

## Vlastnosti vrtů pro tepelná čerpadla

Petr Čížek

RNDr. Petr Čížek – A až Zet, Kundratka 17, 180 00 Praha 8 – E-mail [info@azzet.cz](mailto:info@azzet.cz).

### Abstrakt

Článek informuje o tepelných vlastnostech, různých konstrukčních typech a způsobu rozmístování tepelných vrtů a o vlivu podzemní vody na jejich účinnost. Upozorňuje na malý dosah polních tepelných zkoušek hornin „in situ“ a navrhuje postup geologického průzkumu pro velké systémy, nebo větší nahromadění domovních vrtů.

**Klíčová slova:** tepelná čerpadla, vrty, tepelné vrty, podzemní voda, geologický průzkum

### 1. ÚVOD

Odhaduje se, že v Německu nedosahuje již po šesti až osmi letech potřebného výkonu 30 až 40 % vrtů pro tepelná čerpadla, protože jsou nesprávně rozmístěny, provedeny co nejlevněji a pracují stále jen v topném režimu uvnitř horniny, o které se nic neví. U nás byly hloubeny zcela živelně až do konce roku 2004, kdy je začaly úřady, podobně jako v jiných státech, považovat za zvláštní druh studní. Od té doby je jejich povolení podmíněno územním a vodoprávním rozhodnutím, ke kterému je třeba vyjádření hydrogeologa, že neohrozí podzemní vody. Jeho dodržení ale nikdo nekontroluje a nikdo ho nebude respektovat, dokud tyto vrty nedokážeme navrhovat levnější, anebo kratší a spolehlivější, než jak to dělají odhadem topenáři. Tento článek informuje o současném stavu výzkumu a technického vývoje tepelných vrtů. Nejprve stručně probere jejich tepelné vlastnosti a různé konstrukční typy, způsob jejich rozmístování a vliv podzemní vody na jejich účinnost a tepelný výkon. V závěru navrhuje postup geologického průzkumu pro velké systémy, či větší nahromadění domovních vrtů.

### 2. VNITŘNÍ TEPELNÝ ODPOR VRTU

Každý vrtaný zemní tepelný výměník (BHE – Borehole Heat Exchanger) má nejméně dva kanály – sestupný a vzestupný, kterými cirkuluje kapalina, přenášející teplo mezi okruhy tepelného čerpadla a tepelného vrtu. Ke konduktivnímu přenosu tepla mezi kapalinou a tepelně neovlivněnou horninou je nutný teplotní rozdíl podle vzorce

