

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitě
geofyziky



Využití geotermální energie tepelnými čerpadly

Bakalářská práce

Rudolf Schneedörfler

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Josef V. Datel Ph.D.

Praha, září, 2.9.2010

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce, RNDr. Josefu V. Datlovi Ph.D. za přátelský přístup, ochotu a cenné rady.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá využíváním geotermální energie pomocí tepelných čerpadel. Důraz byl kladen na charakteristiky různých typů tepelných čerpadel a možnosti jejich využití ve vztahu k horninovému prostředí s ohledem na konstrukci primárního okruhu tepelného čerpadla. V prvních kapitolách práce je charakterizována obecně geotermální energie, její původ, geotermální systémy a geofaktory, které podmiňují její výskyt.

SUMMARY

This bachelor thesis describes the utilization of geothermal energy by using heat pumps. Emphasis was placed on the characteristics of different types of heat pumps and how to use them in relation to different types of rock environment, with respect to the construction of the primary circuit of the heat pump. In the early chapters of this work is generally characterized geothermal energy itself, its origins, geothermal systems and geofactors, which indicates its presence.

OBSAH:

1. ÚVOD	1
2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	1
3. METODIKA PRÁCE	2
4. ZEMSKÉ TEPLLO.....	2
5. GEOTERMÁLNÍ ENERGIE	4
5.1. Původ geotermální energie.....	4
5.2. Geotermální systémy	5
5.2.1. Hydrotermální systémy a jejich využití.....	6
5.2.2. Systém a technologie HDR.....	7
5.3. Oblasti a geologické struktury vhodné pro využití geotermální energie.....	8
5.4. Globální využití geotermální energie k produkci elektrické energie.....	9
6. VYUŽITÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE POMOCÍ TEPELNÝCH ČERPADEL.....	10
6.1. Výkon a práce.....	10
6.2. Princip tepelného čerpadla	10
6.3. Systémy tepelných čerpadel podle zdroje získávané energie.....	13
6.3.1. Systém Voda/Voda.....	13
6.3.2. Systém Země/Voda.....	16
<i>Horizontální uložení výměníku</i>	<i>16</i>
<i>Vertikální uložení výměníku.....</i>	<i>18</i>
<i>Význam numerického modelování v navrhování tepelných čerpadel</i>	<i>19</i>
6.4. Globální využití geotermální energie	21
7. DISKUZE.....	22
8. ZÁVĚR.....	23
10. POUŽITÁ LITERATURA	25

1. ÚVOD

Tato práce vznikla na základě původního zadání vedoucího bakalářské práce, RNDr. Josefa V. Datla Ph.D., které se týkalo využití geotermální energie. Téma bylo upřesněno a náplň práce zaměřena hlavně na využití geotermální energie tepelnými čerpadly. Práce má kompilační charakter a byla zadána v prosinci 2010. Cílem práce bylo shrnout dosavadní poznatky o využívání geotermální energie pomocí tepelných čerpadel, tedy o přímém využití této energie k vytápění, ohřevu vody nebo naopak k ochlazení objektů. Důraz byl kladen na charakteristiky různých typů tepelných čerpadel a možnosti jejich využití ve vztahu k horninovému prostředí s ohledem na konstrukci primárního okruhu tepelného čerpadla. V prvních kapitolách práce je charakterizována obecně geotermální energie, její původ, geotermální systémy a geofaktory, které podmiňují její výskyt. Blíže je zde popsáno i využívání geotermální energie pro výrobu elektrické energie v systému HDR.

Dané téma jsem si zvolil, protože geotermální energie je v současné době jedním z nejperspektivnějších obnovitelných zdrojů a její využívání tepelnými čerpadly velice rozšířené.

2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Geotermální energie je v práci Myslil et al., 2007 popsána jako „přírodní teplo Země koncentrované v rezervoárech hornin obvykle nasycených kapalinou“. Tato definice dobře vystihuje způsob, jakým je teplo uloženo pod zemským povrchem, ale než věda dospěla k takovému závěru, všimli si lidé hlavně povrchových projevů této energie. Vulkanické erupce, horké prameny, přítomnost gejzírů a další jevy spojené s parními výrony nebo výrony plynů pravděpodobně vedly naše předky ke zjištění, že v určitých místech pod povrchem se ukrývá teplo. Ke zjištění, že teplota Země stoupá se zvyšující se hloubkou, však došlo až někdy v průběhu 16. a 17. století, kdy byly hloubeny první doly dosahující několika set metrů. První zmínky o využívání geotermální energie můžeme datovat do 19. století. Již v roce 1827 začal Francesco Larderel využívat tepla boritých fluid, které primárně využíval k výrobě kyseliny borité (Dickson, Fannelli, 2003). Ve stejné oblasti dnes zvané Larderello bylo navíc v roce 1904 poprvé využito geotermální energie k výrobě elektřiny. Intenzivnější výzkum geotermální energie ale započal až v 70. letech 20. století, kdy se také více rozšířilo používání tepelných čerpadel. V současné době je zemského tepla využíváno k vytápění či ochlazení objektů i k výrobě elektrické energie. Geotermální energií se v dnešní době zabývá mnoho odborníků a existují různé nadnárodní organizace, které pořádají kongresy na toto téma. Jmenovitě například IGA (International Geothermal Association), která sdružuje více než 2000 členů z 65 států světa. Poslední dokument, který IGA vydala, je souhrnná zpráva ze světového

geotermálního kongresu, který se uskutečnil v dubnu 2010 na Bali. Tento dokument poskytuje cenné informace z různých zemí světa o využívání geotermální energie. Na stránkách IGA (www.geothermal-energy.org) je ale možné získat i mnoho dalších odborných článků publikovaných členy této organizace, které se zabývají danou problematikou. Dalšími důležitými zdroji jsou například časopisy *Geothermics* nebo *Renewable Energy* vydávané nakladatelstvím Elsevier, které publikují řadu odborných článků týkajících se geotermální energie. V České republice byl v časopise *Planeta*, který vydává Ministerstvo životního prostředí, publikován článek Myslil et al., 2007. Článek se zabývá současnými možnostmi využívání geotermální energie a to jak ve světovém měřítku, tak i v podmínkách České republiky. Tento text dobře odráží dosažené poznatky o geotermální energii v České republice, přičemž čerpá z mnoha předchozích výzkumů provedených na našem území.

3. METODIKA PRÁCE

Jelikož tato bakalářská práce má kompilační charakter, byla hlavní metodou sekundární analýza dat. Zdroje používané v této práci jsou buďto knižní nebo se jedná o odborné články hledané převážně v databázi ScienceDirect. Některé články byly vyhledány pomocí webové služby Google Scholar. Odborné knihy byly zapůjčeny ve vědecké knihovně v Českých Budějovicích, v Národní knihovně v Praze nebo v knihovně geologické sekce Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Cenným zdrojem pro tuto práci byly též odborné články dostupné na internetové stránce výše zmiňované IGA (International Geothermal Association).

4. ZEMSKÉ TEPLLO

Informace pro tuto úvodní kapitolu byly čerpány z práce Myslil et al., 2007. Teplo je energie, kterou těleso nabývá díky pohybu malých částic hmoty. Čím teplejší těleso je, tím rychleji kmitají částice, které ho tvoří. Tepelná energie je proudění molekul z míst teplejších na místa chladnější. Teplo se značí Q a jeho základní jednotkou je J (*joul*). Chceme-li vypočítat teplo tělesa, musíme brát v potaz změnu teploty ΔT [K], jeho měrnou tepelnou kapacitu c [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] a hmotnost systému m [kg]. Toto je vyjádřeno vztahem $Q = m c \Delta T$.

Dalším, velice důležitým atributem tepla je způsob, jakým se teplo šíří. Rozlišujeme tři základní způsoby. Šíření tepla vedením (kondukce), prouděním (konvekce) a zářením (radiace). Kondukce je nejčastějším způsobem šíření tepla v pevných látkách, např. v kovech. Jedná se o předávání tepla z teplejší do studenější části tělesa, uskutečňované srážkami částic látky. Schopnost látky přenášet teplo vedením se nazývá tepelná vodivost. Tímto způsobem se teplo šíří ve vnitřním kovovém jádře. Konvekce je proudění teplé nebo studené látky na základě rozdílu hustoty. Tento

způsob předávání tepla je typický pro vulkanické oblasti, kde jsou horniny v plastickém stavu. Konvekční proudění probíhá ve velkém měřítku v zemském plášti, konkrétně pak v astenosféře, která je obecně značně plastičtější než zemská kůra. Již výše zmíněná radiace je předávání tepla zářením o různých vlnových délkách. Jedná se o vlnové délky převážně z oblasti infračerveného spektra a částečně z oblasti viditelného záření.

Změny teploty v závislosti na hloubce jsou popsány geotermickým stupněm a teplotním gradientem. Geotermický stupeň je vyjádřen jako počet metrů pod povrchem, kde teplota vzroste o 1°C. Jeho průměrná hodnota ve světovém měřítku je 33m. Na Zemi však existují obrovské rozdíly v poklesech teploty s hloubkou. V oblastech tektonicky aktivních může být hodnota geotermického stupně jen 5m (např. na Sicílii), přičemž v tektonicky klidných oblastech se tato hodnota blíží 100m (pozorováno v hlubokých zlatých dolech jižní Afriky a Indie). Teplotní gradient je obdobou geotermického stupně. Přesněji se jedná o vertikální gradient teploty v zemské kůře. Vyjadřuje se v jednotkách Celsia (nebo Kelvina) na metr. Nabývá hodnot mezi 0,01 až 0,1°C na metr rostoucí hloubky.

