

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Teploty a tepelné toky ve vertikálním zemním  
tepelném výměníku**

diplomová práce

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

Diplomant: Bc. Lukáš Mašek

PRAHA 2011

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra mechaniky a strojnictví

Akademický rok 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**Lukáš Mašek**

obor Technologická zařízení staveb

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

Název práce: **Teploty a tepelné toky ve vertikálním zemním  
tepelném výměníku.**

### Osnova diplomové práce:

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



Rozsah hlavní textové části: 40 - 60 stran


Doporučené zdroje:

1. Brandl, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56 (2006), No.2: 81-122
2. Florides, G., Kaloqirou, S. Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32 (2007) 2461-2478
3. Hepbasli, A., Akdemir, D. Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) neot pump system. *Energy Conversion and Management*, 45 (2004) No.5: 737-753
4. Akpinar, E. K., Hepbasli, A. A comparative study on exergetic assessment of two ground-source (geothermal) heat pump system for residential applications. *Building and Environment*. 42 (2007) No.5: 2004-2013
5. <http://www.tzb-info.cz>
6. Team. Ground-source heat pump project analysis. Minister of Natural Resources Canada, 2005, ISBN 0-662-39150-0

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

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011

  
.....  
Vedoucí katedry



  
.....  
Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

---

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Radomíra Adamovského, DrSc. a použil jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne 9.4. 2011

Lukáš Mašek



## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Radomíru Adamovskému, DrSc. za jeho pomoc a rady při vypracování této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval společnosti VESKOM spol. s.r.o., která realizovala experimentální pracoviště ve vlastní režii a bylo mi umožněno na něm provést své měření.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Petru Burešovi, řediteli společnosti VESKOM, spol. s.r.o. za poskytnuté informace a projevenou ochotu pomoci při řešení diplomové práce.

## **Teploty a tepelné toky ve vertikálním zemním tepelném výměníku**

**Abstrakt:** Diplomová práce na téma „Teploty a tepelné toky ve vertikálním zemním tepelném výměníku“ se zabývá problematikou vrtů jako zdroje energie pro tepelné čerpadlo. V kapitole „Současný stav řešené problematiky“ je postupně popsána problematika geotermální energie, princip funkce tepelných čerpadel a v závěru kapitoly se zaměřuji na tepelná čerpadla typu země – voda s vertikálním zemním výměníkem. V kapitole „Materiál a metody měření“ se v první části věnuji teoretickému rozboru. V další části této kapitoly dávám prostor popisu měřené lokality a vlastního měření. V kapitole „Výsledky“ uvádím závěry vyplývající z naměřených hodnot. Podle stanovených cílů uvádím závěry co se týče útlumové hloubky, průběhu teplot v jednotlivých vrtech v celé délce sledovaného období a teplotních diferencí mezi referenčním vrtem VT9 a vrtem VT2. V kapitole „Závěr“ stručně shrnuji dosažené výsledky a naposledy uvádím některé závěry.

**Klíčová slova:** energie, čerpadlo, vrt, teplota

## **Temperatures and heat fluxes in vertical gas heat exchanger**

**Summary:** Thesis on "Temperatures and heat fluxes in vertical gas heat exchanger" deals with drilling as an energy source for heat pump. In the chapter "Current status of tackle" successively described the issue of geothermal energy, the principle function of the heat pump and in the end, I focus on the Earth's heat pumps – water with a vertical gas exchanger. In the chapter "Material and methods of measurement" in the first part is devoted to theoretical analysis. In the second part this chapter provides a description of the measured area of the site and their own measurements. In the chapter "Results" I present findings from the measured values. According to the conclusions I present the objectives in terms of attenuation depth, the temperature in individual wells in the entire length of the period and the temperature difference between the reference borehole and borehole VT9 VT2. In the chapter "Conclusion" results briefly summarizing the achievements and the last I present some conclusions.

**Key words:** energy, pump, borehole, temperature

# Obsah

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....</b>	<b>2</b>
2.1 GEOTERMÁLNÍ ENERGIE.....	2
2.1.1 TEPELNÉ VLASTNOSTI HORNIN.....	7
2.1.2 SLUNEČNÍ ENERGIE JAKO ZDROJ PRO VRTY TEPELNÉHO ČERPADLA.....	9
2.1.3 GEOTERMÁLNÍ OBLASTI ČESKÉ REPUBLIKY.....	11
2.1.4 GEOTERMÁLNÍ POTENCIÁL ČESKÉ REPUBLIKY.....	12
2.2 TEPELNÉ ČERPADLO.....	13
2.2.1 PRINCIP KOMPRESOROVÉHO OBĚHU TEPELNÝCH ČERPADEL.....	14
2.2.2 VÝMĚNÍKY.....	16
2.2.2.1 KONDENZÁTOR.....	16
2.2.2.2 VÝPARNÍK.....	17
2.3 SYSTÉMY TEPELNÝCH ČERPADEL.....	17
2.4 VÝSLEDKY STATISTICKÉHO ŠETŘENÍ ZA ROK 2009.....	18
2.5 TEPELNÁ ČERPADLA ZEMĚ – VODA.....	19
2.5.1 HORIZONTÁLNÍ VÝMĚNÍK.....	20
2.5.2 VERTIKÁLNÍ VÝMĚNÍK.....	21
2.6 TOPNÝ VÝKON TEPELNÉHO ČERPADLA.....	23
<b>3 CÍL PRÁCE.....</b>	<b>25</b>
<b>4 MATERIÁL A METODY MĚŘENÍ.....</b>	<b>25</b>
4.1 TEORETICKÝ ROZBOR.....	25
4.1.1 DIMENZOVÁNÍ VRTŮ PRO TEPELNÉ ČERPADLO.....	25
4.1.2 PŘENOS TEPLA MEZI TEPLONOSNÝM MÉDIEM A BENTONITEM / PŮDOU.....	33
4.2 MĚŘENÍ.....	35
4.2.1 POPIS MĚŘENÉ LOKALITY.....	36
4.2.2 VLASTNÍ MĚŘENÍ.....	37

<b>5 VÝSLEDKY</b> .....	<b>39</b>
5.1 ÚTLUMOVÁ HLOUBKA.....	39
5.2 PRŮBĚHY TEPLŮT V JEDNOTLIVÝCH VRTECH.....	44
5.3 TEPLOTNÍ ROZDÍLY MEZI VRTEM VT2 A REFERENČNÍM VRTEM VT9.....	49
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	<b>51</b>

# 1 Úvod

Žijeme v době, ve které se čím dál více hovoří o nedostatku tradičních zdrojů energie jako je zejména ropa, plyn nebo uhlí o jejich náročné těžbě a distribuci, efektivnosti využití a v neposlední řadě také o ekologičnosti takových to zdrojů. Je nezbytné se těmito otázkami zabývat protože například ropa je již po řadu let klíčovým zdrojem energie, kdy kolem 40 % celosvětové spotřeby energie pochází právě z ropy, z čehož na dopravě se podílí závratnými 90%. Zemní plyn se podílí 23 % na celosvětové spotřebě energie a to převážně pro vytápění a výrobu elektřiny. Uhlí se podílí na více než 23 % celosvětové energetické bilance. Je na čase si uvědomit, že částka těchto tradičních zdrojů energie uložených v Zemi je konečná a tedy je potřeba těmito zdroji šetřit.

Protože energie spotřebovaná v budovách představuje vysoký podíl celosvětově spotřebované energie, je v současnosti velký tlak na její šetření. Autor (Kopecký, 2008) uvádí celosvětovou spotřebu energie v budovách 40%. Proto se budoucí strategie zaměřuje na: a) nízkoenergetické a pasivní budovy (energetické účinnosti), b) využití obnovitelných zdrojů energie pro vytápění a chlazení budov a výroby elektřiny. Tento fakt bere na vědomí i Evropská unie o čemž svědčí i přijetí novely směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov, která posledním květnovým dnem roku 2010 vstoupila v platnost s předsevzetím výrazně snížit spotřebu energie v budovách. Cílem této novely je do roku 2020 "přinutit" členské státy Evropské unie, aby všechny budovy postavené od tohoto roku měly téměř nulovou spotřebu energie.



## 2 Současný stav řešné problematiky

Tato kapitola popisuje vědecké poznatky z oboru geotermální energie a mapuje technické a technologické řešení tepelných čerpadel u kterých je kladen důraz na jejich výparníky a především tedy na vertikální zemní výměníky.

### 2.1 Geotermální energie

Země je tepelný motor. Součástí tohoto tepelného motoru jsou hmota a energie. Tyto dva prvky se podílejí na jejím provozu a vyskytují se v různých formách. Hlavní materiál, který je obsažen v tomto motoru jsou horniny. Tyto horniny zajišťují přenos tepelné energie a mohou se vyskytovat v pevné nebo částečně roztavené podobě. Geotermální energii Země lze tedy považovat za soubor vzájemně propojených částečně izolovaných tepelných motorů (Elder, 1981).

Jako geotermální energie je označováno přirozené teplo země. Ve skutečnosti je zdrojem této obnovitelné energie rozpad radioaktivních prvků v zemském nitru. Celkový tok tepelné energie k povrchu je 33 TW, sopky uvolňují 0,3 TW. Měrný tok tepelné energie na 99% zemského povrchu dosahuje hodnoty  $60 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Existují však anomální oblasti zejména v okolí aktivních sopečných zón, kde horniny obsahují velké množství radioaktivních prvků s měrným tepelným tokem dosahujícím hodnoty až  $150 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Tyto lokality vytvářejí příznivé podmínky k výstavbě geotermálních elektráren (Kaminský a Vrtek, 1998).

Ve svrchní části zemské kůry stoupá její teplota podle geotermického stupně, tj. v průměru o  $1^\circ\text{C}$  každých 33 m. V hloubce 3 km je to tedy asi  $100^\circ\text{C}$  v hloubce 10 km již  $300^\circ\text{C}$ . To ovšem neplatí obecně. Tak například v České republice mají nejbližší, jen 5 km k horninám o teplotě  $130^\circ\text{C}$  obyvatelé Teplic, Karlových Varů a Ostravy. Naopak obyvatelé Brna by museli k dosažení této teploty vrtat do hloubky 13 km (Kaminský a Vrtek, 1998).

O složení vnitřních částí země příliš mnoho přímých informací nemáme. Hluběji než důlní díla a vrty, k hlubším patřům zemské kůry, pronikají jen geofyzikální aparatury. O vlastnostech ještě hlubších částí Země se dovídáme jen

z charakteru magnetického a gravitačního pole (Kaminský a Vrtek, 1998).

Tepelný potenciál zemského nitra je možné odhadnout na  $10^{17}$  megawattroky (MW<sub>r</sub>). Tato ohromná zásoba energie není samozřejmě stoprocentně využitelná, avšak přesto představuje energii, jejíž využití je v začátcích a v blízké budoucnosti o ní lidstvo bude bojovat (Myslil, 2009).

Teplo Země je možno získat nejčastěji využitím fluid cirkulujících v zemské kůře. Těmito fluidy jsou plyny, vodní pára, podzemní vody. Je ovšem možno využít i přímo tepla samotných hornin. Z hlediska geotermálních struktur a využití fluid dělí Myslil a kol. (2007) geotermální systémy takto:

- hydrotermální systémy s vysokou tepelnou entalpií. Jsou to systémy s vysokým vodním tlakem, systémy s vodní parou a systémy s přehřátou vodou,
- hydrotermální systémy s nižší tepelnou entalpií, což jsou zvodně s horkou vodou (nad 100 °C) teplou vodou (40–100 °C), zvodně nízkoteplotní (25–40 °C) a termální prameny s teplotou vod nad 20 °C,
- petrofyzikální systémy, jež mají zakonzervované teplo v horninách, magmatická tělesa a suché zemské teplo (Hot Dry Rock – HDR, Fractured Hot Rock – FHR),
- mělké geotermální systémy do teploty 25 °C a do hloubky cca 400 m. Jsou to zemní kolektory, svislé kolektory ve vrtech, podzemní voda ve vrtech a studních,
- jiné systémy, kam patří vrty hlubší než 400 m, betonové piloty nebo základy staveb, sezónní ukládání tepla v horninách v kombinaci s jinými alternativními zdroji, ukládání tepla ve zvodních, teplo v podzemních prostorách (v šachtách, tunelech apod.), teplo povrchových vod, přímé využívání tepla vzduchu prohřátého slunečním zářením. Systémy hlubokých vrtů pro velké odběratele pro 2 MW tepelného výkonu. Ty se v posledních letech uplatňují hlavně v Německu, Švýcarsku, Rakousku a Itálii. Systém je založen na spojení principu využití vyšších teplot zemského tepla v hloubkách 3 km, kde jsou teploty nad 100 °C se sezónním ukládáním tepla ze solárních baterií a akumulaci tepla v nadzemních rezervoárech. Jednou z hlavních podmínek pro uplatnění tohoto systému je vhodná lokalizace hlubokého vrtu, využití stávajícího systému vytápění, což zahrnuje vhodný tepelný spád otopného systému i malou vzdálenost tepelného zdroje od uživatele.

Podle Myslila (2009) se dělí geotermální systémy dle geologického hlediska na:

- systémy vázané na oblasti recentního vulkanismu a příhodných geotermálních struktur, nebo detailněji na magmatické, horké suché a konvektivní hydrotermální,

- systémy pánevních struktur přírodní konvektivní hydrotermální a pánevní struktury (geokomprimované termální systémy).

Ovšem (Myslil a kol., 2007) dělí zdroje zemského tepla takto:

- a) původní teplo Zemského tělesa které zbylo z kosmické etapy jeho vzniku. Kolik jej zbylo, to přesně nevíme,
- b) sluneční záření. Je sice obrovským zdrojem tepelné energie, ohřívá však pouze povrch,
- c) rozpad radioaktivních prvků. Nepochybuje se o tom, že rozpad radioaktivních prvků je hlavním producentem tepla v zemské kůře. Od vzniku Země uran samotný vyráběl přibližně 60 % vnitřní tepelné energie a doplňovaly jej thorium a radioaktivní draslík,
- d) tepelná energie vznikající přeměnou z kinetické energie při tektonických pohybech v zemské kůře. Takové pochody jsou jistě vážným kandidátem na dodávání určitého množství tepla, avšak přesnější výpočty nemáme k dispozici,
- e) teplo vznikající stlačováním podložních vrstev vahou nadloží a náhlým uvolněním tlaků. Pro takový mechanismus platí totéž, jako pro výše uvedený zdroj,
- d) energie pohlcených seizmických vln. Starší modely a odhady vypadaly velmi optimisticky, ještě B. Gutenberg ve dvacátých letech 20. století udával hodnotu tepla buzeního adsorpce seizmických vln na  $10^{10} \text{ cal.s}^{-1}$ . Novější odhady jsou podstatně nižší. Upozorňuje se též na to, že energie tektonických pochodů přenášených na seizmické vlny je ve své podstatě druhotná a vyplývá z nerovnoměrného rozdělení teplot. Proto je nutno hledat příčinu ve své podstatě primární,
- e) fyzikálněchemické reakce, které uvolňují teplo, tedy reakce exotermní. Je to běžná oxidace, při které se prvky slučují s kyslíkem a přecházejí z nižších mocností do vyšších. V hlubších partiích kůry navíc dochází k rekrystalizaci minerálů a jejich změn na jiné, o větší hustotě. Všechny takové procesy jako možné producenty tepla není možné podceňovat a v poslední době se jim přisuzuje podstatný význam,
- f) energie uvolňující se při dopadu meteoritů. Zde se kinetická energie mění na tepelnou, což je prokázáno tavením hornin v místě impaktu. Značná část energie přechází přímo do atmosféry při brzdění tělesa před pádem. Při dopadu se povrch zahřeje, není však jasné, kolik energie se vyzáří do prostoru a kolik se zadrží v Zemi. Pokud jsou k dispozici výpočty, shodují se v tom, že produkce tepelné energie je spíše lokální záležitostí a že její celkové množství produkované na zemském povrchu je jen nepatrným zlomkem třeba i ve srovnání se sluneční energií. Musíme ovšem vzít v úvahu, že v raných dobách geologické historie byly

dopady mimozemských těles mnohem četnější, uvádí se dokonce, že před třemi miliardami let bylo bombardování Země desetkrát až stokrát intenzivnější než dnes,

g) energie slapových sil produkovaná třením vodních mas o sebe i o pevný zemský povrch. Takový zdroj energie nepochybně existuje, jeho kvantitativní vyjádření je však obtížné a tak má pouze teoretický význam.

Podle teploty kapaliny lze systémy využívající geotermální zdroje rozdělit na (Drahokoupilová, 2008):

vysokoteplotní – teplota kapaliny je nad 150 °C

středně teplotní – teplota se pohybuje od 90 – 150 °C

nízkoteplotní – teplota je pod hranicí 90 °

Geotermální zdroje byly rozděleny na zdroje s nízkou, střední nebo vysokou entalpií, podle jejich teploty zásobníku. Avšak tyto používané teplotní rozsahy jsou arbitrární a nejsou obecně dohodnuta. Teplota se používá jako zařazující parametr, protože to je veličina jednoduchá pro měření a pochopení. Kromě toho, určením samotné teploty či entalpie nemusí být jednoznačné vymezení geotermálních zdrojů, protože až určení dvou na sobě nezávislých veličin definuje termodynamický stav tekutiny. Geotermální energie je již ve formě tepla a z termodynamického pohledu, práce je mnohem užitečnější, než teplo, protože ne všechno teplo může být převedeno na práci. Proto by se geotermální zdroje měly zařazovat podle jejich exergie, čili jejich mírou schopnosti vykonávat práci (Hepbasli, 2006).

Autor Lee navrhl nový parametr, takzvaný specifický index exergie (SExI) pro lepší klasifikaci a hodnocení (Hepbasli, 2006):

$$\text{SExI} = \frac{h_{brine} - 273,16 s_{brine}}{1192} \quad [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}] \quad (2.1)$$

Po dosazení parametrů  $h_{brine}$  a  $s_{brine}$  což jsou hodnoty entalpie a entropie použité solanky, se dostaneme do určité oblasti Mollierova  $h - s$  diagramu. Tyto oblasti jsou vymezeny přímkami  $\text{SExI} = 0,5$  a  $\text{SExI} = 0,05$ . Jednotlivé oblasti pak klasifikují geotermální zdroj takto (Hepbasli, 2006):

- $SExI < 0,05$  pro nízko-potencionální zdroj,
- $0,05 \leq SExI < 0,5$  pro středně-potencionální zdroj,
- $SExI \geq 0,5$  pro vysoko-potencionální zdroj.

Abychom mohli dosadit parametry  $h_{brine}$  a  $S_{brine}$ , poslouží nám tyto vzorce (Hepbasli, 2006):

$$h_{brine} = \frac{\sum_i^n m_{wi} \cdot h_{wi}}{\sum_i^n m_{wi}} \quad [kJ.kg^{-1}] \quad (2.2)$$

$$S_{brine} = \frac{\sum_i^n m_{wi} \cdot S_{wi}}{\sum_i^n m_{wi}} \quad [kJ.kg^{-1}.K^{-1}] \quad (2.3)$$

kde:  $m_{wi}$  – hmotnostní průtok solanky  $[kg.s^{-1}]$   
 $h_{wi}$  – entalpie  $[kJ.kg^{-1}]$   
 $S_{wi}$  – entropie  $[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$

Výše uvedený postup a klasifikace geotermálních zdrojů byla již použita některými vyšetřovateli ve svých studiích. Analýza exergie byla provedena v okresním městě Ahuachapa'n (nachází se na západě Salvadoru) a v Berlíně. Vynesení termodynamických podmínek pro obě oblasti do Mollierova  $h - s$  diagramu a výpočtu konkrétního indexu exergie, byla obě území klasifikována jako středně-potencionální zdroje geotermální energie. Dále byl použit specifický index exergie na Balcovu oblast, která se nachází v západní části Turecka. Data z této oblasti se měřila v osmi studních, které se v této oblasti vyskytují a v danou chvíli byly v provozu. Pomocí výše uvedených rovnic byla tato oblast shledána jako středně-potencionální, jelikož  $SExI$  bylo 0,07. Ozgener a kol. určuje také  $SExI$  hodnoty pro geotermální oblasti v Turecku Gonen a Salihli, jako 0,025 a 0,049. Těmito hodnotami se oblasti řadí do nízko-potencionálních geotermálních zdrojů (Hepbasli, 2006).

Přímé využívání geotermální tepelné energie není v ČR pravděpodobně prováděno.



Projekty na případnou výrobu elektrické energie nepřímo z energie geotermální jsou zatím ve stádiu příprav a úvah. Nejdále zatím postoupil projekt využití geotermální energie v Litoměřicích. Na úspěchu tohoto projektu, kde je počítáno s kombinovanou výrobou elektrické a tepelné energie, nepochybně závisí rozvoj využívání této energie v další lokalitách ČR. V tomto případě se využívá metoda Hot dry rock. Primárním zdrojem tepla je zemská kůra, kde je v závislosti na hloubce dostatečně vysoká teplota. Dostatečně vysokou teplotou se rozumí 150 stupňů Celsia. Jednoduchá poučka – každý kilometr do hloubky by měl znamenat nárůst teploty hornin o třicet stupňů Celsia (to ovšem nemusí vždy platit, v Austrálii se například v 5000 metrech navrtaly teploty kolem 280 stupňů). Požadovaných 150 stupňů by tedy mělo být někde v hloubce 5000 metrů.

Specifické je využití termálních vod v lázních a bazénech. Podle Myslíla a kol. (2007) je v současné době geotermální energie využívána v 11 hlavních lázeňských centrech.

Odhaduje se, že užití geotermální energie v lázních a bazénech je okolo 90 TJ/rok při kapacitě 4,5 MWt (Bufka a kol., 2009).

## 2.1.1 Tepelné vlastnosti hornin

Základními tepelnými vlastnostmi hornin jsou tepelná vodivost  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] – což je schopnost výměny tepla mezi sousedními částicemi horniny, objemová tepelná kapacita  $C = c \cdot \rho$  [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ] - schopnost jednotkového objemu horniny pohlcovat a vyzařovat tepelnou energii ( $c$  = specifické teplo horniny,  $\rho$  = objemová hmotnost horniny) a teplotní vodivost (tepelná difuzivita)  $a$  [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ] - charakterizující rychlost šíření teplotních změn.

Protože hornina je nehomogenní trojfázový systém, má jiné tepelné vlastnosti rozlehlý skalní blok, jiné jeho část ležící mezi největšími puklinami a jiné z ní odebrané vrtné jádro. Tepelná a teplotní vodivost horniny závisí kromě petrografického typu, porózity a vlhkosti i na jejím prostorovém uspořádání, proto má velký rozptyl a je v každém směru jiná (Čížek, 2005).

Tepelné vodivosti některých hornin a zemin podle Mareše jsou uvedené v tab. 1

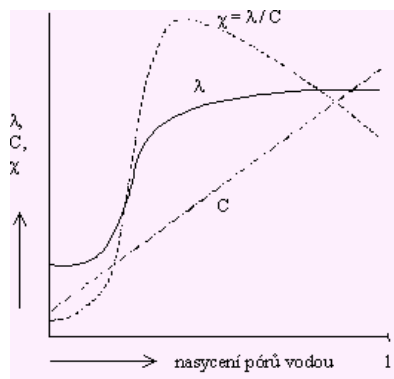
Tab. 1 Tepelné vodivosti hornin

			$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	
			od	do
horniny	vyvěřelé	granit	2	4
		syenit	1,6	3,3
		diorit	1,9	2,8
		gabro	2,2	2,4
	metamorfované	břidlice	1,3	2,1
		rula	1,7	3,3
		amfibolit	1,9	2,4
	usazené	vápenec	0,8	3
		dolomit	0,8	4,5
		pískovec	0,8	7,1
		prachovec	1,5	2,5
		jilovec	1,8	2,8
		písek	0,3	3,5
jíl	0,4	1,2		

Zdroj: Mareš, S., a kol. *Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii*. SNTL, Praha, 1983. 23-25 s.

Tepelná vodivost je u půd charakteristika závislá na mineralogickém složení, obsahu humusu, vlhkosti a na textuře a stuktuře půdy. Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti  $\theta$  vyplývá ze schematického obr. 1. Při velmi nízké vlhkosti se přenáší teplo na bodových kontaktech vodivých elementů (látek s vysokou hodnotou  $\lambda$ ). Při vzniku vodních filmů se objeví prudký vzrůst dotykových ploch a  $\lambda$  rychle vzrůstá s vlhkostí. Při dalším zvyšování vlhkosti jen pozvolně vzrůstají dotykové plochy a při vysoké vlhkosti je vzrůst  $\lambda$  způsobován pouze zmenšením obsahu vzduchu (Kutílek, 1978).

Obr. 1 Obecná závislost tepelných charakteristik na vlhkosti půdy  $\theta$



Zdroj: Kutílek, M.. *Vodohospodářská pedologie*. SNTL, Praha, 1978. 90 s.

Podzemní voda má tepelnou vodivost čtyřikrát menší než horninové zrno ( $\lambda \sim 0,56 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) a dvakrát větší objemové specifické teplo ( $4,2 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ), takže její obsah v hornině významně ovlivňuje funkci zemních tepelných výměníků a dosah teplotního ovlivnění horniny. V hornině mrzne při teplotě asi  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$  a obrovské skupenské teplo tání, které se přitom uvolňuje ( $333\,700 \text{ kJm}^{-3}$ ), se výrazně podílí na teple dodávaném do tepelných čerpadel, protože teplonosné médium vstupující do zemních tepelných výměníků mívá teplotu  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  a nižší. Led má tepelnou vodivost čtyřikrát větší než voda ( $2,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) a o polovinu menší objemové specifické teplo ( $1,9 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ) (Čížek, 2005).

