

Vliv odchylek geometrického uspořádání a tvaru vrtů na tepelné vlastnosti geotermálního systému

AUGUSTIN LEITER

VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky, Veveří 95, 662 37 Brno
LeiterA@study.fce.vutbr.cz

An effect of variations in geometrical arrangement and the shape of boreholes on thermal properties of the geothermal system

The importance of geothermal energy grows continuously. The heat obtaining from the rock massif is via the borehole heat exchanger. Boreholes with the maximum depth of several hundred meters were studied. The real geometrical shape of the borehole is usually distorted and not perfectly vertical. This influences thermal properties of the borehole system. To determine these properties a simplified numerical model, based on the heat conduction theory, is presented. This model provides the calculated temperature field in the vicinity of borehole system. The article presents several model examples of geothermal borehole systems. The calculated temperature fields demonstrate the thermal properties degradation. However, the prior borehole shape determination is difficult due to the possibly changed conditions during drilling. This phenomenon makes also the theoretical examination difficult.

Key words: geothermal borehole geometry, geothermal borehole deviation, borehole thermal resistance, heat conduction model

Úvod

Využití geotermální energie hraje v dnešní době stále významnější úlohu, což zřejmě souvisí s všeobecně rostoucí poptávkou po energiích. Jednou ze žádaných forem energie je energie tepelná, ať již užívaná k vytápění obytných objektů či v technologických procesech. Tuto energii lze za určitých okolností získat využitím tepla z povrchové vrstvy země, případně z hloubky několika desítek až stovek metrů (geotermální energie horninového masivu). Takováto tepelná energie se vyznačuje poměrně nízkou teplotou teplonosného 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. Schéma využití geotermální energie je na obr. 1.

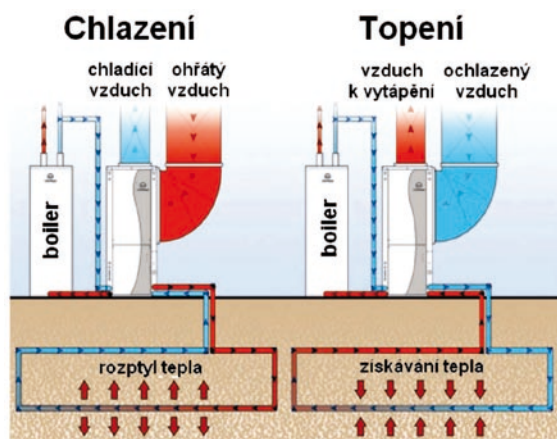
Pro úplnost lze uvést ještě možnost dostat se velmi hlubokým vrtem až k horninám s tak vysokou teplotou, že získané teplo je možné použít v některém z parních cyklů a tím k výrobě elektrické energie. Pro získání dostatečné teploty je ovšem třeba značně hluboký vrt (hloubka řádově v kilometrech) nejlépe v oblastech geologicky vhodných, což jsou například vulkanicky aktivní území nebo pásma kolize litosférických desek (subdukční/riftové zóny), kde je možné přiblížit se poměrně mělkým vrtem k horninám s vysokou teplotou. Na území našeho státu nejsou pro takovéto využívání výhodné podmínky. Dále se v tomto příspěvku autor zabývá pouze systémy s geotermálními vrty o hloubce řádově stovek metrů.

Získávání nízkopotenciálové geotermální energie

Jak tedy vypadá takový běžný systém pro získávání nízkopotenciálové geotermální energie? Buď je vytvořen tepelný výměník na značné ploše povrchové vrstvy země (hloubka cca 1,5 m) a využívá se z velké míry teplo obsažené ve slunečním záření, absorbovaném povrchovou vrstvou. Nebo pronikneme z povrchu do podstatně větší hloubky horninového masivu geotermálním vrtem. Ve vrtu je instalován tepelný výměník – obvykle U-trubice – ve kterém obíhá teplonosné médium (voda smíšená s nemrznoucí a protikoroziční přísadou).

Prostor mezi výměníkem a vnitřním povrchem vrtu se někdy vyplňuje injektážní zálivkou 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 naplní injektážní hmotou s jinými tepelnými vlastnostmi, ta pak 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. Schéma vrtu je na obr. 2.