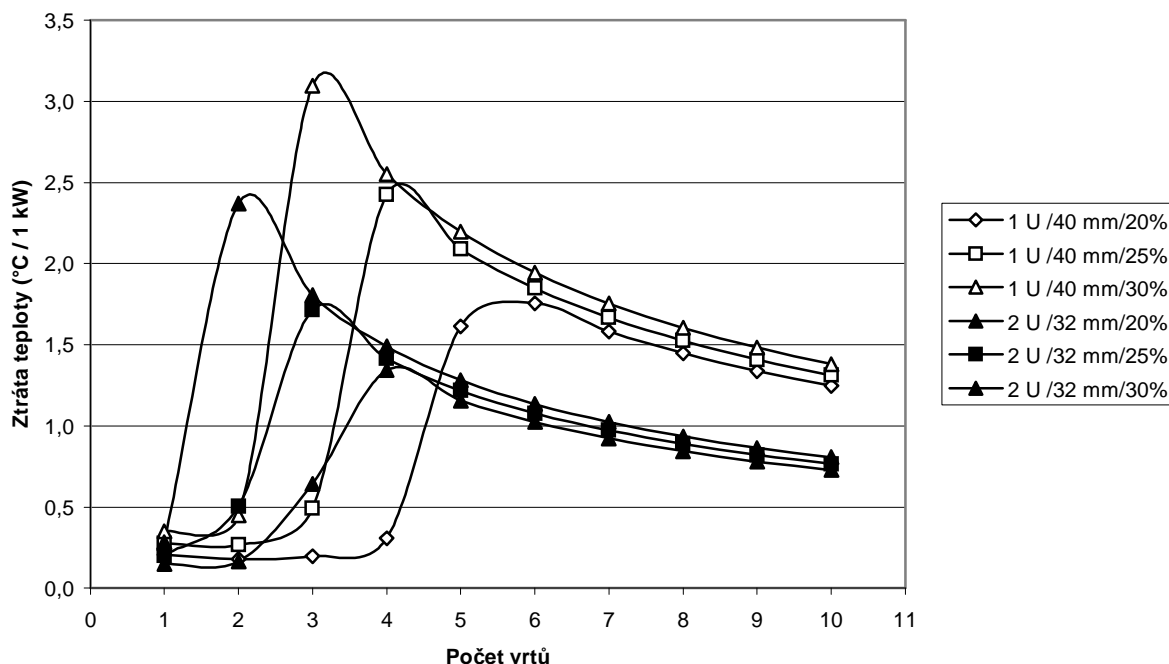
$$\Delta T = R \cdot q$$

ve kterém  $\Delta T$  [K] je rozdíl teplot mezi teplotou kapaliny a vrtem neovlivněnou horninou,  $R$  je tepelný odpor [K m W<sup>-1</sup>] mezi nimi a  $q$  [W m<sup>-1</sup>] je průtok tepla jednotkou délky vrtu. Úhrnný tepelný odpor  $R$  je převrácenou hodnotou výsledné tepelné vodivosti  $\lambda$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]. Platí, že:

$$R = R_b + R_g \quad \Delta T = \Delta T_b + \Delta T_g$$

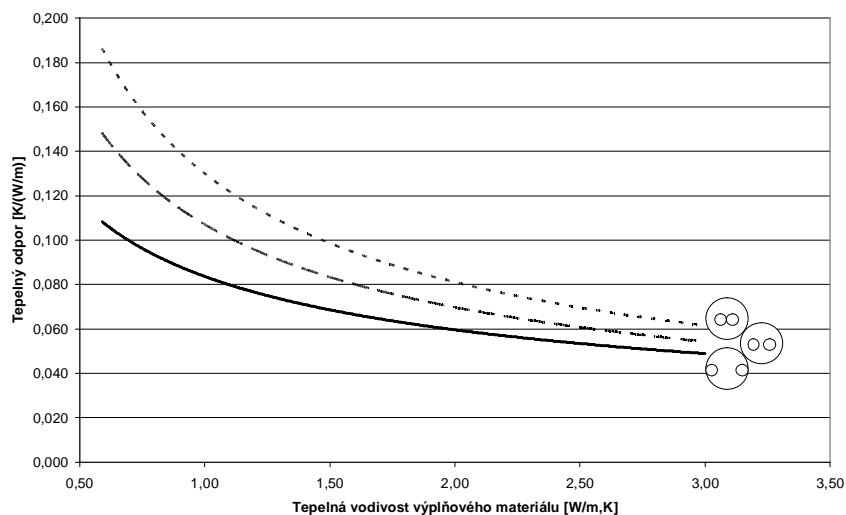
Podle těchto vzorců je  $R$  součtem vnitřního tepelného odporu vrtu  $R_b$  s tepelným odporem  $R_g$ , který klade tepelnému toku hornina mezi stěnou vrtu a hranicí, za kterou se už tepelný vliv vrtu neprojevuje. Tepelný tok  $q$  procházející vnitřním tepelným odporem vrtu  $R_b$  na něm způsobuje úbytek na teplotě  $\Delta T_b$ , který při téže teplotě teploty kapaliny zmenšuje rozdíl teplot  $\Delta T_g$  mezi stěnou vrtu a tepelně neovlivněnou horninou a tím zmenšuje tepelný tok mezi nimi. Vnitřní tepelný odpor vrtu  $R_b$  je součtem několika složek. Nejprve je to tepelný odpor mezi teplotou kapaliny a vnitřní stěnou výměňkového kanálu, který závisí na charakteru proudění. Při laminárním proudění ( $Re < 2360$ ) musí teplo překonávat příčný odpor kapaliny v celém průřezu výměňkového kanálu a tepelný odpor je velký. Při turbulentním proudění ( $Re > 5000$ ) je naopak velmi malý, protože laminární proudnice je jenom těsně u stěny výměňkového kanálu a hned za ní se teplotou kapaliny promíchává na jednotnou teplotu intenzivním vířením. Graf na Obr. 1 ukazuje závislost ztráty teploty mezi teplotou kapaliny a vnitřními stěnami U-smyčkového kolektoru na počtu tepelných vrtů hlubokých 100 m, při střední teplotě mezi vstupem a výstupem z vrtu -1,5 °C a nominálním průtoku primárním okruhem tepelného čerpadla 1,15 ls<sup>-1</sup>. Protože kinematická viskozita běžných nemrznoucích směsí s poklesem jejich teploty stoupá, zmenšuje zvyšování koncentrace nemrznoucí směsi počet vrtů, které je možné paralelně spojit, aniž by turbulentní proudění v zemním tepelném výměníku přešlo v laminární. Z grafu je zřejmé, že návrhy délky a počtu vrtů by měly uvádět nejen počet a průměr U-trubicových kolektorů ve vrtu, ale i nominální průtok teplotou kapaliny primárním tepelného čerpadla a druh a váhovou koncentraci nemrznoucí směsi.

