

Zkušební s realizací testu teplotní odezvy ve vrtech pro tepelná čerpadla

Jiří Ryška¹

Experiences with performing a thermal response test in boreholes for heat pumps

This paper presents a Thermal Response Test (TRT) performed in two testing boreholes for heat pumps in the Czech Republic. The TRT is a special in-situ technique used abroad for the determination of key parameters needed for the proper borehole design: the undisturbed ground temperature, thermal conductivity of rock mass and the borehole resistance.

Key words: thermal response test, heat pump, borehole

Úvod

Určení adekvátní hloubky vrtu pro tepelné čerpadlo v závislosti na geologických podmínkách lokality a objektem požadovaném topném/chladicím výkonu je kritickým parametrem celého projektu vytápění/chlazení pomocí tepelných čerpadel. Testy teplotní odezvy slouží pro stanovení některých fyzikálních vlastností hornin pomocí měření ve vystrojeném vrtu. Tyto vybrané fyzikální vlastnosti hornin slouží jako jedny ze vstupních hodnot software EED 2.0, který je v Evropě používán pro dimenzování hloubek vrtů.

Testy teplotní odezvy

Základním problémem pro určení adekvátních hloubek vrtů je určení vybraných fyzikálních vlastností hornin na dané lokalitě. V první fázi byly fyzikální vlastnosti určovány laboratorně na vzorcích hornin upravených z vrtných jader. Tato metoda má však tyto podstatné nedostatky:

- vlastnosti hornin jsou určovány bez ohledu na některé úložní podmínky – např. přítoky podzemních vod do vrtu,
- jádrování vrtu je nákladné – zvláště v proměnlivých geologických podmínkách,
- není možné zjistit vliv vystrojení vrtu na přenos tepla ze stěny vrtu do plastového vrtového výměníku – tzv. kolektoru.

Proto výzkumní pracovníci (Švédsko, USA) vyvinuli speciální polní zkoušku – test teplotní odezvy, která na základě přestupu tepla z plastového kolektoru do horninového masivu zjišťuje tepelné vlastnosti hornin. Tento test byl postupně vyvíjen ve Švédsku a USA, a to od začátku 90. let. V Evropě je znám pod názvem Thermal Response Test (dále TRT).

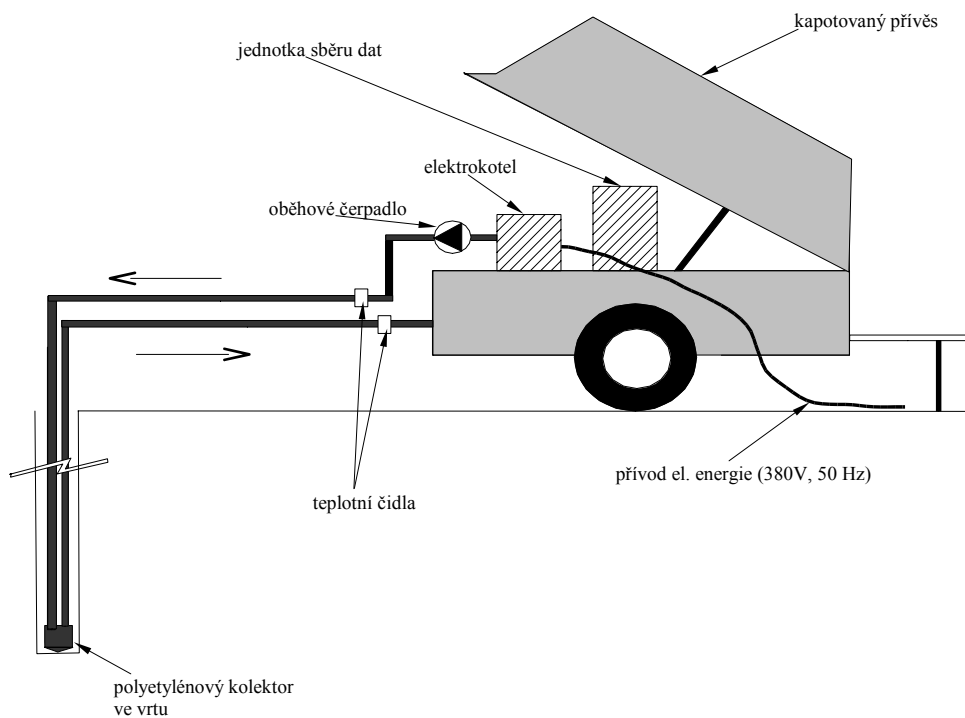
TRT je realizován na dané lokalitě ve zkušebním vrtu, který je vystrojen stejně jako standardní vrt pro tepelné čerpadlo. Účelem testu je zjistit hodnoty:

