

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Teplotní pole a tepelné toky ve vertikálním
zemním tepelném výměníku**

Diplomová práce

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

Autor: Bc. Jiří Ransdorf

PRAHA 2012

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra mechaniky a strojnictví

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Ransdorf Jiří

Technologická zařízení staveb

Název práce

Teplotní pole a tepelné toky ve vertikálním zemním tepelném výměníku

Anglický název

Temperature field and heat flow in vertical ground heat exchanger

Cíle práce

Stanovit provozní parametry zemního výměníku a tepelného čerpadla v průběhu otopného období.

Metodika

Naměření a vyhodnocení teplotních polí v zemním masivu a tepelných toků získaných výměníkem tepla na počátku, v průběhu a na konci otopného období. Stanovení topného faktoru, chladícího a topného výkonu tepelného čerpadla v průběhu otopného období.

Osnova práce

1. Úvod.
2. Analýza současného stavu řešení problematiky a dalšího vývoje.
3. Metody získání výsledků pro vyhodnocení.
4. Vyhodnocení výsledků z hlediska technického, energetického a ekonomického.
5. Diskuse a závěr.
6. Seznam použité literatury.

Rozsah textové části

50 - 60 str.

Klíčová slova

dislokace potrubí; zemní masiv; teplotní pole; tepelný tok; tepelný zisk; topný faktor; teplotní diference; otop

Doporučené zdroje informací

ANONYM, 2005. Ground – source heat pump project analysis. Minister of Natural Resources Canada: 70.

ANONYM, 2004. Tepelná čerpadla IVT – Projekční podklady Verze 6.1. Praha. Tepelná čerpadla IVT, s.r.o.:33.

YAN S., YANG Y., WEI N., 2006. Impacts of soil and pipe thermal conductivity on performance of horizontal. Proceedings of the Sixth International Conference for Enhanced Building Operations, November 6-9, 2006. Shenzhen, China:6.

BRANDL H., 2006. Energy foundations and other thermo – aktive structures. Géotechnique, 56, 2: 81-122.

Vedoucí práce

Adamovský Radomír, prof. Ing., DrSc.

Termín zadání

listopad 2010

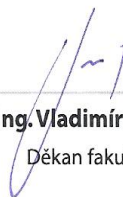
Termín odevzdání

duben 2012



prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 9.2.2011

P R O H L Á Š E N Í

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Teplotní pole a tepelné toky ve vertikálním zemním tepelném výměníku*“ zpracoval samostatně, a že jsem použil pouze zdrojů, které cituji v seznamu použité literatury.

Ve Štětí, dne 9. 4. 2012

Jiří Ransdorf

P O D Ě K O V Á N Í

Děkuji, vedoucímu mé diplomové práce,
panu prof. Ing. Radomíru Adamovskému, DrSc. za připomínky a
postřehy, které mi během vypracovávání mé práce poskytl. Dále děkuji
pracovníkům firmy VESKOM s.r.o., zejména pak ing. Lukáši Maškovi,
za jejich ochotu mi pomoci a za věcné informace, které mi pomohly
při zpracování práce.

Teplotní pole a teplené toky ve vertikálním zemním tepelném výměníku

Abstrakt: Tato diplomová práce na téma „Teplotní pole a teplené toky ve vertikálním zemním tepelném výměníku“ se zabývá problematikou vertikálních vrtů jako zdroje tepla pro tepelná čerpadla. V úvodu zdůvodňuji, proč by měl být kladen důraz na alternativní zdroje energie. V další kapitole je shrnut současný stav problematiky jak z pohledu geotermální energie, tak z pohledu tepelných čerpadel. Následující kapitoly obsahují teoretický rozbor a vlastní měření, kde je popsána lokalita, způsob měření a dosažené výsledky. V poslední části práce shrnuji dosažené výsledky a stanovuji dosažené závěry.

Klíčová slova: zemní masiv, vrt, teplotní pole, tepelné čerpadlo

Temperature field and heat flow in vertical ground heat exchanger

Summary: This thesis on "Temperature field and heat flow in vertical ground heat exchanger" deals with vertical wells as a heat source for heat pumps. The introduction gives reasons why it should be an emphasis on alternative energy sources. The next chapter summarizes the current state of the problem both in terms of geothermal energy and in terms of heat pumps. The following chapters contain theoretical analysis and the measurement. The location, measurement method and results are described there. The final part summarizes the results and I establish the conclusions reached.

Keywords: Earth's mass, borehole, temperature field, heat pump

Obsah:

1.	Úvod	- 1 -
2.	Analýza současného stavu problematiky a budoucího vývoje	- 3 -
2.1.	Geotermální energie	- 3 -
2.1.1.	Tepelný režim půdy	- 5 -
2.1.2.	Geotermální vrty	- 5 -
2.1.3.	Využití energie zemské kůry	- 6 -
2.2.	Ekologické problémy podporující vývoj alternativní energie	- 9 -
2.3.	Fyzikální princip tepelného čerpadla	- 10 -
2.4.	Technické složení tepelného čerpadla	- 13 -
2.5.	Tepelná bilance oběhu	- 15 -
2.6.	Typy tepelných čerpadel	- 16 -
2.6.1.	Voda – Voda	- 16 -
2.6.2.	Vzduch – Voda	- 17 -
2.6.3.	Země – Voda	- 17 -
2.7.	Horizontální zemní kolektory	- 18 -
2.8.	Vertikální zemní výměník	- 20 -
2.8.1.	Technologie provedení vrtu	- 22 -
2.8.2.	Nemrzoucí směs v primárním okruhu	- 22 -
2.8.3.	Pracovní látka – chladivo	- 23 -
2.9.	Návrh vertikálního tepelného čerpadla země-voda	- 25 -
2.9.1.	Monovalentní provoz	- 25 -
2.9.2.	Bivalentní provoz	- 25 -
2.9.3.	Metody návrhu vertikálních horninových výměníků	- 26 -
3.	Cíl práce	- 30 -
4.	Metody získání výsledků pro vyhodnocení	- 31 -
4.1.	Teoretický rozbor vztahů potřebných pro dimenzování hlubinných vrtů	- 31 -
5.	Vlastní měření a vyhodnocení	- 40 -
5.1.	Popis lokality	- 40 -
5.2.	Umístění teplotních čidel	- 44 -
5.3.	Způsob měření	- 45 -
5.4.	Naměřené výsledky a jejich vyhodnocení	- 46 -

5.4.1. Teploty zemského masivu	- 47 -
5.4.2. Porovnání VT1,VT2 s VT9 z hlediska dobití zemského masivu	- 54 -
5.4.3. Stanovení rozdílů teplot mezi vrtem VT3 a vrtem referenčním VT9.....	- 56 -
5.4.4. Útlumová hloubka	- 58 -
5.4.5. Chladicí výkon.....	- 59 -
6. Závěr.....	- 63 -
Literatura	- 65 -
Seznam grafů	- 68 -
Seznam obrázků.....	- 68 -
Seznam tabulek.....	- 69 -
Přílohy	- 70 -

1. Úvod

V této práci se věnuji teplotním tokům a tepelným polím ve vertikálním zemním výměníku. Na začátek je velmi důležité si objasnit proč vlastně se zemními výměníky a tepelnými čerpadly zabývat a pronikat do jejich výhod a vhodnosti využití těchto alternativních zdrojů energie.

V dnešní době, kdy je kladen velmi velký důraz na ekologii a zdravé životní prostředí, je primárním cílem mnoha předních představitelů zemí, co nejvíce propagovat a začlenit do společnosti informace o alternativních obnovitelných zdrojích energie. Státy nenabízejí pouhé informace, ale i různé motivační programy a granty, které zahrnují například jisté spolufinancování nebo další výhody, které plynou z využívání a propagování těchto alternativních zdrojů využívání energie.

Přírodní zásoby neobnovitelných zdrojů, jako jsou zejména fosilní paliva (ropa, uhlí, zemní plyn) nejsou nevyčerpatelné, a tak je vhodná chvíle se poohlédnout po zdrojích jiných. Příkladem je ropa, která je jedním z hlavních neobnovitelných zdrojů. I její zásoby jsou omezené. Jejím hlavním distributorem pro celý svět jsou východní země, a to hlavně Saudská Arábie, SAE, Libye a Irán. Jak je známo, v těchto zemích se politická situace mění velmi rychlým a radikálním způsobem. Nemůžeme si být nikdy jisti, kdy nám východ tzv. "zavře kohoutek". Jen pro porovnání a ilustraci, jak vážná situace by mohla nastat, je fakt, že Saudská Arábie má jako největší distributor ropy podle odhadů zásobu 264 miliard barelů a USA jako první západní stát pouhých 22 miliard barelů.

Z toho i laickou logikou vyplývá, že zásoby fosilních paliv jednoho dne dojdou a bude třeba se spoléhat a využívat jiné řešení, než pouze neobnovitelné zdroje.

Je již vhodná chvíle pro to, abychom se všichni zabývali alternativními možnostmi.

Co to vlastně alternativní zdroj je? To jsou zdroje, které jsou šetrné k životnímu prostředí a jejich zásoby jsou nevyčerpatelné. Nevyčerpatelnost je jedním z nejdůležitějších vlastností, které nás pohánějí k využívání alternativních zdrojů. Dnes jsme schopni získávat energii ze země (geotermální energie), z vody, větru, slunečních paprsků a dokonce i z přílivu oceánu.

Dnes již přesáhlo využívání alternativních zdrojů 8,5% z veškeré energie. Evropská unie si dala za cíl do roku 2020 dosáhnout mety 13,5%. Proto se v této práci zabývám právě tímto tématem. A popíšeme základní informace o vhodnosti využívání nových alternativních zdrojů.

2. Analýza současného stavu problematiky a budoucího vývoje

V této kapitole je hlavním cílem seznámit se se základními vlastnostmi a funkcemi tepelných čerpadel a problematikou vertikálních zemních kolektorů a dále pak s možnostmi jejich využití v dnešním prostředí a s jejich budoucím vývojem. Jednu z významných rolí hraje i možný vývoj a nová využití.

2.1. Geotermální energie

Geotermální energie by se dala popsat jako zemské teplo, které se akumuluje v nitru země. Toto teplo je stále velmi málo využíváno v běžném životě člověka. Zdrojem této energie je teplo uvolňující se při radioaktivním rozpadu hornin. Dále pak teplo vznikající při pohybu litosférických desek, které jsou doprovázeny zemětřesením a vulkanickou činností. V neposlední řadě původní teplotou Země a fyzikálně chemickými reakcemi, ke kterým pod zemským povrchem dochází. Tato energie je nejčastěji považována za netradiční zdroj energie, které jsou reprezentovány hydrogeotermálními zdroji s teplonosnými látkami jako je geotermální voda, geotermální pára nebo jejich směsi. Tyto zdroje se dají využívat jak přímým tak i nepřímým způsobem. Dalším zdrojem využití zemského tepla je teplo suchých hornin. V tomto případě je jasné, že se teplo získává nepřímo, a to pomocí teplonosné látky, která je přiváděna do výměníku instalovaného do geotermálního vrtu. [5]

Geotermální energie se využívá pro ohřev vody, zajištění tepelné pohody a výrobě elektrické energie. Nejvíce se využívá tato geotermální energie pro výrobu elektřiny. Geotermální elektrárny zde pracují s nejteplejšími zdroji nad 150°C.

Z hlediska dosahovaných teplot se geotermální energie rozděluje do tří skupin. Každá ze skupin má vlastní vhodné možnosti využití.

Skupina s využitím **nejteplejších zdrojů** se pohybuje v teplotách nad 150°C a je využívána na výrobu elektrické energie. V geotermálních elektrárnách se používají 3 systémy na výrobu elektrické energie. Jedním ze zmiňovaných systémů je systém suché páry, kde se pro pohon turbíny využívá páry, která se získává ze samotného nitra Země. Dalším je systém mokré páry, při které se nejprve voda přemění na páru a tato pára pak pohání turbínu. Posledním používaným způsobem je systém horkovodní. Zde nedochází k přímému využití, ale voda o nižší teplotě předává teplo organické kapalině ve výměníku. Pohon turbíny zajistí až páry organické kapaliny.

Středně teplých zdrojů geotermální energie (90 – 150°C) se využívá při vytápění objektů s velkou spotřebou tepla, jako jsou zemědělské nebo průmyslové budovy.

Z pohledu tepelných čerpadel je jistě nejdůležitější využívání **nízkoteplotního geotermálního potenciálu**, kterého je nevyčerpatelné množství, protože nevyužité teplo uniká do atmosféry. Tento potenciál se čerpá z geotermálních vrtů, z podpovrchové vody nebo tepla naakumulovaného těsně pod povrchem Země. Při čerpání energie z podzemní vody je nutné znát její složení a dostatečně prozkoumat oblast. Tuto oblast je třeba prozkoumat z hlediska jejího užitelného množství. V případě čerpání energie z vrtů je důležité znát vlastnosti hornin, kvůli návrhu tepelného výkonu. V případě nutnosti zřízení více vrtů je potřeba dbát dostatečné vzdálenosti mezi vrty, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování.

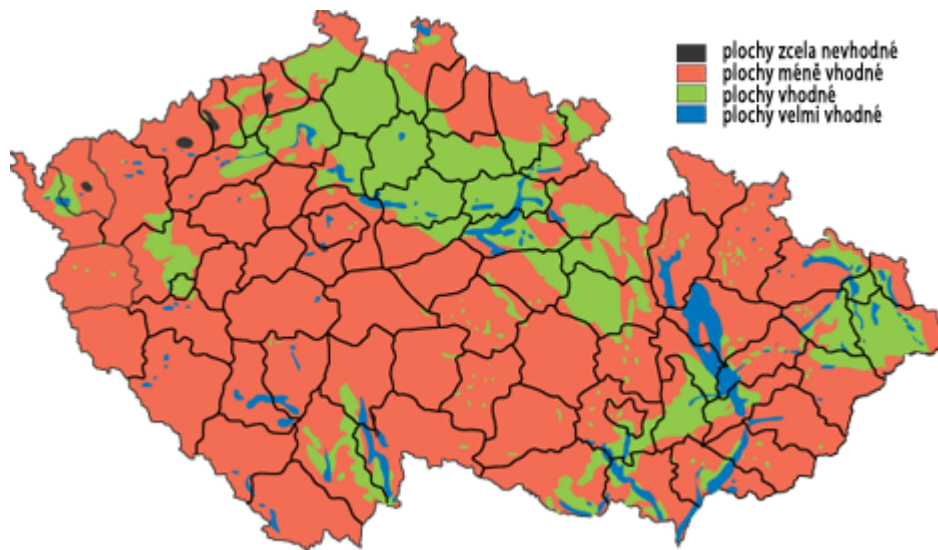
Využívání geotermální energie má značné výhody:

- Šetrnost k životnímu prostředí.
- Patří do skupiny alternativních, obnovitelných zdrojů energie.
- Jedná se o vlastní energetický zdroj.
- Levnější energetický zdroj než klasické fosilní energetické zdroje.

- Snižuje zatížení dopravních komunikací, které jsou plně dopravních prostředků s fosilními zdroji.
- V porovnání s existencí lidstva jsou zásoby téměř nevyčerpatelné.

Následující obrázek ukazuje geotermální potenciál České republiky.

Obr. 1 Geotermální potenciál České republiky [14]



2.1.1. Tepelný režim půdy

Tepelný režim půdy je závislý na vlastnostech půdy a půdního povrchu a na slunečním záření. Sluneční záření je půdou částečně absorbováno a částečně odráženo. Podle Kutílka k největší absorpci dochází u jižních svahů a drsného tmavého povrchu. Míra zahřátí půdy závisí na tepelné kapacitě půdy, na ztrátách energie při výparu vody z půdy a na přenosu energie do hlubších vrstev půdy. Tepelný režim půdy je důležité brát v potaz hlavně u plošných zemních kolektorů, kde hraje největší roli. [2]

2.1.2. Geotermální vrty

Geotermální vrt je velmi složitý technický systém sloužící jako jeden ze zdrojů geotermální energie. Pomocí tohoto systému se geotermální voda dopravuje z geotermálního podloží na zemský povrch. Nad zemským povrchem se voda dopravuje do odběrných míst,

kde se využívá jako zdroj tepla pro ohřev vody, vzduchu či bazénového hospodářství. [5]

2.1.3. Využití energie zemské kůry

Pro účely této práce plně postačí získávání nízkopotencionální energie ze zemské kůry, která je vrchní vrstvou Zemského povrchu. Ale i tak dosahuje značných hloubek. V nejtenčí vrstvě pod oceány se jedná o 6 km a v oblastech hor a pohoří může dosahovat až 70 km. Zemská kůra je tedy vhodná pro odběr energie pomocí tepelných čerpadel a to hlavně díky své neomezené tepelné kapacitě, malým tepelným rozdílům a všeobecné dostupnosti. Hlavní nevýhodou je vysoká ekonomická náročnost na získávání dostatečného tepelného toku ze Země. Ta je dána složitou technickou realizací vertikálního tepelného výměníku. Aby mohl být výměník dobře a ekonomicky navrhnout, je třeba znát vlastnosti půdy na místě jeho instalace.

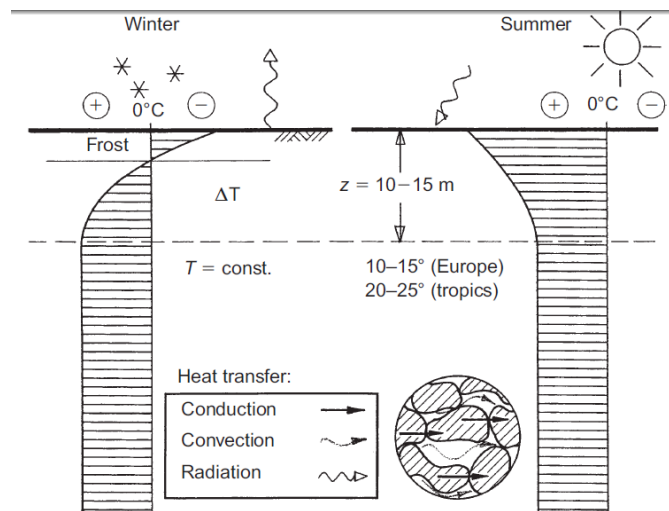
Za hlavní termofyzikální vlastnosti půdy se považuje její hustota, hmotnostní tepelná kapacita a koeficient tepelné vodivosti. Je pochopitelné, že tyto vlastnosti jsou závislé na druhu půdy. Hustota a vlhkost značně ovlivňují koeficient tepelné vodivosti. Rozdíl v hodnotách tepelné vodivosti pro suchou a vlhkou půdu může být značný. V případě suché půdy od 0,25 W/m.K a až 2,5 W/m.K u půdy vlhké. V okolí tepelného výměníku může docházet k zamrznání půdy, což sice zvětšuje hodnotu tepelné vodivosti, ale dochází ke změnám objemu půdy. Mezi půdou a výměníkem mohou vznikat nežádoucí vzduchové mezery, které značně zhoršují přestup tepla a zároveň zhoršují celé technické a ekonomické navržení zařízení. Abychom zabránili tomuto problému, instalují se na výměník pružné materiály, které při změnách objemu půdy kopírují. Nedochází tak ke vzduchovým bublinám a zlepšuje se přestup tepla. Jako nejlepší materiál, pro tyto účely, se ukázal být bentonit. Jedná se o gelový materiál s vysokým obsahem vody, který se umístí na trubky výměníku. Studie ukazují, že na tepelný výkon o hodnotě 1kW v suché půdě je zapotřebí

kolem 125m dlouhých trubek. Ve vlhké půdě se délka sníží na 40m a při použití bentonitu klesne dokonce až na 13m. [5]

Teplota Země roste přibližně o 1°C každých 33m. Tento nárůst není samozřejmě stoprocentní, záleží na dané lokalitě. Nárůst teploty směrem do hloubky je ovlivněn vodivostí a typem hornin, prouděním podzemní vody a tektonikou. Jen pro představu nejvyšší teplota je logicky v zemském jádře a dosahuje 2000 – 4000°C. Do 50m pod povrchem dochází k výkyvům teplot. Při hloubkách pohybujících se pod touto hranicí dochází k teplotnímu ustálení. Obecně platí, že teplota půdy v hloubce 15m pod povrchem se přibližně rovná průměrné teplotě vzduchu pro danou lokalitu. V případě uložení horizontálního zemního výměníku, jehož uložení je maximálně do 2m, dochází ke změnám teploty okolo 5K. V menších hloubkách dokonce o dost vyšším, protože závisí na klimatických podmínkách daného území. Sluneční záření ohřívá Zem, ale pod její povrch se dostane jen malé množství tepla a ne do nějak závratných hloubek. [5]

Autor Brandl uvádí, že sezónní podzemní teploty ve většině oblastí Evropy pod hloubkou 10-15m jsou relativně konstantní. Do 50m se pohybují mezi 10-15°C, což je ideální teplota umožňující hospodárné vytápění a chlazení pomocí termo-aktivních pozemních staveb (vrtů) a představují ideální podmínky pro tepelná čerpadla. V případě kolísání teplot během roku by se podstatně snížila účinnost tepelného čerpadla. V tropech se teploty v hloubkách nižších než 10-15m pohybují mezi 20 až 25°C. [10]

Obr. 2 Přenos tepla a geotermální situace v základních hloubkách pod zemským povrchem [10]



Hlavním poznatkem ze získávání energie ze zemské kůry je, že se zvětšující se hloubkou se nejen zvedá teplota hornin, ale stává se i mnohem stabilnější a dochází k minimálním teplotním změnám. Tento poznatek musíme brát v potaz při navrhování vrtů pro vertikální zemní výměníky tepelných čerpadel. Ne vždy by mělo být cílem, při zřizování takového zařízení, dostat se do co největších hloubek za účelem získání co největšího tepelného výkonu. Musí se mít na paměti, že vrtné práce jsou dosti ekonomicky náročné a s každým metrem se značně zvedá jejich cena. Z tohoto důvodu se musí zvážit, jestli je naším cílem dostat se do větších hloubek nebo raději přejít na bivalentní režim a instalovat záložní zařízení. Zpravidla záleží na klimatických podmínkách. Například v České republice je málo mrazů (není zapotřebí velkých tepelných výkonů), a tak je ekonomičtější instalace elektrického kotle nebo kotle plynového než dimenzovat tepelná čerpadla na větší výkon. Větší hloubka vrtu se vyplatí například ve Skandinávii, kde je značně chladnější počasí. V těchto severských zemích se také nejvíce pracuje na vývoji techniky, která by umožňovala dosahovat větších hloubek než je tomu nyní. Hovoří se o několika stovkách metrů.

