



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

GEOTERMÁLNÍ ENERGIE - VLIV GEOMETRIE VRTU

GEOHERMAL ENERGY - INFLUENCE OF THE BOREHOLE GEOMETRY

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Augustin Leiter

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUMÍR MIČA, Ph.D.

BRNO 2018

Klíčová slova:

geotermální energetický vrt, pole vrtů, tvar vrtu, inklinometr.

Keywords:

geothermal borehole, inclined borehole, borehole deviation, geothermal borehole geometry, distortion of grid geometry, inclinometer.

Místo uložení rukopisu

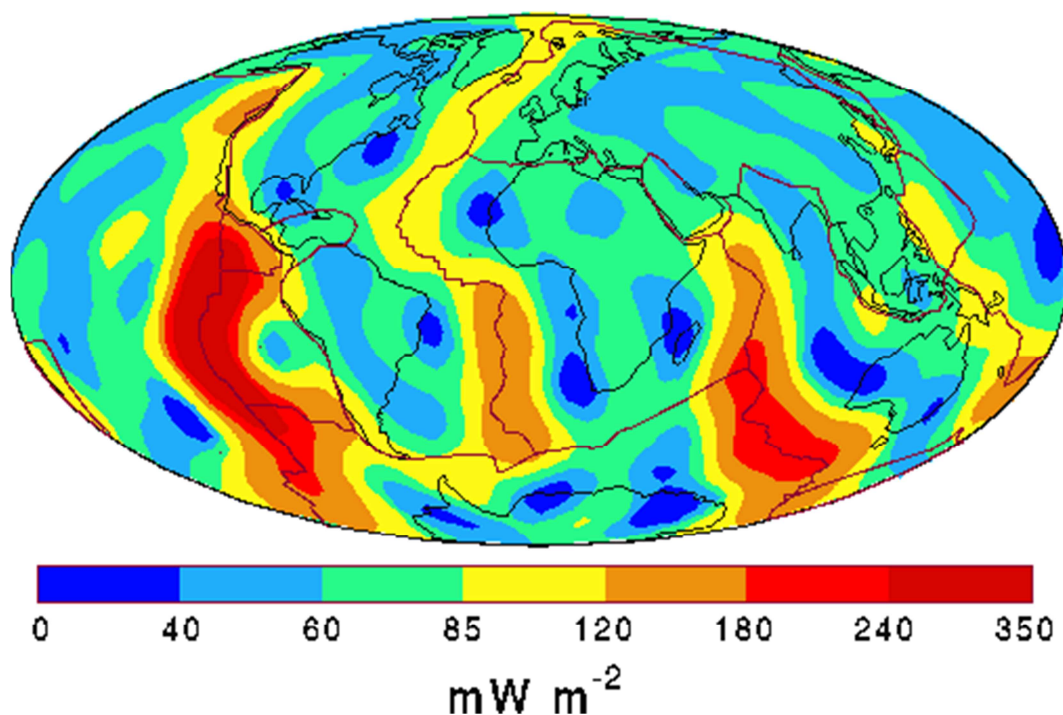
Ústav geotechniky, Fakulta stavební, VUT v Brně

OBSAH

1	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
1.1	Úvod.....	5
1.2	Situace ve světě a v ČR.....	6
1.3	Možnosti využití geotermálního tepla.....	7
1.4	Geotermální energetický vrt.....	7
1.5	Reálné pole geotermálních vrtů	9
1.6	Možnosti určení geometrie geotermálního vrtu	10
2	CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	11
3	VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE.....	11
3.1	Analýza vlivu odklonu vrtu.....	11
3.1.1	<i>Zjednodušený matematický model systému vrtů a okolí ve 2D.....</i>	<i>11</i>
3.1.2	<i>Ověření výsledků modelu pomocí softwaru FEFLOW.....</i>	<i>13</i>
3.2	Vývoj speciálního měřicího přístroje k určení geometrie geotermálního vrtu	13
3.2.1	<i>Konstrukce specializované sondy.....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Ověření činnosti sondy.....</i>	<i>16</i>
3.2.3	<i>Zkouška v reálném vrtu</i>	<i>17</i>
3.2.4	<i>Závěr - stav vyvíjeného měřicího zařízení.....</i>	<i>19</i>
3.3	Vývoj software určeného k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ.....	19
3.3.1	<i>Matematický základ.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Software k rychlému vyhodnocení tepelných vlastností systému vrtů.....</i>	<i>20</i>
3.3.3	<i>Ověření činnosti software</i>	<i>21</i>
3.3.4	<i>Shrnutí.....</i>	<i>22</i>
4	ZÁVĚR.....	23
5	LITERATURA	24

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1.1 ÚVOD



Obr. 1: Mapa geotermálního energetického toku, svět. [1]

Geotermální energie patří k nejstarším formám energie na naší planetě. Její využití lidstvem sahá až k počátkům věků. Existují doklady o využívání horkých pramenů americkými paleo-indiány v dobách před 10 000 lety. Lidé využívali vodu z termálních pramenů k vaření, koupání a umývání. [2]

Využití tepelné energie bylo významné ve starověkém Římě – vytápění lázní – na území dnešní Itálie, Německa, Francie, Španělska, Řecka, Turecka, ba i dnešní Anglie. Objevilo se i v civilizacích na Blízkém i Dalekém Východě. Později se využití rozšiřovalo i na vytápění obytných domů a skleníků. Na Islandu lidé používali teplo z geotermálních zdrojů k vytápění domů, hlavní město Reykjavík bylo zásobováno teplem postupně od roku 1928. Nakonec se objevily i první průmyslové aplikace - k prvnímu průmyslovému využití došlo pravděpodobně v Pise, kde v roce 1827 navrhl Ital Francesco Larderel využití přehřáté páry z fumarol v Toskáne na výrobu kyseliny borité. V roce 1904 pak byla poprvé využitím geotermálního tepla vyrobena elektrická energie. [3]

Všechny aplikace souvisí s využitím tepelného toku z nitra Země, který je uvolňován v kontinentální zemské kůře směrem k povrchu. Jeho intenzita má průměrnou hodnotu 57 mW/m². Celkový geotermální výkon Země je přes 4×10^{13} W (40 000 GW), což je zhruba čtyřnásobek současné celosvětové potřeby energie.

Původ tepelného toku je v teplotním gradientu mezi povrchem a zemským jádrem, které má vysokou teplotu (5 000°C). Vysoká teplota zemského jádra je způsobena teplem uvolněným při formaci Země před 4,5 miliardami let, kdy

kinetická energie srážek materiálů byla přeměněna v teplo. Dále je materiál jádra a pláště kontinuálně oteplován teplem uvolňovaným z rozpadajících se radioaktivních izotopů s dlouhým poločasem rozpadu, především ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U a ^{238}U (zhruba 30 000 GW). [4]

Na hranicích mezi zemskými deskami dochází k velkým tlakům a vývěru žhavého magmatu (pouze několik km pod povrchem, sopečná činnost), což způsobuje vysoké tepelné toky až 300 W/m^2 . Na Obr. 1 lze dobře vidět vysoké energetické toky v oblastech kontaktu litosférických desek. Tato místa jsou současně také místy s vysokým tzv. geotermálním teplotním gradientem, tzn. nárůstem teploty s hloubkou pod zemským povrchem. Průměrný teplotní gradient blízko povrchu do několika km je cca 30 K/km , nicméně jsou místa, kde klesá až na 10 K/km a místa kde dosahuje hodnot nad 100 K/km (místa s aktivní sopečnou činností). [5]

1.2 SITUACE VE SVĚTĚ A V ČR

Využití geotermálního tepla je obvykle vázáno na vhodné přírodní podmínky. Vynikající předpoklady v tomto smyslu má bezesporu Island, kde je geotermální energie (dále jen g. e.) široce využíváno k vyhřívání islandských domů. Další země, které g. e. využívají ve větším měřítku, jsou zejména USA, Velká Británie, Francie, Švýcarsko, Německo a Nový Zéland. [6]

Obvyklé využití g. e. je k topení, lze jej však využít též k výrobě elektrické energie, avšak tato zařízení jsou technologicky značně náročná (především kvůli hloubce, do které je třeba proniknout). Proto je toto využití méně časté. První geotermální elektrárna byla otevřena v Itálii v Larderellu v roce 1904. [3] Největší instalace v současné době jsou v USA, následují Filipíny a Indonésie, největší podíl geotermálních elektráren relativně k celkové výrobě má Island. [6]

Z mapy geotermálního energetického toku v ČR je zřejmé, že oblasti s tokem vyšším než 95 mW/m^2 jsou zastoupeny výjimečně. [7] Přesto existují i u nás realizace, které vysokopotenciálovou formu geotermální energie využívají, mezi významné realizace patří:

- Ústí nad Labem, vytápění plaveckých bazénů a od r. 2006 také k vytápění zoologické zahrady,
- Děčín od r. 2002 pro vytápění poloviny města využívá potenciál tepla vody z podzemního jezera v hloubce 545 m, průměrná roční produkce elektřiny je 18700 MW [8],
- Litoměřice - zde se hloubil zkušební vrt pro geotermální elektrárnu (projektované parametry: hloubka zkušebního vrtu 2500 m, hloubka produkčních vrtů 5000 m, metoda získávání tepla HDR, projektované parametry 50 MW tepelných a 5 MW elektrických),
- Liberec - hlouben zkušební vrt pro geotermální elektrárnu firmou ČEZ, předpokládaný výkon elektrárny v jednotkách či desítkách MW. [9]

Většinou však jsou na území našeho státu mnohem vhodnější podmínky pro nízkopotenciálové systémy, tedy takové, u nichž se předpokládá dosažení hloubky v

řádech desítek (energopiloty) až stovek metrů (geotermální vrty). Jako příklad takových známých aplikací v ČR lze uvést:

- AZ Tower, Brno - realizace firma GEROTop, výška budovy 111 m, využívá energetických základů (piloty, základy) pro akumulaci, celkový výkon tepelných čerpadel 200 kW, otevřena v létě 2013 [10],
- VŠB TU Ostrava, Ostrava-Poruba - pro vytápění auly a ohřev TUV slouží systém 110 geotermálních vrtů o hloubce 142 m, výkon tepelných čerpadel 650 kW, realizace 2006,
- Centrum AdMaS, FAST, VUT v Brně - pro vytápění a ohřev TUV v testovacím provozu, systém zhruba stovky vrtů o hloubkách 100-140 m, plošné geotermální kolektory, výzkumná činnost.

