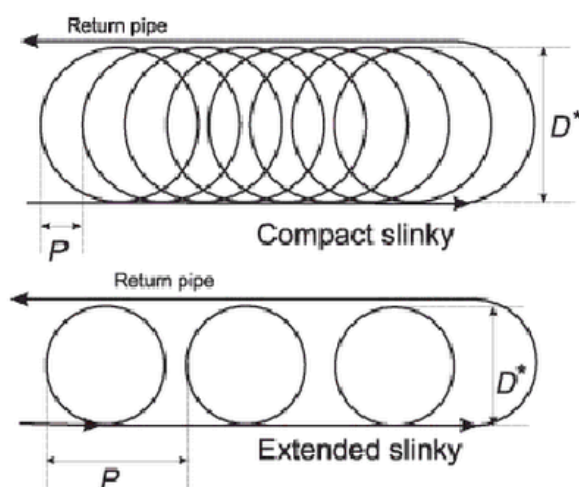


Zdroj: [22]

3.4.1.2 Výměník typu Slinky – instalace a parametry

První výměník typu Slinky vymysleli J.E. Bose a M.D. Smith na univerzitě Oklahoma State University dle [19]. Naopak D.Banks [4] se zmiňuje, že prvním průkopníkem Slinky byl Otto Svec z Kanady kolem roku 1980. Při srovnatelném výkonu vyžaduje tento výměník asi pětkrát kratší výkop než u lineárního plošného kolektoru. Výměníků typu Slinky je více druhů, vertikálních a horizontálních, které se ještě dále dělí na další typy. Hlavní dva druhy horizontálních výměníků Slinky jsou kompaktní a prodloužený, jak je vidět na obr. 12, kde D je průměr kola Slinky a P je vzdálenost mezi sousedícími kruhy Slinky. [4, 19, 23]

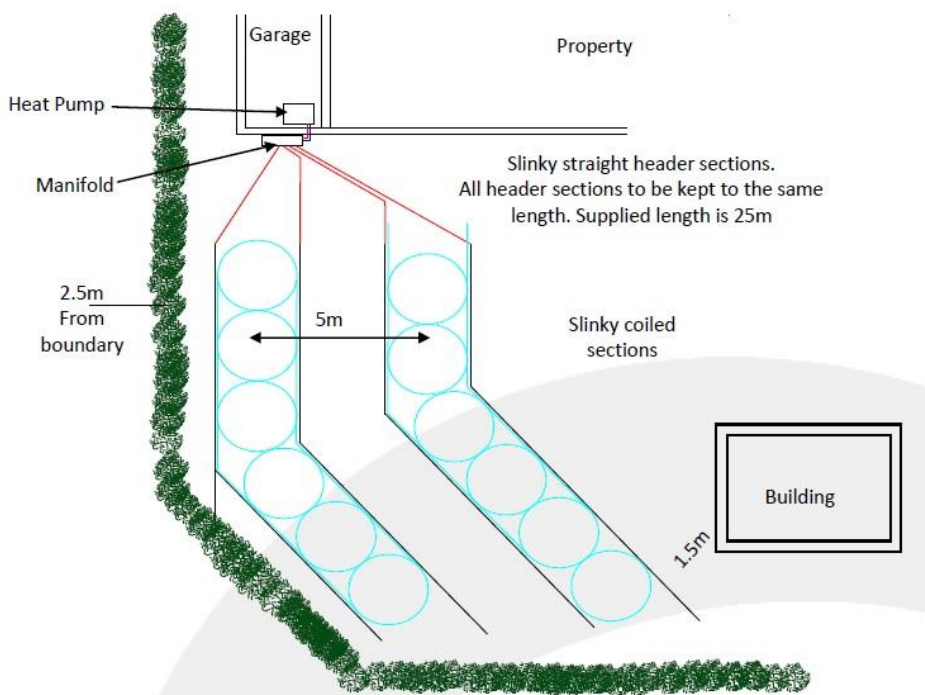
Obr. 12 Kompaktní a prodloužená metoda instalace Slinky



Zdroj: [4]

Pod názvem Slinky se neskrývá nic jiného než roztažené kolo namotaného potrubí, které se při roztahování doporučuje svazovat kvůli tuhosti materiálu. Pravidla pro pokládku potrubí jsou stejná jako v případě horizontálních lineárních výměníků. Pokud používáme potrubí PE 100 RC, není je třeba pokládat do pískového lože, u ostatních typů ano. Slinky se vkládá do výkopu o přibližných rozměrech $3 \times h \times d$ 1,5 m x 1,5 m x 20-25 m společně s vratnou větví. Velikost smyček není nikde dána, ale je důležité dbát na vhodný rozměr potrubí pro daný průměr smyčky, aby se potrubí nezlámalo. Údaje o délkách sekcí se liší v závislosti na zdroji informací. Zejména podle jedné britské firmy jsou délky až 40 m, naopak česká literatura udává okolo 20 m. Pokud je průměr kruhu Slinky 0,8 m, vzdálenost mezi kruhy 0,25 m a délka výkopu 20,8 m, tak bude přibližně 80 kruhů na potrubí o délce 243 m. To znamená, že na každém metru výkopu bude 11 m potrubí. Pravidla, podle kterých by se mělo postupovat při návrhu a pokládce Slinky jsou vidět na obr. 13. [12, 20, 24]

Obr. 13 Doporučené podmínky pro návrh a instalaci Slinky



Zdroj: [25]

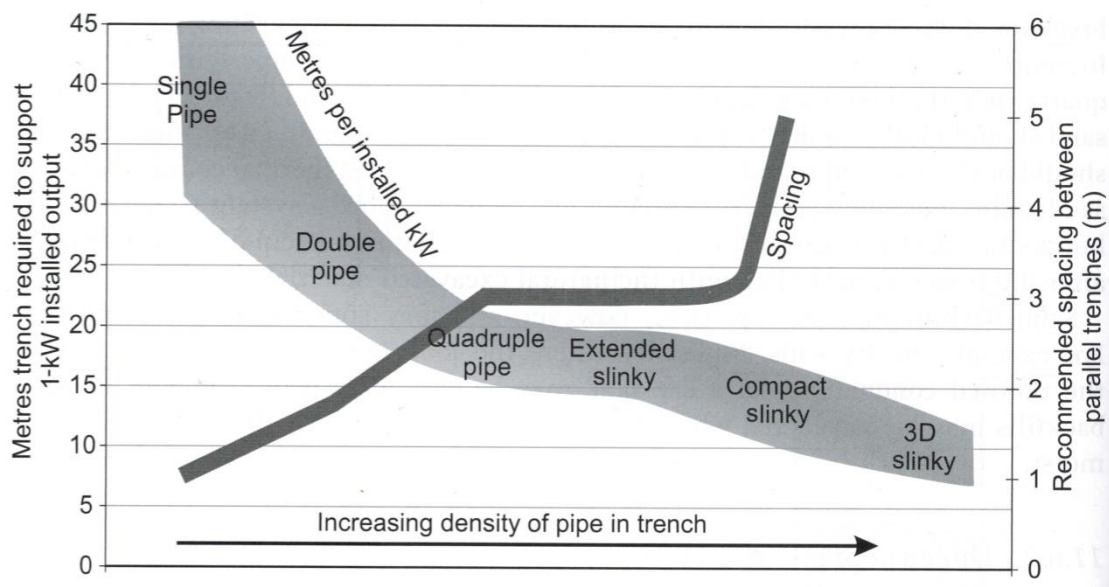
Vzdálenost mezi středy dvou sekcí by měla být pět metrů po celé délce sekce, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování. Dále se doporučuje, aby byla sekce vzdálena minimálně 1,5 m od budov a 2,5 m od hranice pozemku. Sběrné potrubí, které je vyznačeno na obr. 13 červeně, by mělo být stejně dlouhé pro každou větev, aby byl

zajištěn stejný průtok všemi větvemi. Toho může být dosaženo srolováním sběrného potrubí zpět do výkopu. [25]

3.4.1.3 Srovnání zemních plošných kolektorů

Pokud budeme srovnávat Slinky s jednotrubkovým plošným zemním výměníkem podle švédských podmínek, kdy na jeden metr výkopu je 8 metrů potrubí, tak je možné se dostat až na 38 % délky výkopu potřebné pro jednotrubkový plošný výměník v suché půdě a přitom získat stejný výkon. V případě vlhkých půd se délka výkopu zkrátí na 34-38 % a u mokřých půd až na 30-36 %. Z toho vyplývá, že Slinky ušetří až dvě třetiny délky výkopu oproti jednotrubkovému systému. Na druhou stranu náklady na potrubí budou osmkrát vyšší. Prodloužené Slinky potřebují okolo 45 % délky výkopu navíc oproti jednotrubkovému plošnému kolektoru. Srovnání různých typů kolektorů je názorně vidět na obr. 14, který porovnává různé druhy výměníků podle potřebné délky výkopu na 1 – kW instalovaného výkonu a doporučené vzdálenosti mezi jednotlivými výkopy. [4]

Obr. 14 Srovnání plošných kolektorů



Zdroj: [4]

3.4.1.4 TRT (Termal Response Test) test pro horizontální výměníky

Tento test se používá zejména u vertikálních vrtů, jak je popsáno v další kapitole, ale je možné ho použít i pro horizontální výměníky. Princip testu spočívá v cirkulaci teplé vody v horizontálním výměníku a měření vstupních a výstupních teplot