### **2.1.2 Sluneční záření jako zdroj tepelné energie pro vrty tepelného čerpadla**

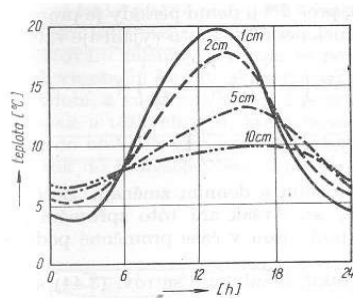
U problematiky slunečního záření jako zdroje tepla pro vrty tepelného čerpadla se ztotožňují se závěry autora Kutílka.

Pro útlum tepelné vlny v půdě je charakteristická tzv. útlumová hloubka  $L$  (obr. 2), která závisí na vlastnostech půdy a na periodě kolísání teploty. Pro roční kolísání teploty je hodnota  $L$  zhruba 19x větší, než je útlumová hloubka pro denní kolísání. V hloubce  $z = L$  je amplituda 0,37 amplitudy povrchu a v hloubce  $z = 3L$  se amplituda snižuje zhruba na 0,05 amplitudy povrchu. Vezmeme-li jako střední hodnoty půdy tepelnou vodivost  $0,95 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a tepelnou kapacitu  $C = 1,9 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ , potom pro denní kolísání teploty je  $L = 12 \text{ cm}$ , pro roční  $L = 229 \text{ cm}$  a při denním kolísání teploty na povrchu se prakticky neprojeví denní výkyvy teploty již v hloubce 36 cm (Kutílek, 1978.)

A praxe je ještě složitější, kdy finální celkový přítok radiační energie se sníží o energii spotřebovanou výparem a transpirací a o energii spotřebovanou radiací do atmosféry a teprve její zbytek se přenáší do půdy.

A v diskuzi na portálu tzb-info upozorňuje RnDr. Petr Čížek na další fakt a sice na fázový posun, který nastává při pohybu tepla do země. Jinými slovy, změna teploty v hloubce je časově posunuta oproti změně teploty na povrchu. Teplo se totiž nepohybuje ve stejnorodém prostředí, ale v měnící se hornině, jejíž teplotní vlastnosti se s hloubkou mění.

Obr. 2 Kolísání teploty závislosti na hloubce

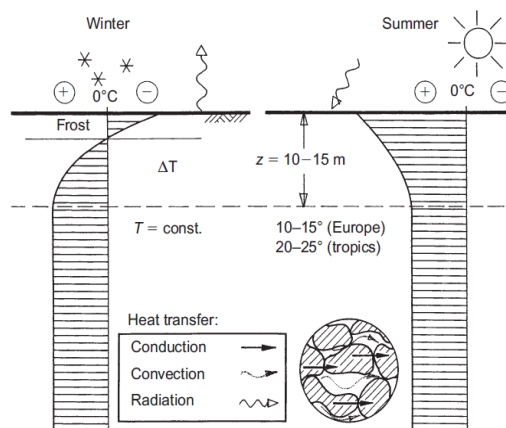


Zdroj: Kutílek, M.. *Vodohospodářská pedologie*. SNTL, Praha, 1978. 93 s.

Sluneční záření dodává na povrch Země v našich podmínkách přibližně 100 až 800 W.m<sup>-2</sup>. Toto teplo proniká jen mělce pod povrch. Při teplotě 20 °C na povrchu a 10 °C v hloubce 2 m se do hloubky 1 m pod povrch dostává jen 0,08 W.m<sup>-2</sup>, do hloubky 2 m jen 0,04 a do hloubky 4 m pouze 0,01 W.m<sup>-2</sup> (Myslil a kol., 2007).

Obdobné závěry má i autor Brandl. Ve většině regionech Evropy zůstávají sezónní teploty země relativně neměnné od hloubky 10-15 m. Hodnoty mezi 10°C a 15°C převládají do hloubky asi 50 m (obr. 3). Tyto teploty umožňují ekonomické vytápění a chlazení pomocí termo-aktivních pozemních staveb a představují ideální podmínky pro tepelná čerpadla. V tropech se konstantní teplota země v hloubce více než 10-15 m pod povrchem pohybuje mezi 20°C a 25°C (místy až 28°C), které ještě umožňují chlazení budovy (Brandl, 2006).

Obr. 3 Přenos tepla a geotermální situace v daných hloubkách



Zdroj: Brandl, H. *Energy foundations and other thermo-active ground structures*.

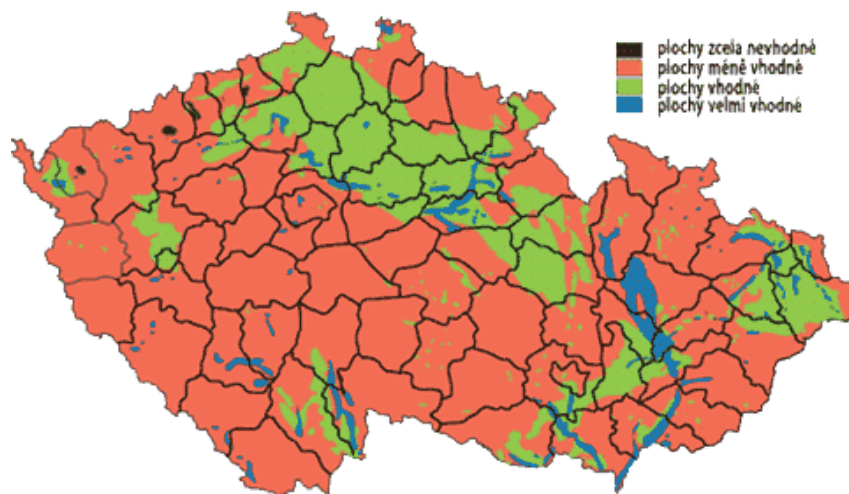
*Géotechnique*, 56, 2, 2008. 90 s.

### 2.1.3 Geotermální oblasti České republiky

Nejvhodnější oblasti a struktury pro využití geotermální energie jsou (obr.4) (Drahokoupilová, 2008):

- České středohoří – Litoměřice,
- křížení oháreckého riftu s labskou zónou Ústí nad Labem – Děčín,
- Podkrkonoší, západní svahy Orlických hor, Polická pánev,
- Vídeňská pánev, jižní části karpatských příkrovů,
- Doupovské hory, ohárecký rift,
- karlovarský žulový masiv,
- plzeňská pánev,
- chebská pánev,
- Železné hory,
- Severomoravský úval, Ostravsko.

Obr. 4 Mapka potencionálních ploch pro využitit geotermální energie



Zdroj: <http://www.spvez.cz/pages/geoterm.htm>



## 2.1.4 Geotermální potenciál České republiky

Autoři Myslíl a kol. (2007) uvádí vzorec pro geotermální potenciál:

$$E_{th} = c_G \cdot \rho_G \cdot V \cdot (T_G - T_S) \quad [\text{J}] \quad (2.4)$$

kde:  $c_G$  – specifická tepelná kapacita hornin  $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

$\rho_G$  – hmotnost hornin  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

$V$  – objem hornin  $[\text{m}^3]$

$T_G$  – teplota hornin v dané hloubce  $[\text{K}]$

$T_S$  – teplota na povrchu země  $[\text{K}]$

dosadíme-li parametry hornin pro naše území  $c_G = 840 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\rho_G = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  
 $T_S = 283,15 \text{ K}$ ,  $T_G$  v rozmezí 468,15 – 478,15 K

pro blok krystalických hornin 4km mocný na ploše 68000km<sup>2</sup> pro naše území lze tedy vypočítat geotermální teplo:

$$E_{th} = 118 \cdot 10^{21} \text{ J}$$

Uvažujeme využitelný geotermální potenciál jen hodnotou 50 % z výše uvedené vypočítané hodnoty, tedy 59 000 000 PJ (pro srovnání, roční spotřeba primárních energetických zdrojů v ČR je 1 800 PJ) (Myslíl a kol., 2007).

Uvažujeme-li minimální mocnost jen 2 km, tj. od 3 do 5 km, tedy teplotně pouze první dvě vrstvy, potom  $E_{GTM_{min}} = 54,94 \cdot 10^{21} \text{ J}$  a z toho využitelné zemské teplo  $E_{GTV_{vyuzitelne}} = 27,47 \cdot 10^6 \text{ PJ}$ . I tato hodnota je několikatisíckrát vyšší, než je celková potřeba energie v ČR za rok anebo odpovídá energií na několik set let (Myslíl a kol., 2007).

Autor (Myslil, 2009) dělí geotermální potenciál do těchto čtyř kategorií:

- **energie z hydrotermálních zdrojů vysoké teploty (>130°C) pro výrobu elektrické energie:**
  - odhad potenciálu .....10 MW
- **energie tepla hornin ("suché zemské teplo") vysoké teploty (>130°C) pro výrobu elektrické energie:**
  - odhad teoretického potenciálu (produkce tepla hornin z 1 km<sup>3</sup> až 30 MW elektrické energie po dobu cca 30 roků) ....2 385 900 MW
  - pro hloubku vrtů do 5km na vytypovaných lokalitách celkem 847 lokalit s výkonem 4 MW (dva až tři vrty )
  - odhad využitelného potenciálu ..... 3 388 MW cca 1,22 . 10<sup>4</sup> GWh, což je zcela zanedbatelná část vypočteného celkového tepelného potenciálu krystalických hornin
- **energie z hydro termálních zdrojů vyšší teploty (<130°C) pro výrobu tepla (odběr tepla >5 K)**
  - odhad potenciálu .....25 MW
- **geotermální energie pro nízkoteplotní systémy (tepelná čerpadla)**
  - odhad potenciálu.....primární zdroj horniny..... 8 750 MW
  - odhad potenciálu.....primární zdroj podzemní voda..... 2 390 MW

V současné době se lidstvo již naučilo využívat zemskou geotermální energii přenášenou hlavně vodou a zemské teplo nízkoteplotní pomocí tepelných čerpadel.

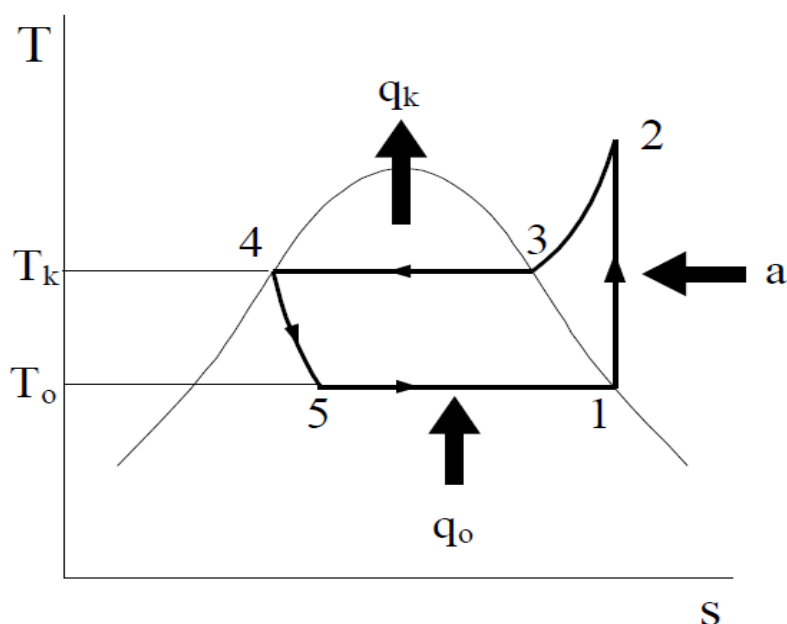
## 2.2 Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlo je zařízení, které umožňuje získávat teplo z tzv. nízkopotenciálních zdrojů. Takovým zdrojem může být např. voda v řece, země nebo i okolní vzduch. Všechny tyto zdroje mají obvykle nižší teplotu než je ta, kterou potřebujeme získat, avšak tepelné čerpadlo z nich dokáže pomocí cyklu komprese a expanze plynu získat teplo a vytvořit teplotu kolem 55 °C.

## 2.2.1 Princip kompresorového oběhu tepelných čerpadel

Zařízení se skládá z kompresoru K, který nasává páry chladiva o tlaku  $p_1$  a teplotě  $T_1$  a stlačuje je na tlak  $p_2$  a teplotu  $T_2$ . V kondenzátoru C, který je povrchovým výměníkem, se parám odvádí při stálém tlaku  $p_2$  měrné teplo  $q_{2,3}$  tak, že se ochladí vodou nebo vzduchem. Z kondenzátoru vystupuje sytá kapalina o teplotě  $T_3$ . Tato kapalina se přivádí do redukčního ventilu RV, kde se škrtí opět na tlak  $p_1$  a teplotu  $T_1$ . Tím vznikne mokrá pára, která se přivádí do výparníku V. Ve výparníku se odebírá při stálém tlaku  $p_1$  chlazené látce měrné teplo  $q_{1,4}$ , které se předává mokré páře, tato se vysušuje, takže na výstupu z výparníku je pára sytá. Tuto opět nasává kompresor K a cyklus se opakuje. Cyklus je levotočivý, práci musíme kompresoru dodávat. Předpokládáme-li, že kompresor pracuje adiabaticky vratně, pak oběh se stává ze dvou izobar, izoentropie a adiabatického škrcení, dle obr. 5. (Neuberger a kol., 2007).

Obr. 5 Oběh kompresorového okruhu v T-s diagramu



Zdroj: <http://www.zboriljosef.cz/files/Obnovitelne%20zdroje%20energie.pdf>

Jednotlivé změny okruhu:

1-2: izoentropická komprese (K)

$$q_{1,2} = 0$$

$$[\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.5)$$

2-4: izobarický odvod tepla (C)

$$q_{2,4} = i_2 - i_4 \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.6)$$

4-5: izoentalpické škrcení (RV)

$$i_4 = i_5 \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.7)$$

5-1: izotermicko-izobarický přívod tepla (V)

$$q_{5,1} = i_1 - i_5 = i_1 - i_4 \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.8)$$

Měrná technická práce kompresoru:

$$at_{1,2} = i_2 - i_1 \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.9)$$

Efektivita provozu energetických zařízení se běžně porovnává pomocí účinnosti. U tepelných čerpadel tomu tak není. Jako veličina, která se používá pro srovnání efektivity provozu tepelných čerpadel, slouží tzv. topný faktor. Topný faktor  $\varepsilon_T$  je bezrozměrná veličina, která je obecně dána poměrem tepelného výkonu  $Q_\tau$  na výstupu tepelného čerpadla k příkonu kompresoru  $P_H$ , resp. poměrem energie dodané pro ohřev vody  $E_T$  k vložené energii pro pohon kompresoru  $E_H$ :

$$\varepsilon_T = \frac{Q_\tau}{P_H} = \frac{E_T}{E_H} \quad [-] \quad (2.10)$$

Topný faktor je dán poměrem tepelného výkonu  $P_{\text{top}}$  k příkonu kompresoru  $P_{\text{el}}$ , resp. poměrem dodané energie pro ohřev k energii spotřebované pro pohon tepelného čerpadla.

Topný faktor rovněž můžeme vyjádřit rovnicí:

$$\varepsilon_T = k \cdot \frac{T_k}{T_k - T_0} \quad [-] \quad (2.11)$$

kde:  $k$  – je korekční činitel respektující skutečný oběh

( $k = 0,4 - 0,6$ ) [-]

$T_k$  – je kondenzační teplota [K]

$T_0$  – je vypařovací teplota [K]

Velikost topného faktoru se běžně pohybuje v rozsahu  $\varepsilon_T = 3 \div 4$ . To znamená, že z 1 kWh energie spotřebované k pohonu tepelného čerpadla se vyrobí (3 ÷ 4) kWh tepelné energie. Čím vyšší je tedy hodnota topného faktoru, tím více se vyrobí tepelné energie.

## 2.2.2 Výměníky

V kompresorovém oběhu jsou dva tepelné výměníky. Jsou to kondenzátor a výparník. Tyto výměníky slouží k výměně tepla, v případě kondenzátoru mezi chladivem a médiem v topném systému a v případě výparníku mezi médiem přiváděným na výparník a chladivem.

### 2.2.2.1 Kondenzátor

Kondenzátor je tepelný výměník pro chlazení par chladiva a jejich přeměnu na kapalinu (kondenzát). V kondenzátoru dochází k předání kondenzačního tepla par chladiva za konstantního tlaku.

Kondenzátor musí být konstrukčně upraven tak, aby trvale snesl kolísání tlaků chladiva v rozsahu 0 až 2,5 MPa. Nulový atmosferický tlak v tomto výměníku tepla, po napuštění chladivem, v podstatě nikdy nemůže nastat. Výměník je na straně topného systému, který bude mít vždy alespoň pokojovou teplotu a této teplotě pak odpovídá tlak chladiva cca 1 MPa (Navrátil, 1997).

Kondenzátory můžeme rozdělit na:

- **Kondenzátory chlazené vzduchem:** jejich tvar je upraven do tvaru žeber či lamel, kterými buď přirozeně nebo nuceně proudí vzduch a tak odvádí potřebný kondenzační výkon.
- **Kondenzátory chlazené vodou:** jsou nejpoužívanější, podle provedení buď deskové nebo trubkové.
- **Kondenzátory odpařovací:** teplosměnná plocha výměníku je sprchována vodou, následně se její část odpaří, čímž se ochlazuje povrch výměníku. V některých případech se odpařování zlepšujeme prouděním vzduchu od ventilátorů.



### 2.2.2.2 Výparník

Výparník je tepelný výměník, který slouží k odebrání tepla z okolního prostředí expanzí tj. vypařením chladiva. Konstrukce výparníků musí odolávat vlivům použitého chladiva nejen z hlediska tlaků, ale také z hlediska chemického a korozivního působení (Navrátil, 1997).

Výparníky můžeme dělit na:

- **Zaplavené výparníky:** u tohoto typu výparníku je prostor chladiva zaplaven kapalným chladivem a tak trvale zaplavuje teplosměnnou plochu.
- **Suché výparníky:** u tohoto typu se přivádí chladivo na teplosměnnou plochu pouze v množství, které odpovídá odpařenému.
- **Sprchový výparník:** zde se chladivo přivádí na teplosměnnou plochu v množství 4 až 8 krát větší než je množství vypařeného chladiva.

## 2.3 Systémy tepelných čerpadel

Podle toho, z jakého média je tepelná energie získávána rozlišujeme tyto základní systémy:

- VODA – VODA

Teplo z podzemní vody se získává tak, že voda je čerpána například z čerpací studny do výparníku tepelného čerpadla. V něm se ochladí a ochlazená je vrácena do druhé, vsakovací studny. Za výhody tohoto systému lze označit stálý výkon tepelného čerpadla, příznivý topný faktor a nízké pořizovací náklady. Nevýhody jsou složité technické řešení, vyšší nároky na údržbu, vyšší nároky na kvalitu, teplotu a množství vody.

- VZDUCH – VODA

Teplo obsažené ve vzduchu se využívá přímo. Jinými slovy výparníkem tepelného čerpadla přímo proudí venkovní vzduch. Výhody tohoto systému jsou nízké pořizovací náklady, snadná instalace, nenarušuje teplotní rovnováhu okolí, průměrná teplota vzduchu v topném období 3°C. Největší nevýhoda je pak závislost topného výkonu na teplotě venkovního vzduchu.

## - ZEMĚ – VODA

Teplo obsažené v zemi - tzv. geotermální teplo - se využívá nepřímo. Získává se ve výměníku tepla - zemním kolektoru, nebo zemním vrtu a převádí se cirkulačním okruhem do výparníku tepelného čerpadla pomocí teplonosné kapaliny. Používaná teplonosná kapalina je nemrznoucí a ekologicky nezávadná. Cirkulaci teplonosné kapaliny zajišťuje oběhové čerpadlo. Cirkulující kapalina se ve výparníku tepelného čerpadla ochlazuje a v zemním kolektoru se znovu ohřívá geotermálním teplem. Výhodou tohoto systému je stálý výkon tepelného čerpadla. Nevýhody pak vysoké pořizovací náklady, vysoké nároky na technické řešení kolektoru, teplota primárního okruhu - vertikální kolektor cca 0 °C, horizontální kolektoru cca -3 °C, vliv na vegetaci na povrchu kolektoru.

## 2.4 Výsledky statistického šetření za rok 2009

Šetření se zúčastnilo 28 firem, které podle odhadu tvoří 80% českého trhu. Tyto firmy dodaly v roce 2009 na český trh celkem 3 876 tepelných čerpadel. Dopočet za firmy, které se šetření nezúčastnily byl proveden na základě porovnání s daty o přiznaných podporách ze SFŽP. Bylo předpokládáno, že podíl tepelných čerpadel těchto firem na podpořených instalacích je stejný, jako jejich podíl na celém trhu. Pro tyto firmy byl pro rok 2009 odhadnut zhruba 20% podíl na trhu s přibližně 969 (výpočtovými) tepelnými čerpadly. Celkem by tedy mělo být na český trh v roce 2009 dodáno okolo 4 845 tepelných čerpadel.

*Tab. 2 Dodávka tepelných čerpadel na trh podle typu (vybrané firmy)*

	Počet	Podíl (%)	Tepelný výkon (kW)	Podíl (%)	Průměrný výkon(%)
Vzduch – vzduch	254	6,55	1 764	3,45	6,9
Vzduch – voda	1 864	48,09	25 759	50,43	13,8
Země – voda	1 531	39,50	20 899	40,92	13,7
Voda – voda	68	1,75	1 283	2,51	18,9
Jiné	159	4,10	1 373	2,69	8,6
<b>Celkem</b>	<b>3 876</b>	<b>100,00</b>	<b>51 078</b>	<b>100,00</b>	<b>13,2</b>

Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/dokumenty-tykajici-se-obnovitelnych-zdroju-energie-a-uspor-energie#p583>

## 2.5 Tepelná čerpadla ZEMĚ - VODA

Využití nízkoteplotního geotermálního potenciálu, který je dosažitelný v malých hloubkách pod povrchem z podzemní vody a nebo mělkými geotermálními vrty na "suché" zemské teplo, hlubokými jen desítky nebo stovky metrů, je možné prakticky v neomezeném množství, protože odebírají zemské teplo, které jinak uniká do atmosféry (Myslil a kol., 2007).

Uplatnění tepelných čerpadel umožňuje využití ekologického zdroje energie, i když potřebuje dodávat cca 1/3 vyrobené tepelné energie, je přesto již v současné době i ekonomické.

Při využití tepla podzemní vody je nutné potvrdit hydrogeologickým posouzením množství čerpané podzemní vody, její chemizmus, plošný rozsah odběru vody (neovlivnění stávajících využívaných zdrojů vody) a fyzikální hodnoty pro správný chod tepelného čerpadla. Pro využití "suchého" zemského tepla je nutné správně ocenit teplotní poměry každé lokality a zajistit ochrannou vzdálenost konstantního odběru tepla každého geotermálního vrtu (Myslil, 2009).

Využití nízkoteplotních zdrojů na území naší republiky sice dosud zaostává za okolními západoevropskými státy, kde je v chodu několik set tisíc tepelných čerpadel, zatímco u nás jen cca 12 tisíc s průměrnou hodnotou 10 kW, představuje již potenciál 1,2 MW (Myslil, 2009).

Uplatnění geotermální energie pro vytápění rodinných domů či jiných objektů nevyžaduje velké prostory kotelny, tepelné čerpadlo je objemově velké jako lednička. Při současném dodržení teplotních norem objektů je významně snížena potřeba tepla a tudíž i velikost tepelného čerpadla. Geotermální systém vytápění objektů uspoří 2/3 energie a tudíž návratnost vložených finančních prostředků je velmi příhodná. Odběr tepla ze země nebo z vody nijak neovlivní přírodní životní prostředí, ani nenaruší budovy či zahradu, protože primární zdroj je celý pod zemí. V každém případě je nutné volit nejvhodnější řešení pro odběr zemského tepla, aby geotermální zdroj byl správně posouzen. Odběr zemského tepla plošnými či svislými vrtnými kolektory nijak teplotně nenarušuje tepelnou bilanci, protože jen zrychlí tepelný tok v povrchových částech zemské kůry, která je hlavním zdrojem tepla pro tepelné čerpadlo (Myslil, 2009).

U tohoto systému se využívají dva zdroje nízkopotenciální tepelné energie:

- zeminy: jedná se o horniny do hloubky cca 1m
- horniny: jedná se o hloubkové vrty do hornin

### 2.5.1 Horizontální výměník

Při využití zemin jako zdroje je primární výměník ve tvaru horizontální smyčky z polyetylenových trubek kladen do mělkých výkopů na pozemku obr.6 (Ryška, 2006).

V současné době jsou známy i spirálové kolektory tzv. slinky, které se ukládají zhruba do 1,5 m hloubky. Plastové potrubí je ukládáno na dno výkopu ve spirálách.