Jedním z hojně používaných geotermických termínů je tepelný tok. Ten vyjadřuje množství tepla, které prochází jednotkou plochy za jednotku času. Nejčastěji je udáván v $mW.m^{-2}$. Na povrchu země se jeho hodnota pohybuje v rozmezí 30 a 120 $mW.m^{-2}$. Jako střední hodnota se uvádí 70 $mW.m^{-2}$. Opět platí, podobně jako u teplotního gradientu, že v oblastech geologicky aktivnějších jsou hodnoty tepelného toku vyšší, než v oblastech klidných. Tepelný tok je též závislý na mocnosti kůry a to tak, že mocnější kůra znamená nižší hodnoty a naopak. Obecně jsou jeho hodnoty vyšší v oceánské kůře, než v kůře kontinentální.

Nemůže být opomíjena ani tepelná vodivost hornin. Ta se značí k , udává se v jednotkách $Wm^{-1}.K^{-1}$ a je důležitou informací při studiu rozložení teplot v zemské kůře. Obecně platí, že hodnoty tepelné vodivosti záleží na obsahu vody a porózitě, na tepelné vodivosti horninotvorných minerálů, na charakteru tmelu, struktuře, textuře i anizotropii. Tepelná vodivost stoupá s obsahem vody a klesá, pokud se zvyšuje porózita. Z toho vyplývá, že dosahuje větších hodnot například u hlubinných vyvřelin či metamorfítů, než u mladých méně zpevněných sedimentů, jež navíc neobsahují minerály dobře vedoucí teplo. Tepelná vodivost je pro svou časoprostorovou proměnlivost a závislost na mnoha dalších parametrech jedním z nejobtížněji stanovitelných parametrů při geotermálním výzkumu. Chybné stanovení velikosti tepelné vodivosti hornin může podstatným způsobem ovlivnit závěry o možnostech využití geotermální energie.

5. GEOTERMÁLNÍ ENERGIE

5.1. Původ geotermální energie

Uvolňování tepla chladnutím Země a teplo produkované radioaktivním rozpadem prvků mají pravděpodobně největší vliv na rozložení teplot a hodnoty tepelného toku na Zemi. Radioaktivní prvky v horninách uvolňují tolik tepla, že jejich příspěvek k celkovému tepelnému toku na povrchu Země je majoritní. U kontinentální kůry mluvíme přibližně o 60% vnitřní tepelné energie (Gupta, Roy, 2007). Závislost hloubky a množství tepla vyrobeného rozpadem radionuklidů bylo předmětem rozsáhlého výzkumu. Dnes už je zjevné, že mělké části kontinentální kůry jsou bohatší na radioaktivní prvky než její hlubší části. Stejně tak v plášti jsou tyto prvky zastoupeny podstatně méně. V oceánské kůře, která je také na radioaktivní prvky chudá, je hlavním zdrojem tepla zřejmě konvektivní proudění tepla ze svrchního pláště. Platí také, že hodnoty tepelného toku jsou nejvyšší na středoocéánských hřbetech a se zvyšující se vzdáleností od nich klesají. Ze všech přítomných radionuklidů jsou pro tepelnou produkci nejdůležitější izotopy uranu ^{238}U a ^{235}U , thoria ^{232}Th a draslíku ^{40}K (Gupta, Roy, 2007). Tepelná produkce jednotlivých izotopů je uvedena v následující tabulce (Tab. 1).

Tab. 1 Hlavní izotopy vyskytující se v horninách, jejich poločasy rozpadu a tepelná produkce (Gupta, Roy, 2007 cituje publikaci Rybach, 1976)

Izotop	Poločas rozpadu (roky)	Tepelná produkce ($\text{J kg}^{-1} \text{rok}^{-1}$)
^{238}U	$4.50 \cdot 10^9$	$2,97 \cdot 10^3$
^{235}U	$0.71 \cdot 10^9$	$18,01 \cdot 10^3$
^{232}Th	$13,9 \cdot 10^9$	$0,83 \cdot 10^3$
^{40}K	$1,30 \cdot 10^9$	$0,92 \cdot 10^3$

Tabulka 2 uvádí koncentrace izotopů v magmatických horninách, přičemž tyto údaje jsou blízké i hodnotám naměřeným u hornin sedimentárních a metamorfovaných. (Hazdrová et al., 1981)

Tab. 2 Obsahy K, U, Th v magmatických horninách (Hazdrová et al., 1981)

Horniny	% K	ppm U	ppm Th
Kyselé	3,34	3,5	18,0
Intermediární	2,31	1.8	7,0
Bazické	0,83	0,5	3,0
Ultrabazické	0,03	0,003	0,005

Z výše uvedených údajů vyplývá, že se zvyšující se kyselostí hornin roste obsah radionuklidů a tím i tepelná produkce jednotlivých hornin. Největších hodnot tepelné produkce budou dosahovat horniny bohaté na izotopy uranu. V práci Hazdrová et al., 1981, kde je zpracováno 725 vzorků hornin z území bývalého Československa, jsou znázorněny závislosti tepelné produkce různých typů hornin na úhrnné gama aktivitě. Z těchto dat je zřejmé, že obecně nejvíce tepla produkují magmatické horniny, poté sedimenty a nejmenší tepelnou produkci vykazují horniny sedimentární.

Další zdroje tepelné energie, uvažujeme-li i o hlubších sférách Země, mohou být různé. Například zbytkové teplo z kosmické etapy vzniku Země, sluneční záření, teplo vznikající přeměnou kinetické energie vzniklé v důsledku tektonických pohybů, nebo různé exotermní fyzikálněchemické reakce. To je jen výčet některých zdrojů, jejichž větší či menší příspěvky k celkové bilanci tepla Země jsou více či méně dobře prozkoumané. Některým z nich se budu podrobněji věnovat v dalších kapitolách.

5.2. Geotermální systémy

Základními požadavky pro existenci geotermálního systému jsou: velký zdroj tepla, možnost toto teplo akumulovat a přítomnost bariéry, která naakumulované teplo udrží (Gupta, Roy, 2007). Je zde velké množství geologických podmínek, které geotermální systémy diferencují. Můžeme je nalézt v místech kde je hodnota teplotního gradientu průměrná nebo lehce nadprůměrná, ale hlavně v oblastech s vysokým teplotním gradientem, například na tektonických rozhraních. V případě menších hodnot teplotního gradientu se bude systém vyznačovat nízkými teplotami, většinou ne vyššími než 100 °C v ekonomicky využitelných hloubkách. Pokud je v oblasti teplotní gradient vyšší, můžou teploty dosahovat i více než 400 °C (Dickson, Fannelli, 2003). Zásadní význam pro využití geotermální energie má přítomnost různých fluid v zemské kůře. Těmito fluidy mohou být voda, vodní pára nebo různé plyny. Můžeme ale využívat i tepla samotných hornin.

Z hlediska geotermálních struktur a využití fluid, jsou podle práce Myslík et al., 2007 geotermální systémy rozděleny takto:

- Hydrotermální systémy (viz kapitola 5.2.1.)

- Petrofyzikální systémy, magmatická tělesa a systémy HDR (Hot Dry Rock - Horké suché horniny), případně FHR (Fractured Hot Rock - Rozpukané horké horniny) (viz kapitola 5.2.2.)

- Mělké geotermální systémy do teploty 25 °C a do hloubky cca 400m. Do této kategorie patří zemní kolektory, svislé kolektory ve vrtech a podzemní voda ve vrtech a studních (Tyto systémy jsou často využívány tepelnými čerpadly.)
- Jiné systémy, kam patří vrty hlubší než 400 m, betonové piloty nebo základy staveb, sezónní ukládání tepla v horninách v kombinaci s jinými alternativními zdroji, ukládání tepla ve zvodních, teplo v podzemních prostorách (v šachtách, tunelech apod.), teplo povrchových vod, přímé využívání tepla vzduchu prohřátého slunečním zářením
- Systémy hlubokých vrtů pro velké odběratele (několik MW). Systém je založen na spojení principu využití vyšších teplot zemského tepla v hloubkách kolem 3 km, kde jsou teploty nad 100 °C se sezónním ukládáním tepla ze solárních baterií a akumulaci tepla v nadzemních rezervoárech

Další možné dělení je fyzikálněchemické dělení na systémy hydrotermální, geotlakové (pánevní struktury s mocnou sedimentární výplní a napjatými termálními zvodněmi), systémy horkých suchých hornin a magmatické systémy. Nebo zde existuje geologické třídění na systémy vázané, či nevázané na oblasti s recentním vulkanismem.