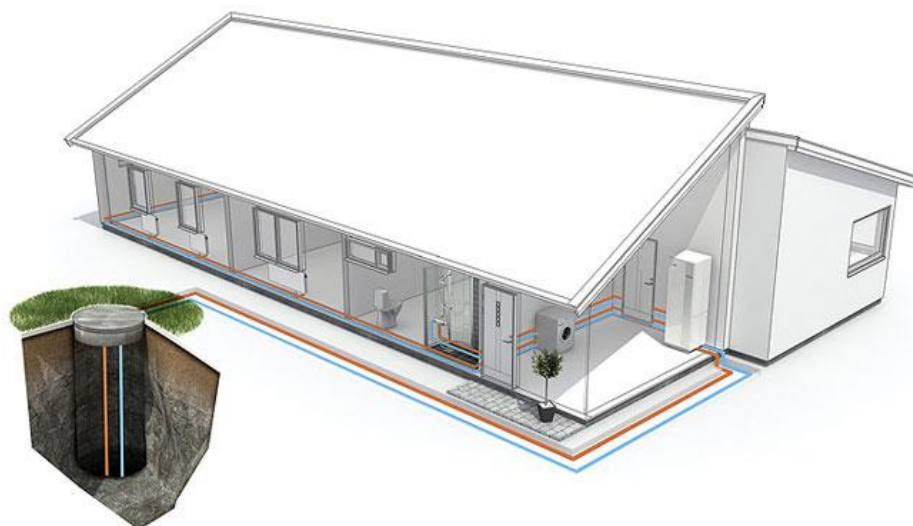
na začátku výměníku. U horizontálních výměníků může být ale výsledný test velmi ovlivněn stavem povrchové půdy, pohybem vlhkosti a druhem povrchu. [4]

Další možností je provést několik testů tepelné vodivosti na ploše, kde se plánuje stavět plošný kolektor. Tento test tepelné vodivosti se provádí pomocí testovací jehly, která se do země zasune do hloubky 1 m pod povrchem. Tato jehla je velmi krátká (17 cm), v průměru má asi 6-7 mm a je vyrobená z kovu. Po vsunutí do země se vyhřívá na konstantní teplotu pomocí elektrického proudu. Tvar jehly je podobný vrtu, takže výpočet tepelné vodivosti se provede na stejném principu jako u vrtu. [4]

3.4.2 Vertikální horninové výměníky

Geotermální vrty jsou tradičním zdrojem nízkopotencionální energie pro tepelná čerpadla. Ačkoliv jsou pořizovací náklady na vrty velmi nákladné, mají velké výhody. Především stabilita a nezávislost na okolních povětrnostních podmínkách a možnost využití pro klimatizování budov v letním období, to jsou nesporné výhody geotermálních vrtů. Chlazením v letním období dodáváme vrtům tepelnou energii, která napomáhá regeneraci vrtů pro vytápění v zimním období. V podstatě jde o ukládání energie v době, kdy ji nepotřebujeme a naopak ji využíváme v době, kdy je potřeba. Na obr. 15 je schéma zapojení tepelného čerpadla na vrt. [4, 12]

Obr. 15 Schéma tepelného čerpadla s geotermálním vrtem



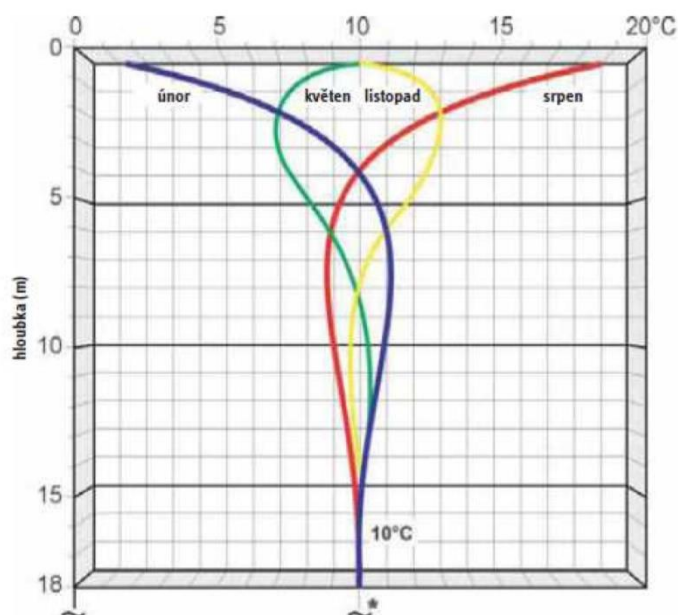
Zdroj: [26]

Pro správné zhotovení vrtů je důležité dodržovat předpisy a normy Evropské unie, které udávají, jak má být vrt proveden a z jakého materiálu. [12]

Ve většině případů se vrty provádějí do hloubky od 70 m do 160 m podle požadovaného výkonu. V případě, že je potřeba celková délka vrtu delší, provede se více kratších vrtů o stejné délce. V některých lokalitách může nastat problém s provedením vrtů delších než 50 m, a tak se v takovém případě doporučuje celkovou délku vrtů navýšit o 10 % oproti původní délce. Pokud se navrhne větší počet malých vrtů, je možné dva vrty spojit do jedné smyčky. Z tohoto důvodu se proto doporučuje provádět sudý počet krátkých vrtů. Vrty zapojené do série musí mít u propojovacího potrubí odvětrávací ventily. Pro jednoduchost regulace průtoku jednotlivými vrty je také důležitá stejná délka potrubí. Vzdálenost vrtů mezi sebou musí být minimálně 10 m, a pokud jsou pouze dva vrty, tak je možná minimální vzdálenost 7 m. [12]

Klimatické podmínky ovlivňují teplotu země pod povrchem do hloubky 15 až 20 m. Od této mezní hloubky je teplota relativně stálá, geotermální teplotní gradient je 3 K na 100 m. Vývoj teplot je vidět na obr. 16. [4, 27]

Obr. 16 Teploty podpovrchové vrstvy



Zdroj: [27]

Rozdělení tepelných vrtů

V geotermálním vrtu probíhá tepelná výměna mezi teplotnějším médiem a okolní horninou. Při výměně tepla vzniká tepelný odpor, který je možné spočítat na základě Ohmova zákona – množství odebíraného tepla je úměrné rozdílu teplot a nepřímo úměrné tepelnému odporu. Jeden odpor vzniká mezi okrajem vrtu a hranicí, kde hornina ještě není tepelně ovlivněna vrtem a druhý odpor vzniká přímo ve vrtu. Vnitřní odpor vrtu závisí na půdorysném uspořádání sestupného a vzestupného kanálu vůči stěně vrtu i navzájem. Ve vrtu je nutné zajistit, aby teplotnějším kapalinou proudila co nejbližší k hornině a nevznikal tepelný zkrat mezi jednotlivými kanály, který vzniká hlavně při nízkém průtoku. Měřitelná velikosti odporů se velmi liší podle použitého uspořádání vrtu. Odpor jednoduché U-trubice v zainjektovaném vrtu GHLE (Ground Loop Heat Exchanger) je 5 až 6 °C z celkového rozdílu teploty mezi teplotnějším médiem a neovlivněnou horninou. U otevřeného systému je tato ztráta teploty 1 až 2°C. Na obr. 17 jsou vidět nejčastěji používaná uspořádání kanálů geotermálních vrtů. [28]

Obr. 17 Půdorysné uspořádání kanálů v BHE



a) otevřený koaxiál, b) uzavřený koaxiál, c) jednoduchá U smyčka, d) dvojitá U smyčka, e) mnohosmyčkový koaxiál TIL

Zdroj: [28]

Základní rozdělení BHE (Borehole Heat Exchangers) je podle toho, jestli je systém uzavřený nebo otevřený. V otevřeném systému je ve vrtu stabilní vodní sloupec, pomocí kterého probíhá výměna tepla s horninou. Vyčerpaná voda z vrtu se po průchodu nadzemním výměníkem vrací zpět do stejného vrtu. Tímto principem se liší otevřený systém od vrtaných studní systému země-voda, kdy se voda čerpá z jednoho vrtu a vrací se do jiného vsakovacího vrtu. Naopak v uzavřeném systému BHE obíhá teplotnějším médiem uzavřeným okruhem trubek a nedochází ke styku média s okolní horninou. Díky tomu je možné použít systém i v místech, kde je podzemní voda hluboko, má nepoužitelné složení nebo je nutné použít nemrznoucí směs z důvodu příliš nízké teploty horniny. [28]

Podle konfigurace se tepelné vrty rozdělují na 4 hlavní druhy: GLHE (U smyčkové – Ground Loop Heat Exchangers), TIL (koaxiální mnohasmyčkové se společným tepelně izolovaným středem - Thermal Insulated Leg), koaxiální trubkové, koaxiální s nepropustnou horninovou stěnou a SCW (se stálým vodním sloupcem – Stab Water Column). Celkový přehled systémů je v tab. 2. [28]

Tab. 2 Rozdělení systémů geotermálních vrtů

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

Zdroj: [28]

3.4.2.1 Vrty s koaxiálním potrubím

U koaxiálního otevřeného uspořádání obr. 17 a) je pasivním kanálem (tam kde neprobíhá tepelná výměna) široké potrubí, které je spuštěno ke dnu neuzavřeného vrtu a aktivním kanálem (tam kde probíhá tepelná výměna) je mezikruží mezi potrubím a horninovou stěnou vrtu. Většinou není možné použít podzemní vodu k transportu tepla a musí se použít teplonosná kapalina cirkulující v odděleném prostoru od okolní horniny. Nejjednodušší varianta řešení, kdy kapalina koluje v uzavřeném systému, je uzavřený koaxiál obr. 17 b). [28]

