

Dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla

Jiří Ryška¹

Dimensioning of Boreholes for Geothermal Heat Pumps

The paper deals with determination of borehole depths for geothermal heat pumps. Basic formulae are stated for heat convection in rocks. Software EED 2.0 was used for calculation of borehole depth depending on different entering parameters. The crucial parameter is thermal conductivity of rocks. The thermal conductivity could be very variable for the same kind of rock. Therefore its in-situ determination by means of formation thermal conductivity testing is briefly described.

Key words: dimensioning of Boreholes, thermal conductivity, thermal conductivity

Úvod

Konvenční systémy vytápění stavebních objektů doposud ve velké míře využívají spalování neobnovitelných zdrojů energie – fosilních paliv (uhlí, nafta, zemní plyn, propan). Přitom dochází k uvolňování CO₂ do atmosféry, což má jednak negativní vliv na kvalitu ovzduší a jednak přispívá ke globálnímu oteplení.

Průmyslově vyspělé státy ve snaze zmírnit tento nepříznivý vývoj začaly používat k vytápění systému přenosu tepla z jednoho místa na druhé, aniž dochází ke spalování. K těmto systémům patří např. tepelná čerpadla.

V současné době je přibližný počet instalací tepelných čerpadel ve vybraných zemích následující:

Stát	Počet tepelných čerpadel (ks)
USA	750 000 (mimo vzduchová TČ)
Švédsko	360 000
Rakousko	160 000
Česká republika	2 400

Horniny jako vodiče tepla pro tepelná čerpadla

Vzhledem k tomu, že tepelné čerpadlo při napojení na kolektor ve vrtu vyvolá v okolí teplotní nerovnováhu, dochází neustále k přenosu tepla v horninách směrem k vrtu. Tento přenos tepla se uskutečňuje především vedením (kondukcí): tzn., že teplo se předává pouze vlněním krystalické mřížky minerálů tvořících horniny. Populárně bývá také označováno jako „suché“ zemské teplo, aby bylo odlišeno od tepla přenášeného prouděním těles podzemních vod (konvekce).

V homogenním izotropním prostředí se šíření tepla vedením řídí Fourierovou rovnicí:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

a součinitel teplotní vodivosti (m²/s)

T teplota (K)

T čas (s)

Součinitel teplotní vodivosti a hornin udává rychlost vyrovnání teploty v horninovém prostředí:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

¹ Ing. Jiří Ryška, CSc., OKD, DPB, a.s., 739 21 Paskov, Česká republika (Czech Republic)
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 3.9.2004)

λ	měrná tepelná vodivost hornin (W/mK)
c	měrná tepelná kapacita hornin při konstantním tlaku (J/kgK)
ρ	přírozená hustota hornin (kg/m ³)

Měrná tepelná vodivost hornin λ je pro danou horninu v izotropním homogenním prostředí konstantou, která charakterizuje schopnost horniny vést teplo. Tento parametr je složitou funkcí především mineralogického složení, strukturně texturních vlastností horniny, její hustoty, pórovitosti a obsahu vody v hornině. Může vykazovat anizotropii, ve větších hloubkách je též funkcí teploty a tlaku v horninách, avšak tuto závislost můžeme zanedbat, protože vrty pro tepelná čerpadla jsou většinou realizovány do hloubky pouze 150m. Měrná tepelná vodivost hornin nabývá nejvyšších hodnot pro křemen ($\lambda = 8,4$ W/mK), zatímco pro některé jíly a jílovce je nejnižší ($\lambda = 0,4 - 0,8$ W/mK). U většiny hornin zemské kůry se tento parametr pohybuje v rozmezí $\lambda = 2,1 - 4,2$ W/mK.

Právě měrná tepelná vodivost hornin má z horninových parametrů zcela zásadní význam pro dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla.

Dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla

Jednou ze stěžejních prací zabývajících se problematikou dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla je práce P. Eskilsona a kol. (1), která se stala základem pro výpočtový software Earth Energy Designer (EED) 2.0. Tento software umožňuje formou jednoduchých dialogových oken s databázemi vstupních parametrů rychlý výpočet průměrné teploty nemrznoucí směsi v kolektorech pro zvolenou hloubku vrtů nebo výpočet hloubky vrtů pro zvolené rozmezí teploty nemrznoucí směsi v kolektorech.