1.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ GEOTERMÁLNÍHO TEPLA

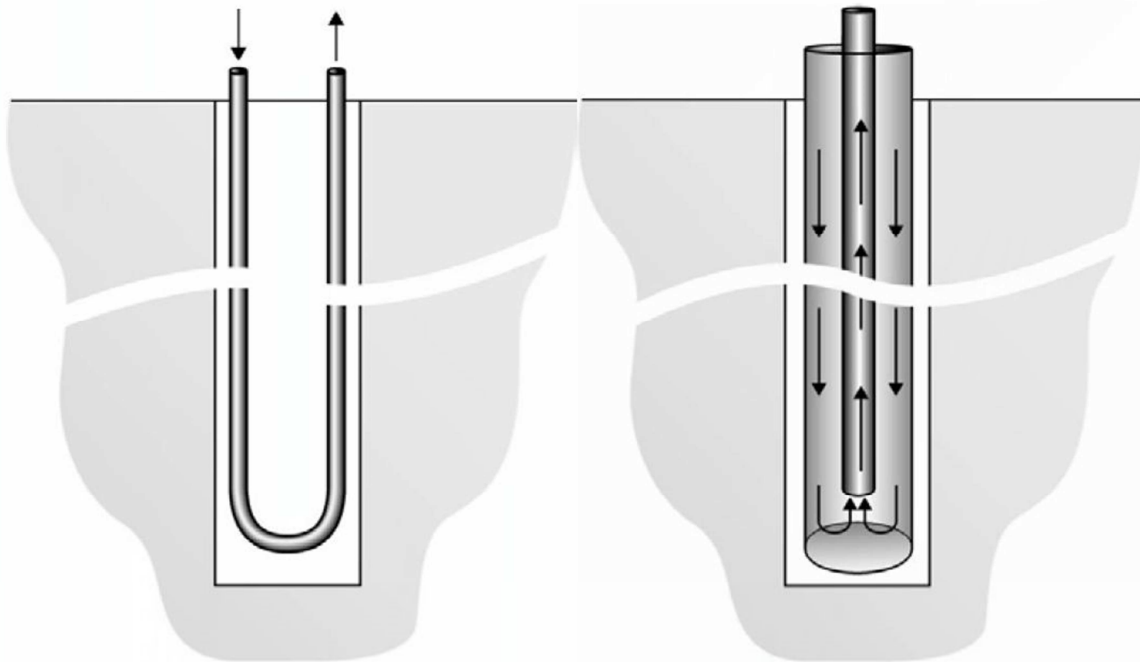
Geotermální teplo je pro lidstvo využitelné různými technologickými postupy. Podle těchto technologických postupů je možné bez nároku na úplnost nebo neměnnost rozdělit využívání geotermální energie (dále jen g. e.) do následujících kategorií:

- vysokopotenciálová g. e., patří sem technologie HDR (Hot Dry Rock), neboli využití tepla suché hydraulicky rozštípané horniny ve velké hloubce [11] a FDR (Fractured Dry Rock) – teplo již přirozeně rozpuštěné horniny,
- nízkopotenciálová g. e. (zpravidla pro vytápění), do této kategorie patří geotermální energetické vrty (Borehole Heat Exchanger, BHE, BHTE), energopiloty [12], [13], podzemní pažící stěny stěny [14], zemní plošné výměníky a hydrotermální systémy,
- odběr teplé vody jímacím vrtem ze zvodně (méně časté),
- využití jako tepelný akumulátor (vyrovnání výkyvu např. v ročním teplotním cyklu),
- kombinace.

V České republice obecně nejsou obvykle splněny podmínky pro využívání vysokopotenciálové formy g.e., protože vrstvy s vhodnou teplotou jsou na většině území uloženy hluboko. Pro další obsah práce má stěžejní význam využívání nízkopotenciální g. e. s využitím geotermálního energetického vrtu, jemuž se věnuje následující kapitola.

1.4 GEOTERMÁLNÍ ENERGETICKÝ VRT

V běžném geotermálním energetickém vrtu pro využívání nízkopotenciálové g. e. je instalován tepelný výměník – obvykle ve formě jednoduché či dvojité U-trubice, vzácně koaxiální výměník (viz Obr. 2) – ve kterém obíhá teplotnosné médium (voda s přísadami).

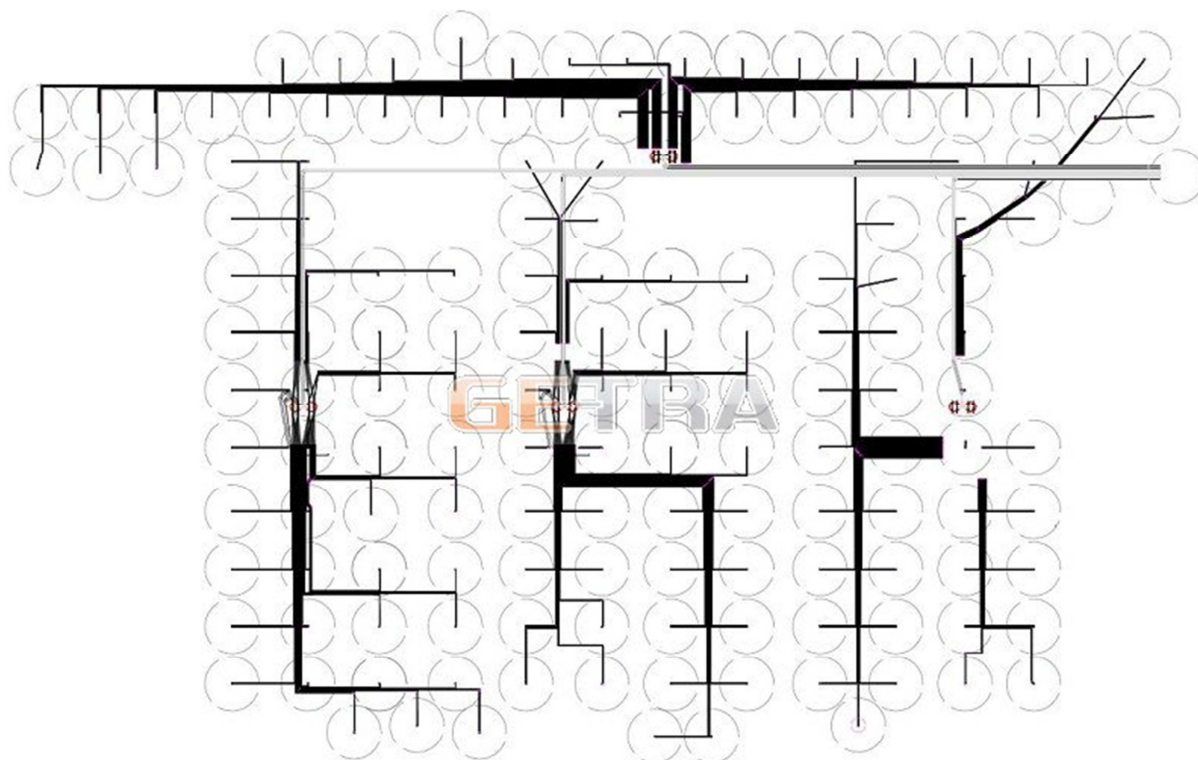


Obr. 2: Geotermální vrt - trubkový výměník, vlevo jednoduchá U-trubice, vpravo koaxiální typ [15 str. 20]

Obvyklá hloubka geotermálního energetického vrtu bývá 100 - 200m. Prostor mezi výměníkem a vnitřním povrchem vrtu se vyplňuje injektážní zálivkou pro zlepšení přestupu tepla. Ve výměníku obíhá voda, která se při sestupu do hloubky dostává do oblasti masivu se stále vyšší teplotou. Voda přes stěnu výměníku tuto tepelnou energii přijímá. Rozdíl mezi teplotou vody na vstupu a na výstupu výměníku je potom možné využít jako zdroje tepla.

Získané teplo má nízkou teplotu a pro topení je nezbytné užití tepelného čerpadla. Systém je možné použít i pro přímé chlazení, obvyklé teploty vystupující vody pro topnou aplikaci s tepelným čerpadlem se mohou pohybovat v rozsahu -5°C až 10°C , pro přímé chlazení 20°C až 40°C . V případě chlazení se jedná o ukládání energie do podloží.

Pro instalace s větším výkonem již nelze vystačit s jediným vrtem. Pak tedy bývá tepelný výměník proveden jako pole geotermálních vrtů, což umožňuje pokrytí většího objemu masivu. Příklad plánu rozvodné potrubní sítě pole geotermálních vrtů je na Obr. 3.



Obr. 3: Příklad pole geotermálních vrtů, plán rozváděcího a sběrného potrubí [16]

1.5 REÁLNÉ POLE GEOTERMÁLNÍCH VRTŮ

Jako příklad lze uvést pole vrtů, které používá Vysoká škola báňská (VŠB) v Ostravě pro vytápění auly a přípravu TUV. Jako zdroj tepla slouží 110 geotermálních vrtů o hloubce 142 m. Velký počet vrtů představuje poměrně drahou záležitost. Proto se v obdobných případech při výstavbě vrtá nejmenším možným průměrem, což je běžně průměr 4“ (100 mm). Do vrtu se potom zavede připravený výměník (U-trubice). [17]

Kvůli malému průměru vrtu je i vůle mezi vnitřním povrchem vrtu a výměníkem velmi malá. To může působit obtíže při instalaci výměníku. Pokud dojde i jen k malému zmenšení průchozího profilu vrtu, výměník tímto místem již obvykle není možné protáhnout a vrt je tak znehodnocen. Proto instalace výměníku obvykle probíhá okamžitě po dokončení vrtání. Je tak téměř jisté úspěšné zavedení výměníku, naopak při prodlení do druhého dne již pravděpodobnost neúspěchu nepřiměřeně roste.