Pro některé aplikace je výhodné čerpat vodu do výměníku teplejší a nechat ji ochladit. Hmota 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



Obr. 1. Schéma využití geotermální energie masivu pro chlazení a topení.

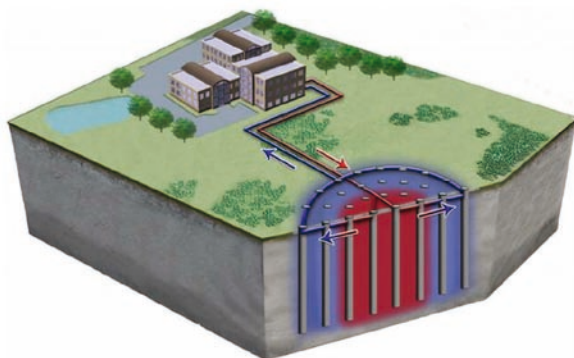
Fig. 1. Scheme of the geothermal energy use for heating and cooling.

velkých městských budov. V létě se do horninového masivu ukládá přebytečné teplo odebírané vzduchu v místnosti („klimatizace“). Teplota masivu stoupá, ukládá se do něj teplo. V zimním období se pak toto teplo uložené z léta využívá pro topení. Takový systém je znázorněn na obr. 3. Balance akumulačního cyklu bývá mírně zlepšena geotermálním teplem (stoupajícím z nitra Země), které do tohoto systému samozřejmě také vstupuje.

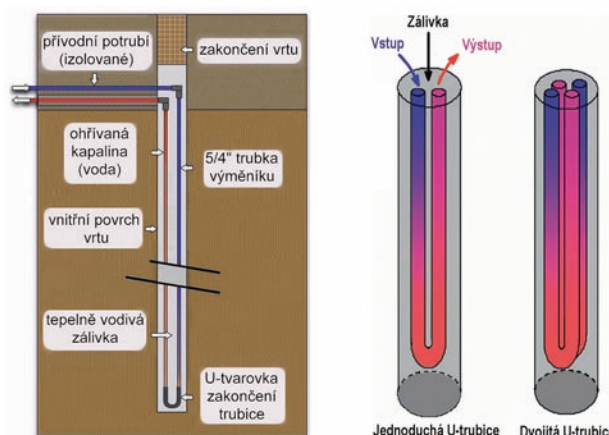
Pro instalace s větším výkonem již nevystačíme s jediným vrtem. Pak tedy bývá tepelný výměník proveden jako pole geotermálních vrtů, což umožňuje pokrytí většího objemu masivu, viz obr. 4. U vrtů organizovaných v poli také obvykle není nutné pronikat do takové hloubky jako u ojedinělých vrtů.

Výpočetní model vedení tepla v okolí vrtů

Pro předvedení některých vlastností pole vrtů autor příspěvku sestavil jednoduchý výpočetní model



léto - chlazení



Obr. 2. Jednoduché schéma geotermálního vrtu s U-trubicí a vrt vystrojený jednoduchou a dvojitou U-trubicí.

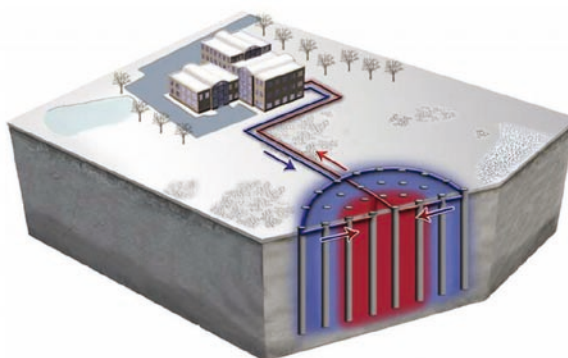
Fig. 2. A geothermal borehole with a U-tube application and a borehole equipped with single and double U-tube.

bezrozměrného řešení úlohy vedení tepla ve vrstvě hmoty jednotkové tloušťky (horninová deska). Model počítá s rozměrem desky 50 x 50 délkových jednotek. Ve středu vrstvy je umístěn spotřebič tepla (propad), který představuje simulovaný vrt (vrty). Vychází se z všeobecně známé rovnice vedení tepla ve tvaru:

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

kde a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] je teplotní vodivost (tepelná vodivost dělená c_p), c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrná tepelná kapacita materiálu, ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota materiálu, T [$^\circ$, K] je teplota jako funkce v prostoru a čase, t [s] je čas, $f = f_0 / c_p$ [$\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$] jsou zdroje tepla v prostoru a čase dělené c_p a Δ je Laplaceův operátor (Dalík, 2011), (Vedení tepla – Wikipedie, 2011).