Následující tabulka ukazuje ziskovost tepla u jednotlivých hornin pro 1 800h a 2 400h hodin ročního provozu. Při 2 400h provozu za rok, jak ukazuje tabulka, je jasné, že dochází ke snížení ziskovosti energie z důvodu “vyčerpání“ vrtu.

Tab. 1 Ziskovost tepla jednotlivých hornin.

Podloží	Specifický odběr	
	pro 1800 h	pro 2400 h
Obecné hodnoty		
Špatné podloží (suchý sediment) - ($\lambda < 1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)	25 W/m	20 W/m
Normální pevná hornina a zvodnělý sediment - ($\lambda = 1,5\text{-}3,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)	60 W/m	50 W/m
Pevná hornina s vysokou tepelnou vodivostí - ($\lambda > 3,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)	84 W/m	70 W/m
Jednotlivé horniny		
Písek, štěrk, suchý	<25 W/m	<20 W/m
Písek, štěrk, vedoucí vodu	65-80 W/m	55-65 W/m
Při silném podzemním vodním toku v písku nebo štěrku, jednotlivá zařízení	80-100 W/m	80-100 W/m
Jíl, hlína, vlhká	35-50 W/m	30-40 W/m
Vápencový masív	55-70 W/m	45-60 W/m
Pískovec	65-80 W/m	55-65 W/m
Kyselá magmatická hornina (např. žula)	65-85 W/m	55-70 W/m
Zásaditá magmatická hornina (např. čedič)	40-65 W/m	35-55 W/m
Rula	70-85 W/m	60-70 W/m
Hodnoty mohou v závislosti na stavbě horniny (puklinatost, břídlícnatost, zvětrávání) kolísat.		

2.2. Ekologické problémy podporující vývoj alternativní energie

Celá Evropa, včetně České republiky, již dosáhla ekologicky únosné hodnoty měrné uvolňované energie vztažené na plochu svých území. Z toho důvodu již nelze zvyšovat uvolňování všech energií – pro elektrárny, automobilismus, teplárny, protože termoeemise lidské činnosti regionálně překročili ekologicky únosné meze. Lidstvo se tedy bude muset naučit žít hospodárněji a využívat v celém světě ročně asi 10^{15} kWh až 10^{16} kWh z čistých a bezpečných energetických zdrojů. [5]

2.3. Fyzikální princip tepelného čerpadla

Hlavní důvodem, proč se vlastně tepelné čerpadlo (TČ) stává čím dál více oblíbeným nástrojem pro vytápění objektů je, že umí využívat nízkopotencionální energii, která je všude kolem nás. V zemi, vodě, vzduchu je obrovské množství tepla, ale jeho nízká hladina nedovoluje přenést energii přímo. A právě pro tento účel je tepelné čerpadlo vhodným zařízením. Přenést teplo o nízké teplotě na teplotu vyšší není zas takový problém, jak by se mohlo na první pohled zdát. Názorně by se tento případ mohl popsat na vodním čerpadle, které přečerpává vodu z nížiny do hor. Tak to samé se děje u čerpadla tepelného, jen s tím rozdílem, že místo vody se přečerpává teplo. Teplo je pojem, který se velmi často zaměňuje s teplotou. Teplota je fyzikální veličina popisující současný stav nějakého prvku. Měří se teploměrem a jejich jednotkou jsou například Kelviny nebo stupně Celsia. Zatímco teplo je veličina, která se vztahuje k nějakému určitému ději kde dochází k tepelné výměně. Vzniká na rozhraní dvou systémů s rozdílnou teplotou. Jedná se tedy o vnitřní energii, kterou systém při styku vymění, aniž by docházelo ke konání práce. Základní myšlenkou používání tepelných čerpadel tedy je ochladit zemi, vzduch či vodu o několik málo stupňů a odebrané teplo použít pro ohřev vody nebo pro vytápění.

TČ nepopírá žádné fyzikální zákony, naopak je na nich přímo založené.

1. zákon termodynamiky:

- přivedeme-li plynu teplo dQ :

➤ zvětší se vnitřní energie dU a dojde k ohřátí

➤ vykonání práce dA

$$dQ = dU + dA \quad [\text{kW}] \quad (2.1)$$

2. zákon termodynamiky:

Teplo se přenáší pouze z prostředí s vyšší teplotou do prostředí s teplotou nižší.

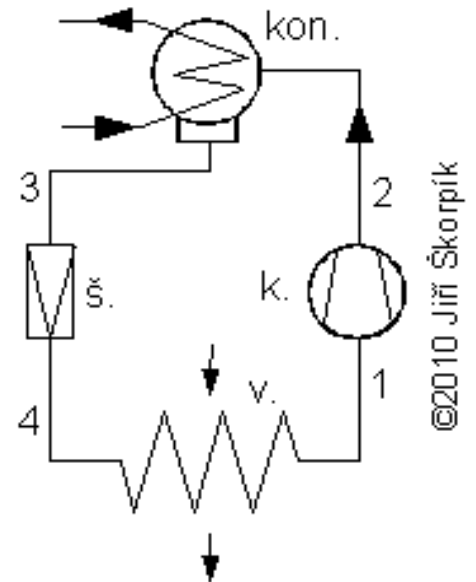
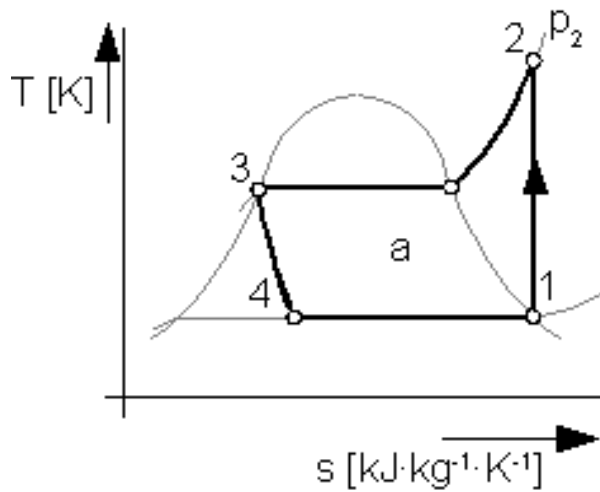
„Je důležité si uvědomit, že fyzikální zákony platí při všech teplotách, jen člověk má při různých teplotách jiné subjektivní pocity“ To znamená, že například při ochlazení vody v topném systému ze 70°C na 64°C teplo uniká do ovzduší a tím jej ohřívá. Tento rozdíl teplot si člověk představí velmi snadno. Složitější je však představit si jedná-li se o mnohem nižší teploty nebo dokonce o hodnoty záporné. Stejně množství tepla se dá získat i při ochlazení solanky (chladiivo) z 0°C na -6°C. [1]

V podvědomí lidí je zakořeněna myšlenka, že TČ pracuje na stejném principu jako obyčejná chladnička, která se nachází v každé domácnosti. To je sice pravda, ale když se zeptáte na podrobnosti málo kdo je schopen odpovědi. Chladnička odebírá teplo potravinám, které jsou v ní uschovány, a při vyšší teplotě jej zadní stranou vyzařuje do místnosti. TČ odebírá teplo z venkovních prostor jako je vzduch, voda, půda a ochlazuje je. Odebrané teplo je poté při vyšší hodnotě předáno do topného systému.

TČ pracuje na principu levotočivého kompresorového oběhu znázorněného na obr. 3, ve kterém je nutné práci oběhu dodávat přes kompresor. Tento oběh je složen z izoentropy, ze dvou izobar a adiabatického škrcení. [11]

Aby mohl stroj vůbec pracovat s nějakou účinností, musí mít možnost využití teplotního spádu. Žádný stroj nemůže konat periodicky práci bez rozdílu teplot. Teplo nemůže samo o sobě přecházet z látky o teplotě nižší do látky o teplotě vyšší. Při takovém to přenosu by bylo za potřebí značného množství energie.

Obr. 3 Znárodnění oběhu kompresorového chladicího zařízení v T-s diagramu a jeho realizace [25]



Popis jednotlivých změn[11]:

1-2 izoentropická komprese

$$q_{1,2} = 0 \quad [\text{J/Kg}] \quad (2.2)$$

2-3 izobarický odvod tepla

$$q_{2,3} = i_2 - i_3 \quad [\text{J/Kg}] \quad (2.3)$$

3-4 škrcení

$$i_3 = i_4 \quad [\text{J/Kg}] \quad (2.4)$$

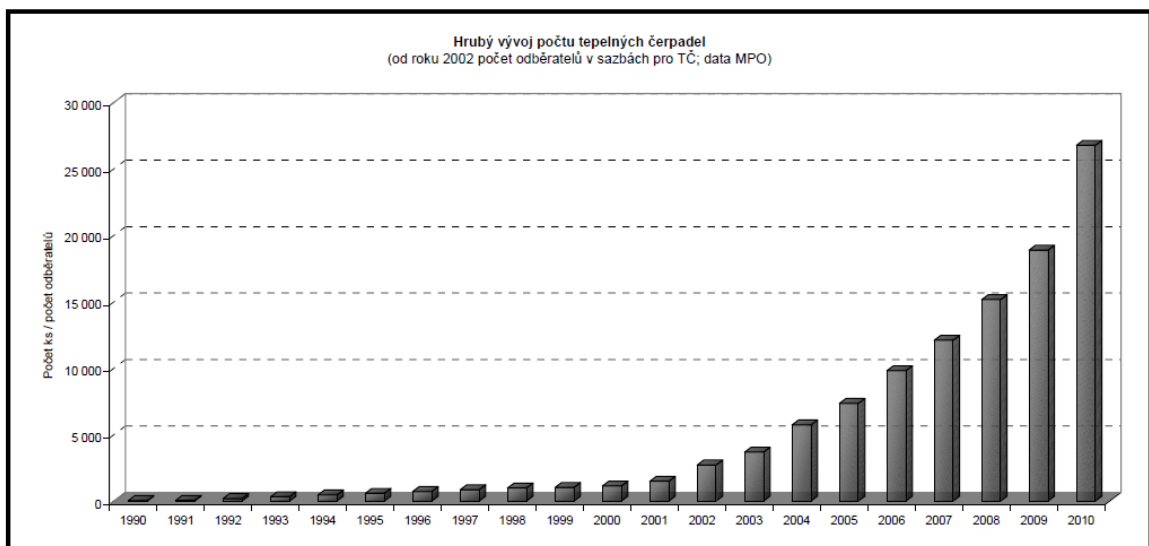
4-1 izotermicko-izobarický přívod tepla

$$q_{4,1} = i_1 - i_4 = i_1 - i_3 \quad [\text{J/Kg}] \quad (2.5)$$

2.4. Technické složení tepelného čerpadla

Princip tepelného čerpadla byl popsán a vymyšlen již v 19. století anglickým fyzikem lordem Kelvinem. TČ jako takové bylo zkonstruováno mnohem později. Prameny uvádějí, že úplně první čerpadlo mělo v roce 1936 sloužit k vytápění curyšské radnice. Plošnějším využívání bránila tehdejší nízká cena energií, která značně prodlužovala návratnost vložené investice. V České republice bylo v osmdesátých letech minulého století sestrojeno několik kusů firmou ČKD a několik dalších podomácku vyrobených od domácích kutilů a nadšenců. Jak je vidět na obrázku, od té doby s rostoucí cenou energií roste i zájem o tepelná čerpadla. Podle statických zjišťování, která provedlo ministerstvo průmyslu a obchodu, byl v roce 2002 počet odběratelů provozujících tepelné čerpadlo 2 702. Za 8 let, v roce 2010, se počet zvýšil téměř desetkrát. Je téměř jisté, že dnes se počet pohybuje kolem 30 000. Ale přesnější čísla nejsou dosud známa.

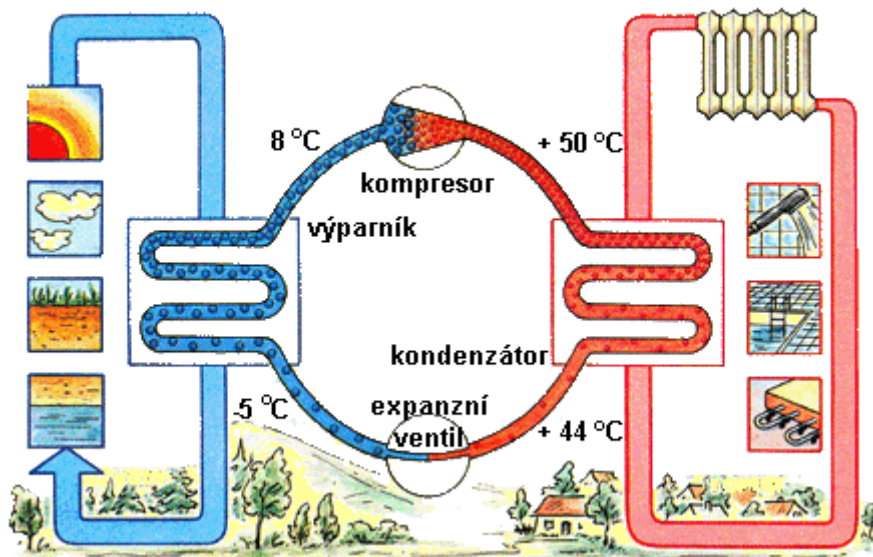
Obr. 4 Vývoj počtu tepelných čerpadel [15]



Zařízení se skládá ze dvou tepelných výměníků (kondenzátoru a výparník). Dále pak z kompresoru a expanzního ventilu. TČ se skládá z primárního a sekundárního okruhu. V primárním okruhu cirkuluje

teplonosné médium (voda, nemrznoucí směs) a pomocí něho je odebírána nízkopotencionální energie z okolí. Dochází k ochlazení vody, vzduchu či půdy a předání tepla teplonosné látce. Sekundárním okruhem proudí vhodné chladivo, které má specifické vlastnosti, kterými se budeme zabývat později. Ve výparníku chladivo v plynném skupenství přebírá teplo od teplonosné látky a je nasáván kompresorem, kde dochází ke stlačení a velkému zahřátí chladiva. V kompresoru se ještě k energii nesené chladivem přidává ztrátová energie elektromotoru kompresoru a teplo vzniklé třením pohyblivých částic kompresoru. Stlačený plyn tak dosahuje větších teplot než je teplota vody v otopné soustavě. Plyn míří do kondenzátoru, kde zkapalní a předá teplo do otopné soustavy. Poslední částí je termodynamický expanzní ventil, který vstřikuje do výparníku správné množství kapaliny tak, aby byl ideálně plněn a udržoval se správný provozní režim. Celý cyklus se neustále opakuje.

Obr. 5 Technické schéma tepelného čerpadla [16]



Kompresor: slouží k cirkulaci chladiva ve vnitřním okruhu tepelného čerpadla, stlačuje jej a tím zvyšuje teplotu chladiva, je napojen na elektrickou energii.

Škrtící ventil (tryska, clona): slouží ke snížení rychlosti, tlaku a zejména teploty zkapalněného chladiva, leží mezi kondenzátorem a výparníkem; celý proces probíhá tak, že dochází k expanzi z tlaku p_1 na tlak p_2 .

Výparník: výměník tepla předávající teplo z teplonosné látky, která jej odebírá z vody, půdy vzduchu, do chladiva; chladivo přechází z kapalného stavu do stavu plynného.

Kondenzátor: výměník tepla předávající vyrobenou tepelnou energii z chladiva do topné soustavy; chladivo přechází z plynného stavu do stavu kapalného.

2.5. Tepelná bilance oběhu

Tepelná bilance zajišťuje tepelnou rovnováhu v oběhu.

$$P_o + N = P_k \quad [\text{kW}] \quad (2.6)$$

P_o tepelný výkon na výparníku [kW]

P_k tepelný výkon získaný na kondenzátoru [kW]

N příkon kompresoru [kW]

Z této bilance vychází nejdůležitější ukazatel účinnosti tepelného čerpadla a to topný faktor (COP – Coefficient of performance). Topný faktor je poměr získané energie a spotřebované energie elektrické. Jde o bezrozměrovou veličinu. Čím získáme větší topný faktor, tím lepší bude účinnost stroje a provoz čerpadla bude levnější. Obvykle se topný faktor pohybuje mezi 2,5 až 4. Například, když máme topný faktor 3, tak dodáme kompresoru 1kWh elektrické energie a vyrobíme 3kWh energie potřebné pro vytápění. Topný faktor není hodnota stálá nýbrž proměnlivá. Mění se podle podmínek, ve kterých zařízení pracuje.

Topný faktor:

$$\varepsilon_t = \frac{Q_k}{N} \quad [-] \quad (2.7)$$

Q_k tepelný výkon získaný na kondenzátoru [kW]

N elektrický příkon kompresoru [kW]

2.6. Typy tepelných čerpadel

Nejdříve je dobré si tepelná čerpadla rozdělit podle způsobu jakým dochází k odsávání par z výparníku a zvýšení tlaku a teploty v oběhu.

Kompresorová tepelná čerpadla (KTČ): jedná se o nejběžnější druh, oběh je zajištěn pístovým nebo rotačním kompresorem, kompresor je poháněn elektrickým nebo spalovacím motorem

Absorpční tepelná čerpadla (ATČ): nejsou moc vyhledávaným zařízením pro jejich malou účinnost, pro zvýšení tlaku par je použito pochodu absorpce chladiva do roztoku, jeho přečerpání do vypuzovače a následné vypuzení chladiva z roztoku při kondenzačním tlaku

Hybridní tepelná čerpadla: zakázková výroba

Důležité členění tepelných čerpadel je podle zdroje tepelné energie. Na prvním místě v názvu je veličina, ze které se teplo odebírá a na druhém místě je veličina které, se teplo předává.

2.6.1. Voda – Voda

U tohoto typu jsou hadice s nemrznoucí směsí, přenášející teplo, nataženy na dně řeky, rybníka nebo jiné vodní plochy. Je tedy nezbytně nutné, aby objekt s TČ, byl co nejbližší vodní plochy, aby se zamezilo zbytečným tepelným ztrátám.

Dalším způsobem jak je možné získávat teplo z vody je voda podzemní. Pro tento způsob je nutné zřídit dvě studny - čerpací studnu a vsakovací studnu. Z čerpací studny je voda přečerpávána přímo do výparníku, kde předá teplo, ochladí se a vrací do studny vsakovací.

Tento typ má samozřejmě svoje výhody a nevýhody:

Výhody: příznivý topný faktor, nízká pořizovací cena, stálý výkon TČ

Nevýhody: složitější technické řešení, nároky na množství a složení vody, nebezpečí vyčerpání studny, větší nároky na údržbu

2.6.2. Vzduch – Voda

Teplo je odebíráno přímo z venkovního vzduchu, který prochází výparníkem a předává jej chladivu. Vzduchová čerpadla jsou, co se týče pořizovací ceny, levná, ale zdání může klamat. V zimních měsících klesá účinnost a roste spotřeba elektrické energie, a tak se může návratnost investice značně prodloužit. Nejvhodnějším způsobem, pro tento druh čerpadel, je zvolit bivalentní provoz.