Při realizaci pole vrtů vzhledem k jejich blízkosti může dojít k jejich vzájemnému přiblížení vlivem nerovného vrtání až případně k jejich vzájemnému průniku. To je dokladováno zkušeností doc. RNDr. Pavla Pospíšila, Ph.D., kdy při výstavbě obdobného vrtného pole vrtná souprava provrtala již dříve vyvrtaný a vystrojený vrt. Jasně se tedy ukázalo, že vrty nemusí být svislé, vzájemně paralelní a kolmé k zemskému povrchu, ale že jejich geometrie je mnohem složitější a často má daleko do ideálního požadovaného tvaru.

Odchyłka polohy (tvaru) vrtu od zamýšleného má vliv na vlastnosti celého vrtného pole. Pokud je pole správně navrženo, odchyłka od navržené geometrie zvýší nerovnoměrnost rozložení teplot a tím tepelný odpor celého pole a má tedy negativní vliv.

1.6 MOŽNOSTI URČENÍ GEOMETRIE GEOTERMÁLNÍHO VRTU

Pro změření tvarů již vyvrtaného vrtu existují měřicí přístroje se sondou dosti podobnou inklinometrické sondě. Jako zdroj informace o úklonu vrtu je často využíván akcelerometr. Pro stanovení směru úklonu (kurzu, azimutu) se využívají různé metody, například řetěz s kardanovými klouby, magnetický kompas, systém s využitím gyroskopů. Podstatné vlastnosti několika takových zařízení pro měření tvaru vrtu shrnuje Tab. 1.

Tab. 1: Souhrnné podstatné vlastnosti v textu uváděných speciálních inklinometrů

Výrobce	Zařízení	Princip činnosti	Průměr	Přesnost
MDL (Renisaw)	Rodded Boretrak [18]	2-ax akcelerometr + řetěz určující natočení	38mm	úklon 0,1°
MDL (Renisaw)	Cabled Boretrak [19]	2-ax akcelerometr + digitální kompas	38mm	úklon 0,2° kurz ±1°
MSI	QL40-DEV [20]	3-ax akcelerometr + 3-ax magnetometr	40mm	úklon ±0,5° kurz ±1,2°
Solexperts AG	EZ-Trac [21 str. 2]	akcelerometr+ magnetometr	35mm	úklon ±0,25° kurz ±0,35°
Solexperts AG	Gyrosmart [21 str. 2]	gyroskop	40mm	úklon ±0,2° kurz ±0,5°
Piletest Ltd	BIT [22]	2-ax akcelerometr + gyroskop	„průměr neomezen“	lepší než 0,07°
RST Instruments	Borehole- Profile-Sensor [23]	3-ax akcelerometr + 3-ax magnetometr	1,9“	úklon 0,5° kurz 1,0°

U mělkých geotermálních vrtů dochází ihned po vyvrtání k zasunutí U-trubice. Proto z časových důvodů není možné realizovat inklinometrické měření pomocí výše uvedených přístrojů.

Existují další metody měření geometrických charakteristik (prozařování, georadar a podobně), avšak jejich použití není rozšířené a je obvyklé opět spíše u hlubokých vrtů. [24]

2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je zlepšení úrovně znalostí o existujícím systému geotermálních vrtů a v konečném důsledku zkvalitnění jeho návrhu případně provozních parametrů. Lze je shrnout do následujících tří bodů:

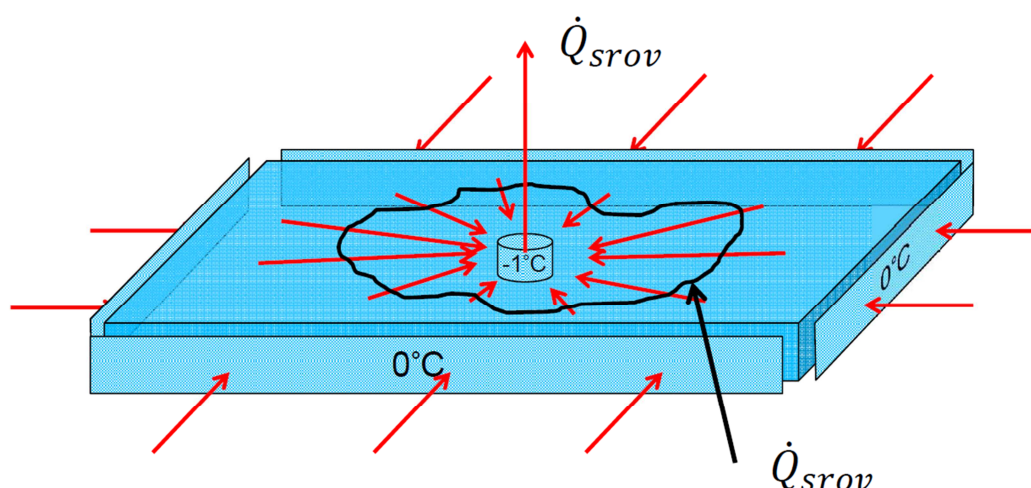
- analýza vlivu odklonu vrtu na vlastnosti tepelného pole systému,
- vývoj speciálního měřicího přístroje určeného k získání informací o skutečném geometrickém tvaru vyšetřovaného vrtu,
- vývoj software k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ.

Jednotlivé dílčí cíle postupně vyplynuly z řešení dané problematiky. Vzájemně na sebe navazují. Jejich řešení je podrobně dále rozepsáno v následujících kapitolách.

3 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

3.1 ANALÝZA VLIVU ODKLONU VRTU

3.1.1 Zjednodušený matematický model systému vrtů a okolí ve 2D



Obr. 4: Tepelný tok horninovou vrstvou (červené šipky), teplo, procházející od obvodu ke středu Q_{srov} .

Pro demonstraci některých vlastností pole vrtů byl sestaven jednoduchý výpočetní model pro bezrozměrné řešení úlohy vedení tepla ve vrstvě horniny jednotkové tloušťky. Model počítá s čtvercovým rozměrem desky, v jejímž středu je umístěn simulovaný geotermální vrt (případně vrty) se stálou teplotou T_{srov} . K přenosu tepla ve vrstvě dochází pouze vedením. Vrstva je obklopena kontinuem se stálou teplotou T_{hr} (viz Obr. 4). Při sestavení modelu se vycházelo ze všeobecně známé rovnice vedení tepla ve tvaru:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\Delta T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

kde

T je teplota jako funkce v prostoru a čase,

t je čas,

a je teplotní vodivost (tepelná vodivost dělená $c\rho$),

Δ je Laplaceův operátor. [25 str. 23]

$f = f_0 / c\rho$ jsou zdroje tepla v prostoru a čase dělené $c\rho$,

c je měrná tepelná kapacita materiálu a

ρ je hustota materiálu.

Úpravou tohoto vztahu pro časově stálou situaci a jeho diskretizací lze postupně odvodit následující vyjádření teploty vhodné pro řešení metodou sítí:

$$T(i, j) = \frac{1}{4} (T(i + 1, j) + T(i - 1, j) + T(i, j + 1) + T(i, j - 1)) \quad (2)$$

Byla stanovena okrajová podmínka $T_{hr} = 0^\circ\text{C}$ pro okraje desky a $T = T_{srov} = -1^\circ\text{C}$ pro bod uprostřed desky, což je uvažovaný vrt. Touto podmínkou je určeno, že simulovaný „geotermální“ vrt získáváním tepla způsobí jednotkový pokles teploty a bude tedy odebírat z desky teplo. Pro takto definovanou úlohu bylo možné spočítat rozložení teplotního pole pomocí metody sítí. Použita byla Gauss-Seidelova iterační metoda. [26], [27 str. 31] Ukázalo se, že i pro vektor neznámých o 2500 prvcích výpočet probíhá dostatečně rychle.

Je-li známo rozložení teplotního pole ve vyšetřované oblasti, lze s pomocí Fourierova zákona stanovit tepelný tok, který deskou protéká. Teplo, které k vrtu prochází deskou přes libovolnou uzavřenou křivku ohraničující oblast se simulovaným vrtem musí být rovno teplu, které tento vrt odvádí (viz Obr. 4). Spočítat jej lze integrací tepelného toku přes uzavřenou hranici (libovolná uzavřená křivka ležící ve vyšetřované oblasti a zahrnující v sobě "vrt") pomocí křivkového integrálu:

$$\dot{Q}_{srov} = \oint_{hr} -\lambda \text{grad } T \vec{ds} \quad (3)$$

Integrace byla provedena numericky po čtvercové hranici vyšetřované oblasti. Výsledkem byl tepelný výkon poskytovaný modelovaným vrtem (Tab. 2, sloupec "výsledek numer. modelu xcel")

Nyní bylo do uvažované vrstvy umístěno více „vrtů“ s různou polohou a iteračním procesem zjištěny potřebné teploty těchto „vrtů“ tak, aby tepelný tok měl stejnou hodnotu jako v prvním srovnávacím případě. [24] Výsledkem byla nová teplota vrtů pro každý takovýto konkrétní případ. Polohy vrtů v jednotlivých případech byly voleny tak, aby simulovaly případy korektně a nekorektně vrtaného pole geotermálních vrtů. Získané výsledky pro jednotlivé geometrické charakteristiky vyšetřovaných variant jsou uvedeny v Tab. 2.

Údaje v Tab. 2 ukazují, že nejmenší rozdíl teplot mezi masivem a vrty je pro případy s více vrty a rovnoměrně rozděleným odběrem. Takovéto systémy vrtů mají pak nejmenší tzv. tepelný odpor. Dále je z tabulky vidět, že porušení geometrie vrtů způsobuje zvýšení nerovnoměrností a zvýšení tepelného odporu systému vrtů, tedy zhoršení parametrů.