Pro analýzu citlivosti hloubky vrtů na různých vstupních parametrech uvádím výsledky modelování pro rodinný dům s celkovými tepelnými ztrátami 15 kW. Modelování hloubek vrtů bylo provedeno při těchto vstupních parametrech:

hornina: žula s maximální tepelnou vodivostí $\lambda = 4,1$ W/mK a minimální tepelnou vodivostí $\lambda = 2,1$ W/mK

zemský tepelný tok $\phi = 0,050$ W/m²

průměrná roční teplota na povrchu terénu = 80C

topný výkon TČ = 11 kW při 00C/450C (teplota na vstupu do TČ/ teplota na výstupu z TČ)

minimální teplota nemrznoucí směsi v kolektoru: -50C

vzdálenost vrtů = 7m

nemrznoucí směs: etanol 18%

litráž oběhového čerpadla pro jeden vrt = 0,00032 m³/s

Na základě tohoto modelování lze konstatovat:

- tepelná vodivost hornin má podstatný vliv na hloubku vrtů – čím je tento horninový parametr vyšší, tím může být vrt kratší (viz Model č. 1): na příkladu žuly je zřejmé, že i pro stejný typ horniny se může tepelná vodivost lišit až o cca 100% (!!), což podmiňuje rozdíl v hloubkách vrtů o 28%
- pokud nemrznoucí směs v kolektoru není v turbulentním režimu toku, pak při použití 4-trubkového kolektoru dochází ke zkrácení hloubky vrtů (viz porovnání Modelů č. 1 a 2): o 15% pro vysoce vodivou žulu a o cca 10% pro špatně vodivou žulu
- pokud nemrznoucí směs v kolektoru je v turbulentním režimu toku, dochází k výraznému zkrácení hloubky vrtů (viz porovnání Modelů č. 1 a 3): o 21% pro vysoce vodivou žulu a o cca 14% pro špatně vodivou žulu
- pokud nemrznoucí směs v kolektoru je v turbulentním režimu toku, pak při použití 4-trubkového kolektoru dochází k prodloužení hloubky vrtů v porovnání s 2-trubkovým kolektorem (viz porovnání Modelů č. 3 a 4): o cca 6% pro vysoce vodivou žulu a o cca 4% pro špatně vodivou žulu
- zemský tepelný tok má pouze nevýrazný vliv na zkrácení hloubek vrtů (viz porovnání Modelů č. 1 a 5): i při zvýšení zemského tepelného toku o 100% se hloubka vrtů zkrátí o 4% pro vysoce vodivou žulu a o cca 8% pro špatně vodivou žulu
- vyšší velikost průměrné roční teploty na povrchu terénu má velmi výrazný vliv na zkrácení hloubek vrtů - při porovnání Modelů č. 1 a 6 vyplývá, že zvýšení této teploty o 100% se vrty zkrátí o 38% pro vysoce vodivou žulu a o cca 35% pro špatně vodivou žulu. Při porovnání Modelů č. 1 a 7 vyplývá, že snížením této teploty o 50% se vrty prodlouží o 40% pro vysoce vodivou žulu a o cca 34% pro špatně vodivou žulu

- vliv vzdálenosti mezi vrty (např. 5m a 10m) není pro hloubku vrtů podstatný (viz porovnání Modelů č. 8 a 9): při větší vzdálenosti zkrácení hloubky vrtů o cca 2% pro vysoce vodivou žulu i pro špatně vodivou žulu
- pokud požadujeme vyšší minimální teplotu nemrznoucí směsi v kolektoru, pak je nutné výrazně prodloužit hloubku vrtů (viz porovnání Modelů č. 1 a 10): o 22% pro vysoce vodivou žulu a o cca 20% pro špatně vodivou žulu

Rodinný dům – tepelná ztráta 15 kW: 2 vrty

-
- V následující tabulce jsou shrnuty hloubky vrtů pro 10 modelů, které odpovídají různým vstupním parametrům