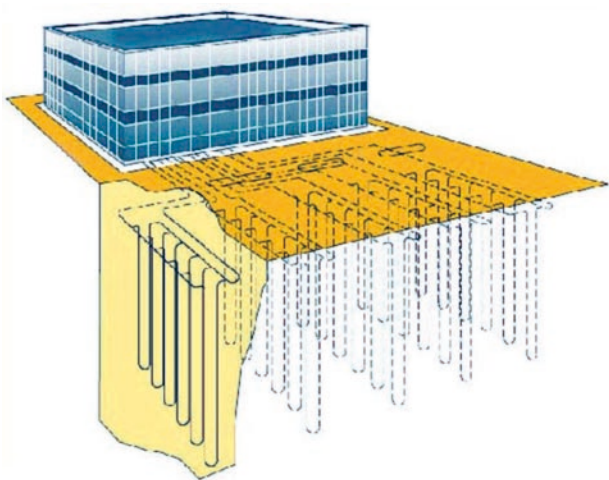
Tato rovnice popisuje vedení tepla pro konstantní teplotní vodivost na vyšetřovaném objemu. Zajímá-li nás pouze ustálený stav a dvourozměrný prostor (= desku jednotkové tloušťky), přechází rovnice (1) pro místa v desce



zima - topení

Obr. 3. Schéma systému geotermálních vrtů provozovaných v chladicím a topném režimu (Underground Energy, LLC – Borehole Thermal Energy Storage – BTES, 2011).

Fig. 3. Scheme of the geothermal wells operated in the cooling and heating modes (Underground Energy, LLC – Borehole Thermal Energy Storage – BTES, 2011).



Obr. 4. Schéma pole vrtů (MENA Geothermal Powers West Bank Palestine Geothermally I Green Prophet, 2012).

Fig. 4. A field of boreholes in schematics visualization (MENA Geothermal Powers West Bank Palestine Geothermally I Green Prophet, 2012).

s diskretními zdroji tepla v bodech se souřadnicemi (X, Y) do tvaru

$$\Delta T(X, Y) = -f(X, Y)/a \quad (2)$$

a pro všechna ostatní místa do tvaru

$$\Delta T(X, Y) = 0 \quad (3)$$

Veličina teplota v tomto vztahu hraje roli pouze v diferenciích, můžeme ji tedy považovat za rozdíl teploty vůči teplotě okolí vyšetřované desky. Stanovme okrajovou podmínku $T_{hr} = 0$ pro oblast okraje desky a $T = T_{srov} = -1$ pro bod uprostřed desky, což je náš uvažovaný vrt. Touto podmínkou předepíšeme, že náš „geotermální“ vrt získáváním tepla způsobí jednotkový pokles teploty a bude tedy odebírat za jednotku času z desky teplo

$$Q_{srov} = \int cp(T - T_{hr}) dx dy \quad (4)$$

Protože však nám jde o srovnání různých variant, můžeme pracovat s tvarem rovnice

$$Q_{srov} / cp = \int T dx dy \quad (5)$$

Tato rovnice popisuje v podstatě přenos tepla z okrajů desky, kde je „vytápěna“ okolím, do jejího středu, kde je umístěn pokusný „geotermální vrt“, který teplo z desky odvádí. Matematický model charakterizují tato zjednodušení:

- neuvažuje s ovlivněním teploty vrstvy mimo zkoumanou oblast,
- nebere v úvahu přestup tepla z vrstev ležících nad a pod uvažovanou vrstvou a tedy i se zdrojem tepla v hlubině Země,
- nezohledňuje nehomogenity tepelných vlastností zkoumané oblasti.

Pomocí výše uvedeného matematického modelu je možné srovnat vzorové uspořádání s jedním vrtem uprostřed desky se situací s více vrtů s různou geometrií a iteračním procesem zjistit potřebné teploty těchto vrtů tak, aby splňovaly podmínku

$$Q = Q_{srov} \quad (6)$$

tedy odebíraly stejnou energii jako srovnávací vrt. Výsledky simulace jsou uvedeny souhrnně v tab. 1. Souřadnice simulovaných „vrtů“ jsou v posledním sloupečku.