Výhody: nízká pořizovací cena, snadná instalace, nenarušuje tepelnou rovnováhu okolí

Nevýhody: závislost na venkovní teplotě, vysoká hlučnost

2.6.3. Země – Voda

Tento typ je nutné rozdělit na dva druhy – horizontální zemní kolektory a vertikální vrty. Jedná se o nejstabilnější řešení. TČ typu země/voda se většinou konstruují pro bivalentní provoz. To znamená, že klesne-li venkovní teplota pod -5°C (teplota bivalence), zapne se záložní zdroj a obě zařízení pracují současně. Jako záložní zdroj se nejčastěji používá elektrokotel. Tento typ může pracovat i v monovalentním režimu. Při rozhodování, který typ použít hraje důležitou roli hornina v místě použití a sama budova pro kterou je tepelné čerpadlo navrhováno. [4]

Zemní práce

Důležitou položkou tepelných čerpadel země/voda jsou zemní práce. Ty tvoří důležitou část finančního rozpočtu při návrhu tohoto typu. Používají se buď zemní horizontální kolektory, nebo geotermální vrty. Zemní kolektory jsou značně levnější a používají se tam, kde jsou možné rozsáhlé zemní práce. Navrhují se například u novostaveb vybudovaných na zelené louce, či u stávajících budov s dostatečnou okolní plochou. Vertikální kolektory se naopak staví tam, kde je nedostatek prostoru. Jen je třeba zajistit vjezd vrtné soustavy na pozemek. Tento požadavek se v některých případech, jako jsou hustě zastavěné oblasti, stává velkým problémem. Díky nezávislosti na klimatických podmínkách je možné tyto typy používat po celý rok. V letních měsících hlavně na ohřev teplé vody. Geotermální vrty je možné použít také jako klimatizační zařízení a regenerovat tak vrt, aby nedocházelo k jeho zamrznání. [4]

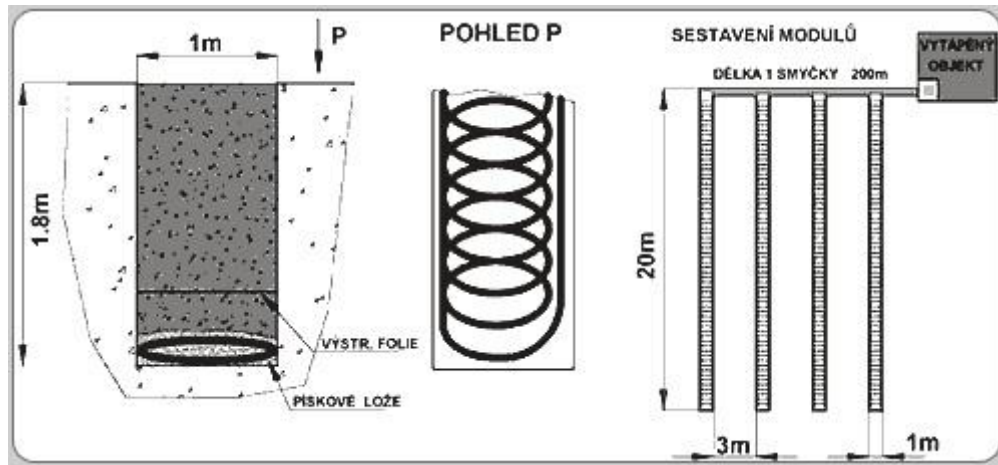
2.7. Horizontální zemní kolektory

Je někdy také nazýván plošný zemní kolektor. Pro jeho realizaci nejsou nutná žádná zdlouhavá potvrzení. Stačí jen nahlášení na stavebním úřadě a mohou se začít kopat výkopy. Zemní kolektory využívají sluneční energii, která se akumuluje v zemi, a je snadno čerpatelná. Je nutné, aby místo, kde se kolektor nachází, bylo volné. To znamená nezastavěné, nezakryté nějakými drobnými stavbami jako jsou skleníky, kůlny atd. [4]

V praxi jsou v zemi, asi 1,2 – 1,8m pod povrchem, uloženy hadice PE naplněné nemrznoucí směsí. Hadice bývají ukládány až s roztečí 150cm. Používají se PE hadice o vnějším průměru 32 nebo 40mm. Síla stěny takové hadice je 3mm. Délka okruhu by neměla přesahovat 200m. Jednotlivé okruhy by měli být stejně dlouhé a spojeny pomocí spojovacích armatur. V dnešní době se často používá i jiná podoba instalace. Jedná se o svinuté kolo PE hadice, která je roztahována do vodorovné polohy (slinky typu H) a do polohy šikmé

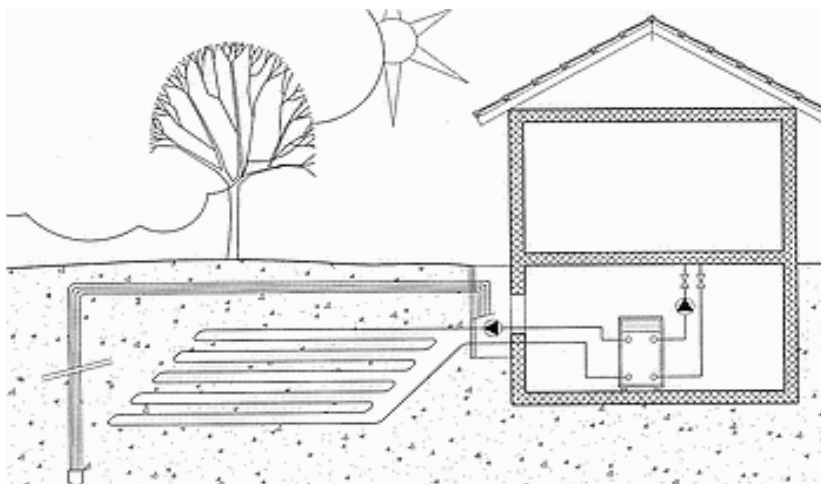
(slinky V). Uložení a jednotlivé vzdálenosti jsou uvedeny na následujících obrázcích. [1]

Obr. 6 Slinka typu H [17]



Po uložení hadic a provedení terénních úprav není na povrchu nic vidět. Mohou se zde pěstovat rostliny a nechat růst tráva. Jen je nutné brát v potaz, že země je v jarních měsících prochladejší, což může mít negativní vliv na vegetaci. [1]

Obr. 7 Horizontální zemní kolektor [18]



2.8. Vertikální zemní výměník

Teplu je získáváno nepřímo ze suchých nebo zvodnělých vrtů hloubky 50 – 150m. Vrty jsou ochlazovány zapuštěným výměníkem, který je tvořen plastovými nebo měděnými sondami naplněnými nemrznoucí směsí. Tato směs přenáší získané teplo mezi zemí a výparníkem tepelného čerpadla. Pro lepší vodivost tepla je vrt vyplněn suspenzí cementu a bentonitu.

Výhody: nezávislost na okolní teplotě, malý půdorysný záběr, vysoký topný faktor, nezneškodnění pozemku, konstantní teplota vrtu (8-12°C) využitelná pro chlazení objektu v letním období a zároveň dochází k regeneraci hlubinného vrtu,

Nevýhody: vysoké pořizovací náklady; umožnění vjezdu vrtné soustavy; nelze realizovat tam, kde jsou pozemky legislativně chráněny

Jen pro představu, cena jednoho metru hloubky vrtu se pohybuje průměrně kolem 1000Kč. Když je zapotřebí vyvrtat 100 metrový vrt, a někdy nezůstane jen u jednoho vrtu, počáteční investice se značně prodraží.

Množství odebraného tepla závisí na geologických podmínkách daného území. Jedná se hlavně o složení hornin, zda se v místě vrtu nacházejí spodní vody atd. Dále je důležité dobře nadimenzovat hloubku vrtu a zvolit správné složení pracovní látky. Teplota země se průměrně zvyšuje na každých 30m hloubky o 1°C. Z tohoto důvodu jasně vyplývá, že je lepší jeden hluboký vrt, než více mělkých.

Zhotovení vrtu není jednoduchá záležitost. Aby dílo pracovalo tak jak má, musí splňovat veškeré evropské normy a předpisy. V poslední době se na trhu objevují firmy, které nedbají na kvalitu, a jde jim pouze o vlastní zisky. Proto je nutné vybrat si kvalitní firmu. Rozdíly jsou v provedení použitých materiálech. [4]

Pro realizaci vrtu v České republice je potřeba stavební povolení, a tak realizace probíhá v několika fázích.

➤ Objednatel

- Vodohospodářský projekt, hydrogeologický posudek, technický projekt
- Získání územního rozhodnutí, stavebního povolení
- Realizace vrtu
- Dokumentace skutečného provedení, kolaudace

Hloubka vrtů je rozdílná. Závisí na výkonnosti vrtné soupravy a na geologických podmínkách daného území. Je možné vrtat do hloubky 50 – 150m. V případě potřeby většího počtu vrtů se celková délka rozdělí do více vrtů stejné délky. Důležitá je také vzdálenost vrtů. Aby se navzájem neovlivňovali, doporučuje se vzdálenost 10m. V případě, že se jedná o dva vrty, vzdálenost se může snížit na 7m. [4]

Důležité informace, které je třeba znát pro výpočet hloubky a počtu vrtů:

- Výkon tepelného čerpadla
- Způsob vytápění (radiátorové, podlahové, kombinované)
- Předpokládaný počet hodin provozu tepelného čerpadla ročně
- Místo instalace
- Využití geotermálních vrtů – ohřev TUV, vytápění, vytápění bazénu,...
- Využití pasivního případně aktivního chlazení v objektu
- Celková roční potřeba tepla pro vytápění

Trend směřuje k vrtání mnohem větších hloubek. Ve Švédsku se snaží vrtat do hloubek kolem 300m. V České republice je pravděpodobně nejhlubší vrt, využívaný pro tepelné čerpadlo společnosti IVT, instalován na Strakonicku a jeho hloubka činí 245m. Toto čerpadlo je využíváno k vytápění rodinného domu a pracuje monovalentně, čili celoročně bez jakéhokoliv dalšího zdroje tepelné energie. Maximální výkon čerpadla je 17kW.

2.8.1. Technologie provedení vrtu

Celý vrt se hloubí pomocí vrtné soupravy. Ve většině případů se používá rotačně příklepového vrtání. Vrtné kladivo je hnáno stlačeným vzduchem a ten vynáší materiál otvorem na povrch. U nestabilních stěn je potřeba provádět výplach, který vyplaví nečistoty z vrtu ven na povrch. Průměr vytvořeného vrtu se pohybuje mezi 130 – 165mm. Vrtné stroje se umísťují na pásový podvozek nebo přímo na podvozek terénního vozu. Vrtné stroje nejsou žádná malá zařízení. Hmotnost těchto strojů je mezi 6 – 20tun. Vrtné kladivo je poháněno kompresorem, který může být umístěn na vzdálenějším místě. To znamená, že nemusí být součástí soustavy. Aby práce byla méně časově náročná, je dobré zajistit v blízkosti volnou plochu pro umístění vrtných tyčí. [4]

Aby mohlo celé zařízení pracovat správně a nedocházelo k upadání výkonu, je potřeba volit vhodné a kvalitní materiály. Výstroj vrtů je ze speciálního polyethylenu s označením PE 100+. Ještě lepší variantou se nabízí trubka s označením PE 100RC. Ta je vyrobena z granulátu s označením RC (Resistance to Crack) Podle evropské normy, která ukládá maximální poškození trubky 10% z její tloušťky, je tato trubka 10krát odolnější proti vrypům než PE 100+. To znamená, že podle normy je u trubky o rozměrech 32 x 2,9mm povolen maximální vryp 0,29mm. Pokud dojde k překročení této hranice je nutná výměna. Na konci celého vstrojení se nachází vratné U koleno, které je prověřováno po celý průběh chodu systému. I tato část musí splňovat evropské normy. [4]

2.8.2. Nemrznoucí směs v primárním okruhu

Primární okruh je naplněn nemrznoucí směsí, která přenáší teplo do výparníku. Jako náplň okruhu se používají látky na lihové, glycerinové nebo glykolové bázi. Dodávaný koncentrát se ředí vodou na požadovanou teplotu změny fáze. Každá látka má své specifické vlastnosti.

Nemrznoucí směsi a jejich vlastnosti [7]:

Líh - jedná se o látku, která podléhá zvláštním bezpečnostním podmínkám. Používá se líh denaturovaný. Dochází k přidání aditiv, obarvení a aromatizaci, aby se znemožnila jeho konzumace. Tento líh je osvobozen od daně. To značně snižuje jeho cenu a zvyšuje oblíbenost. Neinstaluje se do systémů s aktivním chlazením. Jde o látku hořlavou.

Glycerín - látka, jejíž největší předností je, že je šetrná k těsněním a kovům. Není hořlavá a je ekologicky nezávadná. V neposlední řadě nezapáchá.

Etylénglykol – ekologicky nebezpečná látka. Při jejím používání je nutné mít dvojitě jištění při případném úniku do ovzduší. Při vypuštění je nutné látku ekologicky zlikvidovat.

2.8.3. Pracovní látka – chladivo

Pracovní látkou, nebo-li chladivem, se rozumí látka, která přebírá teplo ve výparníku o nižší teplotě a tlaku a předává jej v kondenzátoru o teplotě a tlaku vyšším.

Chladivo by mělo splňovat následující náležitosti: [9]

- mělo by být nehořlavé a nejedovaté
- velké výparné teplo
- malá měrná kapacita v kapalně fázi
- nízká viskozita
- inertní vůči mazacím olejům
- umožňovat snadné odloučení vzduchu
- ekologické, nepůsobit negativně na životní prostředí
- vysoký součinitel tepelné vodivosti
- inertní vůči konstrukčním materiálům

Rozdělení chladiv podle ASHRAE: [9]

- Chladiva HFCKW – halogenové uhlovodíky obsahující chlór – R 22, R 124; například R 22 jednosložkové chladivo ve složení halogenového uhlovodíku s obsahem chlóru, dnes je již zakázáno jeho používání
- Směsi látek HFCKW – zpravidla jde o třísložkovou směs - R 409A
- Chladiva HFKW – halogenové uhlovodíky neobsahující chlór – R 134a, R 143a, R 125; například chladivo R 134a je jednosložkové chladivo ve složení halogenového uhlovodíku bez obsahu chlóru
- Směsi látek HFKW – zpravidla jde o třísložkové směsi – R 404A, R 407C; například R 404A je třísložková směs, kde všechny její složky jsou halogenové uhlovodíky bez chlóru, složení: R 134a, R 125, R 134a v poměru 52, 44, 4 %
- Směsi HFKW a HFCKW – často třísložkové směsi R 413A, R 401A
- Ostatní chladiva, která neobsahují halogeny, jako jsou čpavek, propan a oxid uhličitý – R 717, R 290, R 744

Chladiva mohou mít negativní vliv na životní prostředí. Opatrnosti se musí dbát při plnění chladiva do systému, při jeho provozu a samozřejmě i při jeho likvidaci. Následný únik pracovní látky by mohl negativně působit na skleníkový efekt, na ozónovou vrstvu v atmosféře, mohlo by dojít k výbuchu a následnému požáru a v neposlední řadě by mohlo dojít k újmě na lidském zdraví.

2.9. Návrh vertikálního tepelného čerpadla země-voda

Nejdůležitější částí pro správný chod vertikálního tepelného čerpadla země - voda je správný výběr zařízení. Zařízení je většinou umístěno v samostatné místnosti a je k nerozeznání například od plynového kotle. Aby nedošlo k předimenzování, nebo naopak k poddimenzování, musí se určit správný výkon tepelného čerpadla. K tomuto účelu sloužila v České republice norma ČSN 06 0210. Ta byla ovšem v roce 2008 zrušena a nahrazena normou, převzatou z Evropské unie, ČSN EN 12831, která se zabývá výpočtem tepelné ztráty objektu. Tepelné čerpadlo země/voda se obvykle dimenzuje na 100% tepelných ztrát pro monovalentní provoz a 60 - 80% tepelných ztrát pro provoz s například integrovaným elektrokotlem (bivalentní).

2.9.1. Monovalentní provoz

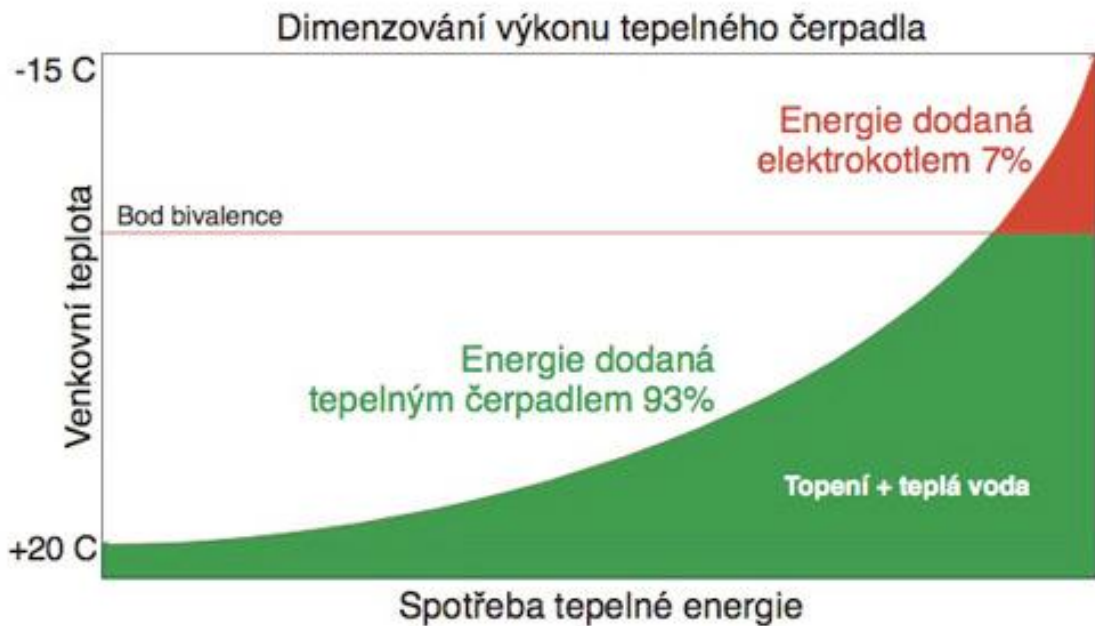
V dnešní době pasivních nebo nízkoenergetických domů, kde náklady na vytápění jsou o 2/3 nižší než u běžných objektů a jejich tepelná ztráta nedosahuje více jak 10kW je možná instalace tepelného čerpadla bez možnosti dalšího zdroje tepla. V takovém případě není zvýšení investičních nákladů tak výrazné. Zařízení nemusí pracovat s dalším zdrojem, ale u většiny je nutná instalace akumulčního zásobníku vody

2.9.2. Bivalentní provoz

Potřeba výkonu pro vytápění objektů se během roku mění. A proto není nutné dimenzovat tepelné čerpadlo na maximální výkon. To by mohlo znamenat zbytečně hluboké vrty a tepelná čerpadla se zbytečně velkým výkonem. Celý provoz by byl neekonomický se zbytečně vysokými pořizovacími náklady. Ideální je navrhnout zařízení průměrně na 70% tepelných ztrát objektu a zbytek pokrýt dalším zařízením pro zdroj tepla. Nejčastěji se používají elektrokotle, který mají některá tepelná čerpadla již integrovaný. Výhodou

elektrokotle je, že slouží jako záloha v případě závady na tepelném čerpadle a neutrpí tak tepelná pohoda obyvatel daného objektu. [4]

Obr. 8 Ukázka dimenzování tepelného čerpadla s bivalentním provozem [19]



2.9.3. Metody návrhu vertikálních horninových výměníků

Dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla není exaktní záležitostí, protože většina projektů a návrhů se opírá o čistě teoretické možnosti zisku energie z vrtů. Přesná data o výkonu vrtu se dají zjistit až po několikaletém provozu zařízení, po několika po sobě jdoucích topných sezónách. Naměřená data se zkoumají a vyhodnocují přímo při provozu tepelného čerpadla. Na nápravu špatného dimenzování je již v této fázi pozdě.

Projektanti, kteří se zabývají dimenzováním vrtů pro tepelná čerpadla, používají počítačové softwary, které jim usnadňují práci.

Tyto softwary jsou založeny samozřejmě na matematických výpočtech, kterými se bude zabývat následující kapitola.

Před vlastním použitím počítačového programu je nutné v dané oblasti provést geologický průzkum, který určí, jaké typy hornin se v dané oblasti nacházejí. Součástí geologického průzkumu by měla být i zkouška teplotní odezvy horninového prostředí, tzv. TRT test (Thermal Response Test). Tento test se provádí v dané lokalitě na zkušebním vrtu vystrojeném jako standardní vrty pro tepelná čerpadla. Výstupem TRT testu je tepelná vodivost hornin λ , tepelný odpor vrtu R_b pro daný vrt a teplota neovlivněného horninového masivu T_{ug} . Tyto dvě veličiny slouží projektantům jako základní vstupní veličiny do výpočetních počítačových programů pro dimenzování tepelných čerpadel.

V Evropě se pro dimenzování vrtů používá software Earth Energy Designer s označením EED 2.0. Tento program byl vytvořen ve spolupráci švédských a německých výzkumných a univerzitních pracovníků. EED 2.0 je vytvořen pouze pro potřeby systému země/voda do maximální hloubky vrtu 200m.

Program dokáže pomocí jednoduchých dialogových oken s databázemi vstupních parametrů rychle vypočítat tyto konečné parametry:

- průměrné teploty nemrznoucí směsi v kolektorech pro zvolenou hloubku vrtů
- hloubku vrtů pro zvolené rozmezí teploty nemrznoucí směsi v kolektorech

Je jistě důležité si říci, čím program disponuje a jaké vstupní parametry se do něj musejí zadat, aby výpočet proběhl rychle a správně.

EED 2.0 obsahuje velké množství databází: [20]

- různé průměry vrtů
- různé materiály kolektorů, jejich různé systémy

- průměrné teploty při povrchu terénu různých lokalit v Evropě
- tepelné vodivosti různých typů hornin
- tepelné vodivosti různých výplní vrtů
- 308 různých uspořádání vrtů
- nemrznoucí směs v kolektorech a jejich fyzikální vlastnosti
- zemský tepelný tok pro různé lokality v Evropě
- 2 465 g-funkcí v závislosti na vzdálenostech mezi vrty a jejich hloubkami

Do programu je nutné zadat tyto vstupní parametry:[20]

- tepelné vodivosti hornin λ vrtem zastižených
- zemský tepelný tok pro danou lokalitu
- průměrná roční teplota na povrchu terénu
- typ injektáží směsi ve vrtu
- typ nemrznoucí směsi v kolektorech TČ
- topný výkon TČ
- celkový tepelný odpor vrtu R_b mezi stěnou vrtu a nemrznoucí směsí v kolektoru
- odhad doby chodu TČ s maximálním topným výkonem pro každý měsíc
- průtok oběhových čerpadel primárního okruhu TČ vztaženou na jeden vrt

Používání tohoto programu jistě není bezchybné a z velké míry záleží na zkušenostech jednotlivých projektantů. Jedním z problémů je, že program nedokáže počítat s přítoky podzemní vody do vrtu. Výpočet hloubky vrtu je pouze pro suché teplo z hornin. Podzemní voda se z hlediska jejího potenciálu stává zdrojem velmi nestálým. Málokdy se dá před realizací vrtu určit, v jakých hloubkách se podzemní voda nachází. A pokud se nachází, tak nejsme schopni určit její množství, tedy dobu po jakou ji budeme moci využívat. [12]

Z technického hlediska je řada parametrů majících vliv na dimenzování hloubky vrtů. Výhodou těchto parametrů je jejich snadná určitelnost a ovlivnitelnost: [20]

- **injektážní směs** – má vliv na celkový tepelný odpor vrtu, který by měl dosahovat co nejnižších hodnot. Při použití kvalitní směsi se odpor snižuje a z toho důvodu se může navrhnout i menší hloubka vrtu
- **režim toku nemrznoucí směsi v kolektorech** – turbulentní režim toku může zkrátit vrt až o 21% u 2-trubkového kolektoru
- **vzdálenost mezi vrty** – narůstá na významu při instalaci více vrtů v jedné oblasti. Jednotlivé vrty se mohou vzájemně tepelně ovlivňovat a je tedy nutné umísťovat je s dostatečnou roztečí.
- **vyšší minimální teplota nemrznoucí směsi v kolektoru** – chceme-li zpomalit vymrzání vrtu a využijeme-li k tomu vyšší minimální teplotu nemrznoucí směsi, musíme počítat s tím, že se nám značně prohloubí vrt.