**Obr. 1.** Závislost ztráty teploty [ $^{\circ}\text{C} / 1 \text{ kW}$ ] mezi tekutinou a vnitřní stěnou U-trubice na váhové koncentraci propylenglykolu, na počtu a průměru U trubice ve vrtu a na množství paralelních vrtů.



Další významnou složkou vnitřního tepelného odporu vrtu  $R_b$  je tepelný odpor výplně prostoru mezi trubicemi a stěnou vrtu. Můžeme ho ovlivnit nejen druhem výplně, ale i způsobem zaplnění, protože při záhozu se na rozdíl od injektáže vytvářejí ve stvolu vrtu volné kapsy, tedy tepelný izolant. Rozsahy převrácené hodnoty tepelného odporu - tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] pro různé výplňové materiály jsou: stagnující voda (0,5), bentonit (0,4-0,8), bentonit termálně vylepšený křemenem (0,5-1,5), křemenný písek sycený čistou vodou (0,3-2,0), směs Stüvatherm (1,7-2,0 dle druhu, vlhkost neudána), směs Calidutherm (2,0), led (2,1), cementová směs Mix 111 (2,2), bentonit s grafitem (3,0). Není-li uvedeno jinak, platí nižší hodnoty pro materiály suché a vyšší pro materiály nasycené vodou. U výplňových materiálů, které mají v suchém stavu nepatrnou tepelnou vodivost a u vrtů zasypaných vrtnou drtí, je nutné počítat aktivní hloubku vrtu až od hladiny podzemní vody.

**Obr. 2.** Tepelný odpor vrtu ( $\text{K}/(\text{W}/\text{m})$ ) jako funkce tepelné vodivosti výplňového materiálu ( $\text{W}/\text{m}, \text{K}$ ) pro tři různé pozice trubice. (HELLSTRÖM, G., 1998)



Obr. 2 ukazuje, jak významně může ovlivnit výsledný vnitřní tepelný odpor U-smyčkových vrtů způsob zapouštění kolektorových trubek do vrtu, protože na jejich pozici závisí velikost ztráty tepla, vzniklé tepelným přenosem mezi sestupným a vzestupným proudem teplotonosné kapaliny. Graf znázorňuje tepelný odpor vrtu s jednoduchou U-smyčkou jako funkci tepelné vodivosti výplňového materiálu při třech odlišných pozicích trubek. Horní křivka odpovídá často praktikovanému zapouštění těsně svázaných trubek, prostřední zapouštění nsvázaných trubek a spodní zapouštění trubek uchycených do speciálních rozpěrek, které je udržují co nejdále od sebe, blízko stěn vrtu.