5.2.1. Hydrotermální systémy a jejich využití

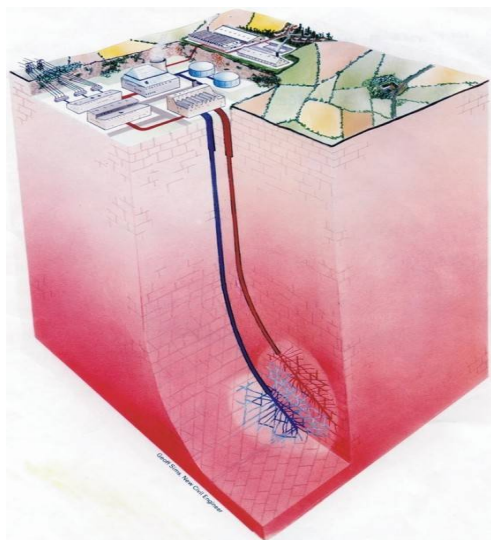
Můžeme je dále dělit na systémy s nižší či vyšší entalpií. Nízkou entalpií mají systémy s přehřátou vodou, popřípadě s vodní párou, nebo systémy s vysokým vodním tlakem. Vysokou entalpií mají hydrotermální zvodně s horkou vodou nad 100 °C, teplou vodou s teplotami v rozmezí 40 až 100 °C nebo nízkoteplotní zvodně, s teplotami 25-40 °C. Do této kategorie také patří termální vody (teploty nad 20 °C). Tyto systémy se váží na geologické struktury s uzavřenými nebo otevřenými zvodněmi, do nichž se hloubí jímací vrty. Teplá voda nebo pára se využije a případně zpět vtlačí do země k dalšímu ohřátí. Podle teploty čerpaného fluida je systém využíván buď přímo k vytápění, nebo k výrobě elektrické energie. V Čechách je využíváno teplo zvodní hlavně z bazálních sedimentů české křídové pánve v Děčíně a Ústí nad Labem, s dosahovanými teplotami v rozmezí 32 - 35 °C. Na Moravě se připravuje projekt na využití zvodní s teplotami 50 až 70 °C. (Myslil et al., 2007)

Velkým úspěchem přímého využití tepla horkých vod je například vytápění na Islandu, kde 90% všech domů v zemi je vytápěno tímto způsobem. Zbýlých 10% je pak vytápěno pomocí elektrické energie, která je ze 30% vyrobena využitím geotermálních zdrojů. (Gunnlaugsson, Ívarsson, 2010)

5.2.2. Systém a technologie HDR

V těchto systémech je teplo uloženo v horkých, málo propustných horninách, odkud energie nemůže být ekonomicky využita za pomoci přirozených fluid, jako je horká voda nebo pára. Teplo může být uloženo v různých hloubkách, podle ERDA (U.S. Energy Research and Development Administration) je ale maximální hloubka systému HDR deset kilometrů pod povrchem. Teploty nepřesahují 650°C, pak už by se mohlo jednat o magmatické těleso (Gupta, Roy, 2007). Ale magma může být zdrojem tepla takového systému, pokud se vyskytuje v jeho blízkosti. Dalšími takovými zdroji může být velká akumulace radioaktivních hornin či velká teplota svrchního pláště, v místech kde teplo vystupuje kondukčními proudy blízko k hranici s kůrou. Zdrojem takové akumulace tepla mohou být i tektonické pohyby. Vzhledem k těmto skutečnostem můžeme systémy HDR hledat hlavně v oblastech s recentním vulkanismem, obecně v oblastech se zvýšeným tepelným tokem. Například v místech, kde jsou radiometricky lokalizované zdroje tepla.

Technologie využití systémů HDR jsou založeny na vytváření umělých tepelných výměníků za pomoci hydraulického štěpení. Prakticky se jedná o vtláčení vody do vrtu za vysokých tlaků tak, aby se vytvořila síť puklin, kde bude voda cirkulovat a odebírat teplo horninám. Základní systém se sestává ze dvou vrtů, které jsou propojeny puklinami (viz Obr.1). Zjednodušeně řečeno se injektážním vrtem do země vtláčí voda a z druhého, čerpacího vrtu, se čerpá voda ohřátá, respektive vodní pára. Při vtláčení vody do větších hloubek voda zůstává i přes teploty přesahující bod varu stále v kapalném stavu, ale čerpáním ohřáté vody zpět k povrchu a následným uvolněním tlaku se mění ve vodní páru. Ta se poté využívá buď přímo, nebo slouží pro pohon geotermální elektrárny. Je odhadováno, že ochlazení 1km³ horké horniny o 100 °C zajistí chod elektrárny o výkonu 30MW po dobu třiceti let (Rummel, 2005). Je však nutné podotknout, že zprovoznění těchto obrovských tepelných výměníků v současné době není reálné pro běžný provoz elektráren o velkých výkonech. Asi největším úspěchem této technologie je francouzský projekt Soultz-sous-Forets (www.soultz.net), kde byla instalována geotermální elektrárna o výkonu 1,5MW. Elektrárna vyrobila první elektrický proud v roce 2008. Teplota čerpaných fluid se pohybuje kolem 180 °C (Vlček, 2009). V poslední době se vyčleňují zvláštní systémy FHR (fractured dry rock). Od systémů HDR se liší tím, že mají přírodně vytvořenou síť puklin. Přesto i v tomto případě je většinou v omezené míře nutné hydraulické štěpení (Myslil et al., 2007). Zásadním problémem těchto hlubokých výzkumů je nedostatečná prozkoumanost horninového masívu v daných hloubkách, a tedy časté nedokonalosti a chyby při spuštění systému (např. vtláčecí a produkční vrt se dostatečně nepropojí přes pukliny, nebo část injektované vody odtéká pryč mimo dosah produkčního vrtu).



Obr. 1 Znáornění tepelného výměníku, modrý vtláčecí a červený produkční vrt propojený puklinovým systémem (www.geothermal-energy.org)

5.3. Oblasti a geologické struktury vhodné pro využití geotermální energie

Schopnost nalézt oblast vhodnou pro využití geotermální energie se z velké části zakládá na znalosti geologických struktur dané lokality. Zde jsou po vzoru práce Myslík et al., 2007 vyjmenovány některé konkrétní geofaktory, které mohou napovědět o přítomnosti vhodného zdroje:

- *Přítomnost zlomových struktur hlubšího dosahu:* Ty představují velkou příležitost pro výstup tepla z velkých hloubek k povrchu. Těmito strukturami může vystupovat nejen magma z pláště, ale i horké vody nebo plyny. Zdroje v oblastech tektonických rozhraní litosférických desek jsou často využívány právě z těchto důvodů.
- *Menší mocnost zemské kůry:* Pokud teplo vystupující konvekčními proudy ve svrchním plášti ohřívá relativně tenčí zemskou kůru, může se zdroj geotermální energie nalézat v relativně menších hloubkách.
Zvýšená radioaktivita hornin: Jelikož rozpad radionuklidů je jedním z hlavních producentů tepla pod zemským povrchem, bude v oblastech se zvýšenou radioaktivitou relativně větší tepelný tok. (viz kapitola 5.1.)
- *Území se zvýšenou hydrogeotermální aktivitou:* Jak již bylo řečeno výše, hydrogeotermální aktivita indikuje oblasti se zvýšenými hodnotami tepelného toku. Horké prameny a plyny mohou být navíc přímo využívány k vytápění nebo výrobě elektrické energie.
- *Přítomnost žilných vyvěrelin:* Žilné vyvěreliny odkazují na dřívější magmatické procesy, tedy na procesy, jimiž vystupovalo v minulosti teplo k povrchu v dané oblasti a určují tak místa se zvýšeným tepelným tokem.

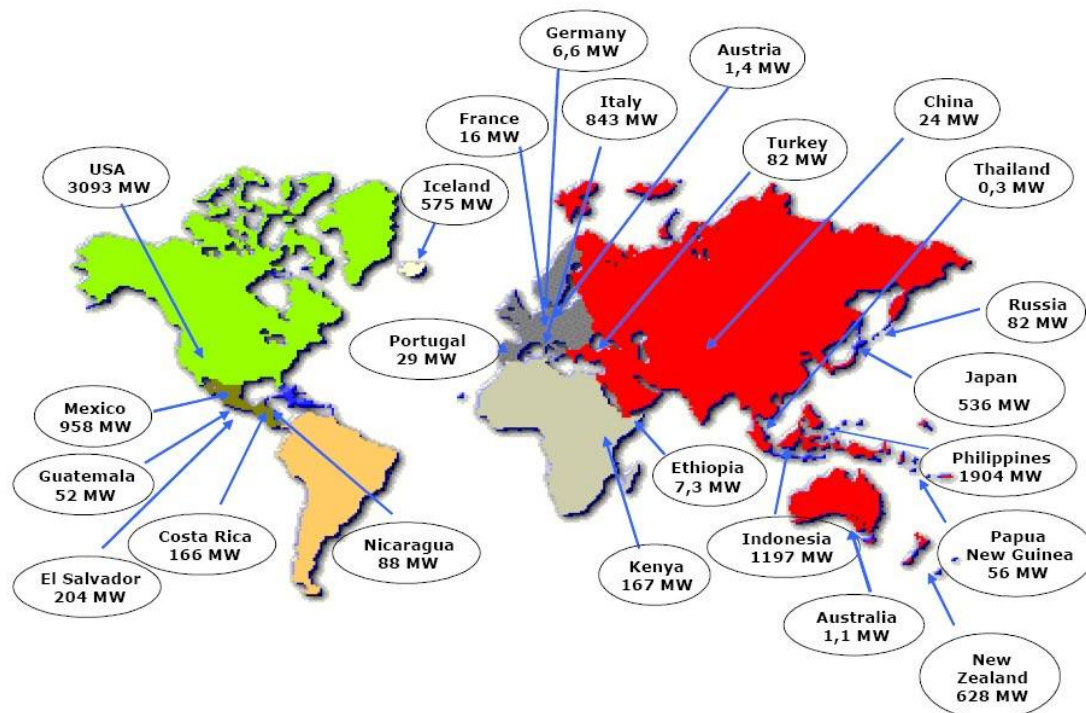
- *Území s recentní či fosilní vulkanickou aktivitou:* V těchto oblastech jsou hodnoty tepelného toku velice vysoké. Vulkanismus je často vázán na tektonická rozhraní, kde teplota přibývá s hloubkou mnohem rychleji než jinde na Zemi a díky tomu je případné využívání geotermální energie takového prostředí velice výhodné. Mnoho velkých geotermálních projektů se nachází právě v těchto oblastech.
- *Vyšší obsah oxidu uhličitého v horninovém prostředí:* Díky specifickým vlastnostem tohoto plynu, jako je například jeho schopnost zvyšovat svůj objem až padesátinásobně a pronikat tak rychleji horninovým prostředím, mohou být pozorovány v oblastech s vyššími obsahy CO₂ až dvojnásobné hodnoty tepelného toku oproti lokalitám, kde se CO₂ nevyskytuje. CO₂ je také jedním z indikátorů vulkanické aktivity, která nemusí být v dnešní době činná – viz šárecký rift v severozápadních Čechách, kde výrony CO₂ odkazují na terciérní vulkanismus.

