



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



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	P3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Doktorský studijní program s kombinovanou formou studia
Studijní obor	3607V009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Student	Ing. Augustin Leiter
Název	Geotermální energie - vliv geometrie vrtu
Vedoucí práce	doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Datum zadání	
Datum odevzdání	V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání disertační práce

V Brně dne

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Lumír Míča, Ph.D.
Vedoucí disertační práce

ABSTRAKT

Geotermální energie patří k nejstarším formám energie na naší planetě. Její využití lidstvem sahá až k počátkům věků. Formy této energie se postupně měnily od přímého tepla horkých pramenů, přes vytápění budov a lázní až k pozdějšímu užití přehřáté páry pro průmyslové využití. V dnešní době představuje velký podíl využívání pomocí systémů velkého počtu zemních geotermálních vrtů s tepelnými výměníky vrtaných v matici. Geometrické uspořádání takového systému má značný vliv na jeho činnost. Konkrétní příklady dokazují, že na rozdíl od návrhu, skutečné vrty v takovém systému často mohou být vrtány s úklonem od svislice nebo i křivě. Tyto nedostatky poté zpravidla zhoršují teplotní vlastnosti systému. Tato práce se věnuje analýze vlivu odklonu vrtu na vlastnosti tepelného pole systému, dále informuje o vývoji speciálního měřicího přístroje určeného k získání informací o skutečném geometrickém tvaru vyšetřovaného vrtu a o vývoji software k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ.

Teoretická část práce obsahuje odvození zjednodušeného numerického modelu vedení tepla v okolí systému vrtů. Jeho výsledky slouží k porovnání jednotlivých variant uspořádání vrtů a nepřesností umístění vrtů. Pomocí provedených simulací je demonstrován vliv nepřesností při výrobě pole vrtů na jeho tepelné vlastnosti na několika vzorových uspořádáních. Tento vliv se neprojeví u jediného vrtu, avšak výrazně se uplatní v organizovaných systémech geotermálních vrtů. Může jít o zhoršení vlastností systému, avšak za jistých okolností se jeho vlastnosti mohou i vylepšit. Ověření výsledků těchto simulací bylo provedeno v programovém prostředí FEFLOW.

V praktické části je dokumentován vývoj speciálního přístroje pro změření průběhu střednice geotermálního energetického vrtu. Po vyvrtání jsou totiž standardní přístroje pro určení tvaru vrtu obtížně použitelné kvůli nutnosti okamžitého vystrojení vrtu výměníkem. Výsledkem práce je prakticky použitelné zařízení, umožňující změřit průběh střednice vystrojeného vrtu. Je možné jej použít i pro vrty již provozované, je pouze nutné odpojit teplovodní potrubí vrtu. Byl kladen důraz na jednoduchost použití přístroje a jeho snadnou obsluhu jedním pracovníkem. Nezajímavější oblast použití tohoto zařízení se předpokládá u rozsáhlých systémů geotermálních vrtů, obzvlášť u těch, které jsou určeny pro výzkumné účely.

Další využití dat, která je vyvinutý měřicí systém schopen poskytnout, by měla umožnit vyvinutá softwarová aplikace k rychlému vyhodnocení vlastností systému vrtů in situ. Aplikace vykazuje funkčnost při výpočtu rozložení teplot v podloží a charakterizaci řešeného geotermálního systému stanovením jeho tepelného výkonu v ustáleném stavu. Software vychází ze zjednodušeného numerického modelu vedení tepla uvedeného v teoretické části práce. Předpokládá jistá zjednodušení, avšak na druhé straně poskytuje výsledky rychle, což by umožnilo provést korekci zjištěných nedostatků (úpravou délky, případně sklonu vrtů) ještě ve fázi vrtání geotermálního systému in situ.

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 can often be 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. It may deteriorate system properties, but under certain circumstances its properties may improve. Verification of the results 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 an 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. It is also possible to use it for boreholes already in operation, the only necessity is to disconnect the water pipeline. Emphasis was placed on the ease of the instrument use and its easy handling by one person. 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.

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.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Ing. Augustin Leiter *Geotermální energie - vliv geometrie vrtu*. Brno, 2017. 113 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
Ing. Augustin Leiter

PODĚKOVÁNÍ

Především bych rád poděkoval svým blízkým za jejich podporu při zpracování této práce. Dík patří také mému současnému školiteli, vedoucímu Ústavu geotechniky Fakulty stavební VUT v Brně panu doc. Ing. Lumíru Mičovi, Ph.D. za cenné rady, starost a obětavé vedení.

Dále děkuji všem, které mně v mojí práci podporovali, zvláště panu doc. RNDr. Pavlu Pospíšilovi, Ph.D. a paní doc. Ing. Nadě Rapantové, CSc. z Katedry geotechniky a podzemního stavitelství VŠB – Technická univerzita Ostrava, kteří svojí podporou výrazně přispěli k úspěšnému uzavření práce.

OBSAH

1	Seznam použitých symbolů a označení.....	13
2	Současný stav řešené problematiky.....	15
2.1	Úvod.....	15
2.2	Možnosti využití geotermální energie.....	18
2.2.1	Vysokopotenciálová geotermální energie	18
2.2.2	Nízkopotenciálová geotermální energie.....	21
2.3	Stav ve světě a v ČR.....	28
2.4	Využití nízkopotenciálové geotermální energie.....	30
2.5	Geotermální vrt, pole vrtů	30
2.6	Reálné pole geotermálních vrtů.....	32
2.7	Možnosti určení geometrie geotermálního vrtu	35
3	Cíle disertační práce	40
4	Analýza vlivu odklonu vrtu na vlastnosti tepelného pole systému - numerický model vedení tepla v okolí vrtu	41
4.1	Zjednodušený matematický model systému vrtů a okolí ve 2D.....	41
4.2	Ověření výsledků modelu pomocí softwaru FEFLOW.....	47
4.3	Závěr	49
5	Vývoj speciálního měřicího přístroje k určení geometrie geotermálního vrtu.....	51
5.1	Měření inklinometrem.....	51
5.2	Rané stádium návrhu experimentálního specializovaného inklinometru	54
5.3	Návrh a konstrukce experimentálního inklinometru s MEMS snímači	57
5.4	Směrová orientace sondy - zvažované principy	58
5.5	Elektronický magnetický kompas jako zdroj informace o azimutu	59
5.6	První konstrukce sondy	61
5.6.1	Výpočet parametrů a obslužný software	64
5.6.2	Kalibrace akcelerometru.....	67
5.6.3	Kalibrace magnetometru	69
5.6.4	Zkušební polygon – schodiště budovy B FAST VUT.....	70
5.6.5	Zkouška AdMaS 15.8.2013.....	72
5.7	Současný stav vývoje specializovaného inklinometru	76
5.7.1	Přístrojová část a hardware.....	76
5.7.2	Činnost zařízení - příprava měření	78
5.7.3	Zkouška v reálném vrtu.....	79

5.8	Závěr - stav vyvíjeného inklinometru.....	84
6	Vývoj software určeného k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ.....	85
6.1	Matematický základ použitý v programu	86
6.1.1	Tepelná bilance vyděleného prvku kontinua (odvození rovnice vedení tepla).....	86
6.1.2	Odvození rovnice vedení tepla	87
6.1.3	Odvození diferenčního schématu pro metodu sítí	90
6.1.4	Okrajové podmínky	93
6.1.5	Řešení systému lineárních rovnic	94
6.1.6	Interpretace výsledného řešení	95
6.2	Software k rychlému vyhodnocení tepelných vlastností systému vrtů.....	97
6.2.1	Ověření činnosti software	98
6.2.2	Shrnutí	100
7	Závěr.....	101
8	Význam práce pro praxi	102
9	Možnosti dalšího pokračování v dané problematice	103
10	Literatura	105
11	Seznam použitých tabulek	110
12	Seznam obrázků a ilustrací.....	111

1 Seznam použitých symbolů a označení

Symbol	Význam	Jednotka
A	matice koeficientů (tuhosti)	
a	součinitel teplotní vodivosti	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
a_{p1}	složka matice koeficientů, zde p – tý řádek, 1. sloupec	
a_{pp}	zde prvek matice A s indexy (p, p)	
\vec{b}	vektor pravých stran	
b_p	p – tá složka vektoru pravých stran	
c	měrná tepelná kapacita materiálu	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_s	měrná tepelná kapacita zeminy	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_w	měrná tepelná kapacita vody	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
div	operátor divergence	
$ds_{i,j,k}$	plocha obdélníkové částí hranice s indexy (i, j, k)	$[m^2]$
f	zdroje tepla v prostoru a čase	
f'	1. derivace funkce	
f''	2. derivace funkce	
f_0	zdroje tepla v prostoru a čase dělené $c \cdot \rho$	$[J \cdot s^{-1}]$
$grad$	gradient funkce	
h	prostorový krok diskretizace	$[m]$
hr	hranice pro křivkový integrál	
i, j, k	pro odvození tepelného toku: indexy uzlu v síti	
i, j, k, l, m, n	vzdálenosti mezi uzly v ose x, y, z	$[m]$
k	pro řešení systému lin. rovnic: krok iterace	
k_0	tepelná vodivost kontinua	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$modulX$	krok v indexu vektoru neznámých, posun ve směru x	
$modulY$	krok v indexu vektoru neznámých, posun ve směru y	
$modulZ$	krok v indexu vektoru neznámých, posun ve směru z	
$M, O; N, P; Q, R$	teplota sousedního bodu k bodu T v ose x, y, z	$[^\circ C]$
\vec{n}	normálový vektor	
p	index složky vektoru, matice	
pc	počet složek vektoru, počet počítaných uzlů sítě	
Q	teplo	$[J]$
\dot{Q}	tepelný tok průřezem	$[W]$
\vec{q}	hustota tepelného toku	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{Q}_{i,j,k}$	tepelný tok jednou obdélníkovou oblastí hranice s indexy (i, j, k)	$[W]$
\dot{Q}_{srov}	tepelný tok srovnávací	$[W]$
S	průřez	$[m^2]$
T	hodnota teplotní funkce (teplota) v bodě	$[^\circ C]$
T	matice sítě uzlů	$[^\circ]$
t	čas	$[s]$
Δt	diference času	$[s]$
T_{hr}	teplota hranice simulované oblasti	$[^\circ C]$
$T_{i,j,k}$	teplota uzlu sítě s indexy (i, j, k)	$[^\circ C]$
T_p	uzlový bod sítě s indexem p , jeho teplota	$[^\circ C]$
T_{srov}	teplota simulovaného vrtu	$[^\circ C]$

u	teplota jako funkce času a prostoru	[°C, K]
\vec{v}	vektor rychlosti	[m.s ⁻¹]
v_x, v_y, v_z	rychlost proudění podzemní vody	[m.s ⁻¹]
\vec{x}	vektor neznámých	
X, Y	prostorová souřadnice zdrojů tepla (vrtů)	[m]
x, y, z	prostorové souřadnice	[m]
X_i	x-ová souřadnice i-tého uzlu ve směru x	
x_p^{k+1}	p – tá složka vektoru neznámých při k+1 iteraci	
x_T, y_T, z_T	prostorové souřadnice bodu T	[m]
Y_j	y-ová souřadnice j-tého uzlu ve směru y	
Z_k	z-ová souřadnice k-tého uzlu ve směru z	
β	beta, pomocný symbol při substituci	
Δ	Laplaceův operátor	
λ	koeficient tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ρ	hustota materiálu	[kg . m ⁻³]
ρ_s	hustota (měrná hmotnost) zeminy	[kg . m ⁻³]
ρ_w	hustota (měrná hmotnost) vody	[kg.m ⁻³]
∇	operátor gradient	

2 Současný stav řešené problematiky

2.1 Úvod

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 10000 lety. Lidé využívali vodu z termálních pramenů k vaření, koupání a umývání. [1]

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. [2]



Obr. 1: Larderello, Itálie, 1904 - Produkce páry s využitím geotermální 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 4x více než současná celosvětová potřeba 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

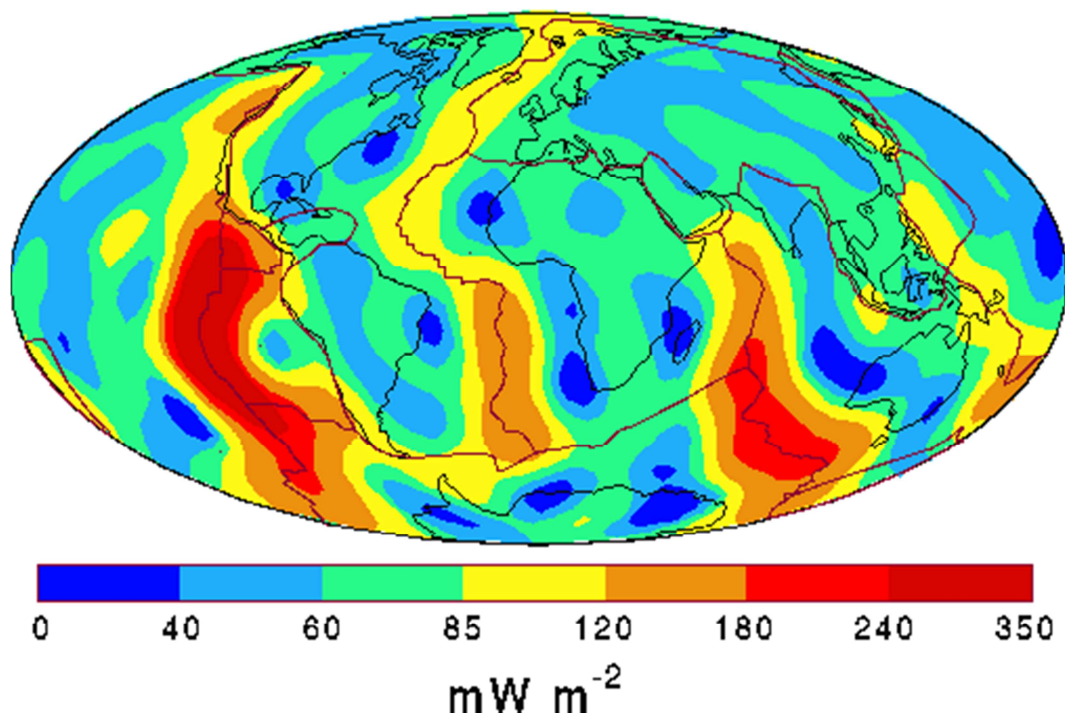
uvolňovaným z rozpadajících se radioaktivních izotopů s dlouhým poločasem rozpadu, především ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U a ^{238}U (zhruba 30 000 GW). [4]



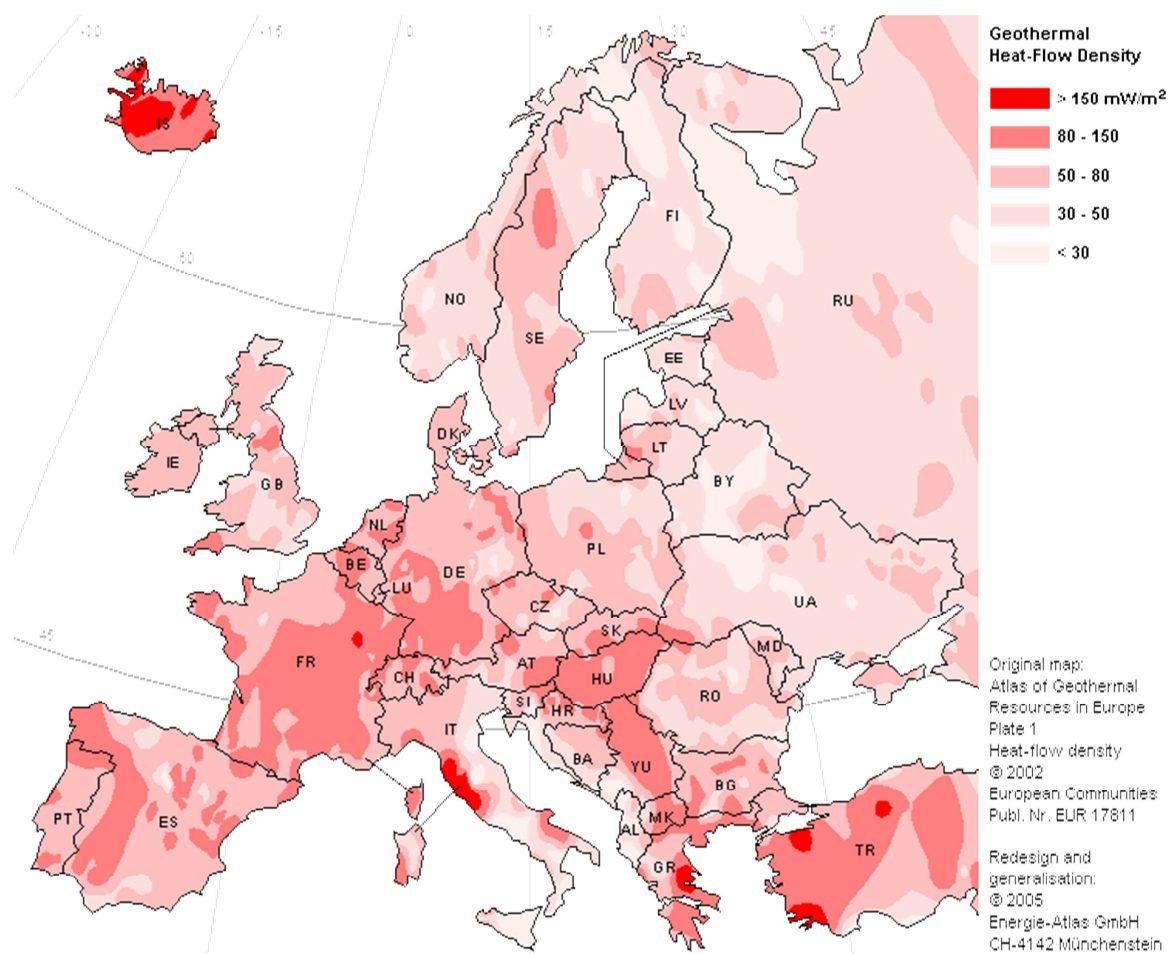
Obr. 2: Larderello, Itálie, 1904: Část technologie geotermálního elektrického generátoru, zřejmě pouze pro demonstrační účely. [5], [6]

Teplu z jádra Země je k zemské kůře přenášeno dvěma mechanismy – konvekcí (prouděním) a kondukcí (vedením). Proudění a tečení roztavených pevných látek je velmi účinným mechanismem přenosu tepla, nicméně v blízkosti povrchu (do 100 km), kde je materiál již příliš studený a viskózní na to, aby se pohyboval, je teplo přenášeno především vedením a teplotní gradienty jsou daleko vyšší. Tuhá kůra je rozdělena (rozlomena) na množství částí (litosférické desky), které se pohybují rychlostí několika centimetrů za rok vlivem konvekčních proudů pod nimi.

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. 3 – světová mapa geotermálního tepelného toku – 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). [6] Na Obr. 4 je potom uvedena podrobnější mapa geotermálního tepelného toku pro oblast Evropy. Ještě podrobnější mapa nastiňující situaci v ČR je na Obr. 15. Podrobněji se situaci v ČR věnuje kapitola 2.3 Stav ve světě a v ČR.



Obr. 3: Mapa geotermálního energetického toku, svět. [7]



Obr. 4: Mapa geotermálního energetického toku, Evropa. [8]

2.2 Možnosti využití geotermální energie

Hlavní zdroje geotermálního tepla jsou:

- akumulované teplo zemského jádra uchované od doby vzniku planety,
- rozpad radioaktivních prvků, zejména uranu, thoria a jiných,
- fyzikálně chemické exotermické reakce (například oxidace),
- tektonický pohyb (kinetická energie pohybu litosférických desek přeměněná na teplo),
- energie slapových sil, vznikajících třením vodních mas. [9]

Všechny tyto zdroje představují nebo přímo vytvářejí tepelnou energii v centru Země. V důsledku tohoto faktu dochází k fenoménu geotermálního tepelného toku - toku tepla od středu k povrchu Země. Toto 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. (lze použít v paroplynovém cyklu = použitelné pro výrobu elektřiny),
- nízkopotenciálová g. e. (zpravidla pro vytápění),
- využití jak tepelný akumulátor (vyrovnání výkyvu např. v ročním teplotním cyklu),
- kombinace.

2.2.1 Vysokopotenciálová geotermální energie

Aby se technologie "kvalifikovala" do skupiny vysokopotenciálových, měla by získávaná teplota dosahovat hodnoty více než 100°C. Taková teplota umožňuje využití pro výrobu elektrické energie v parním cyklu. Pro nejnižší teploty 100 - 200 °C je obvykle nutné použít binárního parního cyklu, pokud instalace umožňuje získávat vyšší teplotu, užijí se parní cykly vhodné pro vyšší teploty. Čím je teplota vyšší, tím je vyšší i účinnost přeměny na elektrickou energii.

Tab. 1: Vybrané geotermální elektrárny s binárními zdroji, účinnosti tepelných cyklů. [10 str. 243]

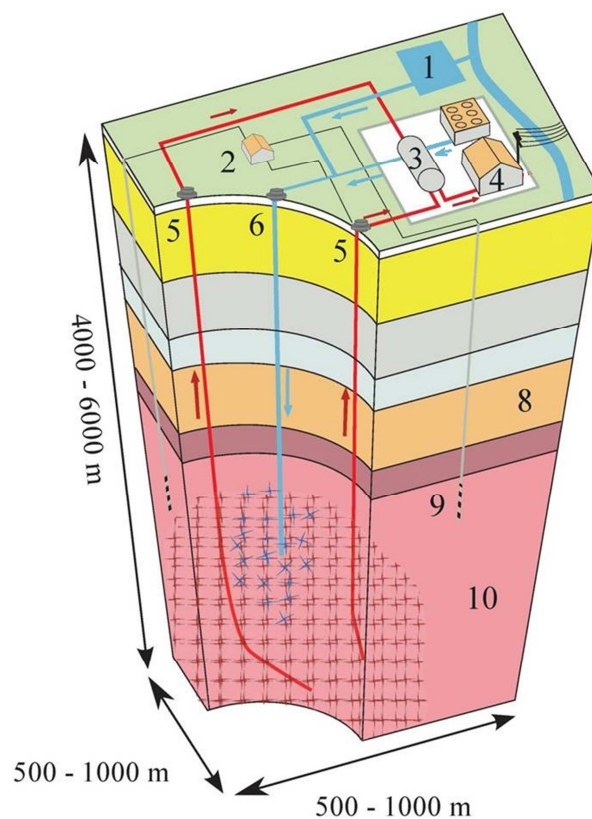
Název elektrárny	Umístění	Teplota na vstupu elektrárny, °C	Účinnost, %
Amedee	USA, Kalifornie	103	5,8
Wabuska	USA, Nevada	105	8,0
Brady	USA, Nevada	109	7,0
Húsavík	Island	122	10,6
Otake	Japonsko	130	12,9
Nigorikawa	Japonsko	140	9,8
Steamboat SB-2 & SB-3	USA, Nevada	152	8,2
Ormesa II	USA, Kalifornie	157	13,5
Heber SIGC	USA, Kalifornie	165	13,2
Miravalles Unit 5	Kostarika	166	13,8

Účinnost výroby elektrické energie pro nejnižší používané teploty může dosahovat hodnot 5 – 15 % podle místních podmínek a použité technologie (viz Tab. 1). Tento fakt současně představuje nutnost používat velký chladič sloužící k disipaci odpadního tepla. Celkovou účinnost lze zvýšit využitím tohoto odpadního tepla neboli kogenerací (v případě vhodné charakteristiky odběru energií). Význačné vysokopotenciálové metody využití g. e. jsou následující:

HDR (Hot Dry Rock)

Tato metoda využívá teplo horké suché horniny ve velké hloubce. Do této horniny je vhnána voda jedním vrtem (injekčním), přejímá z ní teplo a ohřátá vystupuje druhým vrtem (produkčním). Pokud je hornina pro vodu nepropustná, vytvoří se vhodný systém puklin metodou hydraulického štípání při výstavbě díla. Propustný systém puklin potom slouží jako tepelný výměník. Tlak vody se pak musí udržovat na vysoké hodnotě, aby se vytvořený propustný systém puklin opět neuzavřel, avšak na nižší hodnotě, než bylo třeba pro původní hydraulické štípání horniny. Metoda poskytuje vysoké teplotní parametry (několik set stupňů Celsia). Nevýhodou ovšem je vysoká cena vrtu a potřebný rozsáhlý průzkum, technologie je totiž vázána na vhodnou geologii.

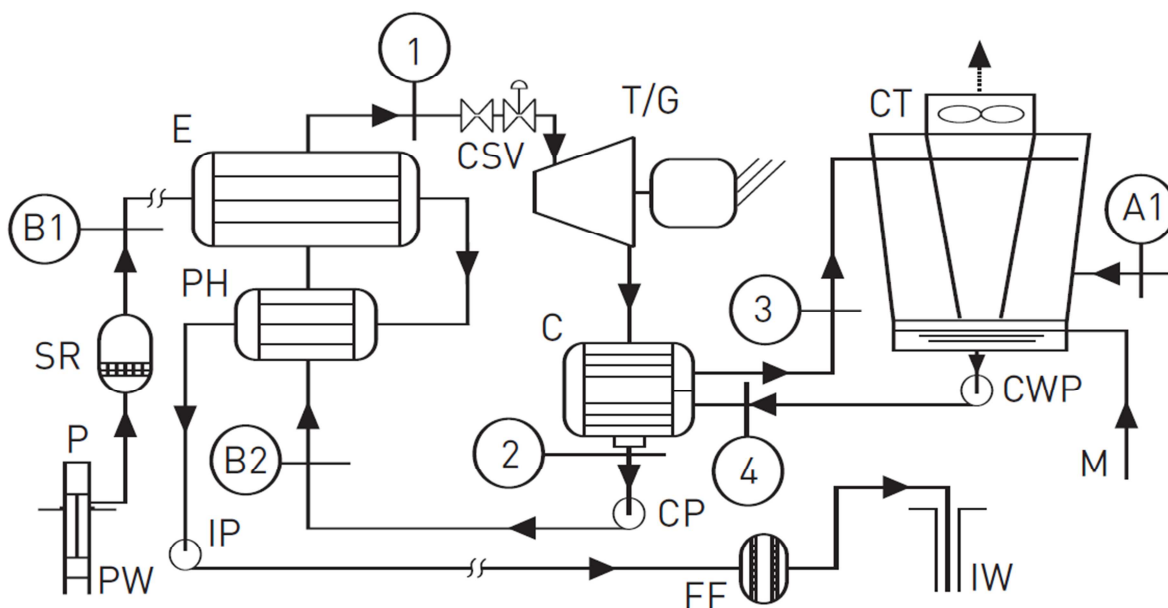
Na Obr. 5 je schematicky znázorněna elektrárna využívající geotermální teplo metodou HDR. V bazénu 1 je zásoba technologické vody. Tato voda je vhnána čerpací stanicí 6 injekčním vrtem do hlubokých vrstev podloží 10. Z těchto vrstev při průchodu propustným systémem puklin přejme teplo a vystupuje na povrch produkčními vrtů 5. Odtud je horká voda vedena do výměníku 3, kde předá teplo vodě v druhém okruhu a přemění ji na páru. Ochlazená je odváděna zpět k čerpací stanici 6. Pára pokračuje do turbíny (v budově 4), kde přemění svoji energii na mechanickou a v připojeném generátoru na elektrickou. Spotřebovaná pára kondenzuje v kondenzátoru a vrací se do výměníku 3. Celý systém je dále doplněn systémem monitorovacích vrtů 2, 9.



Obr. 5: HDR (Hot Dry Rock) - schéma technologie. [11], upraveno.

V případě, že dosahovaná teplota na výstupu z produkčních vrtů je příliš nízká, je vhodnější použít pro výrobu elektrické energie binárního paroplynového cyklu, kde je teplo předáváno médiu s podstatně nižší teplotou varu, než má voda. Základní technologické schéma elektrárny využívající binárního paroplynového cyklu je na Obr. 6.

Binární paroplynové cykly použité k výrobě elektrické energie využívají vložený uzavřený okruh nějaké další kapaliny, proto nesou označení binární. Zobrazený zdroj využívá energii z hlubinného geotermálního produkčního vrtu PW. Ohřátá voda předává svoje teplo ve výměníku E a PH druhému médiu - látce s nízkou teplotou varu při vysokém tlaku. Ta se odpařuje díky nízké teplotě varu, zvětšuje prudce svůj objem a pohání turbínu T, k níž je připojený generátor elektrické energie G. Spotřebovaná pára odchází do kondenzátoru C, kde zkondenzuje opět na kapalinu a je čerpána napájecím čerpadlem CP opět do výměníku. Teplo odebrané kondenzující páře se rozptýluje do okolí v chladicích věžích CT. Voda, která odevzdala své teplo ve výměnících E a PH, je opět čerpána čerpadlem IP do injekčního vrtu IW.



Obr. 6: Využití geotermální energie k výrobě elektrické energie, schéma binárního zdroje. [10 str. 242]

FDR (Fractured Dry Rock)

Rozdíl oproti technologii HDR je v tom, že FDR využívá již rozpukané horniny ve velké hloubce. Ta se již nemusí štípat, avšak pohyb vody proudící horninou z injekčního vrtu je hůře predikovatelný. Metoda je tak vázána na vhodnou geologii a navíc vyžaduje podrobnější průzkum.

2.2.2 Nízkopotenciálová geotermální energie

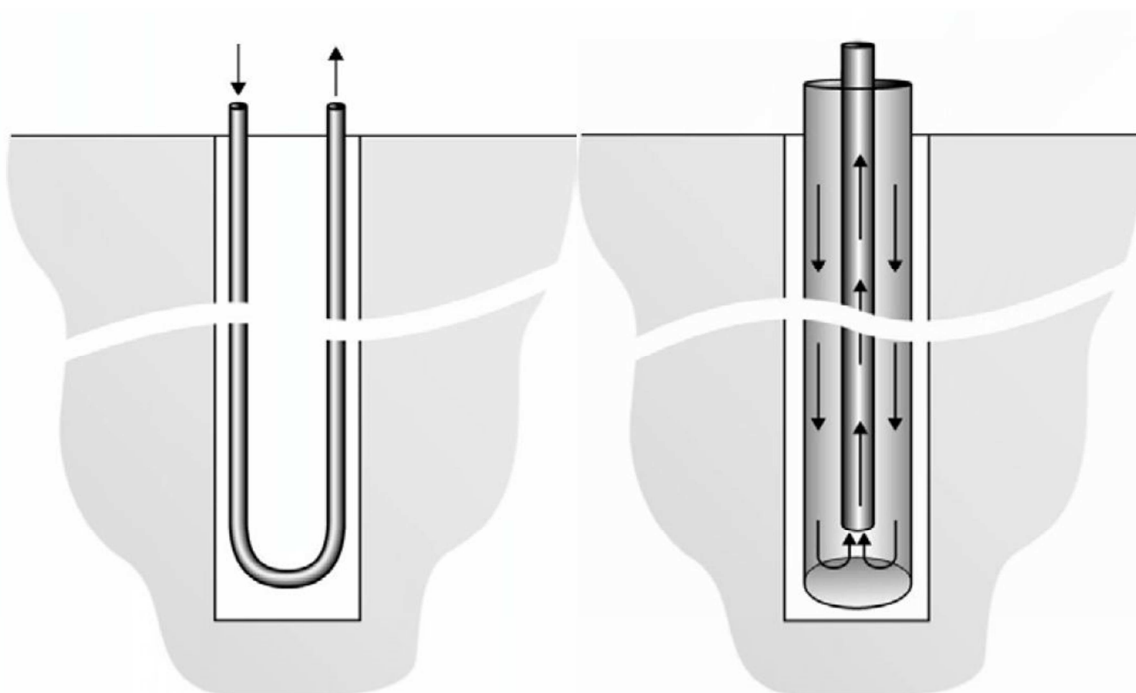
Jako nízkopotenciálová geotermální energie je obvykle označováno teplo s nízkou teplotou. Proto není třeba pronikat hluboko do země. Charakter odběru tepla pak umožní využití i při nízké teplotě. Často se však teplota zvyšuje použitím tepelného čerpadla. Do této kategorie by spadalo i využití masivu zeminy či horniny ke chlazení. Geotechnické zařízení, jehož prostřednictvím se mělká geotermální energie získává, představuje obvykle:

- geotermální energetické vrty (Borehole Heat Exchanger, BHE, BHTE),
- energopiloty,
- podzemní pažící stěny,
- zemní plošné výměníky,
- hydrotermální systémy - odběr teplé vody jímacím vrtem ze zvodně (méně časté).

Poslední možnost je striktně vázána na vhodné přírodní podmínky a proto se používá zřídka. Ostatní zařízení krátce představí následující odstavce.

Geotermální energetický vrt

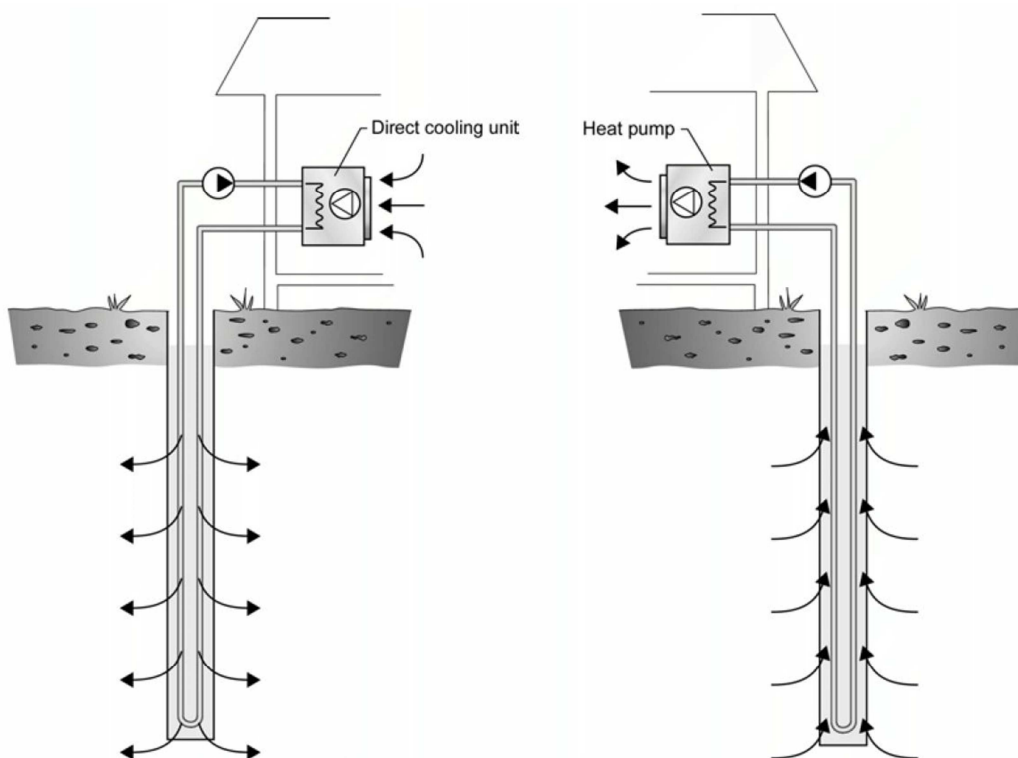
Jedná se o vrt, vystrojený tepelným výměníkem obvykle ve formě trubky, často dvojité U-trubice, ale používané jsou i jednoduchá U-trubice a vzácně koaxiální výměník (viz Obr. 7). Nově se lze setkat s radikálními konstrukcemi, například s výparníkem tepelného čerpadla instalovaným přímo ve vrtu (Heat Pipe).