- tepelné vodivosti hornin λ ,
- celkového tepelného odporu ve vrtu R_b ,
- teploty neovlivněného horninového masivu T_{ug} .

a to jako jedinou „agregátní“ hodnotu reprezentující celý vrt. Tyto fyzikální parametry hornin jsou následně dosazeny do software EED 2.0, který vypočte adekvátní hloubky vrtů pro zadané požadavky objektu na tepelný a chladicí výkon. Adekvátní hloubky vrtů jsou takové hloubky, které zajistí, aby v čase nedocházelo k nevrátnému vychlazení horninového masivu. Zkušební vrt se pak stane součástí projektovaného pole vrtů pro vytápění/chlazení objektu. Schéma testovací aparatury je na Obr. 1.

Principem TRT testu je zpravidla řízené vytápění horninového masivu pomocí kolektoru ve vrtu po dobu 50 – 70 hodin nepřetržitě. Přitom jsou snímány teploty kapaliny v kolektoru na vstupu a výstupu z vrtu v závislosti na době trvání zkoušky a z jejich vyhodnocení jsou určovány výše uvedené fyzikální vlastnosti hornin.

¹ Ing. Jiří Ryška, OKD, DPB, a.s. Česká republika
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 11. 8. 2006)



Obr. 1. Zjednodušené schéma mobilní měřicí aparatury pro realizaci TRT na vrtu.
 Fig. 1. Simplified scheme of the mobile measuring equipment for realizing TRT borehole.

Teoretické základy pro vyhodnocení TRT testů

V současné době je ve světě nejrozšířenější analytické řešení testů TRT, které vychází z následujících předpokladů:

- přestup tepla v horninách je čistě kondukční,
- kolem osy vrtu platí radiální symetrie,
- vedení tepla podél osy vrtu je zanedbatelné.

Při vytápění vrtu elektrokotlem tepelný odpor R_b mezi kapalinou v kolektoru a stěnou vrtu podmiňuje teplotní rozdíl mezi teplotou kapaliny v kolektoru T_f a teplotou hornin na stěně vrtu T_b pro zvolenou konstantní hodnotu q topného výkonu elektrokotle vztaženého na 1m hloubky vrtu:

$$T_f - T_b = R_b \cdot q \quad (1)$$

kde

- T_f teplota kapaliny v kolektoru [K],
- T_b teplota hornin na stěně vrtu [K],
- R_b tepelný odpor mezi kapalinou v kolektoru a stěnou vrtu [K/Wm],
- q topný výkon elektrokotle vztažený na 1m hloubky vrtu [W/m].

Teplota T_f je definována jako průměr vstupní a výstupní teploty kapaliny v kolektoru, který je vytápěn pomocí elektrokotle. Teplotní odpor vrtu R_b je dán součtem odporu materiálu trubek kolektoru a injektážní směsi ve vrtu.

Rovnice pro teplotní pole v okolí vrtu dle Carslaw a Jaegera je funkcí času t a poloměru r kolem liniového zdroje (tj. kolektoru vytápěného elektrokotlem) s konstantním q :

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1(r^2 / 4at) \quad (2)$$

kde E_1 je tzv. exponenciální integrál, pro vysoké hodnoty parametru at/r^2 může být aproximován jednoduchým výrazem:

$$E_1(r^2 / 4at) = \ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \quad \frac{at}{r^2} \geq 5 \quad (3)$$

γ ... Eulerova konstanta = 0,5772

λ tepelná vodivost hornin [W/mK].