Výše uvedené charakteristiky mohou být cennými informacemi při hledání vhodného geotermálního zdroje, přesto možnost využití konkrétní oblasti se nezakládá pouze na lokalizaci geotermálního systému ale i na ekonomické analýze využitelnosti území. Aby mohl být zdroj geotermální energie ekonomicky využit, musí se nacházet co nejbližně odběrateli, musí být legálně a technicky dostupný a cena takto získané energie musí konkurovat cenám jiných zdrojů energie (Dickson, Fanelli, 2003). Ve světovém měřítku je velice obtížné souhrnně popsat oblasti, vhodné pro využití geotermální energie. Různé geotermální systémy jsou rozděleny nerovnoměrně po celém světě. Obecně můžeme říci, že většina vhodných lokalit se nachází v oblastech vulkanicky aktivních. Pokud se však zaměříme na nízkoteplotní zdroje, jež jsme schopni využívat například právě pomocí tepelných čerpadel lze konstatovat, že takováto geotermální energie je dostupná téměř kdekoli na Zemi.

5.4. Globální využití geotermální energie k produkci elektrické energie

Stejně jako i jiné obnovitelné zdroje, označíme-li geotermální energii za obnovitelný zdroj, zažívá i energie zemského tepla v posledních letech růst. Pokud jde o využití této energie pro produkci energie elektrické, můžeme pozorovat téměř lineární přírůstek instalovaného výkonu od poloviny osmdesátých let do současnosti. Podle aktuálních dat z roku 2010, která zohledňují různá stádia vývoje již existujících, či připravovaných projektů se předpokládá zvýšení instalovaného výkonu ze současných 10 715 MW na 18 500 MW do roku 2015. Světové rozšíření geotermálních elektráren ve světě je vidět na Obr. 2. Pro srovnání nárůst instalovaného výkonu mezi lety 2005 a 2010 byl více než 4 krát menší. Množství vyprodukované energie v roce 2010 se pak rovná číslu 67 246 GWh.

Budoucnost tohoto způsobu využití geotermální energie závisí především na vývoji technologií geotermálních elektráren a úrovni poznání geotermálních rezervoárů. (Bertani, 2010)



Obr. 2 Světová instalovaná kapacita geotermálních elektráren v roce 2010 (10.7 GW)

6. VYUŽITÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE POMOCÍ TEPELNÝCH ČERPADEL

6.1. Výkon a práce

Vzhledem k charakteru práce pokládám za vhodné připomenout tyto základní fyzikální jednotky a jejich převodní vztahy. Výkon je množství vykonané práce za jednotku času. Jednotkou SI je Watt (W), což je výkon, při němž se rovnoměrně vykoná práce 1 joulu za 1 sekundu. Watthodina (W.h-1) je jednotka práce (energie). Je definována vztahem $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$. Násobků watthodiny se běžně používá v energetice.

6.2. Princip tepelného čerpadla

Základní myšlenku tepelného čerpadla můžeme nalézt v druhé termodynamické větě, kterou formuloval lord Kelvin v roce 1824. Je zde popsán základní předpoklad funkce tepelného čerpadla a to tvrzení, že při styku dvou těles, která tvoří izolovanou soustavu, bude teplo samovolně přecházet z tělesa teplejšího na těleso chladnější. Tepelné čerpadlo můžeme charakterizovat jako zařízení, které je

schopno odnímat nízkopotenciální tepelnou energii svému okolí a předvádět ji na vyšší teplotní hladinu. Využití takto získaného tepla najdeme ve vytápění různých objektů či ohřevu užitkové vody. Tepelná čerpadla neprodukuje žádné tuhé, plynné či kapalně odpadky a co se týče obsluhy, jsou velmi snadno ovladatelná a téměř bezúdržbová (Mikundová, 2008). Tato technologie je založena na faktu, že v určité hloubce pod povrchem je relativně konstantní teplota. Prostředí, teplejší než vzduch v zimě a chladnější než vzduch v létě. Díky tomuto může sloužit nejen k vytápění ale i k ochlazení budov (Omer, 2006). Jednou ze základních vlastností tepelných čerpadel je fakt, že jsou schopny využít i malého rozdílu teplot, třeba i jen několik stupňů, na rozdíl od systémů diskutovaných výše.

Pro přečerpání tepla na vyšší teplotní hladinu je třeba dodat určité množství energie. Prakticky tepelné čerpadlo pro svůj pohon používá nejčastěji elektrickou energii. Je proto možné považovat jeho využití za ekologické pouze částečně, jelikož záleží na zdroji energie, kterou spotřebovává. V publikaci Srdečný, Truxa, 2005 se zjednodušeně udává, že spotřebovává pro svůj chod přibližně jednu třetinu ze svého výkonu ve formě elektrické energie. Tento poměr ale samozřejmě závisí na mnoha proměnných a reálná čísla dostaneme teprve tehdy, zohledníme-li všechny vnější faktory, od konstrukce vrtu po kvalitu samotného čerpadla či velikosti rozdílu teploty zdroje a požadované dosažené teploty. Pro dobré pochopení chodu tepelného čerpadla je nutné představit několik pojmů.

Topný výkon tepelného čerpadla je výkon na výstupu z čerpadla. Je součtem obou vložených energií. Na jedné straně tepla odebíraného ochlazené látky a na straně druhé energie hnací, tedy elektrické energie. Množství elektrické energie, nutné pro fungování procesu přečerpávání, je charakterizováno elektrickým příkonem. Množství tepla za čas odebrané zdroji nízkopotenciálního tepla se nazývá chladicí výkon. Topný faktor je pak číslo vyjadřující poměr topného výkonu a elektrického příkonu. Můžeme ho vzdáleně přirovnat k účinnosti, která je udávána u ostatních zdrojů tepla. Nabývá hodnot větších než jedna ale běžně se pohybuje v rozmezí 2,5-3,5 i více (Tintěra, 2003). Skutečný topný faktor je však vždy nutné uvádět společně s teplotou vstupního a výstupního média. Samotný údaj topného faktoru je bezcenný a může být zavádějící.

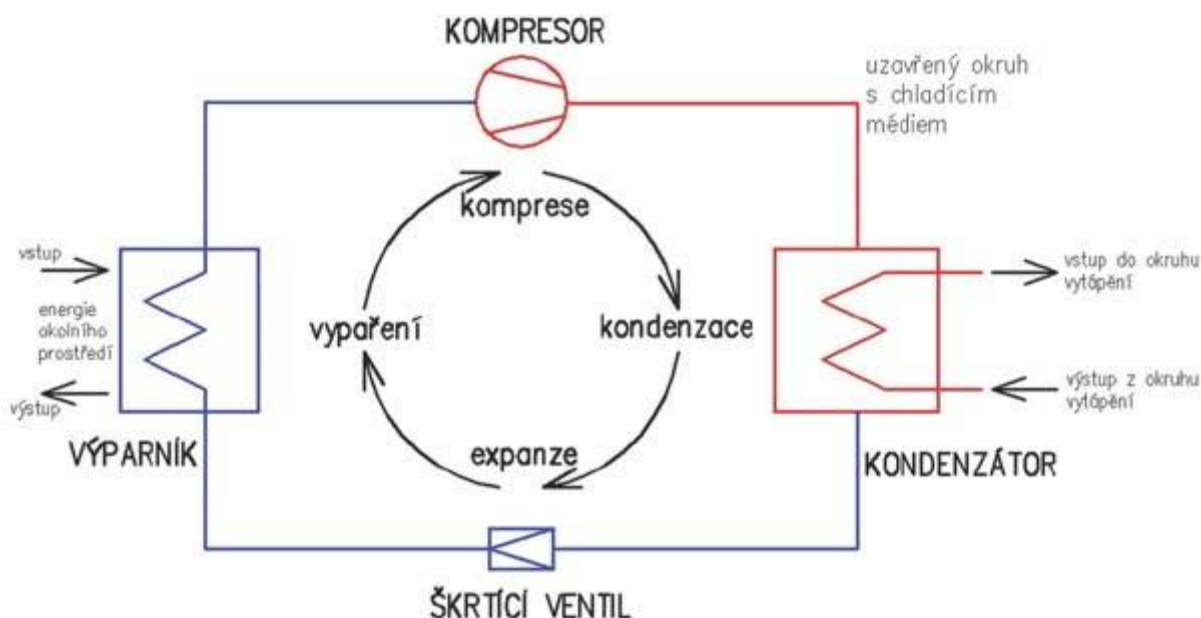
Princip funkce kompresorového tepelného čerpadla

Existují různé typy tepelných čerpadel, ale zdaleka nejpoužívanějším typem je tzv. kompresorové tepelné čerpadlo. Dalšími variantami jsou různé typy sorpčních čerpadel, kde oběh chladiva nezajišťuje kompresor, nýbrž jiná látka vstřebávající a uvolňující chladivo za přestupu tepla. Existují také hybridní tepelná čerpadla, kombinující sorpční a kompresorový oběh nebo čerpadla poháněná Stirlingovým motorem, jejichž využití je zatím ve fázi prototypů (Srdečný, Truxa, 2005).