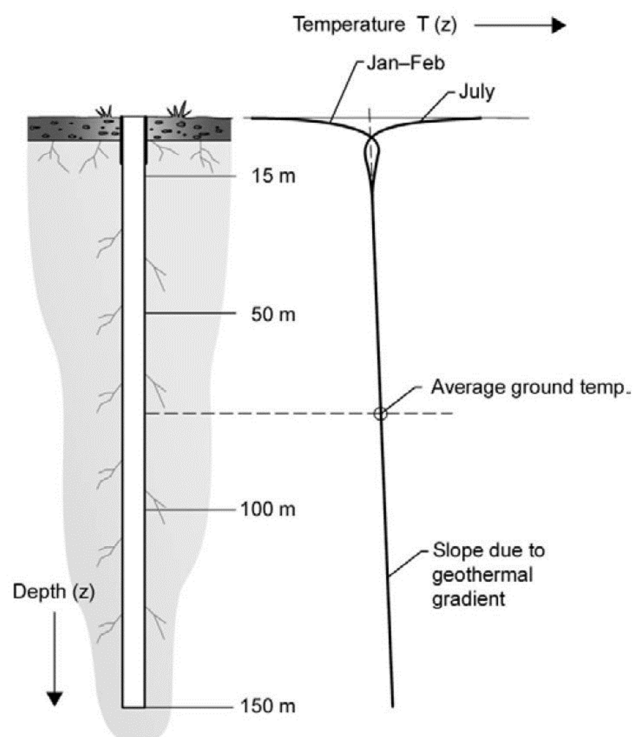
Obr. 7: Geotermální vrt - trubkový výměník, vlevo jednoduchá U-trubice, vpravo koaxiální typ. [12 str. 20]

Obvyklá hloubka geotermálního energetického vrtu bývá 100 - 200m. Získané teplo má pak nízkou teplotu a pro topení je nezbytné užití tepelného čerpadla. Je však možné tento systém přímo využít pro 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 (viz Obr. 8). V případě chlazení se jedná o ukládání energie do podloží. Pro větší výkony se organizuje více geotermálních vrtů do systémů.



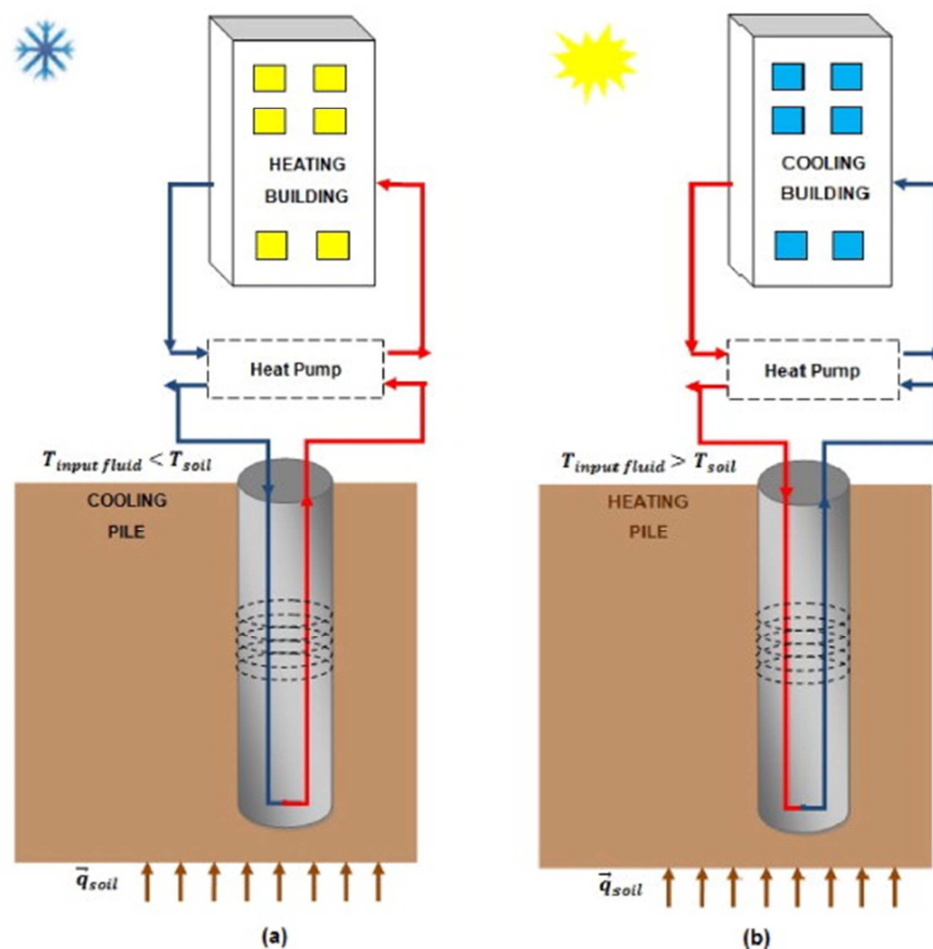
Obr. 8: Mělká geotermální energie - schéma využití pro chlazení a pro topení. [12 str. 18]



Obr. 9: Geotermální vrt (BHTE), průběh teploty v závislosti na hloubce, geotermální teplotní gradient. [12 str. 22]

Energopiloty

Piloty jsou prvky hlubinného zakládání staveb. V podstatě jsou to betonové sloupy. Při jejich výrobě buď odtěžíme (replacement) nebo roztláčíme (displacement) zeminu. Omezíme se pouze na vrtané piloty (způsob výroby – replacement), což je obvyklý případ v České republice. Hlavní funkcí pilot je přenést zatížení z horní konstrukce do podloží do větší hloubky, kde se nachází únosnější podloží. Jako základový prvek jsou značně efektivní. Jejich hloubka může dosahovat několika desítek metrů. V České republice je standardní hloubka pilot od 15 do 20 metrů. Pronikají tak poměrně hluboko pod povrch země. Postup jejich zhotovení je za běžných podmínek technologicky nenáročný, speciálním strojem se vyvrtá v zemině svislý otvor, do něhož se vsune připravený armokoš. Bezprostředně poté se celý otvor zaplní betonem. Piloty je možné ekonomicky zhotovovat ve velkých počtech, neboť přeprava specializovaného pilotovacího stroje je sice nákladná, avšak vyvrtání otvoru a instalace armatury je již zpravidla rychlá a tedy laciná (relativně).

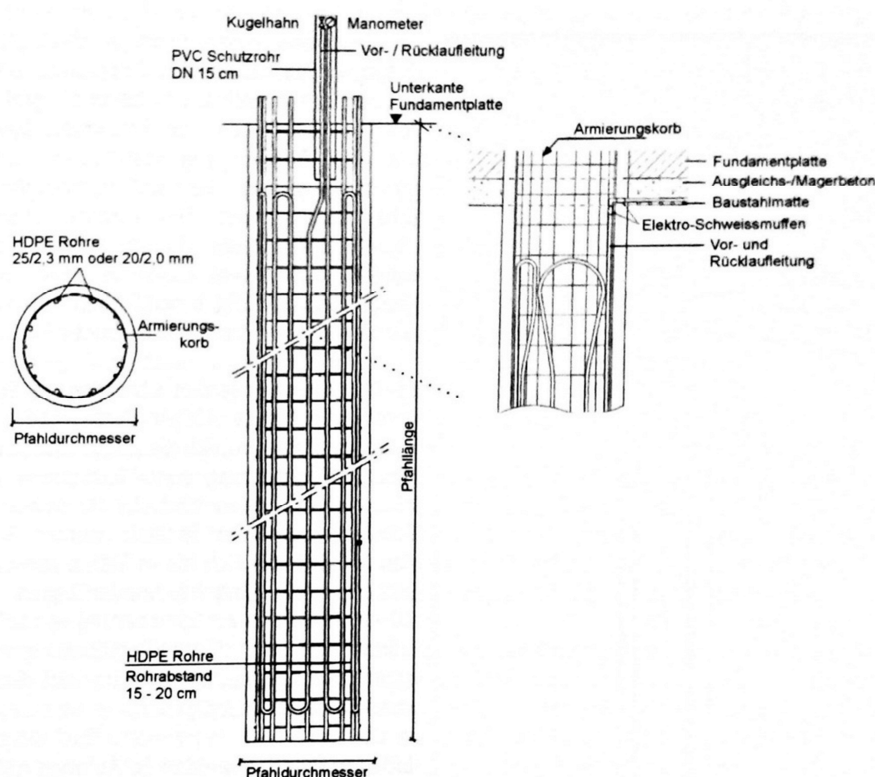


Obr. 10: Schéma budovy, tepelného čerpadla a energopiloty jako zdroje tepla (a) a chladu (b). [13]

Z výše uvedeného plyne, že větší budovy (kancelářské, hotely, výškové budovy a podobně) je výhodné založit na pilotách. Právě tento typ budov však má současně specifické nároky na vytápění a zpravidla v létě i na chlazení. Naskýtá se otázka, zda nevyužít geotermální energii pro zlepšení energetické bilance budovy, když už její základy zasahují tak hluboko pod povrch země, a neupravit pro tuto úlohu právě tento typ základového prvku. Piloty speciálně upravené pro tuto funkci se všeobecně nazývají energopiloty (viz Obr. 10).

Na druhé straně je ovšem třeba podotknout, že hloubka pilot je značně nižší (obvykle řádově nižší) než bývá hloubka geotermálního energetického vrtu. Je tedy zřejmé, že způsob

využití geotermální energie prostřednictvím energopilot se musí lišit od způsobu využití energie z geotermálního vrtu. Naštěstí právě charakter tepelných nároků budov, založených na pilotách, může v této funkci podstatným způsobem vyjít vstříc zamýšlené funkci. [14]



Obr. 11: Schéma vinutí tepelného výměníku v armokoši energopiloty. [15]

Obvykle se používají dva systémy vpletení trubky do armokoše:

- systém se šroubovitým návínem trubek po obvodu armokoše,
- systém s vedením trubek v axiálním směru, W-typ (Obr. 11)

Hloubka dosažitelná pilotou je značně nižší, než hloubka běžného nízkopotenciálního geotermálního energetického vrtu, proto je spíše rozšířené nasazení energopilot ve funkci tepelné akumulace. Větší budovy v létě vytváří značné množství tepla z klimatizačních systémů a to je možné místo rozptylu do atmosféry chlazením akumulovat do masívu pod budovou. [14]

Podzemní pažící stěny

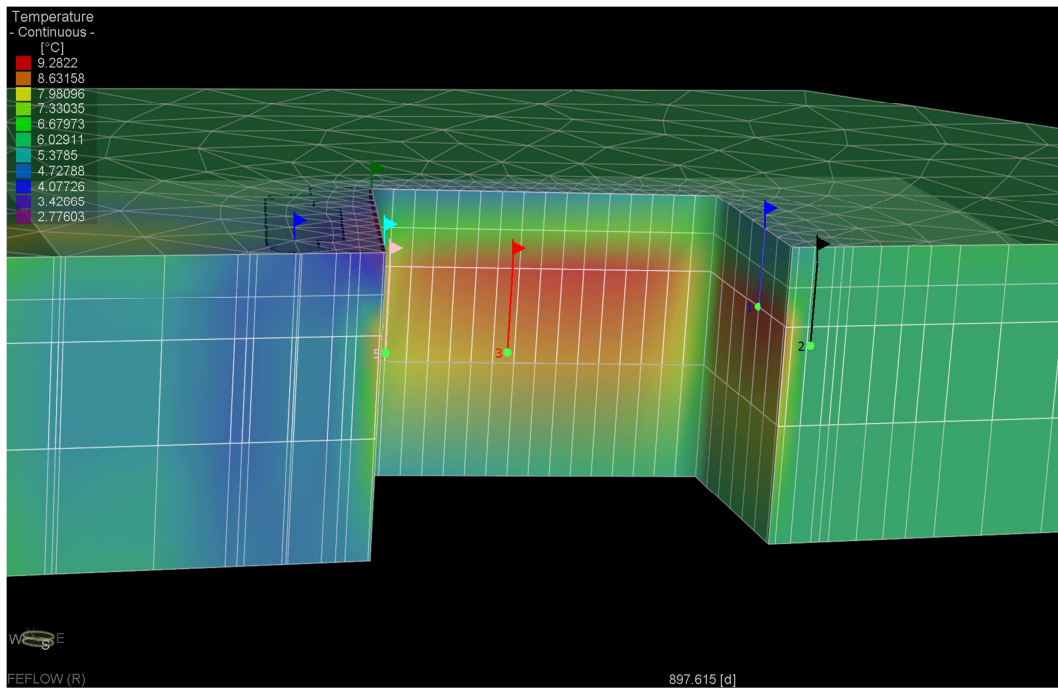
Z hlediska začlenění do geotermálního systému je nezbytné se krátce zmínit o pažících podzemních neboli milánských stěnách. Používají se k často k zajištění stavební jámy a jako podzemní těsnící stěny. Při výstavbě se využívá speciálního drapáku nebo hydrofrézy. Těmito mechanismy se vyhloubí úzká rýha, do které se poté vsune armokoš a zespodu se zalévá betonem. Pokud to dispozice dovoluje, je možné do armokošů вплést vinutí trubkových tepelných výměníků a získat tak mělký podzemní výměník podobně jednoduše, jako v případě energopilot. Milánská stěna je často využívána v těsnící funkci, předpokládá se tedy, že bude obtékána podzemní vodou. Pokud tomu tak je, jsou splněny vhodné podmínky pro nasazení v geotermálním systému. V zimě je možné využít tepla obtékající podzemní vody pro topení, v létě naopak chladit teplo generované klimatizací, to při poměrně malém rozptylu teplot výměníku. Jako reprezentanta takového systému je možné jmenovat hotel Knightsbridge Palace v Londýně, využívající podzemní pažící stěny a energopiloty. Tato stavba zasahuje šest podlaží do většinou jílového podloží. Její obvod byl zajištěn 36 m hlubokou a 800mm tlustou pažící stěnou, při jejímž budování byly do armování začleněny tepelné výměníky pro využití v topném a chladícím systému. Systém tak využívá kromě cca 150 m obvodu pažící stěny ještě 50 energopilot. Základní výkonové parametry jsou 150 kW topení / 150 kW chlazení, zakládání začalo v roce 2010, dokončení v roce 2011 (viz Obr. 12).



Obr. 12: Hotel Knightsbridge Palace v Londýně, instalace výměníku do armokoše pažící stěny. [16]

Z domácích konstrukcí je možné jmenovat projekt Palác Trnitá v Brně, pro který bylo autorem vypracováno posouzení tepelného výkonu. Objekt měl opět využívat teplo podzemní vody proudící kolem těsnící milánské stěny. Lokalita byla zajímavá vodním kolektorem o poměrně malé mocnosti cca 5 m ohrazeným nepropustnými vrstvami. Výkonové parametry posuzovaného návrhu představovaly podle posudku zhruba 40 kW topení a cca 220 kW chladícího výkonu v létě – viz Obr. 13. Při posuzování této instalace se nepříjemně projevila obtíž při stanovení směru toku podzemní vody. Tento tok vzniká jako důsledek hydraulických poměrů v recipientu a korytě řeky. Nelze tedy přesně určit, kterým směrem podzemní voda poteče, neboť to závisí nejen na podloží a výškových poměrech, ale též na ročním období, aktuálních srážkách a stavu hladiny a podobně. Aby taková instalace využívala teplo

obtékající vody optimálně, bylo by třeba vybavit ji měřicím a regulačním systémem tak, aby bylo možné jednotlivé sekce výměníků vřazovat do série podle aktuálně naměřeného chování proudu podzemní vody. Do popředí takto také vyplyne otázka ovlivnění případných okolních uživatelů.



Obr. 13: Palác Trnitá - řez simulovanou oblastí pod stavbou, barevná škála znázorňuje teplotní pole v režimu chlazení.

Zemní plošný kolektor

Jedná se o další možnost, principiálně odlišnou od vrtů. Místo vrtání a pronikání co nehlouběji no zemské kůry jde o sbírání tepla z velké plochy výměníkem umístěným mělce pod povrchem. U instalací velikostí tradičního rodinného domku lze například využít plochy velikosti zahrádky. Výměník plošného kolektoru se realizuje jako síť trubic, položených buď na plochu později zahrnutou zeminou (Obr. 14) nebo do drážek, případně lze využít i jiné techniky. Vzhledem k průběhu teplot v podloží je možné konstatovat, že zemní plošný kolektor využívá spíše solární tepelnou energii, která v uvažovaných hloubkách ještě zcela převažuje nad působením geotermálního tepla - viz Obr. 9. Tento způsob využití také tedy klade odlišné nároky na charakteristiku odběru tepla.



Obr. 14: Zemní plošný kolektor, vinutí sběrného potrubí před zahrnutím zeminou. [17]

2.3 Stav ve světě a v ČR

Využití geotermálního tepla je obvykle vázáno na vhodné přírodní podmínky. Vynikající předpoklady v tomto smyslu má bezesporu Island. Uvádí se, že geotermální energie se podílí až z 85% na vyhřívání islandských domů. Další země, které geotermální energii využívají ve větším měřítku, jsou zejména USA, Velká Británie, Francie, Švýcarsko, Německo a Nový Zéland. [18]

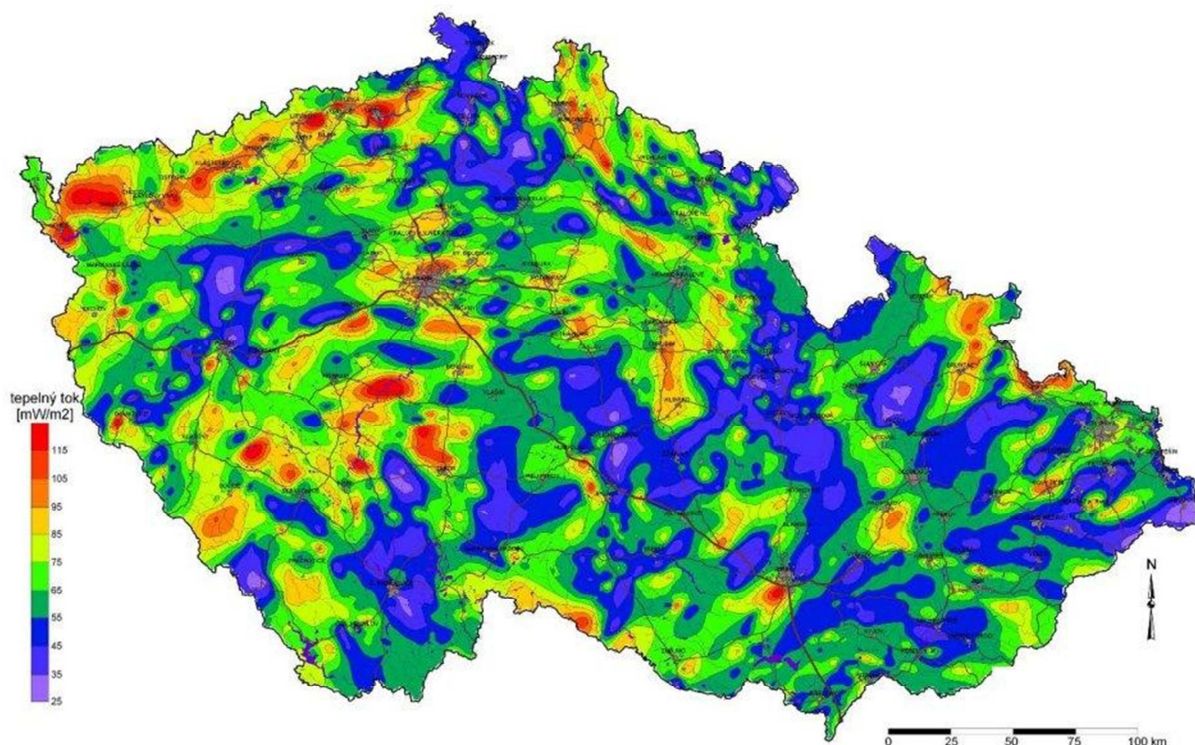
Geotermální teplo lze využít též k výrobě elektrické energie, avšak tato zařízení jsou technologicky značně náročná (především kvůli hloubce vrtu) a mají nízkou termodynamickou účinnost. Proto je toto využití méně časté, nicméně v oblastech s vhodnými podmínkami se používá. První geotermální elektrárna byla otevřena v Itálii v Larderellu v roce 1904 (Obr. 2 - na obrázku je však patrně pouze malé demonstrační zařízení). Největší instalace v současné době jsou v USA, následují Filipíny a Indonésie, největší podíl geotermálních elektráren relativně k celkové výrobě má Island. [18]. Pořadí států ve světě podle instalovaného výkonu geotermálních elektráren ukazuje Tab. 2.

Tab. 2: Pořadí států podle instalovaného výkonu geotermálních elektráren (březen 2016). [19 str. 10]

Pořadí	Stát	instalovaný výkon [MW]	Pořadí	Stát	instalovaný výkon [MW]
1	USA	3567	12	Kostarika	204
2	Filipíny	1930	13	Nikaragua	109
3	Indonésie	1375	14	Rusko	97
4	Mexiko	1069	15	Papua-N.Guinea	56
5	Nový Zéland	973	16	Guatemala	42
6	Itálie	944	17	Německo	40
7	Island	665	18	Portugalsko	29
8	Turecko	637	19	Čína	27
9	Keňa	607	20	Guadeloupe	15
10	Japonsko	533	21	Etiopie	8
11	El Salvador	205			

Geotermální elektrárny využívají teplo s vysokým potenciálem (teplotou), pro takové systémy je nezbytné proniknout pod povrch Země do hloubek v řádech kilometrů případně využít přírodních vývěrů pramenů podzemních vod ohřátých na vysokou teplotu (tedy v místě vývěru spíše páry), nejlépe v oblastech geologicky vhodných. Typicky jsou to například vulkanicky aktivní oblasti nebo pásma kolize litosférických desek (subdukční/riftové zóny), kde je možné přiblížit se poměrně mělkým vrtem k horninám o vysoké teplotě. Pro takovéto využívání geotermální energie v České republice nejsou vhodné podmínky, protože vrstvy s vhodnou teplotou jsou uloženy hluboko. Podrobnější mapa geotermálního energetického toku v ČR je na Obr. 15.

Z této mapy je zřejmé, že oblasti s tokem vyšším než 95 mW/m² jsou zastoupeny výjimečně. Přesto existují i u nás realizace, které vysokopotenciálovou formu geotermální energie využívají, mezi významné realizace patří:



Obr. 15: Mapa geotermálního energetického toku, ČR. [20]

- 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 [21],
- 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. [22]

Na území našeho státu však většinou nejsou pro takovéto využívání výhodné podmínky. Dále se tato práce bude proto zabývat pouze systémy nízkopotenciálovými, tedy takovými, 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 [23],
- 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, v současné době ve výstavbě.

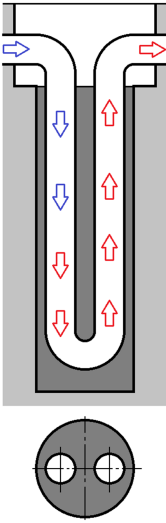
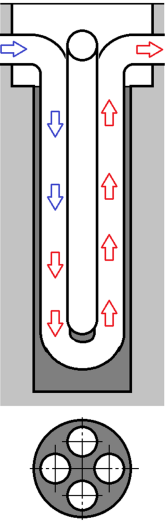
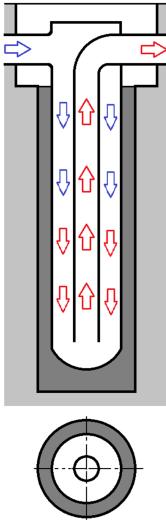
2.4 Využití nízkopotenciálové geotermální energie

Využití geotermální energie hraje v dnešní době stále významnější úlohu. Souvisí to s rostoucí poptávkou po energiích všeobecně. Geotermální teplo lze využít nejen k vytápění obytných objektů, ale i v technologických procesech. Pod tímto pojmem si často představujeme využití tepla z povrchové vrstvy země, případně z hloubky několika desítek až stovek metrů. Takováto tepelná energie se vyznačuje poměrně nízkou teplotou teplotnosného média, a proto ji také často označujeme jako tak zvanou nízkopotenciálovou. To však není jediný způsob využití energie horninového masivu. Podobným způsobem je totiž možné tepelnou energii do masivu též ukládat a přistupovat tak k systému jako k chladiči, dokonce je možné teplo uložené do masivu i do jisté míry zpětně využívat, potom se soustava chová jako jakýsi tepelný akumulátor. [24]

2.5 Geotermální vrt, pole vrtů

Jak tedy vypadá takový běžný systém pro využití nízkopotenciálového geotermálního tepla? Zemský povrch je s masivem propojen takzvaným geotermálním vrtem. Ve vrtu je instalován tepelný výměník – obvykle U-trubice – ve kterém obíhá teplotnosné médium. To bývá voda, smíšená s menším dílem přísad, sloužících k zamezení zamrzání a jako ochrana kovových částí okruhu před korozi.

Tab. 3: Uspořádání výměníků v nejčastěji používaných konfiguracích geotermálních vrtů.

Var:	Jednoduchá U-trubice	Dvojitá U-trubice	Souosý výměník
Uspořádání			
Charakteristika	jediná U-trubice, obíhající médium je teplotnosná látka primárního okruhu (voda s přísadou proti zamrzání), uspořádání se vyznačuje tepelným zkratem zhoršujícím tepelné charakteristiky, tepelný odpor nejvýše 0,2 K/(W/m) [12 str. 72]	dvě U-trubice uspořádané v jediném vrtu, obíhající médium je opět voda primárního okruhu, díky zdvojené U-trubici a tím pádem zvětšené ploše má nižší tepelný odpor, nevýhody vyplývající z tepelného zkratu zůstávají	tepelný výměník uspořádaný koaxiálně, obíhající médium je opět voda, směr cirkulace nemusí být nutně totožný se směrem na ilustraci, je-li vnitřní trubice tepelně izolovaná, odstraňuje se tepelný zkrat = tepelný odpor nejméně 0,01 K/(W/m) [12 str. 72]

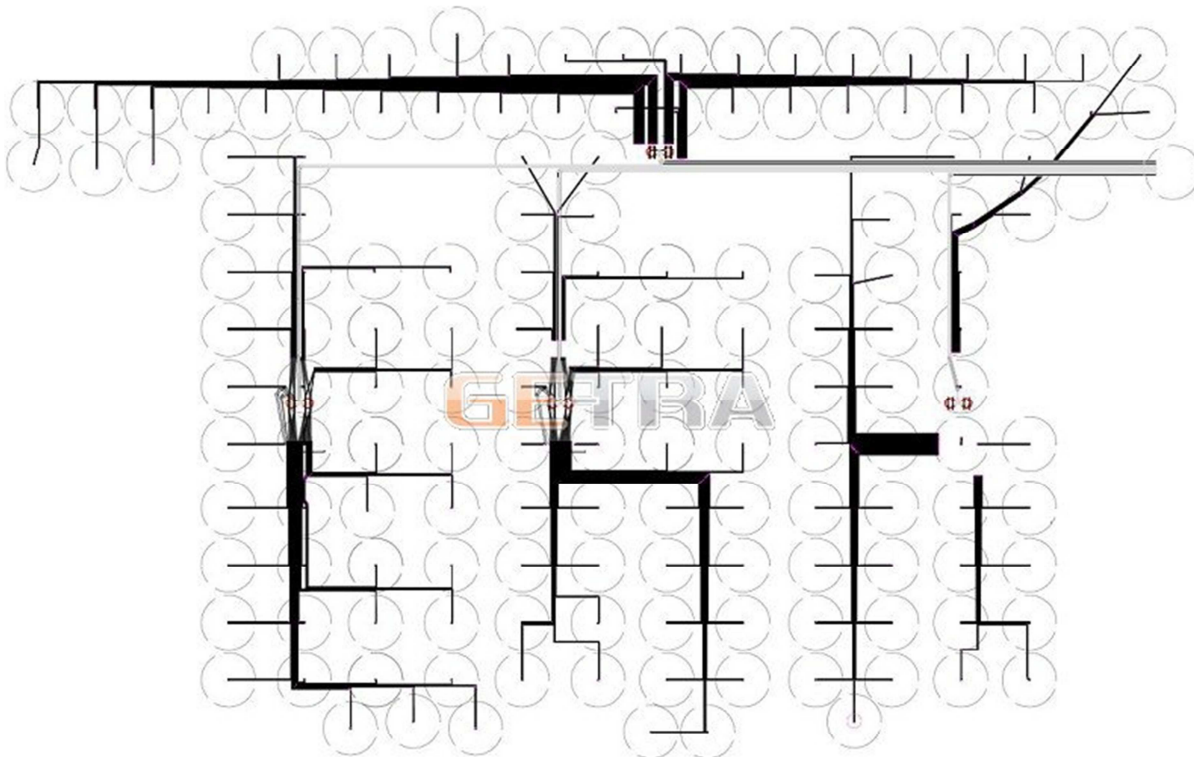
Prostor mezi výměníkem a vnitřním povrchem vrtu se obvykle vyplňuje injektážní záplivkou pro zlepšení přestupu tepla mezi povrchem výměníku a vnitřní stěnou vrtu. Existují i geotermální vrty zaplněné vodou, často v oblastech s vysokou hladinou podzemní vody, která zhotovený vrt zaplaví samovolně. Někdy se horní část vrtu zaplní injektážní hmotou s jinými tepelnými vlastnostmi, ta pak vrt tepelně izoluje, aby voda, ohřátá ve spodní části výměníku, neztrácela teplo při výstupu do vyšších, chladnějších částí vrtu. 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.

Pro některé aplikace je výhodné čerpat vodu do výměníku teplejší a nechat ji ochladit. Hmotu masivu se tak využívá naopak jako chladič. Dále existují aplikace, ve kterých slouží geotermální vrt jako úložiště – akumulátor – tepla, typickým příkladem jsou systémy spojené s klimatizací velkých městských budov. V létě se do horninového masivu ukládá přebytečné teplo odebírané vzduchu v místnosti (odpadní teplo z klimatizace). Teplota masivu stoupá, ukládá se do něj teplo. V zimním období se pak toto teplo uložené z léta využívá pro topení. Bilance akumulačního cyklu bývá mírně vylepšená geotermálním teplem (stoupajícím z nitra Země), které do tohoto systému samozřejmě také vstupuje.



Obr. 16: Systém mnoha geotermálních vrtů, rozváděcí a sběrný potrubní systém v základech. [25]

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. U vrtů organizovaných v poli také obvykle není nutné pronikat do takové hloubky jako u ojedinelých vrtů. Příklad pole geotermálních vrtů ve výstavbě je na Obr. 16, příklad plánu rozvodné potrubní sítě pole geotermálních vrtů je na Obr. 17.



Obr. 17: Příklad pole geotermálních vrtů, plán rozváděcího a sběrného potrubí. [25]

2.6 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 pochopitelně představuje poměrně drahou záležitost. Proto se v obdobných případech vrtá nejmenším možným průměrem, což je běžně průměr 4“ (100 mm). Do vrtu se potom zavede připravený výměník (U-trubice). [26]

Příklad montáže tepelného výměníku v areálu AdMaS je na Obr. 18. Fotografie ukazuje odvíjení připraveného zkompletovaného výměníku z transportní cívky umístěné na nákladním automobilu a zasouvání do právě dokončeného vrtu.

Kvůli malému průměru vrtu je i vůle mezi vnitřním povrchem vrtu a výměníkem velmi malá. To může působit obtíže při instalaci výměníku. Pokud dojde byť i k malému zmenšení průchozího profilu vrtu, výměník tímto místem již obvykle není možné protáhnout a vrt je tak znehodnocen. Takováto situace může nastat díky:

- deformaci vrtu vlivem sedání přilehlých horninových vrstev v čase,
- znečištěním hotového vrtu cizorodými tělesy (zapadení drobných kamínků, štěrku).

Z pochopitelných důvodů existuje snaha minimalizovat výskyt uvedených jevů. Účinnou metodou je okamžitá instalace výměníku bezprostředně po dokončení vrtání. Praxe ukazuje, že při okamžité instalaci je téměř jisté úspěšné zavedení výměníku, naopak při prodloužení do druhého dne již pravděpodobnost neúspěchu nepřiměřeně roste. Přesná

kvantifikace nebyla v rámci této práce provedena, avšak montážní firmy se snaží o spuštění výměníku okamžitě po dovržení vrtu.



Obr. 18: Instalace geotermálního výměníku (dvojitá U-trubice) do vrtu. (AdMaS 2013, foto autor)

Dalším jevem, který může nastat při realizaci vrtů vzhledem k jejich blízkosti, je přiblížení vrtů (dochází ke zdeformování tepelného pole) 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. Bylo zjevné, že odchylka skutečného tvaru vrtu od ideálního může dosáhnout vzdálenosti odstupu sousedních vrtů. Navíc se ukázalo, že obsluha vrtné soupravy si je rizika vědoma a často preventivně odklání vnější vrty pole od svislice směrem ven z vrtného pole, aby riziko provrtání již hotového vrtu snížila. Výsledné pole má potom prostorově vějířovitý tvar. [24]

Odchylka polohy (tvaru) vrtu od zamýšleného má vliv na vlastnosti celého vrtného pole. Pokud je pole správně navrženo, odchylka od navržené geometrie zvýší nerovnoměrnost rozložení teplot a tím tepelný odpor celého pole. Znalost těchto odchylek tedy hraje podstatnou roli. VŠB jako výzkumná instituce vyvíjí činnost také na poli teoretické analýzy problematiky geotermálních vrtů, její snahy však negativně ovlivňuje neznalost skutečné geometrie pokusného vrtného pole.

Další část problému lze spatřovat při praktické činnosti, návrh pole geotermálních vrtů a používané pomůcky (například zmiňovaný program FEFLOW) totiž nepočítají podle autorových znalostí s jiným než s vertikálním systémem. Při návrhu tepelných vlastností pole je tedy činnost projektanta ztížena, neboť nemůže v předstihu jednoduše parametricky navrhované pole testovat s ohledem na možné odchylky, případně u již hotového pole vliv zjištěných odchylek vyhodnotit.

Předestřený problém mně zaujal a rozhodl jsem se pokusit se přispět k jeho řešení v rámci své disertační práce.

2.7 Možnosti určení geometrie geotermálního vrtu

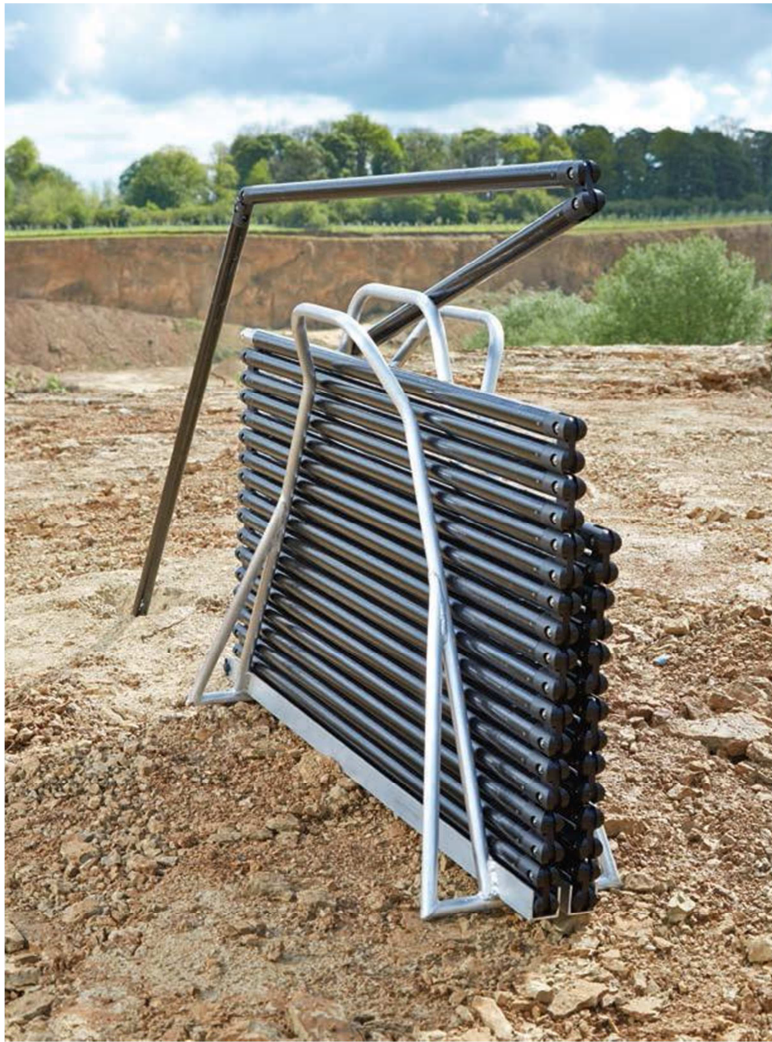
Jak je vlastně možné stanovit přesný tvar vrtu v hloubkách stovek metrů pod povrchem?