3.4.2.2 Vrty s U smyčkou - GHLE

V České republice se nejvíce používají jednoduché nebo dvojité U smyčky v zaplněném stvolu (obr. 17 c), d)). Vrt se skládá z jedné nebo dvou U smyček z polyetylenu, které jsou ve spodní části tvořené propojovacím koncem ve tvaru U. Souběžně vedené trubice U smyčky se chovají jako protiproudý výměník a to je příčinou nesymetrické výměny tepla s horninou. Okolo 75 % této výměny probíhá už v sestupné trubici, která musí vyměnit více tepla, než je celkový výkon vrtu. Důvodem je výměna tepla v horní části vrtu. [28]

3.4.2.3 Vrtý s U smyčkou – GHLE bez výplně

Ve skalnatých horninách s jednotnou vodní hladinou se např. ve Švédsku nechává potrubí volně viset ve vrtu. Podle nařízení musí být horní část vrtu přepažena nejméně 6 m pod povrchem a nejméně 2 m do kompaktní horniny. Voda vyplňující vrt má vysokou tepelnou kapacitu a vyrovnává nerovnoměrnost v teplotách ve vrtu. Tlakovým rozdílem mezi vodou vyplňující vrt a okolní podzemní vodou vzniká takzvaný termosifon, který zvyšuje účinnost geotermálního vrtu. Ohřátá nebo ochlazená voda ve vrtu pod 4°C odtéká z horní části vrtu do horniny díky tlaku okolní podzemní vody, která se tlačí do spodní části vrtu. Účinnost termosifonového efektu je mnohem vyšší při chlazení než při vytápění, protože rozdíly v hustotě vody jsou mnohem větší při ohřátí vody. Jednou z výhod oproti ostatním typům vrtů nebo plošným kolektorům je možnost výměny potrubí po skončení životnosti. Bohužel v České republice tento systém nelze moc využít, protože by došlo k propojení spodních vod, tím by se změnila vodní poměry a mohly být ohroženy třeba i studny v blízkém okolí. Při instalaci se v horních vrstvách země doporučuje, pokud není vrt pouze ve skále, vložit zacementovanou velkou trubku z PVC. Potom se vloží U trubice s rozpěrkami, díky kterým může být vrt kratší až o 30 %. [28]

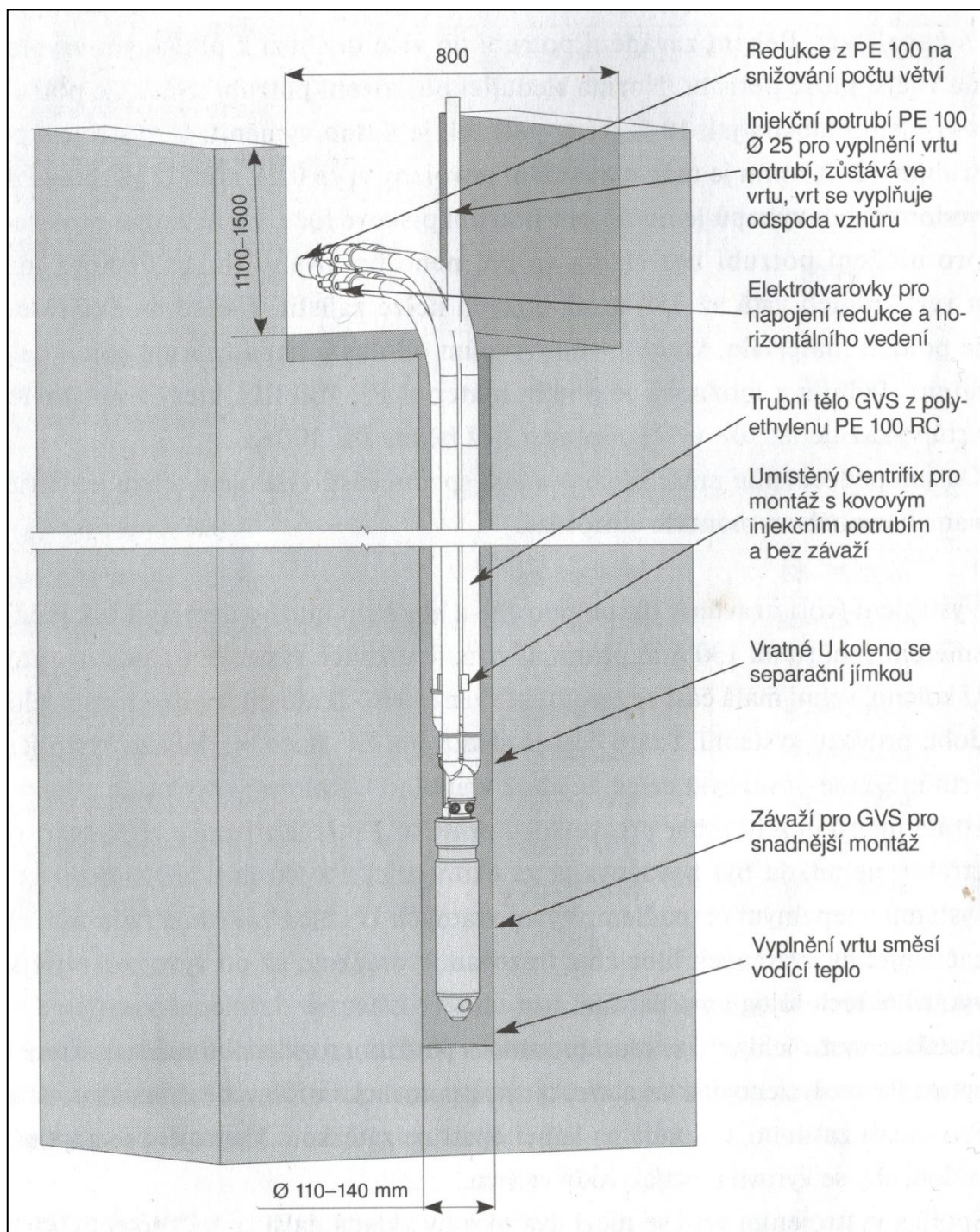
3.4.2.4 Vrtý s U smyčkou – GHLE s výplní

V případě, že vrt není dokonale utěsněn, může docházet k propojení podzemních vod a jejich kontaminaci povrchovou vodou nebo nemrznoucí směsí při porušení potrubí. V některých státech jsou injektáže vrtů nepropustnou směsí povinné a platí pro ně konkrétní předpisy a přesný technologický postup. Ve světě se nejčastěji používá pro injektáž bentonit, čistý cement a hlavně jejich speciální směsi se sníženým obsahem pórů, příměsí minerálů pro lepší tepelný přenos a z toho vyplývající i zisk z vrtu. Injektážní směs by neměla po cyklickém střídání teplot ve vrtu praskat, odlepovat se od potrubí nebo okolních hornin. Neméně důležitým bodem je tedy i tepelná vodivost směsi, která se u specializovaných směsí pohybuje okolo 2-2,5 W/mK. Schéma konstrukce vrtu je vidět na obr. 18. [28]

Vystrojený vrt tvoří uzavřený okruh potrubí, který je ve spodní části opatřen vratným kolenem do tvaru U. Evropská norma nařizuje, že u vratného U musí být tlaková ztráta menší než 10 mbar při rychlosti průtoku 1 m/s pro použití s tepelným

čerpadlem. Do vrtů se dále rozmísťují i vymežovací díly, které se doporučuje vkládat po 2 metrech, aby potrubí bylo uloženo ve správné poloze. [28]

Obr. 18 Schéma konstrukce vrtu



Zdroj: [12]

3.4.2.5 Vrtý TIL (*Thermal Insulated Leg*)

Tepelnou ztrátu u vrtů GLHE, která vzniká nežádoucím efektem protiproudého výměníku mezi sestupnou a vzestupnou trubkou, je možné snížit změnou uspořádání vrtu (obr. 17 e)). V některých případech se TIL zařazují mezi koaxiální vrtý, protože jejich osou je středová tepelně izolovaná „noha“. Od vratného kolena ve spodní části vedou tenčí trubky a stoupají rovnoměrně kolem stěny vrtu. Takové uspořádání snižuje nežádoucí výměnu tepla uvnitř vrtu a také snižuje tepelný odpor mezi okolní horninou a stěnami trubic. Tímto systémem uspořádání je možné snížit délku vrtu až na polovinu oproti standardnímu U vrtu. Hlavní jeho nevýhodou je komplikovaná realizace, velká náchylnost k poruše z důvodu množství svárů a tenkostěnných trubic. Úspory, které získáme kratším vrtem, nejsou schopné pokrýt náklady na jeho realizaci. Vrtý U smyčkové s rozpěrkami a kvalitní injektáží mají sice vyšší náklady na provoz, ale jsou mnohem jednodušší a tím i spolehlivější. [28]

3.4.2.6 Tepelné zkoušky vrtů metodou TRT

TRT (Thermal Response Test) se doporučuje provádět u instalací vyšších výkonů tepelných čerpadel, přibližně nad 50 kW. Na základě získané tepelné vodivosti hornin v konkrétním místě se vypočítá celkový počet vrtů a jejich délka. Tepelná vodivost horniny je ovlivňována mnoha faktory, které se liší podle konkrétního místa. Zejména v České republice, která je geologicky velmi rozmanitá, hodnoty tepelné vodivosti se mohou velmi rychle měnit i na krátkých vzdálenostech. [4, 29, 30]