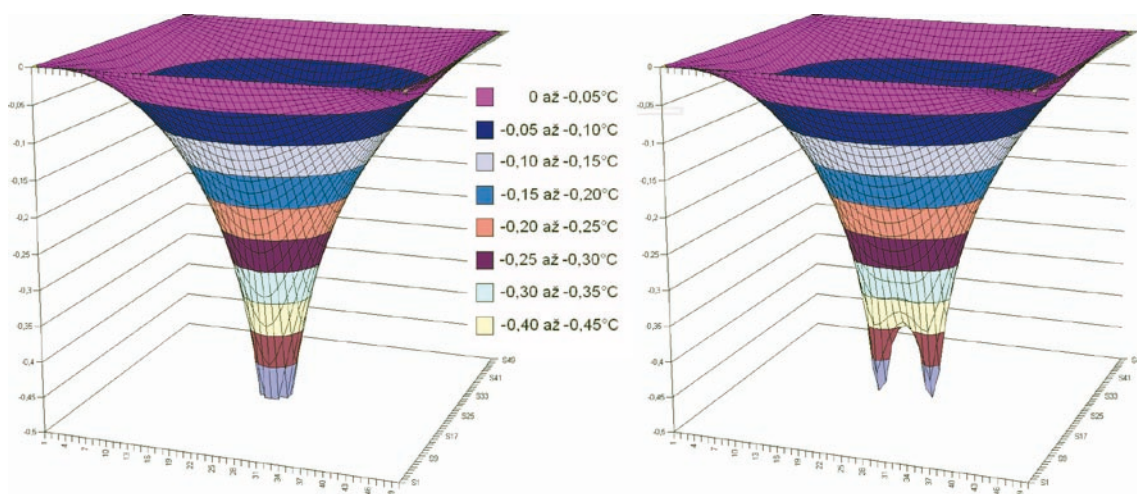
Údaje v tab. 1 ukazují, že nejmenší rozdíl teploty masivu a teploty vody ve vrtu je v případech s více vrtů a rovnoměrně rozděleným odběrem. Tyto systémy vrtů mají proto nejmenší takzvaný tepelný odpor. Pro získávání vody s co nejvyšší teplotou musí být tepelný odpor systému co nejnižší. Z tab. 1 je také vidět, že porušení geometrie vrtů způsobuje zvýšení nerovnoměrností a zvýšení tepelného odporu systému vrtů. Tím se parametry systému zhorší. Graficky ukazují vypočtené výsledky obr. 5 až 10, zobrazená myšlená plocha znázorňuje vypočtené teploty ve vyšetřované vrstvě, na ose z je vyneseno rozdíl teploty. Obr. 11 a 12 ukazují detailně rozložení teplotních rozdílů pro variantu 8a a 8b v půdorysném pohledu.

Skutečný systém geotermálních vrtů

Jako příklad uvedme pole vrtů, které používá Vysoká škola báňská (VŠB) v Ostravě pro vytápění auly a přípravu TUV. Využívá pole 110 geotermálních vrtů, každý o hloubce

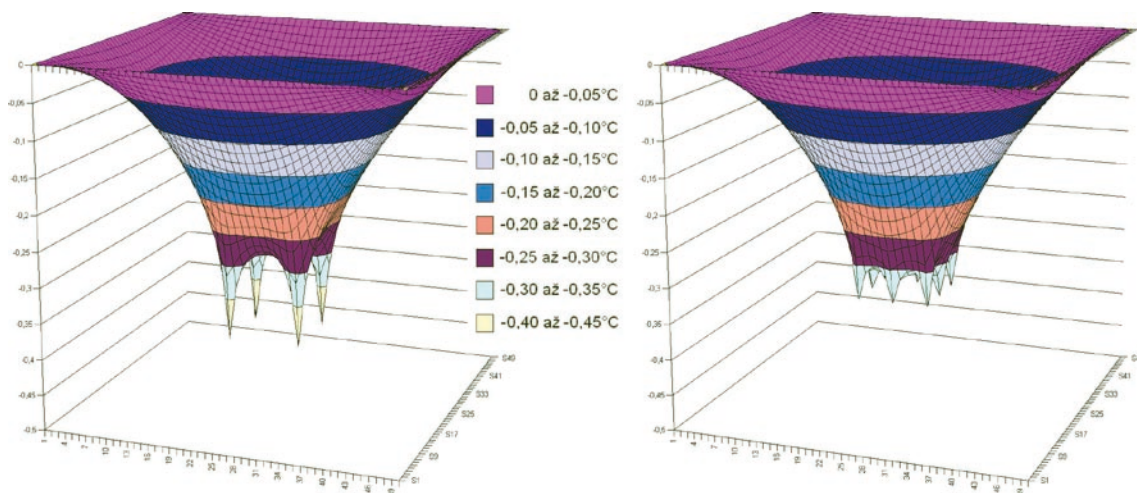
Tab. 1
Výsledky numerické simulace vedení tepla v poli vrtů
The results of numerical simulation of the heat conduction in a field of boreholes