Teplotní vodivost hornin a :

$$a = \lambda / c_p \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (4)$$

c_p měrná tepelná kapacita horniny [J m^{-3}].

Rovnici (1) lze převést na tvar:

$$T_f(t) = T_b(t) + q * R_b \quad (5)$$

Pak funkce závislosti teploty nemrznoucí směsi v závislosti na čase má tvar:

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right) + q * R_b + T_{ug} \quad (6)$$

T_{ug} teplota neovlivněného horninového masivu [K].

Při vyhodnocování dat z TRT testu se vypouští prvních 10 - 15 hodin měření: v této periodě dochází k překonávání tepelného odporu vrtu a ustálení teplotních poměrů v okolí vrtu. Vlastní vyhodnocení testu TRT je prováděno pomocí matematického modelu na základě metody konečných rozdílů: cílem je určení hodnot tepelné vodivosti λ a tepelného odporu vrtu R_b tak, aby bylo dosaženo nejlepší shody – tj. nejmenšího rozdílu - mezi naměřenou a vypočítávanou křivkou závislosti teploty kapaliny v kolektoru T_f na době testování t .

Praktické zkušenosti s TRT testy v České republice

První TRT testy byly v České republice provedeny v dubnu 2005 na lokalitě Ostrava – Poruba, kde probíhala výstavba auly a centra informačních technologií pro technickou univerzitu – Vysokou školu báňskou. Testy byly vyhodnoceny doc. Göranem Hellströmem z Lund University (Švédsko), který je také autorem návrhu švédské mobilní testovací aparatury – viz Obr. 2.



Obr. 2. Testovací zařízení na zkušebním vrtu pro technickou univerzitu VŠB v Ostravě.

Fig. 2. Testing equipment at the borehole of Technical University V+SB in Ostrava.

V první fázi byly odvrtny dva zkušební vrty o hloubce 130 m, které jsou od sebe vzdáleny cca 150 m a lokalizované v projektovaném poli vrtů pro tepelná čerpadla. Účelem bylo ověřit vliv případné změny geologických podmínek na výsledky testu. Oba vrty byly standartně vystrojeny (dvoutrubkový PE-kolektor $\varnothing 40\text{mm}$, injektáž stvolu vrtů) pro budoucí připojení k tepelnému čerpadlu.

Geologické poměry ověřené 2 zkušebními vrty byly následující:

Geologie/Vrt	Vrt č. 1	Vrt č. 2
kvartér	0 – 14,2m: jíly, štěrkopíský, jílovité písky, nepatrný přítok vody	0 – 14m: jíly, štěrkopíský, jílovité písky, nepatrný přítok vody
miocén	14,2 – 62m: tuhé jíly, žádný přítok vody	14 – 83,5m: tuhé jíly, žádný přítok vody
spodní karbon	62 – 130m: jílovce, prachovce s polohami pískovců, silný přítok vody v cca 105m	83,5 – 130m: jílovce, prachovce s polohami pískovců, žádný přítok vody

TRT aparatura byla pomocí rychlospojek napojena na ústí kolektoru – napojení bylo obaleno izolační hmotou, aby se zabránilo ovlivnění testu teplotou ovzduší. V první fázi byla po určitou dobu cirkulována kapalina v kolektoru bez zapojení elektrokotle. Tímto způsobem byla zjištěna teplota neovlivněného horninového masivu T_{ug} jako jediná „agregátní“ hodnota pro celý vrt. Poté byl zapnut elektrokotel a po dobu několika dnů probíhal nepřetržitě vlastní TRT test.