Test se provádí na již vytvořeném vrtu, kterým se nechá pomoci speciálního zařízení kolovat teplá voda. Měří se vstupní a výstupní teplota u začátku vrtu a průtok. Měření se provádí minimálně tři dny, ale obecně platí, čím delší měření tím je to lepší. Výsledkem měření jsou hodnoty tepelné vodivosti podloží, tepelného odporu a neovlivněná teplota podloží. [4, 29, 30]

3.4.2.7 Tepelné zkoušky vrtů metodou DTRT

Tato metoda umožňuje přímé měření rozdělení teplot v kapalině a na stěnách vrtu při ukládání konstantního množství tepla. Tímto je možné získat konkrétní hodnoty teplot v různých hloubkách. [31]

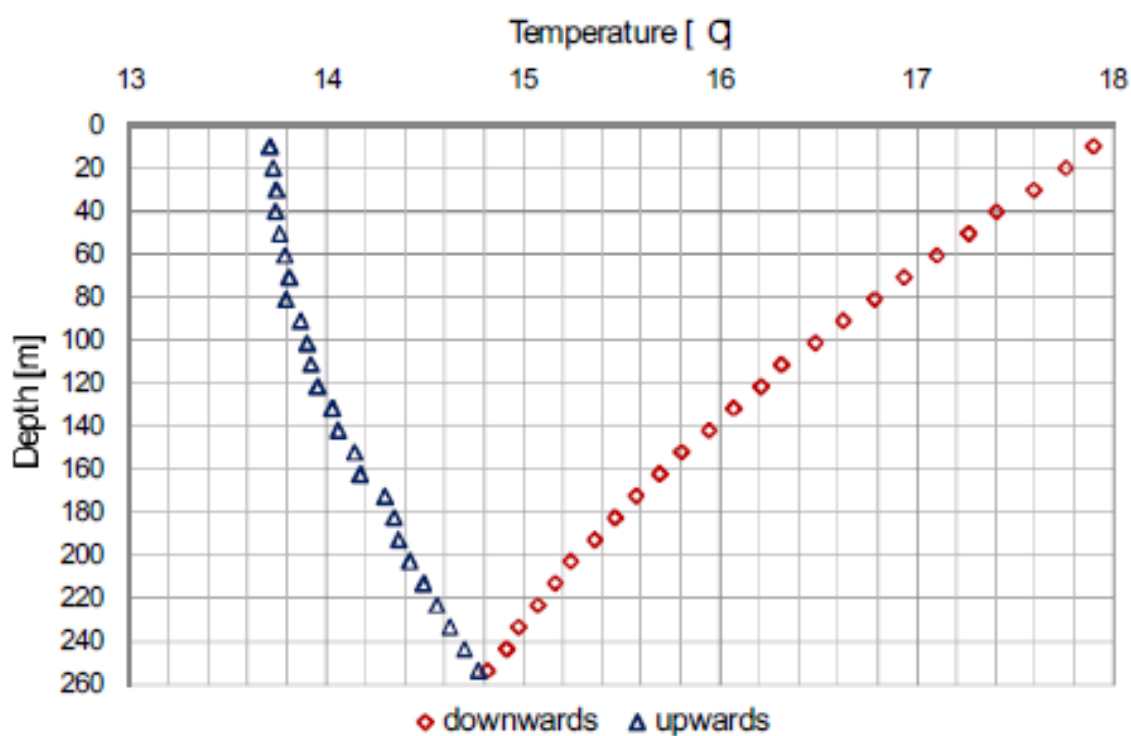
Principem zkoušky vrtu DTRT (Distributed Thermal Response Test) je spuštění optických kabelů uvnitř trubek ve vrtu, do kterých se posílají laserové impulsy.

Vlivem vzájemného působení dopadajícího záření s vibračními a rotačními stavy atomů nebo molekul nabývá odražené světlo jiné vlnové délky, neboli získává jinou energii fotonů oproti dopadajícímu záření. Tento jev se nazývá Ramanův rozptyl světla a je funkcí teploty. Teplota je vyhodnocována na čtecím zařízení a hloubka je vypočítána z rychlosti světla a z časové prodlevy odrazu pulzu. Tento test poprvé prezentovali na Světovém geotermálním kongresu na Bali Acuna, J., Palm, B. (2010). [31]

Ve Stockholmu poprvé otestovali U výměník a koaxiální výměník. K měření použili speciální aparaturu pro TRT, kterou byla udržovaná konstantní teplota. Pro měření teploty byly použity dvoužilové optické kabely s vlákny 50/125 o průměru 3,8 mm, kdy pro měření teploty stačilo pouze jedno vlákno. Čtecí zařízení bylo použito od firmy Hydrossearch AB typ Halo-DTS. V klidovém stavu byl změřen průměr teplot ze všech měřících bodů v U smyčkovém vrtu, který vyšel 9,1 °C a u koaxiálního vrtu to bylo 8,45°C. Celková hloubka U vrtu byla 260 m, přičemž v hloubce 180 m byly teploty stejné u obou vrtů. Stvol vrtu byl zaplněný podzemní vodou, jejíž hladina se ustálila v hloubce 5,5 m. Tepelně aktivní délka vrtu byla tedy 251,2 m. Jako teplotonosná kapalina byl použit 19% etanol. [31]

V případě výměníku typu U byla teplota teplotonosného média udržovaná na 18 °C u vstupu do vrtu, jak je vidět na obr. 19. Po průchodu sestupnou trubicí se kapalina ochladila na 14,8 °C a opouštěla vrt při teplotě 13,7 °C. V sestupné trubicí se teplota změnila asi o 3°C a ve vzestupné o 1°C, z čehož vyplývá, že nejvíce tepla se vymění v sestupné trubicí, která dodá asi 75 % užitečného výkonu celého výměníku. Jak je vidět na grafu na obr. 18, tak posledních 80 m před výstupem z vrtu je křivka velmi strmá. Podle toho se dá poznat, že se tato část vrtu na tepelném výkonu vůbec nepodílí kvůli vysokému teplotnímu rozdílu kapaliny a velkému přenosu tepla mezi vstupní a výstupní trubicí. [31]

Obr. 19 Graf průběhu teplot v U výměníku



Zdroj: [31]

3.4.3 Porovnání nízkoteplotních zdrojů tepla

Typ tepelného čerpadla je možné vybírat podle mnoha kritérií. Přehled výhod a nevýhod konkrétních čerpadel je uveden v tab. 3. Jednotlivé položky hodnotí tepelná čerpadla podle mnoha kritérií a je možné si z přehledu udělat ucelenou představu.

Tab. 3 Porovnání tepelných čerpadel

| | | Vzduch | Vertikální výměníky | Horizontální výměníky |
|---|---------------------------|--------|---------------------|-----------------------|
| Účinnost | | + | +++ | ++ |
| Návrh | Proveditelnost | ++ | + | + |
| | Stavební náročnost | + | +++ | ++ |
| Celkové náklady po dobu životnosti | Instalace | + | +++ | ++ |
| | Provoz | ++ | + | |
| | Údržba | ++ | + | + |
| | Celkem | ++ | + | + |

| | | Vzduch | Vertikální výměníky | Horizontální výměníky |
|--------------------------|-----------------------------|--------|------------------------|--------------------------|
| Životní prostředí | Emise CO₂ | ++ | + | + |
| | Narušení půdy | Ne | ++ | + |
| | Kontaminace vody | Ne | Ne | Ne |
| Životnost | | + | ++ | ++ |
| Praktičnost | Provozní omezení | ++ | + | + |
| | Estetika | + | ++ | ++ |
| | Tichý provoz | + | +++ | +++ |
| | Vandalismus | + | Ne | Ne |
| | Vnitřní pohoda | + | ++ | ++ |
| | Bezpečnost | ++ | ++ | ++ |

Zdroj: [32]

4 Metodika ověřování

Princip činnosti tepelného čerpadla vychází z levotočivého Carnotova cyklu. Účinnost cyklu, u tepelných čerpadel nazývaná topný faktor, je závislá na rozdílu vstupních a výstupních teplot z cyklu. Čím je tento rozdíl nižší, tím je topný faktor vyšší. Topný faktor lze spočítat podle vzorce:

$$COP = \frac{H}{E} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (4.1)$$

Kde:

H....tepelný výkon

E....elektrický příkon

T₁....teplota na teplotonosné látce vystupující z kondenzátoru

T₂....teplota teplotonosné látky vstupující do výparníku

[32]

Topný faktor není nikdy stejný a závisí na vstupní a výstupní teplotě, která se v průběhu provozu mění. Podle teploty vstupující na výparník tepelného čerpadla je

možné posoudit vlastnosti zemních výměníků a jejich vliv na topný faktor tepelného čerpadla. Díky tomu, že všechny hodnoty při výpočtu topného faktoru se dají považovat za konstantní kromě vstupní teploty na výparník, je možné porovnat topný faktor a účinnost tepelného čerpadla vzduch/voda a země/voda. Účinnost tepelného čerpadla je lineárně závislá na hodnotě topného faktoru. Takto vypočítaný topný faktor vycházející z porovnávacího levotočivého Carnotova cyklu je pouze teoretický, protože je ovlivňován dalšími faktory:

- typ kompresoru
- motory ventilátorů (čerpadla vzduch/voda) 80 až 300 w
- oběhová čerpadla primární a sekundární strany 30 až 150 w
- odtávání výparníku tepelného čerpadla (vzduch/voda) 200 až 1000 w na jedno odtání
- příkon elektroniky 10 až 300 w
- výhřev oleje kompresoru 30 až 100 w
- cívky pro elektricky ovládané ventily 5 až 30 w
- další konstrukční okolnosti.