V optimálním případě by bylo nejlepší navádět korunku vrtné soupravy již při vrtání. Takto vybavené vrtné soupravy existují, avšak jsou finančně náročné a používají se zřídka. Hlavní tíhu obvyklých vrtacích prací nesou dosud vrtné soupravy bez této možnosti.

Další možností, která se nabízí, je proměření vyvrtaného vrtu. Pro tento účel existují měřicí přístroje se sondou dosti podobnou inklinometrické sondě. Tyto přístroje umožňují často navíc i proměření kruhovitosti příčného průřezu vrtu a případně dalších vlastností. Postup měření je také podobný měření inklinometrem, sonda se zavede do vrtu a postupně se zapisují údaje podél délky vrtu, výsledný tvar potom vznikne integrací naměřených údajů. Pro ilustraci uvádím na Obr. 19 takový přístroj firmy MDL, části společnosti Renisaw plc. Tento měřič při postupném zasouvání do vrtu zaznamenává jeho průběh. Na rozdíl od obvyklých metod však není zavěšen na lanu, ale na řetězu tyčí propojených kardanovými klouby (umožňují ohyb, ne však rotaci – viz Obr. 20). Častá metoda orientace u podobných přístrojů je použití magnetického kompasu. Orientace sondy firmy MDL je však díky použitému způsobu zavěšení vzhledem k půdorysné rovině zajištěna pozicí stativu se složenými články-tyčemi na povrchu. Sonda tak nemůže být ovlivněna magnetickým rušením a navíc použití tuhého řetězu umožňuje použití v šikmých, vodorovných a dokonce i stoupajících vrtech. Vyšší hmotnost závěsného systému však na druhé straně poněkud omezuje maximální hloubku použití (hmotnost řetězu 0,4 kg/článek, články jsou dlouhé 1 nebo 2 metry). [27]



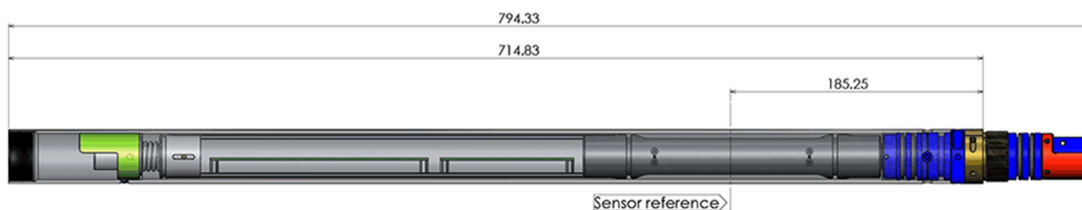
Obr. 19: Rodded Boretrak - speciální inklinometr firmy MDL (Renisaw) pro měření průběhu vrtu [27].



Obr. 20: Rodded Boretrak firmy MDL (Renisaw) – poskládaný článkový řetěz pro spouštění sondy [27].

Tatáž firma nabízí přístroj Cabled Boretrak ve variantě spouštění na kabelu. Tento přístroj má opět zabudovaný akcelerometr (stejně jako Rodded Boretrak), avšak k orientaci slouží zařízení nazývané jako digitální kompas – zřejmě tedy magnetometr. [28]

Podobný přístroj nabízí i firma Mount Sopris Instruments, nazývá se QL40-DEV a získává informaci o náklonu z akcelerometru a o natočení z údajů magnetometru - orientuje se tedy vůči magnetickému severu - Obr. 21.



Obr. 21: Speciální inklinometr firmy MSI s názvem QL40-DEV [29].

Obdobný přístroj nabízí firma Solexperts AG, Švýcarsko, v jejím podání se nazývá EZ-Trac a jde opět o sondu podobnou inklinometrické s orientací pomocí magnetometru [30 str. 2]. Tato firma navíc nabízí přístroj s orientací ne vzhledem ke geomagnetickému poli, ale pomocí gyroskopů [30 str. 2]. Zařízení se jmenuje Gyrosmart a je určené především do vrtů

s ocelovým pažením – to zhoršuje podmínky pro činnost magnetometru ve funkci kompasu. Ovšem na druhé straně je nutné počítat s kumulovanou odchylkou gyroskopu, což výrobce v podkladech uvádí.



Obr. 22: Speciální inklinometr firmy Piletest BIT – sonda s vodícími vozíky, naviják a kladka s bluetooth enkodérem [31] .

Zařízení pro měření úklonu vrtu nabízí firma Piletest Ltd. pod názvem BIT – Borehole Inclination Tester. K měření úklonu využívá opět dvouosý akcelerometr a pro orientaci vůči zeměpisnému směru gyroskop. Zařízení vysílá údaje po kabelu k enkodéru umístěnému na povrchu, z něj je čte standardní mobilní zařízení s operačním systémem Android bezdrátovou bluetooth komunikací – viz Obr. 22. Na tomto obrázku je také vidět vedení sondy ve vrtu pomocí centralizérů - vozíků s kladkami na spodním a horním konci sondy.

(Pozn.: Obvykle se předpokládá, že i k ostatním sondám bude připevněn centralizér.)

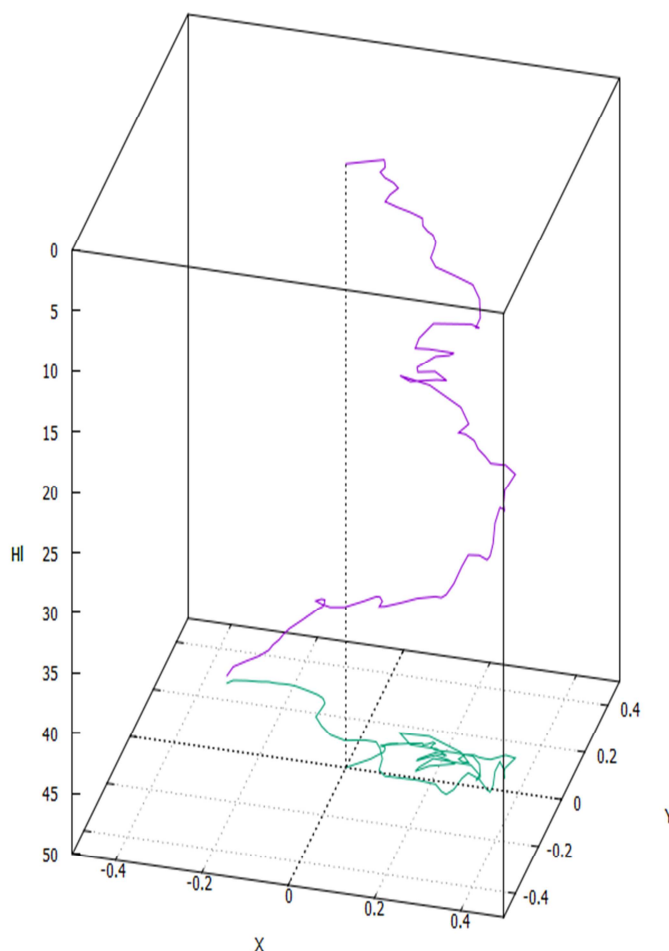


Obr. 23: Speciální inklinometr firmy RST Instruments s názvem Borehole-Profile-Sensor – sonda s vodícími nákrážky [32].

Tab. 4: Souhrnné podstatné vlastnosti v textu uváděných speciálních inklinometrů.

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

Firma RST Instruments nabízí zařízení nazývané Borehole-Profile-Sensor, což je opět v podstatě 3-osý akcelerometr doplněný 3-osým magnetometrem. Slouží opět k proměření průběhu střednice vrtu, ovšem v tomto případě jde o zařízení určené speciálně pro vrty vzestupné. Sonda je tedy do vrtu „tlačena“ zespu dostatečně tuhým kabelem (Obr. 23).



Obr. 24: Příklad skutečného tvaru vrtu – náčes s využitím dat ze speciálního inklinometrického měřicího přístroje.

Podstatné vlastnosti uvedených zařízení shrnuje Tab. 4. Grafickou interpretaci dat pořízených z měření vrtu speciálním inklinometrem ukazuje Obr. 24.

Tyto způsoby kontroly vrtů se využívají ve vrtech dosahující hloubek stovek metrů či několika kilometrů. V případě mělkých vrtů, hloubka 100 až 200 m, jde o finančně náročnou část. V některých případech by vrt musel být pažen, aby bylo možné provést dané měření. A jak již bylo zmíněno, u mělkých geotermálních vrtů dochází ihned po odvrtání vrtu k zasunutí U-trubice a tím pádem není možné realizovat inklinometrické měření standardními inklinometrickými sondami. U-trubice totiž projde 4“ průměrem velmi těsně (ekonomická hlediska vrtání). Zkušenosti ukazují, že pokud by došlo k prodlení kvůli proměření vrtu sondou, vznikne riziko kolapsu vrtu materiálem, uvolňujícím se např. ze stěn, a tím zmenšení průřezu vrtu, ten by se pak už nemuselo podařit vůbec osadit. Z tohoto důvodu je proměření vrtu před osazením U-trubice riskantní až nemožné.

Poznámka k použití gyroskopických senzorů v inklinometrických sondách: Gyroskopický snímač je prakticky nezávislý na vnějším prostředí (na rozdíl od magnetometru), avšak poskytuje údaj o změně úhlu natočení. Z toho vyplývá, že pokud je účelem získat údaj o úhlu natočení, je klasický gyroskopický snímač vždy zatížen kumulující se chybou při integraci jeho signálu, takzvaným integračním driftem. Malé chyby v měření úhlové rychlosti se kumulují do narůstající chyby úhlu natočení. (Jedná se o typickou chybu inerciálních navigačních systémů, což v principu jsou zařízení využívaná v tomto typu inklinometrické sondy. Například [33] uvádí jako chybu orientace (natočení) inerciálního navigačního systému slušné kvality v řádu desetin stupně za hodinu. Snaha o odstranění driftu vede například ke kombinování signálů snímačů více fyzikálních veličin a korekce vstupem signálu z jiného navigačního systému.) Zdálo by se tedy logické využití spíše magnetometru ve funkci kompasu, neboť zde je výstupem již přímo úhel natočení. Magnetometr má však soubor svých specifických problémů působících potíže při jeho využití. Avšak moderní sensorová technika je pravděpodobně dnes schopná způsobit malou revoluci v této oblasti, neboť i dostupné a levné senzory využívající technologie MEMS disponují dříve nevídanou přesností. Autor práce má osobní zkušenost se zařízením MPU-6050. Jedná se o tříosý akcelerometr kombinovaný s tříosým gyroskopem na stejném křemíkovém jádru spolu s digitálním pohybovým procesorem (DMP), schopným zpracování komplexních pohybových algoritmů. [34] Tento snímač je součástí celé řady takzvaných chytrých mobilních telefonů. Při zběžném testu navigační schopnosti tohoto snímače se autorovi nepodařilo odečíst žádný měřitelný drift. To svědčí o výjimečné kvalitě moderní byt' komerční sensorové techniky. Je možné, že takto kvalitní zařízení přispějí ke zbourání některých dříve platných axiomů.

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

3 Cíle 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:

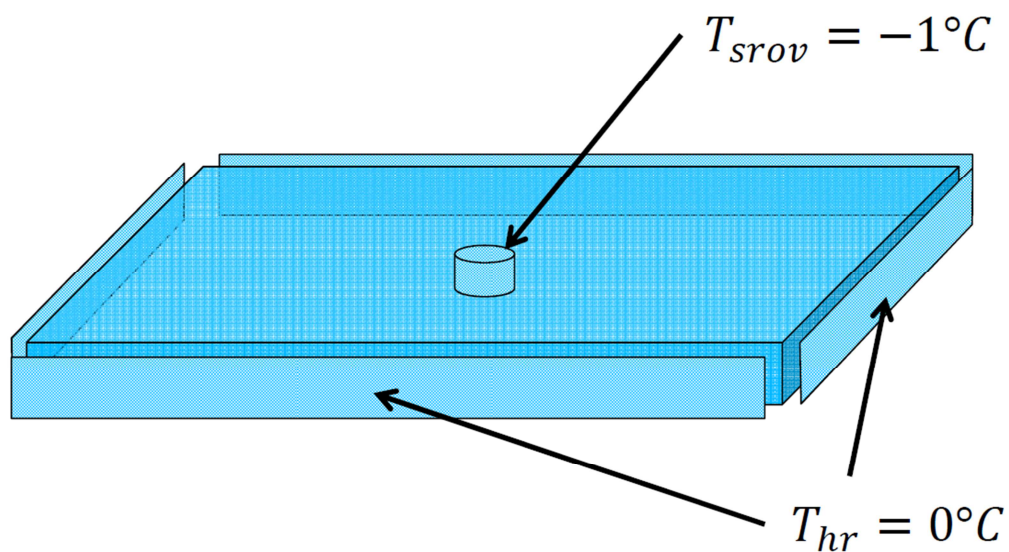
- analýza vlivu odklonu vrtu na vlastnosti tepelného pole systému,
- vývoj speciálního měřicího přístroje, určeného k získání informací o skutečném geometrickém tvaru vyšetřovaného vrtu,
- vývoj software určeného k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ.

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

4 Analýza vlivu odklonu vrtu na vlastnosti tepelného pole systému - numerický model vedení tepla v okolí vrtu

4.1 Zjednodušený matematický model systému vrtů a okolí ve 2D

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 rozměrem desky 50x50 délkových jednotek. Do této vrstvy byl umístěn spotřebič tepla (propad) – tedy simulovaný geotermální vrt případně vrty, se stálou teplotou T_{srov} . K přenosu tepla ve vrstvě dochází pouze vedením (kondukcí), nikoli prouděním (konvekcí) ani zářením (radiací). Vrstva je obklopena kontínuem se stálou teplotou T_{hr} - viz Obr. 25. Další popis odvození je zjednodušený, úplnější verze odvození pro variantu 3D s vlivem případného proudění vody obsahuje kapitola 6.1.



Obr. 25: Zjednodušený matematický model - uvažovaná horninová vrstva, spotřebič tepla v jejím středu a zdroje po jejím obvodu.

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. [35 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.

Tato rovnice popisuje vedení tepla v případech, kdy je teplotní vodivost konstantní na vyšetřovaném objemu. Budeme-li uvažovat pouze ustálený stav a dvourozměrný prostor (=

desku jednotkové tloušťky), přejde tato rovnice pro místa v desce s diskretními zdroji tepla v bodech se souřadnicemi (X, Y) do tvaru:

$$\Delta T(X, Y) = \frac{-f(X, Y)}{a} \quad (2)$$

a pro všechna ostatní místa do tvaru:

$$\Delta T(x, y) = 0 \quad (3)$$

Stanovíme okrajovou podmínku $T_{hr} = 0$ °C pro oblast okraje desky a dále předepíšeme $T = T_{stov} = -1$ °C pro bod uprostřed desky, což je náš 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 je již možné spočítat rozložení teplotního pole. Pro řešení byla použita metoda sítí, která výtečně vyhovuje v případě obdélníkové nebo přímo čtvercové vyšetřované dvourozměrné oblasti. V algoritmu je definována proměnná $T(i, j)$ typu dvourozměrné matice neboli pole. Každý prvek pole reprezentuje hodnotu teploty v bodě o souřadnicích odpovídajících indexu prvku. Ve zjednodušené variantě lze uvažovat s konstantními vzdálenostmi mezi uzly sítě a v popisovaném speciálním případě navíc s jejími jednotkovými velikostmi, tento údaj tedy nijak řešení nekomplikuje. Do proměnné jsou uloženy počáteční hodnoty teplotního pole v bodech, pro které je stanovena Dirichletova okrajová podmínka (předepsaná hodnotou).

Pro výraz $\Delta T(x, y) = 0$ výpočet používá následující diferenční schéma:

$$\Delta T(x, y) = \text{div} \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} \doteq \frac{T(x + h, y) - 2T(x, y) + T(x - h, y)}{h^2} \quad (5)$$

tedy po úpravě a dosazení indexů (za předpokladu stejné velikosti kroku v obou osách):

$$T(i, j) = \frac{1}{4} (T(i + 1, j) + T(i - 1, j) + T(i, j + 1) + T(i, j - 1)) \quad (6)$$

Výsledný systém lineárních rovnic byl řešen pomocí iterační Gauss-Seidelovy metody. [36], [37 str. 31] Pro ilustraci je uveden ve velmi zkrácené verzi její princip:

Metoda se obecně zabývá iteračním řešením úlohy

$$A\vec{x} = \vec{b} \quad (7)$$

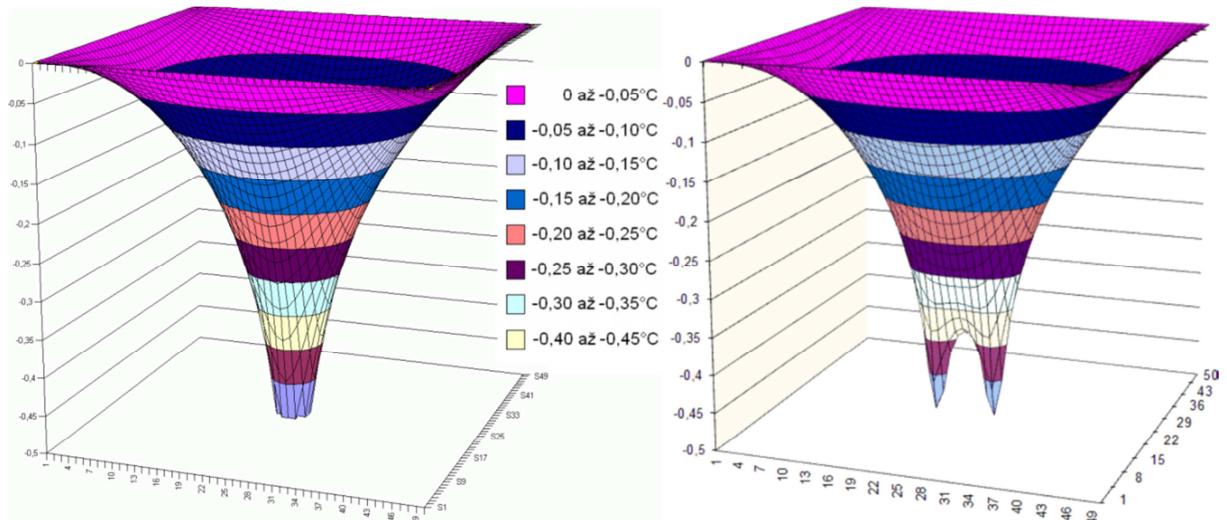
kteřá v popisovaném případě vznikne sestavením systému lineárních rovnic pro všechny hodnoty matice T aplikací diferenčního schématu a počátečních podmínek. Matice A obsahuje koeficienty, vektor \vec{x} hodnoty všech prvků matice T a vektor \vec{b} je vektor pravých stran a je obsazen hodnotami okrajových podmínek. Potom lze při znalosti hodnot vektoru \vec{x}^k v k -té iteraci spočítat hodnotu p -té komponenty vektoru \vec{x}^{k+1} v $k+1$ iteraci z následujícího vztahu:

$$x_p^{k+1} = \frac{1}{a_{pp}} \left(b_{pp} - \sum_{j < p} a_{pj} x_j^{k+1} - \sum_{j > p} a_{pj} x_j^k \right) \quad (8)$$

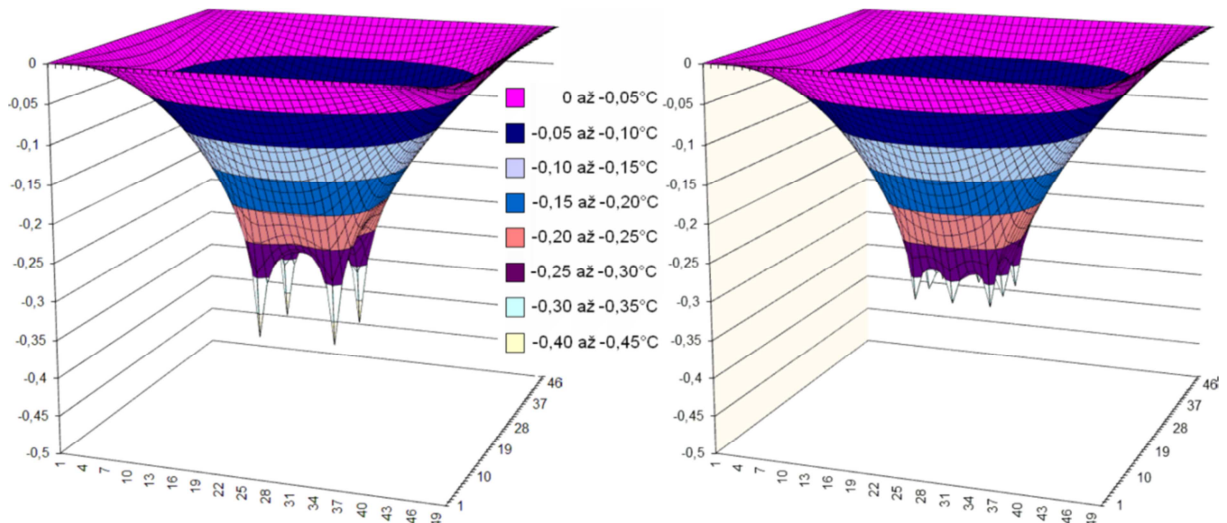
přičemž výpočet konverguje při splnění jistých kritérií - matice \mathbf{A} musí být pozitivně definitní, což je pro předmětný typ úlohy splněno vždy. Ukázalo se, že i pro vektor \vec{x} o 2500 prvcích výpočet probíhá dostatečně rychle. Výpočet byl ukončen, jakmile byla splněna podmínka shodnosti dvou po sobě jdoucích iterací, tedy $\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k$. Použitá algoritmizace metody ukládala po dokončení každé iterace vypočítané hodnoty do matice \mathbf{T} .

V popisovaném případě byl výpočet realizován makrem v Excelu, zadání a výsledné hodnoty pole teplot byly uloženy v příslušném listu sešitu. Výpočet probíhal na soudobém hardware s parametry matice 50 krát 50 prvků a reprezentací čísla typu Single (4bytová reprezentace schopná zobrazit číslo v rozsahu od -3.4028235E38 do -1.401298E-45 pro záporné hodnoty a od 1.401298E-45 do 3.4028235E38 pro kladné hodnoty [38]).

Výpočet dosáhl stupně konvergence, kdy došlo ke splnění podmínky $\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k$ v čase několika vteřin.



Obr. 26: Vypočtené pole teplot vyšetřované oblasti pro variantu 1 a 2 dle Tab. 5 (xcel).



Obr. 27: Vypočtené pole teplot vyšetřované oblasti pro variantu 4 a 8 dle Tab. 5 (xcel).

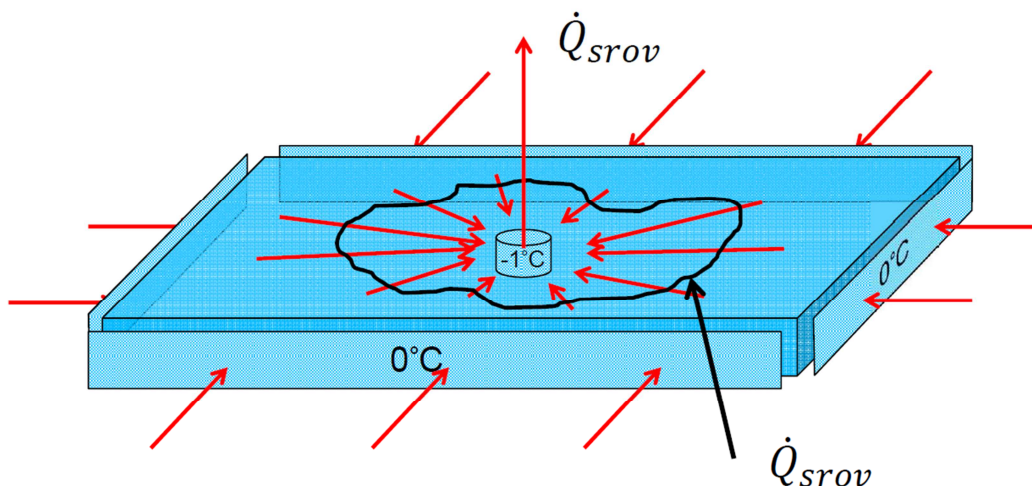
Použitý iterační algoritmus pochází z doby autorových studií na VUT FS (1988-1993) a byl výhodný z hlediska úspory paměti, například celé pole hodnot 64×64 prvků bylo možné umístit do jediného datového segmentu (pro numerickou reprezentaci typu Double 64×64 prvků * 8 bytů = 32 kilobytů, tedy polovina datového segmentu procesoru 8080/80286), což ve spojení s jednoduchostí diferenčního schématu výpočet urychlovalo. Algoritmus je také vnitřně srozumitelný, což může mít význam zejména při hledání chyb. Příklad obdržených výsledků je graficky znázorněn na Obr. 26 a Obr. 27.

Je-li známo rozložení teplotního pole ve vyšetřované oblasti, lze již s pomocí Fourierova zákona stanovit hustotu tepelného toku, který modelovaný geotermální vrt odvádí ze svého okolí:

$$\vec{q} = -\lambda * \text{grad } T \quad (9)$$

$$\dot{Q} = \int_S \vec{q} \, dS \quad (10)$$

kde \vec{q} je hustota tepelného toku a \dot{Q} je tepelný tok uvažovaným průřezem S .



Obr. 28: Tepelný tok horninovou vrstvou (červené šipky), teplo, procházející od obvodu ke středu \dot{Q}_{srov} .

Teplo, které k vrtu prochází deskou jednotkové tloušťky přes libovolnou uzavřenou křivku ohraničující oblast se simulovaným vrtem musí být rovno teplu, které tento vrt odvádí (viz Obr. 28). Spočítat jej lze integrací hustoty tepelného toku přes uzavřenou hranici (libovolná uzavřená křivka ležící ve vyšetřované oblasti a zahrnující v sobě "vrt") pomocí křivkového integrálu:

$$\dot{Q}_{srov} = \oint_{hr} -\lambda \text{grad } T \, \vec{ds} \quad (11)$$

a pro jednotkový případ tedy

$$\dot{Q}_{srov} = \oint_{hr} -\text{grad } T \, \vec{ds} \quad (12)$$

Numericky byla integrace provedena po čtvercové hranici vyšetřované oblasti, gradient T byl vyčíslen jako dopředná diference z hodnot ležících u okraje pole. Výsledkem byl tepelný výkon poskytovaný modelovaným vrtem (Tab. 6, sloupec "výsledek numer. modelu xcel")

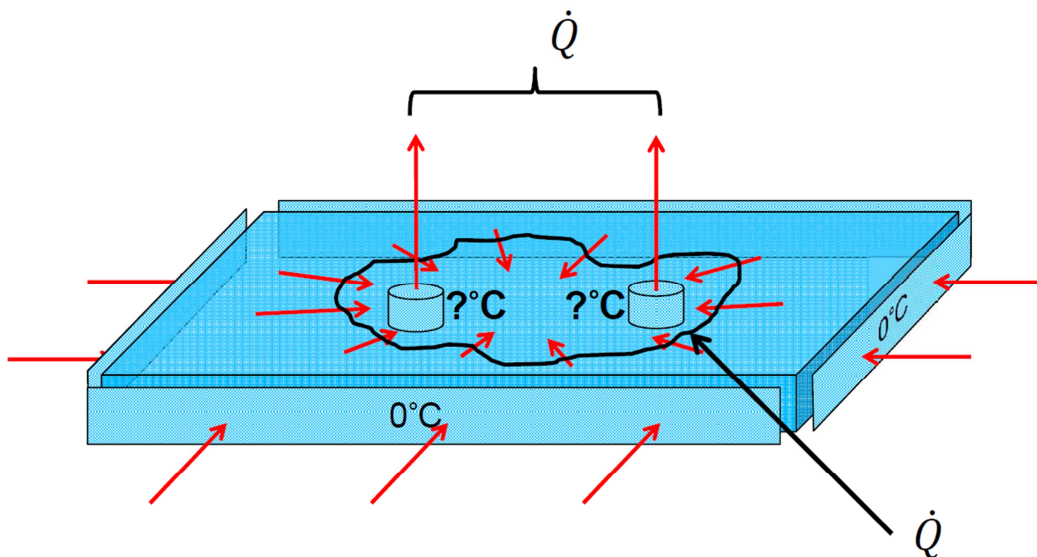
Pro připomenutí: model popisuje v podstatě přenos tepla ve 2D prostoru z okrajů desky, kde je „vytápěna“ okolím, do jejího středu, kde je umístěn náš pokusný „geotermální vrt“, který teplo z desky odvádí. Model tedy neuvažuje s

- ovlivněním teploty vrstvy mimo zkoumanou oblast,
- přestupem tepla z vrstev ležících nad a pod uvažovanou vrstvou a tedy i se zdrojem tepla ve spodních vrstvách (z hlubin Země),
- nehomogenitami tepelných vlastností zkoumané oblasti, případně s jejich ovlivněním například vodou a jejím prouděním.

Nyní tedy bylo provedeno zamýšlené srovnání: do uvažované vrstvy bylo umístěno více „vrtů“ s různou polohou (viz Obr. 29) a iteračním procesem zjištěny potřebné teploty těchto „vrtů“ tak, aby splňovaly podmínku

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{srov} \quad (13)$$

tedy vykazovaly stejný odběr energie jako původně jediný srovnávací vrt. [24] Výsledkem tedy byla obdržená nová teplota vrtů pro každý takovýto konkrétní případ. Polohy vrtů v jednotlivých případech byly voleny tak, aby simulovaly případ korektně vrtaného pole geotermálních energetických vrtů a případ nekorektně vrtaného pole - tedy případ, kdy se polohy jednotlivých vrtů odchylují od zamýšleného (obvykle pravidelného) obrazce.



Obr. 29: Horninová vrstva s obecným počtem a polohou vrtů.

Geometrické charakteristiky vyšetřovaných variant jsou uvedeny v Tab. 5, získané výsledky jsou v Tab. 6.

Tab. 5: Geometrické charakteristiky jednotlivých vyšetřovaných případů.

Var.	Počet vrtů	souřadnice vrtů (X, Y)	soubor s přepočtem
1	1	(25,25)	vrt2d_jede_teplota_1
2	2	(25,21), (25,29)	vrt2d_jede_teplota_2__
4	4	(20,20), (20,30), (30,20), (30,30)	vrt2d_jede_teplota_4_
4a	4 defor.	deformovaná geometrie vrtů oproti variantě 4 (20,20), (22,27), (30,20), (30,30)	vrt2d_jede_teplota_4_defor_
8	8	(20,20), (20,25), (20,30), (25,20), (25,30), (30,20), (30,25), (30,30)	vrt2d_jede_teplota_8_
8a	8	jiná geometrie oproti variantě 8 (19,19), (19,25), (19,31), (25,19), (25,31), (31,19), (31,25), (31,31)	vrt2d_jede_teplota_8a_
8b	8 defor.	deformovaná geometrie vrtů oproti variantě 8a (19,19), (19,25), (19,31), (25,19), (25,31), (31,19), (31,25), (29,30)	vrt2d_jede_teplota_8a_defor_

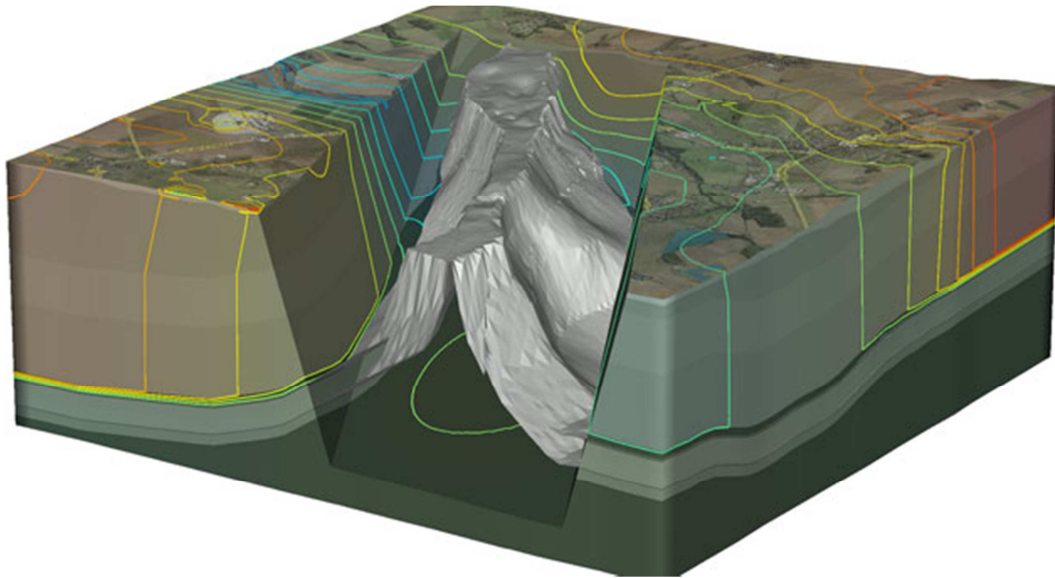
Údaje v Tab. 6 ukazují, že nejmenší rozdíl teplot mezi masivem a vrty je pro případy s více vrty a rovnoměrně rozděleným odběrem. Takovéto systémy vrtů mají pak nejmenší tzv. tepelný odpor, což je nejvýhodnější pro získávání vody s co nejvyšší teplotou. Dále je z tabulky také vidět, že porušení geometrie vrtů způsobuje zvýšení nerovnoměrností a zvýšení tepelného odporu systému vrtů, tedy zhoršení parametrů systému.

Tab. 6: Výsledky numerické simulace vedení tepla v poli vrtů.

Variant a	Počet vrtů	Rozdíl teploty na vnější hranici 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

4.2 Ověření výsledků modelu pomocí softwaru FEFLOW

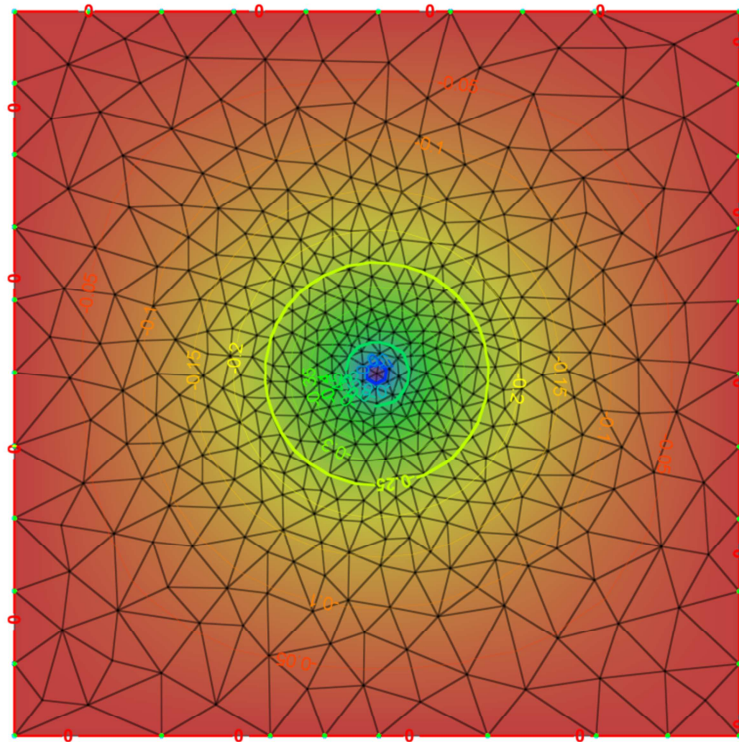
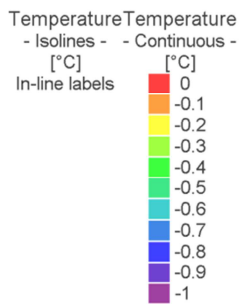
Ústav geotechniky je vlastníkem licence na software německé firmy DGI-WASY GmbH, německé pobočky DHI Group. Jedná se o profesionální sw balíček určený pro modelování toku kapalin a transportu rozpuštěných a rozptýlených látek a také tepla v podloží. Je celosvětově používán konzultačními odbornými firmami, výzkumnými institucemi, vysokými školami a vládními organizacemi. Je možné s ním simulovat aplikace lokálního měřítka i složité situace na úrovni státních územních celků. [39] Příklad vizualizace úlohy řešené v prostředí FEFLOW je na Obr. 30.