Tab. 2: Výsledky numerické simulace vedení tepla v poli vrtů.

Varianta	Počet vrtů	Rozdíl teploty hranice vrstvy a vrtu [°C]	výsledek numer. modelu xcel. [J/s]	výsledek FEFLOW [J/s]
1	1	-1	1,2848	1,25983
2	2	-0,6221	1,2848	1,31293
4	4	-0,3815	1,2848	1,33466
4a	4 defor.	-0,3997	1,2848	1,36948
8	8	-0,3308	1,2848	1,29099
8a	8	-0,2984	1,2848	1,26924
8b	8 defor.	-0,3057	1,2848	1,29646

3.1.2 Ověření výsledků modelu pomocí softwaru FEFLOW

Ústav geotechniky je vlastníkem licence na software německé firmy DGI-WASY GmbH, německé pobočky DHI Group. Jedná se o profesionální softwarový balíček určený pro modelování toku kapalin a transportu rozpuštěných a rozptýlených látek a také tepla v podloží. [28] Pomocí tohoto software byla ověřována správnost výsledků zjednodušeného numerického modelu.

Pro ověření byla definována úloha obdobná úlohám, které byly řešeny zjednodušeným numerickým modelem. Výsledek výpočtu poskytl hodnotu tepelného toku přes hranici oblasti. Jeho hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2, sloupec "výsledek FEFLOW". Patrnou shodu výsledků z FEFLOW a testovaným numerickým modelem lze považovat za příznivou.

Závěrem lze konstatovat, že skutečná geometrie systému geotermálních vrtů se často liší od požadované. Vytvořený zjednodušený matematický model poskytuje výsledky srovnatelné se systémem FEFLOW. Při nerovnoměrně rozmístěných vrtech tepelný odpor systému obvykle roste.

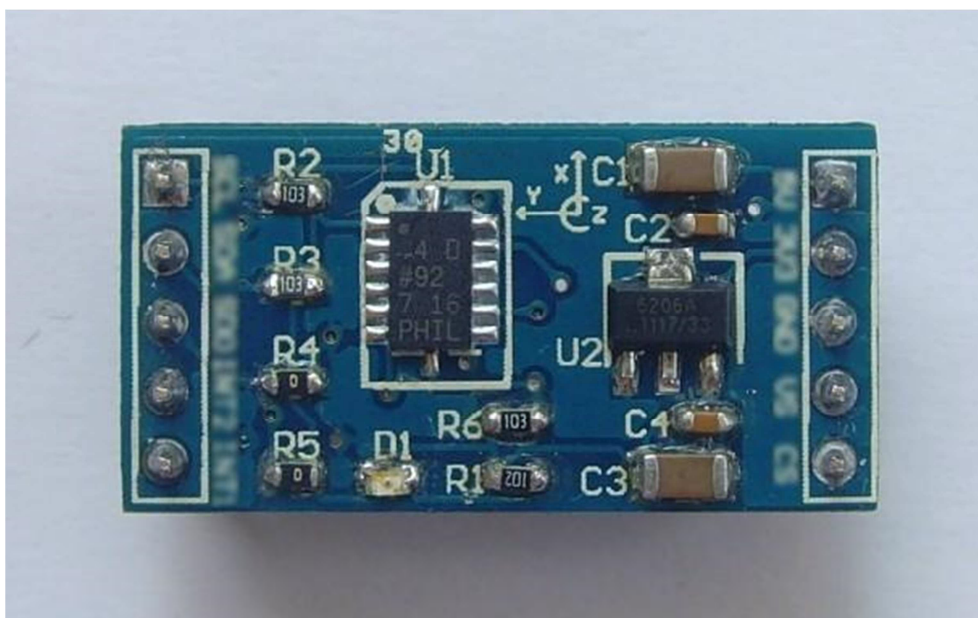
3.2 VÝVOJ SPECIÁLNÍHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE K URČENÍ GEOMETRIE GEOTERMÁLNÍHO VRTU

V předchozích kapitolách byly rozebrány důvody obtíží při stanovení geometrického tvaru vrtu. U systému více vrtů by však znalost jejich skutečné geometrie byla přínosem, neboť pokud není optimální, dochází ke zhoršení vlastností systému. Z výše uvedeného vznikl nápad pokusit se proměřit tvar existujícího vrtu až po jeho vystrojení trubkou instalovaného výměníku. V ČR běžně používané trubky jsou z HDPE rozměru 32x3,2mm. Tento rozměr se používá i v

Německu a Rakousku a pravděpodobně při většině instalací v Evropě. Autor se proto nadále zaměřil na rozbor problematiky přístroje s funkcí obdobnou inklinometru, avšak rozměrově uzpůsobeného k měření vnitřkem trubice výměníku. Pro ověření metodiky bylo uvažováno s přesností určení půdorysné polohy řádově 1 m na 100 m hloubky výměníku.

Provedením rešerše se zjistilo, že existují přístroje, určené pro měření svislosti vrtů. Nejmenší průměr takového přístroje je podle provedené rešerše 35 mm (viz Tab. 1). Použití v trubicích tepelného výměníku s vnitřním průměrem pro rozměr 32 x 3,2 mm = 25,6 mm je tedy nemožné. Proto byla zkonstruována vlastní měřicí souprava určená k činnosti uvnitř trubky výměníku.

Sonda zařízení využívá k určení odklonu od svislice akcelerometru. Snímač měří složku zrychlení kolmou na osu sondy, vzhledem k tomu, že celé měření se odehrává v tíhovém poli Země a tedy za působení gravitačního zrychlení \vec{g} , je možné naměřený údaj interpretovat jako odchylku osy sondy od svislice.



Obr. 5: Tříosý akcelerometr Analog Devices na tištěném spoji.

Pro první pokusy s touto technikou byl zvolen akcelerometr firmy Analog Devices. [29] Akcelerometr je tříosý a rozlišení zařízení vyjádřitelné jako nejmenší rozlišení odklonu sondy od svislice 0,39 m na 100 m hloubky bylo pro začátek plně dostačující. Celý tištěný spoj se součástkou a příslušnými pomocnými obvody je na Obr. 5.

Dalším problémem bylo určení směrové orientace sondy ve vrtu neboli azimutu případného úklonu. Po zvážení dostupných možností bylo rozhodnuto odvozovat půdorysné natočení sondy na základě údaje elektronického magnetometru použitého ve funkci magnetického kompasu. Použitý magnetometr firmy Honeywell poskytuje možnost jednoduchého stanovení intenzity magnetického pole Země s možností odečtu ve všech třech osách. [30] Dosahuje přesnosti určení polohy magnetického severu 1 až 2° [30], což je na úrovni přesnosti dosažitelné akcelerometrem.

3.2.1 Konstrukce specializované sondy

Vyvinutá speciální sonda svými rozměry umožňuje provedení měření trubcím výměníku (předpokládaný rozměr trubice 32x3,2 mm). Celé přístrojové vybavení zahrnuje měřicí sondu s vedením pro použití ve výše zmíněné trubce, nerezové lano s datovým vodičem pro spouštění sondy, naviják s rotačním převaděčem signálu určený ke snadné manipulaci se spouštěcím lanem, interface a přenosný PC s příslušným programovým vybavením.



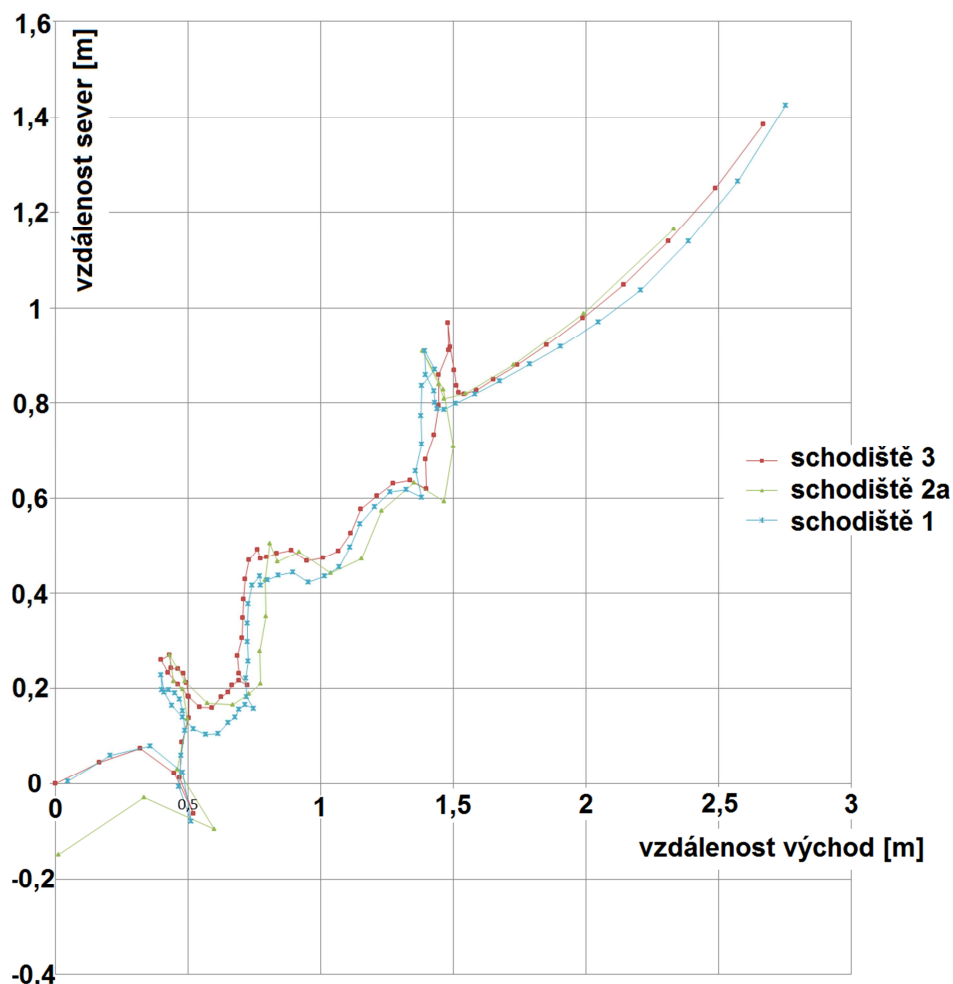
Obr. 6: Sestavená menší „druhá verze“ sondy, předchozí větší verze otevřená a bez vodičích vozíků v pozadí.