[32, 33]

Pomocí statistického softwaru STATISTICA (StatSoft, Inc. (2013). STATISTICA (data analysis software system), version 12.) a MS Excel bylo provedeno hodnocení měření.

4.1 Měření

Měření teplot na horizontálním výměníku Slinky a vertikálním U výměníku probíhalo na pozemcích společnosti VESKOM, spol. s r.o., Dolnoměcholupská 522/12a, 102 00 Praha 10.

Měření probíhalo v topném období od 19.9.2012 do 21.4. 2013, což odpovídá 215 dnům. Topná sezóna byla v průměru o 4, 65 °C teplejší než je udávaný průměr teplot pro Prahu (Karlov). Meteorologická stanice Praha je v nadmořské výšce 181 m.n.m. a společnost Veskom, spol. s.r.o. ve výšce 260 m.n.m. Délka topného období odpovídá normám dle ČSN 38 3350 Zásobování teplem a ČSN 06 0210 Výpočet

tepelných ztrát budov při ústředním vytápění pro Prahu. Hodnoty byly měřeny čtyřikrát za hodinu a výsledkem byl hodinový průměr.

4.1.1 Podmínky měření

Geologický profil zemního masivu je ve vrchní části tvořen ornici (0,25 m) a dále navázkou (tmavě hnědá písčitohlinitá půda, hrubozrnný štěrk, kamenná drť a úlomky cihel) o mocnosti 4 – 9,5 m. Pod navázkou se převážně nachází šedočerné jílovité břidlice letenského souvrství. V hlubších vrstvách jsou masivní horniny, které jsou místy silně rozpukané v hloubce od 30 do 80 m. Rozpukanost horniny naznačuje na silný výskyt podzemní vody a její průsak do vrtů. Při provádění vrtných prací se narazilo na hladinu podzemní vody v hloubce asi 10-12 m pod povrchem. Pro přesnější představu o místních podmínkách byl proveden TRT test, kterým byl naměřen součinitel tepelné vodivosti masivu $\lambda=2,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a celkový odpor vrtů $0,137 \text{ K.m.W}^{-1}$.

Výměníky Slinky spolu s lineárními výměníky jsou používány pro vytápění skladu a administrativní budovy pomocí tepelných čerpadel IVT PremiumLine EQ E17 o nominálním tepelném výkonu 17 kW (0/35 °C). Vrty s U smyčkou spolu s dalšími dvojitými U vrty jsou zdrojem energie pro tepelná čerpadla 1x IVT PremiumLine EQ E13 o tepelném výkonu 13.3 kW (0/35 °C) a 2x GreenLine HT Plus E 17 o tepelném výkonu 2x 16.2 kW (0/35 °C). Měřený vrt byl používán pouze pro vytápění, nikoliv pro chlazení.

Horizontální výměník Slinky byl vyroben z polyethylenového potrubí PE 100RC o rozměrech 32 x 2,9 mm. Potrubí je odolné proti bodovému zatížení a vzniku trhlin. Potrubí o délce 200 m je nainstalováno v hloubce 1,5 m pod povrchem v 53 stočených smyčkách do kruhu s roztečí 0,38 m. Vertikální výměník U byl také vyroben z polyethylenového potrubí PE 100RC o rozměrech 2 x 40 x 3,7 mm. Teplonosnou kapalinou byla směs 33 % etylalkoholu a 67 % vody.

Venkovní teploty vzduchu, který byl zdrojem pro tepelné čerpadlo vzduch/voda, byly měřeny ve výšce 2 m nad zemí ve vzdálenosti 20 m od horizontálních výměníků senzorem ALMEMO FHA646AG (výrobce AHLBORN Mess-und Regelungstechnik, Holzkirchen, Germany). Měření teplot teplonosného média na vstupu a na výstupu z

výměníků bylo provedeno pomocí měřičů spotřeby tepla MTW 3 (Itron Inc. Liberty Lake, USA).

5 Výsledky ověřování

Základní charakteristika naměřených teplot vzduchu a teplotního média vstupujícího na výparník tepelného čerpadla je shrnuta v tab. 4. Podle těchto hodnot již můžeme na první pohled konstatovat, že výměník U by měl být nejvýhodnější jako zdroj nízkopotencionální energie pro tepelné čerpadlo. Výměník má nejvyšší hodnoty průměru a mediánu teplot. Naopak nejnižší hodnota rozptylu naznačuje jeho nejvyšší stabilitu, protože není prakticky ovlivňován venkovní teplotou.

Tab. 4 Charakteristika naměřených dat

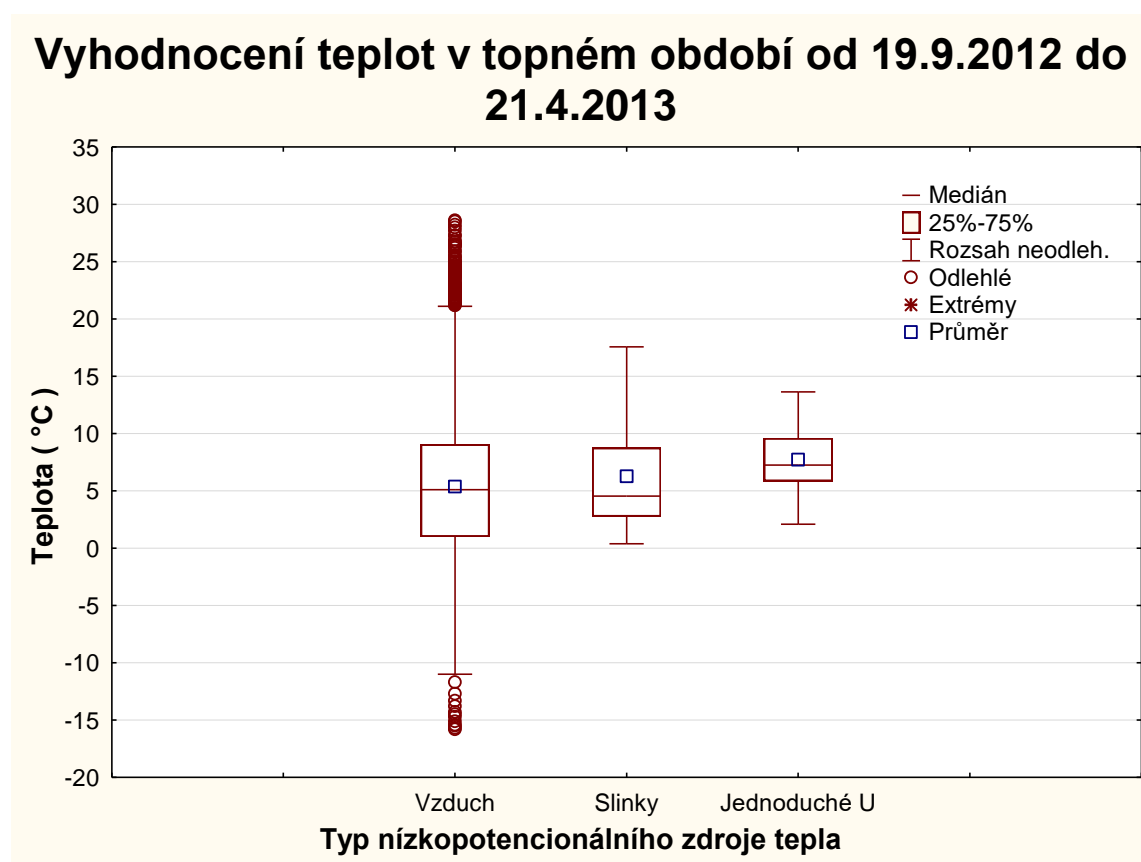
| Zdroj energie pro TČ / hodnota | Vzduch | Slinky | Vertikální výměník U |
|--|------------------|------------------|----------------------|
| Celkový počet hodnot [-] | 5160 | 5159 | 5159 |
| Průměr a směrodatná odchylka [°C] | 5,362 ± 6,251 | 6,261 ± 4,696 | 7,727 ± 2,907 |
| Medián [°C] | 5,100 | 4,540 | 7,244 |
| Minimum [°C] | -15,8 | 0,384 | 2,083 |
| Maximum [°C] | 28,6 | 17,56 | 13,64 |
| Rozptyl [°C] | 39,08 | 22,06 | 8,45 |

Zdroj: vlastní

Z krabicového grafu na obr. 20 je vidět, že hodnoty mediánu a průměru u teploty vzduchu jsou téměř v prostředku a jsou si velmi blízké. Také se zde vyskytují odlehle hodnoty, ale nikoliv extrémní. Hodnota směrodatné odchylky u vzduchu je větší než

hodnota průměru a to svědčí o vysoké variabilitě hodnot. Dále je z grafu patrné, že 75 % hodnot se nachází nad 1°C. Medián teplot vzduchu se nachází lehce nad 5°C. Medián teploty média vstupujícího na výparník z výměníku Slinky se nachází ve spodní části krabice a jeho hodnota je 4,5 °C. Výše teplot v polovině topné sezóny je u výměníku Slinky o 0,6 °C nižší než je teplota vzduchu. Hodnota mediánu pro teplotu média vstupujícího na výparník z vertikálního výměníku jednoduché U je přibližně 7,3°C a leží nad hodnotami dalších porovnávaných zdrojů tepla.