Varianta	Počet vrtů	Poměrné odebrané teplo	Rozdíl teploty na vnější hranici vrstvy a vrtu (vody z vrtu)	Souřadnice vrtů
1	1	1	-1	(25,25)
2	2	1	-0,637	(25,21), (25,29)
4	4	1	-0,410	(20,20), (20,30), (30,20), (30,30)
4a	4 defor.	1	-0,425	deformovaná geometrie vrtů oproti var. 4 (20,20), (22,27), (30,20), (30,30)
8	8	1	-0,350	(20,20), (20,25), (20,30), (25,20), (25,30), (30,20), (30,25), (30,30)
8a	8	1	-0,324	jiná geometrie oproti variantě 8 (19,19), (19,25), (19,31), (25,19), (25,31), (31,19), (31,25), (31,31)
8b	8 defor.	1	-0,330	deformovaná geometrie vrtů oproti var. 8a (19,19), (19,25), (19,31), (25,19), (25,31), (31,19), (31,25), (29,30)



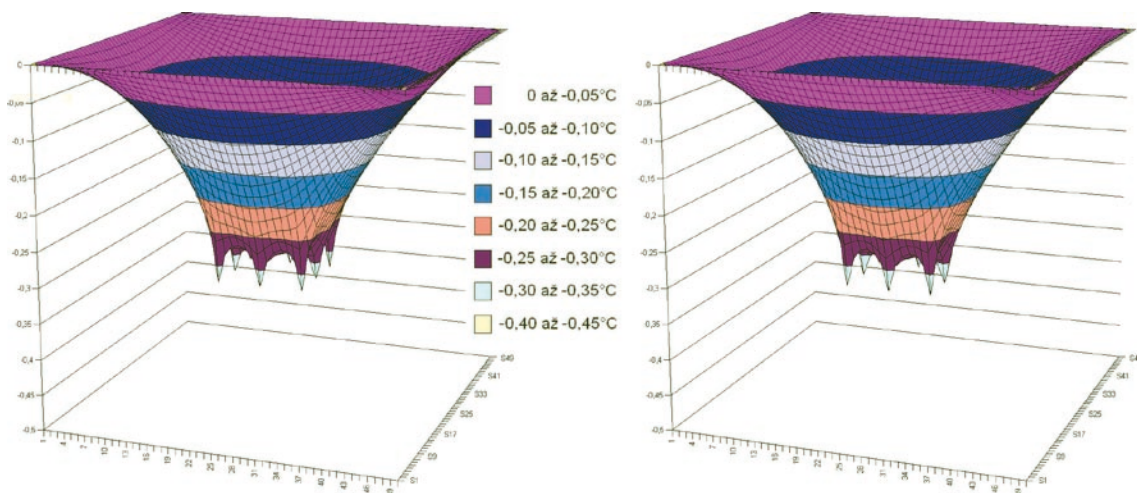
Obr. 5 a 6. Vypočtené pole rozdílů teplot vyšetřované oblasti pro variantu 1 a 2 dle tab. 1.

Figs. 5 and 6. Calculated temperature difference field for variants 1 and 2 according to Tab. 1.



Obr. 7 a 8. Vypočtené pole rozdílů teplot vyšetřované oblasti pro variantu 4 a 8 dle tab. 1.