*Obr. 6 Výměník pro tepelné čerpadlo ve tvaru smyčky uložený do výkopu v zeminách*



#### **Mezi nevýhody tohoto modelu řadíme:**

- ovlivnění povrchové vegetace vychlazováním zemin a topný faktor, který je ovlivněn střídáním ročních období - proto je nutné projektovat dostatečně dlouhý primární výměník (řádově stovky metrů), což klade vysoké nároky na rozlohu pozemku,
- pro větší topné výkony tepelného čerpadla je limitující právě rozloha pozemku,

- pozemek je zpravidla znehodnocen tím, že pod jeho velkou částí jsou uloženy trubky primárního výměníku - nelze na něm dále stavět, vysazovat stromy,
- v kamenitých zeminách nebo silně zvodnělých štěrcích jsou výkopové práce velmi nákladné, ve skalním podloží se tato aplikace neprovádí.

**Hlavní výhodou** této aplikace jsou relativně nízké investiční náklady.

## 2.5.2 Vertikální výměník

Využití hornin jako zdrojů tepla obr. 7 je velmi rozšířené po celém světě, zvláště pak v USA, Švédsku, Švýcarsku a Německu. Vrtý jsou prováděny do hloubek většinou do 150m, s aplikací finančně náročnějších technologií vrtání až 300m (Skandinávie, západní Evropa) (Ryška, 2006).

Trubka je obvykle vyrobena z plastu polyethylenu nebo měďi. Tyto materiály umožňují účinný přenos tepla z půdy do média. Svislá potrubí mohou dosahovat hloubky přibližně 150 až 300 m. Připomeňme si, že se zvyšující hloubkou se nejenom zvyšuje teplota, ale stává se stále více stabilnější. Tato skutečnost činí vertikální potrubní systémy mnohem účinnější než horizontální.

Tepelná čerpadla se systémem země/voda s použitím hloubkových vrtů jsou zvláště výhodná pro větší stavební objekty (školy, nemocnice, domovy důchodců, penziony, hotely, apod.). U těchto typů objektů všechny výše uvedené systémy většinou vykazují četná omezení, a to z hlediska (Ryška, 2006):

- přírodních podmínek (např. nízká teplota vzduchu v zimním období, požadavek na vysoký a stálý přítok podzemní vody nelze na většině pozemků splnit),
- technických požadavků (stálý topný faktor, instalace tepelného čerpadla nesmí narušovat vzhled budovy nebo pozemku),
- velikosti pozemku, která je k dispozici.

*Obr. 7 Schéma napojení hloubkových vrtů pro tepelné čerpadlo*



**Výhody jsou následující:**

- téměř stabilní topný faktor tepelného čerpadla bez ohledu na klima nebo střídání ročních období (nelze použít pouze v oblastech s permafrostem až stovky metrů hluboko - např. Sibiř, Kanada),
- výskyt podzemní vody není podmínkou fungování této aplikace,
- primární výměník z polyetylenových trubek je zapouštěn do hloubkových vrtů, jejichž nároky na velikost pozemku jsou velmi nízké,
- v porovnání s výše uvedenými aplikacemi nejuniverzálnější použití - nejsou vázány na žádné specifické geologické/hydrogeologické podmínky.

**Nevýhody jsou:**

- relativně nejvyšší investiční náklady z důvodu realizace vrtů,
- některé pozemky jsou nedostupné z hlediska dojezdu vrtné techniky,

- vrty pro tepelné čerpadlo nelze realizovat tam, kde jsou pozemky legislativně chráněny (např. lázně, vodní zdroje pro hromadné zásobování obyvatel vodou, podzemní přiváděče vody, důlní díla).

## 2.6 Topný výkon tepelného čerpadla

Topný výkon tepelného čerpadla je zpravidla dimenzován na úrovni 50 - 75% celkových tepelných ztrát stavebního objektu včetně spotřeby teplé užitkové vody. Zbývající tepelné ztráty jsou zpravidla pokryty zálohovým zdrojem tepla (většinou elektrokotel nebo plynový kotel), který je automaticky zapínán pouze v případech silných mrazů. Protože toto extrémně chladné období trvá na většině území ČR cca 15 - 20 dnů ročně, je z hlediska nákladů zpravidla výhodnější použít zálohový zdroj pro dotop, než dimenzovat tepelné čerpadlo a jeho zdroj tepla (vrty) na celkové tepelné ztráty objektu. Z hlediska běžné uživatelské praxe jsou vyhovující následující zjednodušené vztahy, kterými se nahrazují vztahy používané v literatuře z oboru chladicí techniky (Ryška, 2006):

$$P_{\text{top}} = P_{\text{chlad}} + P_{\text{el}} \quad [\text{W}] \quad (2.12)$$

kde:  $P_{\text{top}}$  – je topný výkon tepelného čerpadla [W]

$P_{\text{chlad}}$  – je chladicí výkon na výparníku [W]

$P_{\text{el}}$  – je elektrický výkon kompresoru [W]

$$P_{\text{chlad}} = m_{\tau} \cdot (\Delta i) \quad [\text{W}] \quad (2.13)$$

kde:  $m_{\tau}$  – je hmotnostní tok média přiváděného na výparník [kg.s<sup>-1</sup>]

$\Delta i$  – je rozdíl měrných entalpií média přiváděného na výparník [J.kg<sup>-1</sup>]

$$P_{el} = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad [W] \quad (2.14)$$

kde:  $U$  – je střídavé napětí na svorkách kompresoru [U]  
 $I$  – je intenzita střídavého proudu na kompresoru [A]  
 $\cos\varphi$  – je účinník = 0,8 [-]

Účinnost výroby tepla pomocí tepelného čerpadla udává jeho tzv. topný faktor (zkratka COP - Coefficient Of Performance) viz. kapitola 2.3.1.

COP pro aplikace tepelných čerpadel s vrty by se měl pohybovat v rozmezí 2,8 - 3,5. To znamená, že z 1 kW placené elektrické energie nutné pro pohon kompresoru je tepelné čerpadlo schopno vyprodukovat cca 3 kW tepla, a tedy 2 kW dodá zadarmo horninové prostředí. Právě dostatečně vysoký COP znamená, že systém země - voda byl správně dimenzován a projektovaná návratnost investice do tepelného čerpadla s vrty by zpravidla měla být dodržena (Ryška, 2006).

Tepelné čerpadlo se systémem země/voda je konstruováno tak, že při jeho chodu jsou chladivem ve výparníku odebírány z nemrznoucí směsi pouze maximálně 4°C, tzn., že  $\Delta T = 4$  K. Tento teplotní rozdíl je proto neustále odbírán nemrznoucí směsí v kolektoru po celé délce vrtu (Ryška, 2006).

Tepelné čerpadlo v průběhu vytápění objektu každý vrt nepřetržitě vychlazuje a v tomto důsledku závisí na tepelných vlastnostech hornin v okolí vrtu a tedy na dostatečné hloubce každého vrtu, zda je přísun tepla z okolních hornin dostatečně rychlý, aby nedošlo k úplnému "vymražení" vrtu, resp. okolních hornin.

V praxi se považuje za kritickou mez teplota na vstupu z vrtů do tepelného čerpadla  $t_{in} = -5^{\circ}\text{C}$ , tzn., že při teplotní deltě  $\Delta T = 4$  K bude teplota na výstupu z tepelného čerpadla  $t_{out}$  do vrtu až  $-9^{\circ}\text{C}$ . Tepelné čerpadlo je sice schopné pracovat i při nižších teplotách, avšak topný faktor klesá na hodnotu cca 2. Tento jev nastává v důsledku snížení vypařovací teploty. Sníží-li se nám vypařovací teplota, zvýší se nám měrná izoentropická práce a tedy i příkon potřebný pro pohon kompresoru. Ve vzorci 2.10 nám roste jmenovatel, výsledná hodnota zlomku nám bude klesat a tedy i celkové COP.



### **3 Cíl práce**

Cílem této práce je popsat teplotní pole probíhající ve vrtech pro tepelné čerpadlo. Pro splnění tohoto cíle si stanovuji tyto dílčí úkoly:

- určit útlumovou hloubku pro danou lokalitu, porovnat výsledek s naměřenými daty,
- z naměřených hodnot popsat teploty probíhající ve vrtech v jednotlivých sledovaných hloubkách,
- určit životnost vrtů z hlediska využitelnosti,
- popsat difference teplot mezi jedním zvoleným vrtem a referenčním vrtem pro jednotlivé hloubky,
- veškeré dosažené výsledky graficky zpracovat.

### **4 Materiál a metody měření**

Tato kapitola ve své první části shrnuje teoretické poznatky z oblasti přenosu tepla v horninách a uvádí základní výpočtové vztahy. Ve druhé části této kapitoly je prostor věnován místnímu šetření, vlastnímu měření a metodice zpracování dat.

#### **4.1 Teoretický rozbor**

V této části práce popisují teoretické postupy při procesech přenosu tepla v půdě, zde čerpám zejména z poznatků autorů Brandla a Ryšky, kteří tuto problematiku již dostatečně analyzovali.

##### **4.1.1 Dimenzování vrtů pro tepelné čerpadlo**

Do dimenzování vrtů zahrnuje (Ryška, 2006):

- stanovení počtu a hloubky každého vrtu,
- stanovení vzdálenosti mezi dvěma a více vrty,
- stanovení způsobu rozmístění tří a více vrtů.

Pro dimenzování vrtů pro tepelné čerpadlo je základním kamenem pochopení jakými způsoby se teplo v půdě přenáší. Půda je členitý systém s komplexním přenosovým mechanismem. Přenos tepla v půdě je zajišťován těmito způsoby:

- vedením,
- zářením,
- prouděním,
- odpařováním a kondenzací,
- iontovými výměnami,
- zmrazovacími – rozmrazovacími procesy.

Přenos tepla v půdě se uskutečňuje zejména vedením a prouděním. V případě, že je v určité hloubce vodní hladina, může docházet k přestupu tepla formou odpařování či kondenzace. V půdě záření přispívá jen nepatrně k přenosu tepla, podíl přestupu tepla v písku činí 1% z celkového přenosu tepla. Zmrazováním a rozmrazováním může rovněž docházet k přestupu tepla, ale těmito způsoby je dobré se vyvarovat v souvislosti s termo-aktivními podzemními stavbami jako jsou vrty (Brandl, 2006).

Přenos tepla prouděním dochází v termo-dynamických systémech, které se vůči sobě pohybují. V zemi, kde statickou složkou je půda, tvoří dynamickou složku voda nebo plyn. Prouděním těchto dvou medií dochází k přestupu tepla. Přenos tepla proudící tekutiny může být popsán (Brandl, 2006):

$$\dot{q}_{l, \text{conv}} = c_w \cdot \rho_w \cdot \bar{v}_w (T - T') \quad (4.1)$$

kde:	$c_w$ – je měrná tepelná kapacita vody v půdě	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
	$\rho_w$ – je hustota vody v půdě	[kg.m <sup>-3</sup> ]
	$v_w$ – je vektor rychlosti proudící vody	[m.s <sup>-1</sup> ]
	$T'$ – je referenční teplota	[K]

Podobnou rovnici můžeme napsat pro přenos tepla proudícího plynu (páry) (Brandl, 2006):

$$\dot{q}_{v, \text{conv}} = c_v \cdot \rho_v \cdot \bar{v}_v (T - T') \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (4.2)$$

kde:  $c_v$  – je měrná tepelná kapacita par obsažených v půdě  $[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$   
 $\rho_v$  – je hustota par v půdě  $[\text{kg.m}^{-3}]$   
 $v_w$  – je vektor rychlosti proudící páry  $[\text{m.s}^{-1}]$   
 $T'$  – je referenční teplota  $[\text{K}]$

K latentnímu přestupu tepla dochází v důledku změny skupenství vody (odpařováním) a závisí především na množství vodních par vyskytujících se v půdních pórech. Tento obsah se zvětšuje úměrně s klesajícím obsahem vody. Tento přestup může být vyjádřen takto (Brandl, 2006):

$$\dot{q}_{\text{lat}} = L_0 \cdot \rho_w \cdot \bar{v}_v \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (4.3)$$

kde:  $L_0$  – je latentní teplo vypařování při teplotě  $T'$   $[\text{J.kg}^{-1}]$

Vedení tepla je proces, při němž energie přechází z jednoho regionu do jiného molekulárním převodem, kdy prostřednictvím srážek jednotlivých částic se předává pohybová energie. Podle Fourierova zákona, množství tepla  $Q$ , které projde plochou  $S$  za čas  $\tau$  se označuje jako hustota tepelného toku a proto můžeme psát (Brandl, 2006):

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

kde:  $\lambda$  – je tepelná vodivost  $[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$   
 $\partial T / \partial n$  – je teplotní gradient ve směru proudění  $n$   $[\text{K.m}^{-1}]$

Celkový přenos tepla v půdě  $q_{\text{tot}}$  tak můžeme definovat jako:

$$\dot{q}_{\text{tot}} = \dot{q}_{\text{cond}} + \dot{q}_{1, \text{conv}} + \dot{q}_{v, \text{conv}} + \dot{q}_{\text{lat}} \quad (4.5)$$

kde:  $\dot{q}_{\text{cond}}$  – je tepelný tok způsobený vedením tepla v půdě  $[\text{W.m}^{-2}]$   
 $\dot{q}_{1, \text{conv}}$  – je tepelný tok způsobený prouděním vody v půdě  $[\text{W.m}^{-2}]$

$\dot{q}_{v, \text{conv}}$  – je tepelný tok způsobený prouděním plynu v půdě [W.m<sup>-2</sup>]

$\dot{q}_{\text{lat}}$  – je tepelný tok způsobený změnou skupenství vody v

půdě [W.m<sup>-2</sup>]

Pokud rovnici číslo 4.4 napíšem v pravoúhlých souřadnicích, dostaneme tvar (Brandl, 2006):

$$\dot{q} = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z \right) = -\lambda \text{grad } T \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (4.6)$$

Pokud je tepelná vodivost a teplotní gradient konstantní v průběhu celého území a je ve svém normálním směru, je možné rovnici 4.4 upravit pro energetické piloty (vrty) s poloměrem R a délkou l (Brandl, 2006):

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

Pro energetické piloty (vrty) využívané pro chlazení (předávání tepla do půdy) nebo topení (odběrem tepla ze země) obr. 8, popisuje ustálený stav, kdy se teplota již nemění v době  $t$ . Změna teploty je způsobena střídání hustoty tepelného toku v průběhu této doby, což vede ke změně vnitřní energie (Brandl, 2006):

$$-\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \dot{q}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}}{\partial z} \quad [\text{J.m}^{-3}.\text{s}^{-1}] \quad (4.8)$$

Pokud diferenciální rovnici 4.4 rozšířenou o zohlednění prostorových souřadnic skombinujeme s rovnicí 4.8 dostaneme (Brandl, 2006):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \text{div} (\text{grad } T) = a \Delta T \quad [\text{K.s}^{-1}] \quad (4.9)$$

kde:  $a$  – je teplotní vodivost  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

$\lambda$ – je tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$c$ – je měrná tepelná kapacita	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\rho$ – je hustota pevného media	[kg.m <sup>-3</sup> ]

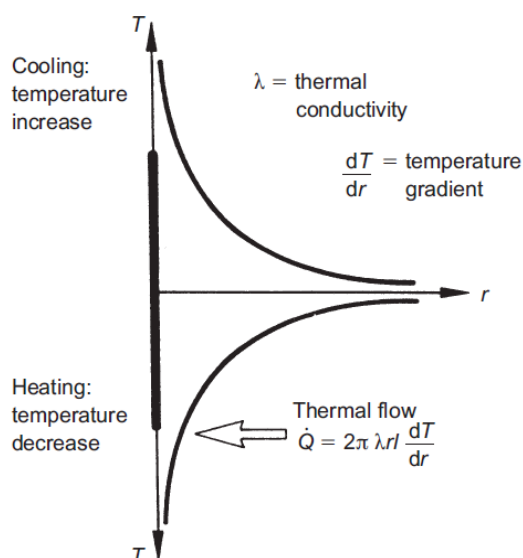
Jestliže v daném kontrolním objemu je zdroj tepla, pak základní rovnice kondukce má tvar (Brandl, 2006):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T + \frac{Q}{\rho c} \quad (4.10)$$

Rovnici 4.9 v pravoúhlých souřadnicích lze transformovat do válcových souřadnic s poloměrem  $r$ , azimutem  $\varphi$  a osou  $z$  (Brandl, 2006):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.11)$$

Obr. 8 Teplotní křivky v půdě kolem energetické piloty využívané pro vytápění nebo chlazení, předpokládá se stálý tepelný tok



Zdroj: Brandl, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique, 56, 2, 2008. 86 s.

Zjednodušená počáteční podmínka pro teplotu hornin je (Ryška, 2006) :

$$T(r, z, 0) = T_g \quad (4.12)$$

kde:  $T$  – je teplota hornin [K]

$T_g$  – je průměrná teplota hornin v okolí vrtu

neovlivněném odběrem tepla [K]

Bylo experimentálně ověřeno, že s dostatečnou přesností lze teplotu  $T_g$  vztáhnout k teplotě v polovině hloubky celého vrtu.

Zjednodušená hraniční podmínka pro povrch terénu je (Ryška, 2006):

$$T(r, 0, t) = T_g \quad [K] \quad (4.13)$$

Přičemž teplota na povrchu terénu pro danou lokalitu je ve skutečnosti o něco nižší.

Výpočtem bylo ověřeno, že chyby pro odběr tepla z hornin vzniklé zanedbáním geotermického gradientu a teplotních sezónních změn pro  $z = 0$  pro výše uvedené podmínky jsou menší jak 1% (Bujok a kol., 2005).

Základní hraniční podmínky ve vrtu jsou následující (Bujok a kol., 2005):

$$T(r, z, t) = T_b(t) \quad [K] \quad (4.14)$$

kde:  $r$  – je poloměr vrtu [m]

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

a tedy:

$$q_t = \frac{1}{H} \int_0^H 2\pi r_b \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{r=r_b} dz \quad [W.m^{-1}] \quad (4.15)$$

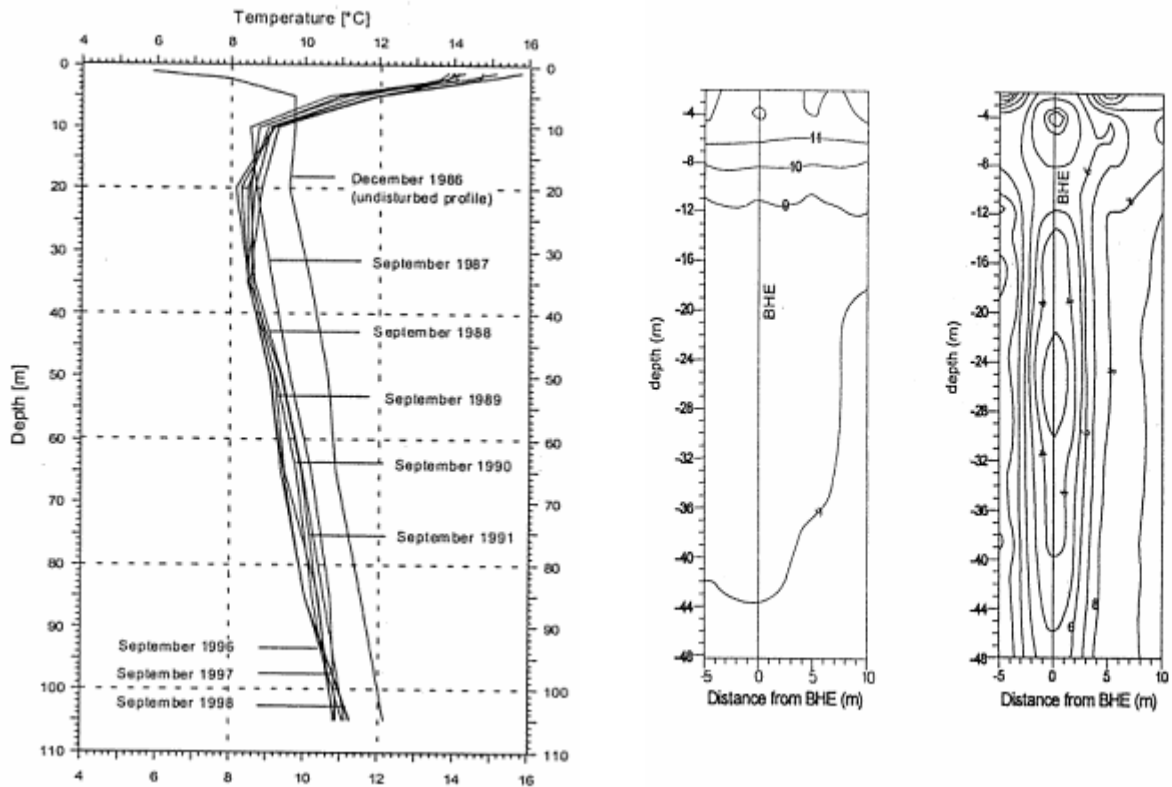
kde:  $q_t$  – je průměrný měrný tepelný výkon odvedený z vrtu [W.m<sup>-1</sup>]

$\lambda$  - je tepelná vodivost hornin [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$H$  – je hloubka vrtu [m]

Při odběru tepla z vrtu za výše uvedených podmínek mají izolinie teploty hornin v okolí vrtu tvar rotačních elipsoidů – viz obr. 9. Měření teplot bylo prováděno jednak ve vrtu vystrojeném pro tepelné čerpadlo, jednak ve speciálních měřicích vrtech (Bujok a kol., 2005).

Obr. 9 Izolinie teploty naměřené ve vrtu teplotně neovlivněném (vlevo) a během chodu tepelného čerpadla



Zdroj: Bujok, P. Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2005, 35-36 s.

Teplotní odezva v horninách v okolí vrtu na určitý odběr tepla z vrtu pro daný časový interval je převedena na soubor bezrozměrných koeficientů teplotní odezvy, které se označují jako g-funkce. Celkový odběr tepla z vrtu je převeden na soubor časově omezených tepelných pulsů, které jsou skládány na principu superpozice. Teplota hornin na stěně vrtu v kterémkoli čase je pak stanovena přiřazením g-funkcí těmto odběrovým pulsům (Bujok a kol., 2005).

$$T_b = T_g + \sum_{i=1}^n \frac{q_i - q_{i-1}}{2\pi\lambda} g\left(\frac{t_n - t_{n-1}}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) \quad [\text{K}] \quad (4.16)$$

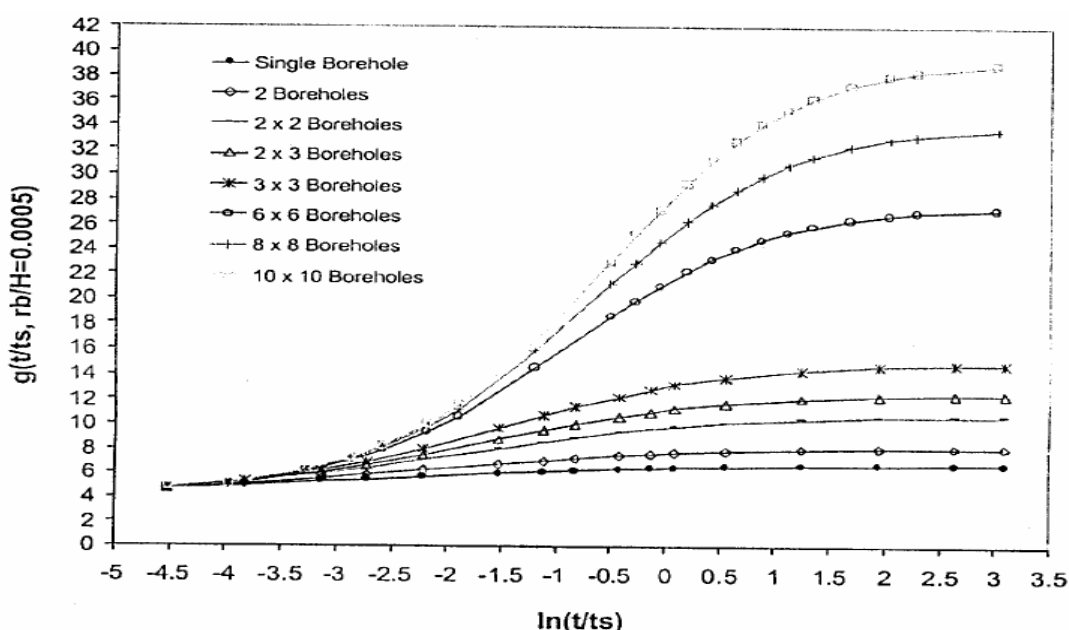
kde:  $t_s$  – je stacionární čas odběru tepla z vrtu,  $t_s = \frac{H^2}{9a}$  [s]

g-funkce popisující teplotní odezvu v horninách způsobenou odběrem tepla z vrtu v určitém časovém intervalu (Bujok a kol., 2005):

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right)$$

Na velikost g-funkce má výrazný vliv počet a způsob rozmístění vrtů, ze kterých je odebíráno teplo (Bujok a kol., 2005) – obr. 10

Obr. 10 Průběh g-funkcí v závislosti na počtu vrtů



Zdroj: Bujok, P. Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel.

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2005, 37 s.

Důležitým parametrem pro dimenzování vrtů je celkový teplotní odpor  $R_b$  vrtu vůči přestupu tepla z hornin do nemrznoucí směsi proudící v kolektoru. Z podstaty této veličiny je žádoucí z hlediska efektivního přestupu tepla z hornin do kolektoru, aby  $R_b$  byl co nejnižší. Tato podmínka je splněna, pokud:

- materiál výplně vrtu má co nejvyšší tepelnou vodivost,
- trubky kolektoru mají po celé délce vrtu stejnou rozteč a jsou co nejbližší stěně vrtu,
- a režim proudění nemrznoucí směsi v kolektoru je turbulentní.