Obr. 20 Krabicový graf teplot na vstupu na výparník

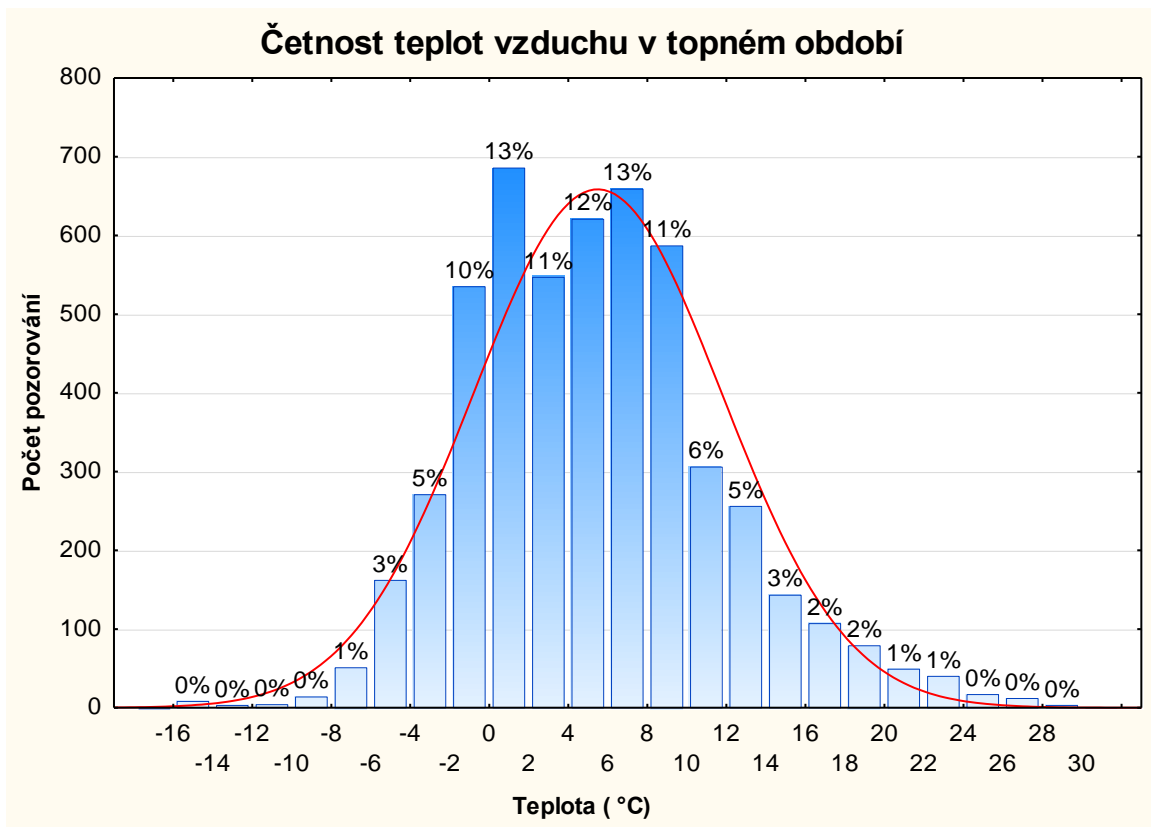


Zdroj: vlastní

Graf na obr. 21 zobrazuje relativní a absolutní četnost teplot vzduchu v topném období. Největší četnost teplot byla v rozmezí od 0 do 2 °C a od 6 do 8 °C a to po 13 %. Nejvýznamnější zastoupení teplot bylo -2 do 10°C. Z grafu na obr. 22 je vidět, že u výměníku Slinky byla největší četnost teplot od 2 do 4 °C a to 33 %. Větší zastoupení také bylo u teplot 4 až 6 °C (16 %) a 0 až 2 °C (13 %). Vyšší teploty se vyskytují

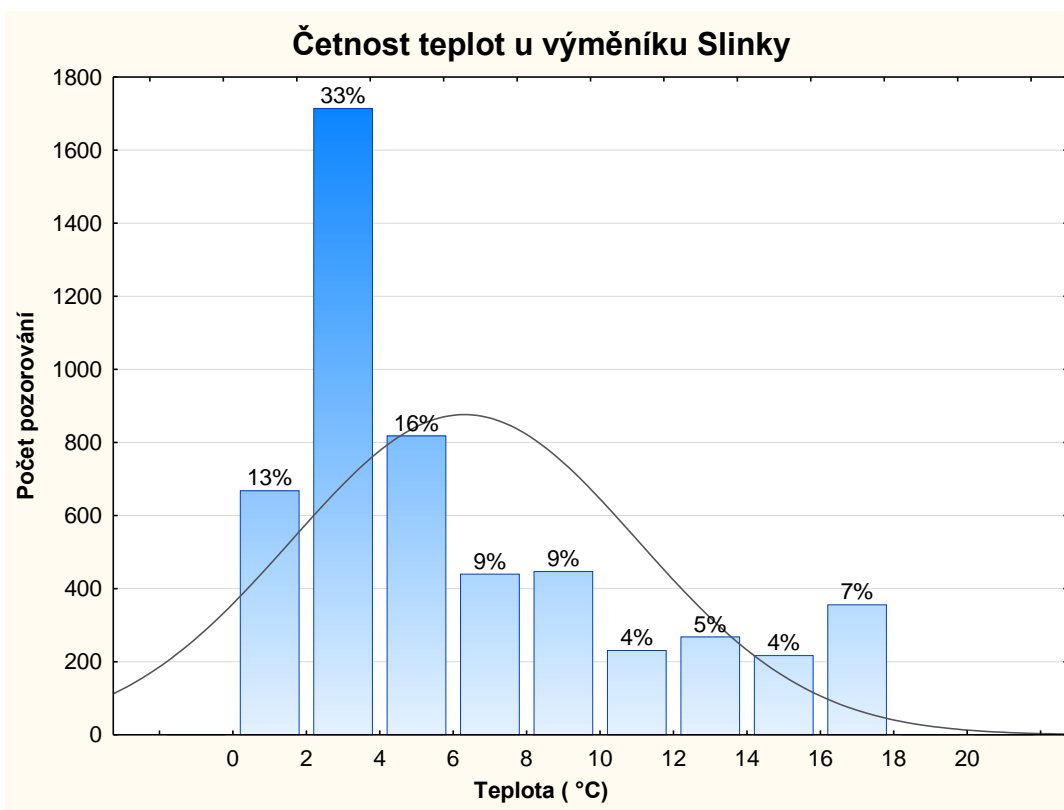
pouze zřídka. Teploty mezi 16 a 18 °C sice pokrývaly 7 % období, ale to bylo hlavně na začátku topné sezóny, kdy byla země prohřátá z období stagnace a také nebyl požadovaný vysoký topný výkon. Četnost teplot v topné sezóně u vertikálního výměníku U je vidět na obr. 23. Na první pohled můžeme konstatovat, že tento výměník je nejstabilnější. Třetinu topného období se teploty pohybovaly mezi 6 až 8 °C. U obou zemních výměníků je vidět, že teplota neklesla nikdy pod 0°C. U vzduchu se teploty nacházejí pod 0°C, ale celkově to je asi 20 % a z toho jen 10 % teplot se nachází v oblasti od -2 do 0 °C.