Figs. 7 and 8. Calculated temperature difference field for variants 4 and 8 according to Tab. 1



Obr. 9 a 10. Vypočtené pole rozdílů teplot vyšetřované oblasti pro variantu 8a a 8b dle tab. 1.

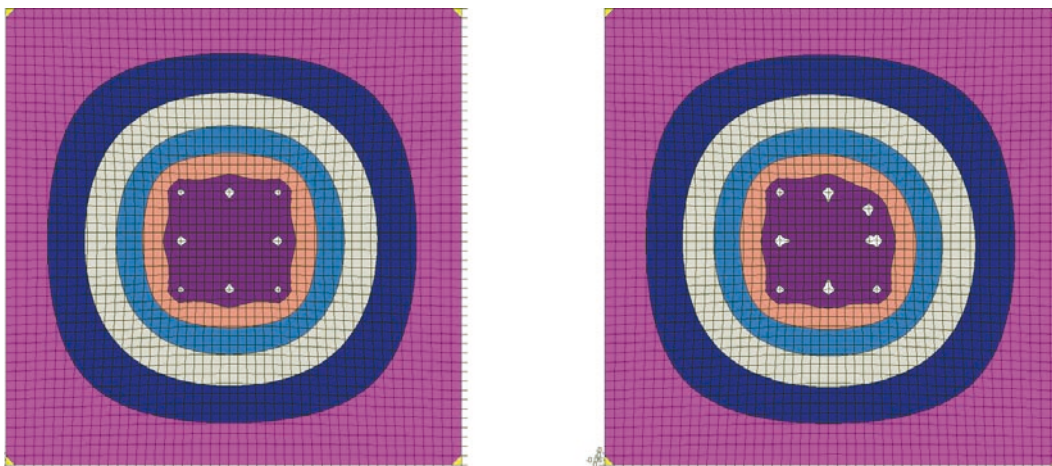
Figs. 9 and 10. Calculated temperature difference field for variants 8a and 8b according to Tab. 1.

142 m. Velký počet vrtů pochopitelně představuje finančně náročnou investici. Proto se v obdobných případech vrtá nejmenším možným průměrem vrtného nástroje, což je běžně 4" (neboli 100 mm). Do vrtu se potom zavede připravený výměník (U-trubice) (www.gerotop.cz, Vysoká škola báňská Ostrava – Gerotop, 2012).

Při výstavbě obdobného vrtného pole došlo k pozoruhodnému jevu. Vrtaná souprava při vrtání provrtala již dříve vyvrtaný a vystrojený vrt, což nezvratně dokazovalo, že vrtý nejsou paralelní a kolmé k zemskému povrchu, ale že jejich geometrie je obvykle mnohem složitější a často má daleko k ideálnímu požadovanému tvaru. Bylo zjevné, že odchylka skutečného tvaru vrtu od zamýšleného může dosáhnout vzdálenosti odstupe sousedních vrtů. Navíc se

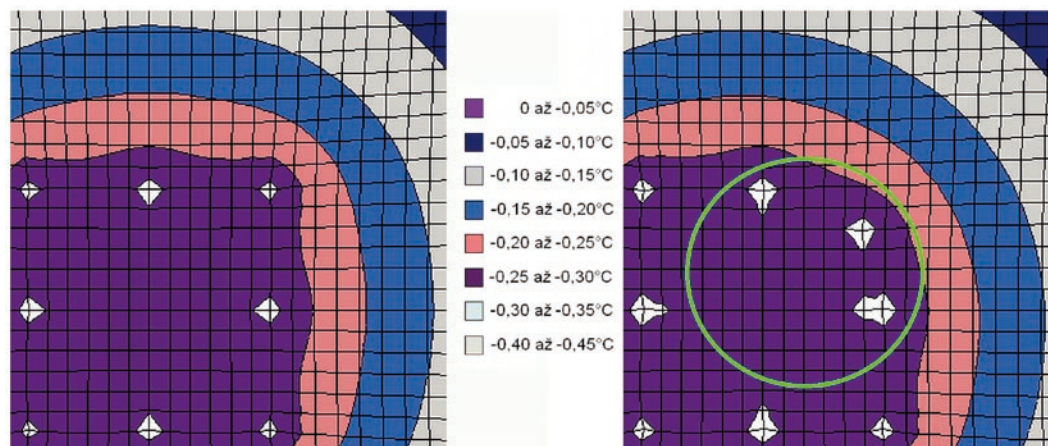
ukázalo, že obsluha vrtné soupravy se proto obvykle snaží vnější vrtý odklonit od kolmice směrem ven z vrtného pole, aby riziko provrtání již hotového vrtu snížila. Hotové pole pak má prostorově vėjířovitý tvar.