V současné době existují dvě varianty sondy (viz Obr. 6), novější verze má mírně zmenšené vnější rozměry. Mechanická konstrukce sondy sestává z pouzdra - trubky. Konce trubky jsou uzavírány víky. Spodní víko je lepené pro zajištění hermetičnosti, horní víko má těsnění O-kroužkem a pojištění šrouby tak, aby spoj zachoval hermetičnost, ale zůstal rozebíratelný. Do vnitřního prostoru pouzdra se vkládá elektronika se senzory. K víkům tělesa sondy jsou připevněny vodičí a pojezdové vozíky. Po stránce senzorů jsou obě verze prakticky totožné. Spouštěcí lano s kabelem v délce 150 m je uloženo na bubnu. S PC je konektor bubnu propojen přes interface. Pro PC je vyvinut specializovaný software, umožňující odečet údajů ze sondy, jejich uložení a vyhodnocení do podoby půdorysných souřadnic.

Při zahájení měření se sonda připojí ke konci spouštěcího kabelu, kabelová přípojka bubnu se propojí s interface, k němu se připojí PC, na němž se spustí obslužný software. Sonda se vloží do ústí trubice geotermálního výměníku a spustí se do maximální hloubky. Měření probíhá v cyklech, v každém cyklu je zaznamenán jeden měřicí bod. Obsluha drží spouštěcí lano v klidu a obslužný software zaznamená naměřené údaje. Poté obsluha povytáhne lano o zvolenou délku a přesune tím sondu do dalšího měřeného bodu a cyklus se opakuje. Výsledkem je tabulka odchylek od svislice a jejich azimutů a dále tabulka obsahující prostorové souřadnice podél délky vrtu.

3.2.2 Ověření činnosti sondy

Činnost prototypů byla ověřována v počátečním stádiu vývoje rozbořem údajů poskytovaných senzory. Ověření funkce akcelerometru bylo relativně jednoduché a s určitým zjednodušením pro ověření dostačovala procedura podobná kalibraci akcelerometru. Funkce magnetometru byla ověřována jednak za podobných podmínek jako akcelerometr, tak za podmínek činnosti ve vrtu. K tomu byly využity vrty na pozemku FAST VUT v Brně před budovou B.



Obr. 7: Příklad grafické interpretace naměřených dat ze zkušebního polygonu - změřený půdorysný tvar trubice ze tří provedených měření.

Pro komplexní zkoušení byl zřízen polygon na schodišti budovy B FAST VUT v Brně, Veveří 331/95. Zde byla testována celá sestava sonda + spouštěcí zařízení (kabel s lankem, buben) + interface a softwarové vybavení notebooku. Ve schodišťové šachtě budovy byla instalována trubka z geotermálního výměníku.

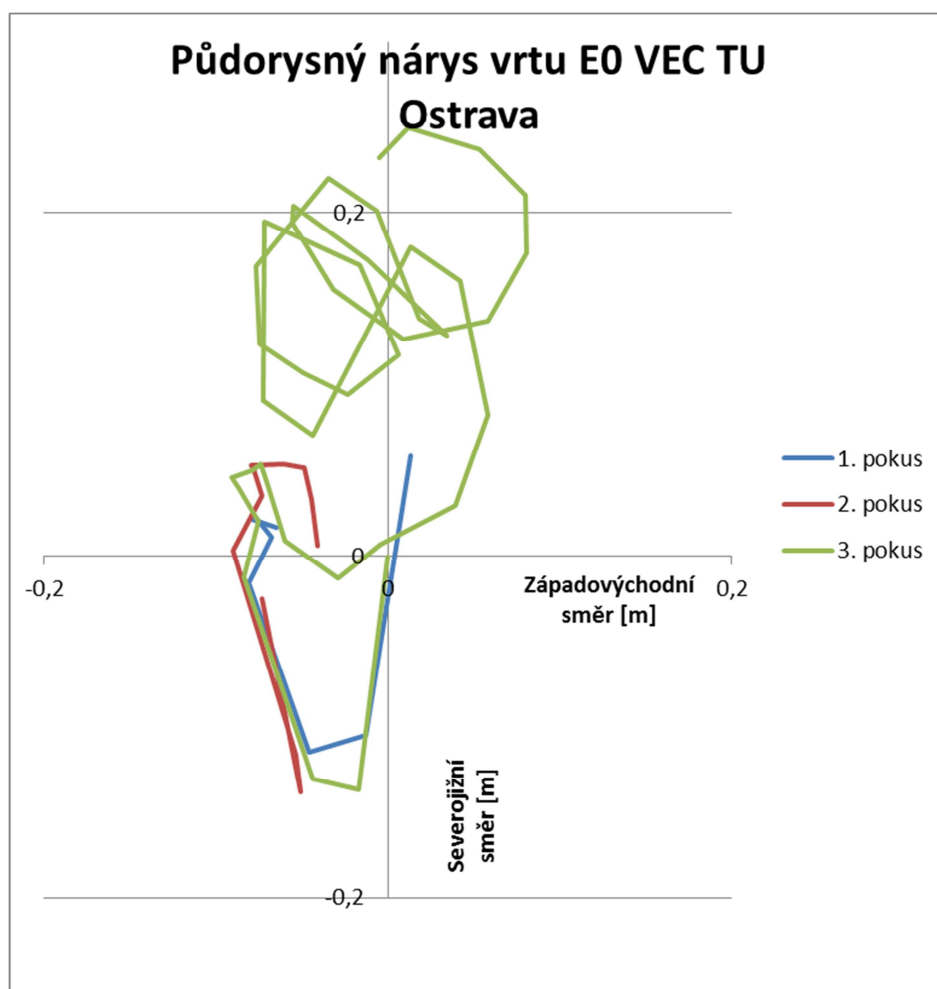
Na tomto pokusném polygonu byla poté provedena celá řada měření. Sonda sama při nich pracovala prakticky bez závad, hlavní přínos spočíval v doladění uživatelsky příjemného chování obslužného software notebooku.

Blízkost železného zábradlí na schodišti bohužel ovlivňuje činnost kompasu sondy, takže data získaná z měření na tomto polygonu nelze přímo srovnávat se

zaměřením schodiště. Při opakovaných měřeních se získané aproximace tvaru potrubí velmi dobře shodovaly (viz Obr. 7), značné zkreslení oproti skutečnému tvaru potrubí vykazovaly všechny výsledky v oblastech, v nichž se potrubí přibližuje železnému feromagnetickému zábradlí.

Dne 20.8.2013 byla provedeno měření vrtu 33 v sousedství budovy P4 areálu AdMaS za účelem ověření měřicí techniky, ověření metodiky provedení takového měření a získání praktických zkušeností s takovým typem zkoušek. Měřený vrt byl vystrojený tepelným výměníkem ve formě dvojité U-trubice. Měření nebylo možné dokončit vzhledem k obtížím s pohybem sondy v potrubí. Na základě výsledků z této zkoušky byla původní sonda přepracována do zmenšené podoby – Obr. 6.

3.2.3 Zkouška v reálném vrtu



Obr. 8: Půdorysný nárys průběhu střednice měřicí trubky vrtu E0 v blízkosti VEC TU Ostrava. 1. pokus dosáhl hloubky pouze 4,5 m, druhý pokus 5 m, třetí již 20 m.

Dne 24.1.2017 proběhla zkouška celého systému v prostoru Technické univerzity Ostrava. Vrty v tomto areálu jsou vybaveny kromě dvojité U-trubice ještě pátou trubkou určenou pro měřicí účely. Pro první měření byl zvolen vrt E0 v blízkosti budovy Výzkumného energetického centra. Ukázalo se, že vztlak vody v trubici

působící na sondu brání jejímu spuštění, na sondu bylo tedy přivěšeno závaží. Všechny měřené vrty byly v činnosti, tudíž v jejich nitru byla velmi nízká teplota, což po prochlazení sondy bránilo v komunikaci s povrchovým zařízením. Při běžném měření se měl potrubní systém rozpojit a tím vyřadit z činnosti, proto na tak nízké teploty nebyla sonda navržena. Nicméně bylo možné provést alespoň několik měření horní část vrtu E0. Výsledný půdorys ze tří pokusů o měření je na Obr. 8.

Další měření bylo provedeno v blízkosti vzorového objektu VŠB-TUO, FAST, Katedry prostředí staveb a TZB - nízkoenergetického domu. Tento objekt využívá více zdrojů energie pro výzkumné účely, mimo jiné též tepelné čerpadlo napojené na blízký zemní geotermální vrt. Spouštění sondy bylo přerušeno v hloubce necelých 50 m. Místní pracovníci poskytli informaci o tom, že měřicí potrubí je pod touto hloubkou dále neprůchozí, byla tedy proměřena celá dostupná část vrtu. Půdorysný nárys naměřeného průběhu střednice měřicí trubky tohoto vrtu je na Obr. 9.



Obr. 9: Půdorysný nárys průběhu střednice měřicí trubky vrtu u nízkoenergetického domu, bod [0,0] je u zhlaví.

3.2.4 Závěr - stav vyvíjeného měřicího zařízení

Vývoj popisovaného specializovaného měřicího systému lze považovat za ukončený. Zařízení již bylo v reálném geotermálním vrtu opakovaně použito.