Průběh testů ve zkušebních vrtech včetně vyhodnocených tepelných vlastností hornin je uveden v následující tabulce:

Parametr	Vrt č. 1	Vrt č. 2
Topný výkon do vrtu	8,2 kW	7,6 kW
Průměr, litráž čerpadla při testu	0,83 l/s	0,87 l/s
Doba vytápění vrtu elektrokotlem	71,5 hodin	93,3 hodin
Teplota T_{ug}	10,8 ^o C	10,8 ^o C
Tepelná vodivost hornin λ	2,2 W/mK	2,1 W/mK
Tepelný odpor R_b	0,16 K/Wm	0,12 K/Wm
Injektážní směs	cement + bentonit	Stüwatherm 2000Z

Je zřejmé, že hodnoty jsou velmi blízké – nižší tepelný odpor R_b ve vrtu č. 2 byl dán typem aplikované injektážní směsi – jednalo se o speciální pytlouvanou směs cement + bentonit + křemitý písek. Cílem bylo snížit tepelný odpor vrtu R_b pomocí směsi s lepší tepelnou vodivostí, která je dána přítomností tříděného křemitého písku.

Stanovení celkového počtu vrtů pro vytápění objektu tepelnými čerpadly

Výsledky TRT testů měly být podkladem pro výpočet celkového počtu vrtů nezbytného pro vytápění objektu auly + CIT VŠB v Ostravě. Vzhledem k nedostatku finančních prostředků na zadání výpočtu univerzitě v Lundu byl proveden odborný odhad. Tento odhad vycházel z:

- analogického případu - vytápění městské víceúčelové haly v Opavě tepelnými čerpadly s vrty,
- zahraničních zkušeností v obdobných geologických podmínkách (Německo),
- orientačního výpočtu metráže vrtů pomocí software EED 2.0 .

Základní vstupní údaje pro kvalifikovaný odhad byly převzaty z energetického auditu stavby auly + CIT VŠB:

- topný výkon tepelných čerpadel: 650 kW
- očekávaný chladicí výkon tepelných čerpadel: 325 kW
- tepelná energie vyrobená tepelnými čerpadly za rok: 1 352 MWh

Odborný odhad na základě analogického případu - vytápění městské víceúčelové haly v Opavě tepelnými čerpadly

Porovnáním geologických podmínek vyplývá, že:

- na lokalitě Opava se vyskytovaly přítoky podzemní vody v kvartérních štěrkopískách a u mnoha vrtů také v pískových vložkách v miocénu
- na lokalitě Ostrava – Poruba se přítok podzemní vody vyskytl jen na jednom ze dvou zkušebních vrtů, jinak byly oba vrty bez zvodnění
- na lokalitě Ostrava – Poruba byly navíc zastíženy skalní horniny spodního karbonu – jejich reliéf asi bude hloubkově kolísat (zkušební vrty vzdáleny od sebe cca 150m a přitom rozdíl v hloubce reliéfu karbonu činí cca 20m)

Z technického hlediska lze orientačně stanovit tepelný zisk z jednoho hloubkového metru vrtu. Např. na lokalitě Opava se bude jednat o podíl celkového topného výkonu (tj. 455 kW) a celkové metráže vrtů (tj. 8 100m). Tepelný zisk z jednoho metru vrtu takto orientačně určený činí cca 56 W m⁻¹. Na lokalitě Ostrava – Poruba lze konzervativně předpokládat horší tepelný zisk z důvodu nižších přítoků podzemních vod. Na základě německých zkušeností s obdobnými geologickými podmínkami („suché“ jíly + skalní horniny) a z nutnosti zabránit možnému pozvolnému dlouhodobému vychlazení horninového masivu

velkým množstvím vrtů napojených na tepelná čerpadla tepelný zisk na lokalitě Ostrava – Poruba lze předpokládat na úrovni cca 45 W m^{-1} . Tato orientační hodnota znamená, že pro požadovaný celkový topný výkon tepelných čerpadel bude potřeba 14 500m vrtů – tj. 112 vrtů o hloubce 130 m.

Dlouhodobému vychlazování horninového masivu bude rovněž zabráněno klimatizací objektu auly + CIT - tzn., že v letním období bude přebytečné teplo z objektu uskladňováno do vrtů, ze kterých bude naopak využíváno relativního chladu horninového masivu.