Obr. 21 Četnost teplot vzduchu v topném období



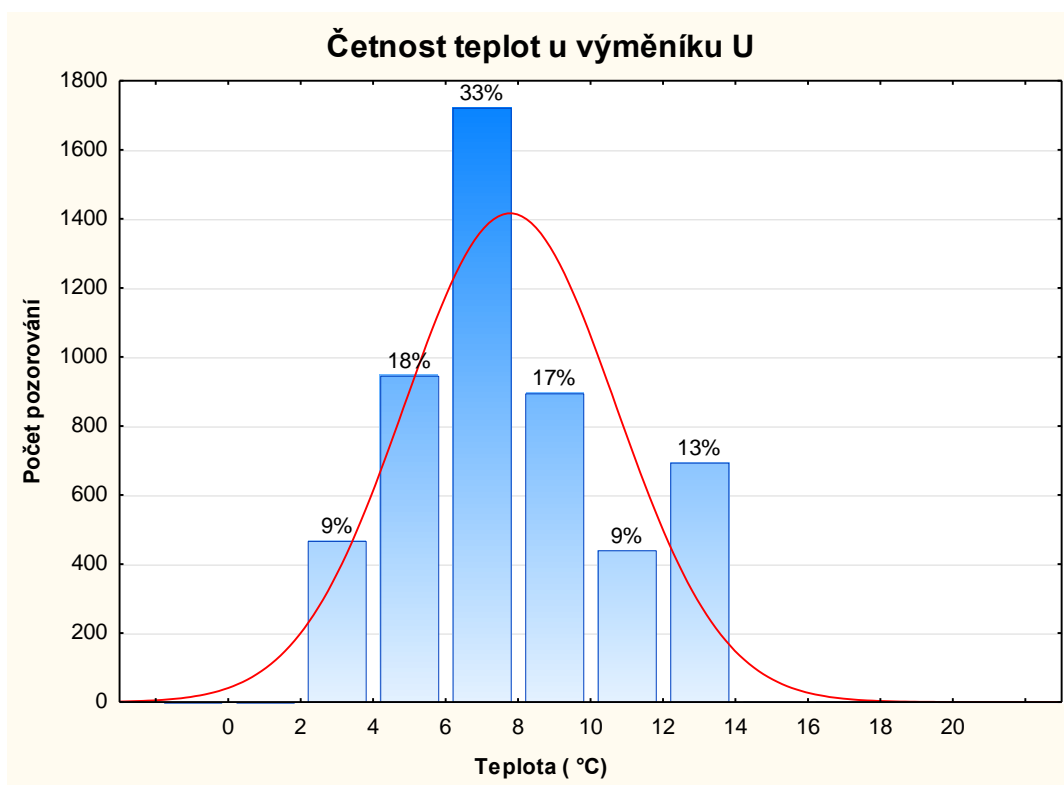
Zdroj: vlastní

Obr. 22 Četnost teplot média vstupujícího na výparník z výměníku Slinky



Zdroj: vlastní

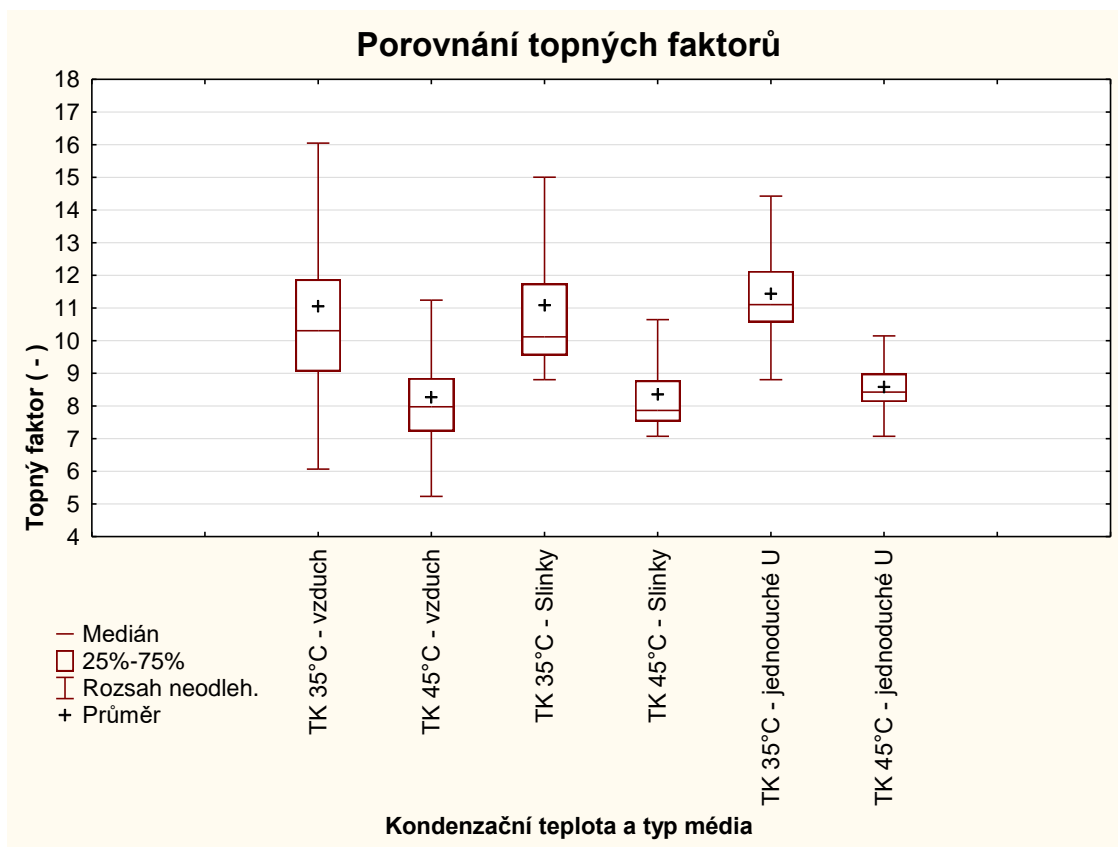
Obr. 23 Četnosti teplot média vstupujícího na výparník z vertikálního výměníku U



Zdroj: vlastní

Porovnání topných faktorů je vidět na obr. 24. Na první pohled je vidět známý fakt, že topný faktor se snižuje s rostoucím rozdílem mezi teplotou vypařování a teplotou kondenzace. Větší rozsah topných faktorů je u kondenzační teploty 35°C. Z grafu vyplývá, že větší vliv na topný faktor má volba teploty kondenzace než použitý typ výměníku. Topný faktor při teplotě kondenzace je jednoznačně nejlepší u jednoduchého U výměníku. Zastoupení hodnot topného faktoru pro vzduch a Slinky je podobné, pro vzduch hodnoty vycházejí trochu vyšší podle pozice mediánu. Topný faktor pro vzduch dosahuje mnohem vyšších hodnot než u horizontálního a vertikálního výměníku díky vysokým teplotám vzduchu na začátku a na konci topného období. Výměník Slinky se jeví jako stabilnější zdroj energie než vzduch.

Obr. 24 Srovnání topných faktorů



Zdroj: vlastní

6 Závěr a diskuze

První část práce popisuje historii, vývoj a celkový přehled tepelných čerpadel. Cílem této práce bylo porovnat zdroje nízkopotencionální energie pro tepelná čerpadla a vyhodnotit, který zdroj je v reálném provozu nejvýhodnější. Podklady pro tuto práci byly shromážděny ve firmě VESKOM spol. s.r.o., kde byla prováděna měření teplot vstupujících na výparník tepelného čerpadla z jednotlivých výměníků a také bylo prováděno měření teploty venkovního vzduchu. Díky tomu bylo možné porovnat tepelná čerpadla vzduch/voda a země/voda při chodu v reálných podmínkách. Konkrétně byl porovnáván horizontální výměník typu Slinky, vertikální výměník jednoduché U a vzduch. Měření probíhalo každou hodinu po celou dobu topné sezóny v období 2012/2013. Naměřená data byla shromážděna do tabulky, ze které následně byly vyhodnoceny výsledky v grafickém zpracování. Hlavním cílem měření bylo zhodnocení topných faktorů u jednotlivých zdrojů nízkopotencionální energie v daném období. Topný faktor byl počítán z porovnávacího levotočivého Carnotova cyklu, teplota kondenzace byla volena jako konstantní 35 °C nebo 45 °C. Hodnoty topného faktoru jsou celkově vysoké, protože výpočet nezohledňuje ztráty při běhu jednotky tepelného čerpadla. Počítání těchto ztrát pro porovnání zdrojů nízkopotencionální energie pro tepelná čerpadla však není důležité.

Z výsledku měření vychází jako nejvýhodnější zdroj pro tepelná čerpadla vertikální výměník jednoduché U. Hodnoty topného faktoru byly nejvyšší za celou topnou sezónu. Pokud bychom porovnávali hodnoty pro teplotu kondenzace 35 °C, tak u výměníku U byl medián topného faktoru 11,1 a rozptyl 1,7. Tento výměník se jeví jako nejúčinnější a nejvíce stabilní. Další z nesporných výhod oproti ostatním typům je možnost pasivního chlazení v letním období.

Hodnoty topného faktoru u výměníku Slinky a u vzduchu ve velké míře srovnatelné. Ačkoliv teploty vzduchu oproti teplotám ve výměníku Slinky nabývaly záporných hodnot, tak jsou výsledky při pohledu na celé topné období srovnatelné. V období, kdy je požadován nejvyšší výkon, tak jsou teploty nejnižší a tím pádem i účinnost je nejnižší. Důležitým faktorem ovlivňujícím topný faktor u tepelného čerpadla vzduch/voda je odtávání výparníku, které začíná okolo 8°C. Právě ¾ teplot v topném období se nachází pod touto hodnotou, takže topný faktor bude už jenom z tohoto důvodu silně ovlivněn.

Při volbě tepelného čerpadla je důležité brát v úvahu návratnost celého systému, dostupnost volného prostoru pro horizontální výměníky a geologickou situaci. Také je důležité uvažovat nad otopným systémem, protože čím vyšší je teplota kondenzace, tím nižší je topný faktor. Vzhledem k tomu, že každá instalace je trochu jiná, tak je třeba volbu tepelného čerpadla individuálně posoudit pro každý případ zvlášť.

Práce se zabývala porovnáním nízkoteplotních zdrojů energie pro tepelná čerpadla v období topné sezóny 2012/2013. Zajímavé a více směrodatné by bylo vyhodnotit data za delší období deseti nebo i dvaceti let.