Pro tzv. celkový teplotní odpor vrtu  $R_b$  mezi stěnou vrtu a nemrznoucí směsí v kolektoru platí přibližný vztah (Bujok a kol., 2005):



$$R_b = \frac{T_b(t) - T_f(t)}{q_t} \quad [\text{K.m.W}^{-1}] \quad (4.17)$$

$$\text{kde: } T_f(t) = \frac{T_{in.} - T_{out.}}{2} \quad [\text{K}] \quad (4.18)$$

$$\text{kde: } T_{in} = T_f - \frac{qH}{2c_f \rho_f V_f}, \quad T_{out} = T_f + \frac{qH}{2c_f \rho_f V_f} \quad [\text{K}] \quad (4.19)$$

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

$T_f$  – je teplota nemrznoucí směsi v kolektoru [K]

$T_{in}, T_{out}$  – je teplota nemrznoucí směsi na vstupu,  
resp. výstupu z vrtu [K]

$c_f$  – je měrná tepelná kapacita nemrznoucí  
směsi v kolektoru [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$\rho_f$  – je měrná hmotnost nemrznoucí směsi v kolektoru [kg.m<sup>-3</sup>]

$V_f$  – je je průtočné množství nemrznoucí směsi  
v kolektoru [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]

## 4.1.2 Přenos tepla mezi teplonosným médiem a bentonitem / půdou

Vzdálenost okraje ochlazení horniny od vrtu je závislá na čase a lze ji stanovit podle vzorce (Jetel, 1982):

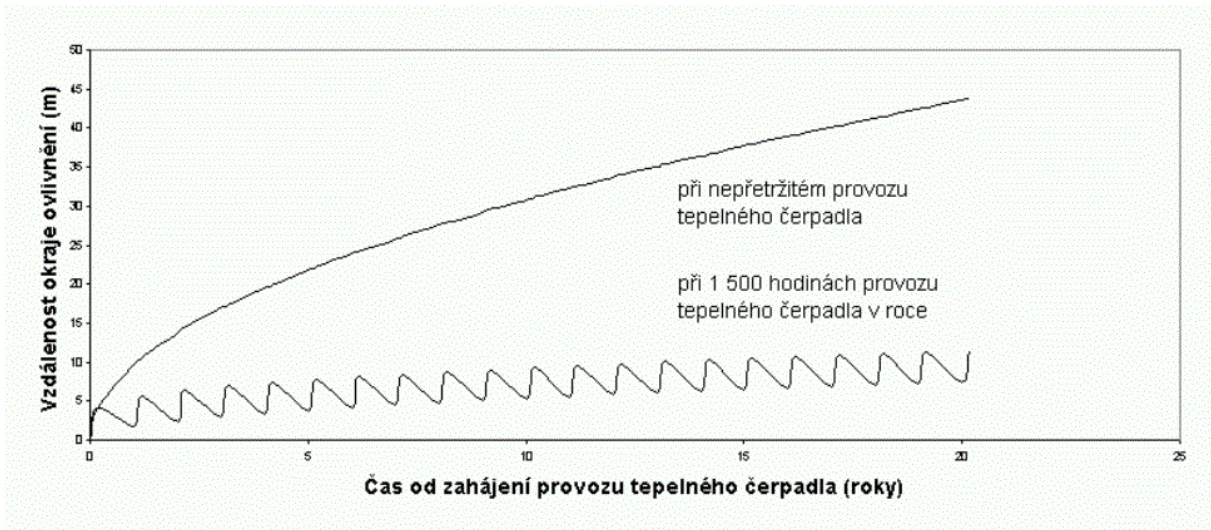
$$R = 1,5 \sqrt{(a \cdot t)} \quad [\text{m}] \quad (4.20)$$

kde:  $a$  – teplotní vodivost [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

$t$  – čas od počátku provozu tepelného čerpadla [s]

Z grafu na obr. 11 je zřejmé, že se při nepřetržitém provozu tepelného čerpadla bude ochlazování horniny šířit do okolí rychleji, nežli při jeho používání jen v době topné sezóny.

Obr. 11 Dosah teplotního ovlivnění žuly



Zdroj: [http://www.geolog.cz/odborne\\_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm](http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm)

Protože vrty pro tepelná čerpadla odčerpávají z horniny více tepla, nežli do ní může zemský tepelný tok dodat a protože tepelná kapacita hornin je velmi vysoká, tepelná energie se sdílí ve směru k vrtům a přítok tepelné energie k nim má charakter neustáleného proudění, při kterém se v daném bodě mění směr i rychlost proudění tepla s časem. Toto proudění přejde po určitém čase  $t_{kv}$  do kvaziustáleného proudění, při kterém je v daném bodě změna snížení teploty úměrná logaritmu času. Tento čas je definován podle (Jetela, 1982):

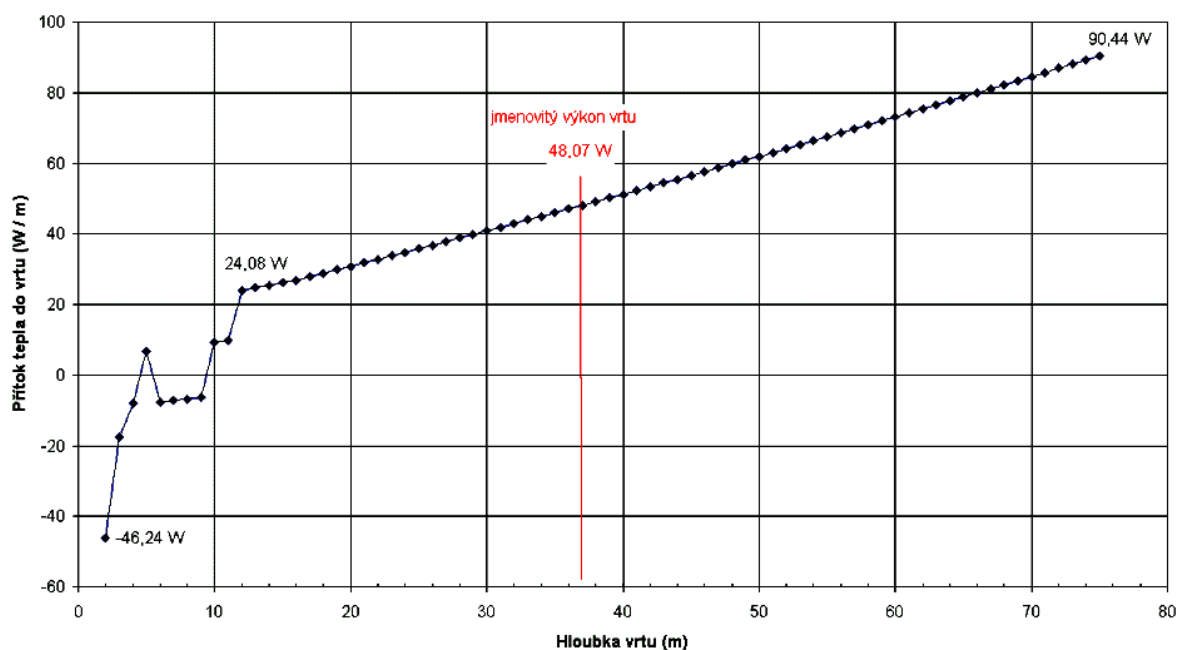
$$t_{kv} = 2,5 \frac{r^2}{a} \quad [s] \quad (4.21)$$

kde:  $r$  – vzdálenost od vrtu [m]

$a$  – teplotní vodivost [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

Teplota teplotnosného média vzrůstá průtokem  $U$  trubici úměrně s pohlceným teplem. Z toho vyplývá, že její sestupná větev pohlcuje podstatně více tepla z horniny, nežli větev vzestupná. V jednotlivých hloubkových intervalech je přítok tepelné energie k vrtu přímo úměrný délce intervalu, tepelné vodivosti horniny a teplotnímu spádu mezi tepelně neovlivněnou horninou a stěnou vrtu.

Obr. 12 Rozložení přítoku tepla do vrtu



Zdroj: [http://www.geolog.cz/odborne\\_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm](http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm)

Z grafu obr. 12 je patrné, že jmenovitý výkon vrtu je ovlivněn ztrátami v horní části vrtu, ke kterým dochází přechodem tepla z výstupních trubíc do sestupných. Z tohoto důvodu je dobré obě větve vést od sebe co nejdále, nebo je tepelně izolovat (Čížek, 2005).

## 4.2 Měření

V této části práce dávám prostor charakteristice měřené lokality. V této souvislosti uvádím výsledky provedeného geologického průzkumu a TRT testu. Dále zde uvádím přehled a vystrojení měřených vrtů, způsob a umístění teplotních čidel ve vrtech.

## 4.2.1 Popis měřené lokality

- pozemek na parcelách č.661/4 a 661/5; k.ú. Dolní Měcholupy, okres Hl. m. Praha,
- GPS: 50°3'24,084"N, 14°32'51,468"E,
- pozemek okolo nové budovy školícího centra společnosti VESKOM s.r.o.,
- Dolnoměcholupská 522/12a, 102 00 Praha 10, poblíž železniční trati Praha Hostivař – Říčany, cca 560 m.n.m.,
- povrch terénu je plochý – pozemek se nachází na násypu.

Geologický průzkum provedla firma GESTEC, s.r.o. ve spolupráci s firmou STAVEBNÍ GEOLOGIE – Geosan s.r.o., která realizovala vrtné práce. V rámci průzkumu bylo vyhloubeno 9 vrtů V1-V9 do hloubky 113 m pro tepelné čerpadlo. Dále byl vyhlouben průzkumný vrt HV-1 pro budoucí vrtanou studnu.

Geologický profil byl zdokumentován na vrtech VT1, VT2, VT3 a VT9. Nejsvrchnější část profilu je tvořena navážkami (násyp), jejichž mocnost se mírně zmenšuje směrem k severu. V nejnižnější části pozemku dosahují navážky mocnosti 9,5 m, v severní části pak kolem 4m. V podloží navážek se nachází šedočerné jílovité břidlice letenského souvrství. Břidlice jsou ve svrchních cca 5 m silně až mírně navětralé. Dále do hloubky jsou břidlice již pevné. V hlubších partiích jsou horniny masivní a místy silně rozpukané, čemuž nasvědčují silné přítoky podzemní vody do vrtů a výrazně menší odpor kladený vrtné soupravě při hloubení. Rozpukané polohy se nacházejí v hloubkách od 30 do cca 80m pod terénem. Geologický popis hornin s grafickým znázorněním je uveden v příloze. Hladina podzemní vody byla ve všech vrtech naražena v hloubkách 10-12 m pod terénem.

V rámci průzkumu geologických poměrů v dané lokalitě se nechala zpracovat zkouška teplotní odezvy horninového prostředí (Thermal Response Test – TRT). Tuto zkoušku provedla opět firma GESTEC, s.r.o. Z této zprávy vyplývá, že:

$$\lambda = 2,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$R_b = 0,137 \text{ K.m.W}^{-1}$$

kde:  $\lambda$  – tepelná vodivost hornin

[W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$R_b$  – tepelný odpor vrtu

[K.m.W<sup>-1</sup>]

## 4.2.2 Vlastní měření

Nad každým vrtem je umístěno čidlo v hloubce 0,2 m pod povrchem pro sledování teploty těsně pod povrchem. Ve vrtech VT1, VT2, VT3, VT4 a VT9 byla nainstalována 4-vodičová teplotní čidla, každé s vlastním elektrickým vodičem pro přenos měřených dat. Hloubkové rozmístění čidel je navrženo tak, aby byl co nejlépe pokryt celý zastižený geologický profil. Čidla byla instalována vždy mezi vzestupnou a sestupnou větev HDPE potrubí (obr. 13), s výjimkou monitorovacího vrtu VT9, který nebyl vystrojen geotermální sondou a kde byla čidla osazena přímo na injektážní potrubí bez další výstroje. V každém vrtu jsou čidla umístěna v těchto hloubkách:

- 1.čidlo – hloubka 8-9 m pod terénem – nezvodnělý kvartérní pokryv,
- 2.čidlo – hloubka 20 m pod terénem – zvodnělé jílovité břidlice,
- 3.čidlo – hloubka 50 m pod terénem – rozpukaný masiv, polovina vrtu,
- 4.čidlo – hloubka 100 m pod terénem – rozpukaný masiv, poloha blízko dna vrtu.

*Tab. 3 Přehled vrtů a jejich finální úprava*

vt	výstroj	pozn.
VT1	GEROTOP 2x40x3,7 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt bude napojen na tepelné čerpadlo a využíván v rámci zkušebního polygonu
VT2	GEROTOP 4x32x2,9 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt bude napojen na tepelné čerpadlo a využíván v rámci zkušebního polygonu
VT3	GEROTOP 2x40x3,7 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt bude napojen na tepelné čerpadlo a využíván v rámci zkušebního polygonu
VT4	GEROTOP 4x32x2,9 mm; osazena 4 teplotní čidla; tamponování v celé délce vrtu	vrt bude napojen na tepelné čerpadlo a využíván v rámci zkušebního polygonu
VT9	bez výstroje, osazena 4 teplotní čidla na injektážní potrubí, tlaková injektáž	bez výstroje, vrt bude sloužit pro monitorování šíření teplotních změn do okolí vrtů V1-4
VT5-VT8	GEROTOP 4x32x2,9 mm; tamponování v celé délce vrtu	vrt napojené na tepelné čerpadlo pro vlastní vytápění novostavby
HV-1	hydrogeologický vrt, vystrojen PE zárubnicí 125 mm s obsypem kačirkem a v horní části provedeno jílování	zdroj užitkové vody pro provoz školícího centra

Obr. 13 Způsob umístění čidel mezi jednotlivé větve HDPE potrubí



Použitá čidla jsou typu Pt1000 A s rozlišením  $0,1^{\circ}\text{C}$  absolutně a citlivostí až  $0,01^{\circ}\text{C}$  s délkou přívodního kabelu, odpovídající hloubce jeho uložení. Tento kabel je odolný proti mechanickému poškození a pronikání vlhkosti.

Venkovní teplota byla zaznamenávána čidlem typu ATF 2 KTY 81.210 umístěným na východní fasádě budovy.

Tyto vrty odebírají nízkopotenciální energii ze země a přivádějí ji na výparníky třech tepelných čerpadel:

2x IVT GREENLINE HT PLUS E17 – tepelný výkon 16,2 kW,

1x IVT PREMIUMLINE X15 – tepelný výkon 11,7kW.

Sledované vrty jsou využívány v zimních měsících pro vytápění. V letních měsících se těmito vrty budova nechladí, čili nedochází k „nabíjení“ zemského masivu.

V primárním okruhu je použito jako teponosné médium voda s 30% nemrznoucí směsí.

Tento systém je v provozu od září 2008, čili provedené měření zachytilo třetí topnou sezónu tohoto systému.

Signály jakož to výstupy z teplotních čidel jsou zpracovávány a poté číselně prezentovány na rozvaděči umístěném na povrchu v jiho-východní části monitorovaného pozemku (obr.14).

Samotné měření probíhalo v pravidelném týdenním intervalu, mezi 15 a 16 hodinou. Jelikož v době měření, nebyl systém vizualizace naměřených dat plně automatizován a síťově ošetřen, odečet hodnot se prováděl u výše zmíněného rozvaděče, opisem údajů do předem připravené tabulky. Takto bylo zaznamenáno období v rozsahu od 7.6.2010 do 24.2.2011.

Obr. 14 Venkovní rozvaděč



## 5 Výsledky

V této pasáži práce, zpracovávám naměřená data. Podle kapitol, které korespondují s cíly této práce se postupně zaměřuji na útlumovou hloubku, u které výpočet dle níže uvedeného vzorce konfrontuji s naměřenými daty. Dále popisuji teploty v celých profilech jednotlivých vrtů v závislosti na čase. Na závěr uvádím teplotní diferenci mezi referenčním vrtem VT9 a vrtem VT2 v jednotlivých měřených hloubkách. Veškeré závěry jednotlivých kapitol jsou podpořeny grafickým znázorněním.

### 5.1 Útlumová hloubka

Pro vyhodnocení výsledků, nejprve určuji tzv. útlumovou hloubku blíže popsanou v kapitole 2.2.2. Tento údaj zjišťuji, abychom věděli do jaké hloubky nám ovlivňuje teplotu půdy sluneční záření.

Pro výpočet využívám vzorec pode (Kutílka, 1978):

$$L = \left( \frac{2a}{\omega} \right)^{1/2} \quad [\text{m}] \quad (5.1)$$

kde:  $a$  – teplotní vodivost [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]  
 $\omega$  – úhlová frekvence [s<sup>-1</sup>]

Pro výpočet dosazují za úhlovou frekvenci údaj 1,99.10<sup>-7</sup> s<sup>-1</sup> pro roční kolísání teplot (Kutílek,1978). Jelikož měření probíhalo necelý rok, v tomto směru bude výsledek s jistou nepřesností. Teplotní vodivost určují ze vztahu:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.2)$$

kde:  $\lambda$  – tepelná vodivost hornin [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]  
 $\rho$  – je objemová hmotnost [kg.m<sup>-3</sup>]  
 $c$  – měrná tepelná kapacita [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

Pro tepelnou vodivost dosazují údaj z provedeného TRT testu (2,9 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>). Součin  $\rho c$  nahrazují objemovým teplem zeminy dle Čížka (2005) pro jíl nasycený vodou, který se vyskytuje prakticky v celém profilu všech sledovaných vrtů  $C = 3,47 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

Z těchto hodnot vychází:

teplotní vodivost  $a = 2,87 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

a tedy útlumová hloubka  $L = 2,9 \text{ m}$

Z prozatím uvedeného vyplývá, že v hloubce 2,9 m je amplituda 0,37 amplitudy povrchu a v hloubce 3L (cca 9 m) klesá amplituda na 0,05 amplitudy povrchu. Jinými slovy pro roční kolísání teplot na povrchu v důsledku střídání ročních období se tyto výkyvy neprojeví již v hloubce 9 m. Tento závěr dokazuje i provedené měření graf obr. 15, kde v hloubce 0,2 m teplota kolísá v závislosti na venkovní teplotě a slunečním záření. Zatímco teplotní čidla instalovaná v 9, 20, 50, 100 m ukazují přibližně stejné hodnoty.

Roční průběh teplot v různých hloubkách v půdě znázorňuje graf obr. 16. Tento graf znázorňuje rytmickou změnu teploty během sledovaného období. Výsledkem jsou sinusoidy závislé na změně teploty s časem. Pro výpočet využívám vzorce podle (Kutílka, 1978):

$$T(z,t) = T^* + T_{AO} \exp\left(\frac{-z}{L}\right) \sin\left(\omega t - \frac{z}{L}\right) \quad [\text{K}] \quad (5.3)$$

kde:  $T^*$  – střední hodnota teploty během periody [K]

$T_{AO}$  – amplituda teploty na povrchu [K]



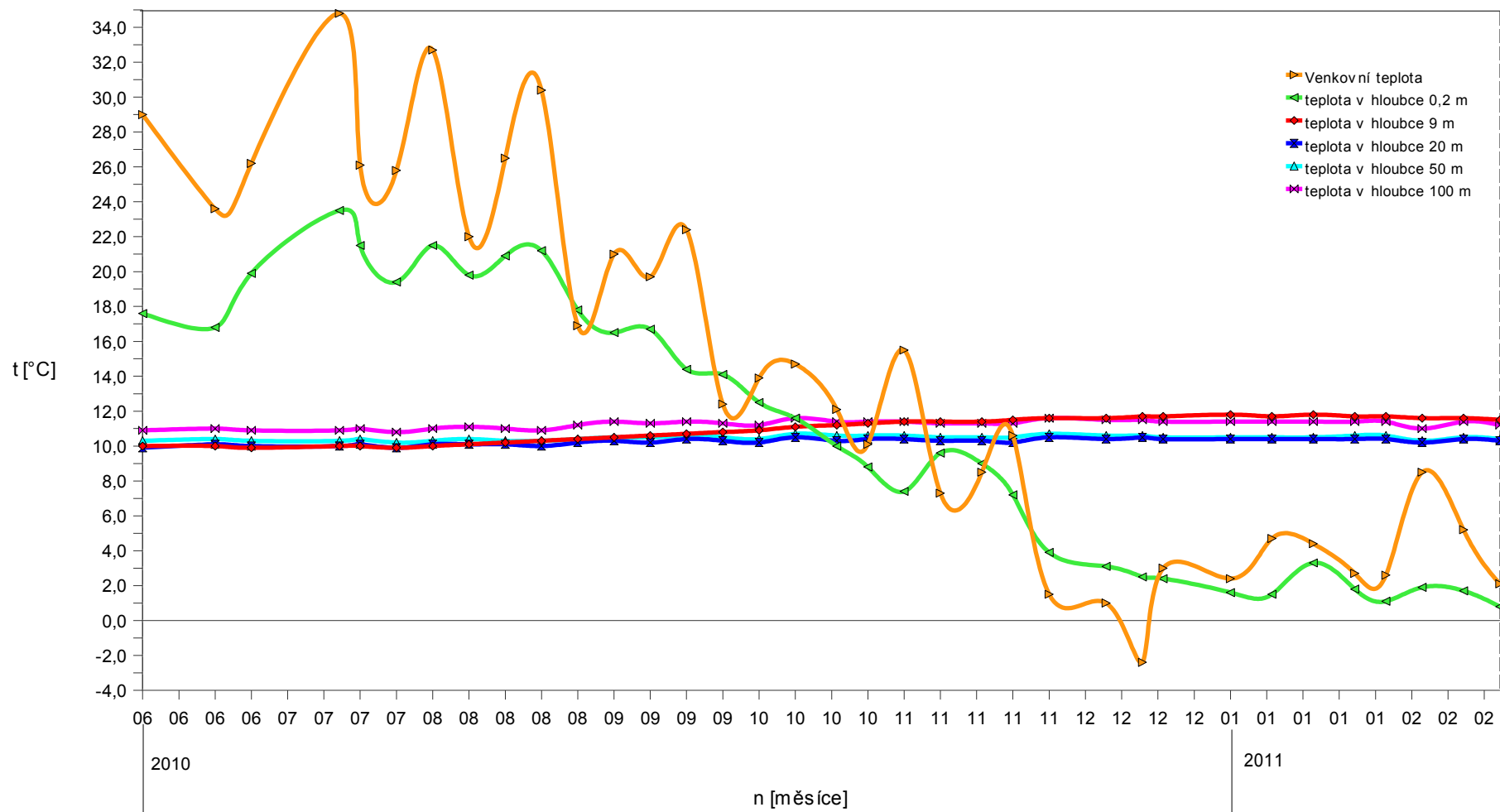
$z$ – hloubka	[m]
$L$ – útlumová hloubka	[m]
$\omega$ – úhlová frekvence	[s <sup>-1</sup> ]
$t$ – čas	[s]

Na grafu obr. 16 jsou patrné počáteční nerovnosti, které jsou způsobené počátečním nepravidelným odečtem hodnot. V dalších částech sinusoid mají křivky již hladký průběh, v těchto fázích probíhal odečet hodnot s pravidelným týdenním intervalem.