Obr. 30: Příklad vizualizace řešené úlohy v prostředí FEFLOW. [39]

Pomocí tohoto software byla ověřována správnost výsledků zjednodušeného numerického modelu. Výpočet metodou sítí pro úlohy typu výpočtu potenciálu (v tomto případě teploty) je dle autorových zkušeností efektivní. Oproti tomu metoda konečných prvků užívaná ve FEFLOW umožní pohodlně a přesně simulovat tvarovou hranici oblasti.

Pro ověření byla definována úloha obdobná úlohám, které byly řešeny zjednodušeným numerickým modelem. Jednalo se o 2D úlohu na desce o rozměru 50x50 m s jednotkovými parametry. Po obvodu byla předepsána Dirichletova okrajová podmínka hodnotou teploty 0°C, na místě uvažovaného vrtu byla předepsána stejná teplota jako v ověřované variantě. Výsledek výpočtu poskytl hodnotu tepelného toku přes hranici oblasti. Jeho hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6, sloupec "výsledek FEFLOW". Patrnou shodu výsledků lze považovat za příznivou. Vypočtené pole hodnot teplot pro variantu 1 dle Tab. 5 ukazuje Obr. 31.



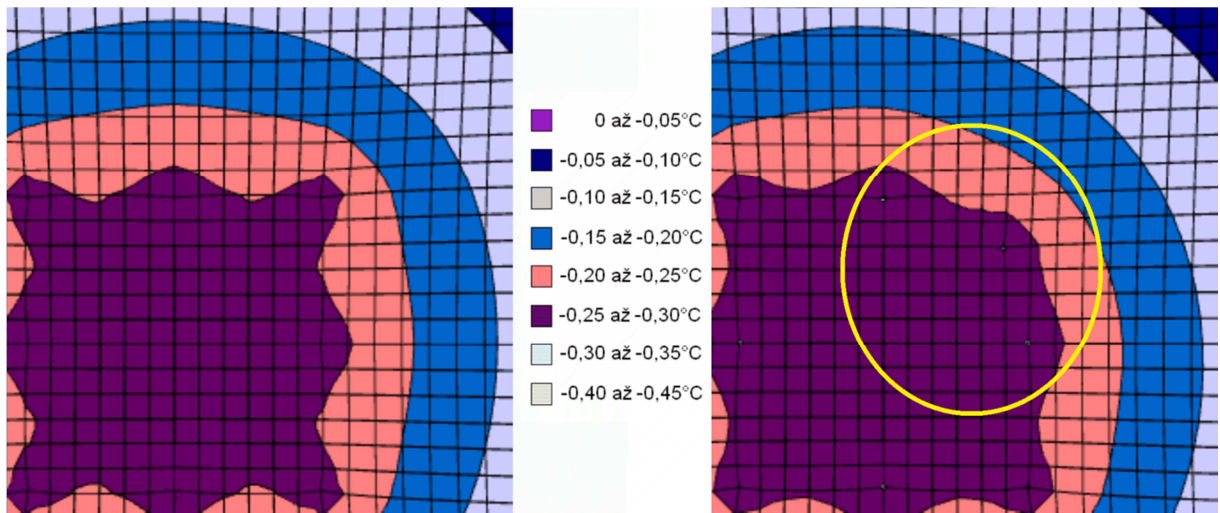
Y
 X
 FEFLOW (R)

37 nodes selected
 0 [d]

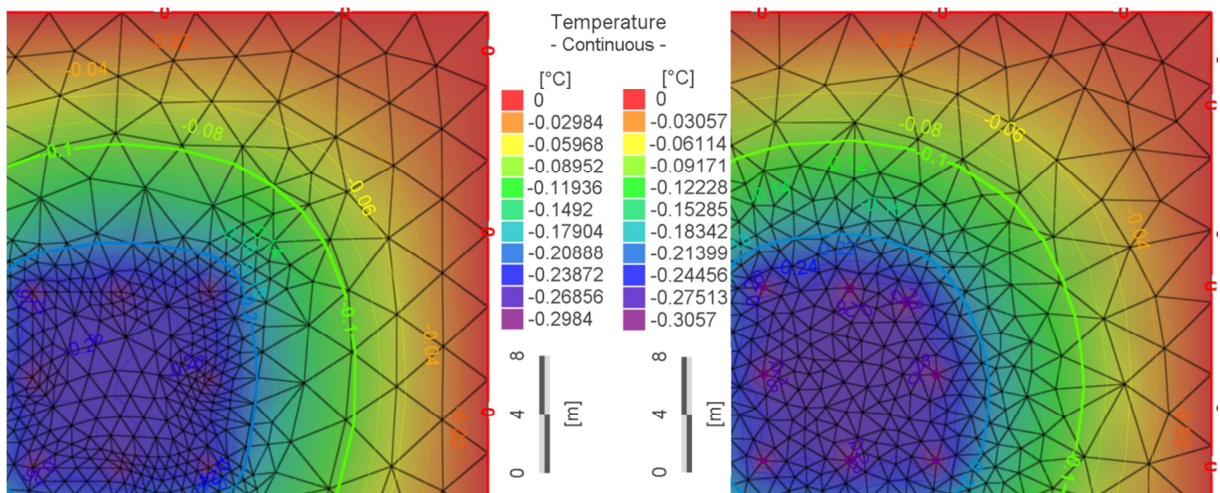
0 4 8
 [m]

Obr. 31: Vypočtené pole teplot vyšetřované oblasti pro variantu 1 dle Tab. 5 (FEFLOW).

Sestaveným modelem geotermálního vrtu byly vyšetřovány varianty systému vrtů, ve kterých jsou pozice vrtů nepravidelné. Tento výpočet měl prokázat zvýšení tepelného odporu systému u nepravidelně umístěných vrtů, což se také potvrdilo. Na Obr. 32 (varianta FEFLOW je na Obr. 33) je vidět zvětšení oblastí s nejnižší teplotou v případě nepravidelně umístěného vrtu, numericky to zřetelně ukazuje Tab. 6.



Obr. 32: Xcel - Vypočtené pole teplot pro varianty 8a a 8b dle Tab. 5, pohled shora odhaluje zřetelně zdeformované pole teplot způsobené odchylkou polohy jednoho vrtu ve druhém případě.



Obr. 33: FEFLOW - Vypočtené pole teplot pro varianty 8a a 8b dle Tab. 5, pohled shora odhaluje zřetelně zdeformované pole teplot způsobené odchylkou polohy jednoho vrtu ve druhém případě.

4.3 Závěr

Skutečná geometrie systému geotermálních vrtů se často liší od požadované. Vytvořený zjednodušený matematický model měl sloužit k demonstraci zhoršení vlastností systému vrtů s porušeným geometrickým uspořádáním. Pro zjednodušení uvažoval pouze s 2D prostorem. Ověření výsledků toto modelu renomovaným softwarovým systémem pro modelování přenosu tepla v podloží prokázalo ve zkoumaných případech dobrou shodu. Na základě tohoto faktu by bylo možné uvažovat o případném dalším rozvinutí původně jednoduché demonstrační výpočetní pomůcky do prakticky využitelné aplikace.

5 Vývoj speciálního měřicího přístroje k určení geometrie geotermálního vrtu

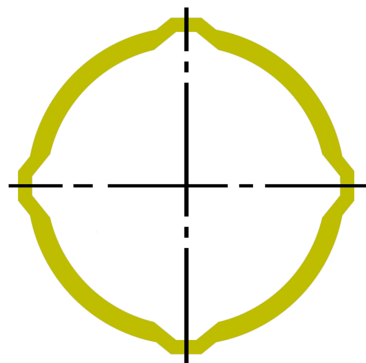
Kapitola 2.6 Reálné pole geotermálních vrtů rozebírá důvody obtíží při stanovení geometrického tvaru geotermálního energetického vrtu. Uvádí, že tomu brání důvody finanční a technologické, hotový vrt je třeba okamžitě osadit výměníkem. Současně však také upozorňuje na důležitost informací o tvaru vrtu. Z výše uvedeného vznikl nápad pokusit se proměřit tvar existujícího vrtu až po jeho vystrojení. Při prvotním náhledu na problém se jevilo nezbytné provést měření trubkou instalovaného výměníku. V ČR běžně používané trubky jsou z vysokomolekulárního polyetylenu (HDPE) rozměru 32x3,2mm. Tento rozměr se běžně používá i v Německu a Rakousku a pravděpodobně při většině instalací v Evropě. Vyskytují se však i drobné odchylky od výše uvedeného rozměru, jak dokazuje Obr. 34 – trubka použitá pro zkušební polygon na schodišti VUT FAST. Autor práce byl obeznámen s technikou měření příčných posuvů zeminového podloží horninového masivu inklinometrem. Prvotní nastínění problematiky při konzultaci s tehdejšími školitelem doc. RNDr. Pavlem Pospíšilem, Ph.D. také směřovalo k této technice. Autor se proto nadále zaměřil na rozbor problematiky přístroje s funkcí obdobnou inklinometru, avšak rozměrově uzpůsobeného k měření vnitřkem trubice výměníku. V porovnání s běžným inklinometrem by takový přístroj mohl mít výrazně nižší přesnost, neboť výsledkem měření by nebyla diference oproti předchozím měřicím cyklům, ale prostá pozice. Pro ověření metodiky bylo uvažováno s přesností určení půdorysné polohy řádově 1 m na 100 m hloubky výměníku.



Obr. 34: Trubka tepelného výměníku – detailní foto rozměru (foto autor).

5.1 Měření inklinometrem

Tato metoda se používá k určení příčných posuvů zeminy v blízkosti například stavebních jam. V zájmové oblasti se vyhotoví vrt (obvykle prakticky svislý). Do tohoto vrtu se spustí kalibrovaná speciální pažnice a zaleje se zálivkou. Tato pažnice má vnitřní povrch uzpůsobený k přesnému vedení inklinometrické sondy (Obr. 35). Je vyrobena jako tažená plastová trubice s vodícími drážkami, zajišťujícími správnou orientaci sondy podél osy trubice. Běžný rozsah průměrů je cca 50-90 mm [40].



Obr. 35: Vlevo zakončení inklinometrické pažnice s částečně vloženou sondou, vpravo průřez pažnice [40].

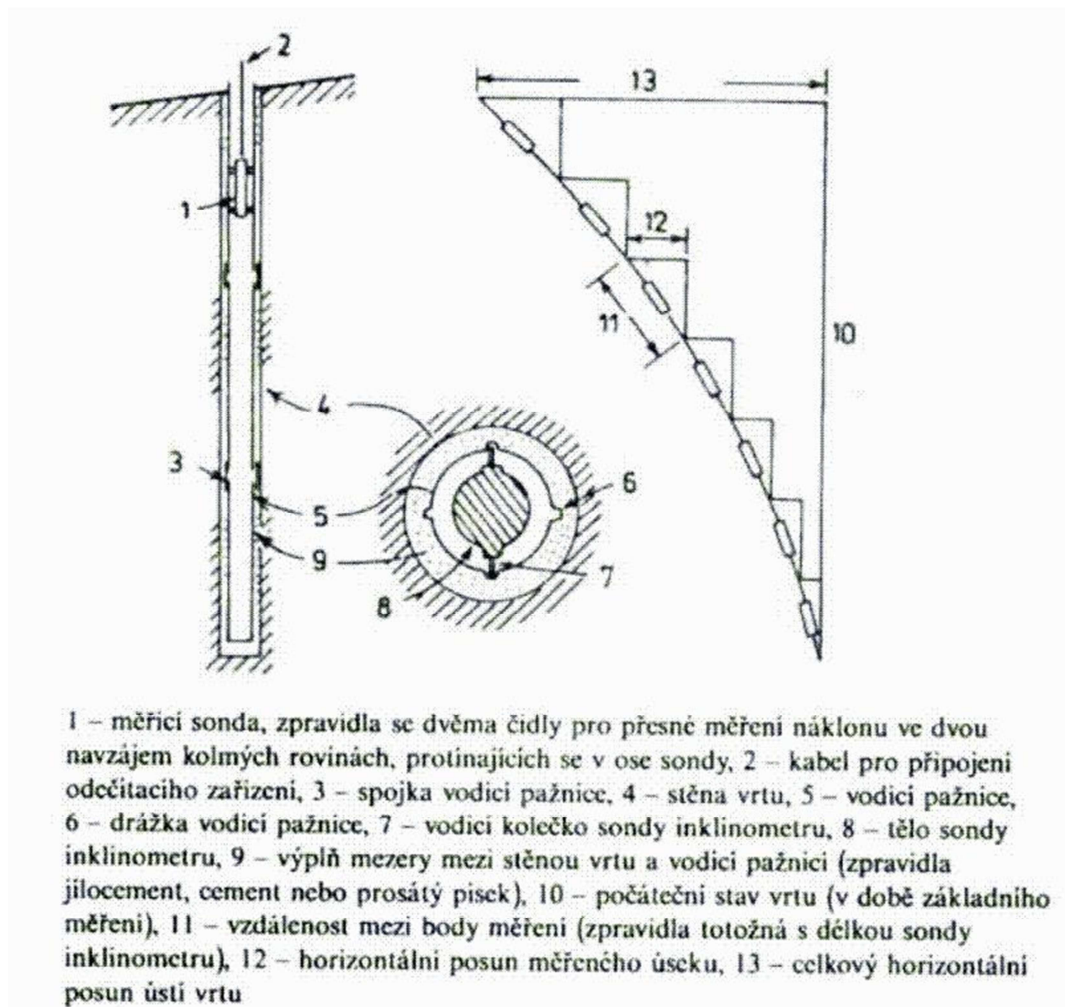
Srdcem sondy je snímač, schopný změřit velmi přesně úhlovou odchylku vektoru zrychlení od geometrické osy snímače. Protože uvažujeme výlučně o použití na planetě Zemi, je tento snímač nepřetržitě vystaven působení zemské gravitace na povrchu planety. Toto působení je možné si zhruba představit jako vektor zrychlení stálé velikosti, působící směrem ke středu planety. Dotčený snímač tedy je schopen určit svoji úhlovou odchylku (natočení) od směru svisle dolů. (takovéto snímače se také někdy označují názvem "elektronická olovnice"). Sonda má tvar dlouhé tyče, senzor je orientován tak, aby poskytoval údaj o úklonu tělesa sondy od svislice. Dále je sonda vybavena vedením s pojezdovými kladkami, zajišťujícím přesné vedení sondy v drážkách pažnice bez vůlí a současně lehký posun sondy ve směru osy pažnice – viz Obr. 36, detail vedení sondy je dobře vidět na Obr. 35 vlevo.



Obr. 36: Přesný inklinometr – buben s kabelem, ovládací jednotka a v popředí sonda [41].

V horní části sondy je přípojka na komunikační kabel. Kabel má na svém povrchu značky v půlmetrových odstupech a druhým koncem je připojený k zobrazovací a záznamové jednotce.

Při měření je sonda postupně spouštěna na kabelu pažnicí po půlmetrových délkových odstupech. Pro určení správných vzdáleností slouží značky na povrchu kabelu. Vždy v každé poloze sondy se provede odečet a uložení změřené hodnoty - odklonu od svislého směru. Vzhledem k tomu, že sonda je pevně vedena v pažnici, považuje se tento údaj za odklon osy pažnice.



Obr. 37: Princip použití přesného inklinometru [42].

Naměřený soubor dat se uloží. Jedná se v podstatě o soubor směrnic osy pažnice v měřených bodech spolu s odpovídajícími vzdálenostmi měřených bodů od konce pažnice. Integrací těchto údajů je tedy možné stanovit křivku průběhu osy pažnice podél měřené vzdálenosti – schematicky viz Obr. 37.

Předpokládá se, že v průběhu času dochází k příčným posuvům ve vrstvách zeminy, způsobených blízkostí stavební činnosti – například okraj stavební jámy se může zvolna sesouvat. To podle předpokladu způsobí pokřivení původního průběhu osy pažnice procházející vyšetřovanými vrstvami. Po stanovené době (například po 1 týdnu) se provede výše popsání inklinometrické měření znova. Od získané druhé křivky průběhu osy pažnice se odečte první křivka a rozdíl je průběh příčného posunutí (v případě svislé pažnice) vůči výchozímu stavu. (Poznámka: Existují i inklinometry pro vodorovná měření.)

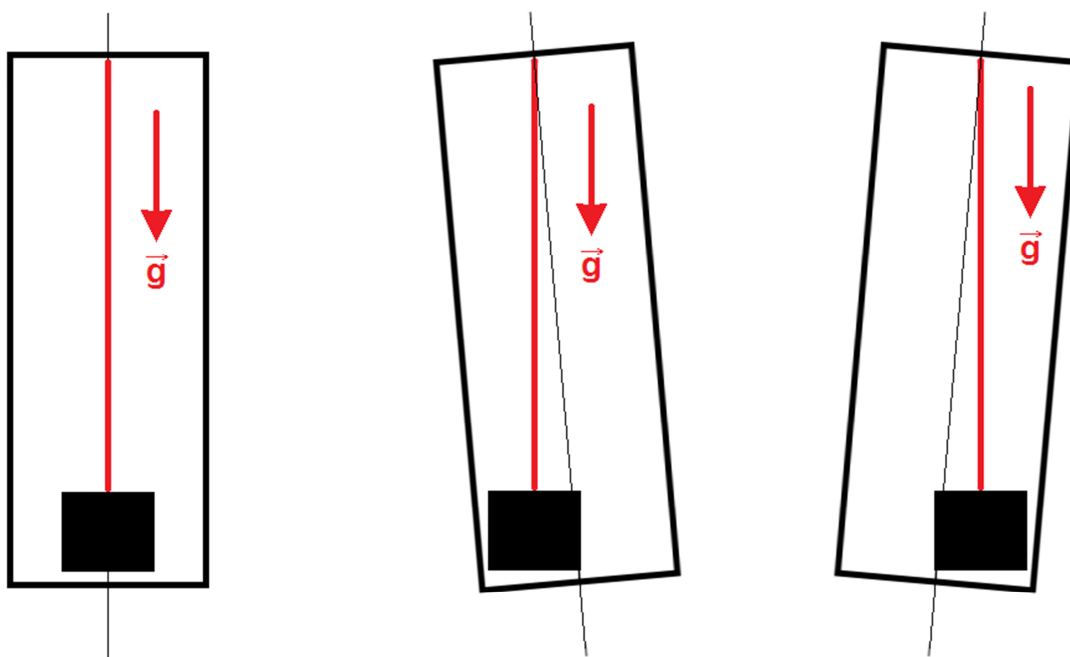
Provedením rešerše se zjistilo, že existují obdobné přístroje, určené pro měření kolmosti vrtů – viz kapitola 2.7 Možnosti určení geometrie geotermálního vrtu. Tyto přístroje však počítají s volným průřezem vrtu a není tedy možné použít je ve vrtu vystrojeném tepelným výměníkem. Nejmenší průměr takového přístroje je podle provedené rešerše 35 mm. Použití v trubicích tepelného výměníku s vnitřním průměrem pro rozměr 32 x 3,2 mm = 25,6 mm je tedy nemožné.

Po provedených rešeršních činnostech byly tedy prověřeny možnosti, které poskytovala cesta konstrukce vlastního experimentálního snímače určeného k činnosti uvnitř trubky výměníku.

5.2 Rané stádium návrhu experimentálního specializovaného inklinometru

Prvotní idea spočívala v tom, že specializovaná sonda (s funkcí podobnou jako inklinometrická sonda) přesně vedená v trubce výměníku poskytne údaje o své odchylce od svislice a o kurzu této odchylky. Postupným zasouváním sondy bude pořízen soubor těchto údajů z bodů podél trasy sondy, z nichž bude možné integrací přibližně stanovit geometrický tvar osy trubky výměníku. Uvažovaná přesnost přístroje byla stanovena na hodnotu řádově metry půdorysně na 100 m hloubky výměníku.

Základním problémem při návrhu konstrukce sondy bylo určení vhodné metody stanovení odchylky osy sondy od vektoru působícího zrychlení tak, aby tato metoda byla realizovatelná v prostoru daném vnitřním průměrem trubky výměníku, tedy zhruba 26 mm. Původně se uvažovalo o konstrukci obdoby obyčejné olovnice v provedení rozměrově vhodném pro zamýšlený snímač. Mělo jít o tvarované závaží na lanku, visící uvnitř tělesa sondy. Určením úhlu, který by svíralo lanko závaží vůči rámu snímače, by bylo možné stanovit odchylku osy rámu od svislice – viz Obr. 38.



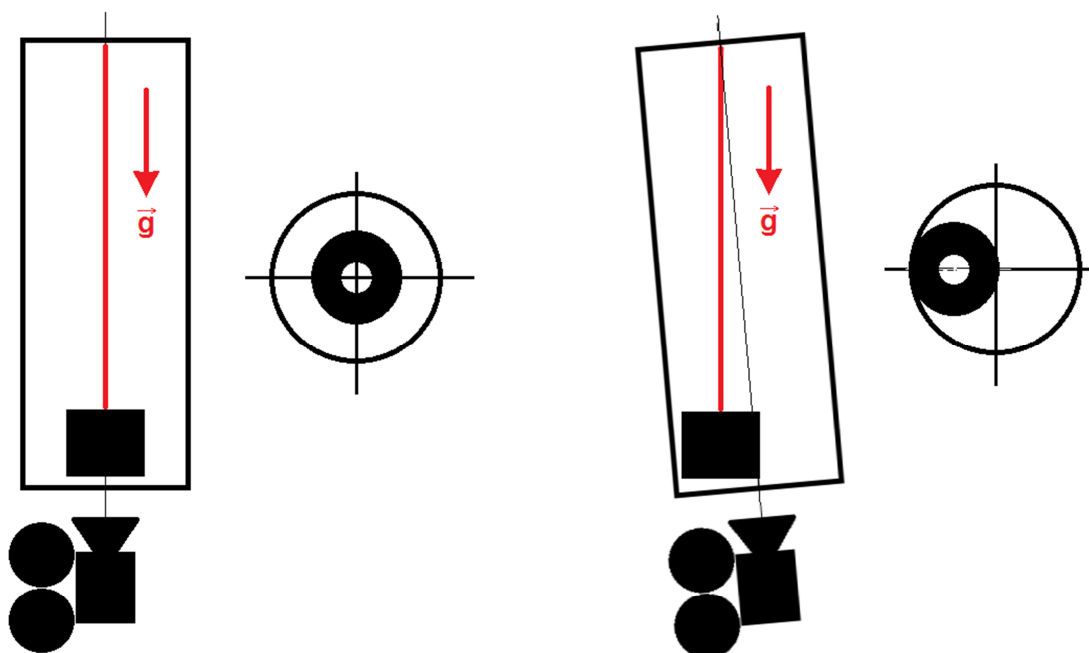
Obr. 38: Schéma sondy vybavené závažíčkem na lanku - kyvadlem.

Z charakteru řešené úlohy vyplývalo, že zajímavý rozsah měření je svislice a oblast odchylky několika stupňů od ní, uvažovaný snímač by tedy zdaleka nemusel být všesměrový. Dostačoval by pravděpodobně rozsah několika stupňů. Závaží by tedy mohlo viset v tělese snímače podélného válcového tvaru. Toto těleso by bylo vedeno ve výměňkové trubce tak, aby osa tělesa byla rovnoběžná s osou trubky výměníku. Odchylky osy trubky výměníku od svislice by způsobovaly odpovídající výchylky závažíčka. Tyto výchylky by se snímaly - uvažovalo se o optickém snímání - a převáděly na elektrický signál, který by se dále zpracoval na digitální údaj a následně uložil do elektronické paměti. Uvažovalo se o dvou možných systémech snímání:

- optické snímání polohy barevně zvýrazněného bodu na závažíčku kamerou, snímající ve směru vzhůru zespod snímače,
- optické měření mezery mezi závažíčkem a pláštěm sondy.

Oba zmíněné principy se zdály být realizovatelné, ovšem ne jednoduše. Následující dva odstavce se podrobněji věnují oběma možnostem.

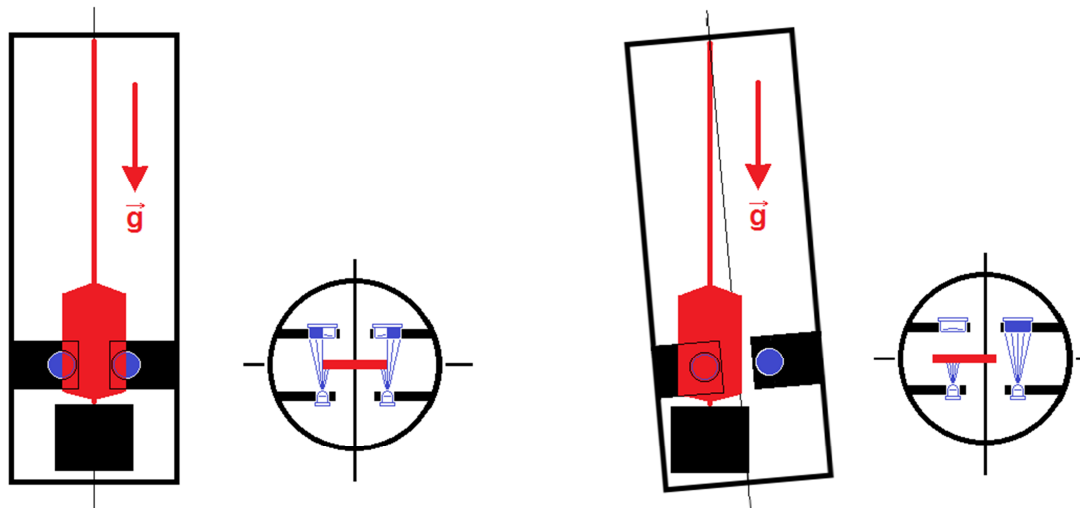
První princip (snímání polohy kamerou) možná nevypadá jednoduše, avšak zdání v tomto případě může klamat. Z mechanického hlediska by takový snímač obnášel tuhý rám (trubku – těleso snímače) se zavěšeným závažím. Pravděpodobně by bylo výhodné jako závěsu použít pružnou tyčku místo lanka či provázku, zamezilo by se tím nevhodné rotaci závažíčka kolem podélné osy. Na spodní část rámu by byla připojena komerčně dostupná digitální kamera. Ideově se mělo jednat o model používaný v mobilních telefonech, případně v počítačových myších. Tím v podstatě výčet podstatných mechanických částí snímače končí. Kamera by poskytovala digitální elektronický signál, jehož zpracování by pravděpodobně obstaral počítač, ať již PC (přenos signálu kabelem), nebo specializovaný počítač umístěný v tělese sondy. Dále tento princip nebyl rozpracováván. Jeho podstata je zachycena na Obr. 39.



Obr. 39: Snímání výchylky závažíčka – kyvadla – pomocí kamery.

Druhý zvažovaný princip v podstatě nahrazoval snímání polohy závažíčka kamerou jiným principem. Mělo jít o měření výchylky závěsu se závažíčkem pomocí světelné závory - principu, který se masově používal například u starších počítačových myší (s kuličkou) a je

dostatečně prověřený. Princip předpokládá použití dvou proporcionálních světelných závor zapojených do můstku. Clonka upevněná na kyvadélku by v závislosti na výchylce kyvadélka jeden snímač zastiňovala a na druhý naopak propouštěla více světla (vše je samozřejmě vysvětlováno pouze pro jednu osu, snímač by měl snímat ve dvou navzájem kolmých osách). Tento princip detailněji ilustruje Obr. 40.



Obr. 40: Snímání výchylky závažíčka – kyvadla – pomocí optických snímačů (světelná závora) zapojených do můstku.

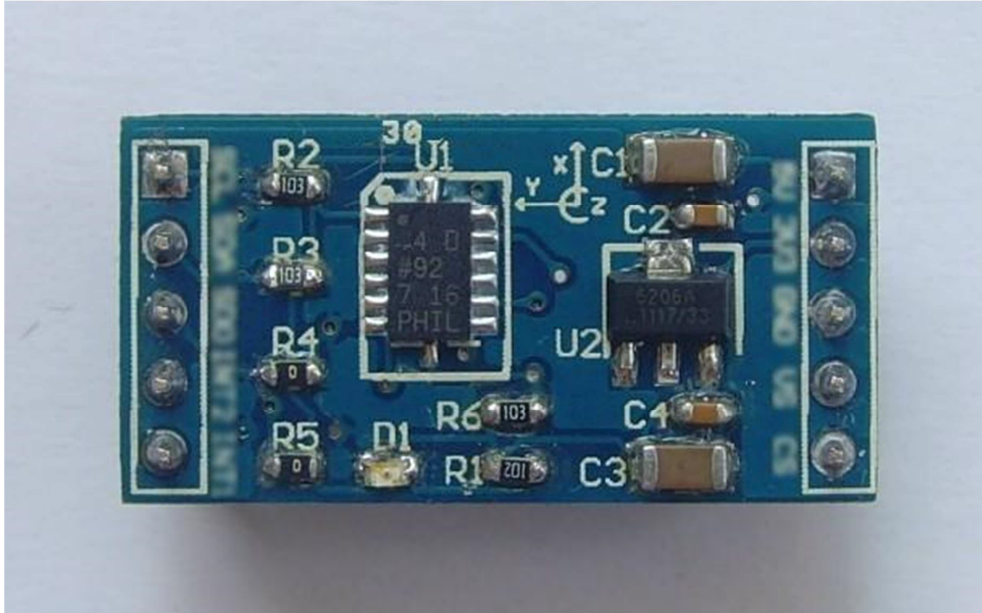
Tehdejší školitel autora práce při diskusi o problému se v žertu vyjádřil, že nejlepším řešením by bylo spuštění "chytrého" telefonu přímo do trubky výměníku, kdyby se tam ovšem rozměrově vešel. Školitel měl na mysli fakt, že tyto "chytré" telefony jsou často vybaveny rozsáhlou sadou snímačů fyzikálních veličin. Autor práce měl dřívější zkušenosti se skupinou elektronických snímačů označovanou jako MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), konkrétně s gyroskopickými jednoosými snímači úhlové rychlosti. Takové součástky se používají právě v oněch "chytrých" telefonech. Poznámka školitele autora podnítila k prozkoumání třetí cesty ke konstrukci experimentálního inklinometru, a sice s využitím komerčně dostupných MEMS snímačů fyzikálních veličin. Tab. 7 uvádí srovnání provedené za účelem stanovení relativní složitosti konstrukce snímače, jasně nejjednodušší vychází konstrukce s MEMS snímačem.

Tab. 7: Pořadí uvažovaných principů snímání z hlediska složitosti realizace.

Princip	mechanika snímače	skóre	elektronika snímače	skóre	Celk. skóre
snímání kamerou	závažíčko, závěs, rám, uchycení kamery	2	zpracování signálu z kamery, hlubší rozbor neproveden	3	5
snímání světelnou závorou	závažíčko, závěs, clonky upevněné na závěsu, rám, uchycení snímačů	3	zpracování analogového signálu ze světelných závor	2	5
MEMS snímač	prakticky nic, elektronická část zajistí též upevnění součástky - snímače	1	zpracování digitálního výstupu snímače	1	2

5.3 Návrh a konstrukce experimentálního inklinometru s MEMS snímači

MEMS snímače jsou obvykle elektronické součástky, integrující na křemíkovém čipu elektronické obvody s mikro-mechanickými prvky, vytvořenými výrobními metodami a postupy, které mají původ ve výrobě integrovaných obvodů. Z jednoduchých snímačů se jedná zejména o akcelerometry a gyroskopy [43].



Obr. 41: Tříosý akcelerometr Analog Devices na tištěném spoji.

Charakter řešené úlohy předpokládá použití akcelerometru neboli snímače zrychlení. Zjednodušeně řečeno mělo jít o obdobu kyvadélka z předchozí kapitoly. Snímač by měřil složku zrychlení kolmou na osu inklinometru, vzhledem k tomu, že celé měření se mělo odehrávat v tíhovém poli Země a tedy za působení gravitačního zrychlení \vec{g} , bylo by možné naměřený údaj interpretovat jako odchylku osy inklinometru od svislice.

Již letný průzkum internetových zdrojů odhalil, že existuje velké množství MEMS součástek - senzorů vhodných pro zamýšlenou funkci. Provedená detailnější rešerše tento fakt potvrdila, navíc vyjevila, že některé z těchto součástek jsou jednoduše dostupné, relativně laciné a přesnost řady z nich pravděpodobně přesahuje možnosti konstrukcí popisovaných v předcházející kapitole. Výstupní signál takových součástek - senzorů se zdál jednoduše zpracovatelný. Tyto faktory přesvědčily autora, aby opustil návrhy popsané dříve a soustředil se na konstrukci experimentálního inklinometru s využitím elektronických MEMS - snímačů.

Zásadním faktorem při volbě typu snímače byla vyhovující přesnost měření při jednoduché dostupnosti součástky. Pro první pokusy s touto technikou nakonec autor zvolil MEMS akcelerometr firmy Analog Devices. Tab. 8 uvádí základní parametry senzoru. Rozlišení 256 b/g znamená, že součástka dokáže rozlišit $0,224^\circ$, což představuje pro případ použití ve speciálním inklinometru rozlišení 0,39 m na 100 m hloubky. Tato rozlišovací schopnost byla tedy pro začátek plně dostačující, dále bylo výhodné, že součástka byla již připevněná a elektricky připojená k tištěnému spoji určenému pro práci při vývoji aplikací, což zajišťovalo jednoduchou manipulaci a vyřešenou napájecí stránku snímače. Celý tištěný spoj se součástkou a příslušnými pomocnými obvody, který nakonec autor zvolil pro první fázi pokusů, je na Obr. 41.

Tab. 8: Výběr z parametrů senzoru Analog Devices [44].

Parametr (výběr)	Hodnota (typicky)
Rozsah měření (uživatelsky nastavitelný)	± 2 g, ± 8 g
Nelinearita (z rozsahu)	$\pm 0,5$ %
Chyba vzájemné kolmosti os	$\pm 0,2$ °
Rozlišení snímače	max 12 bit
Citlivost X, Y a Z osy při rozsahu ± 2 g	256 bit/g

5.4 Směrová orientace sondy - zvažované principy

Dalším problémem, původně považovaným za lehčeji řešitelný, bylo určení směrové orientace sondy ve vrtu. Inklinometrická sonda je ve vrtu vedena již výše zmíněnou pažnicí s vodícími drážkami. Trubka tepelného výměníku geotermálního vrtu však žádné takové drážky nemá. Proto je nezbytné vybavit sondu systémem, který by umožňoval odečtení její orientace vůči absolutním souřadnicím a stanovit tak kurz odchylky osy trubky výměníku od svislice. Byly zvažovány tři principy činnosti:

- orientace relativní (například s využitím gyroskopického snímače),
- orientace relativní s využitím kinematické vazby závěsu (řetěz),
- orientace absolutní - určení severu vyhodnocením magnetických siločár Země.