Kvalitu a přesnost měření je obtížné kontrolovat, neboť přímá kontrola není možná (přesný tvar vrtu není znám). Bylo tedy přijato východisko, že měřicí zařízení pracuje správně, pokud se opakovaná měření stejného vrtu shodují. Shoda samozřejmě nemůže být úplná, avšak z Obr. 7 a Obr. 8 je vidět, že se aproximované půdorysy z několika měření téměř kryjí. Exaktní analýza výsledků nebyla provedena, avšak bylo by zřejmě možné použít například regresní analýzu s využitím metody nejmenších čtverců. [31]

3.3 VÝVOJ SOFTWARE URČENÉHO K RYCHLÉMU VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ SYSTÉMŮ VRTŮ IN SITU

3.3.1 Matematický základ

Dle předběžné úvahy se tento software má vyznačovat následujícími vlastnostmi:

- dostupnost bez složité instalace či komplikovaných licenčních požadavků,
- nenáročnost na použitý hardware,
- poskytnutí srovnávacích (porovnávacích) údajů o systému geotermálních vrtů na základě informací o skutečném geometrickém uspořádání a tvaru jednotlivých vrtů v systému,
- zohlednění faktu, že vrty nemusí být svislé a dokonce ani přímkové, zohlednění 3D situace.

Cílem práce byl pokus dát do rukou pracovníků v běžné praxi relativně jednoduchý prostředek poskytující srovnávací údaje. Software má na základě údajů o skutečné geometrii systému vrtů získaných speciální měřicí sondou poskytnout kvantifikaci zhoršení vlastností systému. Tato informace dostupná in situ ještě v průběhu vrtání systému by mohla přispět k nápravě například prodloužením dosud nezhotovených vrtů.

Matematický základ vyvinutého software vychází z matematického modelu vedení tepla v okolí vrtů. Software využívá metodu sítí. Byla odvozena rovnice vedení tepla ve formě vhodné pro použití ve výpočtu. Při odvození diferenčního schématu byla použita sedmibodová šablona pro určení teploty centrálního uzlu T pomocí hodnot šesti okolních uzlů. Vzhledem k tomu, že nebyl předpokládán ekvidistantní krok v jednotlivých osách sítě, bylo třeba odvodit schéma v dosti obecném tvaru. Výsledná základní rovnice má tento tvar (pouze pro osu X):

$$\begin{aligned} 0 \left(\frac{2\lambda}{j(i+j)} - \frac{\beta v_x}{j} \right) + M \left(\frac{2\lambda}{i(i+j)} + \frac{\beta v_x}{i} \right) + \dots \dots \\ = T \left(\frac{2\lambda}{i+j} \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{j} \right) + \dots \dots + \beta v_x \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{j} \right) + \dots \dots \right) - f_0(x, t) \end{aligned} \quad (4)$$

kde

T reprezentuje teplotu v centrálním uzlu,
O, M, N, P, Q, R teploty okolních uzlů a
i, j, k, l, m, n vzdálenosti mezi uzly.

Výpočet je realizován v myšleném kvádru – bloku – kontinua, symbolizujícím kvádr zeminy obsahující geotermální vrty s dostatečně vzdáleným okolím. Použity jsou dva typy okrajových podmínek:

- Dirichletova podmínka (předepsaná hodnota teploty v uzlu) aplikovaná na svislých hranicích kvádrů a na jeho spodní ploše, kde se předpokládá vyhřívání zeminy přilehlým masivem,

- Neumannova podmínka (předepsaný tok přes hranici oblasti) aplikovaná na horní plochu kvádrů, na této ploše je předepsán nulový tok přes hranici.

Dle předpokladu se očekává zhruba konstantní teplota vody ve výměníku vrtů, proto byla použita Dirichletova podmínka i pro uzly sítě reprezentující vrty. [15 str. 51] V místech, kde uzly sítě nekorespondují s body na střednici vrtů, je použit náhradní přepočítání do bodů uzlů sítě. Do výpočtu dále vstupuje teplo, vnášené či vynášené z oblasti proudící podzemní vodou.

S využitím výše zmíněných skutečností a vztahů je možné již sestavit systém lineárních rovnic pro řešení rozložení teplotního pole. K řešení byla opět použita iterační Gauss-Seidelova metoda. [26], [27 str. 31] Zde uvedu pouze vztah pro výpočet p -té složky vektoru \vec{x} v modifikovaném systému ukládání koeficientů:

$$x_p^{k+1} = b_{pp} - a_{p1}x_{j-modulX}^{k+1} - a_{p2}x_{j+modulX}^k - a_{p3}x_{j-modulY}^{k+1} - a_{p4}x_{j+modulY}^k - a_{p5}x_{j-modulZ}^{k+1} - a_{p6}x_{j+modulZ}^k \quad (5)$$

Iterace systému o cca 40 000 prvcích trvá na běžném hw řádově desítky sekund.

Vektor \vec{x} obsahuje po ukončení výpočtu hodnoty teplot uzlových bodů sítě. Jeho jednotlivé složky jsou podle stanoveného schématu rozděleny do příslušných uzlových bodů sítě. Tím jsou známy uzlové hodnoty teplot a tedy rozložení teplotního pole. To umožňuje například vykreslit rozložení graficky ve formě snadno přehledných řezů s barevně vyznačenými teplotami – viz příklad Obr. 10. Dále je důležité celý systém charakterizovat jedním numerickým údajem, k tomu slouží výpočet celkového tepelného výkonu systému při zadaných teplotách v okrajových podmínkách. Hodnota je spočítána numericky jako tepelný tok přes hranici uvažované oblasti – kvádrů.

3.3.2 Software k rychlému vyhodnocení tepelných vlastností systému vrtů

Simulovaný tepelný systém je modelován jako blok (kvádr) zeminy/horniny, jímž je proložena trojrozměrná síť uzlových bodů. Hodnota teploty v těchto uzlových bodech je počítána metodou sítě s uplatněním vhodných okrajových podmínek – viz předchozí kapitola. Geotermální vrty jsou simulovány jako myšlené křivky s předepsanou stálou teplotou v bodech jejich průsečíků s vodorovnými vrstvami

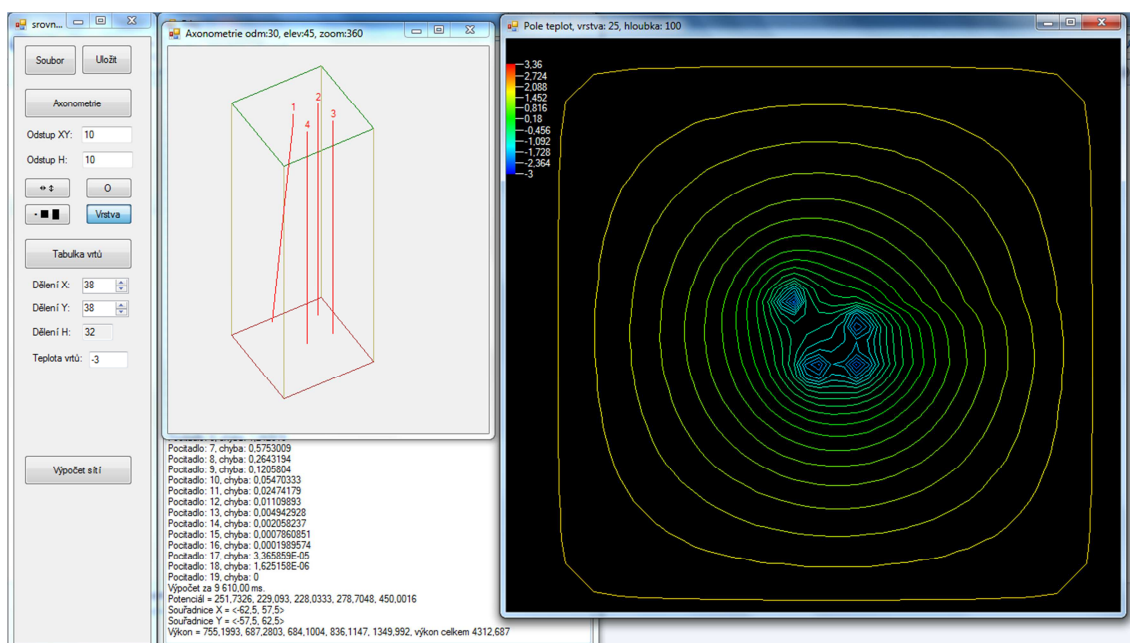
výpočetní síť. Předpoklad stejné teploty po délce vrtu je zjednodušením, avšak na druhé straně průběh teploty podél reálného geotermálního vrtu v činnosti vykazuje pouze malé změny. [15 str. 51]

Základní funkce popisovaného softwaru spočívá v:

- načtení hodnot geometrických charakteristik pole vrtů z formátovaného souboru spolu s případnými dalšími údaji o vrstvení zeminy a tepelných vlastnostech jednotlivých vrstev (předpokládá se, že tento soubor získá uživatel z údajů změřených speciální sondou),
- vypočtení hodnot teplotního pole,
- vypočtení hodnoty tepelného výkonu řešeného pole vrtů.

Vyřešené hodnoty teplotního pole potom je možné vizualizovat a pomocí barevně znázorněného průběhu teplot identifikovat problémová místa, případně využít celkový údaj o tepelném výkonu.

Snímek obrazovky vyvinutého softwaru dokumentuje Obr. 10 s axonometrickým náčrtem řešeného systému ve středu obrázku (čtyři vrtu, vrt označený jako „1“ je vyvrtán pod úklonem, ostatní svisle). V pravé části je teplotní pole vizualizované pomocí izoterm. Deformace teplotního pole (jedná se o vodorovný řez v hloubce 100 m) způsobená ukloněným vrtem je zde jasně viditelná. Jako numerický výsledek výpočtu je prezentována číselná hodnota tepelného výkonu systému na okně v pozadí (4312,7 W).



Obr. 10: Snímek obrazovky s řídicím oknem, oknem axonometrického náhledu a oknem teplotního pole.