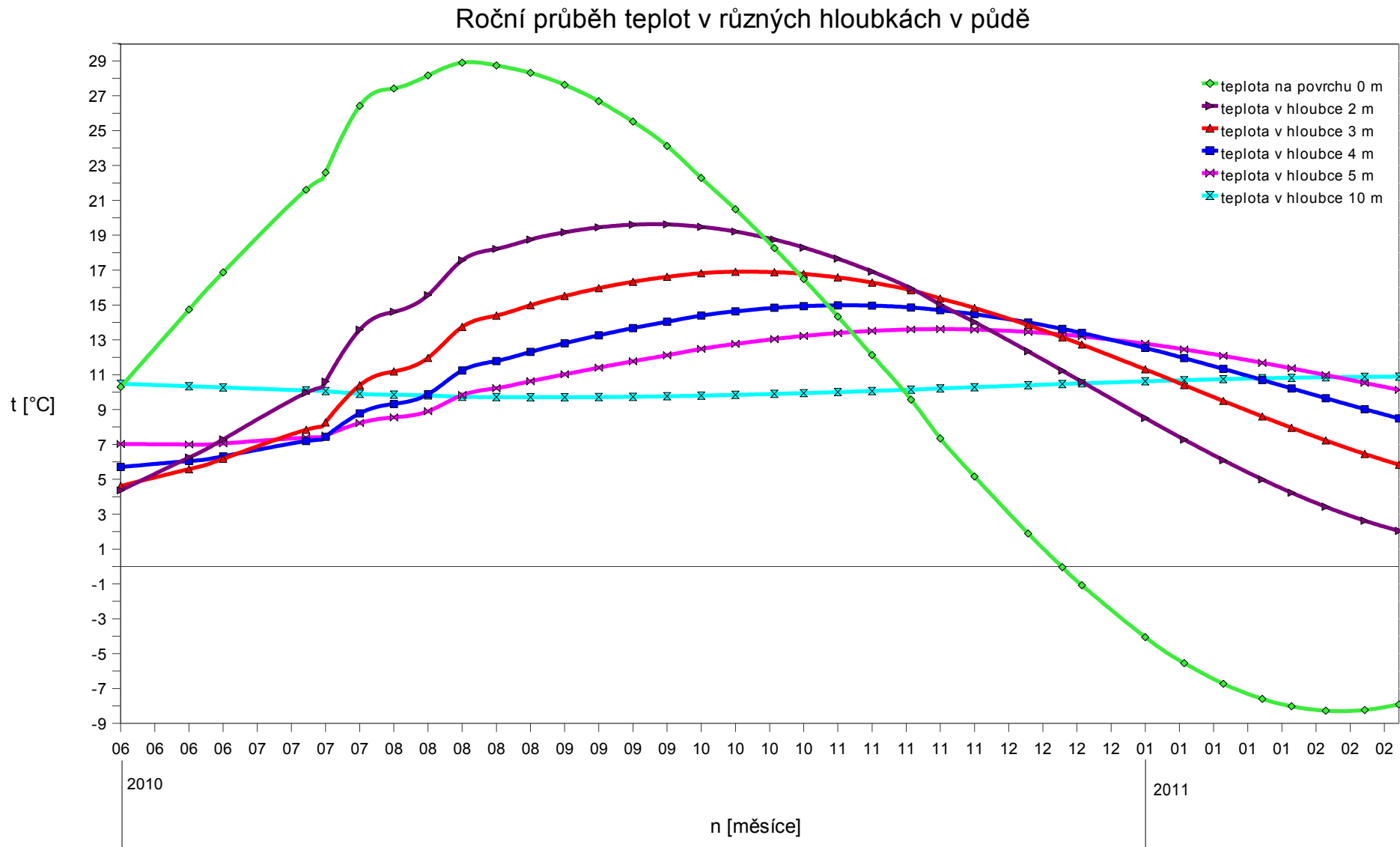
Dále je zřejmé, že se vzrůstající hloubkou je amplituda v hloubce  $z$  menší než amplituda na povrchu a to přesně o hodnotu  $\exp(-z/L)$ . Z uvedeného vzorce 5.3 a grafu obr. 16 vyplývá další závěr a to, že se vzrůstající hloubkou dochází také ke stále silnějšímu fázovému posunu. To znamená, že okamžitá změna teploty na povrchu, je v dané hloubce časově posunuta. Jde tedy o posun ve fázi a jeho hodnota je  $-z/L$ .

Obr. 15 Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT9

VT9 - Teploty horniny v daných metrech v průběhu sledovaného období  
(referenční vrt - není osazen HDPE sondou)



Obr. 16 Roční průběh teplot v různých hloubkách v půdě

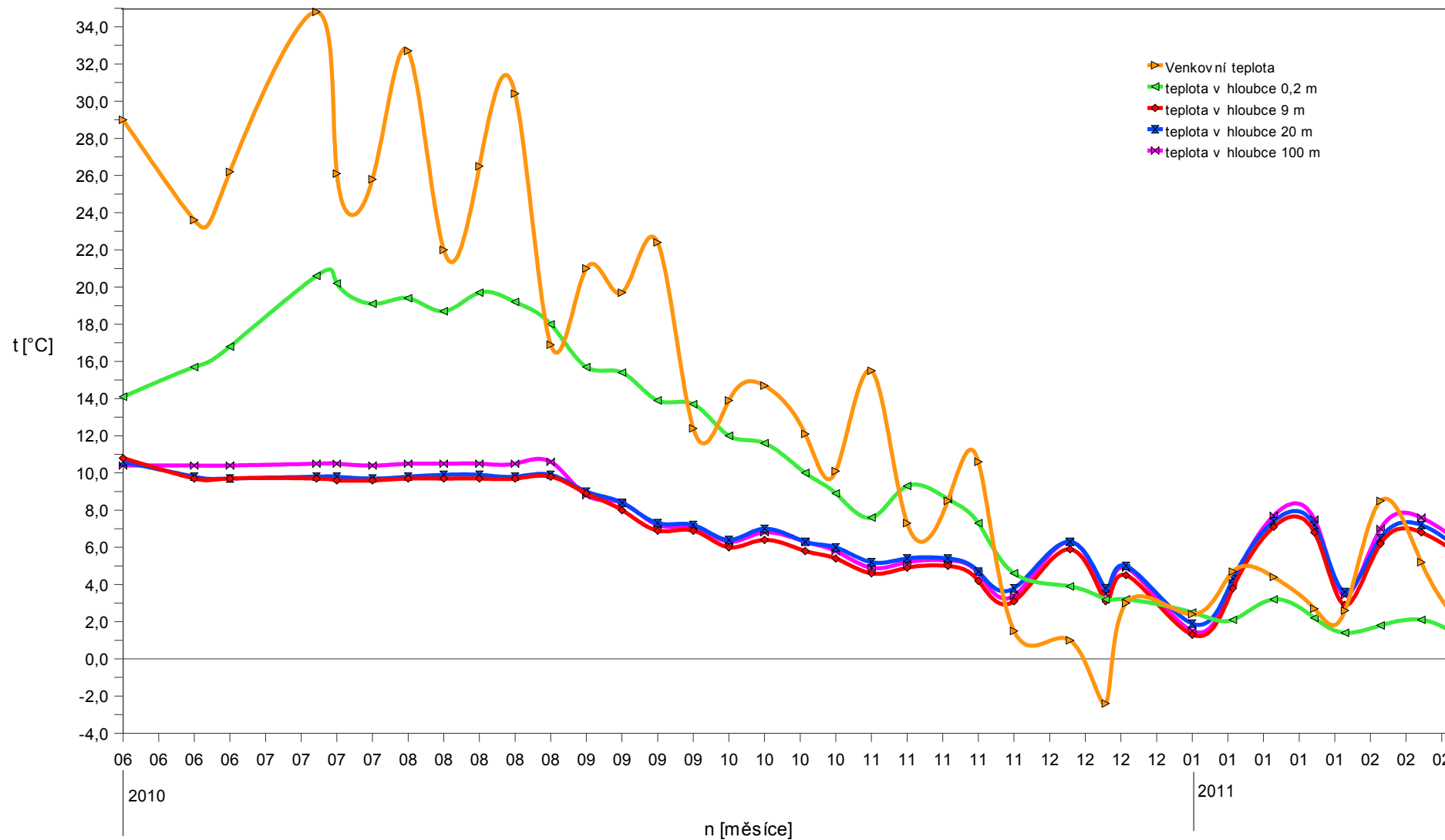


## 5.2 Průběhy teplot v jednotlivých vrtech

Ve sledovaných vrtech VT1 – VT4 je v období letních měsíců (od 7.6. 2010 do 30.8.2010) v hloubkách 9 – 100 m teplota konstantní s průměrnými teplotami pro 9 m 9,7°C, pro 20 m 9,9°C, pro 50 m 10° C a pro 100 m 10,5°C. V tomto období nedochází v jednotlivých hloubkách k významnému teplotnímu statistickému výkyvu. Tyto hodnoty trvají až do začátku otopné sezóny. Oproti referenčnímu vrtu se v tomto období jedná o pokles v hloubce 9 m o hodnotu 0,4 K, v 20 m o 0,1 K, v 50 m o 0,3 K a ve 100 m o 0,5 K. V celkovém průměru se jedná o pokles o 0,3 K na hodnotu 10°C. K tomuto poklesu došlo v důsledku toho, že se těmito vrty v létě nechladí, čili nedochází k „nabíjení“ zemského masivu. Vezmeme-li v úvahu, že k tomuto poklesu došlo v uplynulých 3 letech provozu a minimální teplota na vstupu z vrtů do tepelného čerpadla by měla být -5°C, odhaduji životnost vrtů na 150 let. Průběhy teplot v zemním masivu jednotlivých vrtů VT1 – VT4 jsou znázorněny na grafech obr. 17 – obr. 20. Z těchto křivek lze odhadnout začátek otopného období na 6.9.2010. V tyto dny se venkovní teplota pohybovala okolo 16°C. Z uvedených grafů je vidět, jak čidlo instalované v hloubce 0,2 m pod povrchem kopíruje s určitým útlumem a fázovým posunem výkyvy venkovní teploty. Zatímco čidla instalována v hloubkách 9, 20, 50, 100 m reagují na odběr tepelného čerpadla. Křivky čidel v těchto hloubkách mají klesající tendenci a teplotní minimum nastalo 3.1. 2011, kdy teplota ve vrtech klesla v průměru na hodnotu 1,77°C. V tomto období se venkovní teploty pohybovaly i přes den pod bodem mrazu. Čidla v těchto hloubkách reagují na odběr tepelného čerpadla shodně a nedochází zde k nějaké významné statistické teplotní odchylce v celém průběhu sledovaného období. V grafu obr. 17 chybí průběh teploty v hloubce 50 m, je to z důvodu toho, že čidlo v této hloubce hlásilo chybu.

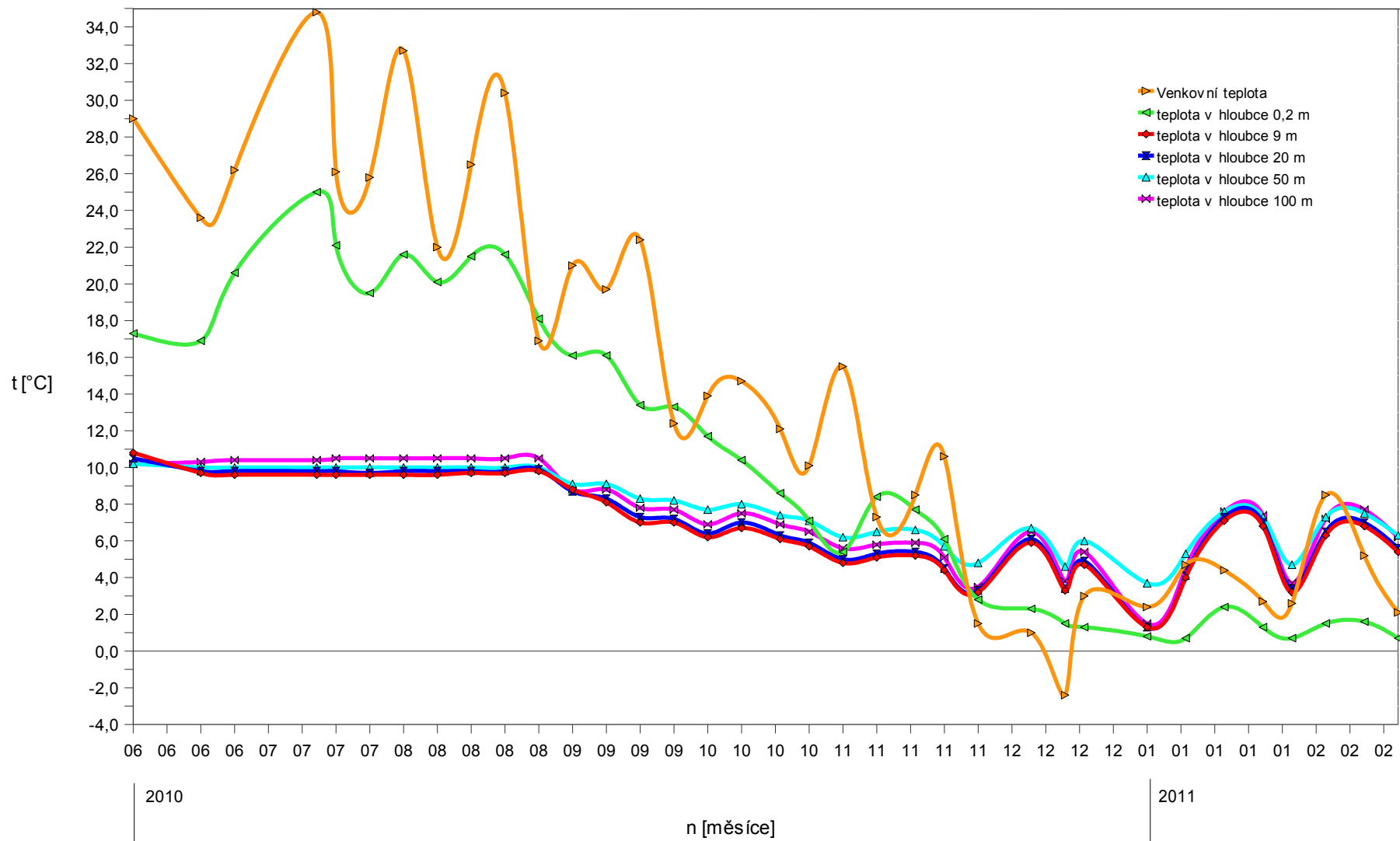
Obr. 17 Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT1

VT1 - Teploty horniny v daných metrech v průběhu sledovaného období



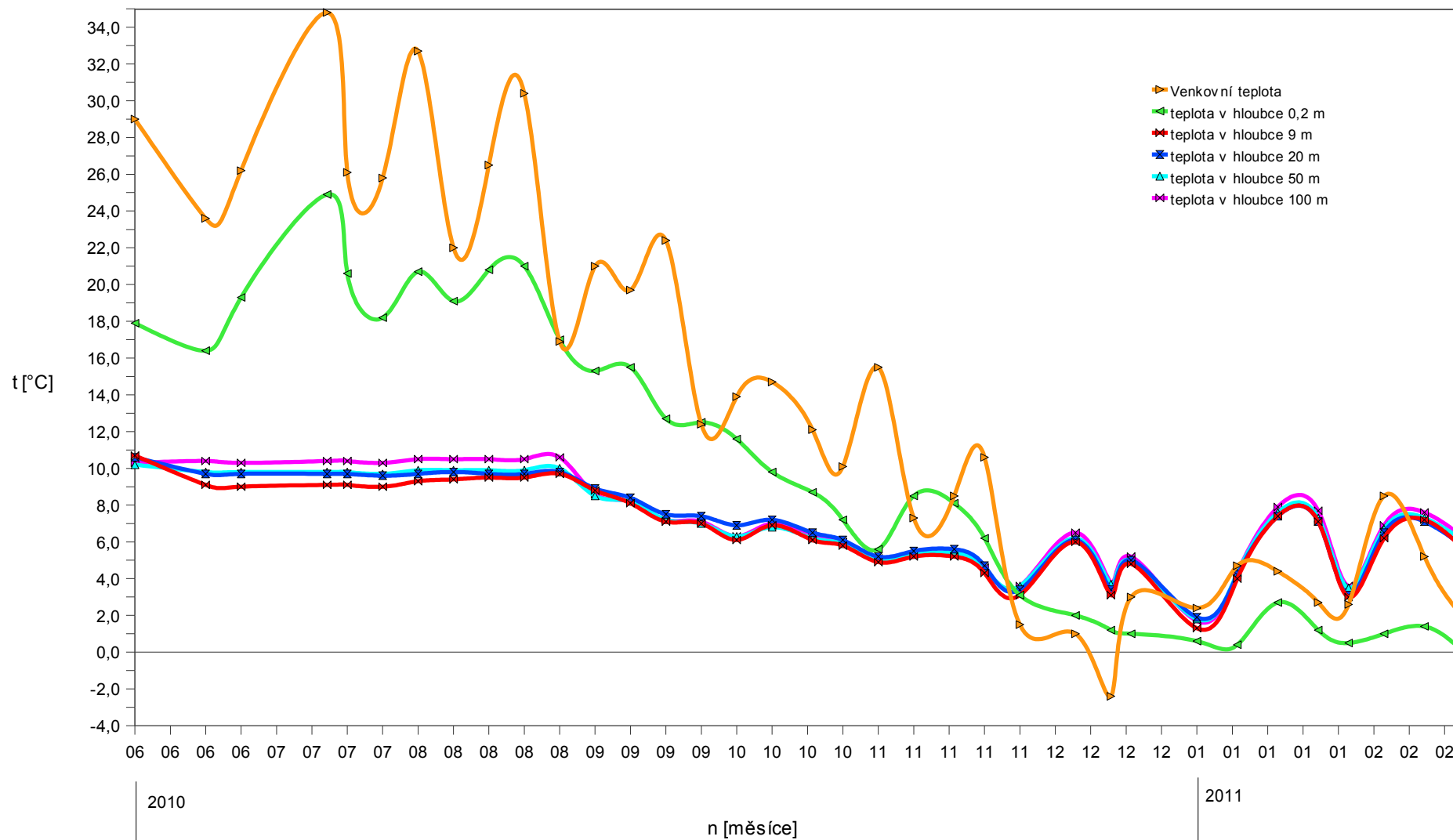
Obr. 18 Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT2

VT2 - Teploty horniny v daných metrech v průběhu sledovaného období



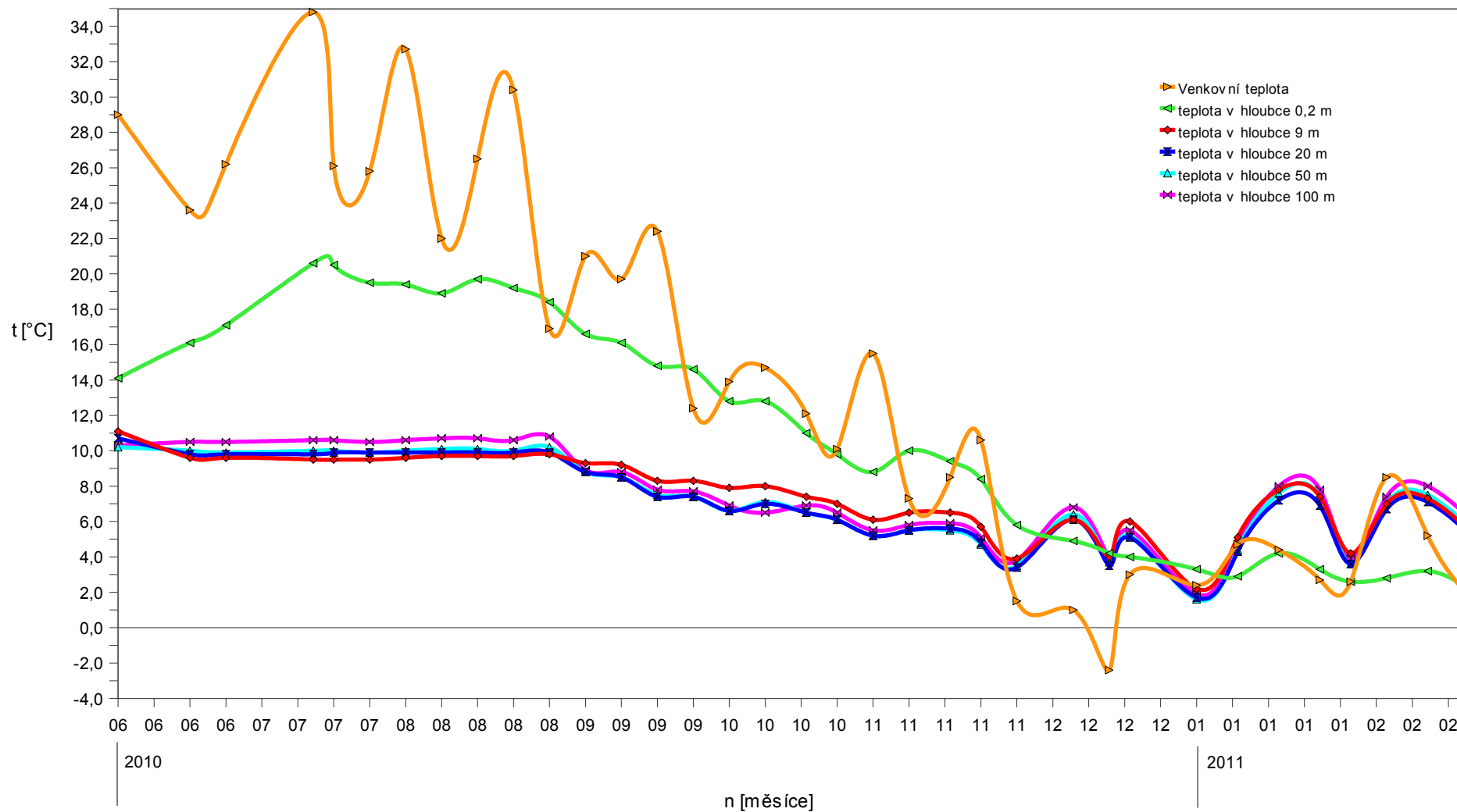
Obr. 19 Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT3

VT3 - Teploty horniny v daných metrech v průběhu sledovaného období



Obr. 20 Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT4

VT4 - Teploty horniny v daných metrech v průběhu sledovaného období

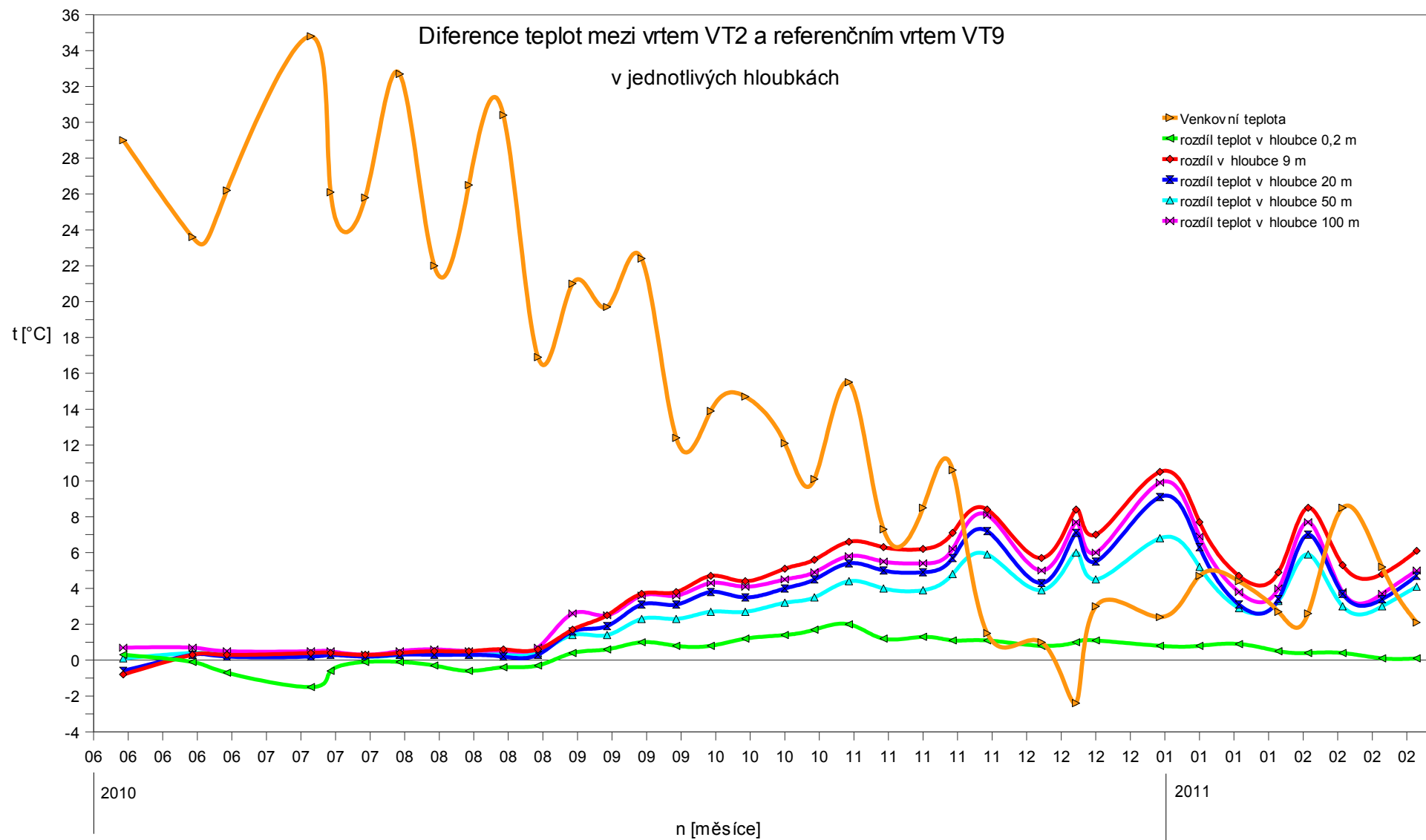




### 5.3 Teplotní rozdíly mezi vrtem VT2 a referenčním vrtem VT9

Pro sledování teplotních diferencí v jednotlivých hloubkách jsem vybral vrt VT2. Průběh diferenčních teplot v jednotlivých sledovaných hloubkách v oblasti vrtu VT2 a referenčního vrtu VT9 jsou znázorněny v grafu obr. 21. Diference teplot v hloubce 0,2 m pod povrchem v celém průběhu sledovaného období dosáhla hodnot 2 K. Kdy minimum  $-1,5^{\circ}\text{C}$  bylo dosaženo 15.7.2010 a maximum  $2^{\circ}\text{C}$  nastalo 1.11.2010. Po tomto datu křivka klesá a dne 24.2.2011 dosahuje hodnot 0,1 K. Maximální diference v hloubce 9 m pod povrchem dosáhla hodnoty 10,5 K. Tato křivka nabývá 4 lokálních maxim. 29.11.2010 je teplotní diference 8,4 K, 17.12.2010 je 8,4 K, 3.1.2011 výše zmíněné globální maximum křivky (diference 10,5 K) a 2.2.2011 je teplotní diference 8,5 K. V posledním sledovaném dni dosahuje teplotní diference hodnoty 6,1 K. V hloubce 20 m pod povrchem dosahuje křivka teplotních diferencí rovněž 4 lokálních maxim. Tyto maxima se vyskytují ve stejných měřených časech a diference postupně nabývají hodnot: 29.11.2010 je 7,2 K, 17.12.2010 je 7,1 K, 3.1.2011 křivka diference dosahuje globálního maxima o hodnotě 9,1 K a 2.2.2011 je diference 7 K. Poslední měřený den je pak diference 4,7 K. Křivka diferenčních teplot pro hloubku 50 m pod povrchem dosahuje těchto maxim: 29.11.2010 je teplotní diference 5,9 K, 17.12.2010 je 6 K, 3.1.2011 nastává globální maximum o hodnotě 6,8 K a 2.2.2011 je teplotní diference 5,9 K. Poslední sledovaný den je teplotní diference 4,1 K. V hloubce 100 m pod povrchem dosahuje křivka teplotních diferencí těchto maxim: 29.11.2010 je 8,1 K, 17.12.2010 je 7,7 K, 3.1.2011 dosahuje křivka svého globálního maxima o hodnotě 9,9 K a 2.2.2011 je teplotní diference 7,7 K. Poslední měřený den je v této hloubce teplotní rozdíl oproti vrtu VT9 5K. Z uvedeného vyplývá, že největší teplotní rozdíl mezi vrtem VT2 a referenčním vrtem VT9 byl naměřen v 9 metrech 3.1.2011 a dosahoval hodnoty 10,5 K. Naproti tomu dne 3.1.2011, kdy sledujeme globální maxima křivek pro hloubky 9, 20, 50 a 100 m, dosahuje nejmenšího maxima křivka pro hloubku 50 m a jeho hodnota je 6,8 K. Globální maxima křivek pro diference teplot v jednotlivých hloubkách jsou tedy sestupně dle teploty: pro 9 m 10,5 K, pro 100 m 9,9 K, pro 20 m 9,1 K a pro 50 m 6,8 K. K této anomálii dochází v důsledku výskytu podzemní vody, která mění tepelné poměry v těchto hloubkách.