První možnost nabízela některé výhody, především autonomii sondy - ta by využívala pouze svých vnitřních zařízení. Oproti určování magnetického severu Země by například nehrály roli magnetické vlastnosti materiálu pouzdra sondy, závěsného kabelu a podobně. Bohužel spolehlivý jednoduchý systém nebyl dostupný. Obecně rozšířená idea o dostatečnosti gyroskopických snímačů pro určení prostorových úhlů je bohužel značně zjednodušená. Údaj gyroskopického snímače by bylo nutné integrovat dle času, neboť tento měří úhlovou rychlost. Teprve pak by bylo možné obdržet údaj o hodnotě natočení (úhlu) v prostoru. Jakýkoli mechanický gyroskopický snímač je ovšem zatížen nejistotou určení, neboť hodnota po integraci prezentovaná jako úhel driftuje vlivem kumulujících se nepřesností při integraci signálu. Například [33] uvádí jako chybu orientace (natočení) inerciálního navigačního systému slušné kvality v řádu desetin stupně za hodinu, chybu pozice (poloha) v řádu jedné námořní míle za hodinu. Navíc při pootočení rámu setrvačnický gyroskop nezachovává přesně rovinu rotace. Lepší situace by zřejmě byla při použití integrovaných MEMS gyroskopů, neboť tyto součástky jsou velice přesné.

Za všech okolností však zůstává problém správné integrace měřené hodnoty a také správně určené počáteční hodnoty. Při hloubce vrtu řekněme 100 m by měření inklinace vrtu mohlo trvat desítky minut, autorovi se (bez bližšího rozboru problematiky) jevila možnost zachování přesnosti údaje o prostorovém natočení sondy po uvedené dobu v řádech jednotek úhlových stupňů jako přinejmenším obtížně dosažitelná.

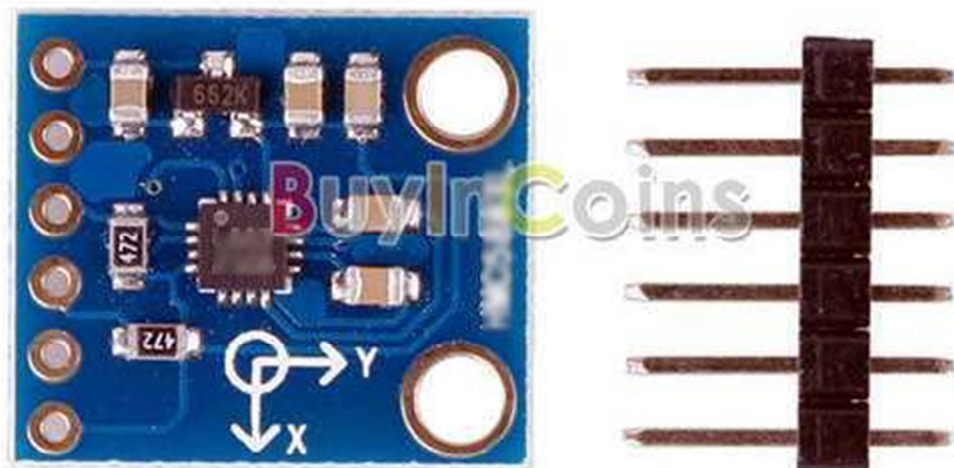
Některé inklinometrické sondy do vrtu jsou pro stanovení půdorysného směru sklonu vrtu (azimutu) vybavené speciálním závěsným článkovým řetězem, který neumožňuje otáčení sondy vůči uchycení sondy na povrchu země. Takovýto závěsný systém pak velice elegantně umožňuje stanovit natočení sondy v půdorysné rovině podle natočení závěsu na povrchu, což pohodlně provede operátor. Pro délky vrtů v řádech stovek metrů by však tento závěs

vycházel značně cenově náročný, nehledě na možné odchylky vznikající kumulací nepřesností jednotlivých článků závěsného řetězu. Příklad popisovaného způsobu zavěšení sondy je vidět na Obr. 19.

Po zvážení výše uvedených možností se autor práce soustředil na stanovení půdorysného natočení sondy pomocí elektronického magnetického kompasu.

5.5 Elektronický magnetický kompas jako zdroj informace o azimutu

V elektronických inklinometrech určených do vrtu se často využívají snímače magnetického pole jako zdroje vstupních informací. Pro použití ve speciálním inklinometru byl zvolen magnetický senzor na podobném modulu jako akcelerometr – viz Obr. 42.



Obr. 42: Třiosý magnetometr Honeywell na tištěném spoji.

Zobrazený modul využívá jako snímače integrovaný obvod firmy Honeywell. Toto zařízení poskytovalo možnost jednoduchého stanovení natočení celé sondy vůči magnetickému poli Země a to s možností odečtu ve všech třech osách [45]. Jeho základní parametry uvádí Tab. 9.

Tab. 9: Výběr z parametrů senzoru Honeywell [45].

Parametr (výběr)	Hodnota (typicky)
Rozsah měření (nastavitelný)	$\pm 1,9$ až $\pm 6,9$ gauss
Nelinearita (z rozsahu $\pm 2,1$ gauss)	$\pm 0,2$ %
Frekvence opakování měření	52 Hz
Rozlišení při napájení 3,0 V	0,012 gauss
Rozlišení digitálního rozhraní	12 bit

Snímač Honeywell dosahuje při odečtech v jednotlivých osách přesnosti dostačující pro určení přesnosti polohy magnetického severu $1 - 2^\circ$ [45], což bylo na úrovni přesnosti

dosažitelné akcelerometrem. Oba snímače tedy vykazovaly, co se týče přesnosti, obdobné parametry.

Údaj magnetického kompasu je možné ovlivnit blízkými feromagnetickými tělesy (magnety, železo, minerály obsahující železo - ferrity). Výskyt takových materiálů v zásadě může pocházet ze dvou, respektive ze tří zdrojů:

- přímo ze sondy (použití feromagnetických materiálů při její konstrukci),
- z okolí sondy (feromagnetické podloží)
- okolí sondy, umělé (člověkem způsobené) vlivy.

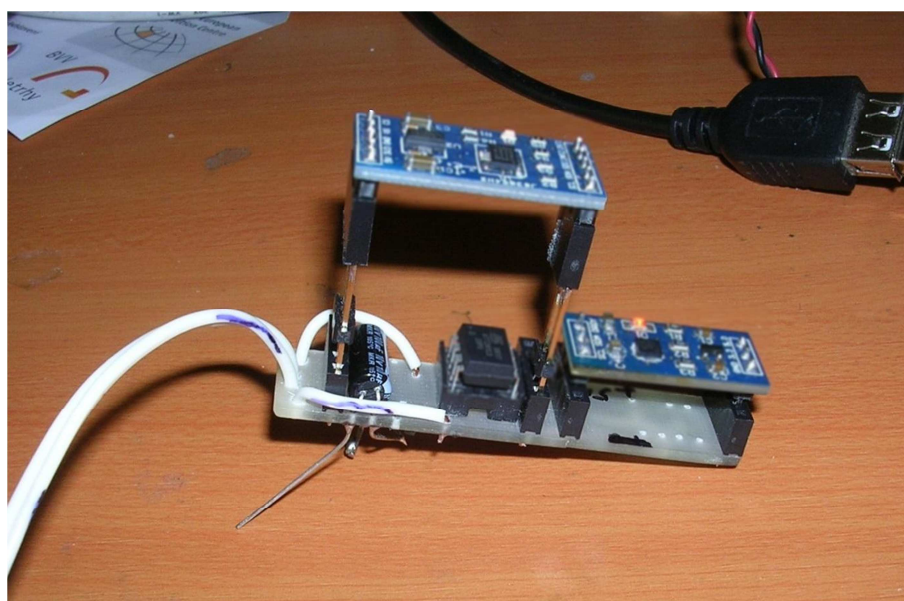
Z důvodu eliminace prvního vlivu bylo nakonec celé těleso sondy vyrobené z nemagnetických materiálů. Jako závěsu je nyní používáno nerezové lanko. Výjimku ovšem tvoří například vývody použitých integrovaných obvodů – zde je výrobcem použita ocel a volba materiálů při konstrukci elektronických součástí je současně mimo rámec ovlivnění autora sondy. Nakonec nezbylo než se s těmito vlivy smířit a přinejmenším v první fázi ověřování zařízení je považovat za nepodstatné.

Ovlivnění feromagnetickými materiály uloženými nehomogenně v blízkosti měřeného vrtu bylo posouzeno jako málo pravděpodobné. Přirozeně se vyskytující koncentrace feromagnetického nerostu - například koncentrovaného ložiska železné rudy (nezmapovaného) - navíc výrazně nehomogenního na rozměrech v řádu desítek metrů byla po konzultaci s geology Ústavu geotechniky FAST vyloučena jako krajně nepravděpodobná.

Výskyt umělé nehomogenity (například blízké ocelové potrubí) je určitě možný, avšak měření sondou by to ovlivnilo pouze lokálně. K takové situaci navíc došlo při zkoušení sondy v prostoru schodiště budovy B FAST, kde roli lokálně umístěné feromagnetické nehomogenity sehrálo železné zábradlí. Údaj magnetometru je proto ukládán ve formě hodnot ve všech třech osách. Výskyt lokální nehomogenity lze identifikovat podle změny velikosti výsledného vektoru magnetického pole. To dále umožňuje podniknout kroky směřující k vyloučení tohoto vlivu z výsledků měření. (Uživatelsky příjemná funkce rozlišující tento jev však v obslužném software zatím není implementována).

5.6 První konstrukce sondy

Ideové schéma sondy a příslušenství se od začátku neměnilo: na povrchu měl být umístěn notebook s obslužným softwarem zajišťujícím příjem, zpracování a uložení signálu ze sondy, připojené hardwarové přizpůsobení, sloužící k příjmu signálu ze sondy kabelem a k jejímu napájení, kabelu a sondy, v níž měly být umístěny senzory. Práce začala konstrukcí pokusné prototypové sondy. Rozměry modulů tištěných spojů se senzory dovolovaly umístění do trubky s vnějším průměrem 22 mm. Ta měla sloužit jako těleso sondy. Kromě senzorů bylo nutné zajistit napájení sensorových modulů z napětí přivedeného kabelem, snímání hodnot veličin naměřených senzory a jejich vysílání ve vhodné formě kabelem. Tyto činnosti plní další účelový elektronický modul, obsahující zdrojovou část, vysílač signálu, mikrokontrolér zajišťující komunikaci a konektory pro zasunutí sensorových modulů – schéma je zpracované na Obr. 60. Moduly tištěných spojů byly na tento podpůrný modul upevněny nasunutím propojovacích konektorů – detail viz Obr. 43, jde o zkušební provoz elektroniky sondy. Pro snadný přístup k ovládacímu mikrokontroléru na podpůrném modulu byl modul akcelerometru umístěn na prodloužených konektorových kolíčkách.



Obr. 43: První prototyp elektroniky sondy, dva moduly tištěných spojů se senzory připojené na třetím uživatelském.

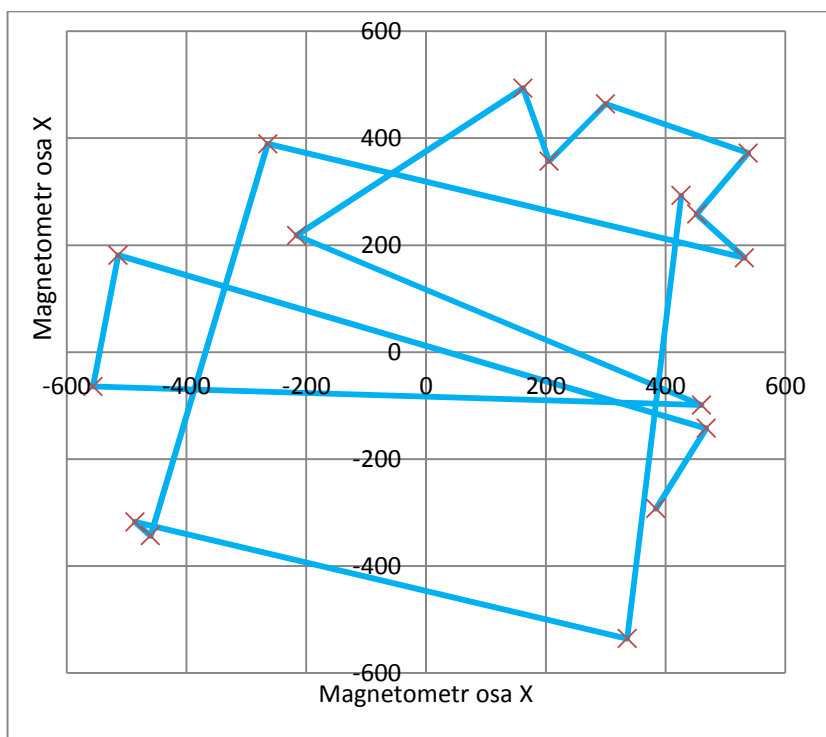
Mechanická konstrukce sondy je dobře vidět na Obr. 46, kde do pouzdra sondy – měděné trubky (neferomagnetický dostupný materiál) je částečně zasunutá elektronika sondy, přičemž modul akcelerometru je stále umístěn na prodloužených kolíčkách, šlo pouze o demonstraci. Konce trubky jsou uzavírány víky. Spodní víko je lepené pro zajištění hermetičnosti, horní víko má těsnění O-kroužkem a pojištění šrouby tak, aby spoj zachoval hermetičnost, ale zůstal rozebíratelný. K víkům tělesa sondy se dále připojovaly vodičí a pojezdové vozíčky.

Činnost prvního prototypu byla ověřována rozбором údajů poskytovaných senzory. Ověření funkce akcelerometru bylo relativně jednoduché a s určitým zjednodušením pro ověření dostačovala procedura podobná kalibraci akcelerometru (viz str. 67, kapitola Kalibrace 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. Jsou určené a vystrojené pro demonstrační měření inklinometrem a pro měření výšky podzemní vody.



Obr. 44: Vrtý na pozemku VUT FAST před budovou B, v popředí vrt č. 5.

Pro zkoušku magnetometru byl vybrán vrt č. 5 (Obr. 44 v popředí) vystrojený pro měření výšky hladiny podzemní vody. Účelem byla zkouška činnosti magnetometru ve funkci kompasu.



Obr. 45: Záznam zkoušky magnetometru na dvoře budovy B ze dne 14.9.2012.

Vrt je naneštěstí vystrojen po větší části své hloubky ocelovou pažnicí, která ovlivňuje činnost magnetického kompasu. Zkoušený prototyp sondy byl upevněn na tuhý závěs vylučující rotaci sondy, spuštěn do vrtu a v různých hloubkách bylo závěsem otáčeno v krocích po 90°, aby se ověřila činnost magnetometru. Na záznamu zkoušky ze dne

14.9.2012 (viz Obr. 45) jsou spojnicí propojeny po sobě jdoucí body, reprezentující po sobě pořízené dvojice hodnot senzorů magnetometru ve vodorovné rovině. Patrný čtyřúhelník (téměř čtverec) v části spojnice signalizuje dobrou činnost magnetometru i v prostředí stínění ocelovou pažnicí, tvar blížký čtverci odpovídá otáčení sondou po 90° krocích. (Pozn.: jednotlivé uzlové body obrazce se zcela nekryjí, neboť ke stabilizaci sondy nebyla použita žádná pomocná konstrukce.). Ocelová pažnice způsobovala koncentraci magnetických siločar, nejvyšší stupeň koncentrace byl měřitelný v místech okrajů pažnice, což je v dobré shodě s teorií – z ocelového předmětu v magnetickém poli se indukci stává též magnet. Ve vnitřním objemu pažnice však samozřejmě magnetické pole existovalo také, použitý magnetometr dokázal, že i takto oslabená velikost pole by dostačovala pro určení severu.

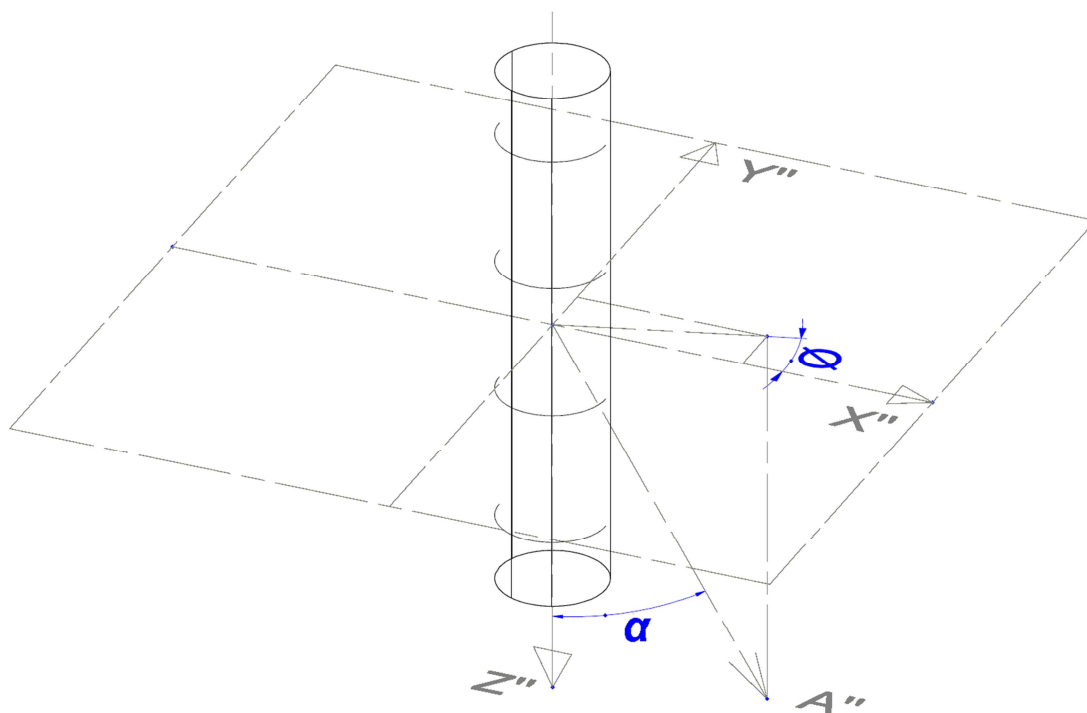


Obr. 46: První prototyp sondy – demonstrace vložení elektronické a senzorové části sondy do pouzdra (trubky).

Při zkouškách v roce 2013 se ukázalo, že průměr tělesa sondy sice teoreticky musí trubkou výměníku bez problému projít, prakticky se však projevil občasné problémy. Proto bylo přikročeno ke konstrukci sondy s obdobnými funkcemi, avšak se zmenšenými vnějšími rozměry – tak zvaná „druhá verze“. Tato druhá verze byla poté i zkoušena ve skutečném geotermálním vrtu.

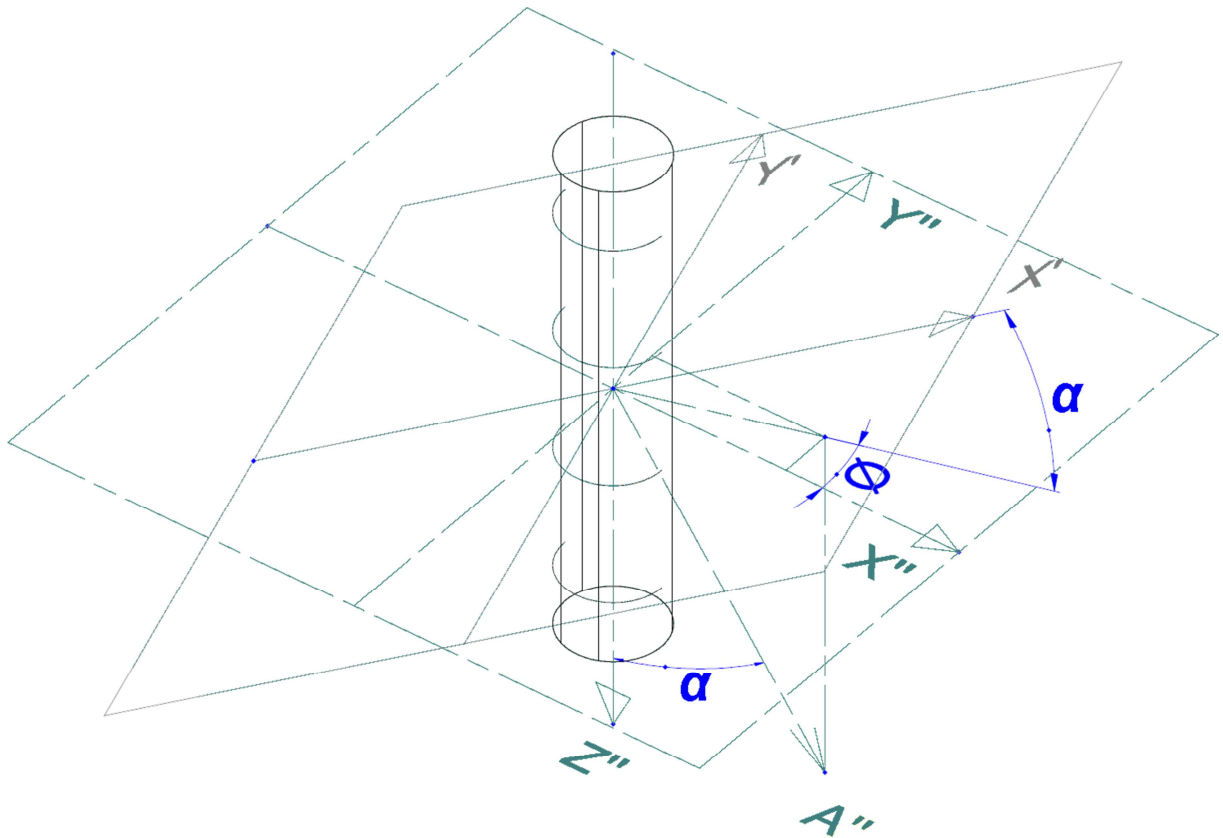
5.6.1 Výpočet parametrů a obslužný software

Sonda zařízení vysílá naměřené údaje ze senzorů kabelem k zařízení na povrchu. To sestává z počítačového interface a přenosného PC, které dále údaje zpracovává. Základními veličinami jsou aktuální odchylka sondy od svislice a azimut této odchylky. Integrací těchto dvou veličin lze obdržet aproximovaný průběh střednice vrtu. Údaje poskytované přímo sondou mají však formu trojice hodnot zrychlení a trojice hodnot intenzity magnetického pole, přičemž každá trojice odpovídá třem složkám prostorového vektoru veličiny v souřadnicovém systému sondy.



Obr. 47: Souřadná soustava sondy – válcový objekt naznačuje těleso sondy visící kabelem nahoru (předpokládaná poloha ve vrtu) Bod A'' je koncový bod vektoru zrychlení změřeného sondou.

Souřadná soustava sondy (viz Obr. 47) má charakter levotočivé kartézské soustavy souřadnic v prostoru s počátkem v těžišti sondy (pro jednoduchost, správně by mělo jít o lokace senzorů v sondě) a číselnými osami X'' , Y'' a Z'' , kde rovina X'' , Y'' je kolmá na osu sondy a osa Z'' směřuje v ose sondy směrem od závěsu sondy (v předpokládaném směru gravitačního zrychlení). Pro získání hodnoty odchylky od svislice a jejího azimutu je nutné tyto souřadnice přepočítat do souřadného systému, kde rovina x , y leží vodorovně. Dále bylo stanoveno, že osa x tohoto systému bude směřovat k severu a systém se bude pro účely výpočtu značit XYZ . Potom bude jednoduše úhel gradientu sklonu sondy azimutem odchylky od svislice. Při výpočtu se nejprve souřadnice přepočtou ze souřadnicového systému sondy $X'' Y'' Z''$ do systému $X' Y' Z'$, který má s prvním společný počátek a je pootočen nejprve kolem osy Z'' o úhel ϕ a poté kolem osy Y' o úhel α – viz Obr. 48. Směr osy Z' takto vzniklého systému $X' Y' Z'$ je tedy totožný s vektorem $0A''$. Bude-li sonda v klidu, bude vektor $0A''$ mít směr a hodnotu gravitačního zrychlení, rovina $X' Y'$ bude hledaná vodorovná rovina. Dále bude potřeba již pouze zjistit natočení osy X' vůči severu, což bude popisovat transformaci mezi $X' Y' Z'$ a XYZ - natočení kolem osy Z' .



Obr. 48: Souřadná soustava sondy $X''Y''Z''$ a pootočená soustava $X'Y'Z'$.

Postup výpočtu vypadá následovně: sonda změří a předá hodnoty 3 složek zrychlení a 3 složek intenzity magnetického pole, které budeme nadále označovat jako:

- X_a , Y_a a Z_a pro úrovně zrychlení v osách X'' , Y'' a Z'' ,
- X_m , Y_m a Z_m pro úrovně intenzity magnetického pole v osách X'' , Y'' a Z'' .

Jako první bude určen směr gradientu zrychlení v rovině $X''Y''$ kolmé na osu sondy (viz Obr. 48 úhel \emptyset):

$$\emptyset = \tan^{-1} \left(\frac{Y_a}{X_a} \right) \quad (14)$$

Dále gradient vyjádřený v úhlové míře, tedy úhel odklonu od svislice, neboli úhel sevřený osou Z'' a vektorem $0A''$ (viz Obr. 48 úhel α):

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{X_a^2 + Y_a^2}}{Z_a} \right) \quad (15)$$

Tím jsou známy úhly natočení souřadného systému sondy $X''Y''Z''$ vůči souřadnému systému $X'Y'Z'$ s rovinou $X'Y'$ vodorovně. V této rovině si vyjádříme souřadnice X_{vodor} , Y_{vodor} a Z_{vodor} , vektoru intenzity magnetického pole:

$$X_{vodor} = (X_m \cos \emptyset + Y_m \sin \emptyset) \cos \alpha + Z_m \sin \alpha \quad (16)$$

$$Y_{vodor} = (Y_m \cos \emptyset - X_m \sin \emptyset) \cos \alpha + Z_m \sin \alpha \quad (17)$$

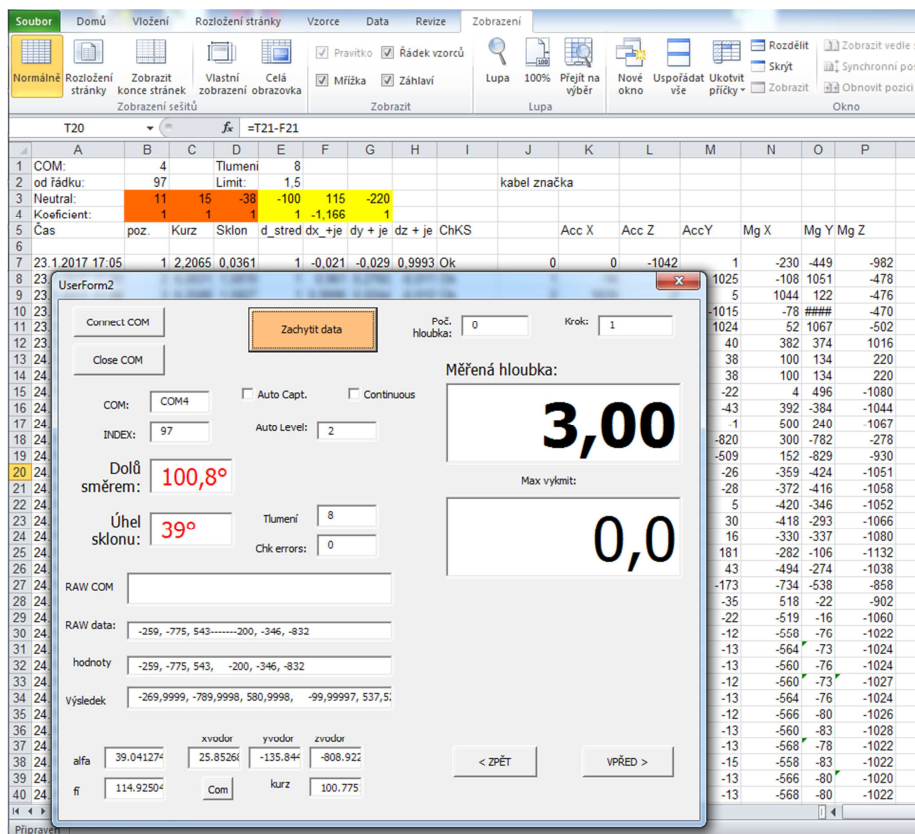
$$Z_{vodor} = -(X_m \cos \emptyset + Y_m \sin \emptyset) \sin \alpha + Z_m \cos \alpha \quad (18)$$

Směr gradientu zrychlení jako úhlová odchylka od směru gradientu magnetického pole (a tedy od severu) lze vypočíst takto:

$$kurz = \pi + \tan^{-1} \left(\frac{Y_{vodor}}{X_{vodor}} \right) \quad (19)$$

Hodnota kurz udává pootočení souřadného systému XYZ proti X' Y' Z' a je tedy hledaným azimutem odchylky od kolmice. Samotná odchylka byla spočítaná již v druhém kroku – jedná se o hodnotu α . Ze znalosti odchylky od svislice a azimutu této odchylky při každém měření lze potom analogicky jako u inklinometrické sondy stanovit aproximaci průběhu střednice trubky výměníku a tím v podstatě i průběh střednice vrtu. V praxi se ukazuje, že trubky výměníku bývají šroubovicovitě zdeformované, takže poloha střednice vrtu vykazují drobné oscilace, ovšem v rozsahu průměru vrtu.

Výše uvedené výpočty realizuje obslužný software, napsaný v začátcích jako makro prostředí MS Excel. Předpokládalo se, že v dalších fázích vývoje bude tento software přepsán do formy aplikace. Avšak zkušenosti ukázaly, že makro pracuje poměrně uspokojivě a že tedy není momentálně důvod ke změnám. Makro využívá doplněnou knihovnu pro pohodlnou komunikaci se sériovým portem, zajišťuje připojení k určenému portu, čtení dat (přenos je zajištěn pomocí kontrolního součtu), přepočítání na zásadní parametry kurzu a odchylky a jejich zobrazení a v případě požadavku jejich uložení do sešitu Excel. V neposlední řadě byla vypracována metoda automatizovaného generování požadavku na uložení vycházející z logiky pohybu sondy v trubce výměníku, systém pracuje tak, aby operátor měl obě ruce uvolněné ke spuštění sondy do vrtu. Obr. 49 ukazuje obrazovku počítače při připojení sondě, hlavní viditelné údaje (vpravo nahoře v otevřeném okně) jsou údaj o sondou dosažené hloubce a dále vlevo ve středu kurz („Dolů směrem:“) a odchylka („Úhel sklonu:“).



Obr. 49: Snímek obrazovky makra – obslužného software – pro komunikaci se sondou.

5.6.2 Kalibrace akcelerometru

Pro přesnou kalibraci zařízení, jako jsou inklinometry, je zapotřebí dosti náročné technické vybavení. Ilustrační Obr. 50 ukazuje kloubový závěs pro kalibraci inklinometrických sond.



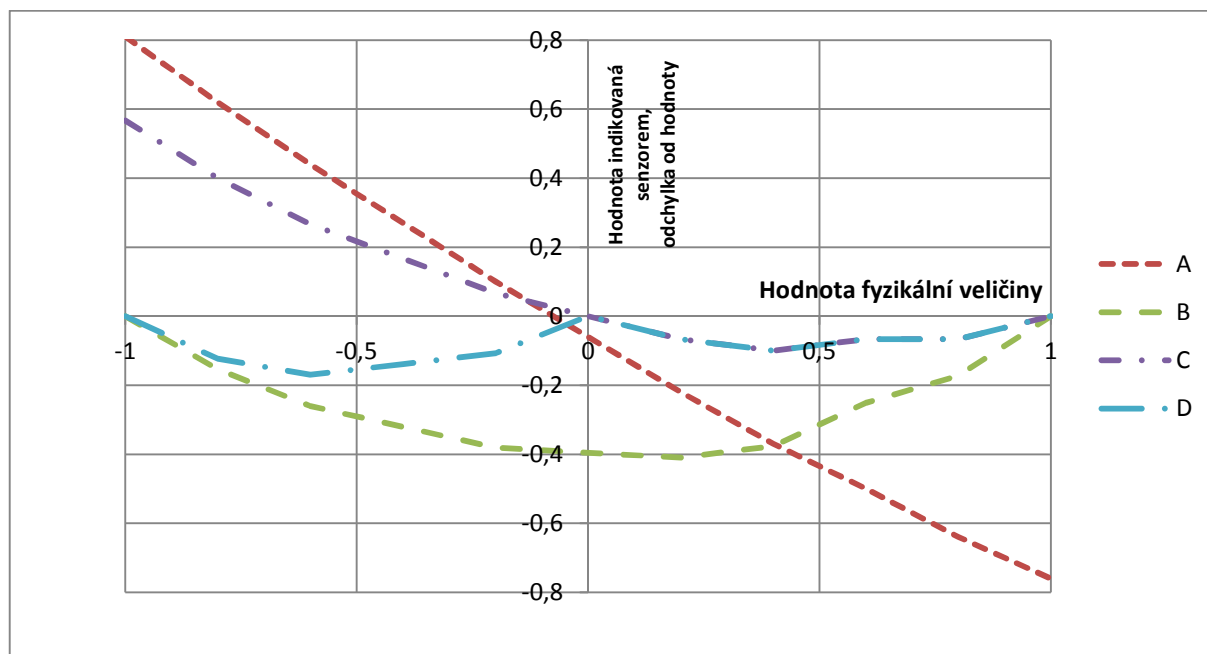
Obr. 50: Závěs automatického kalibračního přístroje pro kalibraci inklinometrů (výrobce Beijing Hekang, [46]).

Tento závěs (kalibrační stand) umožňuje přesné natočení vložené sondy kolem všech tří os. Závěs je řízený pomocí počítače, který dále automaticky porovnává nastavené natočení sondy v prostoru a signál z jejích senzorů a vypracovává kalibrační charakteristiky. Takovéto zařízení však svou cenou přesahuje rámec a cíle této práce. Pro kalibraci akcelerometru inklinometrické sondy pro měření geometrie geotermálních energetických vrtů byla vyvinuta podstatně jednodušší metoda, která spíše odpovídala zamýšlené nižší přesnosti a náročnosti zařízení. Metoda přesto poskytuje přijatelné výsledky, i když má samozřejmě také svá omezení.