3.3.3 Ověření činnosti software

K ověření výstupů software bylo opět provedeno několik srovnávacích simulací na výpočetním softwaru FEFLOW. [28] Bylo srovnáno několik scénářů, výběr obsahuje Tab. 3. Nejprve bylo provedeno porovnání triviálního scénáře (Tab. 3

případ 1). Výsledný tepelný výkon 1702,3 W odpovídá očekávání a srovnávaný výsledek 1825,0 W z FEFLOW je v přijatelném rozmezí. Druhý scénář (Tab. 3 případ 2) se liší od prvního pouze tím, že simulovaný geotermální vrt je ukloněný pod úhlem zhruba 3,5° od svislice. Tato jediná změna způsobuje mírnou redukci vypočítaného výkonu (1694,2 W). Vzhledem k tomu, že neexistuje žádná přímá možnost pracovat ve FEFLOW s jinými než se svislými geotermálními vrty, výsledek FEFLOW (1713,0 W) byl získán za cenu ne zcela korektní úpravy zadání. Výsledná hodnota proto musí být považována za méně přesnou, avšak sleduje stejný trend – hodnota z případu 1 je redukována s největší pravděpodobností jako výsledek nerovnoměrného uspořádání ukloněného geotermálního vrtu.

Složitějším scénářem je v Tab. 3 případ 3. Obě vypočtené výsledné hodnoty (4144,8 W, respektive 3978,2 W) si navzájem odpovídají.

Tab. 3: Srovnávané scénáře problému, zadána tepelná vodivost $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, bez podzemní vody.

Případ	Počet, uspořádání vrtů, hloubka [m]	Rozměr kvádrů [m]	Vypočtený výkon [W]	Výsledek FEFLOW [W]
1.	1, osově, hloubka 100	60x60, hloubka 168	1702,3	1825,0
2.	1, vrtaný s úklonem, hloubka 100	60x60, hloubka 168	1694,2	1713,0 *)
3.	4, matrice 10x10, hloubka 100	120x120, hloubka 168	4144,8	3978,2
4.	4, matrice 10 x 10, jeden vrtaný s úklonem, hloubka 100	120x120, hloubka 168	4312,7	---

Poslední scénář zahrnuje čtyři vrty, z nichž jeden je ukloněn (Tab. 3 případ 4). Jeho střednice se odchyluje směrem z matrice a tím jeho vliv zasahuje dále do okolního podloží. Poskytovaný výkon se zvýší (4144,8 W na 4312,7 W) jako následek zasažení většího objemu zeminy ve spodní části vrtů. Vzhledem k větší složitosti tohoto scénáře tento nebyl podroben srovnávacímu výpočtu ve FEFLOW.

3.3.4 Shrnutí

Softwarový nástroj pro rychlé vyhodnocení tepelných vlastností systému vrtů umožňuje simulovat časově ustálenou činnost systému geotermálních energetických vrtů, přičemž vrty mohou být zadány jako ukloněné i jako křivé. Poskytuje grafické znázornění vypočteného pole teplot pro zadaný scénář a numericky vyčíslený výsledek ve formě ustáleného tepelného výkonu simulovaného systému. Výsledky byly srovnávány s výsledkem simulace takového systému pomocí software FEFLOW, přičemž srovnání vychází uspokojivě.

4 ZÁVĚR

Systémy geotermálních energetických vrtů často nejsou vrtány přesně podle projektovaného záměru. Cílem disertační práce bylo provést analýzu vlivu odklonu geotermálního energetického vrtu na vlastnosti tepelného pole systému, vyvinout speciální měřicí přístroj určený k získání informací o skutečném geometrickém tvaru vrtu a vyvinout software určený k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ.

Teoretická část práce věnující se problematice součinnosti systému vrtů prokazuje na konkrétních provedených simulacích vliv geometrického tvaru vrtů na celkové tepelné vlastnosti. Uvedený jev se neprojeví u jediného vrtu, avšak výrazně se uplatní v organizovaných systémech vrtů. Je-li systém zhotoven nepřesně a jednotlivé vrty jsou vrtány nepravidelně, výsledné tepelné vlastnosti se zpravidla zhoršují.

Speciálním případem může být pokusný systém geotermálních vrtů budovaný a provozovaný pro výzkumné účely. U takového systému lze předpokládat, že jakákoli výzkumná aktivita bude vycházet z předpokládané geometrie systému. Jestliže se však současně prakticky prokázalo, že skutečná geometrie se od ideální může výrazně lišit, budou zřejmě výsledky výzkumných aktivit zatížené značnou chybou. Zde je zjevně znalost skutečného tvaru vrtů nutností. Výsledky teoretického rozboru byly v následujících fázích použity pro vývoj software k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ.

Provedená rešerše potvrdila, že dosud běžná zařízení umožňující tvar vrtu přímo změřit nejsou pro geotermální energetické vrty vhodná. Proto byl proveden návrh vlastní konstrukce takového přístroje. Výsledkem vývoje je unikátní přístroj, založený na moderních snímačích technologie MEMS a umožňující podobným postupem jako v případě měření inklinometrem proměřit geometrický tvar vrtu jeho výměňkovou trubkou. Tato schopnost je dosud unikátní. Zařízení prokázalo způsobilost pracovat v reálném vrtu a poskytovat předpokládaná data. Největší přínos takového zařízení by byl zřejmě u rozsáhlých systémů geotermálních vrtů, obzvláště výhodné se jeví měření provést na systémech vrtů určených pro výzkumné účely.

Širší využití dat, která je vyvinutý měřicí systém schopen poskytnout, umožňuje vyvinutá softwarová aplikace sloužící k rychlému určení termálních vlastností systému vrtů. Software na základě geometrických údajů o tvaru pole vrtů, tepelných charakteristikách podloží a předpokládaných provozních teplotách vypočte rozložení teplot v podloží a tepelný výkon řešeného geotermálního systému. Tyto údaje spočítané pro reálný geotermální systém a pro jeho navrhovanou ideální variantu umožní dále kvantifikovat míru odlišnosti tepelných vlastností reality od návrhu, což je základním předpokladem pro účelnou korekci tak, aby celkově bylo dosaženo projektovaných parametrů. Je také možné aplikaci použít pro návrh i pro studium vlastností systému geotermálních vrtů.

5 LITERATURA

1. IHFC : Global Heat Flow Data. International Heat Flow Commission [IHFC]. [Online] International Heat Flow Commission [IHFC], © 2008. [Citace: 14. 2 2017.] <http://www.geophysik.rwth-aachen.de/IHFC/heatflow.html>.
2. KUKREJA, R. Geothermal Energy History. Conserve Energy Future: Renewable & Non-Renewable Energy Sources. [Online] ©2014. [Citace: 17. 1 2014.] <http://www.conserve-energy-future.com/GeothermalEnergyHistory.php>.
3. MYSLIL, V., Z. Kukul, K. Pošmourný a V. Frydrych. PLANETA: odborný časopis pro životní prostředí, Ročník XV, číslo 4/2007. Ministerstvo životního prostředí. [Online] 2004. [Citace: 17. 01 2014.] [http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/4BE8C2DA7BE810F6C125725900456E0A/\\$file/planeta4_korektura3.pdf](http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/4BE8C2DA7BE810F6C125725900456E0A/$file/planeta4_korektura3.pdf). ISSN 1801-6898 (tištěná verze).
4. RAGHEB, M. TERRESTRIAL RADIOACTIVITY AND GEOTHERMAL ENERGY. Dr. Magdi Ragheb. [Online] Urbana, Illinois, USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Nuclear, Plasma and Radiological Engineering (NPRE), 24. 6 2017. [Citace: 20. 9 2017.] <http://www.ragheb.co/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Terrestrial%20Radioactivity%20and%20Geothermal%20Energy.pdf>.
5. MOTLÍK, J., L. Šamánek, J. Štekl, T. Pařízek, L. Bébar, M. Lisý, M. Pavlas, R. Bařinka, P. Klimek, J. Knápek a J. Vašíček. Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR. Praha : ČEZ, a. s. Duhová 2/1444, 2007.
6. International Energy Statistics. EIA - Energy Information Administration. [Online] Independence ave., SW, Washington: U.S. Department of Energy, 2017. [Citace: 10. 10 2017.] https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=0000000000000000000000000004&c=rurvrvvfvvtvnnvvlurvvvfvfvvvvfvvvvou20evvvvvvvvvvuvvo&ct=0&ug=8&tl_id=2-A&vs=INTL.35-12-AFG-BKWH.A&cy=2014&vo=0&v=H&end=2015.
7. Geotermální energie v ČR. OEnergetice.cz. [Online] oEnergetice.cz, 2017. [Citace: 10. 2 2017.] <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/geotermalni-energie-v-cr/>.
8. 10 let geotermální teplárny. TERMO Děčín. [Online] Děčín: TERMO Děčín a.s., 2010. [Citace: 17. 1 2014.] <http://www.termo.mvv.cz/Cisty-vzduch-a-zdravi/Kourici-kominy-uhelných-vytopen-jsou-v/>.
9. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice? Nazeleno.cz. [Online] Nazeleno.cz, 2015. [Citace: 10. 10 2017.] <https://www.nazeleno.cz/energie/energetika/prvni-geotermalni-elektrarna-v-cr-liberec-nebo-litomerice.aspx>. ISSN 1803-4160.
10. AZ Tower Brno. Gerotop. [Online] GEROTop spol. s r.o., 2000. [Citace: 17. 1 2014.] <http://www.gerotop.cz/cs/novinky/az-tower-brno-22/>.