Obr. 21 Teplotní rozdíly mezi vrtem VT2 a vrtem VT9



## 6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vrtů, jako zdroje nízkopotencionální energie pro tepelné čerpadlo. Pro zmapování teplotního pole probíhajícího ve vrtech byla navázána spolupráce se společností VESKOM s.r.o., kdy byl monitorován pozemek okolo budovy této společnosti. Měření se provedlo ve vrtech VT1 – VT4 a referenčním vrtu VT9, který nebyl osazen HDPE sondou a tedy nebyl zasažen odběrem tepelných čerpadel. Čidla pro měření teploty byla umístěna shodně ve všech sledovaných vrtech v těchto hloubkách: 0,2 m, 9 m, 20 m, 50 m a 100 m pod povrchem. Měření probíhalo v období od 7.6.2010 do 24.2.2011.

Výsledky pro útlumovou hloubku ukázaly, že v hloubce 9 m je amplituda 0,05 amplitudy povrchu. Tedy při ročním kolísání teplot, se teplotní změny neprojeví již v hloubce 9 m. Tento závěr potvrzuje i provedené měření na referenčním vrtu VT9. Čidlo umístěné 0,2 m pod povrchem reaguje s jistým útlumem a fázovým posunem na teplotní změny na povrchu, naproti tomu čidla umístěná v hloubkách 9, 20, 50, 100 m nevykazují v rámci svých hloubek žádné významné teplotní výkyvy a v hloubkách 9, 20, 50 m sledujeme teplotu v průměru 10°C a v hloubce 100 m potom 11,2°C. Tento závěr potvrzuje i autor Brandl (2006), který uvádí, že pro většinu regionů Evropy se sezonní teploty země nemění od hloubky 10 – 15 m a teplota v těchto hloubkách se pohybuje v rozmezí 10°C – 15°C.

Výsledky sledování teplot v jednotlivých vrtech a jednotlivých hloubkách ukázaly, že v počátku sledovaného období (od 7.6.2010 do 30.8.2010) je teplota ve vrtech VT1 – VT4 konstantní ve všech sledovaných hloubkách a nabývá průměrných hodnot pro 9 m 9,7°C, pro 20 m 9,9°C, pro 50 m 10°C a pro 100 m 10,5°C. Z těchto hodnot je patrný fakt, že ve sledovaném období se vrty nevyužívaly k chlazení budovy. V porovnání s naměřenými hodnotami v období od 7.6.2010 do 30.8.2010 v referenčním vrtu VT9 došlo k poklesu teplot ve všech sledovaných hloubkách. V hloubce 9 m o 0,4 K, ve 20 m o 0,1 K, v 50 m o 0,3 K a ve 100 m o 0,5 K. V průměru se tedy jedná o pokles o 0,3 K. V této souvislosti byla odhadnuta životnost vrtů z hlediska využitelnosti a hlediska optimální teploty masivu na 150 let. Výrobci tepelných čerpadel uvádí spíše životnost kompresoru, kterou odhadují na 20 let, nebo životnost vrtů udávají v jednotkách „několik desítek let“ (IVT). Tyto odhady jsou, ale materiálové povahy a vychází z vlastností a kvality použitých materiálů. Za to životnost vrtů ve smyslu zemského masivu, ve kterém se snižuje teplota v důsledku odběru tepelným

čerpádem se nikde neuvádí a tedy nelze objektivně říci, zda hodnota 150 let je uspokojivá. Z průběhu křivek jednotlivých vrtů lze odhadnout začátek otopného období na 6.9.2010. Od této chvíle mají křivky klesající tendenci a reagují na odběr tepelného čerpadla. 3.1.2011 sledujeme minimum všech křivek a průměrná teplota tohoto minima je 1,77°C.

Rozdíly teplot v jednotlivých sledovaných hloubkách mezi vrtem VT2 a referenčním vrtem VT9 nabývají 4 maxim. 3.1.2011 sledujeme globální maxima všech křivek. V tento den dosahují difference teplot v jednotlivých hloubkách sestupně dle teploty těchto hodnot: v 9 m 10,5 K, ve 100 m 9,9 K, ve 20 m 9,1 K a v 50 m 6,8 K. Vlivem působení podzemní vody a jejími charakteristickými vlastnostmi, součinitel tepelné vodivosti ( $0,6062 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a měrná tepelná kapacita ( $4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), ovlivňuje tepelné poměry v masivu a proto dochází k jistému ovlivnění výsledků.

Pro další sledování teplot a tepelných toků ve vertikálních zemních tepelných výměnících bych navrhol stále vrty v letních měsících nevyužívat k chlazení budovy, aby nedocházelo k „nabíjení“ zemského masivu a z dalších naměřených hodnot by se přesněji určila životnost takovýchto vrtů. Po té ověřit možnost zvyšování potenciálu masivu v letních měsících reverzním chodem tepelného čerpadla. V této době bude systém vizualizace dat plně automatizován a proto dosažené výsledky budou přesnější a objektivnější.

## Seznam použité literatury

- BRANDL, H. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56, 2, 81-122 s.
- BUFKA, A., DUŠEK, L., BEDNÁŘ, P., ROSECKÝ, D. 2010. *Obnovitelné zdroje energie, výsledky statistického zjišťování*. [online]. [cit 2011-3-10]. Dostupné z <<http://download.mpo.cz/get/42637/47710/569389/priloha001.pdf>>
- BUJOK, P., VRTEK, M., HORÁK, B., HÁJOVSKÝ, R., HELLSTRÖM, G. 2005. Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 151 s.
- ČÍŽEK, P. *Zemní tepelné výměníky tepelných čerpadel se neobejdou bez podzemní vody* [online]. 19. září 2005 [cit 2011-2-15]. Dostupné z <[http://www.geolog.cz/odborne\\_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm](http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm)>
- DRAHOKOUPILOVÁ, L. 2008. *Obnovitelné zdroje energie v ČR*, Bakalářská práce, Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 28 s. [online]. [cit 2011-3-10] Dostupné z <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6369](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6369)>
- ELDER, J. 1981. *Geothermal systems*. Academic Press, London, 508 s.
- HEPBASLI, A. 2006. *A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future* [online]. [cit 2011-3-10]. Dostupné z <<http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ryanr3/EP/papers/Hepbasli.pdf>>
- JETEL, J. 1982. *Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech*. Academia, Praha, 246 s.
- KAMINSKÝ, J., VRTEK, M. 1998. *Možnosti obnovitelné energie*. Vysoká škola báňská – technická univerzita, Ostrava, 96 s.
- KOPECKÝ, P. 2008. *Tepelně vlhkostní chování výměníků tepla, numerický model, analytická a experimentální validace, měření in-situ, navrhování*, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha, 137 s.
- KUTÍLEK, M. 1978. *Vodohospodářská pedologie*. SNTL, Praha, 295 s.
- LEE, K.C. 2001. Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30, 42-431 s.
- MAREŠ, S., KAROUS, M., LANDA, I., MAZÁČ, O., MÜLLER, K., MÜLLEROVÁ, J. 1983. *Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii*. SNTL, Praha, 197 s.
- MYSLIL, V. *Zájem o využívání geotermální energie roste* [online]. 27. dubna 2009 [cit

2011-3-10]. Dostupné z <<http://energie.tzb-info.cz/geothermalni-energie/5589-zajem-o-vyuzivani-geothermalni-energie-roste>>

MYSLIL, V., KUKAL, Z., POŠMOURNÝ, K., FRYDRYCH, V. 2007. Geotermální energie ekologická energie z hlubin Země – současné možnosti využívání. *Planeta*, 15, 4, 2-30 s.

NAVRÁTIL, J. 1997. *Domácí kůtil a tepelné čerpadlo*. Olomouc, 153 s.

NEUBERGER, P., ADAMOVSÝ, D., ADAMOVSÝ, R. 2007. *Termomechanika*. Česká zemědělská univerzita v Praze Technická fakulta, Praha, 191 s.

RYŠKA, J. *Vrty do horninového masivu – zdroj energie pro tepelná čerpadla* [online]. 23. října 2006 [cit 2011-1-5]. Dostupné z <<http://www.tzb-info.cz/3609-vrty-do-horninoveho-masivu-zdroj-energie-pro-tepelna-čerpadla-i>>

Interní materiály společnosti VESKOM s.r.o.

## Seznam obrázků

Obr. 1	Obecná závislost tepelných charakteristik na vlhkosti půdy $\theta$ .....	8
Obr. 2	Kolísání teploty závislosti na hloubce.....	10
Obr. 3	Přenos tepla a geotermální situace v daných hloubkách.....	10
Obr. 4	Mapka potencionálních ploch pro využití geotermální energie.....	11
Obr. 5	Oběh kompresorového okruhu v T-s diagramu.....	14
Obr. 6	Výměník pro tepelné čerpadlo ve tvaru smyčky uložené do výkopu v zeminách.....	20
Obr. 7	Schéma napojení hloubkových vrtů pro tepelné čerpadlo.....	22
Obr. 8	Teplotní křivky v půdě kolem energetické piloty využívané pro vytápění nebo chlazení.....	29
Obr. 9	Izolinie teploty naměřené ve vrtu teplotně neovlivněném (vlevo) a během chodu tepelného čerpadla.....	31
Obr. 10	Průběh g-funkcí v závislosti na počtu vrtů.....	32
Obr. 11	Dosah teplotního ovlivnění žuly.....	34
Obr. 12	Rozložení přítoku tepla do vrtu.....	35
Obr. 13	Způsob umístění čidel mezi jednotlivé větve HDPE potrubí.....	38
Obr. 14	Venkovní rozvaděč.....	39
Obr. 15	Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT9.....	42
Obr. 16	Roční průběh teplot v různých hloubkách v půdě.....	43
Obr. 17	Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT1.....	45
Obr. 18	Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT2.....	46
Obr. 19	Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT3.....	47
Obr. 20	Teploty horniny ve sledovaných hloubkách vrtu VT4.....	48
Obr. 21	Teplotní rozdíly mezi vrtem VT2 a vrtem VT9.....	50

## Seznam tabulek

Tab. 1 Tepelné vodivosti hornin.....	8
Tab. 2 Dodávka tepelných čerpadel na trh podle typu (vybrané firmy).....	18
Tab. 3 Přehled vrtů a jejich finální úprava.....	37



## Seznam příloh

Příloha I, II – Geologická dokumentace vrtu VT1

Příloha III, IV – Geologická dokumentace vrtu VT2

Příloha V, VI – Geologická dokumentace vrtu VT3

Příloha VII, VIII – Geologická dokumentace vrtu VT4

Příloha IX, X – Geologická dokumentace vrtu VT9

Příloha XI – Situace s umístěním vrtů

Příloha XII, XIII – Naměřená data

Příloha XIV – Výpočty pro útlumovou hloubku

Příloha XV – Výpočty pro diference teplot mezi vrtem VT2 a vrtem VT9

GESTEC, s.r.o.  
163 04 Praha 6 - Bílá Hora, Třanovského 622/11

## GEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VRTU

# V1

Vrtmistr: -  
Typ soupravy: HVS 482  
Datum provedení - od: 26.7.2008  
- do: 27.7.2008

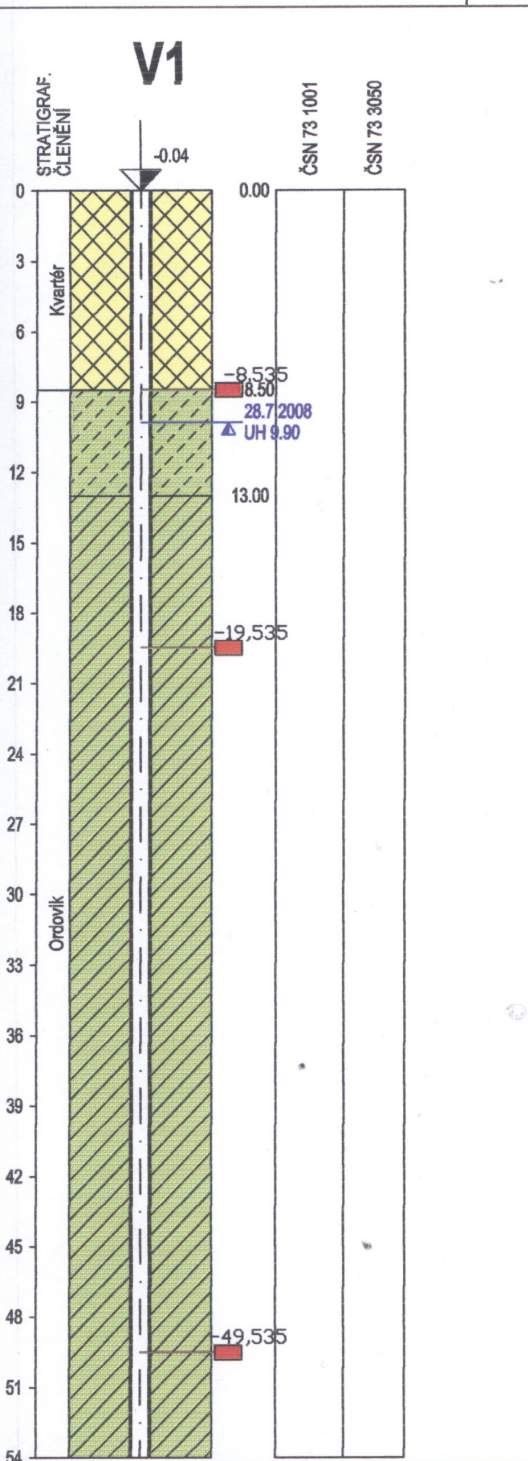
Hloubka sondy [m]: 113.00  
Hladina podz. vody:  
naražená [m]:  
ustálená [m]: Hl.= 9.90, Z = -9.94

Y= 734 220.00  
X= 1 047 746.00  
Z= - .04  
Souř.systémy: JTSK / Relat.

od: [m] do: [m] vrtáno DN [mm]

výstroj: HDPE potrubí GEROTOP, 2 x 40 mm  
tlaková injektáž bentonitocement. směsí

Okres:  
Katastr.území: Dolní Měcholupy  
Mapa 1:25000: 12-244



do	GEOLOGICKÝ POPIS HORNIN
4.00	1: Navážka, tmavě hnědý, hlinito-písčité štěrky, obsahuje úlomky cihel a stavební suti
7.00	1: Navážka, tmavě hnědá, písčito-jílovitá hlína, bez štěrkové příměsi
8.50	1: Navážka, okrový, písčito-jílovitý štěrky
13.00	167: Břidlice jílovitá mírně navětralá, šedo černá, měkká.
54.00	169: Břidlice jílovitá zdravá, šedo černá, tvrdá. V úseku mezi 30-60 m pod terémem časté přítoky do vrtu.

**Legenda:** Vzorky s číslem laboratorního rozboru. Podzemní voda s číslem zvodně.  
 ■ neporušený ■ porušený ■ jádro ■ technolog. ■ skalní □ jiný  
 ● voda ▼ naražená hladina ▲ ustálená hladina

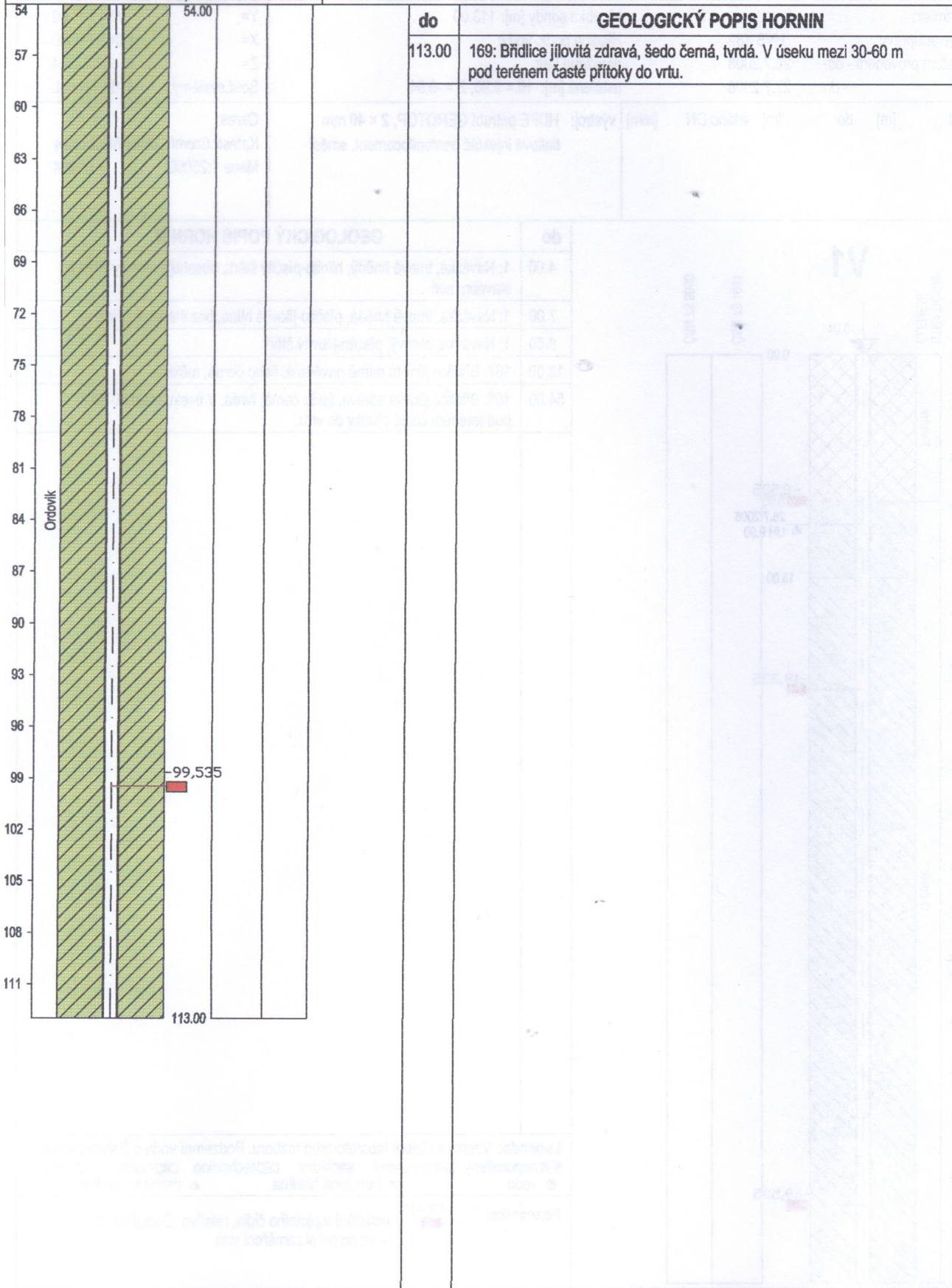
**Poznámka:** -48,415 umístění teplotního čidla, relativní Z-souřadnice  
 - viz protokol zaměření vrtů

Název akce: **VESKOM - školící centrum**

Měřítko: 1: 300

Zak. číslo: 4008

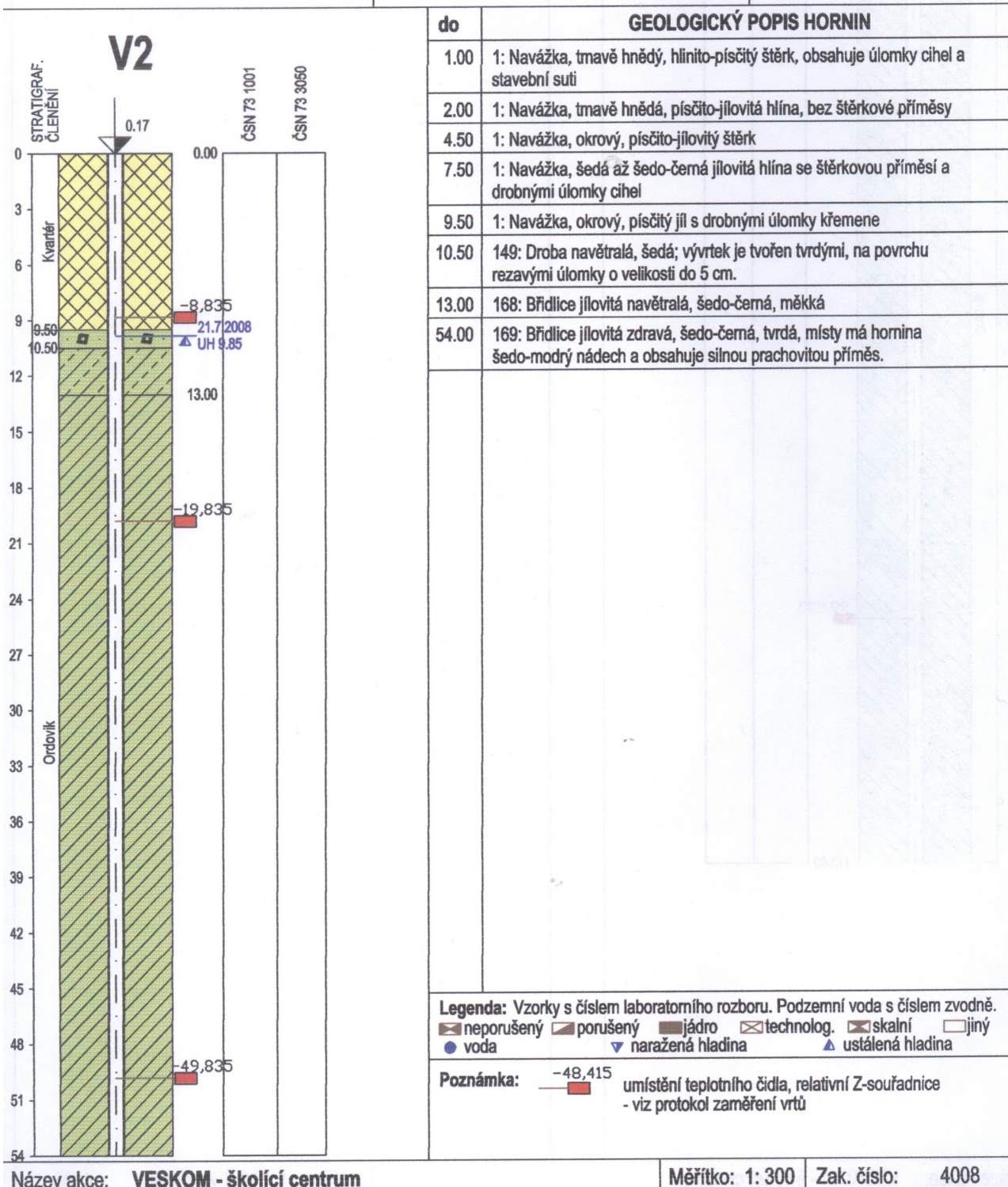




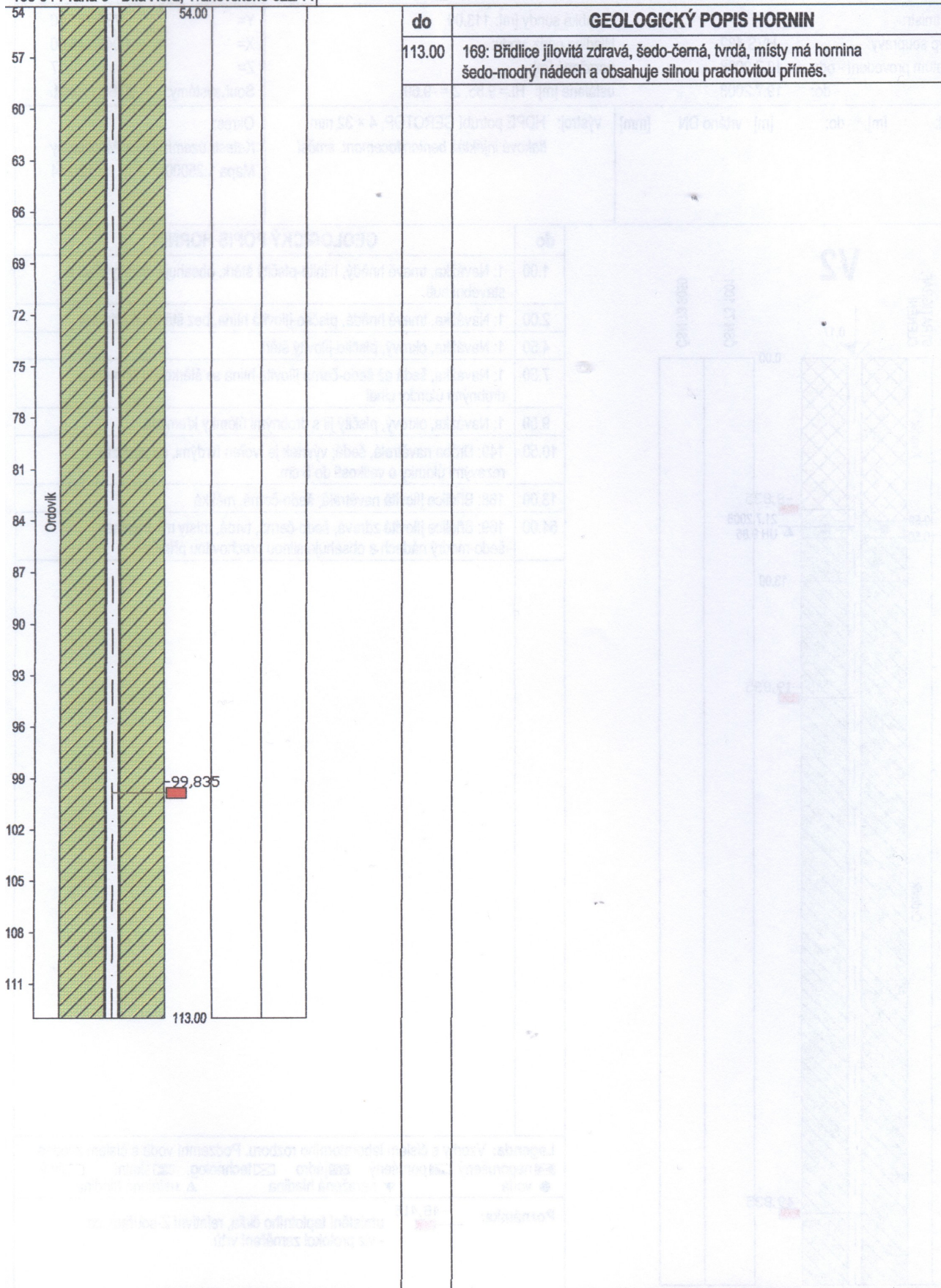


Vrtmistr: -	Hloubka sondy [m]: 113.00	Y= 734 232.00
Typ soupravy: HVS 482	Hladina podz. vody:	X= 1 047 748.00
Datum provedení - od: 18.7.2008	naražená [m]:	Z= .17
- do: 19.7.2008	ustálená [m]: HI.= 9.85, Z = -9.69	Souř.systémy: JTSK / Relat.