Předchozí kapitola se zabývala posouzením vlivu odchylky polohy (tvaru) vrtu na vlastnosti celého vrtného pole. Pokud je pole správně navrženo, odchylka od navržené (optimální) geometrie zvýší nerovnoměrnost tepelného pole a tím tepelný odpor celého pole. Skutečná geometrie vrtů tedy hraje podstatnou roli. VŠB jako výzkumná instituce nepoužívá systém vrtů pouze k topení, ale usiluje i o teoretickou analýzu problematiky. Bohužel nedostatek informací o skutečné geometrii pokusného pole geotermálních vrtů negativně ovlivňuje její činnost v této oblasti.



Obr. 11. Vypočtené pole rozdílů teplot pro varianty 8a a 8b dle tab. 1, pohled shora odhaluje zřetelně zdeformované pole způsobené odchylkou polohy jednoho vrtu ve druhém případě.

Fig. 11. Calculated temperature difference field for variants 8a and 8b according to Tab. 1, view from above reveals clearly distorted field due to position variation of one borehole in the second case.



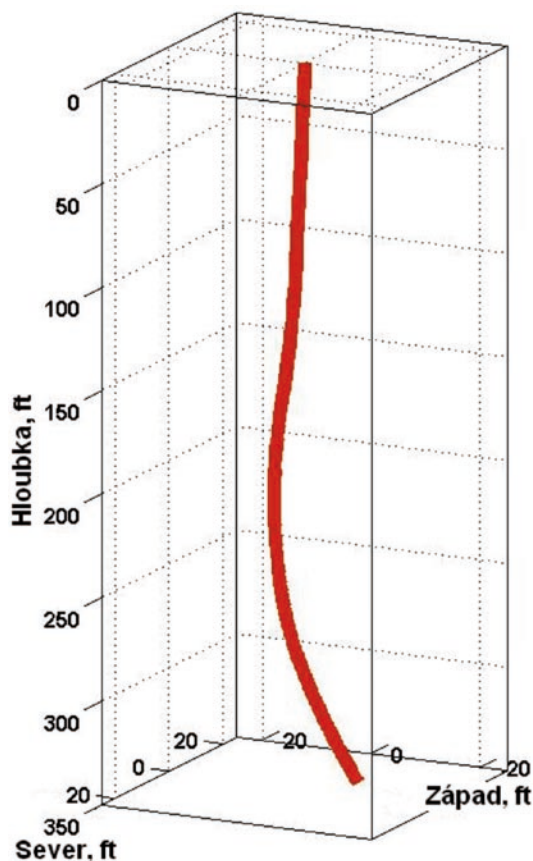
Obr. 12. Vypočtené pole rozdílů teplot pro varianty 8a a 8b dle tab. 1, pohled shora, zvětšený výřez zajímavé oblasti. Pro případ 8b je tato oblast zvýrazněná kroužkem. Ve středu mezi obrázky je barevná škála k obrázkům. Zvětšené plochy vyznačující oblasti s rozdílem teploty $-0,30$ až $-0,35$ °C dle škály signalizují snížení teploty „vrtu“ a tím zvětšení tepelného odporu soustavy a zhoršení celkových vlastností.

Fig. 12. Calculated temperature difference field for variants 8a and 8b according to Tab. 1, view from above, enlarged cutout of the region of interest. In the case of 8b, this area is highlighted by a circle. A color scale is located between the pictures. Enlarged areas of the temperature difference range from -0.30 to -0.35 °C are indicating lowered borehole temperature and increased thermal resistance.

Stanovení geometrie geotermálního vrtu – současné možnosti

Předchozí kapitola se zabývala existencí tvarových odchylek geotermálních vrtů. Je však vůbec možné přesný tvar vrtu v hloubkách stovek metrů pod povrchem určit?