Místo kloubového rámu, zajišťujícího přesnou nastavenou pozici sondy v prostoru byla pro kalibraci použita trubka s rovným okrajem a vnitřním průměrem shodným s průměrem trubky výměníku. Do této trubky byla sonda vložena. Byl spuštěn elektronický přenos dat a postupně kalibrovány jednotlivé osy akcelerometru sondy. Zásadní důležitost pro přesnost měření má odchylka působícího tíhového zrychlení od osy sondy, což se projevuje jako nenulová hodnota zrychlení v rovině kolmé na osu sondy (dále rovina XY). Vzhledem k tomu, že odchylky od svislice budou malé (předpokládá se, že vrty budou prakticky svislé), zájmovou oblastí je rozsah snímače v osách X a Y těsně kolem nuly. Osa sondy při měření ve výměníku bude naproti tomu téměř totožná se směrem tíhového zrychlení a proto naměřené hodnoty v ose sondy (značeno Z) se budou prakticky rovnat hodnotě tíhového zrychlení. Pro přesnost určení odchylky od svislice tato hodnota prakticky nemá vliv, avšak její měření lze využít pro rozlišení situace, kdy je sonda vůči trubce výměníku v klidu. Dále popsaná kalibrační metoda neumožňuje postihnout nelinearitu signálu sondy v jednotlivých poloosách a nesouhlas kolmosti os jednotlivých snímaných složek. Postup je popsán v následujících bodech:

- *Kalibrace nulové hodnoty X a Y osy.* Sonda v trubce se postaví na desku stolu (ideálně přesně vodorovnou), přičemž obrobek konec trubky zajistí, že trubka a tím i sonda stojí kolmo k rovině stolu. Nyní je třeba nastavit kalibrační konstanty tak, aby kalibrovaná hodnota snímače v osách X a Y byla nulová. Není-li pracovní deska zcela vodorovná, lze odchylku identifikovat a následně vyloučit otáčením trubky se sondou kolem její osy. X a Y-ová osa snímače je správně kalibrovaná, pokud kalibrované hodnoty oscilují pro každou osu ve stejném rozsahu se střední hodnotou v nule. Dále lze kalibrovat maximální rozsah osy Z – snímač musí po kalibraci ukazovat hodnotu 1 g. Tato kalibrace má však okrajový význam.
- *Kalibrace rozsahu hodnot X a Y osy a nuly v ose Z.* Trubka se sondou se položí na pracovní desku a válí se po pracovní desce. Obdržené hodnoty snímačů X a Y po kalibraci musí oscilovat v rozsahu ± 1 g, snímač ve směru Z musí ukazovat nulovou hodnotu. Pokud pracovní deska není zcela vodorovná, lze tento vliv vyloučit provedením několika měření s různým půdorysným pootočením trubky se sondou. Správná kalibrace v ose Z má okrajový význam, důležitější je správná kalibrace rozsahu hodnot X a Y.
- *Kalibrace rozsahu v ose Z a kontrola kalibrace nuly X a Y os.* Sonda se vyjme z trubky a vloží do ní obráceně. Trubka se postaví na pracovní desku a provede se měření dle prvního bodu. Jsou-li osy X a Y správně kalibrované, ukazují nulu, hodnota v ose Z musí ukazovat -1 g. Tato část kalibrace nemá podstatný význam na přesnost měření.

Uvedený kalibrační postup dobře funguje pro běžnou činnost sondy při odchylkách od vodorovnosti v řádech několika stupňů. Pro přesnější kalibraci by bylo ještě výhodnější upravit používaný software tak, aby umožňoval kalibraci pomocí tří bodů – body na obou koncích rozsahu snímače a nulový bod ve středu rozsahu. Takto by kalibrace byla stále dostatečně jednoduchá, avšak přesnost čtení signálu v celém rozsahu by se zvýšila.



Obr. 51: Příklad nekorigovaného signálu snímače a odchylky kalibrovaného signálu od skutečné vstupní hodnoty (bližší popis viz text).

Přínos je vidět na Obr. 51, charakteristika A ukazuje příklad nekorigovaného signálu snímače, charakteristika B potom odchylku indikované hodnoty od skutečné v případě

kalibrování snímače pomocí dvou bodů na okrajích rozsahu, charakteristika C odchylku v případě kalibrace pomocí dvou bodů ve středu rozsahu a na jednom okraji a konečně charakteristika D odchylku v případě kalibrace pomocí bodů na okrajích rozsahu a v nule. Zadání středového kalibračního bodu a okrajových bodů by navíc bylo možné separovat a tím i zjednodušit proceduru kalibrace.

5.6.3 Kalibrace magnetometru

Plnohodnotná kalibrace magnetometru ve funkci kompasu nebyla provedena, neboť se jedná o choulostivou a náročnou operaci komplikovanou přítomností magnetického pole Země. Nicméně všechny tři osy snímače byly vždy prověřeny na symetrii a kolmost v rámci dostupných technických prostředků sloužících k přesnému uložení a natočení sondy. Výsledné hodnoty byly korigovány kalibračními součiniteli tak, aby výstupní hodnoty sondy po kalibraci odpovídaly předpokládané poloze magnetického severu Země při postupném natáčení sondy.

5.6.4 Zkušební polygon – schodiště budovy B FAST VUT

Aby bylo možné celé zařízení pohodlně testovat, byl zřízen testovací polygon na schodišti budovy B FAST VUT v Brně, Veveří 331/95. Šlo o testy celé sestavy sonda + spouštěcí zařízení (kabel s lankem, buben) + interface a softwarové vybavení notebooku. Za tím účelem byla ve vhodném prostoru – schodišťové šachtě výše zmíněné budovy – instalována trubka používaná jinak běžně v geotermálních vrtech jako teplovodní výměník (Obr. 52 – pohled svisle dolů šachtou schodiště). Tyto trubky se běžně dodávají v návinu o průměru cca 2m. Použitý plast má tvarovou paměť, proto rozvinutí do přímého směru při instalaci nebylo možné. Trubka si zachovává náznak závitů z původního uložení, což v šachtě schodiště vytváří mírné šroubovice. Trubka byla připevňována k zábradlí schodiště pomocí úvazků – viz Obr. 53. Při úvahách o tom, zda se snažit tyto spirály napřímit, nebo je ponechat ve stávajícím stavu, zvítězil názor, že trasa sondy s více ohyby bude na zařízení klást vyšší nároky a lépe tak sondu otestuje. Dále panovala obava, že trubky výměníku v reálném vrtu též nesledují paralelně osu vrtu, ale společně vytváří jakési šroubovice podél osy vrtu. Proto byla trubka ponechána ve tvaru, jaký samovolně zaujala, tedy v mírných šroubovicích. Při skutečném měření v reálném geotermálním vrtu byla potom tato idea v podstatě potvrzena – viz například Obr. 62, kde jsou patrné mírné šroubovicové závitky trubky výměníku ve vrtu.



Obr. 52: Zkušební polygon – zavěšená trubka výměníku v prostoru schodiště budovy B FAST VUT.

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, který v současné podobě při měření nevyžaduje od obsluhy žádný zásah. Obsluha se tak může plně věnovat pouze spouštění sondy.

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 například Obr. 67), značné zkreslení oproti skutečnému tvaru potrubí vykazovaly všechny výsledky v oblastech, v nichž se potrubí přibližuje zábradlí. Důkladnější analýza výsledků nebyla provedena, případně by přicházela v úvahu patrně například regresní analýza s využitím metody nejmenších čtverců. [47]

Bylo tedy konstatováno, že zkušební polygon splnil svůj účel a se stávající konstrukcí sondy již nelze testy na tomto polygonu dospět k zásadnímu výsledku z hlediska odhalení závady na měřicím zařízení.



Obr. 53: Detail upevnění potrubí výměníku v prostoru schodiště budovy B FAST VUT.

5.6.5 Zkouška AdMaS 15.8.2013

Dne 20.8.2013 byla provedeno inklinometrické 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. Měření provedli doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D. a Ing. Augustin Leiter. Měřený vrt byl vystrojený tepelným výměníkem realizovaným jako dvojitá U-trubice. Průměr použitého potrubí byl obvyklých 5/4". Vrt měl být hluboký 100 m. Situace na místě je zachycena na Obr. 54.



Obr. 54: Měřený vrt - situace.

Po příchodu k vrtu byla provedena zběžná vizuální kontrola dostupných konců potrubí (4 konce, 2xU-trubice). Jedna trubka měla konec zdeformovaný patrně působením nějakého tepelného zdroje, další dvě trubky byly na samém konci zploštělé patrně v důsledku stlačení po průjezdu stavebního mechanismu (Obr. 55). Všechny tyto deformace byly až na samém konci potrubí, tedy bez vlivu na funkci tepelného výměníku. Pro zajištění přístupu byl zdeformovaný konec jedné trubice upraven pro vložení sondy.

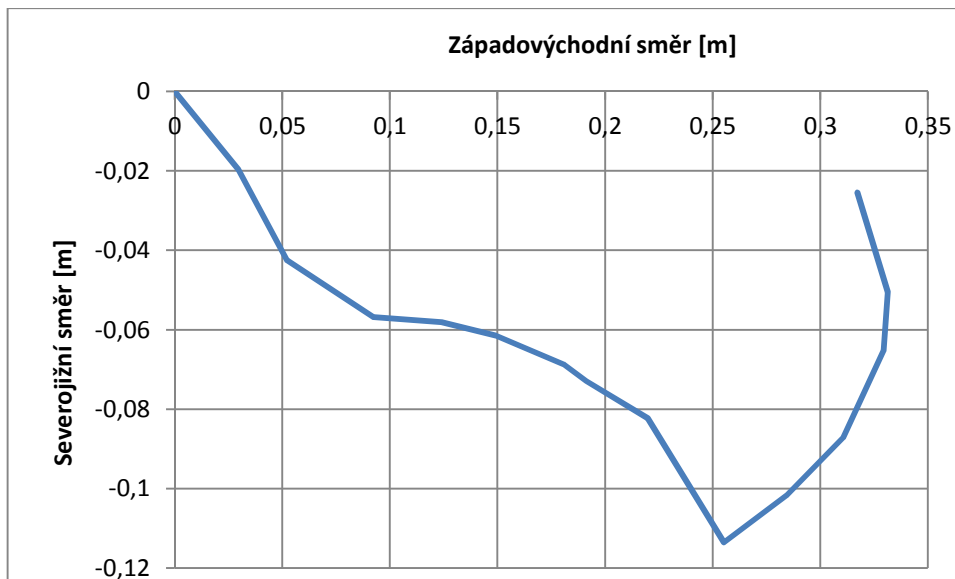
Do trubice byla zavedena inklinometrická sonda a bylo zahájeno spouštění sondy na kabelu dolů trubicí výměníku. V průběhu spouštění byla ukládána měřená data o směru a velikosti úchylny vrtu. Zvláštní pozornost byla při spouštění věnována hladkému pohybu sondy v potrubí. V hloubce zhruba 15 m bylo zaznamenáno ztížení volného pohybu sondy. Ve snaze předejít jakémukoli možnému zablokování výměníku nepohyblivou sondou bylo měření ukončeno a sonda vytažena. Po vytažení byly na povrchu sondy v blízkosti horní hrany hermetického prostoru senzorů sondy pozorovány drobné otřepy, pocházející pravděpodobně z měřeného potrubí - viz Obr. 57. Zaznamenaná data jsou uvedena v Tab. 10. Půdorys průběhu střednice měřené trubky výměníku pak zobrazuje Obr. 56.



Obr. 55: Deformace ústí trubky.

Tab. 10: Naměřená data z vrtu 33 u budovy P4 AdMaS.

Čas	Kurz [rad]	Sklon [rad]	Pozice západ-východ [m]	Pozice sever-jih [m]	hloubka [m]
20.8.2013 11:13	5,30759	0,0450413	0	0	1
20.8.2013 11:13	5,29758	0,0355377	0,029618	-0,01963	2
20.8.2013 11:13	5,50463	0,0322456	0,052259	-0,04258	3
20.8.2013 11:14	5,05385	0,0424567	0,092252	-0,05679	4
20.8.2013 11:14	4,75395	0,0318543	0,124074	-0,05811	5
20.8.2013 11:15	4,84467	0,0255478	0,149396	-0,06148	6
20.8.2013 11:15	4,93879	0,0322456	0,180813	-0,06872	7
20.8.2013 11:16	5,09339	0,0112542	0,19126	-0,07291	8
20.8.2013 11:17	5,03094	0,0300259	0,219771	-0,08231	9
20.8.2013 11:17	5,43578	0,0472438	0,25517	-0,11357	10
20.8.2013 11:18	4,32578	0,0316675	0,284495	-0,10163	11
20.8.2013 11:19	4,20713	0,0299276	0,31068	-0,08715	12
20.8.2013 11:19	3,84872	0,0288543	0,329422	-0,06521	13
20.8.2013 11:19	3,27637	0,0147862	0,331409	-0,05056	14
20.8.2013 11:21	2,62786	0,0287924	0,317261	-0,02549	15



Obr. 56: Půdorysný nárys průběhu střednice trubky výměníku vrtu 33 u budovy P4 AdMaS.



Obr. 57: Otřepy na povrchu sondy po ukončení měření.

Omezení pohybu sondy v potrubí byla věnována maximální pozornost, přítomnost drobných otřepů na povrchu sondy naznačovala kontakt s vnitřním povrchem potrubí. Potrubí na testovacím polygonu schodiště budovy B FAST VUT, kde byla sonda zkoušena, má poloměry křivosti velmi malé (v některých pasážích i v řádu metrů), proto byl předpoklad, že v rozvinutém potrubí ve vrtu budou poloměry větší. Zřejmě se však ukázalo, že v instalovaném výměníku poloměr křivosti může být menší. Zvažována byla také možnost, že potrubí bylo v tomto místě zploštělé či jinak deformované.

Po zhodnocení informací získaných v průběhu měření byla zvážena možnost dalšího zmenšení rozměrů sondy. Tato cesta nakonec vyústila v úspěšnou zmenšenou variantu sondy nazývanou jako „druhá verze“. Tato sonda již nezaznamenala potíže při pohybu normálně tvarovanou (nezdeformovanou) trubkou výměníku.

Pro případnou identifikaci operací s rizikem zdeformování trubky výměníku při jeho zavádění do vrtu byla následně dne 9.9.2013 vykonána návštěva staveniště AdMaS v době vystrojování dalších geotermálních výměníků – viz Obr. 18. Žádná operace v průběhu vystrojování však nebyla podezřelá z deformování trubek. Proto byl pracovně jako příčina obtížného pohybu sondy v trubce při zkoušce dne 15.8.2013 přijat tvar a rozměr sondy. Druhá verze sondy (zmenšená) pak již potíže při průchodu trubkou výměníku nezaznamenala.

Překonstruování sondy do „druhé verze“ samozřejmě zabralo jistý čas. V době, kdy byla tato vylepšená sonda k dispozici, již nebylo možné provést další měření v areálu AdMaS, neboť trubky výměníků již byly zapojené do rozvodných a sběracích větví hydraulického systému.

5.7 Současný stav vývoje specializovaného inklinometru

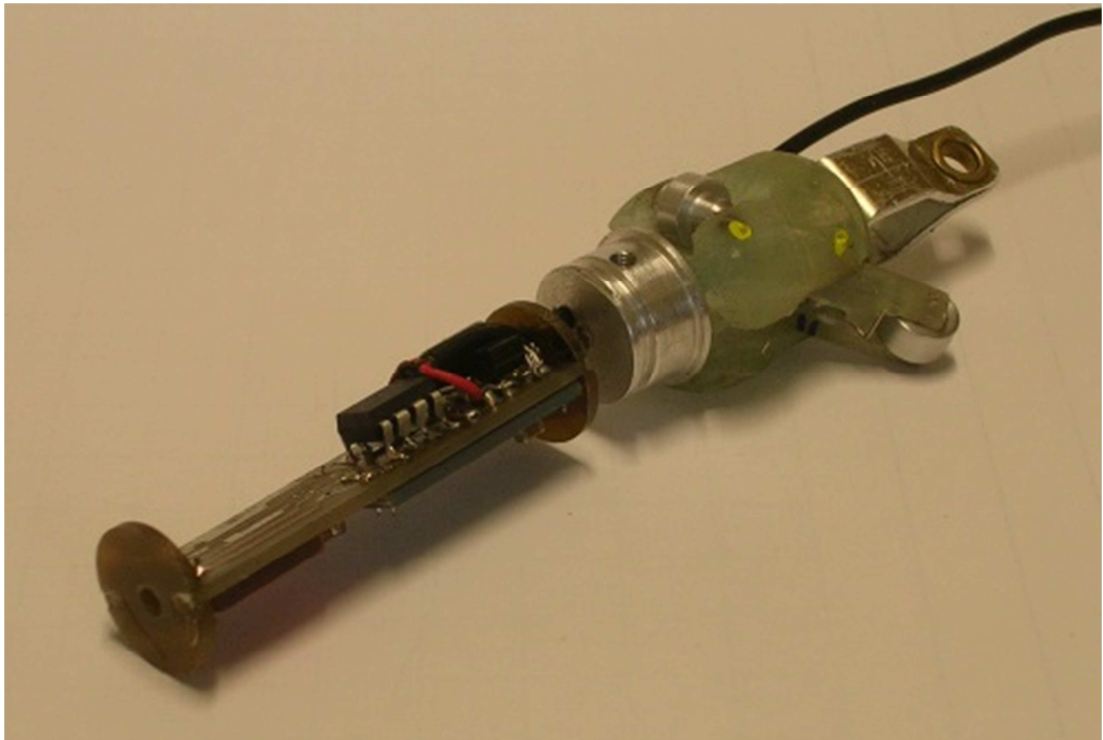
5.7.1 Přístrojová část a hardware

Vyvíjený inklinometr svými rozměry umožňuje provedení měření trubcí výměníku (předpokládaný rozměr trubice je obvykle používaná trubka HDPE 32x3,2 mm). Celé přístrojové vybavení zahrnuje inklinometrickou sondu s vedením pro použití ve výše zmíněné trubce, ocelové 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.

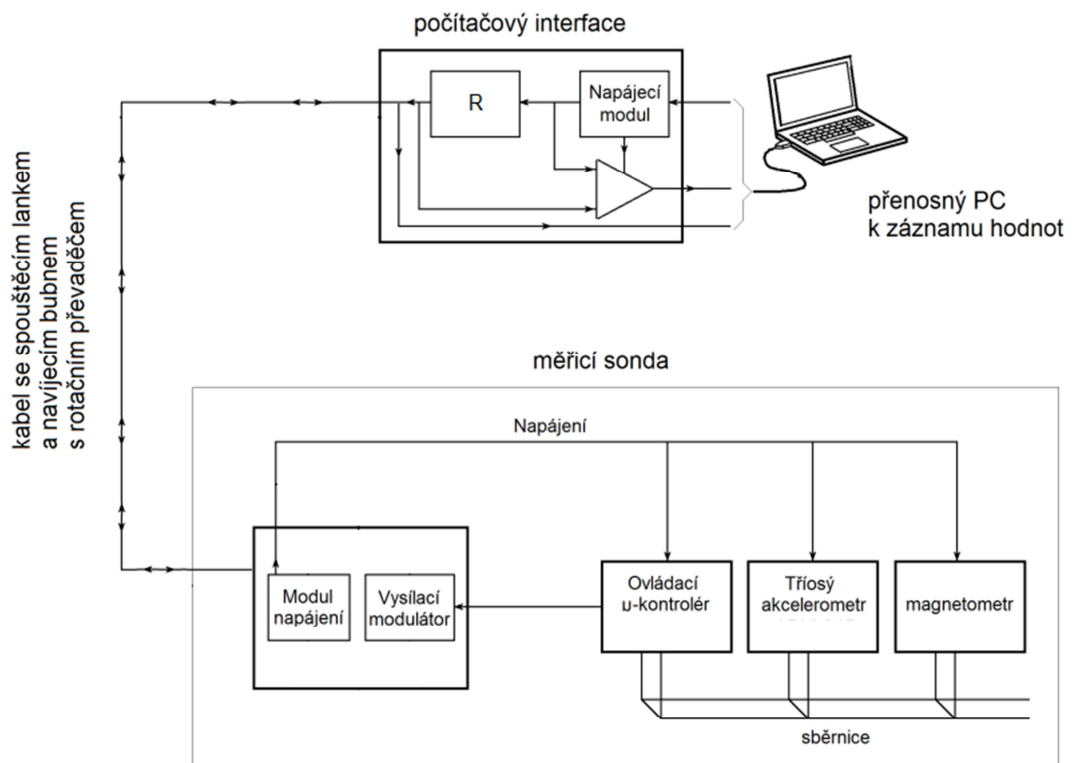


Obr. 58: Sestavená menší „druhá verze“ sondy, předchozí větší verze bez vodičích vozíků v pozadí.

V současné době existují dvě varianty sondy (viz Obr. 58), novější „druhá verze“ má mírně zmenšené vnější rozměry. Starší verze již není zcela funkční. Po stránce senzorů jsou obě verze prakticky totožné, elektrické schéma je na Obr. 60, elektronika sondy je zachycena na Obr. 59. Spouštěcí lano s kabelem v délce 150 m je uloženo na bubnu, opatřeném rotačním převaděčem signálu, takže není nutné při rozvíjení/navíjení lana manipulovat s propojovacím konektorem. S PC je konektor bubnu propojen přes interface. Pro PC je vyvinut specializovaný software, umožňující odečít údajů ze sondy, jejich uložení a vyhodnocení do podoby půdorysných souřadnic.



Obr. 59: Vnitřní elektronická část „druhá verze“ sondy.



Obr. 60: Elektrické schéma inklinometrické sondy do geotermálního tepelného výměníku.

5.7.2 Činnost zařízení - příprava měření

Sonda se připojí ke konci spouštěcího kabelu. Kabelová přípojka bubnu se propojí s interface, k němu se připojí PC, na němž se spustí obslužný software. Po otevření příslušného COM portu poskytuje aplikační sw údaj o hodnotě sklonu sondy (ve stupních, rozumí se odklon od svislice) a azimut tohoto sklonu vzhledem k magnetickému severu. Sonda se vloží do ústí trubice geotermálního výměníku a spustí se do maximální hloubky. Hloubku lze stanovit podle značek na spouštěcím lanu využitím kódování značek. Po dosažení maximální hloubky spuštění sondy se tato hloubka vloží do příslušného okna obslužného programu, dále se vloží vzdálenost jednotlivých odečtů (délka lana na jeden krok) a spustí se měření.

Průběh měření

Měření probíhá v cyklech, v každém cyklu je zaznamenaný jeden měřící bod. Obsluha drží spouštěcí lano v klidu a obslužný software testuje, zda je snímaná hodnota zrychlení v čase neměnná a zda je tedy sonda vůči potrubí v klidu. Pokud tomu tak je, zaznamená naměřené údaje a upozorní obsluhu na tuto skutečnost akustickým signálem (beep). Nyní je na obsluze, aby vytáhla lano o zvolenou délku a přesunula tím sondu do dalšího měřeného bodu. Obslužný software identifikuje další měřený bod podle uklidnění sondy, zahájí opět test neměnnosti snímané hodnoty v čase a celý cyklus se opakuje. Výsledkem je excelový soubor - tabulka naměřených odchylek od svislice a jejich azimutů a dále integrace těchto údajů, tedy tabulka obsahující prostorové souřadnice podél délky vrtu.

5.7.3 Zkouška v reálném vrtu

Dne 24.1.2017 proběhla zkouška celého systému v prostoru Technické univerzity Ostrava. Tato organizace provozuje zkušební pole geotermálních vrtů (snaha o zjištění bližších geometrických charakteristik tohoto pole stála v pozadí při zahájení prací na sondě) a také větší počet různých pokusných geotermálních vrtů. Některé z těchto vrtů disponují kromě tepelného výměníku ve formě dvojité U-trubice ještě pátou trubicí, která se normálně používá pro měření teploty po celé délce vrtu pro výzkumné účely. Právě touto trubicí bylo provedeno pokusné měření. Po celou dobu měření panovalo nepříznivé počasí s teplotami pod bodem mrazu (viz Obr. 63 – práce bez rukavic pouze po velmi omezenou dobu), větrem a občasným sněžením. Tato skutečnost měla na průběh měření – jak se později ukázalo – vliv.

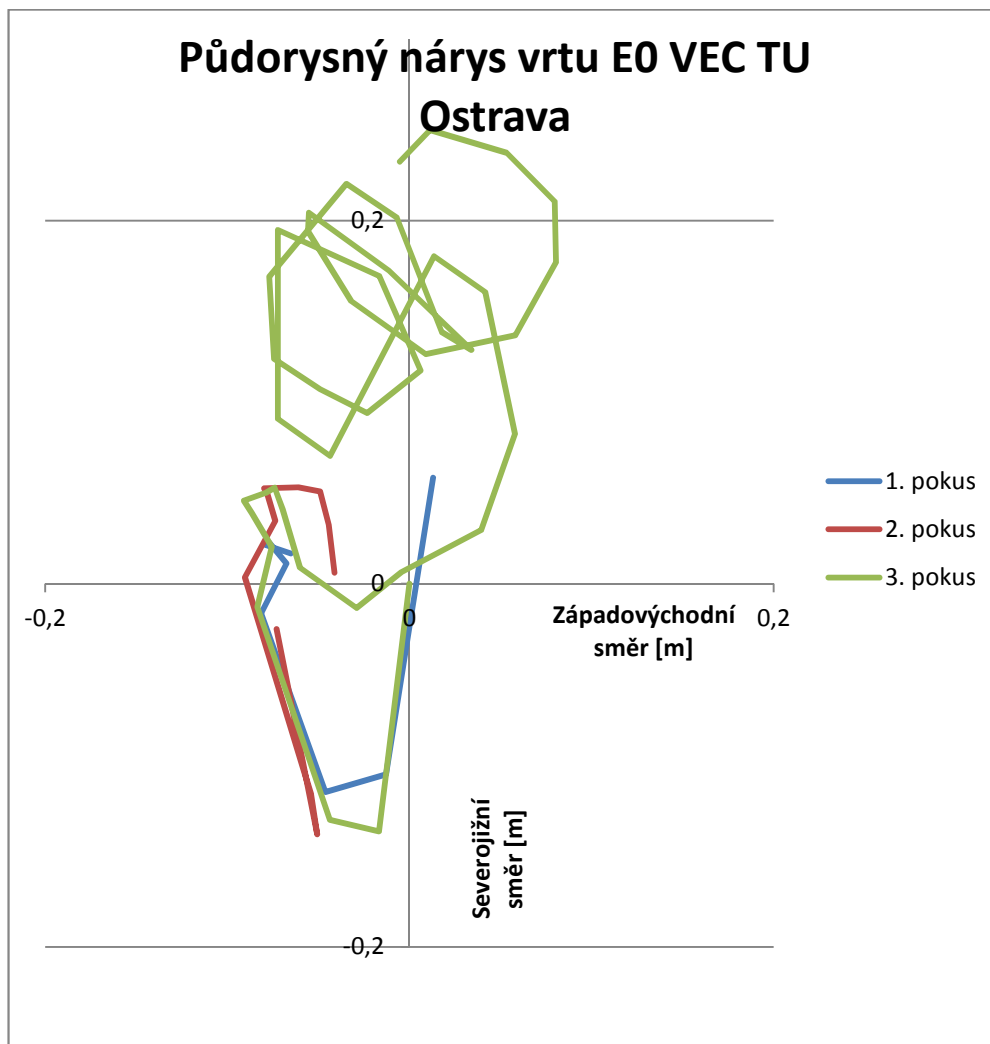
První měření proběhlo ve vrtech v blízkosti budovy Výzkumného energetického centra. Zde bylo zjištěno, že měřicí trubice nesplňují rozměrový standard a bylo tedy nutné zvolit vrt, ve kterém průměr použité páté měřicí trubice umožňoval precizní vedení sondy. Parametry splňoval vrt E0 – viz Obr. 61, na kterém je vidět zhlaví vrtu. Provedený pokus o proměření geometrie odhalil, že měřicí trubice je naplněná vodou, jejíž vztlak působící na sondu bránil jejímu spouštění. Sonda tedy byla zatížena improvizovanou dodatečnou zátěží. Krátce po zahájení dalšího pokusu však selhala komunikace mezi sondou a notebookem. Při dalších pokusech o měření se závada opakovala, systém byl funkční vždy pouze několik minut. Během tohoto časového intervalu byla však opakovaně proměřena horní část vrtu E0. Výsledný půdorys ze tří pokusů o měření je na Obr. 62.



Obr. 61: Zhlaví vrtu E0 v blízkosti VEC TU Ostrava.

Z tohoto půdorysu je zřejmé, že dokud systém pracoval, změřené průběhy střednic měřicí trubky vrtu se dobře shodují - viz Obr. 62 jihozápadní kvadrant. Na údajích z posledního pokusu jsou v severní oblasti nárysu (největší hloubka) patrné smyčky. Jedná se zřejmě o promítnutí faktu, že trubky výměníku jsou ve vrtu šroubovicově spleteny. Tyto

šroubovice pak při měření tvoří na půdorysu ony smyčky. Pokud by tomu tak nebylo, bylo by možné tento jev vysvětlit pouze špatnou kalibrací sondy, kdy akcelerometr vykazuje stálou úchytku od svislice a sonda při svém pohybu v potrubí rotuje kolem osy. Tím by vektor magnetického severu magnetometru rotoval relativně k sondě v protisměru rotace sondy a stálý úklon vykazovaný akcelerometrem by vytvořil zdání pozorovaných smyček. Výsledný vektor měřený magnetometrem však nerotuje, respektive rotuje, ovšem s podstatně delší periodou, než je perioda oněch smyček.



Obr. 62: 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.

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. Vždy se jedná o aproximaci a shoda nemůže být úplná, avšak z tvaru charakteristik ostatních dvou pokusů se lze domnívat, že jsou navzájem v dobré shodě. Exaktní analýza výsledků nebyla provedena, avšak bylo by zřejmě možné použít například regresní analýzu s využitím metody nejmenších čtverců. [47] Vzhledem k výše popsaným technickým problémům nebylo možné získat druhou sadu dat obdobnou sadě na Obr. 62 - 3. pokus a srovnat celé změřené průběhy tvaru vrtu.



Obr. 63: „Druhá verze“ sondy připravená ke vložení do potrubí výměníku, v pozadí naviják s kabelem.

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 (Obr. 64, zhlaví vrtu a vkládaná sonda v detailu na Obr. 65). Zde přítomnost napájecího vedení neomezovala dobu provozu notebooku. Při zahájení proměrování geotermálního vrtu systém pracoval dobře, bohužel ztráta komunikace mezi sondou a notebookem opět znemožnila dokončení měření vrtu. Potrubí z tohoto vrtu je připojeno k tepelnému čerpadlu v objektu a je zde opatřeno teploměry. Teplota náběhové i výstupní vody byla pod 0°C (rafička teploměru na doraz, potrubí ojištěné). To vysvětlilo ztrátu komunikace mezi sondou a notebookem – všechny dosud proměřované vrty byly totiž v činnosti v režimu získávání tepla. To znamená, že voda v trubkách výměníků má velmi nízké teploty, které se vedením přenáší i do měřicího potrubí a vůbec celého bezprostředního okolí vrtu. Takováto nízká teplota zjevně způsobila rozladění časování sériové komunikace a tím nečitelnost údajů pro software na notebooku (koresponduje s pozorovaným průběhem kolapsu komunikace). K tomu došlo vždy až po jisté době činnosti sondy ve vrtu, než se zjevně působením okolního chladného prostředí dostatečně ochladila. Návrh sondy nepočítal s činností v takto chladném prostředí, neboť k proměření vrtů by docházelo v době, kdy se výměník rozpojí kvůli přístupu do potrubí a vrt tedy nutně musí být mimo provoz. Náprava tohoto nedostatku poté, co byla identifikována jeho příčina, tedy nebude složitá. Pro alespoň časově omezené doměření vrtu byla sonda temperována na teplotu cca 35°C a poté byl podniknut nový pokus o proměření vrtu, který již proběhl uspokojivě. 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. 66. Vzhledem k výše zmíněným technickým potížím se opět nezdařilo provést plnohodnotné druhé měření pro srovnání průběhů.

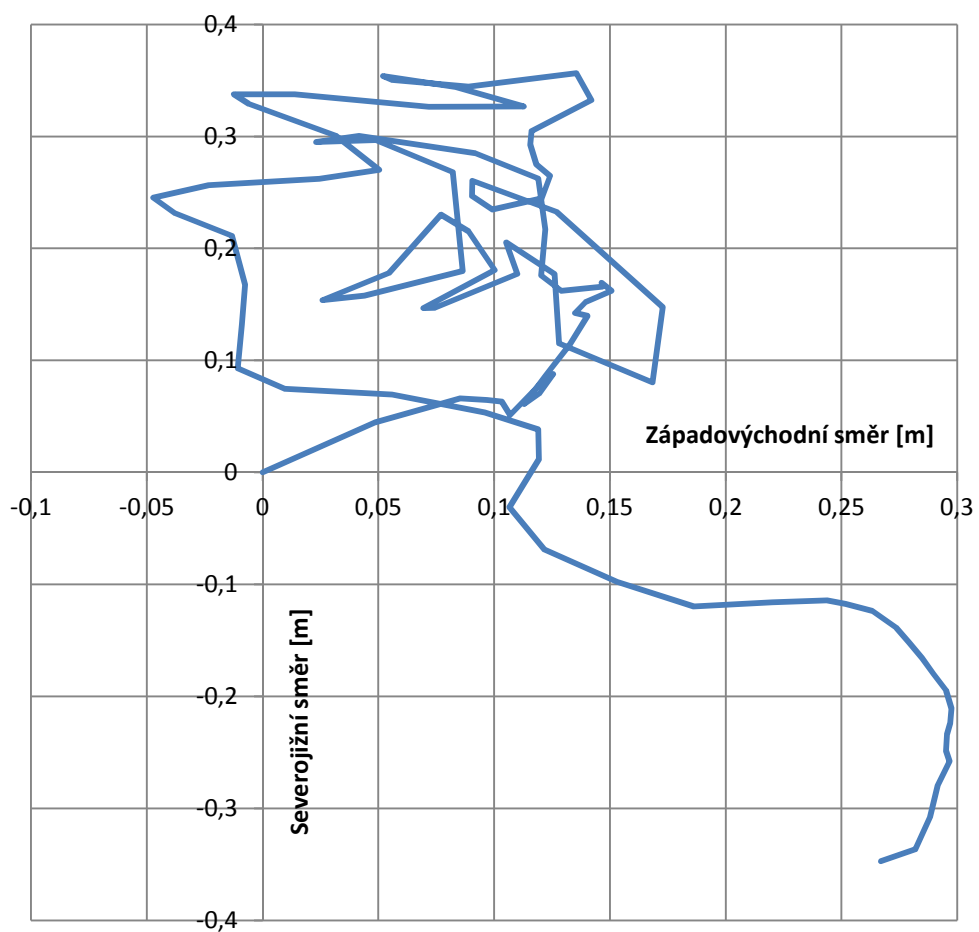


Obr. 64: Měření u zhlaví geotermálního vrtu sloužícího jako zdroj pro nízkoenergetický dům.



Obr. 65: Detail zhlaví vrtu u nízkoenergetického domu, vkládání sondy do měřicího potrubí vrtu.

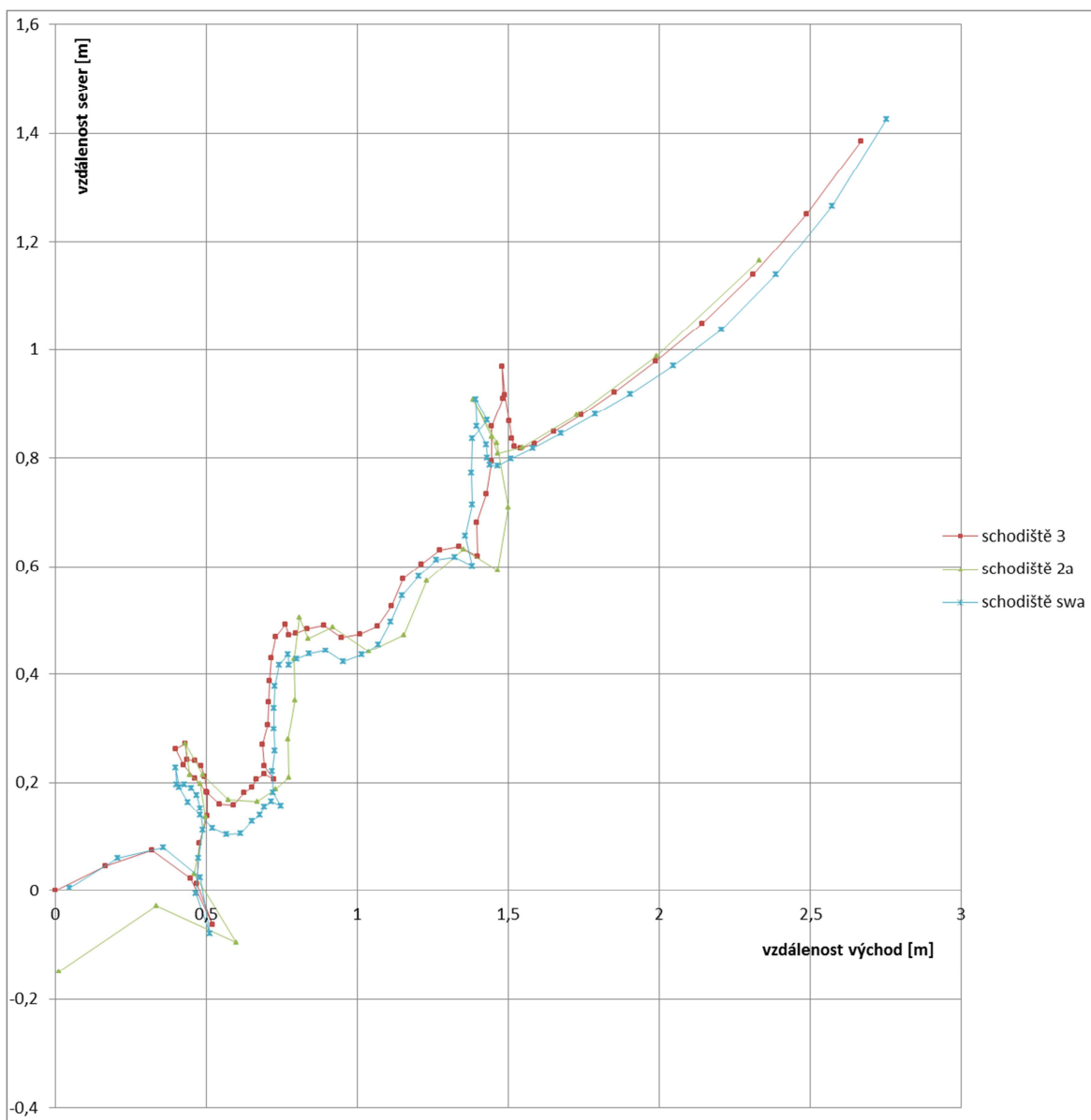
Vrt u nízkoenergetického domu



Obr. 66: Půdorysný nárys průběhu střednice měřicí trubky vrtu u nízkoenergetického domu, bod [0,0] je u zhlaví.

