REALIZOVATELNÝ POTENCIÁL VYUŽITÍ TEPLA ODPADNÍ VODY V PILOTNÍM POVODÍ HRADEC KRÁLOVÉ

David Stránský[1], Ivana Kabelková[2], Gabriela Šťastná[3], Vojtěch Bareš[4], Petr Polák[5]

Abstract

Presented paper identifies buildings in a pilot catchment of Hradec Kralove suitable for application of wastewater heat exchangers in sewer system. Presented work is a part of a research project Heat recovery from wastewater in combined sewer systems. Suitable buildings are selected according to following criteria: owner, proximity to suitable sewer and heat utilisation. For selected buildings a heat pump system is designed and capital expenditures and operational costs are calculated. Savings are calculated in order to obtain complete data for efficiency evaluation. Efficiency is then calculated as discounted payback period (*DPP*). Installations with *DPP* < 10 years are supposed to be effective and installations with *DPP* < 15 years as a conditionally effective. A total of 7 installations was evaluated as suitable and further 5 as a conditionally suitable. All 7 suitable installations stand together for 695 kW of power. Potential savings are about 100,000 EUR per year.

Úvod

S vývojem společnosti jsou kladeny vyšší nároky na snížení energetické náročnosti ve všech oblastech života. Jednou z možností je využívání obnovitelných zdrojů energie. Další možnost poskytuje znovuvyužití odpadních produktů.

V odpadní vodě se nalézá značný tepelný potenciál. Ten je dán relativně stabilní teplotou odpadních vod v rozmezí cca 10 - 25°C, která je ideálním zdrojem pro tepelná čerpadla [1]. Ve světě je již řada realizovaných projektů využívajících toto odpadní teplo [např. 2, 3, 4], na našem území však zatím nedošlo k žádné větší realizaci.

Na tuto problematiku reaguje výzkumný projekt TA03020600 Získávání tepelné energie z odpadní vody v kanalizačních sítích (enKAN), jehož hlavním cílem je vyvinout funkční vzorek výměníku vhodný pro použití ve specifickém prostředí jednotné stokové sítě a jeho testování v reálných podmínkách. Dílčím cílem projektu je pak mj. identifikace realizovatelného potenciálu využití tepelné energie z odpadní vody stokové sítě pilotního povodí v Hradci Králové.

---

[1] doc. Ing. David Stránský, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224355412, e-mail: stransky@fsv.cvut.cz

[2] Dr. Ing. Ivana Kabelková, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224354605, e-mail: kabelkova@fsv.cvut.cz

[3] Mgr. Gabriela Šťastná, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224355447, e-mail: gabriela.stastna@fsv.cvut.cz

[4] Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrauliky a hydrologie, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224354339, e-mail: bares@fsv.cvut.cz

[5] Ing. Petr Polák, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224355412

Identifikace realizovatelného potenciálu (tj. identifikace budov vhodných pro napojení na zdroj tepla z odpadní vody) navazuje na dříve zpracovaný dílčí cíl projektu, kterým byla identifikace teoretického potenciálu vlastní stokové sítě [5], a tvoří tak základ pro metodiku začlenění využití tepelné energie z odpadní vody do generelů odvodnění.

Cílem tohoto článku je ukázat postup při výběru vhodných budov pro využití odpadního tepla z kanalizačních stok za účelem vytápění a ohřevu teplé vody a aplikovat jej na pilotním povodí města Hradec Králové.

Metody a nástroje

Metodický postup při identifikaci realizovatelného potenciálu využití tepla má čtyři základní kroky:

1. výběr objektů, u kterých přichází připojení tepla z odpadní vody v úvahu z hlediska majetkového a situačního,
2. určení orientačních nákladů na realizaci a provoz nového způsobu vytápění a ohřevu teplé vody,
3. výpočet úspor nákladů na vytápění a ohřev teplé vody a
4. vyhodnocení ekonomické efektivity pro objekty vybrané v bodě 1.

Výběr vhodných objektů

Pro výběr objektů byla použita tři základní kritéria: vlastnictví objektu, jeho lokace a využití.

S ohledem na omezení problémů souvisejících s otázkou vlastnictví odpadních vod (a potažmo obsaženého tepla) ve stokové síti, bylo uvažováno s objekty ve vlastnictví města Hradce Králové a organizací městem zřízených, kde lze předpokládat jednoduchou dohodu mezi vlastníky, správci a provozovateli stokové sítě a napojovaných objektů. Pro určení vlastnických poměrů jednotlivých objektů byl využit katastr nemovitostí.

Vhodnost objektu z hlediska jeho lokace byla omezena jeho vzdáleností od úseků stokové sítě, které byly vyhodnoceny jako vhodné či částečně vhodné pro umístění tepelných výměníků [5]. Maximálně přípustná vzdálenost byla stanovena na 500 m od alespoň částečně vyhovující stoky. Tato hodnota byla zvolena s určitou mírou bezpečnosti tak, aby výsledný soubor objektů k ekonomickému posouzení zahrnoval jak objekty, u nichž doba návratnosti bude výhodná, tak i objekty, u nichž tomu tak nebude. Hodnotu tohoto kritéria lze verifikovat až na základě dosažených výsledků.