Principem funkce kompresorového tepelného čerpadla je fakt, že teplota varu (kondenzace) různých látek je závislá na tlaku. Například čpavek (NH_3), který se využíval jako chladivo v tepelných

čerpadlech hlavně v minulosti, se vaří při normálním atmosférickém tlaku již při teplotě $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při stlačení na tlak 2MPa (dvacetinásobek atmosférického tlaku), začne vřít (kondenzovat) při teplotě $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dnes se jako chladivo často používají směsi různých freonů, které na rozdíl od čpavku nejsou jedovaté a jsou nehořlavé. Jako ekologičtější alternativa freonů se občas používá propan, který na rozdíl od freonů nepoškozuje ozonovou vrstvu Země. Jeho nevýhoda však spočívá v hořlavosti. Další variantou je například použití CO_2 . V případě tohoto chladiva by měla tepelná čerpadla pracovat dokonce efektivněji, ale jeho využití vyžaduje bytelnější konstrukci tepelného čerpadla z důvodů vyšších dosahovaných teplot. (Srdečný, Truxa, 2005)

Samotné tepelné čerpadlo se sestává ze čtyř částí. Patří mezi ně výparník, kompresor, kondenzátor a škrtící ventil (viz Obr. 3). Ve výparníku se chladivo změní z kapaliny na páru, přičemž odebere teplo chlazené látky. Poté chladivo putuje do kompresoru, kde je stlačeno na vyšší tlak. Při tomto procesu se spotřebuje elektrická energie, kterou musíme tepelnému čerpadlu dodat. Tato energie, ve formě práce konané nejčastěji elektrickým motorem, se přemění v teplo, které se přičítá k teplu odebranému zdroji nízkopotenciální energie (Mastný, 2006). Existují čtyři nejčastější typy kompresorů, které se liší v životnosti, efektivitě a samozřejmě ceně. Patří mezi ně pístový kompresor, spirálový kompresor, rotační kompresor nebo kompresor šroubový (Srdečný, Truxa, 2005). V kondenzátoru odvádí cirkulující topné médium (tzv. sekundární okruh, nejčastěji se jedná o vodu ústředního topení) teplo přivedené z výparníku a kompresoru, čímž dochází ke kondenzaci chladiva. Ve škrtícím ventilu se tlak chladiva sníží na výchozí hodnotu a proces se opakuje. (Mastný, 2006)



Obr. 3 Schéma kompresorového tepelného čerpadla (www.casopisstavebnictvi.cz)

6.3. Systémy tepelných čerpadel podle zdroje získávané energie

V předchozí kapitole bylo popsáno, jakým způsobem pracuje tzv. chladicí okruh tepelného čerpadla v návaznosti na sekundární okruh. Nyní se zaměříme na primární okruh celého systému, který zajišťuje přesun tepla od zdroje do chladicího okruhu. Rozlišujeme tři základní systémy: Voda/Voda (Vzduch), Země/Voda (Vzduch) a Vzduch/Voda (Vzduch) – tento systém není dále v textu popisován. První údaj odpovídá vždy zdroji tepla a údaj za lomítkem ohřivanému médiu, buďto vodě (pro vytápění; užitkové) nebo vzduchu. Další možné dělení odpovídá způsobu jakým je teplo transportováno od zdroje k ohřivanému (ochlazovanému) prostředí. Rozlišujeme systémy otevřené, uzavřené a systémy, které jednoznačně nepatří ani do jedné z těchto kategorií. V následujících kapitolách se budeme zabývat podrobnými charakteristikami jednotlivých systémů.

6.3.1. Systém Voda/Voda

Podzemní voda

Nejčastěji se jedná o otevřený systém, kde využíváme tepla podzemní vody. Jako teponosné médium je použita přímo podzemní voda, která je čerpána oběhovým čerpadlem. Zjednodušeně řečeno, mezi horninou/půdou, podzemní vodou a výparníkem tepelného čerpadla není kromě filtru žádná bariéra (Omer, 2006). Systém se sestává z jímacího vrtu nebo studně a vrtu vsakovacího, popřípadě drénu či studně, kterými se voda vrací po ochlazení v tepelném čerpadle zpět do podzemí (viz Obr. 4).



Obr. 4 Systém Voda/voda, systém dvou studen (jímací a vsakovací studna).

(www.cerpadla-ivt.cz)

Je několik důležitých podmínek, které předcházejí výběru tohoto systému jako vhodného pro danou lokalitu. Jednou z nich je kvalita podzemní vody. Hlavními problémy chemizmu vody vzhledem k využití tepelnými čerpadly, a i vzhledem k využití v hlubokých systémech diskutovaných

výše, je její případná agresivita nebo silná mineralizace. Díky tomu může primární tepelný výměník podléhat korozi, zanášení či ucpávání. Chemický rozbor podzemní vody je tak jednou ze základních průzkumných prací. Dalším zásadním faktorem je přítomnost dostatku podzemní vody. Potřebný průtok se přibližně pohybuje od 0,2 l/s do 0,5 l/s na 10kW tepelného výkonu. (Omer, 2006)

Jímací studny (vrty) se hloubí pod úroveň hladiny podzemní vody, a vsakovací struktury se zavádějí tak, aby se co nejméně narušily přírodní poměry cirkulace podzemní vody. Funguje-li otevřený systém v dobrých podmínkách, je jeho provoz ekonomičtější než provoz systémů uzavřených. (Omer, 2006) Samozřejmou podmínkou, která předurčuje úspěch všech tepelných čerpadel je teplota prostředí, z něž odebíráme teplo, tedy v tomto případě teplota podzemní vody. Výhodou tohoto systému je právě relativně vysoká teplota podzemní vody, která je v hloubkách větších než 10m stálá po celý rok a pohybuje se kolem 10 až 12°C. Teplota vody by se neměla po průchodu tepelným čerpadlem zmenšit na více jak 5-6°C, při 4°C se začínají výrazně měnit vlastnosti vody a to by mohlo mít negativní vliv na hydrogeologické poměry v místě, kde by se voda vsakovala. (Milenic, Vasiljevic, Vranjes, 2009)

Pokud bychom se zaměřili na termální vody, pak můžeme čerpat i vodu o mnohem vyšších teplotách, ale místa, kde se vyskytují, jsou často chráněna zákonem (v ČR se jedná o lázeňský zákon č. 164/2001 Sb.) a není zde možné hloubit vrty pro tento účel. Termální vody o teplotách kolem 40°C jsou navíc již přímo využitelné, není proto nutné přečerpávat je na vyšší teplotní hladinu. Zajímavý systém pro využití tepla termálních vod ale funguje v Děčíně. Několik tepelných čerpadel o výkonu stovek kW zde ochlazuje termální vodu o teplotě kolem 30°C na teplotu 12-15°C a teplo vyrobené při tomto procesu se poté využívá k vytápění (Tintěra, 2003). Nemělo by to být na méně než 5-6 stupňů, při 4 stupních se začínají výrazně měnit vlastnosti vody

Existuje zde i varianta, která bývá občas popisována jako polootevřený systém, kdy se velká část vody vrací po ochlazení zpět do původní studně. Tyto studně se označují zkratkou SCW - standing column wells. Výhodami tohoto systému jsou malé nároky na vsakovací struktury a především o 40 až 60% kratší vrty (Čížek, 2009). Jedná se o vrt, který je vyplněn vodním sloupcem. Může tak sloužit zároveň jako studna, dovoluje-li to kvalita vody. Ke dnu vrtu je spuštěna trubka, kterou je voda čerpána a po průchodu tepelným čerpadlem se vrací zpět jinou trubkou do horní části sloupce. Pokud se teplota ve vrtu nepatříčně změní, je systém schopen nevracet jí do vrtu všechnu. To způsobí přísun tepla podzemní vody a teplota ve vrtu se začne stabilizovat. Vodu, kterou čerpáme, ale nevracíme zpět do horninového prostředí, je pak možné využít jako užitkovou nebo jí odvádět pryč. V Číně byla tato technologie zdokonalena a kapacita nízkopotenciálního tepla při hloubce vrtu 85 m je údajně až 580kW. (Ni et al., 2010) Tyto vrty je možné umísťovat pouze pokud daná lokalita poskytuje dobré hydrogeologické podmínky. Skalní podloží by se mělo nacházet co nejbližší k povrchu a musí být tvořeno tvrdými horninami, aby byl volný stvol vrtu dostatečně stabilní.

Povrchová voda

Pokud se objekt určený k vytápění geotermální energií nachází poblíž akumulace povrchové vody, je možné ji využít za pomoci tepelného čerpadla. Obecně se ale povrchová voda k takovýmto účelům příliš nehodí, hlavně díky častému znečištění a nízké teplotě. Přesto lze na dno vodní nádrže nebo vodoteče umístit kolektor, případně i čerpat samotnou vodu. Může se tedy jednat jak o systém uzavřený, kde používáme potrubí naplněné nemrznoucí směsí, tak i o systém otevřený, kde čerpáme samotnou vodu. Povrchová voda se takto ale příliš často nevyužívá. (Srdečný, Truxa, 2005)

Důlní vody

Podobné způsoby jaké můžeme využít pro získání tepla povrchových vod, jsme schopni aplikovat na důlní vody. I zde se nabízejí dvě možnosti. Otevřený či uzavřený systém. Problémem důlních vod je především jejich mineralizace, agresivita podzemní vody a srážení pevných fází (hlavně Fe). V případě vysoké mineralizace je nutné přistoupit k vybudování klasického uzavřeného systému, nebo systému dvou okruhů v případě středně mineralizovaných vod. První okruh je tvořen materiály odolnými vůči účinkům důlní vody a v tepelném výměníku předává teplo druhému okruhu s vlastním teplonosným médiem.