Model č.	Hornina	Žula: $\lambda = 4,1 \text{ W/mK}$	Žula: $\lambda = 2,1 \text{ W/mK}$	Poznámka
	Vstupní parametr	Hloubka každého vrtu	Hloubka každého vrtu	
1	kolektor 2 x 40mm	100 m	128 m	tok v kolektoru není turbulentní
2	kolektor 4 x 32mm	85 m	115 m	tok v kolektoru není turbulentní
3	kolektor 2 x 40mm, litráž oběhového čerpadla dvojnásobná	79 m	110 m	tok v kolektoru je turbulentní
4	kolektor 4 x 32mm, litráž oběhového čerpadla dvojnásobná	84 m	114 m	tok v kolektoru je turbulentní
5	kolektor 2 x 40mm, zemský tepelný tok $\phi = 0,100 \text{ W/m}^2$	96 m	118 m	tok v kolektoru není turbulentní
6	kolektor 2 x 40mm, průměrná roční teplota na povrchu terénu = 160C	62 m	83m	tok v kolektoru není turbulentní
7	kolektor 2 x 40mm, průměrná roční teplota na povrchu terénu = 40C	140 m	172 m	tok v kolektoru není turbulentní
8	kolektor 2 x 40mm, vzdálenost vrtů = 5m	101 m	130 m	tok v kolektoru není turbulentní
9	kolektor 2 x 40mm, vzdálenost vrtů = 10m	99 m	127 m	tok v kolektoru není turbulentní
10	kolektor 2 x 40mm, minimální teplota v kolektoru = -2,50C	122 m	153 m	tok v kolektoru není turbulentní

-

Měření tepelné vodivosti hornin ve vrtu

Americká firma Geothermal Resource Technologies, Inc. (GRTI) se již přes 12 let zabývá měřením a výpočty tepelné vodivosti hornin. GRTI analyzovala data nashromážděná za více než 13.000 hodin testování z více než 300 testů.

Testování tepelné vodivosti in-situ se provádí ve vrtu vystrojeném PE-kolektorem a vyplněném injektážní směsí. PE-kolektor naplněný vodou je pak napojen na konstantní zdroj tepla (elektrokotel), voda je pomocí oběhového čerpadla cirkulována PE-kolektorem, přičemž jsou měřeny a snímány energetický příkon a teplota na vstupu a výstupu z PE-kolektoru. Na základě těchto naměřených hodnot je použit matematický postup pro určení tepelné vodivosti hornin.

GRTI provádí dlouhodobé testy (40 – 48 hodin). GRTI zjistila, že u většiny testů obvykle trvá 10 – 12 hodin, než dojde k prokazatelné stabilizaci proměnných. Proto se obvykle ignorují data z těchto prvních 10 – 12 hodin testu a využívají se data z následujících 28 – 36 hodin, která jsou stabilizována. Tato data jsou pak během analýzy podrobena průměrování. Testovací zařízení musí být schopné dodávat nepřetržitě do PE-kolektoru topný příkon minimálně 14,9 W na 0,3 m hloubky vrtu.

Data jsou snímána s konstantní frekvencí, která nepřevyšuje 5 minut po celou dobu testu. Minimální počet snímaných veličin je tento: teplota vody na vstupu do PE-kolektoru, teplota vody na výstupu z PE-kolektoru, teplota vzduchu uvnitř testovací aparatury, venkovní teplota vzduchu a topný výkon.

Pro analýzu získaných dat používá GRTI metodu „liniového zdroje“. Tato metoda je založena na předpokladu vyzařování tepla z nekonečně tenkého zdroje o konstantní velikosti do nekonečného okolí. Hypoteticky se předpokládá, že kolem vrtu je teplotní pole neporušené a že do vrtu proudí konstantní množství tepelné energie během dostatečně dlouhé doby. Pak je za těchto předpokladů možné použít zjednodušené rovnice pro liniový zdroj, která má tento tvar:

$$\Delta T = A + \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln(t)$$

ΔT změna teploty (K)
A konstanta

Q	množství dodávaného tepla (W)
π	3,14159
λ	tepelná vodivost (W/mK)
ln(t)	přirozený logaritmus času testování

Teplota představuje průměrnou hodnotu z měřených hodnot teploty na vstupu a výstupu z kolektoru. Výše uvedená rovnice může být převedena na tvar pro určení tepelné vodivosti λ :

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot SP}$$

kde:

H	hloubka vrtu (m)
SP	směrník přímký

Směrník přímký SP se určí na semilogaritmickém grafu závislosti průměrné teploty v PE-kolektoru na čase

$$\frac{T_2 - T_1}{\ln t_2 - \ln t_1}$$

v logaritmické stupnici. Pak se určí směrník přímkové části, kde stav 1 odpovídá času, kdy na křivce grafu začíná její přímková část a stav 2 odpovídá času, který se blíží konci konstantní dodávky tepla. Je přesnější vypočítat směrník v tomto časovém rozmezí použitím lineární metody nejmenších čtverců pro hodnoty závislosti T na ln (t).