od: [m] do: [m] vrtáno DN [mm]	výstroj: HDPE potrubí GEROTOP, 4 x 32 mm tlaková injektáž bentonitocement. směsí	Okres: Katastr.území: Dolní Měcholupy Mapa 1:25000: 12-244
--------------------------------	---	--







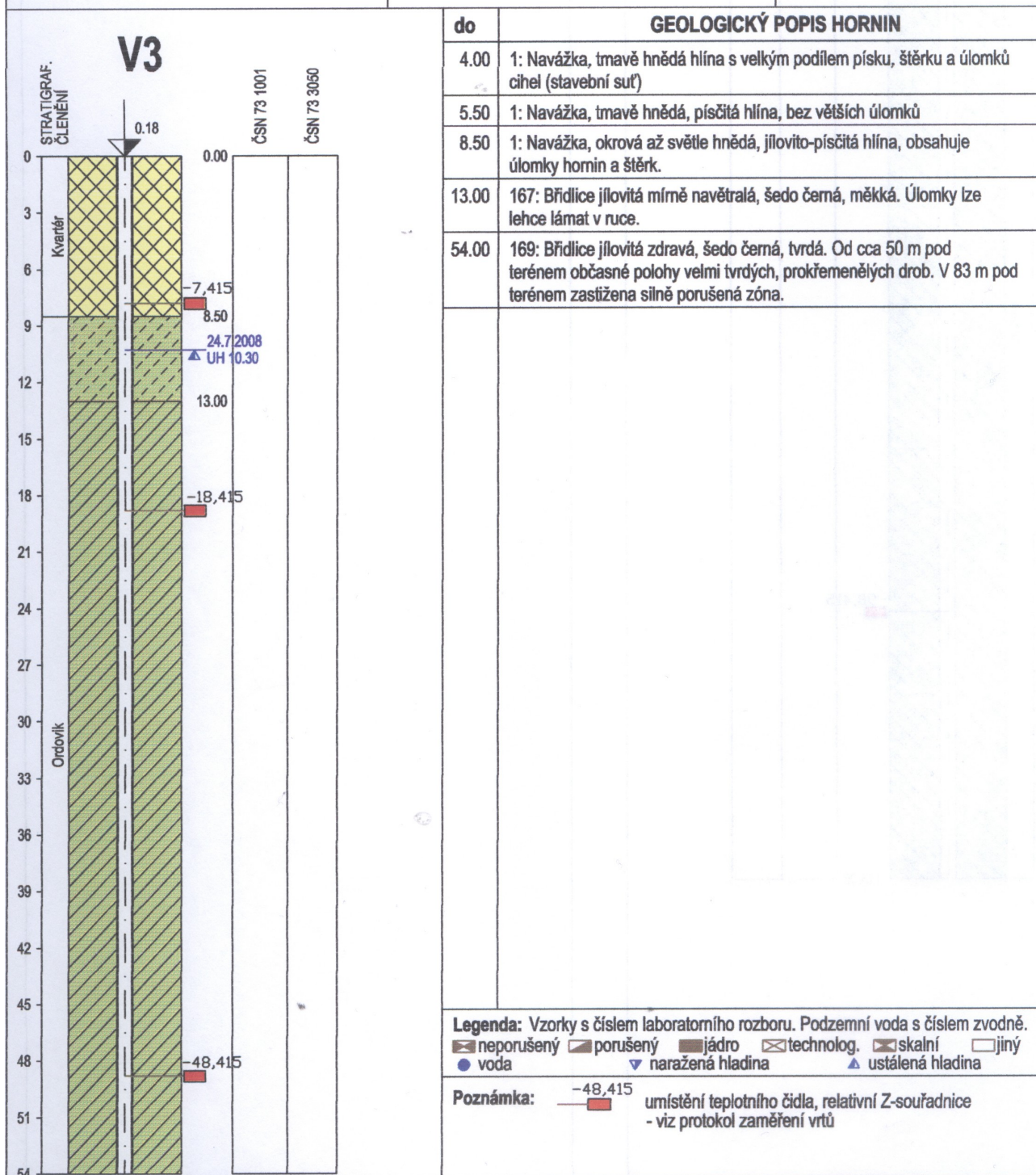
Název akce: **VESKOM - školící centrum**

Měřítko: 1: 300

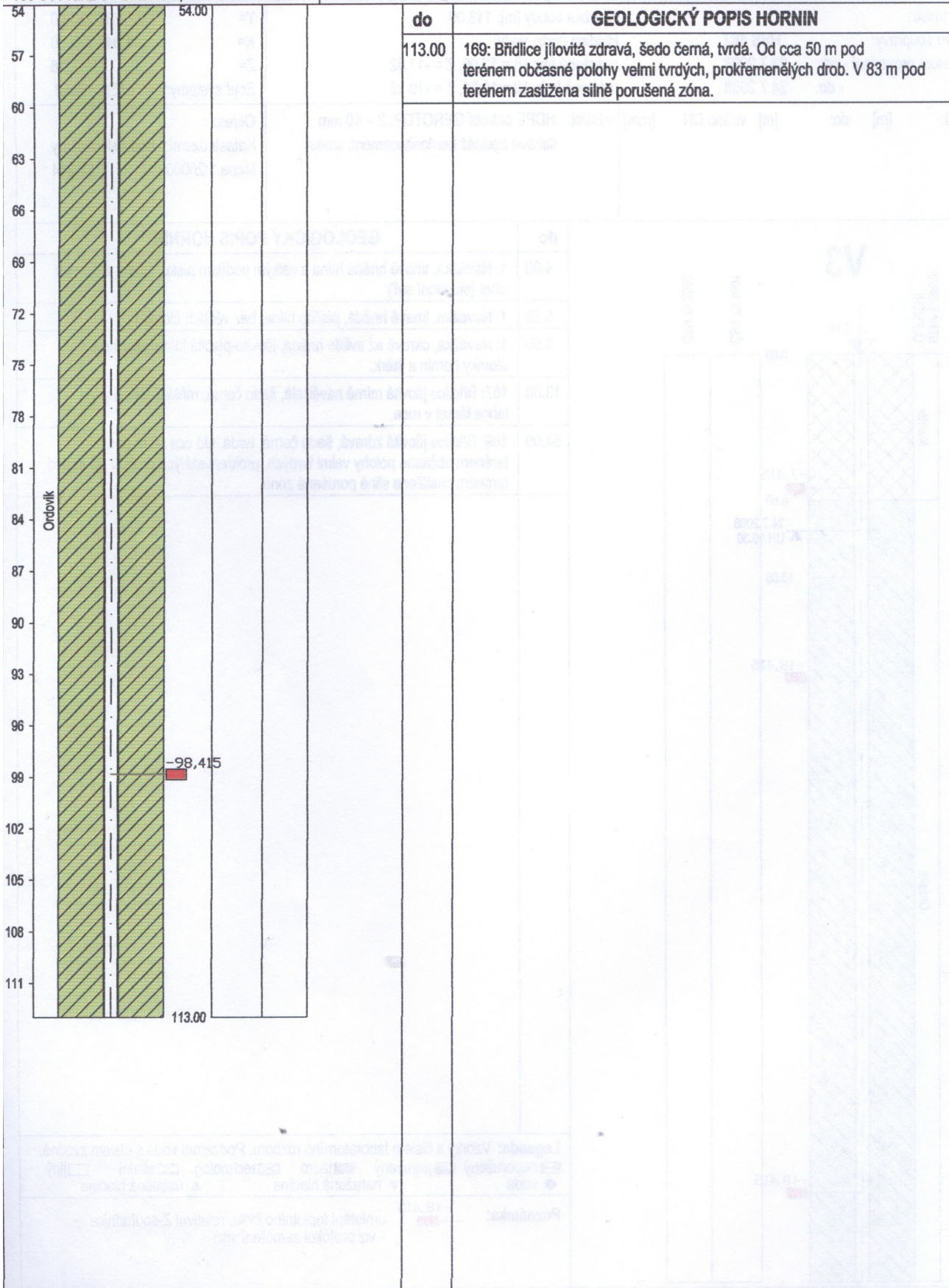
Zak. číslo: 4008



Vrtmistr: -	Hĺoubka sondy [m]: 113.00	Y= 734 233.00
Typ soupravy: HVS 482	Hladina podz. vody:	X= 1 047 736.00
Datum provedení - od: 23.7.2008	naražená [m]: Hl.= 12.00, Z = -11.82	Z= .18
- do: 24.7.2008	ustálená [m]: Hl.= 10.30, Z = -10.12	Souř.systémy: JTSK / Relat.
od: [m] do: [m] vrtáno DN [mm]	výstroj: HDPE potrubí GEROTOP, 2 x 40 mm tlaková injektáž bentonitocement. směsí	Okres: Katastr.území: Dolní Měcholupy Mapa 1:25000: 12-244







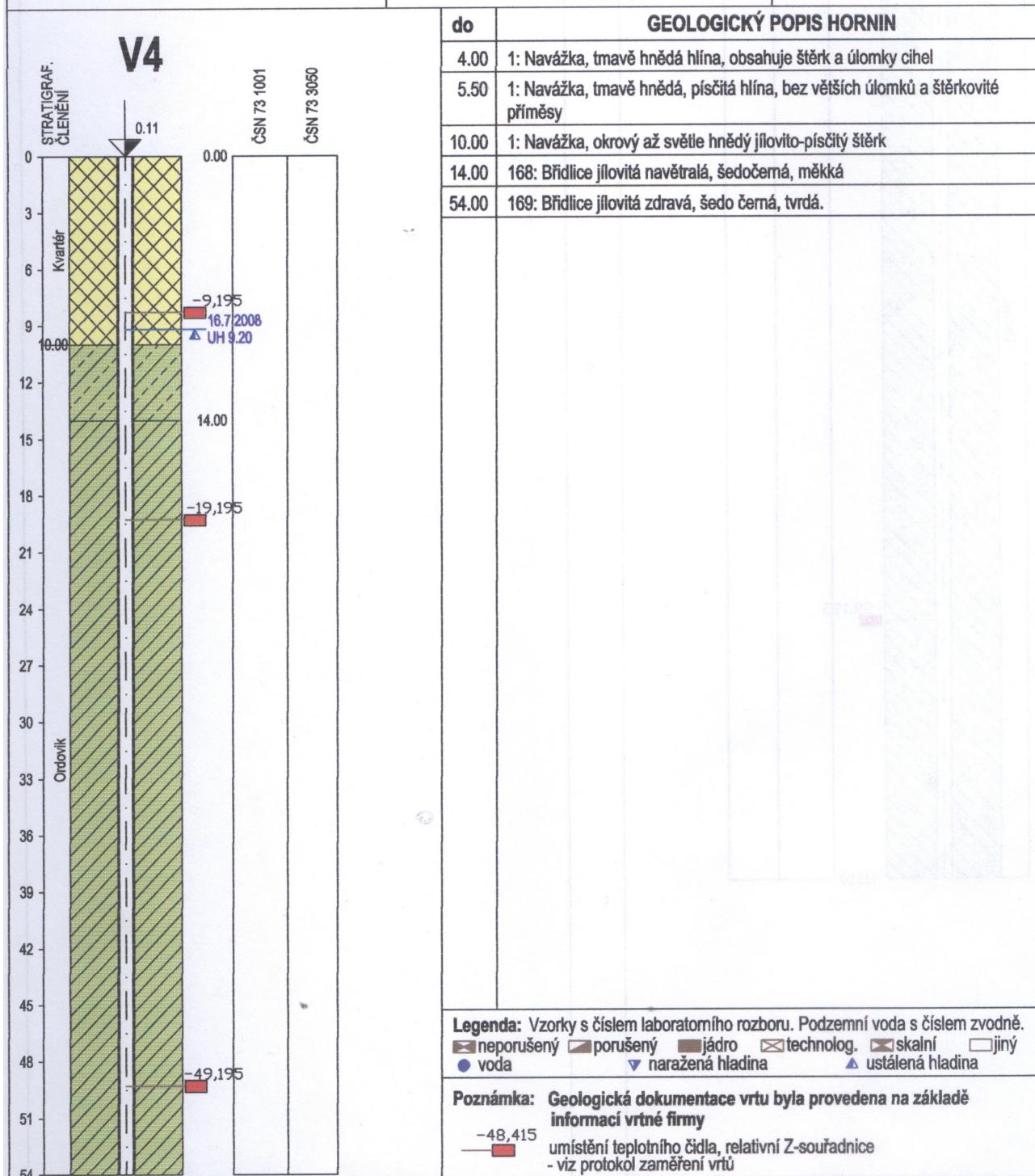


GESTEC, s.r.o.  
163 04 Praha 6 - Bílá Hora, Třanovského 622/11

## GEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VRTU

# V4

Vrtmistr: -	Hĺoubka sondy [m]: 113.00	Y= 734 221.00
Typ soupravy: HVS 482	Hladina podz. vody: naražená [m]:	X= 1 047 736.00
Datum provedení - od: 23.7.2008	ustálená [m]: Hl.= 9.20, Z = -9.10	Z= .11
- do: 24.7.2008		Souř.systémy: JTSK / Relat.
od: [m] do: [m] vrtáno DN [mm]	výstroj: HDPE potrubí GEROTOP, 4 × 32 mm tlaková injektáž bentonitocement. směsí	Okres: Katastr.území: Dolní Měcholupy Mapa 1:25000: 12-244



Název akce: **VESKOM - školící centrum**

Měřítko: 1: 300

Zak. číslo: 4008





Název akce: **VESKOM - školící centrum**

Měřítko: 1: 300

Zak. číslo: 4008

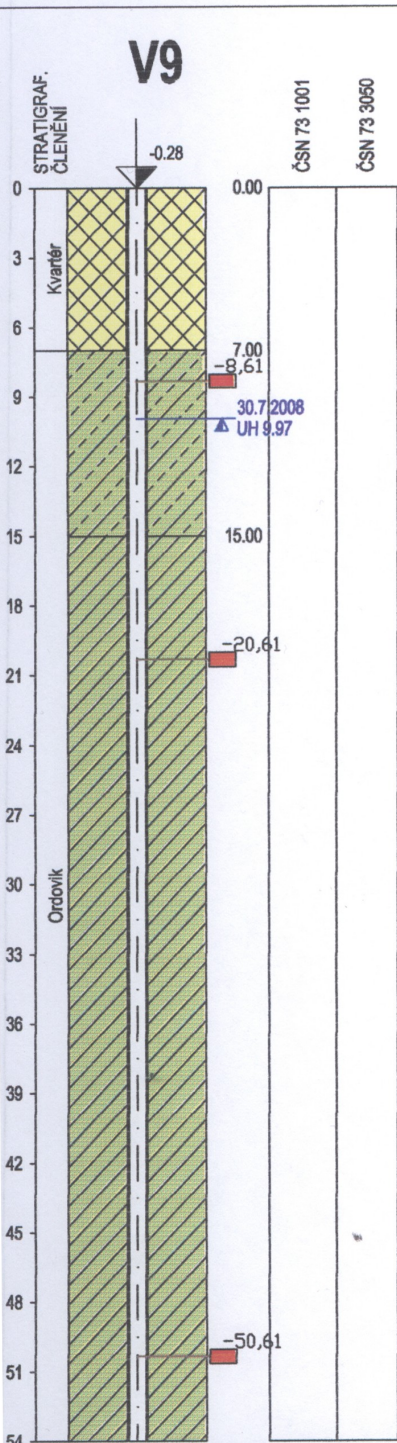
GESTEC, s.r.o.  
163 04 Praha 6 - Bílá Hora, Trnovského 622/11

## GEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VRTU

# V9

Vrtmistr: -	Hloubka sondy [m]: 113.00	Y= 734 226.00
Typ soupravy: HVS 482	Hladina podz. vody: naražená [m]:	X= 1 047 723.00
Datum provedení - od: 28.7.2008	ustálená [m]: HI.= 9.97, Z = -10.25	Z= -28
- do: 30.7.2008		Souř.systémy: JTSK / Relat.

od: [m]	do: [m]	vrtáno DN [mm]	výstroj: vrt bez výstroje, po osazení teplotních čidel zatamponován bentonitocement. směsí	Okres: Katastr.území: Dolní Měcholupy Mapa 1:25000: 12-244
---------	---------	----------------	--	---



do	GEOLOGICKÝ POPIS HORNIN
3.50	1: Navážka, hrubozrný štěrky, kamenná dř, úlomky cihel
7.00	1: Navážka, světle hnědý až okrový, písčité štěrky s drobnými úlomky cihel
15.00	168: Břidlice jílovitá navětralá, šedočerná, měkká. Vývrtek je převážně tvořen měkkými úlomky o velikosti do 2 cm.
54.00	169: Břidlice jílovitá zdravá, šedo černá, tvrdá, místy prachovitá. V úseku 30 - 50 m pod terémem zastíženy rozpukané polohy s patrnými přítoky podzemní vody do vrtu.

**Legenda:** Vzorky s číslem laboratorního rozboru. Podzemní voda s číslem zvodně.  
 ■ neporušený ■ porušený ■ jádro ■ technolog. ■ skální □ jiný  
 ● voda ▼ naražená hladina ▲ ustálená hladina

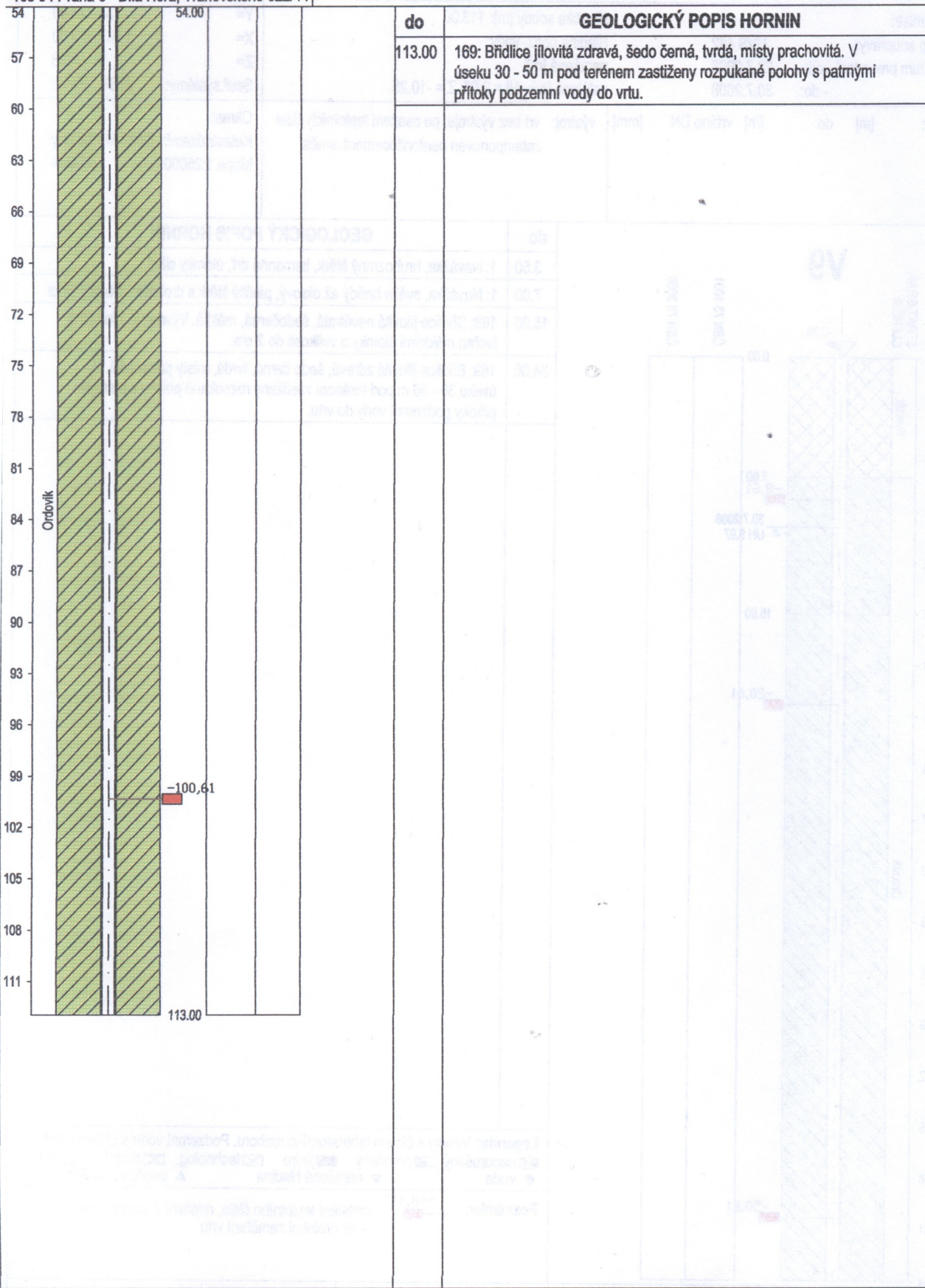
**Poznámka:** -48,415 umístění teplotního čidla, relativní Z-souřadnice - viz protokol zaměření vrtů