V České republice probíhá od roku 2007 výzkum, který má za cíl zmapovat vhodné lokality a určit jejich energetický potenciál. Informace pro tuto kapitolu byly čerpány ze zprávy (Šindelář, Uhlík, Milický, 2009), která informuje o výsledcích výše jmenovaného výzkumu. Celkem bylo identifikováno několik desítek vhodných lokalit především v rakovnické pánvi, na Jáchymovsku, v příbramských revírech, v kutnohorských revírech a v plzeňské pánvi. Jedním kritériem vhodnosti využití konkrétních lokalit byla hloubka důlních děl, jako využitelná byla klasifikována důlní díla o hloubce nad 70m. Mělká díla byla zahrnuta, jednalo-li se o součást větších podzemních systémů. Dalšími podmínkami byly především chemická stabilita vod, dostatečný přítok, technické možnosti instalace tepelného čerpadla (hloubení vrtů; vybudování potrubí; údržba), vzdálenost odběratelů tepla nebo konstrukce a technický stav důlních děl. Teplota důlních vod se pohybovala v rozmezí 9,5 až 21°C. Velkou příležitostí pro získání energie jsou čistírny důlních vod. Kromě aerace, která slouží k odstraňování Fe je hlavním postupem čištění dávkování vápenného mléka (zvyšování pH, srážení síranů a kovů). Při tomto procesu dochází k exotermním chemickým reakcím, což zajišťuje téměř stejnou teplotu na vstupu i výstupu z čistírny. Vyčištěnou vodu je pak možné dobře využít pomocí tepelných čerpadel.

6.3.2. Systém Země/Voda

Jedná se o systém využití tepla hornin. Pokud jsou ale horniny zvodněné, teplo se odebírá nejen z vlastní horniny (teplo suchých hornin), ale zprostředkovaně i z podzemní vody, která se zde vyskytuje.

Horizontální uložení výměníku

Nejjednodušším způsobem jak vybudovat uzavřený systém je horizontálně orientovaný plošný výměník (viz Obr. 5). Tento systém má oproti hlubinným vrtům nižší pořizovací náklady ale průměrně menší roční topný faktor, protože teplota v průběhu roku kolísá vlivem venkovní teploty. V létě, pokud není tepelné čerpadlo využíváno, například pro vytápění bazénu, se zemní kolektor regeneruje přestupem tepla s okolní zeminy, slunečním zářením a teplem venkovního vzduchu. (Srdečný, Truxa, 2005)



Obr. 5 Systém Země/Voda, plošný výměník (www.cerpadla-ivt.cz)

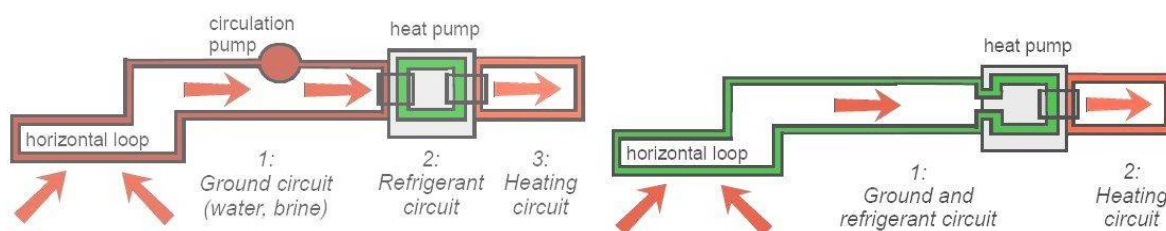
Plošný výměník je tvořen nejčastěji polyetylenovým potrubím, které je uloženo v hloubkách 1 až 1,5m, nebo lépe řečeno v nezamrzlé hloubce. Potrubí je vyplněno nemrznoucí kapalinou, která slouží jako teplotné médium. Existuje několik variant uložení potrubí. Ve střední a západní Evropě se nejčastěji setkáváme se sériovým nebo paralelním zapojením potrubí v rozteči 0,6 až 1m (Omer, 2006). Svrchní vrstva půdy je většinou kompletně odstraněna a po uložení potrubí je navezena zpět a potrubí je zasypáno. Plocha pro zemní kolektor by měla být dostatečně velká, většinou se uvádí až trojnásobek vytápěné plochy (Tintěra, 2003). Z tabulky číslo 3 lze zjistit jaký vliv má rozdílný typ půdy, v níž je výměník nainstalován, na plochu plošného kolektoru. Je zde také možné pozorovat, že při větším nasycení půdy vodou klesají požadavky na plochu plošných výměníků.

Tab. 3 Závislost druhu půdy na měrném výkonu a ploše výměníků (Srdečný, Truxa, 2005)

Druh půdy	Měrný výkon získaný z půdy (W/m ²)	Plocha výměníků pro TČ s topným faktorem 3,0 (m ² /kW)
Suchá nezpevněná půda	10	66
Ulehlá vlhká půda	20-30	33-22
Vodou nasycené štěrky a písky	40	17

Dalším možným způsobem je uložení potrubí ve výkopech. Trubice je v tomto případě položena jako spirála do výkopu o šířce asi 1m a hloubce cca 1,5m. Tento kolektor bývá označován jako „slinky“. Je možné je umístit i vertikálně do užších výkopů 0,3-0,4m, ale do větších hloubek tak, aby byly vrcholy spirály v hloubce kolem 1,5m (Srdečný, Truxa, 2005). Na jeden kW topného výkonu tepelného čerpadla připadá 5 až 8m výkopu (Tintěra, 2003). Slinky se používají hlavně z důvodu úspory místa.

Horizontální výměníky mohou pracovat i v dvouokruhovém režimu namísto tří okruhů (viz Obr. 6). To znamená, že v potrubí kolektoru obíhá přímo chladivo tepelného čerpadla. V takovém případě ale systém může fungovat pouze pro vytápění (Sanner, 2009). Výhodou dvouokruhového systému je i fakt, že není třeba oběhového čerpadla, jako je tomu u systému s třemi okruhy.



Obr. 6 Dvouokruhový/Tříokruhový systém (Sanner, 2009)

Nabízí se otázka, jakým způsobem ovlivňují plošné výměníky teplotu půdy během roku. Jak již bylo řečeno výše, pokud je výměník používán k vytápění hlavně v topné sezóně, má půda možnost se během jara a léta regenerovat. Na začátku topné sezóny proto teploty téměř odpovídají stavu, který by v půdě nastal, kdyby plošný výměník nebyl instalován vůbec. Regenerace půdní teploty je ale samozřejmě pomalejší, což indikuje například pozdější tání sněhu. Obecně by se dalo říci, že půdy

v zimě promrzají a jejich teploty jsou v hloubkách instalovaného výměníku nižší v řádech jednotek při využívání půdy tepelným čerpadlem. Není proto vhodné umisťovat výměník příliš blízko základům staveb z důvodů hrozícího promrzání a následné možné destabilizace objektů. (Srdečný, Truxa, 2005)

Vertikální uložení výměníku

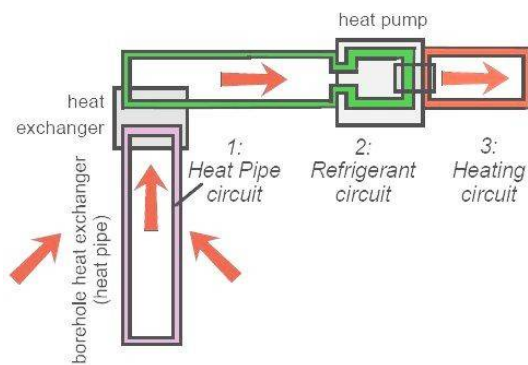


Obr. 7 Systém Země/Voda, vertikálně uložený výměník (www.cerpadla-ivt.cz)

Velice často užívanými druhy výměníků pro tepelná čerpadla jsou výměníky uložené vertikálně ve vrtech (viz Obr. 7). Celý systém se může sestávat z několika vrtů. Vrty jsou většinou hluboké od 50 do 150m, i když v některých případech mohou být i výrazně hlubší (Srdečný, Truxa, 2005). Existují i méně hluboké vrty, v práci (Omer, 2006) se uvádí nejnižší hloubka vrtu už 22,9m. Toto je hloubka lehce nad hranicí takzvané neutrální zóny (kolem 10m v ČR), pod níž jsou teploty konstantní po celý rok. Skutečná hloubka vrtu závisí na mnoha geologických faktorech i na technickém zpracování celého systému. Například při větším počtu vrtů není nutné dosahovat takových hloubek jako v případě jednoho vrtu. Vzdálenost více vrtů by měla být řešena analýzou tepelného toku v místě, nejlépe formou matematického modelu proudění tepla. Obvykle se ukazuje, že minimální rozteč vrtů je 20 m, při hustší síti dochází k rychlejšímu poklesu teplot a snižování efektivity celého topného systému. (ústní sdělení RNDr. Josef V. Datel Ph.D.). Průměrně roste teplota s hloubkou o 1°C každých 33m. V hloubce 100m je teplota okolo 10°C (Srdečný, Truxa, 2005). Samotný tepelný výměník se sestává většinou z polyethylenového potrubí, které je uloženo ve vrtu vyplněném takovým materiálem, který zajistí dobrou tepelnou komunikaci mezi potrubím a horninami (Florides, Kalogirou, 2007). K těmto účelům se používá například cementová nebo jílocementová směs. Pro tento účel je nevhodné použít odvrtný materiál nebo například písek. V takovém případě by hrozilo, že by znečištěná povrchová voda kontaminovala průsakem z povrchu podzemní vodu, nebo že by neutěsněný vrt propojil oblasti v různých hloubkách a tím narušil hydrogeologické poměry (Srdečný, Truxa, 2005). Potrubí je vyplněno nemrznoucí směsí, která přivádí teplo do tepelného

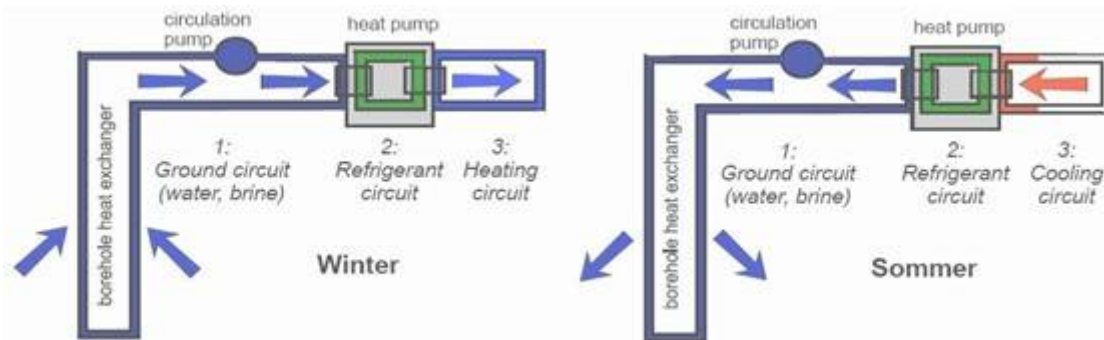
čerpadla oběhovým čerpadlem. Jedná se tedy o systém uzavřený. U-smyčkové uspořádání se sestává vždy ze smyčky potrubí, která se na dně vrtu obrací a vynáší k tepelnému čerpadlu již ohřáté médium. V jednom vrtu může být i několik takových smyček. Vrtů mají nejčastěji průměr 76-127mm a používají se průměry potrubí v rozmezí 19-38mm (Li, Zheng, 2009).