3. Cíl práce

Pro účely této práce si stanovuji tyto dílčí cíle:

- Stanovení útlumové hloubky pro danou lokalitu
- Popis tepelných toků v jednotlivých hlubinných vrtech
- Porovnání VT1, VT2 a referenčního vrtu z hlediska dobíjení zemského masivu od 20. 1. 2012 do 29. 2. 2012
- Stanovení rozdílu teplot mezi vrtem VT3 a vrtem VT9
- Stanovení chladicího výkonu tepelného čerpadla IVT GREENLINE HT PLUS E17 v průběhu měřeného období

V souladu se zadáním práce nebylo možné stanovit hodnotu topného výkonu, protože tepelná čerpadla nebyla na kondenzátoru osazena teplotními čidly a data o příkonu tepelných čerpadel nebyla k dispozici. Z tohoto důvodu nebylo možné vypočítat topný faktor, který je na těchto veličinách závislý.

4. Metody získání výsledků pro vyhodnocení

4.1. Teoretický rozbor vztahů potřebných pro dimenzování hlubinných vrtů

Teplu v horninách nejsvrchnější části zemské kůry je akumulováno pomocí vnitřních a vnějších zdrojů. Když budeme postupovat od shora dolů, zaměříme se nejdříve na sluneční paprsky dopadající na povrch Země. Sluneční paprsky jsou typickým představitelem zdroje vnějšího, které mají vliv na teplotu v půdě. Tento vliv se dá podle Kutílka přiblížit útlumovou hloubkou L . Útlumová hloubka je závislá na vlastnostech půdy a na periodě kolísání teploty. Útlumová hloubka má za úkol upřesnit v jaké hloubce pod zemským povrchem již nedochází k teplotnímu ovlivnění hornin z vnějších zdrojů.

$$L = \left(\frac{2a}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

kde: a – teplotní vodivost [m²/s]

ω – úhlová frekvence [1/s]

Hodnota úhlové frekvence ω je rovna $2\pi/\tau$. Podle Kutílka je hodnota pro denní $\omega = 2\pi/86\,400 = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

V hloubce $z = L$ je amplituda teploty půdy 0,37 amplitudy povrchu a v hloubce $z = 3L$ se amplituda snižuje zhruba na 0,05 amplitudy povrchu [2].

V rovnici 4.1 se za součinitel teplotní vodivosti a dosadí:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4.2)$$

λ – součinitel tepelné vodivosti [W/m.K]

ρ – hustota zeminy [kg/m³]

c – měrná tepelná kapacita zeminy [J/kg.K]

Součinitel teplotní vodivosti nám říká, jak rychle dochází k vyrovnání teploty v horninovém prostředí.

Důležitou veličinou v geotermální energii je zemský tepelný tok φ . Je to množství tepla, které projde povrchem za jednotku času. Výsledkem zemského tepelného toku je tepelný zisk nebo tepelná ztráta a vypočte se podle vztahu 4.3. Průměrná hodnota φ podle číni $60 \pm 10 \text{ mW/m}^2$. [21]

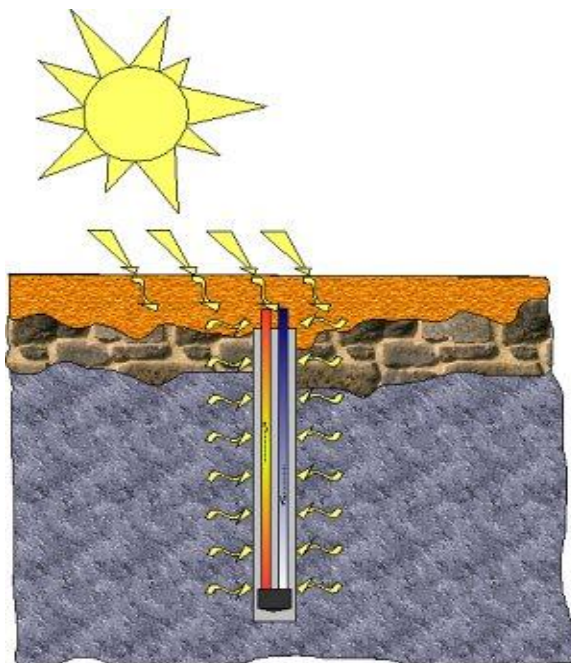
$$\varphi = \lambda \cdot \Delta T \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.3)$$

λ – součinitel tepelné vodivosti $[\text{W/m.K}]$

ΔT – přírůstek teploty s hloubkou $[\text{K/m}]$

Spuštěním tepelného čerpadla dochází ve vrtu k teplotní nerovnováze a dochází k neustálému přenosu tepla v horninách směrem k vrtu.

Obr. 9 Schéma sdílení tepla z hornin do vrtu [21]



Hlavním druhem sdílení tepla v horninách je vedení nebo-li konduktce. Teplo sdílené vedením se přenáší vlněním krystalické

mřížky minerálů tvořících horninu. Druhým nejběžnějším sdílením tepla je konvekce. V takovém to případě je teplo přenášeno pomocí proudění podzemních vod. [21]

Přenos tepla v nejsvrchnější části zemské kůry je prováděn:

- Vedením (kondukce)
- Prouděním (konvekce)
- Odpařováním a kondenzací
- Zářením
- Iontovými výměnami
- Zmrazovacími, rozmrazovacími procesy

K přenosu tepla v nezamrzlé půdě dochází především vedením a dále prouděním. Proudění tepla je také možné při změně skupenství vody (latentní teplo při odpařování a kondenzaci). Sálání obvykle přispívá k přenosu tepla v půdě jen nepatrně. Její vliv v písku je méně než 1% celkového přenosu tepla. K významnému přenosu tepla může docházet také při zmrazování a tání, ale v souvislosti s termodynamickými podzemními stavbami, jako jsou vrty, je dobré se takovým procesům vyvarovat[10].

Kondukce tepla je proces, při kterém je energie převáděna z jedné části tělesa do jiné molekulárním přenosem. Podle Fourierova zákona může být vedení tepla popsáno takto[10]:

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

λ – součinitel tepelné vodivosti [W/m.K]

$\frac{\partial T}{\partial n}$ – teplotní gradient ve směru proudění n [K/m]

A – plocha [m²]

t – čas [s]

Teplotní gradient skutečného směru proudění je rozepsán následovně [10]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z = \text{grad}T \quad (4.5)$$

Rovnice (4.4) může být zapsána pomocí pravoúhlých souřadnic:

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

Jestliže je tepelná vodivost a teplotní gradient konstantní v celé oblasti a v normálním směru, můžeme rovnici (4.4) upravit pro vrt s poloměrem R a délkou l následovně [10]:

$$\dot{Q} = 2R\lambda \frac{dT}{dR} \quad [\text{W}] \quad (4.7)$$

K přenosu tepla prouděním dochází mezi termo-dynamickými systémy, které se vůči sobě pohybují (tzn. pomocí cirkulačních toků). V zemi je pevné skupenství statické, tudíž významné je pouze proudění vody a plynu. Přenos tepla, ke kterému dochází při proudění kapaliny, může být popsán následovně [10]:

$$\dot{q}_{l,conv} = c_w \cdot \rho_w \cdot \bar{v}_w (T - T') \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.8)$$

\bar{v}_w - rychlostní vektor proudící vody	[m/s]
c_w - měrná tepelná kapacita půdní vody	[J/kg.K]
ρ_w - hustota půdní vody	[kg/m ³]
T' - referenční teplota	[K]

Podobná rovnice jako pro proudění kapaliny existuje také pro proudění plynu (páry):

$$\dot{q}_{v,conv} = c_v \cdot \rho_v \cdot \bar{v}_v (T - T') \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.9)$$

\bar{v}_v - rychlostní vektor proudícího plynu	[m/s]
c_v - měrná tepelná kapacita půdního plynu	[J/kg.K]

ρ_v – hustota pŕdní plynu [kg/m³]

T' - referenční teplota [K]

Latentní pŕenos tepla, který vzniká jako dŕsledek změny skupenství vody (odpařování), závisí pŕedevším na množství par vyskytujících se v pŕdních pórech. Jejich objem se zvětšuje s klesajícím objemem vody a může být vyjádřen následovně[10]:

$$\dot{q}_{lat} = L_0 \cdot \rho_w \cdot \bar{U}_v \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.10)$$

L_0 - latentní teplo vypařované při teplotě T' [J/kg]

Rovnice pro celkový pŕenos tepla v pŕdě může být definován takto[10]:

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{l,conv} + \dot{q}_{v,conv} + \dot{q}_{lat} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.11)$$

\dot{q}_{cond} – konduktivní tepelný tok [W/m²]

$\dot{q}_{l,conv}$ – konvekční tepelný tok (proudění kapaliny)[W/m²]

$\dot{q}_{v,conv}$ – konvekční tepelný tok (proudění plynu) [W/m²]

\dot{q}_{lat} – latentní tepelný výkon (změna skupenství vody)
[W/m²]

Jestliže v daném objemu pŕdy existuje vnitřní tepelný zdroj, pak základní rovnice kondukce vypadá takto[10]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T + \frac{\dot{Q}_i}{\rho c} \quad (4.12)$$

a – teplotní vodivost [m²/s]

t – čas [s]

Simulacemi se prokázalo, že lze horninový masiv, pro účely výpočtu hloubky vrtu, považovat za homogenní z hlediska tepelné vodivosti hornin. Zjednodušení, které se týče volby pouze jedné průměrné hodnoty tepelné vodivosti, se na praktické přesnosti výpočtu tepelné vodivosti nijak neprojeví. Z hlediska teplotních změn je důležitá průměrná roční teplota pro danou lokalitu. Změny v podobě mrazu, sněhové pokrývky či střídání ročních období mají na funkci vrtu zanedbatelný vliv. [22]

Zjednodušená počáteční podmínka pro teplotu hornin: [22]

$$T(r, z, 0) = T_g \quad (4.13)$$

T – teplota hornin [K]

T_g – průměrná teplota hornin v okolí vrtu neovlivněná odběrem tepla [K]

Experimenty dokazují, že teplotu T_g lze vztáhnout k teplotě v polovině hloubky vrtu, aniž by se to projevilo na výsledku.

Zjednodušená hraniční podmínka pro povrch terénu:

$$T(r, 0, t) = T_g \quad (4.14)$$

Základní hraniční podmínky ve vrtu:

$$T(r_b, z, t) = T_B(t) \quad (4.15)$$

r_b – poloměr vrtu [m]

$T_B(t)$ – teplota podél stěny vrtu v závislosti na čase [K]

Při znalosti základních podmínek můžeme napsat, že pro průměrný odběr tepla z 1m vrtu platí:

$$q(t) = \frac{1}{H} \int_0^H 2\pi r_b \cdot \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_b} dz \quad (4.16)$$

$q(t)$ – průměrný odběr tepla z 1m vrtu [W/m]

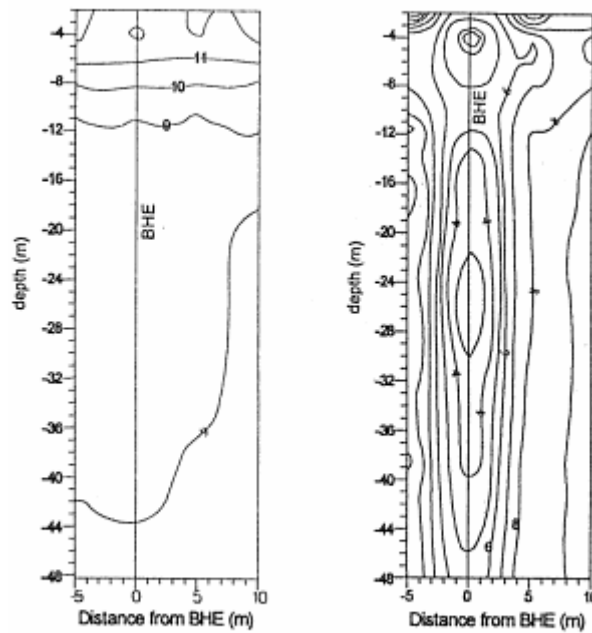
λ – tepelná vodivost [W/m.K]

H – hloubka vrtu

[m]

Když jsou splněny předešlé podmínky, mají izotermy v okolí vrtu při odběru tepla tvar rotačních elipsoidů, které jsou vidět na obr.10.

Obr. 10 Izolinie teploty ve vrtu naměřené během provozu tepelného čerpadla [24]



$$T_b = T_g + \sum_{i=1}^n \frac{q_i - q_{i-1}}{2\pi\lambda} g\left(\frac{t_n - t_{i-1}}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) \quad (4.17)$$

t_s – stacionární čas odběru tepla z vrtu [s]

$$t_s = \frac{H^2}{9a}$$

$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right)$ g-funkce popisující teplotní odezvu v horninách

způsobenou odběrem tepla z vrtu v určitém časovém intervalu

q_i – odběr tepla z vrtu po dobu i-tého teplotního pulsu

t_i – časový konec i-tého časového pulsu

Pro dimenzování vrtu je nezbytné znát celkový tepelný odpor vrtu R_b mezi stěnou vrtu a nemrznoucí směsí v kolektoru. Potřebujeme zajistit, aby tepelný odpor byl co nejmenší. To je závislé na několika podmínkách. Položení trubek ve vrtu by mělo být co nejbližší ke stěně vrtu. Další podmínkou je, aby použité injektážní směsi měly co nejvyšší tepelnou vodivost a režim proudění nemrznoucí směsi byl turbulentní. Je samozřejmostí, že trubky musejí být z kvalitního materiálu se stejnou roztečí po celé délce vrtu. R_b získáme například při zhotovení TRT testu. Výpočet vychází z přibližného vztahu:[22]

$$R_b = \frac{T_b(t) - T_f(t)}{q(t)} \quad [\text{K.m/W}] \quad (4.18)$$

Tf získáme z následujícího vztahu:

$$T_f(t) = \frac{T_{in} - T_{out}}{2} \quad [\text{K}] \quad (4.19)$$

Vztahy pro T_{in} a T_{out} :

$$T_{in} = T_f - \frac{qH}{2c_f\rho_fV_f} \quad [\text{K}] \quad (4.20)$$

$$T_{out} = T_f + \frac{qH}{2c_f\rho_fV_f} \quad [\text{K}] \quad (4.21)$$

$T_f(t)$ – průměrná hodnota teploty nemrznoucí směsi na vstupu, resp. výstupu z vrtu [K]

T_f – teplota nemrznoucí směsi v kolektoru [K]

T_{in} – teplota nemrznoucí směsi na vstupu do vrtu [K]

T_{out} - teplota nemrznoucí směsi na výstupu z vrtu [K]

c_f – měrná tepelná kapacita nemrznoucí směsi v kolektoru [J/kgK]

V_f – průtočné množství nemrznoucí směsi v kolektoru [m³/s]

ρ_f – měrná hmotnost nemrznoucí směsi [kg/m³]

Důležitou roli, z hlediska energetického a ekonomického, hrají při dimenzování tepelného čerpadla dvě veličiny, topný a chladicí výkon. Obě veličiny jsou spolu úzce spjaty podle následujícího vzorce:

$$P_{top} = P_{chlad} + P_{el} \quad (4.22)$$

P_{top} – topný výkon tepelného čerpadla [W]

P_{chlad} – chladicí výkon kompresoru (na výparníku)
[W]

P_{el} – el. příkon kompresoru [W]

Chladicí výkon, v některých publikacích uváděný jako energie prostředí, se vypočítá následovně:

$$P_{chlad} = V \cdot c \cdot \rho \cdot dT \quad (4.23)$$

V – průtok oběhového čerpadla primárního okruhu

c – měrná tepelná kapacita nemrznoucí směsi v kolektoru

ρ – hustota nemrznoucí směsi [kg/m³]

dT – rozdíl teplot na vstupu a výstupu z výparníku

Tepelné čerpadlo s vyšším topným faktorem má při stejném topném výkonu, nižší elektrický příkon, což znamená vyšší výkon chladicí.

$$P_{top} = Q_m \cdot c_p \cdot dT \quad (4.24)$$

Q_m – hmotnostní průtok média [kg/s]

dT – rozdíl teplot na vstupu a výstupu z kondenzátoru
[K]

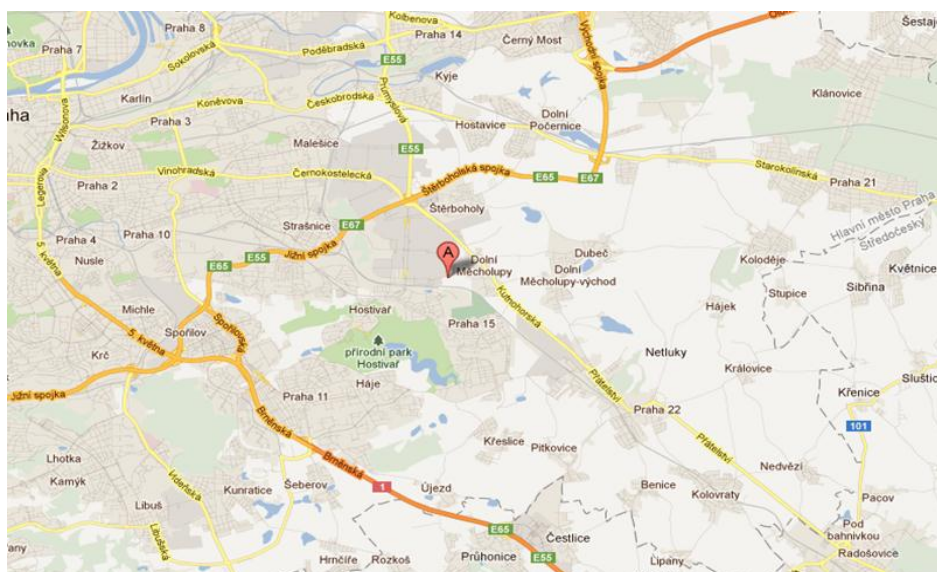
c_p – měrná tepelná kapacita média [J/kg.K]

5. Vlastní měření a vyhodnocení

5.1. Popis lokality

Měření proběhlo na pozemku školícího centra společnosti VESKOM s.r.o. Tato společnost se nachází na Praze 10 v ulici Dolnoměcholupská 522/12a (GPS: 50°3'24,084"N, 14°32'51,468"E).

Obr. 11 Situační plánek místa měření[23]



Nové sídlo společnost vystavěla v roce 2008 a při této příležitosti na svém pozemku vybuodovala experimentální pracoviště pro získávání informací o zdrojích tepla z horninového a zemního masivu pro potřeby tepelných čerpadel. Na experimentálním pracovišti byly realizovány horizontální zemní výměníky, zemní výměníky typu SLINK a vertikální hlubinné vrty. Na experimentálním pracovišti je vybudováno 9 vrtů (VT1-VT9) o hloubce 113m. Měření proběhlo na hlubinných vrtech s označením VT1, VT2, VT3, VT4 a na referenčním vrtu VT9, který nebyl vystrojen a slouží k porovnávání naměřených výsledků.

Pro zjištění složení hornin pod zemským povrchem byla vybrána firma GESTEC s.r.o., která provedla na pozemku geologický průzkum. Vrtné práce byly realizovány firmou STAVEBNÍ GEOLOGIE - Geosan s.r.o. V tabulce č. 2 jsou přehledně znázorněny všechny vrty, jejich účel, vstrojení a jednotlivé geologické vrstvy, které vyplynuly z geologického průzkumu.

Tab. 2 Popis jednotlivých vrtů včetně geolog. průzkumu

Označení vrtu	Účel vrtu	Vystrojení	Geologický průzkum
VT1	experimentální vrt	potrubí PE 100RC, 2x40x3,7mm, 4 teplotní čidla Pt 1000A	0-4m-navážka, hlinito-písčité štěrky
			4-7m-navážka, písčito-jílovitá hlína, bez štěrkové příměsi
			7-13m-břidlice jílovitá, navětralá
			13-113m-břidlice jílovitá zdravá, mezi 30-60m časté přítoky do vrtu
VT2	experimentální vrt	potrubí PE 100RC, 4x32x2,9mm, 4 teplotní čidla Pt 1000A	0-1m-navážka, hlinito-písčité štěrky
			1-2m-navážka, písčito-jílovitá hlína
			2-4,5m-navážka, písčito-jílovitý štěrky
			4,5-7,5m - navážka, jílovitá hlína se štěrkovou příměsí
			7,5-9,5m - navážka, písčité jíly s drobnými úlomky křemene
			9,5-10,5m - droba zvětralá
			10,5-13m - břidlice jílovitá zvětralá
VT3	experimentální vrt	potrubí PE 100RC, 2x40x3,7mm, 4 teplotní čidla Pt 1000A	0-4m - navážka, hlína s velkým podílem písku a štěrku
			4-5,5m - navážka, písčité hlína
			5,5-8,5m - navážka, jílovitá-písčité hlína s úlomky hornin
			8,5-13m - břidlice jílovitá mírně zvětralá
			13-113m - břidlice jílovitá zdravá
VT4	experimentální vrt	potrubí PE 100RC, 4x32x2,9mm, 4 teplotní čidla Pt 1000A	0-4m - navážka, hlína se štěrky
			4-5,5m - navážka, písčité hlína
			5,5-10m - navážka, jílovito-písčité štěrky
			10-14m - břidlice jílovitá zvětralá
			14-113m - břidlice jílovitá zdravá
VT9	referenční vrt	bez vystrojení, 4 teplotní čidla Pt 1000A	0-3,5m - navážka, hrubozrný štěrky, kamenná drť, úlomky cihel
			3,5-7m - navážka, písčité štěrky s úlomky cihel
			7-15m - břidlice jílovitá zvětralá
			15-113m - břidlice jílovitá zdravá
VT5-8	geotermální vrty, vytápění budovy	PE 100RC, 4x32x2,9mm	geologický průzkum není znám
HV1	hydrogeologický vrt, zásobování budovy užitkovou vodou	PE zárubnice 125mm s obsypem kačírky	

Firma GESTEC s.r.o. provedla na vrtu VT1 zkoušku teplotní odezvy horninového prostředí (TRT test), jehož cílem bylo zjistit teplotní parametry horninového prostředí, které budou dále využity při modelování teplotního ovlivnění okolí vrtů pro tepelná čerpadla. Vrt VT1 byl vystrojen pro napojení na tepelné čerpadlo vertikální HDPE sondou GEROtherm 2x40mm. Cílem zkoušky bylo zjistit neovlivněnou teplotu horninového masivu T_{ug} , tepelnou vodivost hornin λ a tepelný odpor vrtu R_b . Výsledky TRT testu jsou znázorněny v tabulce 3.