### 3. ROZDĚLENÍ TEPELNÝCH VRTŮ PODLE JEJICH KONSTRUKCE

Ačkoliv se u nás používají jen tepelné vrty s jednoduchým, nebo dvojitým U-smyčkovým kolektorem v zaplněném stvolu, jejich škála je mnohem větší. Nejjednodušším způsobem jak zřídit zemní tepelný výměník, je spustit jednu plastickou trubku ke dnu nezapaženého vrtu, takže mezi ní a stěnou vrtu vznikne kanál pro vratné proudění. Je to velmi výhodné z hlediska přenosu tepla a jsou na tom založeny vrty SCW, umožňující snížit odvrtané metry o 40 až 60% a přitom sloužit i jako domovní studna. Většinou je ale volný stvol vrtu nežádoucí, anebo to přímo zakazují předpisy a tak se tepelné vrty rozdělují se na otevřené a uzavřené. V otevřených systémech je teplotonosná kapalina v přímém styku s horninou a proto v nich jako nosič tepla slouží buď přímo místní podzemní voda, která při provozu vrtu vytvoří v jeho okolí termosifon, zlepšující jeho funkci, anebo se stěny vrtu nejprve utěsní kolmatací a pak se jeho stvol naplní pitnou vodou. V uzavřených systémech obíhá teplotonosná kapalina uvnitř nepropustných trubek a proto je lze plnit nemrznoucí směsí. Podle výměňkových kanálů se tepelné vrty rozdělují na 4 hlavní druhy: GLHE (U-smyčkové – Ground Loop Heat Exchangers), TIL (koaxiální mnohasmyčkové se společným tepelně izolovaným středem - Thermal Insulated Leg), koaxiální trubkové, koaxiální s kolmatovanou horninovou stěnou a SCW (se stálým vodním sloupcem – Stab Water Column). Názorně to ukazuje Tabulka 1.

Tab. 1. Rozdělení tepelných vrtů

Systémy	Druh vrtaného zemního tepelného výměníku (BHE)			Teplotonosné medium	
	G	typ	výplň vrtu		materiál:
Uzavřené	L	bez výplně	podzemní voda	HD PE	nemrznoucí směs
	H	se zaplněným stvolem vrtu	vrtaná drť, nebo injektáž	HD PE	nemrznoucí směs
	E		injektáž	Cu	chladiivo tep. čerp.
		koaxiální uzavřené	TIL (mnohasmyčkový s tepelně izolovaným středem)		nemrznoucí směs
			trubkový		nemrznoucí směs
Otevřené		koaxiální otevřené	s kolmatovanou horninovou stěnou		pitná voda
		SCW	bez odpouštění vody		podzemní voda
			s odpouštěním vody		

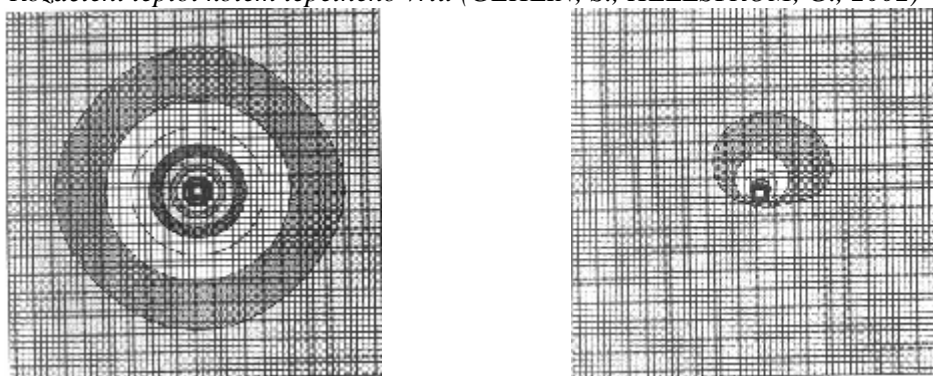
Tepelné odpory jednotlivých druhů tepelných vrtů se výrazně liší. CRUICKSHANKS, F. et al. (2006) uvádějí, že pokud typickému tepelnému odporu jednoduché U-trubice v zainjektovaném vrtu GLHE odpovídá 5 až 6 °C rozdílu mezi horninou a teplotonosnou kapalinou, tak otevřené BHE sníží ztrátu teploty na 1 až 2 °C.

### 4. ROZMÍSTĚNÍ VRTŮ A ŠÍŘENÍ TEPLOTNÍCH ZMĚN V HORNINĚ

U našich firem nepanuje na rozmístění vrtů jednotný názor. Některé doporučují zákazníkům vzdálenost vrtů 5 m a jiné naopak nejméně 15 až 20 m. Ve skutečnosti lze rozdělit zemní systémy tepelných čerpadel na disipativní a akumulativní. Disipativní systémy čerpají rozptýlené zemské teplo a ukládané teplo rozptylují do horniny, zatímco akumulativní systémy vytvářejí tepelné zásobníky s teplotou vysoko převyšující teplotu okolní horniny. Počet a rozmístění tepelných vrtů se musí řídit tím, o jaký systém půjde. U disipativních systémů je třeba provést nejlépe jenom jeden, anebo co nejméně vrtů co nejdále od sebe, aby se co nejméně ovlivňovaly a za klidovou teplotu horniny se u nich obvykle považuje místní průměrná roční teplota vzduchu. Naproti tomu u akumulativních systémů je třeba vyplnit celou plochu tepelného zásobníku velkým množstvím vrtů, uspořádaných v pravidelných rozestupech několika málo metrů a za klidovou teplotu horniny se u nich považuje místní průměrná teplota tepelného zásobníku. V obou případech se k výpočtu šíření teplotních změn