Další variantou uspořádání potrubí jsou koaxiální tepelné výměníky. V poslední době se také prosazují měděná potrubí, ve kterých obíhá přímo chladivo tepelného čerpadla, které v něm cirkuluje samovolně. Podobnou možností je i tříokruhový systém (viz Obr. 8), kde v primárním okruhu samovolně koluje propan nebo CO₂ (Sanner, 2009).



Obr. 8 Tříokruhový systém (Sanner, 2009)

Stejně jako u horizontálních výměníků je možné využít odpadního tepla domu mimo sezónu vytápění, existuje i v případě vertikálního uložení možnost teplo vracet do vrtu a systém používat k ochlazení objektu (viz Obr. 9). Geotermální energie není ve své podstatě obnovitelným zdrojem, protože při čerpání velkého množství tepla a špatném nadimenzování vrtu lze konkrétní zdroj na dlouhou dobu vyčerpat (Srdečný, Truxa, 2005). Proto je regenerace vrtu odpadním teplem mimo sezónu dobrým řešením, především pokud je tepelná kapacita horninového prostředí nižší.



Obr. 9 Vytápěcí a reverzní - chladicí funkce systému (Sanner, 2009)

Co se týče různých typů hornin, ve kterých může být proveden vrt nebo vrty pro tepelné čerpadlo, obecně platí, že většího výkonu by mohlo tepelné čerpadlo dosahovat v horninách vodou nasycených než v horninách suchých. Základním parametrem určujícím vhodnost konkrétního horninového prostředí pro instalaci tepelného čerpadla je pak tepelná vodivost (viz kapitola 4.). Největší hodnoty tepelné vodivosti nabývá křemen (8,4 W/mK), ale u některých jíílů a jíilovců může dosahovat i hodnoty 0,4 W/mK. U většiny hornin je hodnota tohoto parametru v rozmezí 2,1 – 4,2 W/mK (Ryška, 2004). V tabulce č. 4 jsou uvedeny některé horninové typy, hodnoty jejich tepelné vodivosti, odpovídající měrný výkon a případná hloubka vrtu. Z tabulky je zřejmé, že tepelná vodivost hraje velkou roli při výpočtu hloubky vrtu a dalo by se říci, že její hodnota je hloubce vrtu nepřímou úměrná.

Tab. 4 Závislost typu hornin na tepelné vodivosti, měrném výkonu a hloubce vrtu (Srdečný, Truxa, 2005)

Hornina	Tepelná vodivost (W/m.K)	Měrný výkon (W/m)	Hloubka vrtu pro tepelné čerpadlo s topným faktorem 3,5 (m/kW)
Suché nezpevněné horniny	< 1,5	20	36
Pevné horniny nebo vodou nasycené	1,5 až 3,0	50	14
Pevné horniny s vysokou tepelnou vodivostí	> 3,0	70	10

Význam numerického modelování v navrhování tepelných čerpadel

Účinným nástrojem pro dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla je v dnešní době numerické modelování. Pro tyto účely vzniklo v poslední době mnoho počítačových programů, jmenovitě například Earth Energy Designer (EED) 2.0 (www.buildingphysics.com), který je schopen vypočítat hloubku vrtu pro zvolenou teplotu nemrznoucí směsi a naopak. Jako vstupní data se vkládají informace o horninovém prostředí, mezi které patří tepelná vodivost hornin, tepelný tok, povrchová teplota nebo objemová tepelná kapacita. Dále se vkládají údaje o vlastním vrtu, jeho hloubce, počtu vrtů, použitému teplotonosnému médiu nebo uspořádání potrubí (koaxiální/u-smyčkové) a další

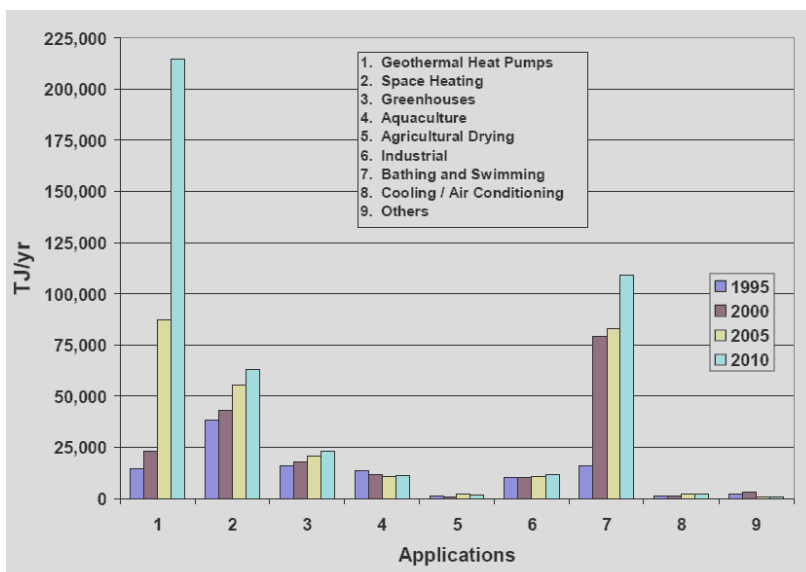
charakteristiky celého systému. Program spočítá tepelný odpor vrtu a po zadání dat reprezentujících míru využívání systému (na kolik let se provádí analýza, v jakých měsících bude systém nejvíce využíván apod.) vygeneruje výsledek ve formě závěrečné zprávy a grafů.

Další programy jako například SVHeat (www.soilvision.com) nebo PetraSim (www.thunderheadeng.com), umí modelovat teplotní okolí vrtu a jejich změny s časem. PetraSim vytváří 3D modely, které nám mohou dát prostorovou představu o rozložení teploty v horninovém masivu, ale svým zaměřením je vhodný spíše pro analýzu hlubokých systémů o vysokých teplotách. SVHeat může naopak generovat výstupy se znázorněnými izoliniemi o stejných teplotách v okolí vrtů i v menších měřítcích, což může být při dimenzování vrtů užitečné. (Lukeš, 2008)

Existuje samozřejmě i řada dalších programů, které se zabývají teplotními charakteristikami horninového prostředí, ale software, který by zvládnul modelování a simulace teplotního okolí vrtu a zároveň generoval finální údaje potřebné k návrhu vrtu (a který by byl určen přímo pro tento účel) však podle práce Lukeš, 2008, která se touto problematikou zabývá hlouběji, vyvinut nebyl nebo je ve stádiu vývoje. Správné nadimenzování vrtů tak nadále závisí nejen na správném využití vhodného programu ale hlavně na zkušenostech odborníků a geologickém průzkumu zájmové oblasti.

6.4. Přímé využití geotermální energie v globálním měřítku

Stejně jako v případě dat pojednávajících o výrobě elektrické energie z geotermálních zdrojů přináší nejnovější data o přímém využití geotermální energie kongres IGA (International Geothermal Association), který se uskutečnil na Bali v dubnu 2010. Do závěrečné zprávy přispěli odborníci ze 70 zemí světa, z čehož 66 z těchto států vykážalo nějaký způsob přímého využití geotermální energie. Na konci roku 2009 byla odhadnuta celková instalovaná kapacita na 50 586MWt, což je 79% nárůst oproti roku 2005. Celkově bylo využito 121 696GWh geotermální energie za rok, což je 60% nárůst oproti roku 2005. Pokud bychom rozdělili různé způsoby přímého využití geotermální energie, připadá 49% na využití tepelnými čerpadly, 24,9% na bazény (včetně lázní), 14,4% na přímé vytápění, 5,3% na skleníky a zbylých 6,4% bylo využito v průmyslu nebo jinými než výše uvedenými způsoby (viz Obr. 10). Z těchto dat je zřejmé, jak velký růst zažívá využívání geotermální energie v čele s tepelnými čerpadly, přičemž většina instalací tepelných čerpadel je provedena na území severní Ameriky, Evropy a Číny. Mezi pět zemí, které nejvíce využívají geotermální energii přímým způsobem patří USA, Čína, Švédsko, Norsko a Německo. V České republice byl k roku 2009 instalovaný výkon 151.5MWt a celkově se zde využilo 256.1GWh geotermální energie, hlavně pomocí tepelných čerpadel. (Lund, Freeston, Boyd, 2010)



Obr. 10 Graf znázorňující různé způsoby přímého využití geotermální energie od roku 1995 do roku 2010 (Lund, Freeston, Boyd, 2010)

7. DISKUZE

Využívání geotermální energie ať již pro produkci elektrické energie nebo přímo k vytápění/ochlazení objektů či ohřevu vody je právoplatně považováno za slibný alternativní zdroj. Přestože geografické rozložení zdrojů vysokoteplotních geotermálních systémů neodpovídá ideálně lidskému osídlení, existuje zde varianta využití nízkoteplotních zdrojů téměř kdekoli na Zemi. Touto variantou jsou právě systémy s tepelnými čerpadly. První tepelná čerpadla byla zkonstruována ve třicátých letech dvacátého století, přičemž k jejich rozsáhlejšímu využívání za účelem vytápění došlo až v letech sedmdesátých. Stalo se tak z velké části díky zvyšování cen energií. Ať už díky ekonomickému tlaku na spotřebitele, nebo díky stále se zvyšující chuti společnosti po obnovitelných zdrojích, se stává využívání této technologie běžnou alternativou ke klasickým způsobům vytápění. Právě popularita tepelných čerpadel ale mnohdy vede k neodborným instalacím, což může znamenat neúčinnost celého systému, vyčerpání tepelné kapacity prostředí nebo narušení hydrogeologických podmínek dané oblasti. S ohledem na typ systému tepelného čerpadla existuje mnoho různých rizik spojených s jejich provozem.