Tab. 3 Výsledky testu TRT provedeného na vrtu VT1

Parametr	Hodnota
zemský tepelný gradient	1,5 K/100m
neovlivněná teplota horninového masivu T_{ug}	12,3°C
tepelná vodivost hornin λ	2,9W/mK
tepelný odpor vrtu R_b	0,137K(W/m) ⁻¹

Každý z vrtů je vystrojen potrubím PE 100RC s vratným U kolenem, které jakož to nejdůležitější část vystrojení, musí být chráněno pouzdem, které je zajištěno šrouby. Pro lepší a snadnější instalaci je sonda na svém konci opatřena závažím.

Obr. 12 Potrubí PE 100RC s vratným U kolenem a pouzdrem [24]



5.2. Umístění teplotních čidel

Do každého z vrtů VT1, VT2, VT3, VT4, VT9 byla pro potřeby měření nainstalována 4-vodičová teplotní čidla s označením Pt 1000A. Každé čidlo má samostatný elektrický vodič, který přenáší data na povrch. Tím se zamezí, v případě poruchy, ztráty dat z ostatních čidel. Čidla jsou umístěna v hloubkách tak, aby co nejlépe pokrývala geologický profil a jeho vertikální změny. To znamená, že jsou umístěna v místech, kde je předpoklad podzemní vody či různé stupně zvětrání. Teplotní čidla jsou umístěna vždy mezi vzestupnou a sestupnou větev potrubí. Výjimku tvoří vrt VT9, který nebyl vystrojen, a tak jsou čidla instalována přímo na injektážní potrubí bez geotermální sondy.

Tab. 4 Umístění teplotních čidel ve vrtech

Číslo čidla	Umístění pod terénem	Složení hornin v místě čidla
1.	8-9m	nezvodnělý kvartérní pokryv
2.	20m	zvodnělé jílovité břidlice
3.	50m	rozpukaný masiv, polovina vrtu
4.	100m	rozpukaný masiv, blízko dna vrtu

Teplotní čidla jsou také umístěna na výparníku tepelných čerpadel, kde je ještě na zpáteční větvi průtokoměr umožňující měření průtoku teplotnosného média. Pomocí těchto čidel a směsi kolující v primárním okruhu, je možné vypočítat chladicí výkon jednotlivých tepelných čerpadel.

Pro účely vytápění a ohřevu teplé vody byly v objektu nainstalována tři tepelná čerpadla. Je důležité zmínit, že tepelná čerpadla nebyla využívána v letních měsících pro chlazení budovy, čili nedochází k dobíjení vrtu. Pro odběr tepla z vrtů byla použita 2 čerpadla typu IVT GREENLINE HT PLUS E17 o topném výkonu 16.2kW stanoveném při teplotách 0/35 °C a 1x IVT PREMIUMLINE X15 o topném výkonu 11.7kW. V primárním okruhu tepelného čerpadla je pro odběr nízkopotencionální energie z vrtu použito teplotnosné médium složené ze 70% z H₂O a 30% C₂H₆O₂ (ethylenglykol).

Pro přehlednost a znalost venkovní teploty v jednotlivých fázích měření bylo na východní stranu fasády objektu, do výše 2m, namontováno teplotní čidlo typu ATF 2 KTY 81.210.

5.3. Způsob měření

Měření probíhalo v období od 1. 3. 2011 do 29. 2. 2012. V této době byl sběr dat plně automatizován. Měřená data se odečítala a ukládala po 15 minutách. Což zaručuje vysokou přesnost měření. K přehledné vizualizaci čidel s naměřenými daty slouží software KOBRA, pomocí kterého je také možné nastavovat celý energetický systém budovy.

V měřeném období bylo pro potřeby vyhodnocení odečteno z každého čidla kolem 35 000 dat. Pro přehlednost bylo zprůměrováno 6 hodnot kolem 15. hodiny každého dne. Venkovní teplota byla odečítána také v 15. hodin. A s těmito daty se následně pracovalo.

5.4. Naměřené výsledky a jejich vyhodnocení

Tabulka 5 přehledně ukazuje naměřené průměrné hodnoty a minima, maxima v jednotlivých vrtech. Tabulka říká, že teplotní rozdíly ve vrtech VT1-VT4 jsou minimální a mohou být způsobeny různým stupněm zvětrání hornin a výskytem podzemní vody. Detailně bude rozebrán rozdíl teplot VT3 a VT9 v grafu 6.

Tab. 5 Přehled teplot v jednotlivých vrtech

		Hloubka				
		0,2m	9m	20m	50m	100m
VT1	Průměrná teplota [°C]	9,797	9,309	9,331	Chyba čidla	9,633
	Nejvyšší teplota [°C]	19,041	13,682	13,486	Chyba čidla	13,444
	Nejnižší teplota [°C]	-0,052	4,602	5,052	Chyba čidla	5,136
VT2	Průměrná teplota [°C]	10,373	8,874	8,859	9,078	9,168
	Nejvyšší teplota [°C]	21,632	13,514	13,427	12,962	13,028
	Nejnižší teplota [°C]	-1,716	4,295	4,469	5,326	4,707
VT3	Průměrná teplota [°C]	10,316	8,881	8,980	8,907	9,293
	Nejvyšší teplota [°C]	21,177	13,324	13,586	13,208	13,504
	Nejnižší teplota [°C]	-1,435	4,525	4,598	4,697	4,966
VT4	Průměrná teplota [°C]	10,569	9,352	9,081	9,030	9,353
	Nejvyšší teplota [°C]	19,516	14,174	13,749	13,499	13,384
	Nejnižší teplota [°C]	1,116	4,758	4,522	4,679	4,988
VT9	Průměrná teplota [°C]	Chyba čidla	10,889	10,156	10,226	10,924
	Nejvyšší teplota [°C]	Chyba čidla	11,525	10,527	10,467	11,364
	Nejnižší teplota [°C]	Chyba čidla	10,133	9,869	9,982	10,511

5.4.1. Teploty zemského masivu

Měřené období od 1. 3. 2011 do 29. 2. 2012 by se dalo rozdělit do tří fází.

První fáze je od začátku měření, přibližně do 20 týdne roku 2011. Kdy probíhala otopná sezóna, ale v závěru první topné sezóny venkovní teploty již s určitými skoky stoupaly. To mělo za následek stoupání teplot ve vrtech z důsledku menší potřeby tepla pro administrativní budovu. Docházelo tedy k pozvolnému dobíjení vrtu. Nejmenší teplota ve vrtech v tomto období dosáhla $6,5^{\circ}\text{C}$ v hloubce 9m a nejvyšší na konci otopného období a to $9,5^{\circ}\text{C}$. Zatímco na začátku topného období byla teplota 7°C .

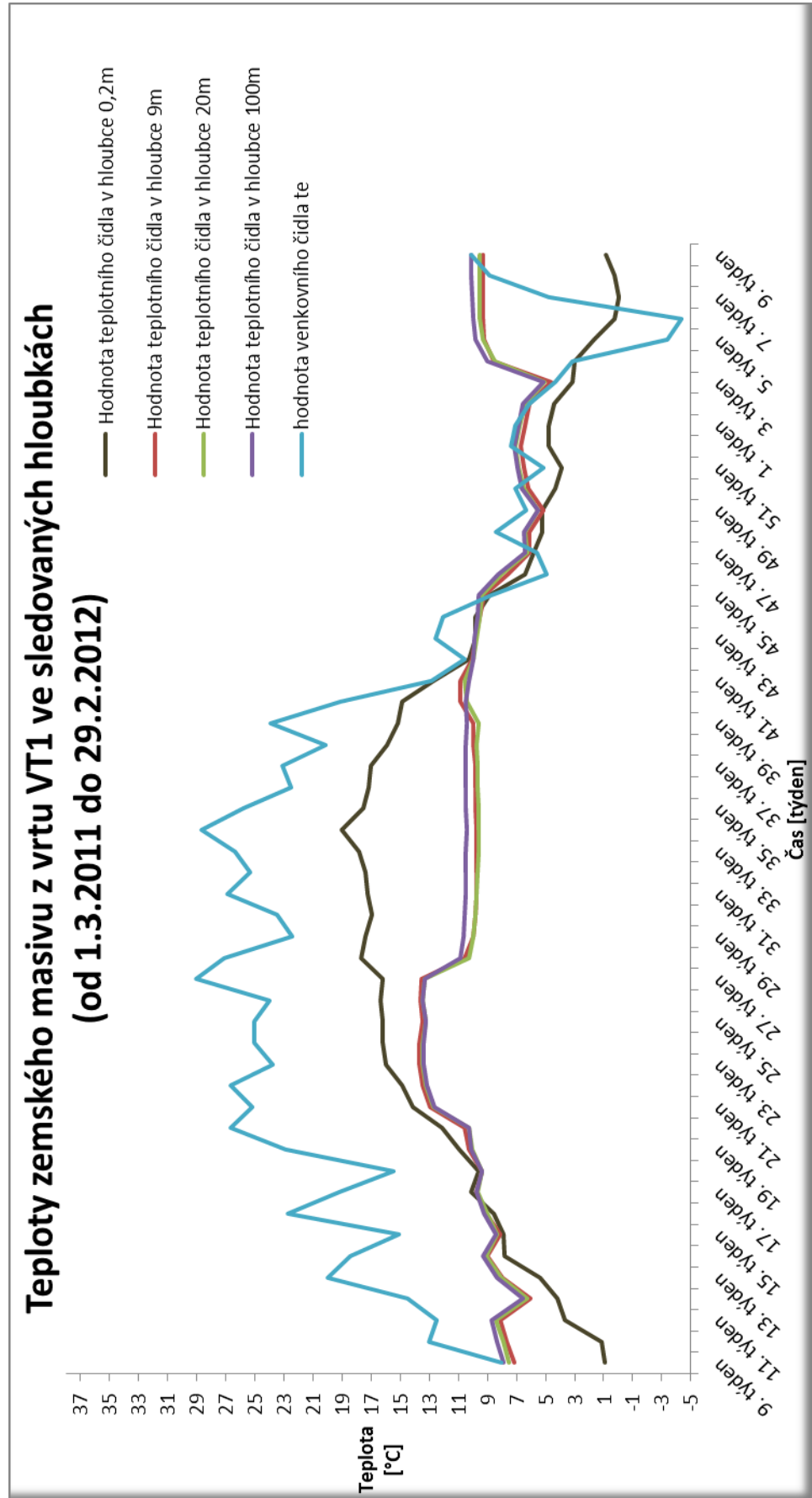
Druhou fází je letní období, které probíhalo mezi 20. až 40. týdnem roku 2011. Z toho důvodu, že měřené vrty neslouží v letních měsících ke chlazení budovy, by se měla křivka teplot teoreticky pozvolna ustalovat až na teplotu přibližně konstantní a o něco menší než je teplota ve vrtu referenčním. Tato situace nastane, ale až od 19. června 2011. Kdy se teploty ustálí a mají konstantní podobu mezi teplotami $9,9^{\circ}\text{C}$ až $10,5^{\circ}\text{C}$, což odpovídá vrtu referenčnímu ($10,3^{\circ}\text{C}$ – $10,9^{\circ}\text{C}$). Rozdíl teplot ve VT1-VT4 a vrtem referenčním se pohybuje kolem 0,4K. Tento rozdíl je způsoben pozvolným vybíjením vrtu v závislosti na době využívání a množství odebraného tepla tepelným čerpadlem.

Zvláštní situace však nastala ve dnech od 16. května do 19. července. Kdy teploty během týdne strmě narostly z 10°C až na $13,5^{\circ}\text{C}$. Poté si teploty udržovaly přibližné konstantní hodnoty, a jak je vidět na grafech 1-4, během 27. týdne znovu náhle klesají na teplotu $10,5^{\circ}\text{C}$. V této situaci, jak ji popisuje graf, muselo dojít k reverzibilnímu chodu tepelného čerpadla. K tomu dochází při otočení pracovního směru kompresoru nebo expanzního ventilu. Tím se otočí směr proudění chladiva a tepla. Teplo z místností, odebrané kondenzátorem, muselo býti v daném období pomocí vrtů vypouštěno do zemského masivu. Tím se horniny ohřály a teploty vzrostli až na 14°C .

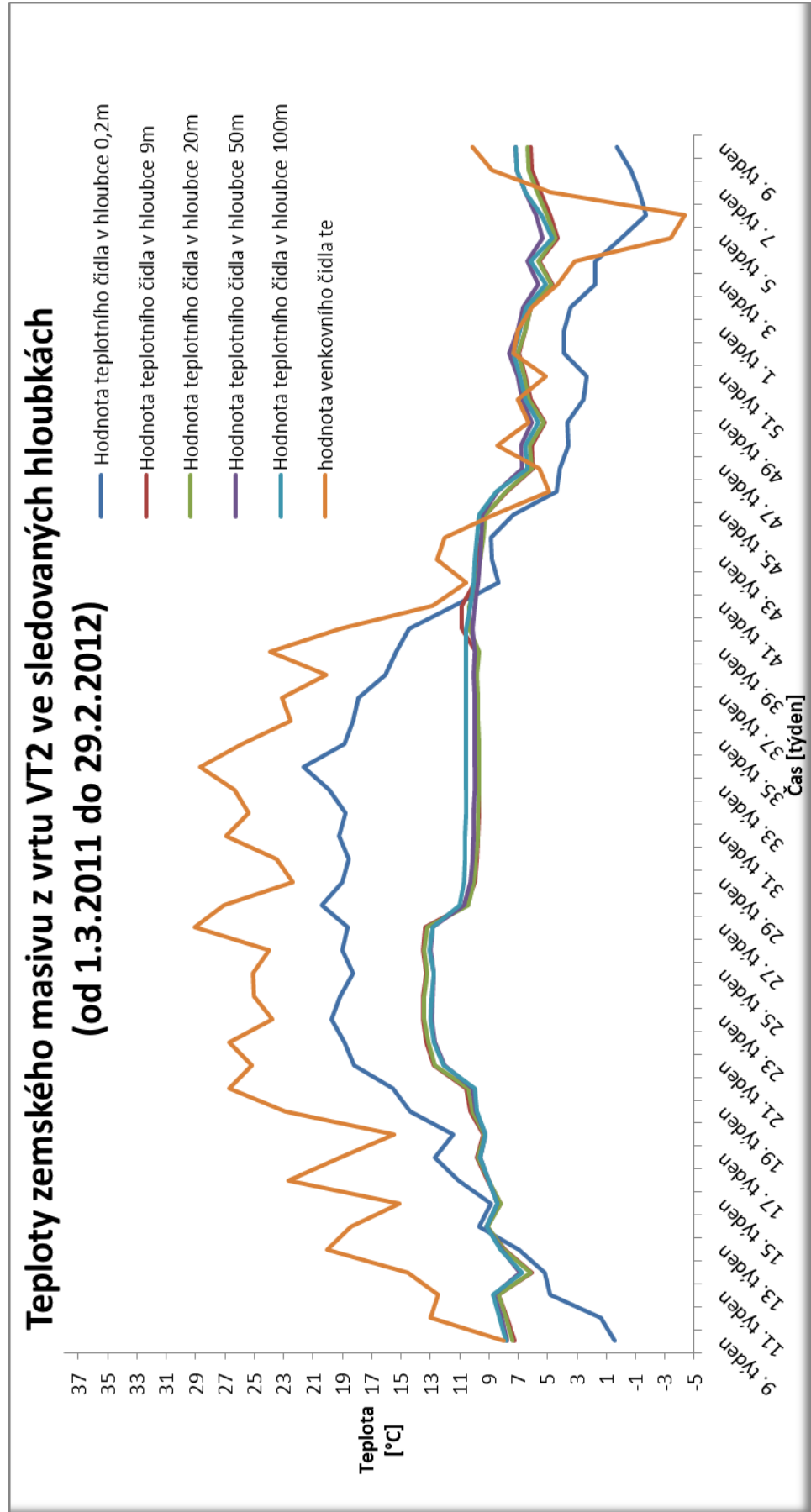
Poslední fáze měřeného období probíhala od 41. týdne roku 2011 do konce měření. Teploty ve vrtech v tomto období jsou znovu velmi podobné. Mají klesající tendenci v závislosti na klesající venkovní teplotě a potřebě většího odběru tepla z vrtů. Výjimku tvoří vrt VT1, který byl 20. 1. 2012 vypnut a dochází k jeho dobíjení. Podrobněji bude proces dobíjení VT1 popsán v kapitole 5.4.2.

Na grafu 5. je znázorněn vrt referenční VT9, který není zatěžován odběrem tepla, a jeho hodnoty jsou konstantní ve všech hloubkách. Samozřejmě toto tvrzení neplatí pro čidlo v hloubce 0,2m. Toto čidlo hlásilo ve 23. týdně chybu, ale dokážeme odhadnout průběh těchto teplot pro hloubku 0,2m, která je závislá na venkovním klimatu a její teplotní křivka by teoreticky kopírovala křivku venkovní teploty t_e . Teploty v jednotlivých hloubkách dosahují těchto průměrných hodnot: 9m – 10,9°C, 20m – 10,1°C, 50m - 10,2°C, 100m – 10,9°C. Teploty v jednotlivých hloubkách by měly mírně stoupat. Tato podmínka je téměř splněna. Výjimku tvoří čidlo v hloubce 9m, kde předpokládáme výskyt podzemní vody. Teploty se pohybují mezi 10-11°C, což koresponduje s autorem Brandlem (kapitola 2.1.3.), který uvádí, že teploty na Evropském území v těchto hloubkách, by se měly pohybovat mezi 10-15°C.

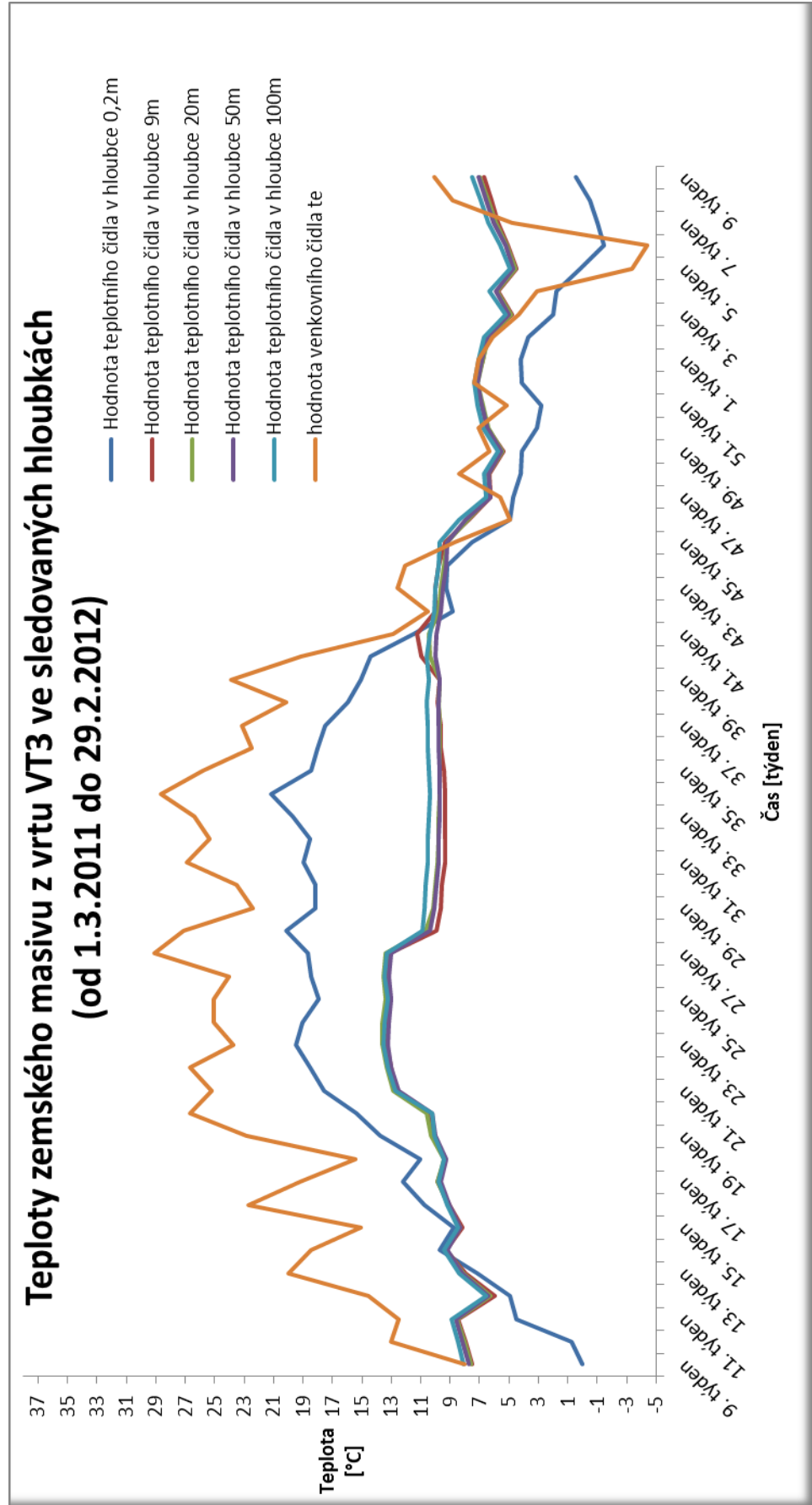
Graf 1. Teploty zemského masivu z vrty VT1