5.8 Závěr - stav vyvíjeného inklinometru

Vývoj popisovaného specializovaného měřicího systému lze považovat za ukončený byť s nutností dodatečně odstranit dílčí nedostatky. Za podstatný mezník vývoje každého takového systému lze považovat jeho „ostré“ použití. Uskutečnění měření sondou v reálném vrtu je obtížné přinejmenším kvůli obavám vlastníka vrtu z jeho znehodnocení. Ve světle těchto potíží lze chápat jako velmi podstatný fakt to, že sonda již byla v reálném geotermálním vrtu opakovaně použita. Tomu navíc předcházela řada testů na polygonu, zřízeném v prostoru schodiště budovy B FAST. Příklad obdržených výsledků ukazují Obr. 62, Obr. 66 a Obr. 67. Sondou je tedy možné (po odstranění nedostatků popisovaných v kapitole 5.7.3 Zkouška v reálném vrtu) nasadit v běžném provozu. Otázkou zůstává kontrola kvality měření. Zde zatím platí požadavek na korektní kalibraci sondy před zahájením práce a kontrolu pomocí srovnání několika po sobě jdoucích měření. Dosavadní zkušenosti naznačují, že průběh měření postupuje dostatečně rychle na to, aby bylo možné považovat zdržení kvůli opakovaným měřením za nepodstatné proti časové náročnosti při přípravě vrtu k měření.



Obr. 67: Příklad grafické interpretace naměřených dat ze zkušebního polygonu - změřený půdorysný tvar trubice ze tří provedených měření.

6 Vývoj software určeného k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ

Vytvořený zjednodušený matematický model popsany v kapitole 4 měl sloužit k demonstraci zhoršení vlastností systému vrtů s porušeným geometrickým uspořádáním. Pro zjednodušení uvažoval pouze s 2D prostorem. Ověření výsledků toto modelu renomovaným softwarovým systémem pro modelování přenosu tepla v podloží prokázalo ve zkoumaných případech dobrou shodu (viz kapitola 4.2). Tento fakt vybízel k úvaze o dalším rozvinutí původně jednoduché demonstrační výpočetní pomůcky do prakticky využitelné aplikace. Dle předběžné úvahy se měla 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 kolmé a dokonce ani přímkové, zohlednění 3D situace.

Cílem práce nemělo být vypracování ekvivalentu používaných výpočetních prostředků, jako jsou rozšířené software pro MKP (např. ANSYS), spíše se pokusit dát do rukou pracovníků v běžné praxi relativně jednoduchý prostředek poskytující srovnávací údaje. Původní představa byla taková, že předmětný software na základě údajů o požadované a skutečné geometrii systému vrtů poskytne kvantifikaci zhoršení vlastností, pravděpodobně tedy jako hodnotu snížení výkonu nebo zvýšení tepelného odporu skutečného a požadovaného systému. Taková informace dostupná in situ by mohla přispět k nápravě například prodloužením dosud nezhotovených vrtů v systému. Vyvinutá softwarová aplikace poskytuje tyto základní informace o tepelných vlastnostech zadaného systému geotermálních vrtů.

6.1 Matematický základ použitý v programu

6.1.1 Tepelná bilance vyděleného prvku kontinua (odvození rovnice vedení tepla)

Odvození rovnice vedení tepla ve formě vhodné pro použití ve výpočtu vychází z obecně známých fyzikálních jevů vyjádřených matematicky. Pro účely tohoto odvození se bude hodit několik definic, které proto budou uvedeny v záhlaví této kapitoly. Navazující odvození se potom bude na tyto definice odkazovat. Všeobecně se předpokládá, že definice popisují vedení tepla v tělese (oblasti) označeném jako oblast D a majícím kontakt s okolím prostřednictvím svého povrchu neboli hranice označované ∂D .

Věta o gradientu

Tato věta v podstatě definuje řecký symbol pro gradient a jeho vyjádření pomocí jeho složek v třírozměrném prostoru [35 str. 20]:

$$\nabla u = \text{grad } u = \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right)^T \quad (20)$$

Pro libovolný jednotkový vektor $\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$ a funkci u definovanou na oblasti D platí výraz (21) – viz [35 str. 21]:

$$\frac{\partial u}{\partial \vec{s}} = \frac{\partial u}{\partial x} s_x + \frac{\partial u}{\partial y} s_y + \frac{\partial u}{\partial z} s_z = \nabla u \cdot \vec{s} \quad (21)$$

Divergence vektorové funkce

Stanovíme, že pro libovolnou vektorovou funkci $u = (u_1(x, y, z), u_2(x, y, z), u_3(x, y, z))$ platí výraz (22), kde výraz $\text{div } \vec{u}$ se bude nazývat divergencí vektorové funkce u :

$$\text{div } \vec{u} = \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{\partial u_3}{\partial z} \quad (22)$$

Pokud je \vec{v} vektor rychlosti proudění nestlačitelné kapaliny, pak platí, že $\text{div } \vec{v} = 0$. Dále lze pro libovolnou vektorovou funkci u formulovat větu o divergenci gradientu:

$$\text{div } \nabla u = \text{div} \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \equiv \Delta u \quad (23)$$

Zde užitý symbol Δ v tomto případě vystupuje jako Laplaceův operátor. [35 str. 21]

Věta o divergenci (Gaussova věta, Gaussova-Ostrogradského věta)

Pro libovolnou oblast D a její hranici ∂D platí rovnice:

$$\int_D \text{div } \vec{u} \, dx \, dy \, dz = \int_{\partial D} \vec{u} \cdot \vec{n} \, ds \quad (24)$$

Z pohledu fyzikální aplikace Gaussova věta v podstatě konstatuje, že tok přes hranici oblasti D odpovídá součtu zdrojů a propadů v oblasti D . [48], [35 str. 21] Důležitý je fakt, že

na jedné straně rovnice figuruje objemový integrál, kdežto na druhé je integrál přes hraniční plochu oblasti. Gaussova věta tedy umožňuje přecházet mezi integrací povrchu oblasti a integrací objemu oblasti D .

Greenova formule:

$$\int_D \frac{\partial v}{\partial x} w \, dx \, dy \, dz = \int_{\partial D} v w \cdot n_1 \, ds - \int_D v \frac{\partial w}{\partial x} \, dx \, dy \, dz \quad (25)$$

Odvození Greenovy formule viz [35 str. 21]

Greenova věta:

$$\int_D \nabla v \cdot \nabla w \, dx \, dy \, dz = \int_{\partial D} v \frac{\partial w}{\partial \vec{n}} \, ds - \int_D v \cdot \Delta w \, dx \, dy \, dz \quad (26)$$

Důkaz Greenovy věty viz [35 str. 22]

6.1.2 Odvození rovnice vedení tepla

Toto odvození vychází z tepelné bilance malého prvku vyděleného ve studovaném kontinuu. Toto kontinuum se bude pro matematické účely opět zjednodušeně označovat jako oblast D . Povrch této oblasti se bude nazývat hranice D a označovat se bude opět jako ∂D . Pro oblast D budou nejprve stanoveny jednotlivé složky tepla, které se budou brát v úvahu. Jednotlivé veličiny vstupující do odvození budou popsány podle pořadí, ve kterém budou uvedeny:

Teplo dodané zdroji rozmístěnými v kontinuu v oblasti D za dobu Δt :

$$Q_1 = \int_D f_0(x, t) \, dx \, dy \, dz \, \Delta t \quad (27)$$

kde

f_0 je funkce zdrojů tepla v čase a prostoru,
 Δt je diference času.

Teplo spotřebované na zvýšení teploty látky v oblasti D za dobu Δt :

$$Q_2 = \int_D c_s \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \, dx \, dy \, dz \, \Delta t \quad (28)$$

kde

c_s je měrná tepelná kapacita zeminy,
 ρ_s je hustota (měrná hmotnost) zeminy,
 u je teplota jako funkce času a prostoru.

Teplu přecházející přes hranici ∂D oblasti D za dobu Δt :

$$Q_3 = - \int_{\partial D} k_0 \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} ds \Delta t \quad (29)$$

kde

k_0 je tepelná vodivost kontinua,
 ds značí, že integrace proběhne přes plochu hranice ∂D ,
 \vec{n} je jednotkový normálový vektor k povrchu hranice oblasti ∂D .

Teplu odnesené ven z D proudící látkou (vodou) s teplotou u_w proudící rychlostí \vec{v} :

$$Q_4 = \int_{\partial D} c_w \rho_w u_w \vec{v}_w \cdot \vec{n} ds \Delta t \quad (30)$$

kde

c_w je měrná tepelná kapacita vody,
 ρ_w je hustota (měrná hmotnost) vody.

Zákon zachování energie říká, že energie nemůže nikde vznikat nebo se ztrácet, pouze přecházet z jedné formy na jinou. V našem případě to znamená, že v oblasti D součet všech tepel musí být konstantní. Tuto skutečnost lze vyjádřit sečtením jednotlivých příspěvků Q_{1-4} (31):

$$Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_1 \quad (31)$$

Po dosazení obdržíme následující rovnici:

$$\begin{aligned} \int_D c_s \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} dx dy dz - \int_{\partial D} k_0 \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} ds + \int_{\partial D} c_w \rho_w u_w \vec{v}_w \cdot \vec{n} ds \\ = \int_D f_0(x, t) dx dy dz \end{aligned} \quad (32)$$

Tato rovnice obsahuje dva typy integrálů: objemový přes oblast D a integrál přes plochu hranice oblasti ∂D .

Užitím Věty o divergenci (Gaussovy věty) (24) a Věty o divergenci gradientu (23) vznikne následující výraz:

$$\int_D \left(c_s \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} - \operatorname{div}(k_0 \nabla u) + \operatorname{div}(c_w \rho_w u_w \vec{v}_w) \right) dx dy dz = \int_D f_0(x, t) dx dy dz \quad (33)$$

Zde již vystupuje pouze integrace přes objem oblasti D . Je-li proudění nestlačitelné, tj. platí $\operatorname{div} \vec{v} = 0$, pak lze odvodit výraz

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(u \vec{v}) &= \frac{\partial(uv_1)}{\partial x} + \frac{\partial(uv_2)}{\partial y} + \frac{\partial(uv_3)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} v_1 + u \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} v_2 + u \frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} v_3 + u \frac{\partial v_3}{\partial z} = \vec{v} \cdot \nabla u + u \operatorname{div} \vec{v} \\ &= \vec{v} \cdot \nabla u \end{aligned} \quad (34)$$

Po dosazení (34) a (23) do (33) lze přepsat rovnici jako základní rovnici vedení tepla:

$$c_s \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} - k_0 \Delta u + c_w \rho_w \operatorname{div}(u_w \vec{v}) = f_0(x, t) \quad (35)$$

viz [36].

Dále bude vyšetřována pouze časově ustálená situace, což lze definovat rovnicí

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (36)$$

a také bude zaveden standardně používaný symbol pro tepelnou vodivost:

$$\lambda = k_0 \quad (37)$$

kde λ je tepelná vodivost kontinua - zeminy.

Užitím výrazů (36) a (37) lze výraz (35) tedy přepsat takto:

$$-\lambda \Delta u + c_w \rho_w \operatorname{div}(u_w \vec{v}) = f_0(x, t) \quad (38)$$

anebo po jednotlivých složkách:

$$-\lambda \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + c_w \rho_w \left(v_1 \frac{\partial u}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u}{\partial y} + v_3 \frac{\partial u}{\partial z} \right) = f_0(x, t) \quad (39)$$

Nyní se použije substituce z důvodu úspory programového kódu při programování:

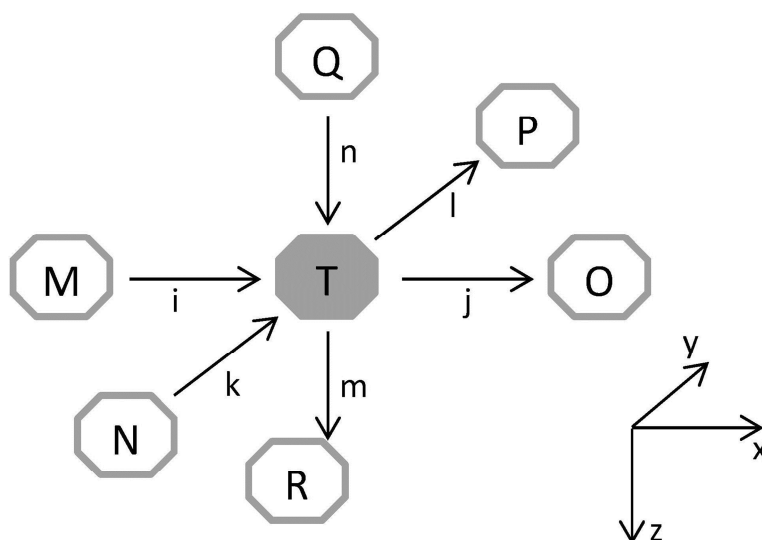
$$\beta = \frac{c_w \rho_w}{2} \quad (40)$$

a pomocí této úpravy (40) lze obdržet výraz

$$-\lambda \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + 2\beta \left(v_1 \frac{\partial u}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u}{\partial y} + v_3 \frac{\partial u}{\partial z} \right) = f_0(x, t) \quad (41)$$

V tomto výrazu již figurují pouze parciální derivace teploty u podle jednotlivých os souřadnicového systému. Pro řešení pomocí výpočetní techniky je však tato podoba výrazu stále nepoužitelná, je nutné získat výraz, ve kterém budou vystupovat pouze hodnoty funkce u v jednotlivých uzlech sítě. Toho lze dosáhnout tak, že se v tomto okamžiku z výrazu (41) vytvoří výraz pro diferenční schéma výpočtu uzlových hodnot pole metodou sítě.

6.1.3 Odvození diferenčního schématu pro metodu sítí



Obr. 68: Šablona použitá pro sestavení diferenčního schématu.

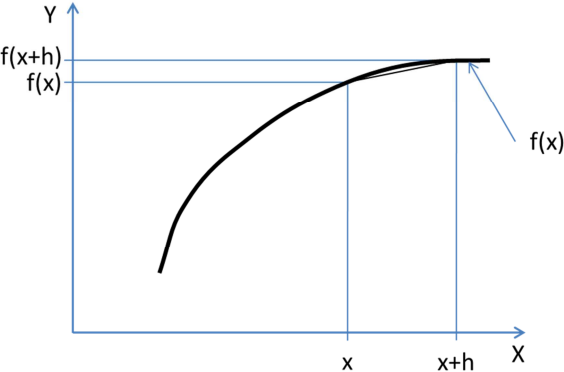
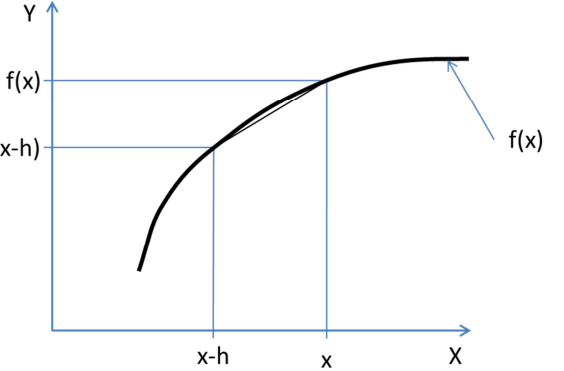
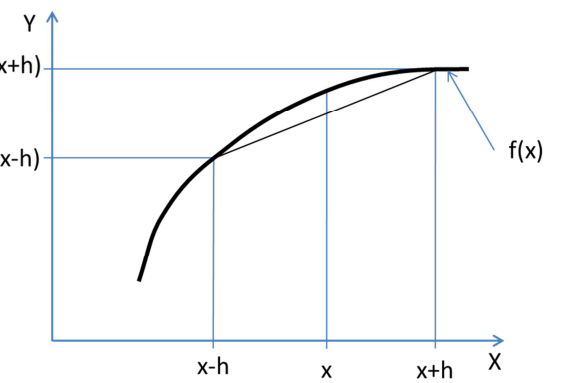
Při odvození diferenčního schématu byla použita sedmibodová šablona – viz Obr. 68. Dle této šablony je využito hodnot šesti sousedních uzlů sítě pro vypočítání hodnoty v uzlu T. Vzhledem k tomu, že nebyl předpokládán ekvidistantní krok v jednotlivých osách sítě, bylo třeba odvodit schéma v dosti obecném tvaru. Geometricky vztahy jednotlivých uzlů v šabloně popisuje Tab. 11.

Tab. 11: Pozice v šabloně a jejich relativní pozice vůči počítané pozici T.

Pozice v šabloně	poloha ve směru x	poloha ve směru y	poloha ve směru z
T	x_T	y_T	z_T
M	$x_T - i$	y_T	z_T
O	$x_T + i$	y_T	z_T
N	x_T	$y_T - k$	z_T
P	x_T	$y_T + l$	z_T
Q	x_T	y_T	$z_T - n$
R	x_T	y_T	$z_T + m$

Při znalosti geometrie je možné stanovit diferenční schéma. Základní formule k této problematice spolu s grafickým významem diferenčních schémat pro 1. derivaci podle osy x uvádí Tab. 12.

Tab. 12: Grafické znázornění dopředné, zpětné a centrální diference a vztahy pro první derivaci. [49 str. 53]

<p style="text-align: center;">Dopředná diference</p> 	$f'(x) \doteq \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \frac{O - T}{j}$
<p style="text-align: center;">Zpětná diference</p> 	$f'(x) \doteq \frac{f(x) - f(x-h)}{h} = \frac{T - M}{i}$
<p style="text-align: center;">Centrální diference</p> 	$f'(x) \doteq \frac{\frac{f(x+h) - f(x)}{h} + \frac{f(x) - f(x-h)}{h}}{2} = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} = \frac{O - M}{i + j}$ <p>(Uvedený vztah platí pro ekvidistantní síť.)</p>

$f(x)$ je funkční hodnota funkce f v bodě x ,
 h je krok sítě,
 $f'(x)$ je přibližná hodnota 1. derivace funkce f v bodě x ,
 O, T, M jsou funkční hodnoty v uvažovaných uzlech sítě
 j je vzdálenost mezi uzly O, T ,
 i je vzdálenost mezi uzly T, M .

Pozn.: U centrální diference je chyba vzniklá aproximací nejmenší.

Vzhledem k předpokladu, že řešená síť nebude ekvidistantní, bylo nezbytné použít složitější formulaci diferenčního schématu pro první derivaci, která bere v úvahu dopřednou i zpětnou diferenci:

$$f'(x) \doteq \frac{1}{2} \left(\frac{O - T}{j} + \frac{T - M}{i} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{O}{j} - \frac{M}{i} + T \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{j} \right) \right) \quad (42)$$

Dále bylo potřeba stanovit diferenční schéma pro druhou derivaci. Analogicky lze postupovat jako v případě první derivace. Standardní formule pro určení aproximace druhé derivace pro ekvidistantní síť, odvozená jako změna první derivace na kroku h , vypadá takto:

$$f''(x) \doteq \frac{\frac{f(x+h) - f(x)}{h} - \frac{f(x) - f(x-h)}{h}}{h} = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (43)$$

Pro situaci s neekvidistantní sítí byl však použit následující vztah:

$$f''(x) \doteq \frac{\frac{O - T}{j} - \frac{T - M}{i}}{\frac{i}{2} + \frac{j}{2}} = \frac{2}{i+j} \left(\frac{O}{j} - \frac{T}{j} - \frac{T}{i} + \frac{M}{i} \right) \quad (44)$$

Dosazením formulí pro první a druhou diferenci (42) a (44) lze rovnici vedení tepla rozepsat do následujícího tvaru (provedeno pouze pro osu x):

$$-\lambda \left(\frac{\frac{O - T}{j} - \frac{T - M}{i}}{\frac{i}{2} + \frac{j}{2}} + \dots \dots \right) + 2\beta \left(\frac{v_x}{2} \left(\frac{O}{j} - \frac{M}{i} + T \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{j} \right) \right) + \dots \dots \right) = f_0(x, t) \quad (45)$$

Z tohoto tvaru již lze vyjádřit vztah pro výpočet teploty v bodě T (pouze pro osu x):

$$\begin{aligned} & O \left(\frac{2\lambda}{j(i+j)} - \frac{\beta v_x}{j} \right) + M \left(\frac{2\lambda}{i(i+j)} + \frac{\beta v_x}{i} \right) + \dots \dots \\ & = T \left(\frac{2\lambda}{i+j} \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{j} \right) + \dots \dots + \beta v_x \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{j} \right) + \dots \dots \right) - f_0(x, t) \end{aligned} \quad (46)$$

Ve vztahu (46) již figurují pouze hodnoty funkce u v jednotlivých uzlech sítě a známé konstanty. Před vlastním řešením problému je však ještě nutné zavést okrajové podmínky funkce, čemuž se věnuje následující kapitola.

6.1.4 Okrajové podmínky

Pro řešení úlohy metodou sítí byl tedy v minulé kapitole odvozen diferenční vztah, jehož pomocí lze ze znalosti teplot v okolních bodech šablony a znalosti rozměrových charakteristik šablony spočítat teplotu v uzlu sítě T dle šablony. Úlohu si lze představit jako výpočet teplotního pole v uzlech prostorové ortogonální sítě proložené myšleným kvádrem kontinua. Tento kvádr – blok – bude symbolizovat objem zeminy, pro který bude výpočet proveden. Pro úspěšné řešení je třeba definovat okrajové podmínky výpočtu. Použity jsou dvě:

- Dirichletova podmínka (předepsaná hodnota teploty v uzlu),
- Neumannova podmínka (předepsaný tok přes hranici oblasti).

Dirichletova podmínka je uplatněna na svislých hranicích kvádrů, kde se předpokládá vyhřívání zeminy přilehlým masivem. Teploty zde předepsané jsou vypočítány tak, aby odpovídaly geotermálnímu teplotnímu gradientu. To samé platí pro spodní plochu kvádrů.

Dále jsou Dirichletovy podmínky předepsány pro vrty. Předpokládá se, že vrty budou propojeny rozdělovačem/sběračem. Při dostatečném průtoku vody výměníkem vrtu bude teplota v blízkém okolí výměníku kolísat v rozmezí několika stupňů, proto byla jako předpoklad stanovena stálá teplota vrtů. [12 str. 51] Teplo se tedy v zásadě přemísťuje z vnějších hranic kvádrů k bodům, symbolizujícím vrty. V místech, kde uzly sítě nekorespondují s body na střednici vrtů, je použit náhradní přepočtení do bodů uzlů sítě (odvození vztahů pro tuto problematiku je obsáhlé a není předmětem této práce).

Pro horní povrch kvádrů je pro jednoduchost uplatněna Neumannova podmínka, vzhledem k přechodu z prostředí zeminy do prostředí atmosféry byl na této ploše předepsán nulový tok přes hranici. Tato plocha tak prakticky funguje jako teplotní izolátor. [50]

Do výpočtu dále vstupuje teplo, vnášené či vynášené z oblasti proudící podzemní vodou. Pokud tedy voda proudí, nemá dle [49 str. 96] smysl předepisovat Dirichletovu okrajovou podmínku na hranici oblasti po směru proudění vody. Fyzikální realita tomuto předpokladu odpovídá velice dobře, proudění vody s její vysokou tepelnou kapacitou určitě zabrání přenosu tepla proti toku vody od hranice oblasti, navíc za touto hranicí by v reálném kontinuu teplota byla rozhodně ovlivněna odtékající vodou. Proto pro případy nenulové rychlosti proudění byla Dirichletova podmínka na hranici oblasti po směru proudu vypuštěna.

Odvození základního vztahu pro Neumannovu podmínku (pouze pro směr x):

Úpravou vztahu (46) lze obdržet jeho tvar výhodnější pro vyjádření okrajových podmínek:

$$-\lambda \left(\frac{\frac{0 - T}{j} - \frac{T - M}{i}}{\frac{i}{2} + \frac{j}{2}} + \dots \dots \right) + 2\beta \left(\frac{v_x}{2} \left(\frac{0}{j} - \frac{M}{i} + T \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{j} \right) \right) + \dots \dots \right) = f_0(x, t) \quad (47)$$

Nulová hodnota přestupu tepla u povrchu znamená, že první derivace teplotní funkce musí být rovna konstantě – v případě simulování tepelné izolace nule. S využitím vztahu (42) pro první derivaci lze tedy pro osu x odvodit:

$$\frac{0 - T}{j} = -\frac{T - M}{i}, \text{ neboli } \frac{0}{j} = \frac{M}{i} - T \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{j} \right) \quad (48)$$

Pro podmínky nulového přestupu u horního povrchu kvádrů je nutné vyjádřit diferenční vztahy pro uzly sítě ležící na hranici s využitím této podmínky (následující úprava pouze pro osu x pro nulový přestup tepla ve směru osy x , bod O je již mimo oblast uvažovaného kvádrů):

$$-\lambda \left(\frac{-2 \frac{T - M}{i}}{\frac{i}{2} + \frac{j}{2}} + \dots \dots \right) + 2\beta \left(\frac{v_x}{2}(0) + \dots \dots \right) = f_0(x, t) \quad (49)$$

Tímto způsobem lze upravit vztah pro výpočet v bodě T vždy pro každou stěnu kvádrů, u níž by platila podmínka nulového přestupu tepla. Ke změnám tedy dochází pouze u jistých částí vztahu (47), což je výhodné z hlediska algoritmizace řešení. Důležité ve výsledném vztahu je, že se v něm již nevyskytuje bod O . Pokud má vztah platit u hranice kvádrů ve směru x , bod O by se nalézal již za hranicí kvádrů. Jeho hodnotu by tudíž nebylo jak počítat.

6.1.5 Řešení systému lineárních rovnic

Nyní je nezbytné sestavit systém lineárních rovnic tak, aby mohla být následně řešena úloha:

$$A\vec{x} = \vec{b} \quad (50)$$

Matice A obsahuje koeficienty, vektor \vec{x} hodnoty teplot všech uzlových bodů sítě a vektor \vec{b} je vektor pravých stran. Je nezbytné stanovit neměnné schéma převodu hodnot uzlových bodů sítě do vektoru \vec{x} a zpět, aby bylo možné po ukončení výpočtu identifikovat pozici každého uzlu z pořadí složky vektoru \vec{x} . Matice bude mít pro pc uzlů sítě pc řádků. Každý řádek bude obsahovat koeficienty pro výpočet konkrétního T_p . Vzhledem k tomu, že každý uzlový bod T_p je vždy počítán z pevných koeficientů a hodnot maximálně šesti okolních uzlů (M, O, N, P, Q, R – viz Obr. 68), je možné vztahy pro každé T_p vždy přepsat do následující lineární rovnice:

$$T_p = b_p - a_{p1}M_p - a_{p2}O_p - a_{p3}N_p - a_{p4}P_p - a_{p5}Q_p - a_{p6}R_p \quad (51)$$

kde $a_{p1} \dots a_{p6}$ jsou koeficienty příslušející okolním uzlům sítě. Jejich hodnoty lze obdržet vhodným vyjádřením ze vztahů (46) a (49). V koeficientu b_p je hodnota případné Dirichletovy podmínky. Pro znázornění převodu mezi okolními uzlovými body sítě a bodem T lze vztah (51) také přepsat následovně:

$$T_p = b_p - a_{p1}T_{p-modulX} - a_{p2}T_{p+modulX} - a_{p3}T_{p-modulY} - a_{p4}T_{p+modulY} - a_{p5}T_{p-modulZ} - a_{p6}T_{p+modulZ} \quad (52)$$

kde $modulX$, $modulY$ a $modulZ$ jsou kroky charakterizující ve vektoru neznámých (a matici koeficientů a vektoru pravých stran) posuv k sousednímu bodu sítě v osách x , y a z . To již umožňuje modifikovat matici A na pouze 6 sloupců, v nichž jsou vždy pouze koeficienty

$a_{p1} \dots a_{p6}$. Tím se radikálně snížit požadavky na úložný prostor počítače, neboť zbytek každého řádku matice obsahuje nuly, které se nikde neukládají. Vektor \vec{x} obsahuje zatím neznámé hodnoty všech uzlových hodnot a vektor \vec{b} je vektor pravých stran.

Nyní již lze takto uložený systém lineárních rovnic řešit. K řešení byla použita iterační Gauss-Seidelova metoda. [36], [37 str. 31] Zkráceně je její princip popsán v kapitole 4.1 Zjednodušený matematický model systému vrtů a okolí v 2D. Zde uvedu pouze vztah pro výpočet p -té složky vektoru \vec{x} v modifikovaném systému ukládání koeficientů:

$$x_p^{k+1} = b_{pp} - a_{p1}x_{j-\text{modul}X}^{k+1} - a_{p2}x_{j+\text{modul}X}^k - a_{p3}x_{j-\text{modul}Y}^{k+1} - a_{p4}x_{j+\text{modul}Y}^k - a_{p5}x_{j-\text{modul}Z}^{k+1} - a_{p6}x_{j+\text{modul}Z}^k \quad (53)$$

Podle tohoto vztahu jsou v jedné iteraci počítány postupně všechny prvky vektoru \vec{x} (pro p jdoucí od 1 do pc) tak, jak to předepisuje postup řešení. Jakmile rozdíl mezi kumulovanými hodnotami odchylek mezi x_p^{k+1} a x_p^k pro všechna p podkročí zadanou hodnotu, je výpočet ukončen. 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.

6.1.6 Interpretace výsledného řešení

Znalost rozložení teplot uvnitř simulované oblasti zeminy umožňuje vykreslit rozložení graficky ve formě snadno přehledných řezů s barevně vyznačenými teplotami – viz příklad Obr. 71. Nicméně vhodné je celý simulovaný tepelný systém nějakým způsobem charakterizovat jedním numerickým údajem. K tomu je výhodný údaj o tepelném toku \dot{Q} simulovaného systému, neboli jeho tepelném výkonu (při zadaných teplotách v okrajových podmínkách):

$$\dot{Q} = \int_S \vec{q} dS \quad (54)$$

neboli pomocí křivkového integrálu přes hranici simulované oblasti

$$\dot{Q} = \oint_{hr} -\lambda \text{grad } T \vec{ds} \quad (55)$$

Například příspěvek tepelného výkonu pro obdélníkovou oblast sítě ohraničenou uzly s indexy $[(i, 0, k), (i+1, 0, k), (i+1, 0, k+1), (i, 0, k+1)]$ ležící v rovině $j = 0$ (na hranici uvažované obdélníkové oblasti, kde platí $y = 0$) lze vztah (55) přepsat do této podoby:

$$\dot{Q}_{i,0,k} = -\lambda \text{grad } T_{i,0,k} ds_{i,0,k} \quad (56)$$

kde diskretizovaný výpočet teplotního gradientu je vyčíslen jako změna teploty (průměr ze čtyř ohraničujících bodů) na vzdálenosti kolmo do simulované oblasti

$$\text{grad } T_{i,0,k} = \frac{1}{Y_1 - Y_0} (T_{i,1,k} + T_{i+1,1,k} + T_{i+1,1,k+1} + T_{i,1,k+1} - T_{i,0,k} - T_{i+1,0,k} - T_{i+1,0,k+1} - T_{i,0,k+1}) \quad (57)$$

a kde diskretizovanou část povrchu hraniční plochy lze vyčíslit jako plochu obdélníkové oblasti:

$$ds_{i,0,k} = (X_{i+1} - X_i)(Z_{k+1} - Z_k) \quad (58)$$

Nyní tedy stačí obdobným způsobem vyčíslit výraz (56) pro celou hranici simulovaného bloku zeminy a součet těchto příspěvků dá aproximaci celkového tepelného toku přes hranici bloku zeminy a tedy celkový tepelný výkon systému.

6.2 Software k rychlému vyhodnocení tepelných vlastností systému vrtů

Možnost exaktně proměřit skutečný tvar geotermálního vrtu jak je to popsáno v kapitole 5 v podstatě umožňuje tato data použít k simulaci chování a výpočtu tepelných parametrů systému s geotermálním vrtem. Existuje řada simulačních programů pro takovou simulaci, bohužel autorovi není znám jediný, který by zohledňoval přítomnost geotermálních vrtů s deformovanou geometrií. Bylo tedy rozhodnuto vyvinout zjednodušený softwarový nástroj založený na numerickém modelu popsaném v kapitole 4 a rozvedeném v kapitole 6.1 k vyšetření tepelných vlastností takových systémů. Cílem bylo poskytnout jednoduché řešení pro pracovníky in situ pro rychlé zjištění změny vlastností systému vrtů a případně poskytnout vodítko pro jeho nápravu. Data pro výpočet poskytuje měření speciálním inklinometrem, software je schopen simulovat systémy obsahující řádově stovky 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 sítí. Na horní hraniční plochu bloku je aplikována Neumannova podmínka nulového přestupu tepla (izolace atmosférou), na boční a spodní plochu pak Dirichletova podmínka předepisující přímo hodnoty teplot [50]. Tyto teploty jsou voleny tak, aby korespondovaly s geotermálním teplotním gradientem. Geotermální vrty jsou simulovány jako myšlené křivky s předepsanou stálou teplotou v bodech jejich průsečíků s vodorovnými vrstvami výpočetní sítě. Předpoklad stejné teploty po délce vrtu je zjednodušením, avšak na druhé straně průběh teploty podél reálného geotermálního vrtu v činnosti vykazuje pouze malé změny [12 str. 51]. Příklad hodnot: uvažovaná teplota horního povrchu 0°C , geotermální gradient $0,02^{\circ}\text{C}/\text{m}$, z čehož vychází teplota boční hranice v hloubce 168 m $3,36^{\circ}\text{C}$, teplota ve vrtech -3°C .