U systému Voda/Voda to může být především problém mineralizace a agresivity podzemních vod, které postupně ničí technické vybavení. Nutností pro instalaci systému je také dostatečná vydatnost studní. Pokud je ale zaručen dostatečný průtok tepelným čerpadlem, pracuje systém Voda/Voda nejefektivněji ze všech možných variant. Problémem by nastal, pokud by byla podzemní voda čerpána, ale již nebyla vhodným způsobem vracena zpět. V takovém případě by mohlo dojít k nežádoucímu snížení hladiny podzemní vody. Další nevýhodou může být například delší legislativní povolovací proces než u jiných typů tepelných čerpadel. V České republice je neřešeným problémem

otázka zpětného vypouštění ochlazené vody do podzemí. Na rozdíl od některých zemí zde neexistuje limit, který by stanovoval teplotu vsakované vody. To může vést k nešetrnému vypouštění příliš chladné vody, následnému ochlazení geotermálních rezervoárů a změnám hydrogeologických procesů. Zajímavým zdrojem geotermální energie jsou také důlní vody, které jsou jistou ekologickou zátěží. Pokud ale využíváme jejich tepla, slouží vlastně jako ekologický zdroj energie. Po technické stránce je jejich využívání zcela reálné, hlavními limitujícími faktory je dostupnost starých důlních děl, chemismus vody a vzdálenost možných odběratelů tepla. Můžeme využívat také tepla povrchových vod, to ale nebývá v praxi příliš výhodné hlavně z technických důvodů spojených s instalací a údržbou tepelného výměníku.

Srovnání dvou hlavních typů systému Země/Voda směřuje hlavně k možnostem koncového uživatele tepelného čerpadla a vlastnostem horninového prostředí místa, kde by měl být systém vybudován. První variantou je horizontální uložení výměníku, což se ukazuje jako dobré řešení, pokud může být zabrána dostatečně velká plocha. Jedná se také o levnější variantu systému a to z hlediska provozu, i z hlediska vybudování systému. Rizikové je uložení tepelného výměníku příliš blízko základům staveb a jejich následnému promrzání, což může způsobit problémy spojené se statikou dotčených budov. Druhou variantou je uložení tepelného výměníku horizontálně do vrtu. Hlavní výhody tohoto způsobu uložení výměníku spočívají v malých nárocích na zastavěnou plochu a vyšším topném faktoru oproti horizontálnímu uložení. Zbudování tohoto systému je ale dražší a vyžaduje hlubší poznání geologie dané oblasti. Hlavním rizikem by se dal nazvat právě špatný návrh vrtu způsobený malou hloubkou znalostí horninového prostředí. Nejen že může být systém navržen velice neefektivně, ale špatně provedený vrt může i negativně ovlivnit své okolí. Například může dojít k propojení několika zvodněných kolektorů nad sebou, nebo kontaminaci podzemní vody znečištěnou povrchovou vodou. Existuje zde také možnost, kdy vrt bude odebírat z horniny tolik tepla, že se tepelná kapacita okolního prostředí vyčerpá a systém přestane na dlouhou dobu pracovat. V oblasti návrhu vrtů proto vidím nutnou přítomnost geologů a hydrogeologů, kteří mohou na základě geologického průzkumu případně za použití vhodných počítačových modelů přispět ke zlepšení efektivity systémů tepelných čerpadel a zabránit devastaci přirozeného horninového prostředí.

8. ZÁVĚR

V práci byly shrnuty dosavadní poznatky o využívání geotermální energie tepelnými čerpadly, přičemž bylo čerpáno z co možná nejnovějších zdrojů literatury. Důraz byl kladen na charakteristiky různých typů tepelných čerpadel a možnosti jejich využití ve vztahu k horninovému prostředí s ohledem na konstrukci primárního okruhu tepelného čerpadla. V prvních kapitolách práce je

charakterizována obecně geotermální energie, její původ, geotermální systémy a geofaktory, které podmiňují její výskyt. Blíže je zde popsáno i využívání geotermální energie pro výrobu elektrické energie v systému HDR. Geotermální energie je v současné době jedním z nejperspektivnějších obnovitelných zdrojů a její využívání tepelnými čerpadly velice rozšířené, mnohdy na úkor kvality. Práce má kompilační charakter a byla dokončena v září 2010.

DATUM: 3. ZÁŘÍ 2010

PODPIS:

9. POUŽITÁ LITERATURA

BERTANI, Ruggero (2010): Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, s. 41

ČÍŽEK, Petr (2009): Vlastnosti vrtů pro tepelná čerpadla. 10. Česko-Slovenský mezinárodní hydrogeologický kongres, Ostrava 2009, s. 1-4

DICKSON, M. H. ; FANELLI, M., *Geothermal energy: utilization and technology*. Paris : UNESCO, 2003. 205 s. ISBN 1-84407-187-7.

FLORIDES, Georgios ; KALOGIROU, Soteris . Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. *Renewable energy*. 2007, no. 32, s. 1-18. Dostupný také z WWW: <www.sciencedirect.com>.

GUNNLAUGSSON, Einar ; ÍVARSSON, Gretar: Direct use of geothermal water for district heating in Reykjavík and other towns and communities in SW-Iceland, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, s. 1-6

GUPTA, Harsch ; ROY, Sukanta . *Geothermal energy : An alternative resource for the 21st century*. Vyd. 1. Amsterdam : Elsevier, 2007. 279 s. ISBN 978-0-444-52875-9.

HAZDROVÁ et al., 1981. *Geotermální energie a její využití*, Ústřední ústav geologický, str. 1-127

LI, Zhongjian ; ZHENG, Maoyu. Development of a numerical model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2009, no. 29, [cit. 2008-05-10]. Dostupný z WWW: <www.sciencedirect.com>. s. 5

LUKEŠ, P. (2008): Aplikace počítačového modelování při využívání geotermální energie. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2007 neuveden, srpen, 225-228. ISSN 0514-8057.

LUND, J.W. ; FREESTON, D.H. ; BOYD, T.L. (2010): Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, s. 23

MASTNÝ, Petr. *Tepelná čerpadla v kombinovaných systémech*. Brno, 2006. 26 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

MIKUNDOVÁ P., (2008): Tepelná čerpadla - Jedna z možností využití alternativních zdrojů energie k vytápění objektů v České republice. Odborná konference doktorského studia Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně JUNIORSTAV, Brno 2008, s. 1-8

MILENIC', Dejan ; VASILJEVIC', Petar; VRANJES', Ana. Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes. *Energy and Buildings* [online]. 2009, no. 42, [cit. 2010-11-07]. Dostupný z WWW: <www.elsevier.com>. s. 9

MYSLIL V., KUKAL Z., POŠMOURNÝ K., FRYDRYCH V., 2007. *Geotermální energie*, Planeta, č.4, str. 1-32

NI, Long ; JIANG, Yiqiang ; YAO, Yang ; MA, Zuiliang (2006): Groundwater heat pump with pumping and recharging in the same well in China, Sixth International Conference for Enhanced Building Operations, Shenzhen, China, November 6 - 9, 2006, s. 8

OMER, Abdeen Mustafa. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2008, 12, [cit. 2006-10-13]. Dostupný z WWW: <www.sciencedirect.com>.

RUMMEL, F., 2005. Heatmining by hot-dry-rock technology. In: Proceedings of International Conference of ECOMINING, Bukharest, Říjen 9pp.

RYBACH, L., 1976. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters. *Pure and Applied Geophysics*, 114, 309-318

RYŠKA, Jiří. Dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla. *Acta Montanistica Slovaca*. 2004, 9, 3, s. 269-273.

SANNER, Burkhard (2009): Development of geothermal heat pumps. International geothermal days, Slovakiai 2009, session 7., s. 1-12

SRDEČNÝ, Karel ; TRUXA, Jan. *Tepelná čerpadla*. Brno : ERA group, 2005. 68 s. ISBN 80-7366-031-8.

ŠINDELÁŘ, M. ; UHLÍK, J. ; Milický M. (2009): Využití důlních vod jako zdroje tepla. 10. Česko-Slovenský mezinárodní hydrogeologický kongres, Ostrava 2009, s. 1-4

TINTĚRA, Ladislav. *Tepelná čerpadla*. Praha : ARCH, 2003. 121 s. ISBN 80-86165-61-2.

VLČEK, Josef. *Geotermální energie – zkušenosti z projektu Soultz-sous-Forets*. Praha, 2009. 22 s. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.

www.casopisstavebnictvi.cz (5.8.2010) ; www.cerpadla-ivt.cz (20.7.2010) ; www.geothermal-energy.org (27.7.2010)