v hornině používají rovnice ustáleného a neustáleného proudění známé z hydrauliky podzemní vody, do kterých jsou dosazeny termodynamické veličiny. Ve skutečnosti ale platí jenom v homogenním prostředí a při absenci pohybu podzemní vody. Vliv podzemní vody na skutečné teplotní poměry v okolí tepelného vrtu analyzovali počítačovým modelem GEHLIN a HELLSTRÖM (2002). Na obrázku č. 3 je do mřížky, značící vzdálenost 0,05 m, zakresleno rozdělení teplot v hornině po 100 hodinách ukládání tepelného toku 40 W/m stometrovým vrtem. Vlevo je případ šíření tepla jen kondukcí, bez pomoci podzemní vody a vpravo případ, kdy podél celé délky vrtu probíhá 5 cm od jeho stěny svislá zvodnělá puklina šířky 0,72 mm, s hydraulickým spádem 0,01 m / m.

**Obr. 3.** Rozdělení teplot kolem tepelného vrtu (GEHLIN, S., HELLSTRÖM, G., 2002)



### ZÁVĚR.

Pro snížení pořizovacích nákladů na zemní systémy tepelných čerpadel jsou ve světě vyvíjeny stále účinnější vrty a aby nebyly zbytečně dlouhé, jsou vyvíjeny stále dokonalejší programy k jejich návrhu. Nedrží s nimi ale krok přesnost vkládaných dat o tepelných vlastnostech hornin a to ani tam, kde se provádějí polní tepelné zkoušky „in situ“. Kvůli značným nákladům se doporučují 52 hodinové, takže mají dosah jen několik desítek centimetrů od vrtu. Proto nemohou postihnout tepelný vliv tektoniky a podzemní vody, jejichž vliv je významný. Zatímco účinnost disipativních systémů tepelných čerpadel většinou zlepší, akumulací systémů je potřeba jejich vlivům buď přizpůsobit, anebo je před nimi chránit. Hydrogeologii to nabízí nové možnosti uplatnění. U rodinných domů se může prosadit návrhem vrtů s co nejnižším vnitřním odporem a v ojedinělých případech by dokonce asi bylo možné i u nás použít vrty SCW, sloužící současně i jako studna. Pro větší nahromadění domovních vrtů a pro velmi výkonná tepelná čerpadla zase může nalézt dobré řešení geologický průzkum, podobný průzkumu ložisek nerostných surovin. Zájmovou oblast bude napřed nutno prozkoumat geofyzikou a pak podle ochranných pilířů a hlavních puklinových pásem rozčlenit na jednotlivé bloky, jejichž hydrogeologii a vnitřní a hraniční tepelné vlastnosti ověří nejprve mělké a potom i provozní vrty.

### LITERATURA

- BUJOK, P. et al. *Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel*. VŠB – technická universita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ostrava: 2005.
- CRUICKSHANKS, F. et al. *Borehole Sealing in a Coaxial Heat Exchanger by Bentonite Treatment*. The Richard Stockton College of NJ, Pomona, NJ: 2006. <http://intraweb.stockton.edu/>
- DENG, Z. *Modeling of Standing Column Wells in Ground Source Heat Pump Systems*. Oklahoma State University, Stillwater, OK: 2004. <http://www.hvac.okstate.edu>
- GEHLIN, S., HELLSTRÖM, G. Influence on Thermal Response Tests by Groundwater Flow in Vertical Fractures in Hard Rock. In *Doctoral Thesis*. Luleå: University of Technology. 2002.
- HELLSTRÖM, G. *Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers*. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund: 1998.
- SPITLER, J. Ground Source Heat Pump System Research – Past, Present and Future (Editorial). *International Journal of HVAC&R Research*. 2005, XI. Nr. 2, pp. 165-167. <http://www.ashrae.org>
- XU, X., SPITLER, J. *Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers with Variable Convective Resistance and Thermal Mass of the Fluid*. Oklahoma State University, Stillwater, OK: 2006. <http://www.hvac.okstate.edu>