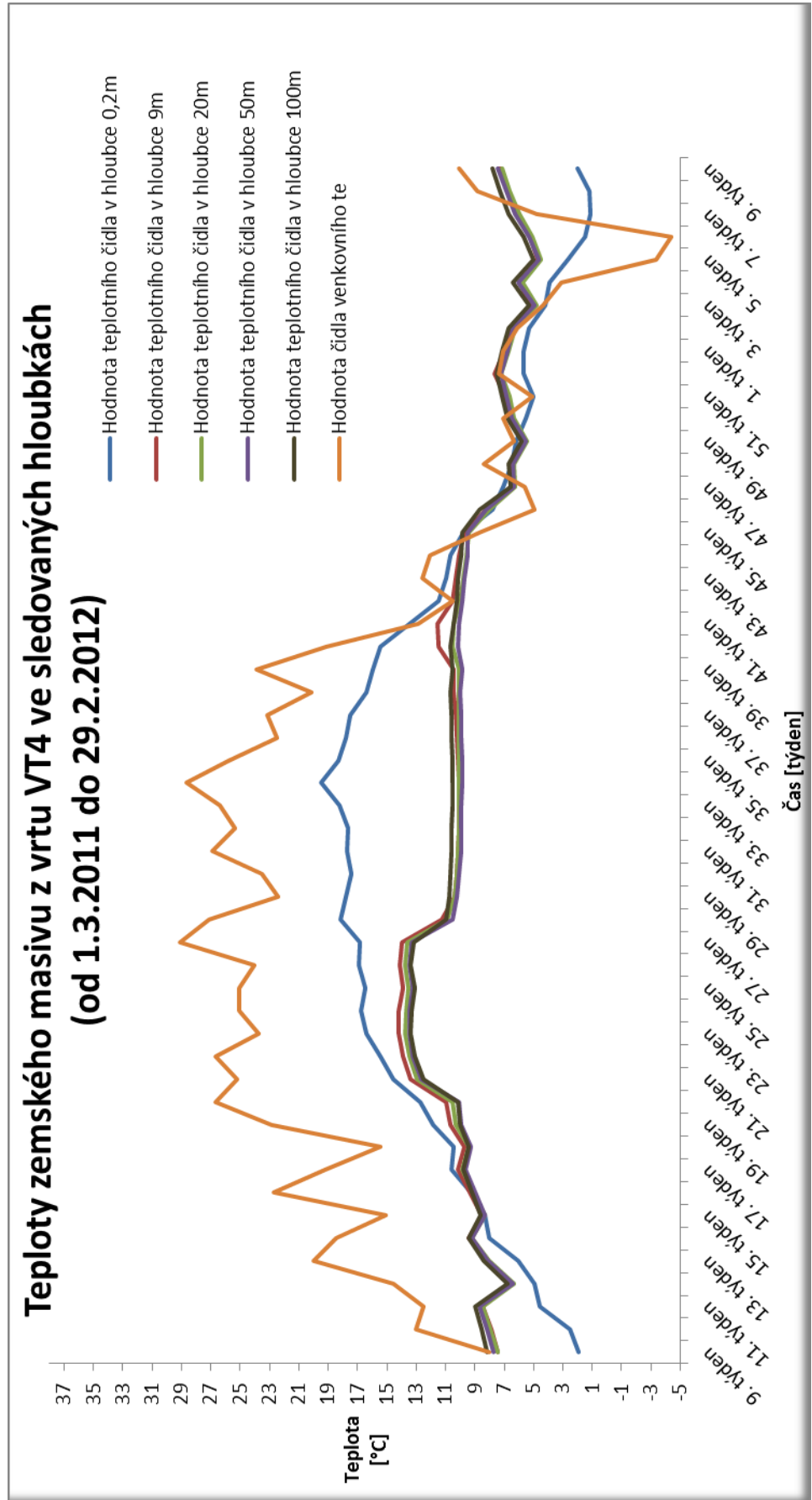
Graf 2. Teploty zemského masivu z vrtu VT2



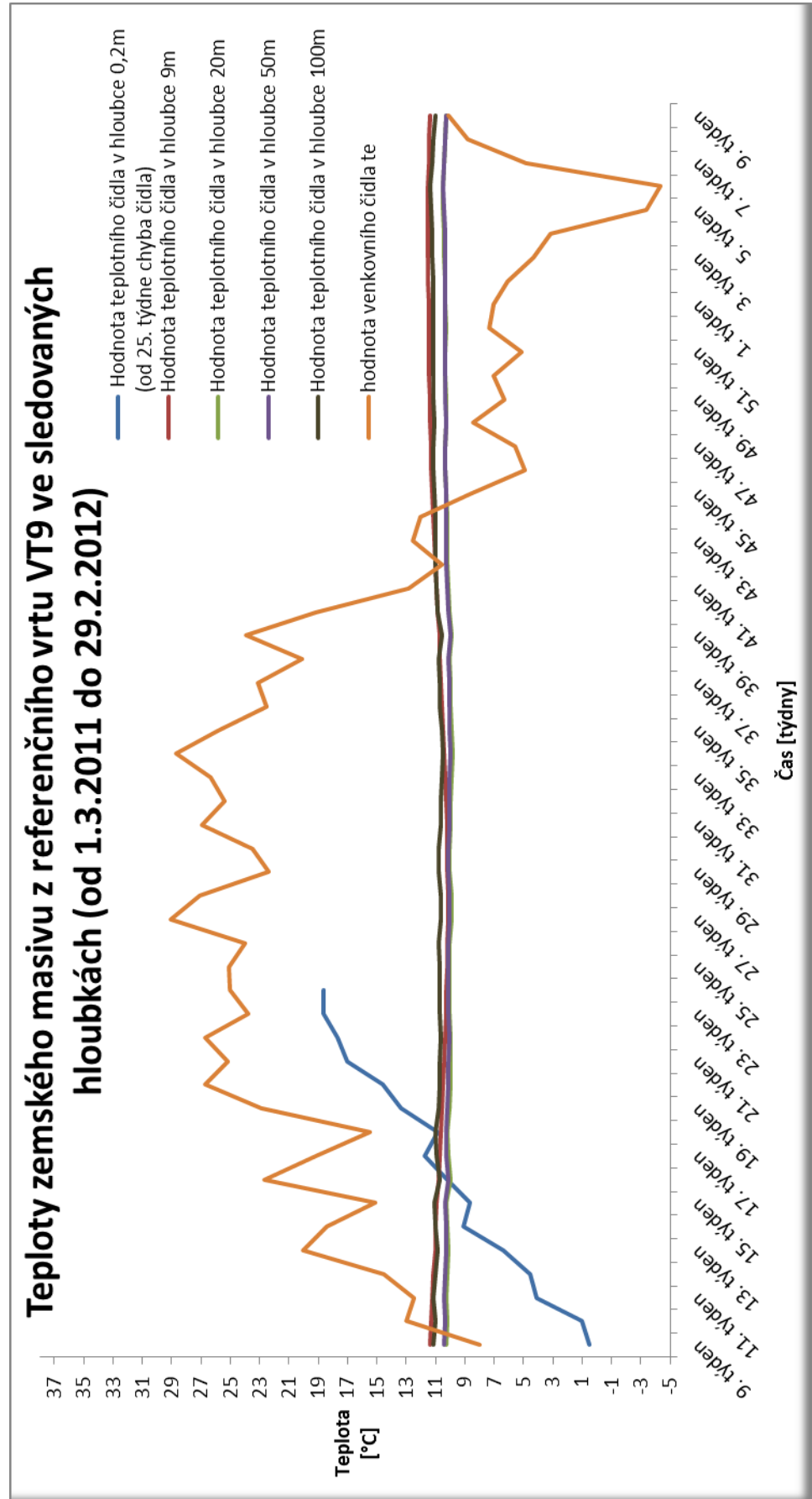
Graf 3. Teploty zemského masivu z vrtu VT3



Graf 4. Teploty zemského masivu z vrtu VT4 ve sledovaných hloubkách



Graf 5. Teploty zemského masivu VT9

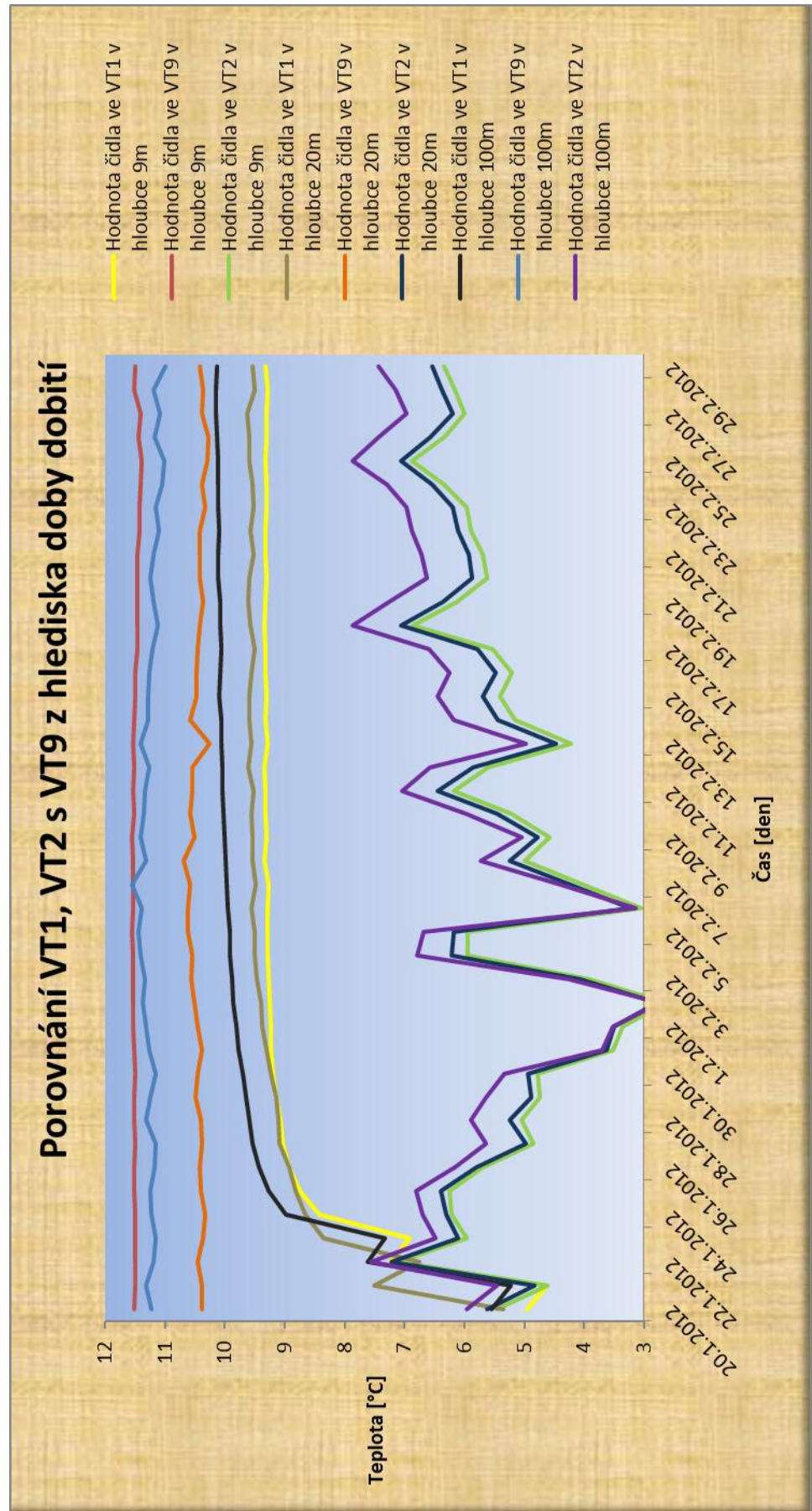


5.4.2. Porovnání VT1,VT2 s VT9 z hlediska dobití zemského masivu

Po dohodě s pracovníkem firmy VESKOM ing. Lukášem Maškem došlo k uzavření vrtu VT1 dne 20. 1. 2012 ve 14.45h. K tomuto kroku se přistoupilo za účelem zkoumání rychlosti dobíjení zemského masivu ve VT1 oproti ostatním vrtům, ze kterých je teplo čerpáno po celé zimní období. Na grafu 6. je porovnáván vypnutý vrt VT1 s VT2, ze kterého bylo teplo dále odebíráno. Jako vrchní hranice je znázorněn referenční vrt VT9. Z grafu 6. je jasné, že teplotní křivky neaktivního vrtu VT1 první 2-3 dny kopírují křivky aktivního VT2. A po třech dnech se začínají křivky rozdělovat. Křivka VT1 ve 20m reaguje s určitým fázovým předstihem a u ní zlom nastává 22. 1. 2012, u ostatních až o den později. Zlomová teplota je 6,907°C, od které začíná strmý nárůst. Strmý růst končí v hloubce 20m na teplotě 8,348°C dne 23. 1. 2012 a pokračuje v pozvolném stoupání až do posledního dne měření, kdy je teplota 9,532°C. V 9m a ve 100m končí strmý růst 24. 1. 2012 a to teplotami 8,423°C a 8,983°C. Po těchto teplotách nastává opět pozvolné stoupání až do posledního dne měření. Teplota posledního dne měření dosahuje ve VT1 v 9m 9,318°C a ve 100m 10,118°C.

Provedené měření prokázalo, že v poslední den měření 29. 2. 2012 rozdíly mezi referenčním vrtem VT9 a neaktivním vrtem VT1 dosáhly následujících hodnot: v 9m - 2,176K, ve 20m - 0,878K, ve 100m - 0,863K. Rozdíly zejména v hloubkách 20m a 100m nedosahují ani 1K. Jelikož teplotní křivka stále pozvolna stoupá, není zatím možné určit, k jaké nejmenší diferenci dojde. Ale je jasné, že k ustálení a konstantním hodnotám dojde v brzké době. Přesné datum se dá zjistit dalším měřením.

Graf 6. Porovnání VT1, VT2 s VT9 z hlediska dobití zemského masivu



5.4.3. Stanovení rozdílů teplot mezi vrtem VT3 a vrtem referenčním VT9

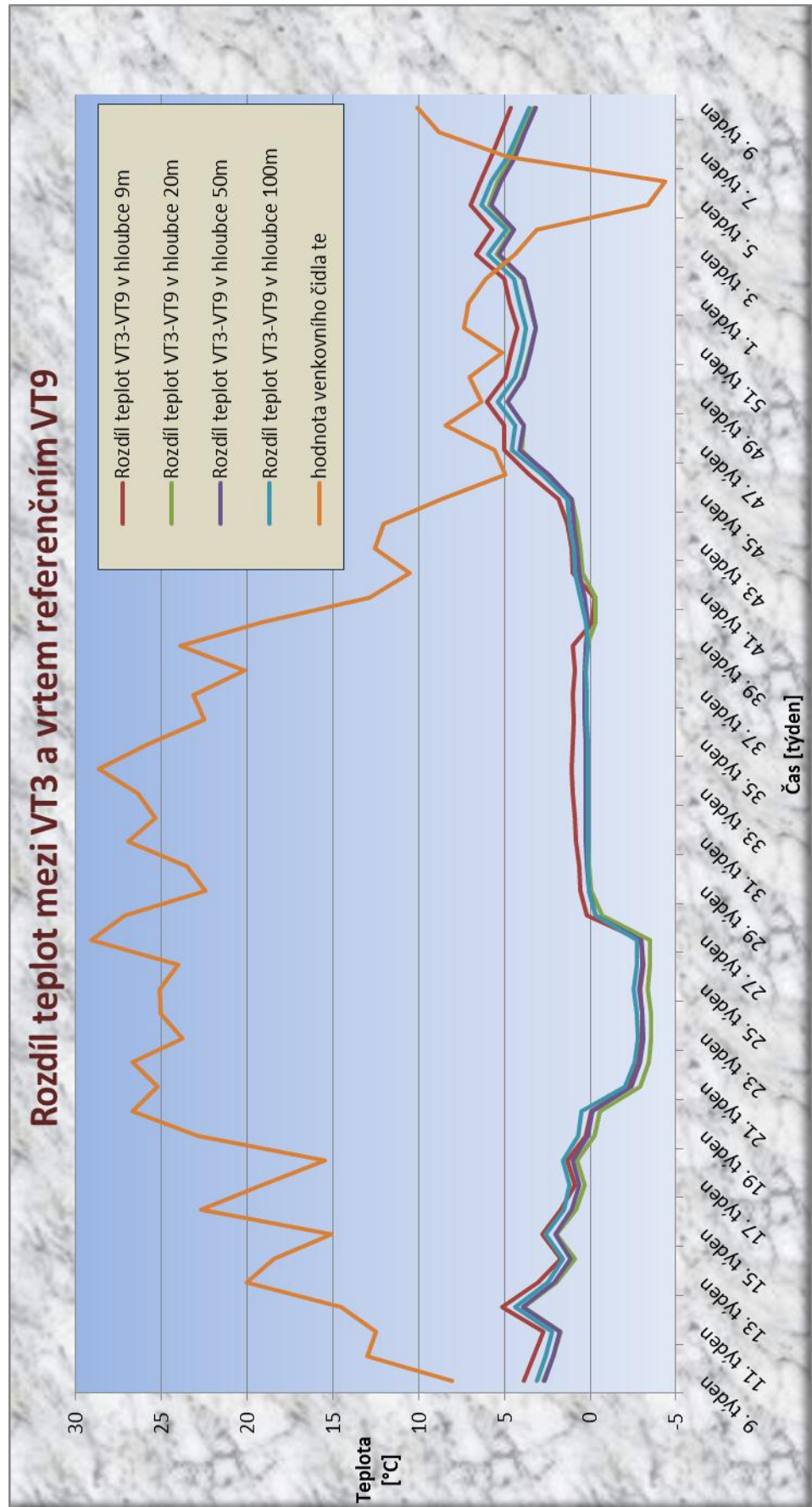
Graf 7. ukazuje difference mezi VT9 a VT3 v měřeném období. Průměrná difference teplot v jednotlivých hloubkách dosahovala těchto hodnot: 9m – 2K, 20m – 1,2K, 50m – 1,3K, 100m – 1,6K. Tyto hodnoty jsou dosti zkreslené, protože v letních měsících čerpadlo stálo nebo bylo dokonce, podle naměřených hodnot, v reverzibilním chodu. Pro přehlednost je lepší si období znovu rozdělit do tří fází.

V prvním otopném období dosáhla teplotní křivka rozdílů teplot tří lokálních maxim, ale tendence průběhu byla klesající. Největšího rozdílu v tomto období bylo dosaženo v hloubce 9m a hodnota činila 5,2K (12.týden). Před koncem 20. týdne, tedy prvního otopného období, byla v hloubce 100m naměřena difference 0,5K.

V letních měsících se difference mezi 16. květnem a 19. červencem dostala do záporných hodnot z důvodu zpětného chodu tepelného čerpadla. Největší rozdílová hodnota v reverzibilním období byla naměřena v hloubce 20m a to 3,6K. V dalším otopném období na přelomu roku dosahovaly rozdílové hodnoty maximálně 0,2K. Výjimku tvořilo znovu čidlo v hloubce 9m, kde byla, i z důvodu předpokládaného výskytu podzemní vody, naměřena difference 1,1K.

Ve druhém otopném období mají rozdíly hodnot, mezi vrtem zatíženým VT3 a vrtem nevystrojeným VT9, stoupající tendenci. Protože z vrtu VT3 je odebíráno značné množství tepla z důvodu značně klesající venkovní teploty t_e . Největší rozdíl teplot byl naměřen pochopitelně v hloubce 9m – 7K, což potvrzuje domněnku o výskytu podzemní vody.

Graf 7. Rozdíl teplot mezi VT3 a vrtem referenčním VT9



5.4.4. Útlumová hloubka

Znalost útlumové hloubky v experimentálním pracovišti společnosti VESKOM slouží k určení hloubky pod zemským povrchem, do které je teplota masivu ovlivňována z vnějších vlivů, jako je například sluneční záření, a od jaké hloubky to již nemá vliv na teplotu hornin. Pro výpočet využijeme vzorce 4.1 a 4.2. Kde za teplotní vodivost by měl být dosazen výsledek z TRT testu $\lambda = 2,9\text{W/mK}$. Jelikož pro výpočet útlumové hloubky nás zajímá pouze svrchní část zeminy, volím teplotní vodivost pro jílu $\lambda = 1,2\text{W/mK}$ a objemovou měrnou tepelnou kapacitu $C = 2,41 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ [13]. Podle autora Kutílka dosazujeme za denní úhlovou frekvenci $\omega_d = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a za roční úhlovou frekvenci $\omega_r = 1,99 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

Po dosazení do vzorce 4.2 a 4.1 dostáváme následující výsledky:

Součinitel teplotní vodivosti $a = 0,499 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Útlumová hloubka pro denní kolísání teplot $L_d = 0,117\text{m}$

Útlumová hloubka pro roční kolísání teplot $L_r = 2,24\text{m}$

Z výsledků útlumové hloubky vyplývá, že denní výkyvy teplot se neprojeví v hloubce $3L_d = 0,351\text{m}$ a roční výkyvy teplot se mohou projevat pouze do hloubky $3L_r = 6,72\text{m}$. Když výsledek porovnáme s grafem 5. pro referenční vrt VT9, je jasné, že jsme postupovali správně, protože teplota v hloubce 0,2m značně kolísá a je ovlivněna vnějším prostředím, zatímco v ostatních hloubkách jsou teploty téměř konstantní. Teplotní čidlo v hloubce 9m již není ovlivňováno vnějším prostředím a přesně to potvrdil výpočet útlumové hloubky, která je stanovena na hodnotu 6,72m.