Seznam použité literatury

- [1] HOŘEJŠÍ, M. (2002): Tepelná čerpadla pro každého (I). Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/953-tepelna-cerpadla-pro-kazdeho-i> (cit. 20.1.2017)
- [2] REDAKCE SVĚTA BYDLENÍ (2007): Představujeme tepelná čerpadla, 1. díl: Pohled do historie, aneb jak to vše vzniklo. Dostupné z: <http://www.svetbydleni.cz/stavba-a-rekonstrukce/predstavujeme-tepelna-cerpadla-1-dil-pohled-do-historie-aneb-jak-to-vse-vzniklo-.aspx> (cit. 20.1.2017)
- [3] DOLEŽEL, M. (2016): Stručná historie tepelných čerpadel. Technologie vznikla v Česku. Dostupné z: <http://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/technicka-zarizeni/3557-strucna-historie-tepelnych-cerpadel-technologie-vznikla-v-cesku> (cit. 20.1.2017)
- [4] BANKS, D. (2012): An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, West Sussex, United Kingdom of Great Britain, 510 s. ISBN 978-0-470-67034-7
- [5] BLÁHA, M. (2011): První tepelné čerpadlo v rodinném domě funguje již 20 let. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/7983-prvni-tepelne-cerpadlo-v-rodinnem-dome-funguje-jiz-20-let> (cit. 23.1.2017)
- [6] IVT s.r.o., (2017): Typy tepelných čerpadel : Vzduch/vzduch. Dostupné z: <http://www.cerpadla-ivt.cz/cz/tepelna-cerpadla-vzduch-vzduch> (cit. 23.1.2017)
- [7] SLOVÁČEK, J. (2014): Stav tepelných čerpadel na českém trhu. Dostupné z: http://www.avtc.cz/?download=_/145/stav-tepelnych-cerpadel-na-ceskem-trhu.pdf (cit. 24.1.2017)
- [8] PERGL, J. (2014): Tepelná čerpadla mají své kořeny v Česku. Používají se už desítky let. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/vytapani/tepelna-cerpadla-maji-sve-koreny-v-cesku-pouzivaji-se-uz-desitky-let.aspx> (cit. 24.1.2017)

- [9] SLOVÁČEK, J. (2007): Tepelná čerpadla v ČR. Dostupné z: http://www.avtc.cz/?download=_/6/clanek-tepelna-cerpadla-v-cr-22.2.2007_uprava_final.pdf (cit. 24.1.2017)
- [10] HÖGFORS, P. (2014): Ground Source Heat Pumps In Stockholm City. Dostupné z: http://regeocities.eu/wp-content/uploads/2014/05/3-GSHP-Bryssel-23-maj_midsommar-rev.pdf (cit 23.1.2017)
- [11] BURKHARD, S. et.al. (2014): Analysis of Market for Shallow Geothermal Energy. Dostupné z: <http://regeocities.eu/wp-content/uploads/2012/12/D3.1-2nd-Analysis-of-Market-for-Shallow-Geothermal-Energy.pdf> (cit. 24.1.2017)
- [12] KARLÍK, R. (2009): Tepelné čerpadlo pro váš dům. Praha : Garda, ISBN 978-80-247-2720-2.
- [13] <http://www.chlazenizlin.cz/www/userfiles/images/princip-tcw.jpg>
- [14] SEDLÁŘ, J. (2015): Hodnocení SCOP tepelných čerpadel pro vytápění. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13507-hodnoceni-scop-tepelnych-cerpadel-pro-vytapani> (cit. 28.1.2017)
- [15] MATUŠKA, T. (2015): Parametry pro hodnocení efektivity soustav s tepelnými čerpadly: SPF a PER. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13272-parametry-pro-hodnoceni-efektivit-soustav-s-tepelny-mi-cerpadly-spf-a-per> (cit.28.1.2017)
- [16] REDAKCE (2016): Tepelná čerpadla země/voda se zemním kolektorem s přímým odparem. Dostupné z: <http://www.infobydleni.cz/news/tepelna-cerpadla-zeme-voda-se-zemnim-kolektorem-s-primym-odparem/>(cit.28.1.2017)
- [17] http://www.termowatt.cz/tepelnacerpadla/img/Zeme_voda_schema_kol_Full.jpg
- [18] KALETA, J. et.al.(2013): Základní zásady návrhu plošného zemního kolektoru pro tepelné čerpadlo země/voda. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/10178-zakladni-zasady-navrhu-plosneho-zemniho-kolektoru-pro-tepelne-cerpadlo-zeme-voda> (cit.30.1.2017)
- [19] WU, Y. et al. (2010): Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers. Applied Thermal Engineering 30, 2574-2583. Dostupné z:

http://www.met.reading.ac.uk/~ass98av/GROMIT/Publications_files/Wuetal2010AppliedThermalEngineering.pdf

- [20] (2012): Metodika pro návrh tepelného čerpadla země – voda. Dostupné z: http://www.avtc.cz/?download=/_dokum/metodika-pro-navrh- tepelneho- cerpadla- zeme---voda_28_5_2012-pracovni-verze.pdf
- [21] GE-TRA s.r.o., (2009-2017): Návod na pokládku PE potrubí. Dostupné z: <http://www.ge-tra.cz/problematiky/navod-na-pokladku-pe-potrubí> (cit. 2.2.2017)
- [22] SVP - půjčovna s.r.o. (2017): Rýhovač Vermeer RTX100. Dostupné z: <http://www.zahradni-technika.eu/ryhovac-rtx100.html> (cit. 2.2.2017)
- [23] EGG, J. (2011): Geothermal HVAC : green heating and cooling, New York : McGraw-Hill, 249 s. ISBN: 978-0-07-174610-6
- [24] ŽERAVÍK, A. (2003): Stavíme tepelné čerpadlo: [návratnost i za jeden rok]. Kroměříž: A. Žeravík, ISBN 80-239-0275-X.
- [25] Kensa Heat Pumps Ltd (2017):Slinky Installation V4. Dostupné z: <https://www.kensaheatpumps.com/wp-content/uploads/2014/03/Factsheet-Slinkie-Installation-V4.pdf> (cit. 10.2.2017)
- [26] <http://www.nibe.cz/images/onas/hlubinny-vrt.jpeg>
- [27] Inteligentní budovy, České vysoké učení technické v Praze (2017): Tepelná čerpadla NPT. Dostupné z: https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/AZE/P7-tepelna_cerpadla_NPT.pdf (cit. 10.2.2017)
- [28] ČÍŽEK, P. (2012): Základní vlastnosti vrtů pro tepelná čerpadla. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/9245-zakladni-vlastnosti-vrtu-pro-tepelna-cerpadla> (cit. 12.2.2017)
- [29] GE-TRA s.r.o., (2009-2017): THERMAL RESPONSE TEST. Dostupné z: <http://www.ge-tra.cz/problematiky/thermal-response-test> (cit. 20.2.2017)
- [30] Green Gas DPB, a.s., (2013-2017): Thermal Response Test. Dostupné z: <http://www.teplozezeme.cz/nabidka-trt/> (cit. 20.2.2017)

- [31] ACUNA, J. et al. (2010): A Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia: 2010. Dostupné z: https://www.kth.se/polopoly_fs/1.114031!/Menu/general/column-content/attachment/Acuna%20-%20Palm%20%20A%20novel%20coaxila%20BHE%20-%20Description%20and%20first%20DTRT%20measurements%20%202953.pdf
- [32] WU, R. (2009): Energy Efficiency Technologies – Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump. Journal of Sustainable Development Vol. 2, No.2. Dostupné z: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/viewFile/2986/2757>
- [33] 4u-therm s.r.o. (2010): Jak je to s výkonem a účinností TČ? Dostupné z: <http://www.4u-therm.cz/zakladni-informace-jak-je-to-s-vykonem-TC.php?str=6> (cit. 2.3.2017)

Seznam Obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Vývoj instalací tepelných čerpadel v ČR od roku 1990 | 5 |
| Obr. 2 EHPA..... | 5 |
| Obr. 3 Tepelná čerpadla v Evropě | 6 |
| Obr. 4 Vrtly v oblasti Stockholmu | 7 |
| Obr. 5 Princip tepelného čerpadla..... | 9 |
| Obr. 6 Schéma tepelného čerpadla země/voda s plošným kolektorem..... | 12 |
| Obr. 7 Šíření tepla v okolí lineárního zemního výměníku..... | 14 |
| Obr. 8 Šíření tepla v okolí horizontálního výměníku Slinky..... | 15 |
| Obr. 9 Typy horizontálních výměníků: klasické uložení; spirálové uložení; Slinky..... | 16 |
| Obr. 10 Pokládka plošného kolektoru – skrývka..... | 16 |
| Obr. 11 Zemní rýhovač | 17 |
| Obr. 12 Kompaktní a prodloužená metoda instalace Slinky | 17 |
| Obr. 13 Doporučené podmínky pro návrh a instalaci Slinky | 18 |
| Obr. 14 Srovnání plošných kolektorů | 19 |
| Obr. 15 Schéma tepelného čerpadla s geotermálním vrtem | 20 |
| Obr. 16 Teploty podpovrchové vrstvy | 21 |
| Obr. 17 Půdorysné uspořádání kanálů v BHE | 22 |
| Obr. 18 Schéma konstrukce vrtu..... | 25 |
| Obr. 19 Graf průběhu teplot v U výměníku..... | 28 |
| Obr. 20 Krabicový graf teplot na vstupu na výparník | 33 |
| Obr. 21 Četnost teplot vzduchu v topném období | 34 |
| Obr. 22 Četnost teplot média vstupujícího na výparník z výměníku Slinky | 35 |
| Obr. 23 Četnosti teplot média vstupujícího na výparník z vertikálního výměníku U | 35 |
| Obr. 24 Srovnání topných faktorů | 36 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Maximální extrakční kapacita půdy podle normy VDI 4640 | 14 |
| Tab. 2 Rozdělení systémů geotermálních vrtů..... | 23 |
| Tab. 3 Porovnání tepelných čerpadel..... | 28 |
| Tab. 4 Charakteristika naměřených dat | 32 |