11. Hot rock gets a cold shoulder. ScienceNordic. [Online] Oslo, Norway: ScienceNordic.com - Independent news on research in the Nordic countries, 2011. [Citace: 10. 9 2017.] <http://sciencenordic.com/hot-rock-gets-cold-shoulder>.
12. LEITER, A. INSTALACE SNÍMAČŮ TEPLoty V ENERGOPILOTĚ. Juniorstav 2013. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2013. ISBN 978-80-214-4669-4.
13. THOLEN, M. a S. Walker-Hertkorn. Arbeitshilfen Geothermie. Bonn : wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2008. ISBN 978-3-89554-167-4.
14. AMIS, T., Ch. A. W. Robinson a S. Wong. INTEGRATING GEOTHERMAL LOOPS INTO THE DIAPHRAGM WALLS OF THE KNIGHTSBRIDGE PALACE HOTEL PROJECT. GE Presentation 6th October 2010. [Online] LinkedIn Corporation, 2017. [Citace: 29. 8 2017.] <https://www.slideshare.net/Tonyamis/ge-presentation-6th-october-2010>.
15. GEHLIN, S. Thermal Response Test, Method Development and Evaluation. [Online] Luleå, Sweden: Luleå University of Technology, 2002. [Citace: 2. 4 2011.] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991442/FULLTEXT01.pdf>. ISSN 1402-1544.
16. Tepelná čerpadla a kompaktní těsnění od GE-TRA s.r.o. GE-TRA s.r.o. [Online] Liberec: GE-TRA s.r.o., 2009-2017. [Citace: 2. 5 2012.] <https://www.ge-tra.cz/reference/reference-tepelna-cerpadla>.
17. Vysoká škola báňská Ostrava. Gerotop. [Online] GEROTop spol. s r.o., 2000. [Citace: 17. 1 2014.] <http://www.gerotop.cz/cs/reference/vysoka-skola-banska-ostrava/>.
18. Rodded Boretrak®. Measurement Devices Ltd (MDL). [Online] Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK: Renishaw plc., 1998-2014. [Citace: 17. 1 2014.] <http://www.mdl-laser.com/en/rodded-boretrak--15121>.
19. Cabled Boretrak®. [Online] Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK: Renishaw plc., 2017. [Citace: 1. 8 2017.] <http://www.renishaw.com/en/cabled-boretrak--26407>.
20. QL40-DEV Borehole Deviation - Geophysical Well Logging Equipment. Mount Sopris Instruments. [Online] Denver, Colorado 80216 USA: Mount Sopris Instruments, 2017. [Citace: 31. 7 2017.] <http://mountsopris.com/items/ql40-dev-borehole-deviation/>.
21. Borehole Measurements. [Online] 8617 Mönchaltorf, Switzerland: Solexperts AG, 18. 11 2014. [Citace: 31. 7 2017.] http://www.solexperts.com/index.php/de/component/docman/doc_view/784-en12geoboehrlochvermessv6.html.
22. BIT (Borehole Inclination Tester) - Measure deviation from vertical of piles and shafts. [Online] London, UK: Piletest Limited, 22. 3 2016. [Citace: 1. 8 2017.] <http://www.piletest.com/Show.asp?page=BIT>.

23. Borehole Profile Sensor. [Online] Maple Ridge, BC, Canada: RST Instruments Ltd., 2015. [Citace: 1. 8 2017.]
<http://www.rstinstruments.com/Brochures/Borehole-Profile-Sensor-ICB0041A.pdf>.
24. LEITER, A. SKUTEČNÁ GEOMETRICKÁ CHARAKTERISTIKA POLE GEOTERMÁLNÍCH VRTŮ. Juniorstav 2012. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012. ISBN 978-80-214-4393-8.
25. DALÍK, J. NUMERICKÉ METODY II. Brno : Ústav matematiky a deskriptivní geometrie FAST VUT v Brně, 24. 11 2011.
26. DALÍK, J. a J. Pešl. Gaussova-Seidelova metoda. ITERAČNÍ METODY PRO ŘEŠENÍ ALGEBRAICKÝCH ROVNIC. [Online] Brno: Ústav matematiky a deskriptivní geometrie FAST VUT v Brně, 10 2001. [Citace: 17. 1 2014.]
http://math.fce.vutbr.cz/vyuka/matematika/numericke_metody/node13.html.
27. DALÍK, J. NUMERICKÉ METODY. Ústav matematiky a deskriptivní geometrie. [Online] Brno: Ústav matematiky a deskriptivní geometrie FAST VUT v Brně, 1. 12 2006. [Citace: 18. 1 2014.]
http://math.fce.vutbr.cz/vyuka/podpora/Num_Mat.pdf.
28. FEFLOW. FEFLOW. [Online] Berlin, Germany: DHI WASY GmbH, 2014. [Citace: 17. 1 2014.]
http://www.feflow.com/about.html?&tx_ttnews%5bttn_news%5d=28.
29. Digital Accelerometer AD. [Online] Norwood, MA 02062-9106, USA: Analog Devices, Inc., 2009. [Citace: 18. 1 2014.]
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD.pdf.
30. 3-Axis Digital Compass. [Online] Honeywell International Inc., 2 2013. [Citace: 18. 1 2014.]
http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/. Form # 900.
31. JANÍČEK, P. Technický experiment. Brno : Vysoké učení technické v Čs.redakci VN MON, 1989. 55-636-89.

Curriculum vitae

Jméno: Ing. Augustin Leiter
Datum narození: 30.10.1969, Česká republika

Kontaktní údaje:

E-mail: leiter.a@fce.vutbr.cz

Profesní a akademická kariéra:

1988 – 1993 studium na FS VUT v Brně, obor Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení,
1993 - 2002 technický pracovník v obchodní firmě, projektování čerpací techniky,
2003 technický asistent ředitele, administrativně technická činnost na pobočce v Rusku (Evropská část),
2004 - 2009 technický pracovník v obchodní firmě, projektování čerpací techniky, podpora prodeje,
2010 zahájení doktorského studijního programu na FAST VUT v Brně,
2011 až dosud Centrum AdMaS, pozice Ph.D. student (odborné práce spojené s výzkumnou, vědeckou, inovační, vzdělávací a komerční činností Centra),
2014 až dosud Ústav geotechniky FAST VUT v Brně, pozice technický pracovník (laboratorní zkoušky, specializované odborné práce související s výzkumnou a hospodářskou činností ústavu, výuka).

Vzdělání

1984 – 1998 studium na gymnáziu Táborská 185 Brno ukončené maturitou,
1988 – 1993 studium na FS VUT v Brně, obor Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení, zakončené získáním titulu inženýr,
2010 až dosud Ústav geotechniky FAST VUT v Brně, doktorské studium.

Účast ve výzkumných projektech

2016 – 2017 TA04031092: Interpretace a korelace dynamické a statické penetrační zkoušky pro efektivnější navrhování dopravních staveb (TAČR alfa).
2012 – 2015 TA02030829: Kontrola a zkoušení podloží zlepšeného štěrkovými pilíři (TAČR alfa).

- 2012 – 2013 FAST-S-12-1774: Studium petrologických a fyzikálně-mechanických vlastností v systému enkláva-granitoid a enkláva (Specifický výzkum).
- 2012-2015 MPO FR-TI 4/329: Tvorba aplikačního systému pro návrh a posouzení zemních a horninových kotev včetně vývoje monitorovacích prvků (Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR).
- 2012 – 2014 MŠMT CZ.1.07/2.4.00/31.0012: OKTAEDR - partnerství a sítě stavebnictví (Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR).
- 2012 – 2015 MPO FR-TI4/261: Výzkum chování injektážních směsí při aplikaci pod hladinou podzemní vody, vývoj nových injektážních směsí, metodiky jejich návrhu, způsobu monitoringu a provádění (Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR).
- 2009 – 2011 GAČR ap. 103/09/1262: Numerická analýza pažících konstrukcí s využitím různých konstitučních modelů (Grantová agentura ČR).

Zahraniční pobyty a stáže na jiných pracovištích

- 19.-28.11.2013 Slovensko, Bratislava. Zahraniční stáž na STU Bratislava, Stavebná fakulta. Zaměření: Inklinometrie, kontaminace, geotechnický monitoring
- 1.-10.10.2013 Slovensko, Bratislava. Zahraniční stáž na STU Bratislava, Stavebná fakulta. Zaměření: Inklinometrie, lab. přístroje

Znalosti a dovednosti:

- Jazyky: čeština (rodilý mluvčí), angličtina, němčina, ruština.
- Výpoč. technika: nadstandardní uživatelská, programování.

ABSTRACT

Geothermal energy is one of the oldest forms of energy on our planet. Its use by humanity dates back to the beginning of the ages. The forms of this energy gradually changed from the direct heat of the hot springs, through the heating of the buildings and the baths to the later use of superheated steam for industrial use. Nowadays, there is a large share of the use of large number of ground geothermal boreholes with heat exchangers drilled in the matrix. The geometric arrangement of such system has a considerable impact on its operation. Specific examples show that, unlike the design, actual boreholes in such system are often drilled non vertically or even curved. These imperfections then usually deteriorate the thermal properties of the system. This thesis demonstrates the influence analysis of the borehole geometry distortion on the system thermal properties, it also informs about the development of a special measuring device designed to obtain information about the actual geometric shape of the investigated borehole and about the development of software for in situ rapid borehole system properties evaluation.

The theoretical part of thesis contains the derivation of a simplified numerical model of heat conduction in the vicinity of the borehole system. Its results serve to compare the different borehole variants and the inaccuracy of borehole shaping. Using the simulations, the influence of inaccuracies in the borehole system on its thermal properties is demonstrated in several model configurations. This effect does not occur in a single borehole, but it is significantly visible in organized geothermal borehole systems. The thermal characteristics of the distorted borehole system are usually worse. Results verification of these simulations was performed by the FEFLOW simulation software.

In the practical part the development of a special instrument for measuring the shape of a geothermal energy borehole is documented. After drilling, standard borehole measuring devices are difficult to use due to the need for an immediate fitting with a heat exchanger. The result of this task is a practically usable device, which allows to measure the course of the centerline of a borehole equipped with a heat exchanger. The most interesting area of application is anticipated for extensive geothermal well systems, especially those designed for research purposes.

Further use of the data that the developed measuring system is able to provide should enable the developed software application to rapidly evaluate the properties of the borehole system in situ. The application is able to calculate the subsoil temperature field and to characterize the geothermal system by determining its steady state heat output. The software is based on the simplified numerical heat conduction model presented in the theoretical part of the thesis. It foresees some simplifications, but on the other hand it provides results quickly, which would allow correction of the imperfections (by adjusting the borehole length or the borehole inclination) in the drilling phase on a building site.