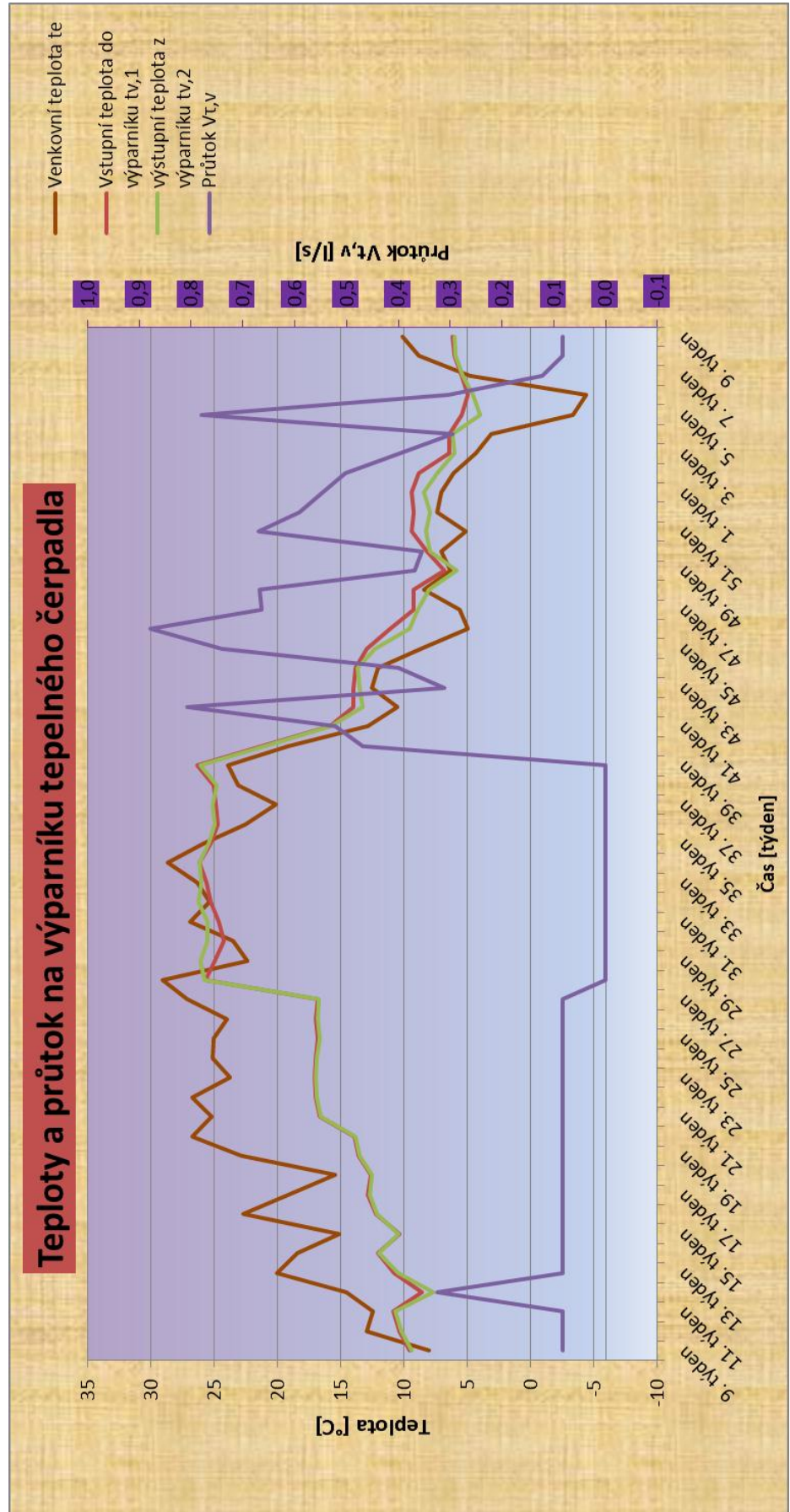
5.4.5. Chladicí výkon

Chladicí výkon tepelného čerpadla IVT GREENLINE HT PLUS E17 v průběhu měřeného období se dá určit podle měřených teplot na vstupu a výstupu z výparníku a odečítaných průtoků na výstupu z tepelného čerpadla. Jelikož dochází ke směšování teplotnosného média, jdoucího z horizontálního zemního výměníku, zemního výměníku typu SLINK a vertikálních hlubinných vrtů, v rozváděcím uzlu, nelze počítat chladicí výkon pouze pro vrty, ale musí se počítat pro všechna zařízení společně.

Graf 8. ukazuje teploty a průtok na výparníku tepelného čerpadla. V prvním období ukazuje průtokoměr, až na jednu výjimku (0,3 l/s) konstantní hodnotu 0,1 l/s. Tento stav se dá klasifikovat tak, že průtokoměr nepracoval správně. Ve 28. týdnu došlo k odstavení oběhového čerpadla a průtok se změnil na 0 l/s. To se okamžitě projevilo na teplotě směsi jdoucí do a z výparníku. Směs celé letní období stála, a tak je možné, že se ve strojovně ohřála na teplotu místnosti. Tuto domněnku ukazuje graf 8., kde se teplota směsi pohybuje od 28. do 40. týdne okolo 25,5 °C.

Od 40. týdne do konce měřeného období začalo oběhové čerpadlo pracovat správně. Na grafu 8. je vidět, jak při každém poklesu venkovní teploty t_e dochází ke zvýšení průtoku. Z tohoto důvodu, vybírám pro výpočet chladicího výkonu tepelného čerpadla pouze tuto část měřeného období.

Graf 8. Teploty a průtok na výparníku tepelného čerpadla



Chladicí výkon na výparníku pro 40. týden měření:

$$Q_{\tau, ch} = V_{\tau, ch} \cdot \rho_{s, v} \cdot c_{s, v} \cdot (t_{v1} - t_{v2}) \quad (5.1)$$

Průtok:

$$V_{\tau, ch} = 0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$$

Střední teplota směsi t_v :

$$t_v = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2} = \frac{21,283 + 20,998}{2} = 21,1^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

Hustota 100% ethylenglykolu:

$$\rho_{e, v} = -7 \cdot 10^{-10} \cdot (t_v^3) - 2 \cdot 10^{-7} \cdot (t_v^2) - 0,0004 \cdot t_v + 1,1601 \quad (5.3)$$

$$\rho_{e, v} = 1152 \text{ kg/m}^3$$

Hustota vody $\rho_{w, v}$ je $999,82 \text{ kg/m}^3$

Hustota směsi 70% vody a 30% ethylenglykolu:

$$\rho_{s, v} = 0,7 \cdot \rho_{w, v} + 0,3 \cdot \rho_{e, v} = 1045,45 \text{ kg/m}^3 \quad (5.4)$$

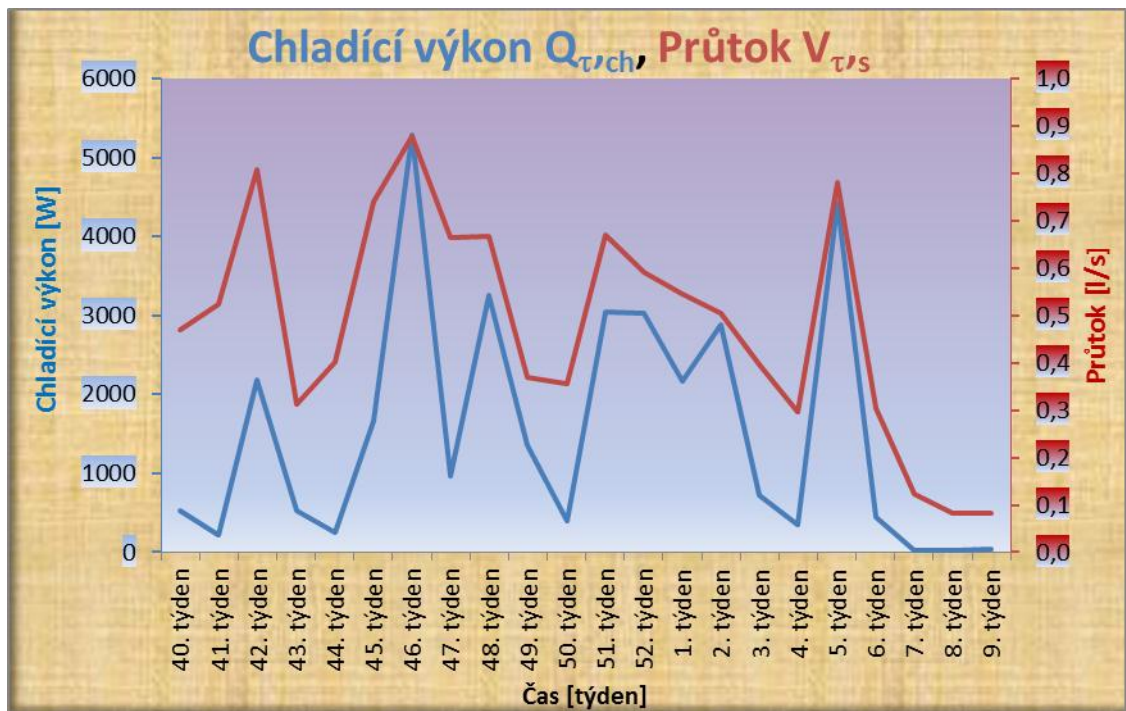
Měrná tepelná kapacita 30% ethylenglykolu (vychází z rovnice regrese pro 30% ethylenglykol):

$$c_{s, v} = -0,0000000008 \cdot (t_v^3) - 7 \cdot 10^{-7} \cdot (t_v^2) + 0,0014 \cdot t_v + 3,6694 \quad (5.5)$$

$$c_{s, v} = 3,699 \text{ kJ/kg.K} = 3699 \text{ J/kg.K}$$

Po dosazení do rovnice 5.1 dostáváme následující chladicí výkon pro 40. týden měření: $Q_{\tau, ch} = 518,1 \text{ W}$

Tento výpočet opakujeme pro každý týden topné sezóny a průběh průtoku a chladicího výkonu ukazuje graf 9. Z grafu je patrná souvislost chladicího výkonu a průtoků teplotnosné směsi. Při každém zvýšení průtoku vlivem snížení venkovní teploty a potřeby odebrání většího množství tepla stoupá také chladicí výkon. Největšího chladicího výkonu dosáhlo teplotné čerpadlo ve 46. týdnu při průtoku $0,91/\text{s}$ a to $Q_{\tau, ch} = 5,278 \text{ kW}$.

Graf 9. Chladicí výkon a průtok teplotné směsi

6. Závěr

Hlavním tématem této diplomové práce bylo zhodnotit teplotní pole a tepelné toky ve vertikálních zemních výměnících. Měření probíhalo ve spolupráci se společností VESKOM, která pro tyto účely vytvořila na svém pozemku experimentální pracoviště s vrtly VT1-VT4 se zemním výměníkem tepla a vrtem VT9 bez vystrojení pro porovnávání výsledných hodnot po odběru tepla z vrtů vystrojených. Vrtly byly osazeny teplotními čidly v hloubkách 0,2m, 9m, 20m, 50m, 100m. Měření probíhalo v době od 1. 3. 2011 do 29. 2. 2012 a bylo plně automatizováno. Data z teplotních čidel se odečítala a ukládala každých 15 minut, což velmi zpřesňuje měření i budoucí výsledky.

Výsledná útlumová hloubka byla v oblasti vrtů stanovena na 6,72m. Tato hodnota stanovuje přelom, kdy dochází nebo nedochází k ovlivňování teploty zemského masivu z vnějšího prostředí (sluneční záření,...). Graf 5. pro referenční vrt VT9 potvrzuje správnost výsledné útlumové hloubky, protože čidlo v hloubce 0,2m prakticky kopíruje křivku venkovní teploty, zatímco čidlo v hloubce 9m má konstantní průběh a není ovlivňováno venkovní teplotou.

Výsledné teploty zemského masivu znázorněné na grafech 1-4. ukázaly snižování či zvyšování teplot zemského masivu v závislosti na venkovní teplotě a potřebě odebraného tepla. Zvláštní věc nastala mezi 16. květnem až 19. červencem kdy teploty vzrostly až o 3K v porovnání s teplotami ve vrtu referenčním. Muselo tedy dojít v tomto období k reverzibilnímu chodu oběhového čerpadla. A teplo z administrativní budovy bylo vháněno do vrtů.

Dne 20. 1. 2012 došlo k vypnutí vrtu VT1 za účelem sledování rychlosti dobití zemského masivu. Křivka ještě tři dny pokračovala v kopírování vrtu, ze kterého bylo teplo stále odebíráno, a poté od teploty 6,9°C začala rychle stoupat na

teplotu 8,5 °C. Od této teploty dochází k pozvolnému stoupání až do konce měřeného období. Rozdíly mezi referenčním vrtem VT9 a neaktivním vrtem VT1 v poslední den měření mají tyto hodnoty: v 9m - 2,176K, ve 20m - 0,878K, ve 100m - 0,863K.

Chladicí výkon tepelného čerpadla IVT GREENLINE HT PLUS E17 v průběhu druhého otopného období (graf 9) byl stanoven v rozmezí od 0 do 278W. Tento chladicí výkon platí pro všechny výměníky, protože dochází ke směšování teplotního média.

Do budoucna bych doporučil, nechat vrt VT1 vypnutý a sledovat do jaké míry se nabije, protože teplotní křivka v průběhu měření měla stále mírně stoupající tendenci. A dále upravit dopravní cesty teplotního média takovým způsobem, aby bylo možné stanovit chladicí výkon pro každý výměník samostatně.

Literatura

- [1.] ŽERAVÍK, Antonín. Stavíme tepelné čerpadlo: [návratnost i za jeden rok]. 1. vyd. Přerov: Antonín Žeravík, 2003, 311 s. ISBN 80-239-0275-X.
- [2.] KUTÍLEK, Miroslav. Vodohospodářská pedologie: [návratnost i za jeden rok]. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1978, 295 s.
- [3.] ADAMOVSKEÝ, Radomír. NEUBERGER, Pavel. Termomechanika I: termodynamika plynů, oběhy v plynech. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2000, 85 s. ISBN 80-213-0683-1.
- [4.] KARLÍK, Robert. Tepelné čerpadlo pro váš dům. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 109 s. ISBN 978-80-247-2720-2 (BROŽ.).
- [5.] PETRÁŠ, Dušan. Obnovitelné zdroje energie pro nízkoteplotné systémy. 1. vyd. Bratislava: JAGA, 2009, 223 s. ISBN 978-80-8076-075-5.
- [6.] BERANOVSKÝ, Jiří a Jan TRUXA. Alternativní energie pro váš dům. 1. vyd. Brno: ERA, 2003, 125 s. ISBN 80-865-1759-4.
- [7.] Teplonosné medium. [online]. [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: www.ge-tra.cz
- [8.] TZB-info [online]. 1-7-2001. [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: www.tzb-info.cz

- [9.] ADAMOVSKEÝ, Radomír, Termomechanika, Přednáška tepelná čerpadla
- [10.] Brandl. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. Geotechnique 56, No. 2, 81–122
- [11.] ADAMOVSKEÝ, Radomír. NEUBERGER, Pavel. Termomechanika II, 2003
- [12.] RYŠKA, Jiří. Vrtý do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (VII). [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: [HTTP://WWW.TZB-INFO.CZ/3721-VRTY-DO-HORNINOVEHO-MASIVU-ZDROJ-ENERGIE-PRO-TEPELNA-CERPADLA-VII](http://www.tzb-info.cz/3721-VRTY-DO-HORNINOVEHO-MASIVU-ZDROJ-ENERGIE-PRO-TEPELNA-CERPADLA-VII)
- [13.] Zemní tepelné výměníky tepelných čerpadel se neobejdou bez podzemní vody. RNDR. PETR ČÍŽEK. [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.ht
- [14.] <http://gnosis9.net/view.php?cisloclanku=2006110006>
- [15.] MPO. [online]. [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/>
- [16.] http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=383
- [17.] <http://www.tepelnacerpadlamidos.cz/katalog-a-cenik/tepelna-cerpadla-zeme-voda>.
- [18.] <http://www.tzb-info.cz/957-tepelna-cerpadla-pro-kazdeho-i>
- [19.] <http://www.ivtostrava.cz/cs/tepelny-vykon.html>

- [20.] Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (VII): Aplikace softwaru pro dimenzování vrtů. [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3721-vrty-do-horninoveho-masivu-zdroj-energie-pro-tepelna-čerpadla-vii>
- [21.] Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (V) Horniny jako zdroj tepla: Horniny jako zdroj tepla pro tepelné čerpadlo. [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3665-vrty-do-horninoveho-masivu-zdroj-energie-pro-tepelna-čerpadla-v>
- [22.] Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (VI) Dimenzování vrtů: Dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla. [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3691-vrty-do-horninoveho-masivu-zdroj-energie-pro-tepelna-čerpadla-vi>
- [23.] <http://maps.google.cz/maps?hl=cs&tab=wl>
- [24.] <http://www.gerotop.cz/cs/sluzby/čerpadlo-se-sondou/vystrojeni-geotermalniho-vrtu/>
- [25.] <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>

Seznam grafů

- Graf 1. Teploty zemského masivu z vrtu VT1
- Graf 2. Teploty zemského masivu z vrtu VT2
- Graf 3. Teploty zemského masivu z vrtu VT3
- Graf 4. Teploty zemského masivu z vrtu VT4
- Graf 5. Teploty zemského masivu z vrtu VT9
- Graf 6. Porovnání VT1,VT2 s VT9 z hlediska dobití zemského masivu
- Graf 7. Rozdíl teplot mezi VT3 a vrtem referenčním VT9
- Graf 8. Teploty a průtok na výparníku tepelného čerpadla
- Graf 9. Chladicí výkon a průtok teplotné směsi

Seznam obrázků

- Obr. 1 Geotermální potenciál České republiky
- Obr. 2 Přenos tepla a geotermální situace v základních hloubkách pod zemským povrchem
- Obr. 3 Znázornění oběhu kompresorového chladicího zařízení v T-s diagramu a jeho realizace
- Obr. 4 Vývoj počtu tepelných čerpadel
- Obr. 5 Technické schéma tepelného čerpadla.
- Obr. 6 Slinka typu H.
- Obr. 7 Horizontální zemní kolektor.
- Obr. 8 Ukázka dimenzování tepelného čerpadla s bivalentním provozem
- Obr. 9 Schéma přestupu tepla z hornin do vrtu
- Obr. 10 Izolinie teploty ve vrtu naměřené během provozu tepelného čerpadla
- Obr. 11 Situační plánek místa měření
- Obr. 12 Potrubí PE 100RC s vratným U kolenem a pouzdrem

Seznam tabulek

Tab. 1 Ziskovost tepla jednotlivých hornin.

Tab. 2 Popis jednotlivých vrtů včetně geolog. průzkumu

Tab. 3 Výsledky testu TRT provedeného na vrtu VT1

Tab. 4 Umístění teplotních čidel ve vrtech

Tab. 5 Přehled teplot v jednotlivých vrtech

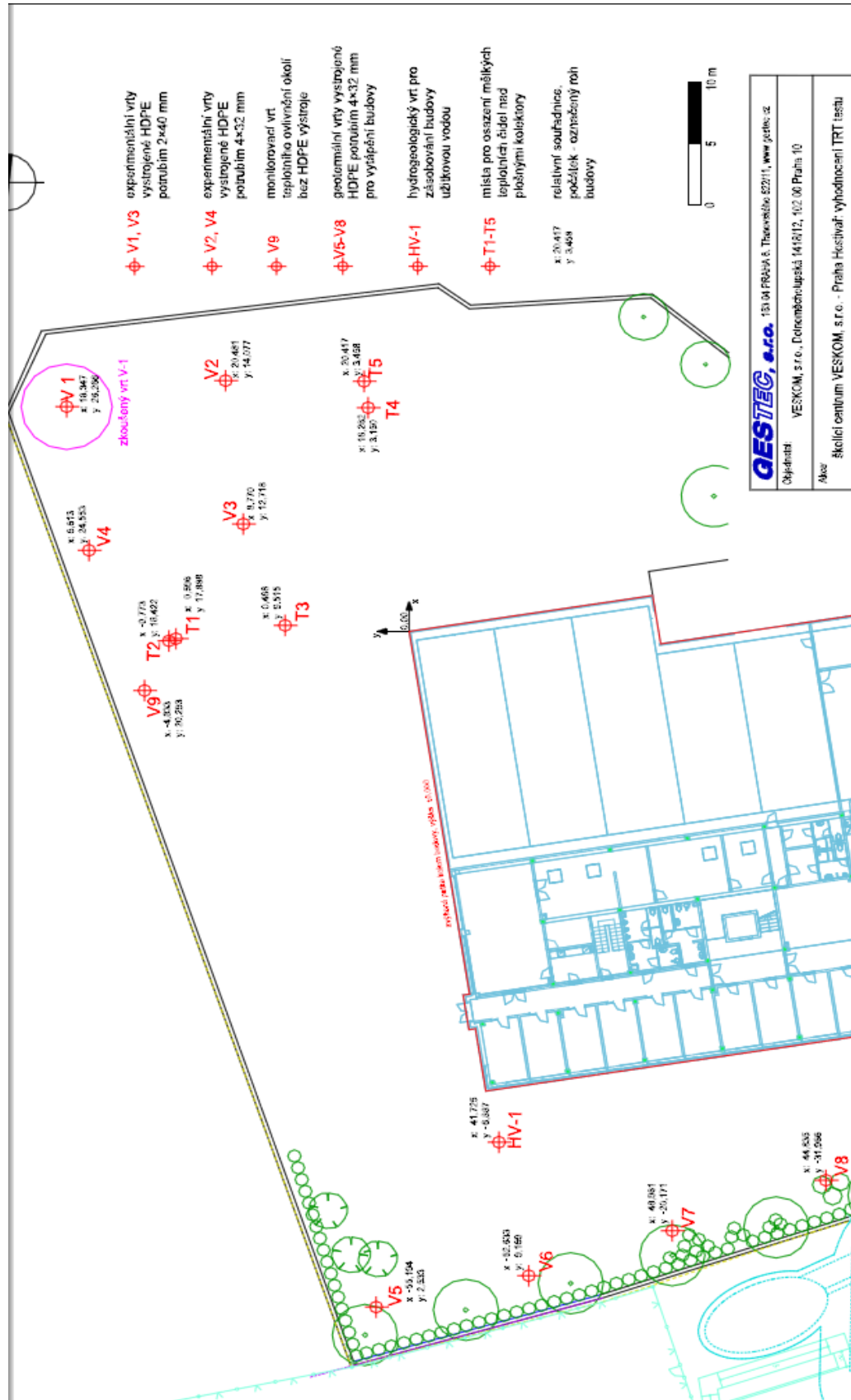
Přílohy

- I. Přehled klíčových tepelně technických veličin
- II. Situační plán experimentálního pracoviště
- III. Hodnoty teplotních čidel VT1
- IV. Hodnoty teplotních čidel VT2
- V. Hodnoty teplotních čidel VT3
- VI. Hodnoty teplotních čidel VT4
- VII. Hodnoty teplotních čidel VT9
- VIII. Přehled použitých veličin