Název akce: **VESKOM - školící centrum**

Měřítko: 1: 300

Zak. číslo: 4008





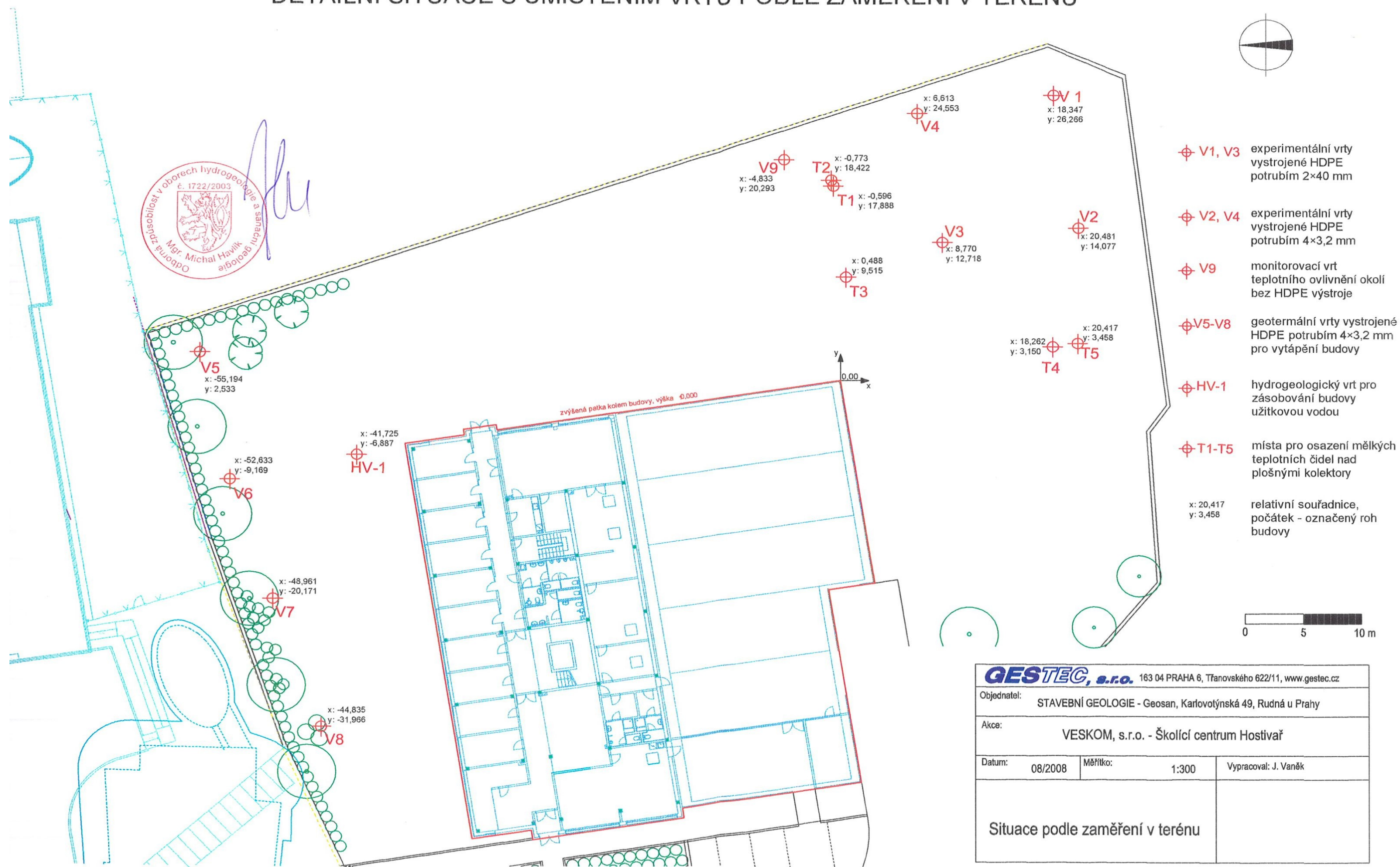
Název akce: **VESKOM - školící centrum**

Měřítko: 1: 300

Zak. číslo: 4008



# DETAILNÍ SITUACE S UMÍSTĚNÍM VRTŮ PODLE ZAMĚŘENÍ V TERÉNU



2010					týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden			
					den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den			
jednotka	pozice v jednotce	číslo. teploměru	skupina	umístění pod povrchem	23	25	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
					7.6.	21.6.	28.6.	15.7.	19.7.	26.7.	2.8.	9.8.	16.8.	23.8.	30.8.	6.9.	13.9.	20.9.	27.9.	4.10.		
JEDNOTKA 2	1	9																				
	2	10																				
	3	11	VT 1	1	14,1	15,7	16,8	20,6	20,2	19,1	19,4	18,7	19,7	19,2	18,0	15,7	15,4	13,9	13,7	12,0		
	4	12	VT 1	9	10,8	9,7	9,7	9,7	9,6	9,6	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,8	8,9	8,0	6,9	6,9	6,0	
	5	13	VT 1	20	10,6	9,8	9,7	9,8	9,8	9,7	9,8	9,8	9,9	9,9	9,8	9,9	9,0	8,4	7,3	7,2	6,4	
	6	14	VT 1	50	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.
	7	15	VT 1	100	10,4	10,4	10,4	10,5	10,5	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,6	8,8	8,4	7,2	7,1	6,3	
	8	16	VT 2	1	17,3	16,9	20,6	25,0	22,1	19,5	21,6	20,1	21,5	21,6	18,1	16,1	16,1	13,4	13,3	11,7		
JEDNOTKA 3	1	17	VT 2	9	10,8	9,7	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,7	9,7	9,8	8,8	8,1	7,0	7,0	6,2		
	2	18	VT 2	20	10,5	9,8	9,8	9,8	9,8	9,7	9,8	9,8	9,8	9,8	9,9	8,7	8,3	7,3	7,2	6,4		
	3	19	VT 2	50	10,2	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,1	9,1	8,3	8,2	7,7		
	4	20	VT 2	100	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	8,8	8,8	7,8	7,7	6,9		
	5	21	VT 3	1	17,9	16,4	19,3	24,9	20,6	18,2	20,7	19,1	20,8	21,0	17,0	15,3	15,5	12,7	12,5	11,6		
	6	22	VT 3	9	10,7	9,1	9,0	9,1	9,1	9,0	9,3	9,4	9,5	9,5	9,7	8,8	8,1	7,1	7,0	6,1		
	7	23	VT 3	20	10,6	9,7	9,7	9,7	9,7	9,6	9,7	9,8	9,7	9,7	9,8	8,9	8,4	7,5	7,4	6,9		
	8	24	VT 3	50	10,2	9,8	9,8	9,8	9,8	9,7	9,9	9,9	9,9	9,9	10,0	8,5	8,2	7,2	7,0	6,3		
JEDNOTKA 4	1	25	VT 3	100	10,3	10,4	10,3	10,4	10,4	10,3	10,5	10,5	10,5	10,5	10,6	8,6	8,2	7,2	7,1	6,3		
	2	26	VT 4	1	14,1	16,1	17,1	20,6	20,5	19,5	19,4	18,9	19,7	19,2	18,4	16,6	16,1	14,8	14,6	12,8		
	3	27	VT 4	9	11,1	9,6	9,6	9,5	9,5	9,5	9,6	9,7	9,7	9,7	9,8	9,3	9,2	8,3	8,3	7,9		
	4	28	VT 4	20	10,7	9,8	9,8	9,8	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	8,8	8,5	7,4	7,4	6,6		
	5	29	VT 4	50	10,2	10,0	9,9	10,0	10,0	9,9	10,0	10,1	10,1	10,0	10,2	8,8	8,5	7,5	7,4	6,6		
	6	30	VT 4	100	10,3	10,5	10,5	10,6	10,6	10,5	10,6	10,7	10,7	10,6	10,8	8,9	8,8	7,8	7,7	6,9		
	7	31	VT 9	1	17,6	16,8	19,9	23,5	21,5	19,4	21,5	19,8	20,9	21,2	17,8	16,5	16,7	14,4	14,1	12,5		
	8	32	VT 9	9	10,0	10,0	9,9	10,0	10,0	9,9	10,0	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9		
JEDN. 5	1	33	VT 9	20	9,9	10,1	10,0	10,0	10,1	9,9	10,1	10,1	10,1	10,0	10,2	10,3	10,2	10,4	10,3	10,2		
	2	34	VT 9	50	10,3	10,4	10,3	10,3	10,4	10,2	10,3	10,4	10,3	10,3	10,4	10,5	10,5	10,6	10,5	10,4		
	3	35	VT 9	100	10,9	11,0	10,9	10,9	11,0	10,8	11,0	11,1	11,0	10,9	11,2	11,4	11,3	11,4	11,3	11,2		

2010					týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden	týden			
					den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den	den		
jednotka	pozice v jednotce	číslo. teploměru	skupina	umístění pod povrchem	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	1	2	3	4	5	6	7	8	
					11.10.	19.10.	25.10.	1.11.	8.11.	16.11.	22.11.	29.11.	10.12.	17.12.	21.12.	3.1.	11.1.	19.1.	27.1.	2.2.	9.2.	17.2.	24.2.	
JEDNOTKA 2	1	9																						
	2	10																						
	3	11	VT 1	1	11,6	10,0	8,9	7,6	9,3	8,6	7,3	4,6	3,9	3,2	3,2	2,5	2,1	3,2	2,2	1,4	1,8	2,1	1,3	
	4	12	VT 1	9	6,4	5,8	5,4	4,6	4,9	5,0	4,2	3,1	5,9	3,1	4,5	1,3	3,8	7,1	6,8	2,9	6,2	6,8	5,7	
	5	13	VT 1	20	7,0	6,3	6,0	5,2	5,4	5,4	4,7	3,8	6,3	3,8	5,0	1,9	4,3	7,4	7,2	3,6	6,5	7,2	6	
	6	14	VT 1	50	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.	CH.
	7	15	VT 1	100	6,8	6,3	5,8	4,9	5,2	5,3	4,6	3,4	6,3	3,5	4,9	1,5	4,1	7,7	7,5	3,4	7	7,6	6,4	
	8	16	VT 2	1	10,4	8,6	7,1	5,4	8,4	7,7	6,1	2,8	2,3	1,5	1,3	0,8	0,7	2,4	1,3	0,7	1,5	1,6	0,7	
JEDNOTKA 3	1	17	VT 2	9	6,7	6,1	5,7	4,8	5,1	5,2	4,4	3,2	5,9	3,3	4,7	1,3	4,0	7,1	6,8	3,2	6,3	6,8	5,4	
	2	18	VT 2	20	7,0	6,3	5,9	5,0	5,3	5,4	4,5	3,3	6,1	3,4	4,9	1,3	4,1	7,3	7	3,4	6,5	7	5,6	
	3	19	VT 2	50	8,0	7,4	7,1	6,2	6,5	6,6	5,7	4,8	6,7	4,6	6,0	3,7	5,3	7,6	7,3	4,7	7,3	7,5	6,3	
	4	20	VT 2	100	7,5	6,9	6,5	5,6	5,8	5,9	5,1	3,5	6,5	3,8	5,4	1,5	4,5	7,6	7,4	3,7	7,2	7,7	6,2	
	5	21	VT 3	1	9,8	8,7	7,2	5,6	8,5	8,1	6,2	3,1	2,0	1,2	1,0	0,6	0,4	2,7	1,2	0,5	1	1,4	0,2	
	6	22	VT 3	9	6,9	6,1	5,8	4,9	5,2	5,2	4,3	3,1	6,0	3,1	4,8	1,3	4,0	7,4	7,1	3	6,2	7,2	5,8	
	7	23	VT 3	20	7,2	6,5	6,1	5,2	5,5	5,6	4,7	3,4	6,1	3,4	5,0	1,9	4,2	7,4	7,1	3,1	6,5	7,1	5,9	
	8	24	VT 3	50	6,8	6,2	5,9	5,1	5,3	5,4	4,6	3,6	6,2	3,7	5,0	1,8	4,3	7,6	7,3	3,5	6,7	7,3	6,2	
JEDNOTKA 4	1	25	VT 3	100	7,0	6,4	6,0	5,1	5,3	5,4	4,6	3,6	6,5	3,8	5,2	1,7	4,3	7,9	7,7	3,6	6,9	7,6	6,4	
	2	26	VT 4	1	12,8	11,0	9,8	8,8	10,0	9,4	8,4	5,8	4,9	4,2	4,0	3,3	2,9	4,2	3,3	2,6	2,8	3,2	2,4	
	3	27	VT 4	9	8,0	7,4	7,0	6,1	6,5	6,5	5,7	3,9	6,1	4,0	6,0	2,2	5,1	7,8	7,4	4,2	7	7,3	5,8	
	4	28	VT 4	20	7,0	6,5	6,1	5,2	5,5	5,6	4,8	3,4	6,1	3,5	5,1	1,7	4,3	7,2	6,9	3,6	6,7	7,1	5,6	
	5	29	VT 4	50	7,1	6,5	6,1	5,2	5,5	5,5	4,7	3,5	6,4	3,7	5,2	1,6	4,4	7,6	7,4	3,6	7	7,5	6	
	6	30	VT 4	100	6,5	6,9	6,5	5,5	5,8	5,9	5,1	3,8	6,8	4,0	5,5	1,9	4,7	8	7,8	3,9	7,4	8	6,5	
	7	31	VT 9	1	11,6	10,0	8,8	7,4	9,6	9,0	7,2	3,9	3,1	2,5	2,4	1,6	1,5	3,3	1,8	1,1	1,9	1,7	0,8	
	8	32	VT 9	9	11,1	11,2	11,3	11,4	11,4	11,4	11,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,7	11,8	11,7	11,7	11,6	11,6	11,5
JEDN. 5	1	33	VT 9	20	10,5	10,3	10,4	10,4	10,3	10,3	10,2	10,5	10,4	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,2	10,4	10,3	
	2	34	VT 9	50	10,7	10,6	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6	10,3	10,5	10,4	
	3	35	VT 9	100	11,6	11,4	11,4	11,4	11,3	11,3	11,3	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11	11,4	11,2	

z (m)
0
2
3
4
5
10

		7.6.2010	21.6.2010	28.6.2010	15.7.2010	19.7.2010	26.7.2010	2.8.2010	9.8.2010	16.8.2010	23.8.2010	30.8.2010	6.9.2010	13.9.2010	20.9.2010	27.9.2010	4.10.2010
Venkovní teplota	<b>0 m</b>	29	23,6	26,2	34,8	26,1	25,8	32,7	22	26,5	30,4	16,9	21	19,7	22,4	12,4	13,9
VT 9	<b>1 m</b>	17,6	16,8	19,9	23,5	21,5	19,4	21,5	19,8	20,9	21,2	17,8	16,5	16,7	14,4	14,1	12,5
VT 9	<b>9 m</b>	10,0	10,0	9,9	10,0	10,0	9,9	10,0	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9
VT 9	<b>20 m</b>	9,9	10,1	10,0	10,0	10,1	9,9	10,1	10,1	10,1	10,0	10,2	10,3	10,2	10,4	10,3	10,2
VT 9	<b>50 m</b>	10,3	10,4	10,3	10,3	10,4	10,2	10,3	10,4	10,3	10,3	10,4	10,5	10,5	10,6	10,5	10,4
VT 9	<b>100 m</b>	10,9	11,0	10,9	10,9	11,0	10,8	11,0	11,1	11,0	10,9	11,2	11,4	11,3	11,4	11,3	11,2
T*	střední hodnota teploty během periody	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
T <sub>AO</sub>	amplituda teploty na povrchu	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
L	útlumová hloubka	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
ω	úhlová frekvence	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199
t	čas (s)	0	1209600	1814400	3283200	3628800	5270400	5875200	6480000	7948800	8553600	9158400	9763200	10368000	10972800	11577600	12268800
T <sub>0</sub>	teplota na povrchu 0 m	10,3	14,73	16,87	21,61	22,59	26,42	27,42	28,17	28,9	28,74	28,31	27,63	26,69	25,52	24,12	22,28
T <sub>2</sub>	teplota v hloubce 2 m	4,36	6,25	7,29	9,96	10,6	13,58	14,61	15,57	17,56	18,22	18,75	19,17	19,45	19,6	19,62	19,48
T <sub>3</sub>	teplota v hloubce 3 m	4,62	5,59	6,18	7,84	8,27	10,39	11,19	11,97	13,74	14,39	14,99	15,51	15,96	16,33	16,61	16,82
T <sub>4</sub>	teplota v hloubce 4 m	5,7	6,05	6,31	7,19	7,44	8,78	9,32	9,88	11,24	11,79	12,31	12,8	13,26	13,67	14,04	14,39
T <sub>5</sub>	teplota v hloubce 5 m	7,02	7	7,05	7,39	7,51	8,23	8,55	8,9	9,83	10,23	10,63	11,02	11,4	11,77	12,12	12,48
T <sub>10</sub>	teplota v hloubce 10 m	10,48	10,34	10,27	10,1	10,06	9,9	9,85	9,81	9,73	9,72	9,71	9,71	9,72	9,74	9,76	9,8

		11.10.2010	19.10.2010	25.10.2010	1.11.2010	8.11.2010	16.11.2010	22.11.2010	29.11.2010	10.12.2010	17.12.2010	21.12.2010	3.1.2011	11.1.2011	19.1.2011	27.1.2011	2.2.2011	9.2.2011	17.2.2011	24.2.2011
Venkovní teplota	<b>0 m</b>	14,7	12,1	10,1	15,5	7,3	8,5	10,6	1,5	1	-2,4	3	2,4	4,7	4,4	2,7	2,6	8,5	5,2	2,1
VT 9	<b>1 m</b>	11,6	10,0	8,8	7,4	9,6	9,0	7,2	3,9	3,1	2,5	2,4	1,6	1,5	3,3	1,8	1,1	1,9	1,7	0,8
VT 9	<b>9 m</b>	11,1	11,2	11,3	11,4	11,4	11,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,7	11,8	11,7	11,7	11,6	11,6	11,5
VT 9	<b>20 m</b>	10,5	10,3	10,4	10,4	10,3	10,3	10,2	10,5	10,4	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,2	10,4	10,3
VT 9	<b>50 m</b>	10,7	10,6	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6	10,3	10,5	10,4
VT 9	<b>100 m</b>	11,6	11,4	11,4	11,4	11,3	11,3	11,3	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11	11,4	11,2
T*	střední hodnota teploty během periody	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
T <sub>AO</sub>	amplituda teploty na povrchu	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
L	útlumová hloubka	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
ω	úhlová frekvence	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199	0,000000199
t	čas (s)	12873600	13564800	14083200	14688000	15292800	15984000	16588800	17193600	18144000	18748800	19094400	20217600	20908800	21600000	22291200	22809600	23414400	24105600	24710400
T <sub>0</sub>	teplota na povrchu 0 m	20,49	18,26	16,49	14,34	12,13	9,57	7,34	5,16	1,89	-0,04	-1,08	-4,06	-5,54	-6,73	-7,59	-8,02	-8,27	-8,23	-7,91
T <sub>2</sub>	teplota v hloubce 2 m	19,21	18,75	18,29	17,66	16,92	15,95	15,02	14,02	12,34	11,23	10,59	8,52	7,28	6,1	4,99	4,23	3,42	2,62	2,04
T <sub>3</sub>	teplota v hloubce 3 m	16,9	16,88	16,78	16,58	16,29	15,85	15,37	14,83	13,84	13,15	12,73	11,31	10,4	9,49	8,6	7,95	7,23	6,45	5,84
T <sub>4</sub>	teplota v hloubce 4 m	14,63	14,84	14,93	14,98	14,96	14,86	14,7	14,47	14	13,63	13,39	12,54	11,95	11,33	10,7	10,21	9,65	9,02	8,49
T <sub>5</sub>	teplota v hloubce 5 m	12,76	13,05	13,22	13,39	13,51	13,6	13,62	13,59	13,45	13,31	13,2	12,78	12,45	12,08	11,68	11,36	10,98	10,53	10,13
T <sub>10</sub>	teplota v hloubce 10 m	9,84	9,9	9,94	10	10,07	10,14	10,21	10,28	10,4	10,47	10,5	10,62	10,69	10,74	10,79	10,82	10,85	10,88	10,89

		7.6.2010	21.6.2010	28.6.2010	15.7.2010	19.7.2010	26.7.2010	2.8.2010	9.8.2010	16.8.2010	23.8.2010	30.8.2010	6.9.2010	13.9.2010	20.9.2010	27.9.2010	4.10.2010	11.10.2010	19.10.2010
Venkovní teplota	0 m	29	23,6	26,2	34,8	26,1	25,8	32,7	22	26,5	30,4	16,9	21	19,7	22,4	12,4	13,9	14,7	12,1
VT 2	teplota v hloubce 0,2 m	17,3	16,9	20,6	25,0	22,1	19,5	21,6	20,1	21,5	21,6	18,1	16,1	16,1	13,4	13,3	11,7	10,4	8,6
VT 2	teplota v hloubce 9 m	10,8	9,7	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,7	9,7	9,8	8,8	8,1	7,0	7,0	6,2	6,7	6,1
VT 2	teplota v hloubce 20 m	10,5	9,8	9,8	9,8	9,8	9,7	9,8	9,8	9,8	9,8	9,9	8,7	8,3	7,3	7,2	6,4	7,0	6,3
VT 2	teplota v hloubce 50 m	10,2	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,1	9,1	8,3	8,2	7,7	8,0	7,4
VT 2	teplota v hloubce 100 m	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	8,8	8,8	7,8	7,7	6,9	7,5	6,9
VT 9	teplota v hloubce 0,2 m	17,6	16,8	19,9	23,5	21,5	19,4	21,5	19,8	20,9	21,2	17,8	16,5	16,7	14,4	14,1	12,5	11,6	10,0
VT 9	teplota v hloubce 9 m	10,0	10,0	9,9	10,0	10,0	9,9	10,0	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11,1	11,2
VT 9	teplota v hloubce 20 m	9,9	10,1	10,0	10,0	10,1	9,9	10,1	10,1	10,1	10,0	10,2	10,3	10,2	10,4	10,3	10,2	10,5	10,3
VT 9	teplota v hloubce 50 m	10,3	10,4	10,3	10,3	10,4	10,2	10,3	10,4	10,3	10,3	10,4	10,5	10,5	10,6	10,5	10,4	10,7	10,6
VT 9	teplota v hloubce 100 m	10,9	11,0	10,9	10,9	11,0	10,8	11,0	11,1	11,0	10,9	11,2	11,4	11,3	11,4	11,3	11,2	11,6	11,4
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 0,2 m	0,3	-0,1	-0,7	-1,5	-0,6	-0,1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,4	-0,3	0,4	0,6	1	0,8	0,8	1,2	1,4
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 9 m	-0,8	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	1,7	2,5	3,7	3,8	4,7	4,4	5,1
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 20 m	-0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	1,6	1,9	3,1	3,1	3,8	3,5	4
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 50 m	0,1	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	1,4	1,4	2,3	2,3	2,7	2,7	3,2
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 100 m	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,7	2,6	2,5	3,6	3,6	4,3	4,1	4,5

		25.10.2010	1.11.2010	8.11.2010	16.11.2010	22.11.2010	29.11.2010	10.12.2010	17.12.2010	21.12.2010	3.1.2011	11.1.2011	19.1.2011	27.1.2011	2.2.2011	9.2.2011	17.2.2011	24.2.2011
Venkovní teplota	0 m	10,1	15,5	7,3	8,5	10,6	1,5	1	-2,4	3	2,4	4,7	4,4	2,7	2,6	8,5	5,2	2,1
VT 2	teplota v hloubce 0,2 m	7,1	5,4	8,4	7,7	6,1	2,8	2,3	1,5	1,3	0,8	0,7	2,4	1,3	0,7	1,5	1,6	0,7
VT 2	teplota v hloubce 9 m	5,7	4,8	5,1	5,2	4,4	3,2	5,9	3,3	4,7	1,3	4,0	7,1	6,8	3,2	6,3	6,8	5,4
VT 2	teplota v hloubce 20 m	5,9	5,0	5,3	5,4	4,5	3,3	6,1	3,4	4,9	1,3	4,1	7,3	7	3,4	6,5	7	5,6
VT 2	teplota v hloubce 50 m	7,1	6,2	6,5	6,6	5,7	4,8	6,7	4,6	6,0	3,7	5,3	7,6	7,3	4,7	7,3	7,5	6,3
VT 2	teplota v hloubce 100 m	6,5	5,6	5,8	5,9	5,1	3,5	6,5	3,8	5,4	1,5	4,5	7,6	7,4	3,7	7,2	7,7	6,2
VT 9	teplota v hloubce 0,2 m	8,8	7,4	9,6	9,0	7,2	3,9	3,1	2,5	2,4	1,6	1,5	3,3	1,8	1,1	1,9	1,7	0,8
VT 9	teplota v hloubce 9 m	11,3	11,4	11,4	11,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,7	11,8	11,7	11,7	11,6	11,6	11,5
VT 9	teplota v hloubce 20 m	10,4	10,4	10,3	10,3	10,2	10,5	10,4	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,2	10,4	10,3
VT 9	teplota v hloubce 50 m	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6	10,3	10,5	10,4
VT 9	teplota v hloubce 100 m	11,4	11,4	11,3	11,3	11,3	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11	11,4	11,2
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 0,2 m	1,7	2	1,2	1,3	1,1	1,1	0,8	1	1,1	0,8	0,8	0,9	0,5	0,4	0,4	0,1	0,1
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 9 m	5,6	6,6	6,3	6,2	7,1	8,4	5,7	8,4	7	10,5	7,7	4,7	4,9	8,5	5,3	4,8	6,1
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 20 m	4,5	5,4	5	4,9	5,7	7,2	4,3	7,1	5,5	9,1	6,3	3,1	3,4	7	3,7	3,4	4,7
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 50 m	3,5	4,4	4	3,9	4,8	5,9	3,9	6	4,5	6,8	5,2	2,9	3,3	5,9	3	3	4,1
VT9 – VT2	rozdíl teplot v hloubce 100 m	4,9	5,8	5,5	5,4	6,2	8,1	5	7,7	6	9,9	6,9	3,8	4	7,7	3,8	3,7	5