Pro proměření vyvrtaného vrtu se vyrábějí měřicí přístroje se sondou dosti podobnou inklinometrické. Tyto přístroje umožňují často navíc i proměření kruhovitosti příčného průřezu vrtu, mohou být vybaveny širokouhlou kamerou a případně poskytovat ještě další údaje. Postup měření je podobný měření inklinometrem, sonda se zavede do vrtu a postupně se podél délky vrtu zapisují údaje. Příklad zobrazení tvaru vrtu s využitím takto naměřených dat je na obr. 13. Pokud však má být vrt osazen U-trubicí (výměníkem), je nutné to udělat okamžitě po vytažení vrtového nářadí. U-trubice projde 4" průměrem velmi těsně (viz ekonomická hlediska vrtání) a pokud by došlo k prodloužení kvůli proměření vrtu sondou, zkušenosti ukazují, že vznikne riziko zanesení vrtu (například materiálem uvolněným ze stěn vrtu) a tím zmenšení průřezu vrtu. Potom by se jej už nemuselo podařit osadit výměníkem. Z tohoto důvodu je proměření vrtu před osazením U-trubice riskantní až nemožné.



Obr. 13. Příklad skutečného tvaru vrtu – náčrtek s využitím dat z inklinometrického měřicího přístroje.

Fig. 13. An example of a real borehole shape – diagram using data from the inclinometer.

Jsou ještě další metody měření geometrických charakteristik (prozařování, georadar apod.), avšak jejich použití není rozšířené.

Pravděpodobně nejlepší variantou by bylo použití vrtné soustavy se směrovým naváděním vrtného nářadí. Takto vybavené vrtné soupravy existují, avšak jsou finančně náročné a používají se zřídka. Hlavní tíhu obvyklých vrtacích prací nesou vrtné soupravy bez této možnosti.

Závěr

V důsledku odchylek při vrtání se geometrie zhotoveného geotermálního vrtu liší od ideálně svislého tvaru. Díky takovým odchylkám však horninový masiv není z geotermálního hlediska optimálně využíván. Uvedená numerická simulace ukazuje na sníženou účinnost výměny tepla v systému. V některých místech může vznikat riziko tepelného vyčerpání částí masivu („vymrazení“). Přesný tvar vrtu však není znám, neboť zavedené metody pro měření vrtů vesměs nevyhovují z technologického, případně ekonomického hlediska. Specifické požadavky této problematiky by snad mohla splňovat kombinace zavedených metod, konkrétní způsob měření si však zřejmě vyžádá další vývoj. Vzhledem k rozvoji využívání geotermálních systémů se autor příspěvku domnívá, že se pro takovouto specializovanou metodu otevírá širší prostor k použití. Důležitá bude nízká náročnost na provedení měření a s tím spojená jednoduchá opakovatelnost v terénu pro případy velkých počtů vrtů.

Poděkování. Tento příspěvek byl vypracován s finanční pomocí EU „OP Výzkum a vývoj pro inovace“, projekt reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, v rámci činnosti regionálního centra AdMaS „Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“.

References

- MENA Geothermal Powers West Bank Palestine Geothermally I Green Prophet. Green Prophet | Cleantech& Environment News from the Middle East [online]. Copyright 2007 – 2012 [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: <http://www.greenprophet.com/2010/06/mena-powers-palestine-geothermally/>
- DALÍK, JOSEF: Přednáška předmětu Numerické metody II, 2011. In: Fakulta stavební VUT v Brně [online]. [2011] [cit. 2011-11-06]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/struktura/zamestnanec.asp?IDprac=2210&ID=dalik.j>
- Underground Energy, LLC – Borehole Thermal Energy Storage – BTES. Underground Energy, LLC-The Future of Energy Efficient Buildings – Geothermal Energy Storage Consultants [online]. [2011] [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: <http://www.underground-energy.com/BTES.html>
- Vedení tepla – Wikipedie. Wikipedie, otevřená encyklopedie [online]. 21. 12. 2011 [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD_teplo
- Vysoká škola báňská Ostrava – Gerotop. GEROTOP Tepelná čerpadla - Gerotop [online]. Copyright 2000 – 2012 [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: <http://www.gerotop.cz/cs/reference/vysoka-skola-banska-ostava/>

Článek nebol jazykovo upravený.

Rukopis doručený 15. 4. 2012
Revidovaná verzia doručená 22. 5. 2012
Rukopis akceptovaný red. radou 16. 4. 2012