I. Přehled klíčových tepelně technických veličin

- **Zemský tepelný tok ϕ** – množství tepla, které projde povrchem za jednotku času; výsledkem je tepelný zisk nebo tepelná ztráta (W/m^2)
- **Tepelná vodivost λ** – schopnost materiálu vést teplo; pro ilustraci: průměrná hodnota hornin v zemské kůře se pohybuje mezi 2,1 – 4,2 W/m.K , nejvyšších hodnot dosahuje křemen, nejnižších jíly a jílovce (W/m.K)
- **Tepelný odpor R** – vyjadřuje tepelně izolační schopnost konstrukce; odpory jednotlivých vrstev se dají sčítat ($\text{m}^2.\text{W/K}$)
- **Součinitel prostupu tepla U** – množství tepla ve Wattech, které projde 1m^2 konstrukce při rozdílu teploty o 1K ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
- **Teplotní pole** – rozložení teplot ve sledované ploše; na vnitřní ploše nebo ve sledovaném průřezu konstrukce v časovém období
- **Tepelný most** – oblast konstrukce, kde tepelný tok dané oblasti je vyšší než oblasti na ni navazující
- **Měrná tepelná kapacita c_p** – množství tepla, které musíme 1kg látka přivést, aby se její teplota změnila o 1K (J/kg.K)

II. Situační plán experimentálního pracoviště



III. Hodnoty teplotních čidel VT1

	Hodnota teplotního čidla v hloubce 0,2m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 9m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 20m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 100m	Hodnota venkovního čidla te
9. týden	0,900	7,189	7,493	7,879	8,025
10. týden	1,172	7,684	7,880	8,310	12,988
11. týden	3,700	8,152	8,404	8,708	12,488
12. týden	4,178	6,011	6,255	6,583	14,538
13. týden	5,376	7,961	8,015	8,356	20,029
14. týden	7,789	9,026	9,119	9,325	18,455
15. týden	7,917	8,158	8,340	8,449	15,095
16. týden	8,599	9,094	8,998	9,242	22,710
17. týden	10,113	9,736	9,683	9,767	19,157
18. týden	9,639	9,367	9,363	9,390	15,469
19. týden	10,970	10,242	10,079	10,100	22,869
20. týden	12,132	10,539	10,293	10,276	26,703
21. týden	14,133	12,959	12,744	12,674	25,194
22. týden	14,877	13,463	13,219	13,187	26,691
23. týden	15,972	13,682	13,486	13,425	23,769
24. týden	16,246	13,667	13,450	13,378	25,031
25. týden	16,181	13,447	13,272	13,242	25,071
26. týden	16,345	13,625	13,469	13,444	24,002
27. týden	16,213	13,520	13,286	13,314	29,071
28. týden	17,690	10,595	10,264	10,855	27,119
29. týden	17,403	9,994	9,997	10,609	22,410
30. týden	16,939	9,835	9,861	10,539	23,521
31. týden	17,235	9,768	9,719	10,486	26,926
32. týden	17,364	9,731	9,715	10,479	25,376
33. týden	17,836	9,728	9,641	10,464	26,364
34. týden	19,041	9,745	9,575	10,452	28,676
35. týden	17,563	9,816	9,622	10,466	25,817
36. týden	17,178	9,835	9,701	10,486	22,519
37. týden	17,024	9,861	9,676	10,476	23,133
38. týden	15,893	9,963	9,753	10,492	20,129
39. týden	15,167	10,015	9,588	10,461	23,902
40. týden	14,868	10,870	10,416	10,519	19,143
41. týden	12,720	10,898	10,551	10,253	12,857
42. týden	10,300	10,016	9,987	10,013	10,540
43. týden	9,849	9,794	9,773	9,928	12,567
44. týden	9,807	9,555	9,560	9,717	12,060
45. týden	8,894	9,254	9,391	9,615	8,693
46. týden	6,408	7,616	8,046	8,246	4,945
47. týden	5,830	6,115	6,259	6,417	5,593
48. týden	5,246	6,118	6,400	6,520	8,410
49. týden	5,216	5,158	5,534	5,546	6,343
50. týden	4,342	6,175	6,519	6,645	7,057
51. týden	3,910	6,514	6,829	6,951	5,129
52. týden	4,751	6,716	7,090	7,129	7,360
1. týden	4,816	6,445	6,751	6,866	7,076
2. týden	4,430	6,119	6,427	6,542	6,100
3. týden	3,161	4,602	5,052	5,136	4,359
4. týden	2,985	8,542	8,484	9,041	3,117
5. týden	1,634	9,250	9,330	9,826	-3,350
6. týden	0,268	9,312	9,521	9,997	-4,374
7. týden	-0,052	9,312	9,556	10,069	4,812
8. týden	0,245	9,309	9,552	10,104	8,838
9. týden	0,813	9,286	9,533	10,128	10,107

IV. Hodnoty teplotních čidel VT2

	Hodnota teplotního čidla v hloubce 0,2m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 9m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 20m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 50m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 100m
9. týden	0,408	7,252	7,393	7,741	7,866
10. týden	1,398	7,787	7,850	8,161	8,293
11. týden	4,863	8,329	8,388	8,634	8,746
12. týden	5,185	6,066	6,164	6,896	6,712
13. týden	6,970	7,946	7,963	8,135	8,233
14. týden	9,710	9,156	9,125	9,134	9,191
15. týden	8,894	8,197	8,248	8,464	8,429
16. týden	11,069	9,096	9,005	8,994	9,057
17. týden	12,700	9,807	9,721	9,619	9,582
18. týden	11,470	9,375	9,293	9,261	9,226
19. týden	14,351	10,292	10,152	9,909	9,822
20. týden	15,527	10,560	10,385	10,094	9,963
21. týden	18,197	12,757	12,666	12,068	12,122
22. týden	18,831	13,250	13,167	12,691	12,738
23. týden	19,720	13,514	13,427	12,920	12,970
24. týden	19,160	13,511	13,399	12,874	12,899
25. týden	18,245	13,306	13,192	12,751	12,770
26. týden	19,031	13,514	13,417	12,962	13,028
27. týden	18,675	13,373	13,244	12,806	12,865
28. týden	20,397	10,542	10,417	10,724	11,016
29. týden	18,993	9,993	10,047	10,259	10,747
30. týden	18,545	9,833	9,917	10,129	10,663
31. týden	19,248	9,735	9,790	10,064	10,617
32. týden	18,770	9,709	9,776	10,037	10,596
33. týden	19,891	9,687	9,719	10,009	10,577
34. týden	21,632	9,683	9,672	9,994	10,564
35. týden	18,866	9,748	9,713	10,004	10,572
36. týden	18,277	9,788	9,749	10,003	10,569
37. týden	17,907	9,810	9,739	9,994	10,564
38. týden	16,069	9,915	9,806	10,023	10,562
39. týden	15,334	9,907	9,699	10,010	10,561
40. týden	14,466	10,827	10,330	10,149	10,542
41. týden	11,380	10,860	10,335	9,993	10,293
42. týden	8,391	10,002	9,822	9,790	10,027
43. týden	8,802	9,797	9,622	9,642	9,954
44. týden	8,888	9,573	9,404	9,508	9,799
45. týden	7,305	9,270	9,229	9,431	9,684
46. týden	4,435	7,754	7,883	8,461	8,495
47. týden	4,199	6,006	6,096	6,759	6,402
48. týden	3,598	6,122	6,213	6,791	6,563
49. týden	3,693	5,207	5,306	6,077	5,655
50. týden	2,581	6,186	6,271	6,770	6,553
51. týden	2,342	6,536	6,613	7,069	6,866
52. týden	3,849	6,968	7,064	7,664	7,364
1. týden	3,868	6,506	6,525	7,049	6,866
2. týden	3,430	6,152	6,170	6,690	6,458
3. týden	1,763	4,699	4,801	5,644	5,137
4. týden	1,781	5,536	5,670	6,400	6,184
5. týden	0,017	4,295	4,469	5,326	4,707
6. týden	-1,716	4,802	5,034	5,792	5,410
7. týden	-1,282	5,497	5,753	6,545	6,501
8. týden	-0,676	6,102	6,324	7,083	7,112
9. týden	0,306	6,162	6,372	7,157	7,185

V. Hodnoty teplotních čidel VT3

	Hodnota teplotního čidla v hloubce 0,2m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 9m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 20m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 50m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 100m
9. týden	0,045	7,499	7,557	7,734	8,068
10. týden	0,760	7,969	8,050	8,171	8,450
11. týden	4,516	8,501	8,535	8,597	8,893
12. týden	4,907	5,960	6,278	6,398	6,593
13. týden	7,157	7,976	8,108	8,155	8,401
14. týden	9,711	9,254	9,270	9,191	9,386
15. týden	8,795	8,148	8,311	8,313	8,479
16. týden	10,726	9,029	9,162	9,044	9,195
17. týden	12,218	9,829	9,853	9,645	9,772
18. týden	11,009	9,357	9,441	9,276	9,386
19. týden	13,742	10,264	10,310	10,035	10,078
20. týden	15,371	10,491	10,561	10,221	10,214
21. týden	17,589	12,658	12,891	12,498	12,759
22. týden	18,520	13,045	13,346	12,991	13,263
23. týden	19,465	13,311	13,586	13,208	13,504
24. týden	19,051	13,324	13,569	13,173	13,452
25. týden	17,940	13,113	13,365	12,986	13,268
26. týden	18,435	13,308	13,546	13,186	13,489
27. týden	18,694	13,106	13,397	13,031	13,307
28. týden	20,125	9,944	10,647	10,357	10,910
29. týden	18,163	9,613	10,152	10,046	10,740
30. týden	18,139	9,561	9,984	9,930	10,637
31. týden	18,991	9,354	9,855	9,810	10,519
32. týden	18,496	9,383	9,809	9,798	10,531
33. týden	19,712	9,338	9,753	9,749	10,467
34. týden	21,177	9,316	9,702	9,702	10,410
35. týden	18,440	9,442	9,724	9,732	10,459
36. týden	18,034	9,616	9,744	9,780	10,533
37. týden	17,498	9,675	9,728	9,768	10,520
38. týden	15,918	9,861	9,778	9,818	10,566
39. týden	15,108	9,720	9,700	9,714	10,433
40. týden	14,377	10,977	10,377	10,036	10,580
41. týden	11,498	11,225	10,468	9,928	10,338
42. týden	8,848	10,031	9,764	9,616	10,082
43. týden	9,308	9,985	9,644	9,492	10,001
44. týden	9,200	9,797	9,434	9,297	9,763
45. týden	7,537	9,354	9,184	9,190	9,686
46. týden	4,907	7,719	7,776	7,920	8,368
47. týden	4,727	6,279	6,344	6,250	6,588
48. týden	4,202	6,326	6,379	6,421	6,698
49. týden	4,126	5,348	5,476	5,504	5,740
50. týden	3,140	6,478	6,413	6,495	6,753
51. týden	2,813	6,852	6,807	6,860	7,166
52. týden	4,118	7,206	7,166	7,171	7,372
1. týden	4,224	6,793	6,764	6,814	7,040
2. týden	3,676	6,498	6,419	6,489	6,700
3. týden	2,037	4,827	4,904	5,034	5,257
4. týden	1,810	5,758	5,845	5,906	6,309
5. týden	0,134	4,525	4,598	4,697	4,966
6. týden	-1,435	5,114	5,160	5,244	5,612
7. týden	-0,973	5,737	5,896	6,017	6,424
8. týden	-0,460	6,211	6,439	6,533	6,934
9. týden	0,489	6,709	6,988	7,075	7,477

VI. Hodnoty teplotních čidel VT4

	Hodnota teplotního čidla v hloubce 0,2m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 9m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 20m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 50m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 100m
9. týden	1,925	7,435	7,443	7,739	8,158
10. týden	2,503	7,916	7,957	8,174	8,544
11. týden	4,568	8,478	8,487	8,667	8,993
12. týden	4,962	6,556	6,308	6,396	6,813
13. týden	6,078	8,104	8,059	8,111	8,417
14. týden	8,036	9,392	9,236	9,224	9,431
15. týden	8,294	8,579	8,349	8,358	8,619
16. týden	9,284	9,351	9,151	8,997	9,188
17. týden	10,628	10,143	9,864	9,677	9,781
18. týden	10,417	9,752	9,420	9,293	9,417
19. týden	11,823	10,675	10,294	9,967	10,003
20. týden	12,761	10,990	10,550	10,119	10,124
21. týden	14,552	13,363	12,916	12,653	12,517
22. týden	15,415	13,915	13,478	13,230	13,094
23. týden	16,395	14,164	13,733	13,495	13,359
24. týden	16,744	14,174	13,708	13,432	13,292
25. týden	16,469	13,918	13,529	13,255	13,120
26. týden	16,886	14,129	13,749	13,499	13,384
27. týden	16,834	14,002	13,609	13,295	13,172
28. týden	18,170	11,253	10,879	10,518	10,963
29. týden	17,774	10,411	10,370	10,210	10,757
30. týden	17,394	10,204	10,229	10,086	10,672
31. týden	17,750	10,139	10,162	9,964	10,575
32. týden	17,668	10,113	10,114	9,962	10,589
33. týden	18,205	10,090	10,086	9,904	10,549
34. týden	19,516	10,077	10,055	9,856	10,513
35. týden	18,294	10,165	10,082	9,898	10,551
36. týden	17,772	10,251	10,087	9,962	10,618
37. týden	17,533	10,310	10,059	9,951	10,611
38. týden	16,411	10,444	10,109	10,024	10,651
39. týden	15,958	10,473	10,080	9,891	10,538
40. týden	15,471	11,491	10,523	10,192	10,653
41. týden	13,443	11,567	10,479	10,079	10,447
42. týden	11,494	10,528	9,982	9,871	10,200
43. týden	10,953	10,276	9,789	9,720	10,131
44. týden	10,669	10,052	9,578	9,530	9,965
45. týden	9,789	9,704	9,414	9,478	9,891
46. týden	7,809	8,273	8,060	8,263	8,675
47. týden	7,057	6,541	6,280	6,326	6,578
48. týden	6,485	6,551	6,348	6,394	6,738
49. týden	6,176	5,771	5,488	5,529	5,811
50. týden	5,536	6,575	6,323	6,469	6,802
51. týden	5,049	6,908	6,671	6,819	7,147
52. týden	5,654	7,656	7,250	7,257	7,537
1. týden	5,695	6,971	6,676	6,794	7,113
2. týden	5,293	6,598	6,295	6,409	6,727
3. týden	4,248	5,161	4,801	4,963	5,317
4. týden	3,905	5,947	5,785	6,052	6,431
5. týden	2,642	4,758	4,522	4,679	4,988
6. týden	1,506	5,254	5,106	5,350	5,681
7. týden	1,116	6,077	5,975	6,301	6,724
8. týden	1,189	6,764	6,618	6,884	7,290
9. týden	1,981	7,268	7,178	7,410	7,831

VII. Hodnoty teplotních čidel VT9

	Hodnota teplotního čidla v hloubce 0,2m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 9m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 20m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 50m	Hodnota teplotního čidla v hloubce 100m
9. týden	0,494	11,386	10,284	10,419	11,166
10. týden	1,053	11,293	10,193	10,345	11,044
11. týden	4,125	11,229	10,262	10,397	11,131
12. týden	4,529	11,121	10,167	10,311	10,996
13. týden	6,395	11,015	10,094	10,244	10,882
14. týden	9,071	10,980	10,183	10,309	10,994
15. týden	8,690	10,918	10,254	10,357	11,085
16. týden	10,232	10,756	9,997	10,149	10,741
17. týden	11,748	10,737	10,156	10,271	10,949
18. týden	10,835	10,668	10,184	10,281	10,985
19. týden	13,387	10,550	10,060	10,177	10,805
20. týden	14,608	10,457	9,991	10,120	10,718
21. týden	17,038	10,404	9,995	10,119	10,719
22. týden	17,665	10,325	9,944	10,076	10,646
23. týden	18,670	10,302	10,017	10,135	10,742
24. týden	18,616	10,257	10,018	10,126	10,737
25. týden	chyba	10,214	10,020	10,117	10,727
26. týden	chyba	10,198	10,048	10,131	10,753
27. týden	chyba	10,140	9,929	10,042	10,611
28. týden	chyba	10,133	9,926	10,030	10,604
29. týden	chyba	10,194	10,087	10,142	10,801
30. týden	chyba	10,202	10,071	10,120	10,762
31. týden	chyba	10,204	9,956	10,036	10,623
32. týden	chyba	10,285	9,993	10,067	10,674
33. týden	chyba	10,333	9,933	10,028	10,601
34. týden	chyba	10,389	9,869	9,982	10,511
35. týden	chyba	10,482	9,922	10,017	10,577
36. týden	chyba	10,593	10,006	10,087	10,715
37. týden	chyba	10,666	10,003	10,088	10,713
38. týden	chyba	10,749	10,065	10,139	10,796
39. týden	chyba	10,738	9,870	9,990	10,546
40. týden	chyba	10,879	10,084	10,155	10,830
41. týden	chyba	10,957	10,163	10,221	10,943
42. týden	chyba	11,023	10,215	10,267	11,003
43. týden	chyba	11,082	10,193	10,249	10,986
44. týden	chyba	11,135	10,189	10,242	10,987
45. týden	chyba	11,207	10,242	10,288	11,050
46. týden	chyba	11,275	10,332	10,361	11,175
47. týden	chyba	11,317	10,318	10,352	11,166
48. týden	chyba	11,344	10,263	10,309	11,088
49. týden	chyba	11,389	10,304	10,336	11,137
50. týden	chyba	11,429	10,326	10,350	11,156
51. týden	chyba	11,460	10,339	10,362	11,171
52. týden	chyba	11,470	10,310	10,332	11,137
1. týden	chyba	11,477	10,316	10,333	11,146
2. týden	chyba	11,488	10,326	10,342	11,162
3. týden	chyba	11,494	10,386	10,382	11,231
4. týden	chyba	11,493	10,385	10,372	11,213
5. týden	chyba	11,525	10,489	10,444	11,322
6. týden	chyba	11,520	10,527	10,467	11,364
7. týden	chyba	11,477	10,440	10,399	11,247
8. týden	chyba	11,421	10,343	10,321	11,118
9. týden	chyba	11,363	10,265	10,256	11,006

VIII. Přehled použitých veličin

ε_t	..... topný faktor.....	[-]
a	..... teplotní vodivost	[m ² /s]
ω	..... úhlová frekvence	[1/s]
L	..... útlumová hloubka	[m]
λ	..... součinitel tepelné vodivosti	[W/m.K]
ρ	..... hustota	[kg/m ³]
c	..... měrná tepelná kapacita	[J/kg.K]
φ	..... tepelný tok	[W/m ²]
A	..... plocha	[m ²]
t	..... čas	[s]
\bar{v}_w	..... rychlostní vektor proudící vody	[m/s]
c_w	..... měrná tepelná kapacita půdní vody	[J/kg.K]
ρ_w	..... hustota půdní vody	[kg/m ³]
T'	..... referenční teplota	[K]
\bar{v}_v	..... rychlostní vektor proudícího plynu	[m/s]
c_v	..... měrná tepelná kapacita půdního plynu	[J/kg.K]
ρ_v	..... hustota půdního plynu	[kg/m ³]
\dot{q}_{cond}	..... konduktivní tepelný tok	[W/m ²]
$\dot{q}_{l,conv}$	..... konvekční tepelný tok (proudění kapaliny)	[W/m ²]
$\dot{q}_{v,conv}$	..... konvekční tepelný tok (proudění plynu)	[W/m ²]
\dot{q}_{lat}	..... latentní tepelný výkon (změna skupenství vody)	[W/m ²]
r_b	..... poloměr vrtu	[m]
$T_B(t)$	..... teplota podél stěny vrtu v závislosti na čase	[K]
$q(t)$	..... průměrný odběr tepla z 1m vrtu	[W/m]
H	..... hloubka vrtu	[m]
t_s	..... stacionární čas odběru tepla z vrtu	[s]
R_b	..... celkový tepelný odpor vrtu	[K.m/W]

T_f	teplota nemrznoucí směsi v kolektoru	[K]
T_{in}	teplota nemrznoucí směsi na vstupu do vrtu	[K]
T_{out}	teplota nemrznoucí směsi na výstupu z vrtu.....	[K]
c_f	měrná tepelná kapacita směsi v kolektoru	[J/kgK]
V_f	průtočné množství směsi v kolektoru	[m ³ /s]
ρ_f	měrná hmotnost nemrznoucí směsi	[kg/m ³]
P_{top}	topný výkon tepelného čerpadla	[W]
P_{chlad}	chladicí výkon kompresoru (na výparníku)	[W]
P_{el}	elektrický příkon kompresoru	[W]
V	průtok oběhového čerpadla primárního okruhu ..	[m ³ /s]
dT	rozdíl teplot na vstupu a výstupu z výparníku	[K]
Q_m	hmotnostní průtok média	[kg/s]