Závěr

Dimenzování vrtů pro tepelná čerpadla představuje poměrně složitý úkol, který v optimálním případě vyžaduje kromě modelování pomocí výpočtového software také terénní zkoušky a v neposlední řadě značné praktické zkušenosti. Projektant provádějící dimenzování vrtů by měl spolupracovat s těmito odborníky:

- geolog: ten by měl poskytnout prvotní informace o předpokládané litologii provrtávaných hornin,
- instalatér tepelného čerpadla: dodá hodnoty energetické spotřeby objektu, po instalaci TČ může měřit množství tepla vyprodukovaného tepelným čerpadlem, spotřebu el. energie, a tak určit efektivnost práce tepelného čerpadla v daných geologických podmínkách.

Pro dimenzování vrtů má zásadní vliv určení tepelné vodivosti hornin. Tento parametr nabývá i pro jeden horninový typ hodnot, které se mohou lišit až o stovky procent. Rozdíly jsou způsobeny kombinací řady fyzikálně-mechanických vlastností hornin a jejich mineralogického složení na dané lokalitě. Proto je nanejvýš žádoucí určit hodnotu tepelné vodivosti hornin in-situ a tuto hodnotu dosadit do výpočtového software. Tento postup je však nákladný a zatím i časově náročný, a proto je v zahraničí aplikován pro velké skupiny vrtů.

V současné době se v naší provozní praxi postupuje těmito způsoby:

1. hloubka vrtů je určována jako podíl topného výkonu tepelného čerpadla a maximálního teplotního zisku z 1 m vrtu (ten je doporučován některými výrobci tepelných čerpadel v rozmezí 40 – 70 W/m)
2. hloubka vrtů je určována jako podíl chladicího výkonu tepelného čerpadla a maximálního teplotního zisku z 1 m vrtu
3. hloubka vrtů je určována na základě empirických zkušeností s provozem tepelného čerpadla poblíž dané lokality
4. hloubka vrtů je přejímána pro daný typ tepelného čerpadla z firemních projekčních podkladů

Je nutné zdůraznit, že způsob 2) většinou vede k poddimenzování hloubky vrtů – vychází z představy konstantní hodnoty el. výkonu kompresoru (rovné 1/3 topného výkonu tepelného čerpadla), což v praxi neplatí. Některé instalační firmy po dohodě s investorem monitorují několik topných sezón po sobě chod tepelného čerpadla. Tímto způsobem lze v určitých geologických podmínkách získat cenné poznatky pro zadávání hodnot vstupních parametrů do výpočtového software a tento postup je v současné době pravděpodobně nejvhodnější.

Literatura - References

- [1] P., Eskilson: Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes., *Sbornik referátů, University of Lund, Švédsko, 1987.*
- [2] Geothermal Resource Technologies, Inc.: Formation Thermal Conductivity Test and Data Analysis. Webové stránky firmy, 2003.
- [3] S., Mareš, a kol.: Úvod do užití geofyziky, *SNTL Praha, 1979.*
- [4] J., Svoboda, a kol: Encyklopedický slovník geologických věd. *ACADEMIA Praha, 1983.*
- [5] A., Žeravík: Stavíme tepelné čerpadlo., *Vydáno vlastním nákladem, 2003.*
- [6] Z., Dvořák: Základy chladicí techniky., *SNTL Praha, 1986.*
- [7] J., D., Spitler, S., J., Rees, C., Yavuzturk: Recent Developments in Ground Source Heat Pump System Design, *Modelling and Applications. Referát z webových stránek IGSHPA, 2002.*
- [8] Firma Stiebel-Eltron: Tepelná čerpadla., Projektování a instalace. Technické podklady, 2002.
- [9] Oklahoma State University: Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems., *Installation Guide, 1988.*
- [10] P., Jakeš: Planeta Země., Mladá fronta Praha, 1984.