Orientační výpočet metráže vrtů pomocí software EED 2.0

Na základě parametrů energetického auditu, výsledků TRT testů a znalosti litráže oběhového čerpadla na primární straně tepelného čerpadla ($Q = 3,4 \text{ m s}^{-1}$) byl proveden orientační výpočet celkové metráže vrtů pomocí software EED 2.0 s následujícími výsledky:

Vrty/typ inj. směsi	Inj. směs „klasická“	Inj. směs s křemitým pískem
hloubka vrtů	130 m	130 m
orientační celková metráž	15 000 m	14 000 m
počet vrtů	116	108

Tento výpočet je nutné chápat jako orientační z následujících důvodů:

- není zohledněno „dobíjení“ vrtů tepelnou energií odebranou z objektu při jeho klimatizaci,
- spotřeba tepelné energie v objektu po jednotlivých měsících byla do software dosazena pouze orientačně bez hlubší analýzy,
- v ČR se jedná zatím o první pokus takového výpočtu pro velký stavební objekt a z toho vyplývají malé zkušenosti autora s tímto software.

Závěr

Vytápění velkých objektů pomocí tepelných čerpadel s řádově desítkami vrtů je nezbytné provádět dle projektu vrtů stanovených na základě vyhodnocení TRT testů. Aparatury pro TRT testy mají k dispozici v USA (dokonce již v kufříkovém provedení), Kanadě, Švédsku, Německu, Holandsku, Norsku, Švýcarsku, Velké Británii a Turecku.

TRT testy včetně kompletního vyhodnocení jsou zatím finančně (cca 7 500 EURO test⁻¹) a časově náročné – proto jsou aplikovány u objektů s mnoha vrty. Jsou však vyvíjeny metody vyhodnocení, které by mohly vést ke zkrácení těchto testů.

V České republice byl proveden první TRT test na 2 zkušebních vrtech pro vytápění auly a centra informačních technologií Vysoké školy báňské v Ostravě. Tato akce byla spolufinancována Českou energetickou agenturou. Vyhodnocení těchto testů TRT bylo provedeno švédským odborníkem. Následný výpočet celkového počtu vrtů byl proveden orientačně z důvodu nedostatku finančních prostředků na jeho zadání zahraničním odborníkům. V konečné fázi bylo rozhodnuto o realizaci celkově 120 vrtů o hloubce 130 m (celková metráž: 15 600 m) z důvodu použití „klasické“ injektážní směsi (Stuwatherm způsobuje problémy na čerpací technice) a ponechání určité rezervy topného výkonu horninového masivu. Instalace tepelných čerpadel včetně realizace vrtů budou z velké části hrazeny z prostředků Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva životního prostředí.

References

- Eskilson, P.: Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. *Sborník referátů, University of Lund, Švédsko, 1987.*
- Hellström, G., Sanner, B.: Earth Energy Designer, *Version 2.0. Uživatelský manuál software, 2000, University of Lund, Švédsko.*
- Gehlin, S.: Thermal Response Test. *Doctoral thesis, 2002, Lulea University of Technology.*
- Kunz, A., Ryška, J., Koníček, J., Bujok, P.: Využití horninového prostředí jako stálého efektivního zdroje energie pro tepelná čerpadla. *Sborník přednášek „Nové poznatky v oblasti vrtání, těžby, dopravy a uskladňování uhlíkovodíků. Podbáňské 2002, s. 69-75, ISBN 80-7099-895-4*
- Belica, P., Křupka, J.: Aula a CIT VŠB - TU Ostrava – Poruba. *Energetický audit 2004.*
- Grmela, A., Aldorf, J.: VŠB – Technická univerzita Ostrava, aula + CIT vrty pro tepelná čerpadla na parc. 1738/30 a 1738/37, k.ú. Poruba. *Projekt vodního díla pro územní rozhodnutí a stavební povolení, 2005.*
- Ryška J.: Prováděcí projekt vrtů pro tepelné čerpadlo č. DPV – 047-02-03-2005. *OKD, DPB, a.s.*