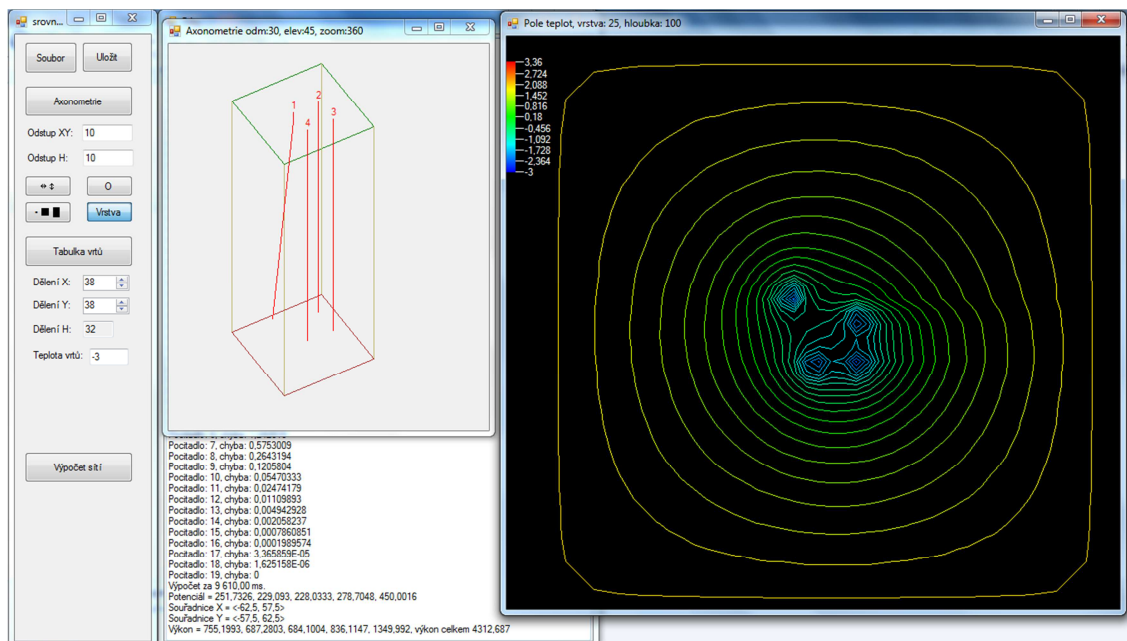
Tyto parametry znamenají, že myšlený kvádr zeminy je vyhříván přilehlým okolním masivem, zatímco teplo je z něj odváděno prostřednictvím simulovaných geotermálních vrtů.

Základní funkce popisovaného softwaru spočívá v následně popsaných činnostech:

- načtení hodnot geometrických charakteristik pole vrtů z formátovaného souboru spolu s případnými dalšími údaji o vrstvení zeminy a tepelných vlastnostech jednotlivých vrstev,
- sestavení pásové matice z rovnic (46) pro výpočet hodnoty teploty v bodě T s využitím diferenčního schématu popsaného v kapitole 7.1.3 Odvození diferenčního schématu pro metodu sítí (viz Obr. 68) případně z jejich modifikací pro body s uplatněnou hraniční podmínkou,
- vyřešení této matice využitím iterační Gauss-Seidelovy metody [36], [37 str. 31].

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 software dokumentuje Obr. 69 s axonometrickým náčrtem řešeného systému ve středu obrázku (čtyři vrty, 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. 69: Snímek obrazovky s řídicím oknem, oknem axonometrického náhledu a oknem teplotního pole.

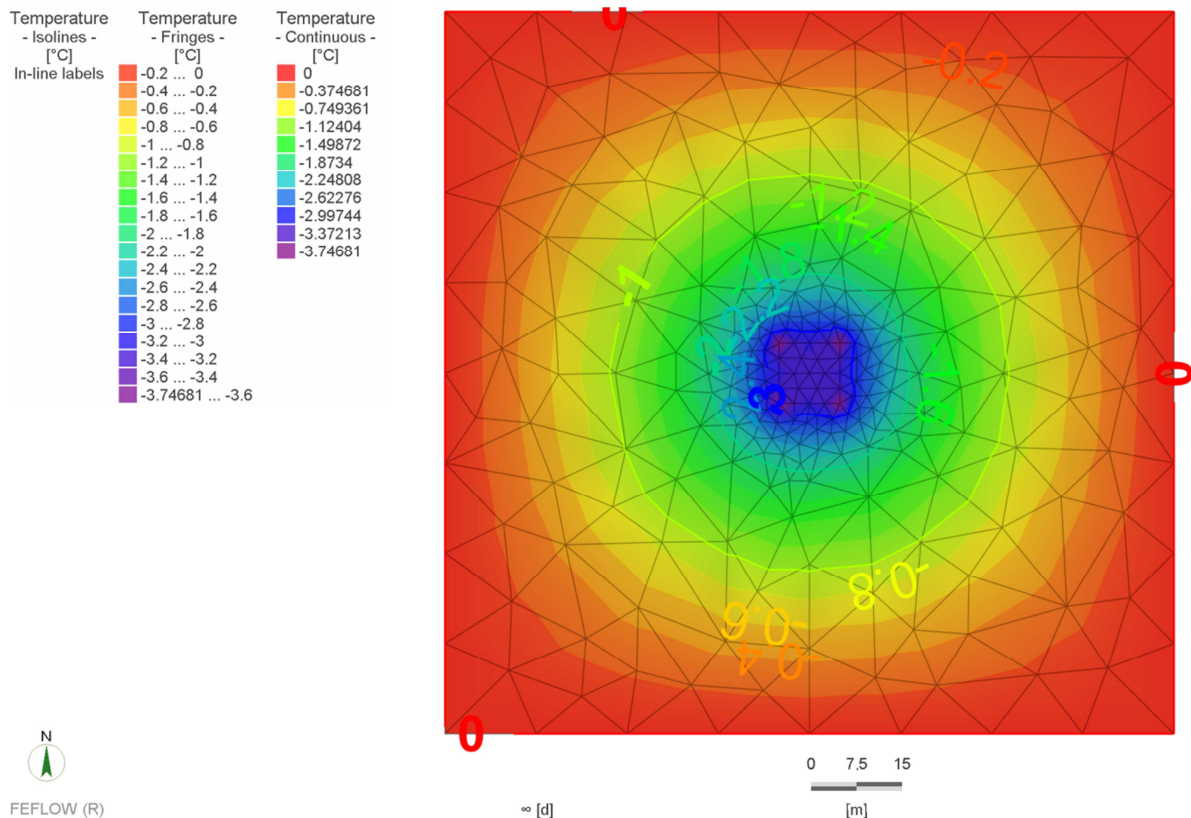
6.2.1 Ověření činnosti software

K ověření výstupů software bylo provedeno několik srovnávacích simulací na výpočetním softwaru FEFLOW. Jedná se o renomované prostředí společnosti DHI-WASY GmbH, německé pobočky DHI Group [39]. Ústav geotechniky FAST VUT v Brně vlastní licenci na toto software, takže jeho použití bylo jen přirozené.

FEFLOW využívá metodu konečných prvků (MKP). V zásadě pracuje s myšleným blokem zeminy (podloží) definovaným jeho půdorysným obrysem a rozměry a jeho tloušťkou (hloubkou uvažovaného podloží). Tento blok je rozdělen do několika vodorovných vrstev. Vrstvy sestávají z individuálních prvků rozdělených vždy stejnou vodorovnou sítí (mesh). Obr. 70 zobrazuje horní vrstvu bloku, jeho rozdělení sítí na jednotlivé prvky a rozdělení teplotního pole řešeného scénáře dle Tab. 13, případ 1.

Bylo srovnáno několik scénářů jak prezentovaným software k rychlému vyhodnocení tepelných vlastností systému vrtů, tak pomocí FEFLOW. Výběr ze scénářů obsahuje Tab. 13. Nejprve bylo provedeno porovnání triviálního scénáře (Tab. 1, 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. 13, případ 2) se liší od prvního pouze tím, že simulovaný geotermální vrt je ukloněný pod úhlem zhruba 3,5° od vvislice. 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 vvislými 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. 13 případ 3. Obě vypočtené výsledné hodnoty (4144,8 W, respektive 3978,2 W) si navzájem odpovídají.



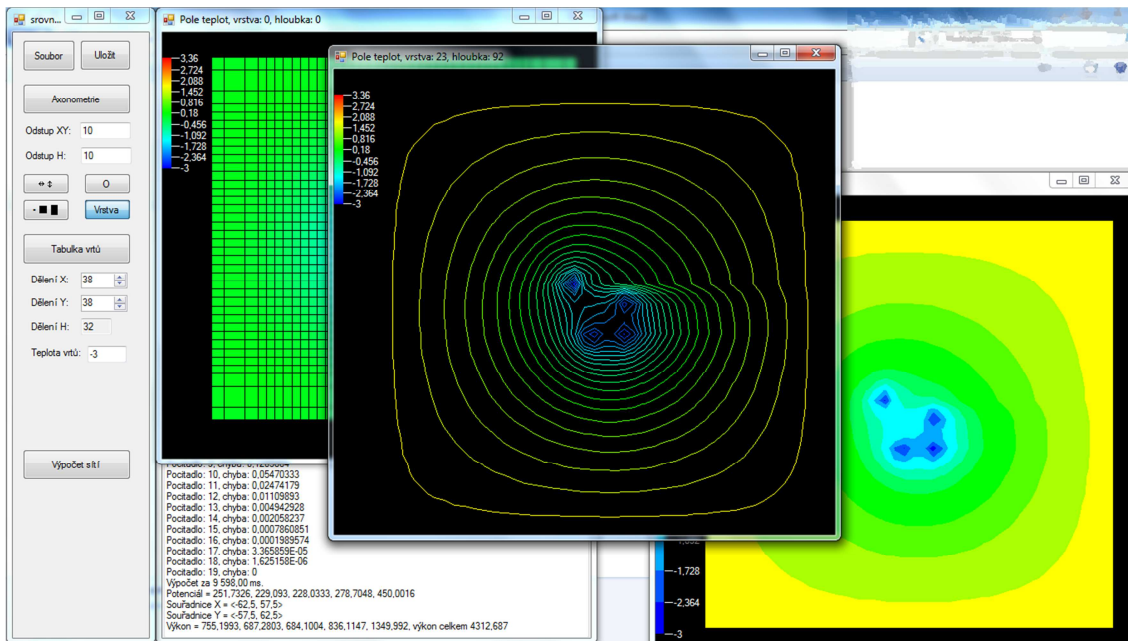
Obr. 70: Horní vrstva (povrch země), vypočítané teplotní pole pro případ 1 (Tab. 13), FEFLOW.

Tab. 13: Srovnávané scénáře problému, zadána tepelná vodivost 3 W.m-1.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	---

*) Vzhledem k tomu, že FEFLOW uvažuje pouze s vertikálními geotermálními vrtvy, byl tento scénář simulován předepsáním teploty uzlům sítě ležícím na ukloněné přímce. Výsledek je tedy méně přesný.

Poslední scénář zahrnuje čtyři vrtvy, z nichž jeden je ukloněn (Tab. 13, 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. Grafický náhled na výsledek simulace tohoto scénáře je na Obr. 71.



Obr. 71: Výsledek případu 4 (Tab. 13), vrty vrтанé pod úklonem zjevně deformují vypočtené pole teplot.

6.2.2 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.

7 Závěr

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 vyšetřovaného vrtu a vyvinout software určený k rychlému vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ. Impulsem pro toto zadání byl jev, ke kterému došlo na VŠB TUO při vystrojování tamního systému vrtů – provrtání již dokončeného vystrojeného vrtu, přičemž podle předpokladu měly být všechny vrty svisle. Tato skutečnost poukázala na to, že ve skutečném systému vrtů mohou odchylky od předpokládané polohy dosáhnout i hodnotu kroku matrice vrtů (při čtvercové matici).

Teoretická část práce věnující se problematice součinnosti systému vrtů prokazuje na konkrétních příkladech provedených simulací vliv geometrického tvaru vrtů na celkové tepelné vlastnosti. Uvedený jev se neprojeví u jediného vrtu, avšak výrazně se uplatní v organizovaných systémech geotermálních vrtů. Je-li systém zhotoven nepřesně a jednotlivé vrty jsou vrtány nepravidelně, výsledné tepelné vlastnosti se zpravidla zhoršují. Výjimkou jsou případy, kdy vrty na hranici systému směřují ven z jeho obrysu, potom zasahují větší objem zeminy v podloží a parametry systému se mohou i vylepšit. Je však třeba poukázat na to, že to může být na úkor případných sousedících uživatelů geotermální energie. 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 zamýšlené 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.

Vývoji speciálního měřicího přístroje předcházela důkladná rešerše k této problematice. Ta potvrdila, že dosud běžně existující zařízení umožňující tvar vrtu přímo změřit nejsou pro geotermální energetické vrty vhodná. Proto byl proveden návrh vlastní konstrukce takového přístroje. V průběhu vývoje bylo zvaženo několik principů činnosti. Zvolena byla varianta podobající se inklinometrickým měřicím systémům určeným pro stanovení posuvů zeminy a využívajícím speciálních vodících pažnic. Výsledkem vývoje je unikátní přístroj, založený na moderních snímačích technologie MEMS, umožňujících v malém a relativně laciném prvku realizovat snímače mechanických veličin. Rozměr těchto prvků odpovídá rozměrům integrovaných obvodů a jejich přesnost obvykle o řády překonává dřívější konstrukce senzorů. Vyvinutá sonda vystrojená takovými senzory umožňuje podobným postupem jako v případě měření výše zmíněným inklinometrem provést měření standardní výměňkovou trubicou vystrojeného geotermálního vrtu. Zařízení prokázalo (s drobnými závadami, znamenajícími spíše drobné vnější doplnění konstrukce) schopnost pracovat v reálném vrtu a poskytovat předpokládaná data. Otázkou zůstává možnost komerčního využití takového zařízení. Největší užitek z nasazení by byl zřejmě u rozsáhlých systémů geotermálních vrtů, obzvláště výhodné se jeví měření provést na systémech vrtů určených pro výzkumné účely. Takových instalací ovšem není mnoho. Zatím se tedy praktická využitelnost vyvinutého měřicího zařízení jeví omezenou především na zmíněné případy experimentálních a výzkumných systémů.

Širší využití dat, která je vyvinutý měřicí systém schopen poskytnout, by měla umožnit vyvinutá softwarová aplikace sloužící k rychlému určení termálních vlastností systému vrtů. Tato aplikace nepočítá s hromadným vstupem údajů získaných z výše zmíněné měřicí sondy, avšak upgrade v tomto směru by nebyl složitý. Software vykazuje

svoji funkčnost v základní oblasti, což je výpočet rozložení teplot v podloží a charakterizace řešeného geotermálního systému jednou skalární veličinou – poskytovaným tepelným výkonem v ustáleném stavu (výkon samozřejmě odpovídá konkrétně zadaným teplotám). Takové charakteristiky 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. Výsledný software v sobě zahrnuje jistá zjednodušení, jím poskytované výsledky nemohou přesností konkurovat specializovaným softwarovým nástrojům v rukou zacvičených odborníků při věrné simulaci konkrétního geotermálního systému, avšak poskytuje výsledky rychle, což má umožnit korekci ještě při budování geotermálního systému in situ. Navíc nejdůležitějším výsledkem nemá být hodnota tepelného výkonu systému, ale rozdíl takových hodnot mezi reálným systémem a jeho návrhem. Zde se případné nepřesnosti v simulaci projeví méně podstatně.

8 Význam práce pro praxi

Výsledkem činnosti při naplnění cílů této disertační práce je použitelný speciální inklinometrický přístroj určený pro měření tvaru geotermálního energetického vrtu vystrojeného tepelným výměníkem s U-trubicí. Přístroj umožňuje proměřit tvar již dohotoveného a osazeného vrtu, pouze je nezbytné zajistit nejméně jeden volný konec trubky tepelného výměníku. Tato schopnost je dosud unikátní. Její využití však nemá velký smysl u izolovaných geotermálních vrtů. Je však velmi důležitá pro velké systémy množství spolupracujících vrtů ve fázi jejich stavby. Ještě zajímavější se jeví tato schopnost u systémů vrtů sloužících pro výzkumné účely, kde dosavadní faktická nemožnost určit skutečný tvar systému v podloží může výrazně ovlivňovat výsledky výzkumem dosahované.

Dalším výsledkem práce, který lze prakticky využít, je software pro rychlé vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ. Tento software předpokládá dostupnost výsledků poskytnutých inklinometrickým měřicím přístrojem, avšak nezávisí na vstupu informací o tvaru geotermálního systému vrtů získaných pouze touto cestou (pokud je možné získat je jinak). Při jeho vývoji byla uplatněna některá zjednodušení, avšak výsledky jím poskytované je přesto možné považovat za hodnotné. Je možné jej použít pro návrh systému geotermálních vrtů a navíc disponuje unikátní možností brát v úvahu jiný než svislý tvar geotermálních vrtů. Je tak možné využít jej i pro studium vlastností geotermálních systémů. Po doplnění metody hromadného zadávání údajů změřených inklinometrickým měřicím přístrojem je možné i jeho využití pro návrh efektivní korekce zjištěných geometrických odchylek ve vrtání při budování systému geotermálních energetických vrtů.

9 Možnosti dalšího pokračování v dané problematice

Zásadní zlepšení parametrů sondy měřicího systému (speciálního inklinometru) by předpokládalo využití senzorů s řádově vyšší přesností. To je v současné době možné, avšak dosažená přesnost zařízení (dle provedených opakovaných měření v řádu ± 1 m na 100 m hloubky vrtu) se pro počáteční stádium využívání tohoto zařízení jeví jako dostatečná. Praktické měření nicméně prokázalo těžkopádnost používání notebooku jako záznamové jednotky. Další vylepšení zařízení by tedy mohlo spočívat ve vývoji jednoduchého specializovaného záznamového zařízení (dataloggeru). Ten by měl být výrazně menší a lehčí než přenosný počítač, což by ulehčilo činnost obsluhy. Rovněž vytrvalost napájecího zdroje by mohla být u takového specializovaného zařízení podstatně vyšší, což by opět zjednodušilo činnost obsluhy a zvýšilo autonomii zařízení. Dále by zřejmě bylo možné vyvinout software na statistické zpracování více měření jednoho vrtu, který by zajistil jednak odfiltrování smyček v půdorysném průmětu vznikajících v důsledku šroubovicového svinutí trubek výměníku, tak také statistické zpracování všech provedených měření a kvantifikaci jejich spolehlivosti.

Jako další oblast vhodnou pro další zlepšení je možné označit uživatelské vlastnosti software pro rychlé vyhodnocení vlastností systémů vrtů in situ. Především by bylo možné doplnit software o automatizované hromadné zavádění dat dříve změřených speciálním inklinometrem. Jinak by totiž zavádění těchto dat v terénu bylo zdoluhavou činností s potenciálem pro vznik množství chyb charakteru překlepu. Další oblastí pak může být postupné rozšiřování schopností software podle praktických požadavků uživatelů. Neoddělitelnou součástí práce na takovém software pak musí být i jeho aktualizace a udržování funkčnosti s inovovanými operačními prostředími používaných počítačů.

10 Literatura

1. 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>.
2. 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).
3. QUICK, H., J. Michael, H. Huber a U. Arslan. History of International Geothermal Power Plants and Geothermal Projects in Germany. 2010, World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010. [Online] <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0605.pdf>.
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 (NPPE), 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. Larderello Worlds First Geothermal Power Station. REUK.co.uk. [Online] UK: REUK – Renewable Energy UK, 2006-2017. [Citace: 18. 10 2017.] <http://www.reuk.co.uk/wordpress/geothermal/larderello-worlds-first-geothermal-power-station/>.
6. MOTLÍK, J., L. Šamánek, J. Štekl, T. Pařízek, L. Bébar, M. Lisý, M. Pavlas, R. Bařinka, P. Klimek, J. Knápek a J. Vaříček. Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR. Praha : ČEZ, a. s. Duhová 2/1444, 2007.
7. 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>.
8. Geothermal Energy in EUROPE. Renewable Energy Resources. [Online] San Diego, California 92120, USA: Global Energy Network Institute - GENI, 2016. [Citace: 17. 01 2017.] <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/europe/geo-europe/indexbig.shtml>.
9. Geotermální energie. OEnergetice.cz. [Online] oEnergetice.cz, 2017. [Citace: 16. 2 2017.] <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/geotermalni-energie/>.
10. Massachusetts Institute of Technology. The Future of Geothermal Energy. [Online] Idaho Falls, Idaho 83415, USA: Idaho National Laboratory, 11 2006. [Citace: 6. 10 2016.]

<http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2006/11/MITEI-The-Future-of-Geothermal-Energy.pdf>. ISBN: 0-615-13438-6.

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. 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.
13. SURYATRIYASTUTI, M.E., H. Mroueha a S. Burlonb. Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Online] 24. 3 2012. http://ac.els-cdn.com/S1364032112001566/1-s2.0-S1364032112001566-main.pdf?_tid=28d1a50e-782d-11e7-9d55-00000aab0f6b&acdnat=1501752282_89dc21700b3be6f76a20b467073af5d0. doi:10.1016/j.rser.2012.02.062.
14. LEITER, A. INSTALACE SNÍMAČŮ TEPLŮTY V ENERGOPILOTĚ. Juniorstav 2013. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2013. ISBN 978-80-214-4669-4.
15. THOLEN, M. a S. Walker-Hertkorn. Arbeitshilfen Geothermie. Bonn : wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2008. ISBN 978-3-89554-167-4.
16. 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>.
17. RAUGEO zemní plošný kolektor. REHAU. [Online] REHAU Česká republika, 2000-2017. [Citace: 22. 01 2017.] <https://www.rehau.com/cz-cs/stavebnictv%C3%AD-podnikatel%C3%A9/obnovitelné-energie/geothermie/zemni-plosny-kolektor-raugeo>.
18. 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=0000000000000000000000200000004&c=rurvrvvfvtnvv1urvrvvfvvvvvfvvvou20evvvvvvvvvnvvuvo&ct=0&ug=8&tl_id=2-A&vs=INTL.35-12-AFG-BKWH.A&cy=2014&vo=0&v=H&end=2015.
19. 2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report. [Online] Washington, DC 20003, USA: Geothermal Energy Association, 3 2016. [Citace: 10. 2 2017.] <http://geo->

energy.org/reports/2016/2016%20Annual%20US%20Global%20Geothermal%20Power%20Production.pdf.

20. 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/>.
21. 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/>.
22. 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.
23. 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/>.
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. 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>.
26. 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/>.
27. 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>.
28. Cabled Boretrak®. [Online] Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK: Renishaw plc., 2017. [Citace: 1. 8 2017.] <http://www.renishaw.com/en/cabled-boretrak--26407>.
29. 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/>.
30. 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-en12geobohrlochvermessv6.html.

31. 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>.
32. 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>.
33. GADE, K. Introduction to Inertial Navigation. [Online] Hoenefoss, Norway: Geodesi- og Hydrografidagene, 2005. [Citace: 3. 8 2017.] http://www.navlab.net/Publications/Introduction_to_Inertial_Navigation.pdf.
34. MPU-6050 - INVENSENSE - MEMS Modul. Farnell. [Online] Leeds, LS12 2QQ, Anglie: Premier Farnell UK Limited., 2017. [Citace: 3. 8 2017.] <http://cz.farnell.com/invensense/mpu-6050/gyro-accel-6-axis-i2c-qfn-24/dp/1864742>.
35. DALÍK, J. NUMERICKÉ METODY II. Brno : Ústav matematiky a deskriptivní geometrie FAST VUT v Brně, 24. 11 2011.
36. 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.
37. 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.
38. Single Data Type (Visual Basic). Microsoft Docs. [Online] Microsoft, 2014. [Citace: 1. 1 2014.] <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/xay7978z.aspx>.
39. FEFLOW. FEFLOW. [Online] Berlin, Germany: DHI WASY GmbH, 2014. [Citace: 17. 1 2014.] http://www.feflow.com/about.html?&tx_ttnews%5btt_news%5d=28.
40. Geotechnical Instrumentation. [Online] Attica, Greece: Set Point Technologies Ltd, 2015-17. [Citace: 9. 6 2017.] http://setpoint.gr/wp-content/uploads/Sireg_Inclinometer_Casing.pdf.
41. Digital Inclinometer System (MEMS). GEOKON. [Online] Lebanon, New Hampshire, USA: GEOKON, INCORPORATED, ©2017. [Citace: 9. 6 2017.] <http://www.geokon.com/GK-604D>.
42. Inženýrská geologie. Institut geologického inženýrství, VŠB-TU Ostrava. [Online] Ostrava: VŠB-TU Ostrava. [Citace: 9. 6 2017.] <http://geologie.vsb.cz/inzgeol/sylaby/09%20Geodynamicke%20procesy/9%202%207%20Svahove%20deformace/Obr%209%202%207%208.jpg>.

43. MEMS. MNX MEMS & Nanotechnology Exchange. [Online] Reston, Virginia, USA: MEMS and Nanotechnology Exchange, 2017. [Citace: 17. 1 2017.] <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>.
44. 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.
45. 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.
46. Inclinomater Automatic Calibrator. Alibaba.com. [Online] Beijing Hekang Science & Technology Development Co., Ltd., 1999-2017. [Citace: 14. 07 2017.] https://bjhekgang.en.alibaba.com/productshowimg/60228689952-800996398/Inclinometer_Automatic_Calibrator.html?spm=a2700.8304367.0.0.22b672a3hL1XLq.
47. JANÍČEK, P. Technický experiment. Brno : Vysoké učení technické v Čs.redakci VN MON, 1989. 55-636-89.
48. ROKYTA, M. Věty Gauss-Ostrogradského, Greenova a Stokesova věta. Matematická sekce RSS. [Online] Praha: Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, 2012. [Citace: 10. 10 2017.] https://www.karlin.mff.cuni.cz/~rokyta/vyuka/1011/ls/F_apl_mat/ApMat_Kap_14_tisk.pdf.
49. DALÍK, J. NUMERICKÉ METODY I. Brno : Ústav matematiky a deskriptivní geometrie FAST VUT v Brně, 27. 4 2011.
50. ROKYTA, M. Aplikovaná matematika IV - kap. 24: Parciální diferenciální rovnice. Matematická sekce RSS. [Online] Praha: Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, 2012. [Citace: 18. 6 2017.] https://www.karlin.mff.cuni.cz/~rokyta/vyuka/1112/ls/F_apl_mat/ApMat_Kap_24_tisk.pdf.

11 Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Vybrané geotermální elektrárny s binárními zdroji, účinnosti tepelných cyklů. [10 str. 243]..	18
Tab. 2: Pořadí států podle instalovaného výkonu geotermálních elektráren (březen 2016). [19 str. 10]	28
.....	28
Tab. 3: Uspořádání výměníků v nejčastěji používaných konfiguracích geotermálních vrtů.....	30
Tab. 4: Souhrnné podstatné vlastnosti v textu uváděných speciálních inklinometrů.	38
Tab. 5: Geometrické charakteristiky jednotlivých vyšetřovaných případů.	46
Tab. 6: Výsledky numerické simulace vedení tepla v poli vrtů.....	46
Tab. 7: Pořadí uvažovaných principů snímání z hlediska složitosti realizace.....	56
Tab. 8: Výběr z parametrů senzoru Analog Devices [44].	58
Tab. 9: Výběr z parametrů senzoru Honeywell [45].	59
Tab. 10: Naměřená data z vrtu 33 u budovy P4 AdMaS.	73
Tab. 11: Pozice v šabloně a jejich relativní pozice vůči počítané pozici T.	90
Tab. 12: Grafické znázornění dopředné, zpětné a centrální diference a vztahy pro první derivaci. [49 str. 53].....	91
Tab. 13: Srovnávané scénáře problému, zadána tepelná vodivost $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, bez podzemní vody.	99

12 Seznam obrázků a ilustrací

Obr. 1: Larderello, Itálie, 1904 - Produkce páry s využitím geotermální energie. [3]	15
Obr. 2: Larderello, Itálie, 1904: Část technologie geotermálního elektrického generátoru, zřejmě pouze pro demonstrační účely. [5], [6]	16
Obr. 3: Mapa geotermálního energetického toku, svět. [7]	17
Obr. 4: Mapa geotermálního energetického toku, Evropa. [8]	17
Obr. 5: HDR (Hot Dry Rock) - schéma technologie. [11], upraveno.	19
Obr. 6: Využití geotermální energie k výrobě elektrické energie, schéma binárního zdroje. [10 str. 242]	20
Obr. 7: Geotermální vrt - trubkový výměník, vlevo jednoduchá U-trubice, vpravo koaxiální typ. [12 str. 20]	21
Obr. 8: Mělká geotermální energie - schéma využití pro chlazení a pro topení. [12 str. 18]	22
Obr. 9: Geotermální vrt (BHTE), průběh teploty v závislosti na hloubce, geotermální teplotní gradient. [12 str. 22]	22
Obr. 10: Schéma budovy, tepelného čerpadla a energopiloty jako zdroje tepla (a) a chladu (b). [13] .	23
Obr. 11: Schéma vinutí tepelného výměníku v armokoši energopiloty. [15]	24
Obr. 12: Hotel Knightsbridge Palace v Londýně, instalace výměníku do armokoše pažící stěny. [16]	25
Obr. 13: Palác Trnitá - řez simulovanou oblastí pod stavbou, barevná škála znázorňuje teplotní pole v režimu chlazení.	26
Obr. 14: Zemní plošný kolektor, vinutí sběrného potrubí před zahrnutím zeminou. [17]	27
Obr. 15: Mapa geotermálního energetického toku, ČR. [20]	29
Obr. 16: Systém mnoha geotermálních vrtů, rozváděcí a sběrný potrubní systém v základech. [25]..	31
Obr. 17: Příklad pole geotermálních vrtů, plán rozváděcího a sběrného potrubí. [25]	32
Obr. 18: Instalace geotermálního výměníku (dvojitá U-trubice) do vrtu. (AdMaS 2013, foto autor) ..	33
Obr. 19: Rodded Boretrak - speciální inklinometr firmy MDL (Renisaw) pro měření průběhu vrtu [27].	35
Obr. 20: Rodded Boretrak firmy MDL (Renisaw) – poskládaný článkový řetěz pro spouštění sondy [27].	36
Obr. 21: Speciální inklinometr firmy MSI s názvem QL40-DEV [29]	36
Obr. 22: Speciální inklinometr firmy Piletest BIT – sonda s vodícími vozíky, naviják a kladka s bluetooth enkodérem [31]	37
Obr. 23: Speciální inklinometr firmy RST Instruments s názvem Borehole-Profile-Sensor – sonda s vodícími nákrůžky [32]	37
Obr. 24: Příklad skutečného tvaru vrtu – nákrus s využitím dat ze speciálního inklinometrického měřicího přístroje.	38
Obr. 25: Zjednodušený matematický model - uvažovaná horninová vrstva, spotřebič tepla v jejím středu a zdroje po jejím obvodu.	41
Obr. 26: Vypočtené pole teplot vyšetřované oblasti pro variantu 1 a 2 dle Tab. 5 (xcel)	43
Obr. 27: Vypočtené pole teplot vyšetřované oblasti pro variantu 4 a 8 dle Tab. 5 (xcel)	43
Obr. 28: Tepelný tok horninovou vrstvou (červené šipky), teplo, procházející od obvodu ke středu Qsrov.....	44
Obr. 29: Horninová vrstva s obecným počtem a polohou vrtů.....	45
Obr. 30: Příklad vizualizace řešené úlohy v prostředí FEFLOW. [39]	47
Obr. 31: Vypočtené pole teplot vyšetřované oblasti pro variantu 1 dle Tab. 5 (FEFLOW).	48

Obr. 32: Xcel - Vypočtené pole teplot pro varianty 8a a 8b dle Tab. 5, pohled shora odhaluje zřetelně zdeformované pole teplot způsobené odchylkou polohy jednoho vrtu ve druhém případě.	49
Obr. 33: FEFLOW - Vypočtené pole teplot pro varianty 8a a 8b dle Tab. 5, pohled shora odhaluje zřetelně zdeformované pole teplot způsobené odchylkou polohy jednoho vrtu ve druhém případě.....	49
Obr. 34: Trubka tepelného výměníku – detailní foto rozměru (foto autor).....	51
Obr. 35: Vlevo zakončení inklinometrické pažnice s částečně vloženou sondou, vpravo průřez pažnice [40].	52
Obr. 36: Přesný inklinometr – buben s kabelem, ovládací jednotka a v popředí sonda [41].	52
Obr. 37: Princip použití přesného inklinometru [42].....	53
Obr. 38: Schéma sondy vybavené závažičkou na lanku - kyvadlem.	54
Obr. 39: Snímání výchylky závažička – kyvadla – pomocí kamery.	55
Obr. 40: Snímání výchylky závažička – kyvadla – pomocí optických snímačů (světelná závora) zapojených do můstku.	56
Obr. 41: Třiosý akcelerometr Analog Devices na tištěném spoji.	57
Obr. 42: Třiosý magnetometr Honeywell na tištěném spoji.....	59
Obr. 43: První prototyp elektroniky sondy, dva moduly tištěných spojů se senzory připojené na třetím uživatelském.	61
Obr. 44: Vrtu na pozemku VUT FAST před budovou B, v popředí vrt č. 5.	62
Obr. 45: Záznam zkoušky magnetometru na dvoře budovy B ze dne 14.9.2012.	62
Obr. 46: První prototyp sondy – demonstrace vložení elektronické a sensorové části sondy do pouzdra (trubky).	63
Obr. 47: Souřadná soustava sondy – válcový objekt naznačuje těleso sondy visící kabelem nahoru (předpokládaná poloha ve vrtu) Bod A'' je koncový bod vektoru zrychlení změřeného sondou.	64
Obr. 48: Souřadná soustava sondy X''Y''Z'' a pootočená soustava X'Y'Z'.	65
Obr. 49: Snímek obrazovky makra – obslužného software – pro komunikaci se sondou.	66
Obr. 50: Závěs automatického kalibračního přístroje pro kalibraci inklinometrů (výrobce Beijing Hekang, [46]).....	67
Obr. 51: Příklad nekorigovaného signálu snímače a odchylky kalibrovaného signálu od skutečné vstupní hodnoty (bližší popis viz text).	68
Obr. 52: Zkušební polygon – zavěšená trubka výměníku v prostoru schodiště budovy B FAST VUT.	70
Obr. 53: Detail upevnění potrubí výměníku v prostoru schodiště budovy B FAST VUT.	71
Obr. 54: Měřený vrt - situace.....	72
Obr. 55: Deformace ústí trubky.	73
Obr. 56: Půdorysný nárys průběhu střednice trubky výměníku vrtu 33 u budovy P4 AdMaS.	74
Obr. 57: Otřepy na povrchu sondy po ukončení měření.....	74
Obr. 58: Sestavená menší „druhá verze“ sondy, předchozí větší verze bez vodících vozíků v pozadí.	76
Obr. 59: Vnitřní elektronická část „druhá verze“ sondy.....	77
Obr. 60: Elektrické schéma inklinometrické sondy do geotermálního tepelného výměníku.	77
Obr. 61: Zhlaví vrtu E0 v blízkosti VEC TU Ostrava.	79
Obr. 62: 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.	80
Obr. 63: „Druhá verze“ sondy připravená ke vložení do potrubí výměníku, v pozadí naviják s kabelem.	81
Obr. 64: Měření u zhlaví geotermálního vrtu sloužícího jako zdroj pro nízkoenergetický dům.	82
Obr. 65: Detail zhlaví vrtu u nízkoenergetického domu, vkládání sondy do měřicího potrubí vrtu.	82

Obr. 66: Půdorysný nárys průběhu střednice měřicí trubky vrtu u nízkoenergetického domu, bod [0,0] je u zhlaví.	83
Obr. 67: Příklad grafické interpretace naměřených dat ze zkušebního polygonu - změřený půdorysný tvar trubice ze tří provedených měření.....	84
Obr. 68: Šablona použitá pro sestavení diferenčního schématu.....	90
Obr. 69: Snímek obrazovky s řídicím oknem, oknem axonometrického náhledu a oknem teplotního pole.....	98
Obr. 70: Horní vrstva (povrch země), vypočítané teplotní pole pro případ 1 (Tab. 13), FEFLOW.	99
Obr. 71: Výsledek případu 4 (Tab. 13), vrty vrtané pod úklonem zjevně deformují vypočtené pole teplot.....	100