Posledním kritériem je způsob využití objektu a jeho vhodnosti pro vytápění. Z tohoto ohledu byla pozornost převážně soustředěna na objekty občanské vybavenosti (např. mateřské školy, základní školy, knihovny atd.) nebo bytové domy. Jako nevhodné objekty lze označit např. garáže, sklady a drobné stavby.

Investiční a provozní náklady

Do investičních nákladů byly počítány náklady na:

- výrobu tepelných výměníků a jejich instalaci (doprava, práce a převedení průtoku odpadní vody při instalaci),
- pořízení tepelného čerpadla, jeho instalaci a zapojení do stávajícího topného systému a
- vedení potrubí pro cirkulaci média mezi výměníkem a tepelným čerpadlem (dodávka a montáž vlastního potrubí, výkopové práce a oprava dotčených povrchů). Rozpočty byly sestaveny v cenové hladině URS 2014 [6].

Do provozních nákladů byly počítány náklady na:

- elektrickou energii na provoz tepelného čerpadla a
- pravidelnou údržbu výměníků (odstraňování biofilmu, který brání přestupu tepla [7]).

Úspory nákladů na vytápění a ohřev

Pro výpočet úspory nákladů je nutné nejprve určit spotřebu tepelné energie pro jednotlivé vybrané objekty a její část, kterou je možné pokrýt tepelným čerpadlem.

Spotřeba tepelné energie za otopné období pro jednotlivé objekty byla stanovena na základě vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu č. 291/2001 Sb. [8]. Potřeba tepla pro ohřev teplé vody byla stanovena dle ČSN EN 15316-3-1 [9]. Potřebné hodnoty vytápěného objemu a ochlazovaných ploch objektů byly získány z dat uvedených v katastru nemovitostí. V případech, kdy nebyla potřebná data v katastru nemovitostí obsažena, byla stanovena výpočtem (výška patra 3 m, půdorysná plocha z katastrální mapy a počet podlaží z Google maps street view).

Výkon tepelných čerpadel u jednotlivých objektů byl řešen variantně s tím, že maximální zkoumaný výkon byl určen buď jako výkon, který pokryje celou spotřebu objektu včetně špiček, nebo jako výkon vycházející z maximálního dostupného tepelného potenciálu v místě napojení na stokovou síť.

Lze však důvodně předpokládat [10], že pokrytí spotřeby objektu včetně špiček tepelným čerpadlem (monovalentní zdroj) nebude ekonomicky efektivní, protože čerpadlo v těchto případech funguje na plný výkon právě pouze v období spotřební špičky, jinak je jeho výkon využíván omezeně. Proto byly variantně uvažovány i nižší výkony tepelných čerpadel. V těchto případech slouží tepelné čerpadlo jako bivalentní zdroj s tím, že jeho provoz je kontinuální. Konkrétně je s kontinuálním provozem (tj. 22 hod denně z důvodu sazeb za dodávku energie) počítáno u čerpadel, jejichž výkon je do 25% celkového potřebného výkonu pro objekt. Při vyšším než 25% výkonu je pak uvažován diskontinuální provoz tak, že při pokrytí 50% výkonu je tepelné čerpadlo v chodu jenom 17,6 h za den, při 75% 13,2 h za den a při 100% 8,8 h za den.

Na základě výše uvedeného lze spočítat celkové dodané teplo tepelným čerpadlem a následně ho vyjádřit finančně s využitím cen tepla z centrálního zdroje, jehož využití v pilotním povodí Hradec Králové jednoznačně převažuje. Ceny tepla jsou uvažovány s 4% ročním nárůstem.

Ekonomická efektivita

Přírůstek zdrojů plynoucí z investice do reálných aktiv představuje čistou současnou hodnotu (Net Present Value, *NPV*). Vzhledem ke změně hodnoty peněžních prostředků v čase není možné toky budoucích čistých výnosů prostě sčítat. Z tohoto důvodu je nutné jejich převedení na současnou hodnotu (Present Value, *PV*). Pro převod platí následující rovnice:

$$\boldsymbol{PV} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \frac{\boldsymbol{R_i}}{(\boldsymbol{1}+\boldsymbol{r})^{\boldsymbol{i}}} \tag{1}$$

kde: *R* [Kč] jsou čisté výnosy v jednotlivých letech (tj. úspora nákladů minus provozní náklady),

I [-] jsou jednotlivé roky hodnoceného období od 1 do *n*,

n [rok] je délka hodnoceného období a

r [-] diskontní sazba (uvažovaná jako 5,5 %).

Čistá současná hodnota (Net Present Value, *NPV*) je pak:

$$\boldsymbol{NPV} = \boldsymbol{PV} - \boldsymbol{IC} \tag{2}$$

kde *IC* [Kč] jsou investiční náklady.

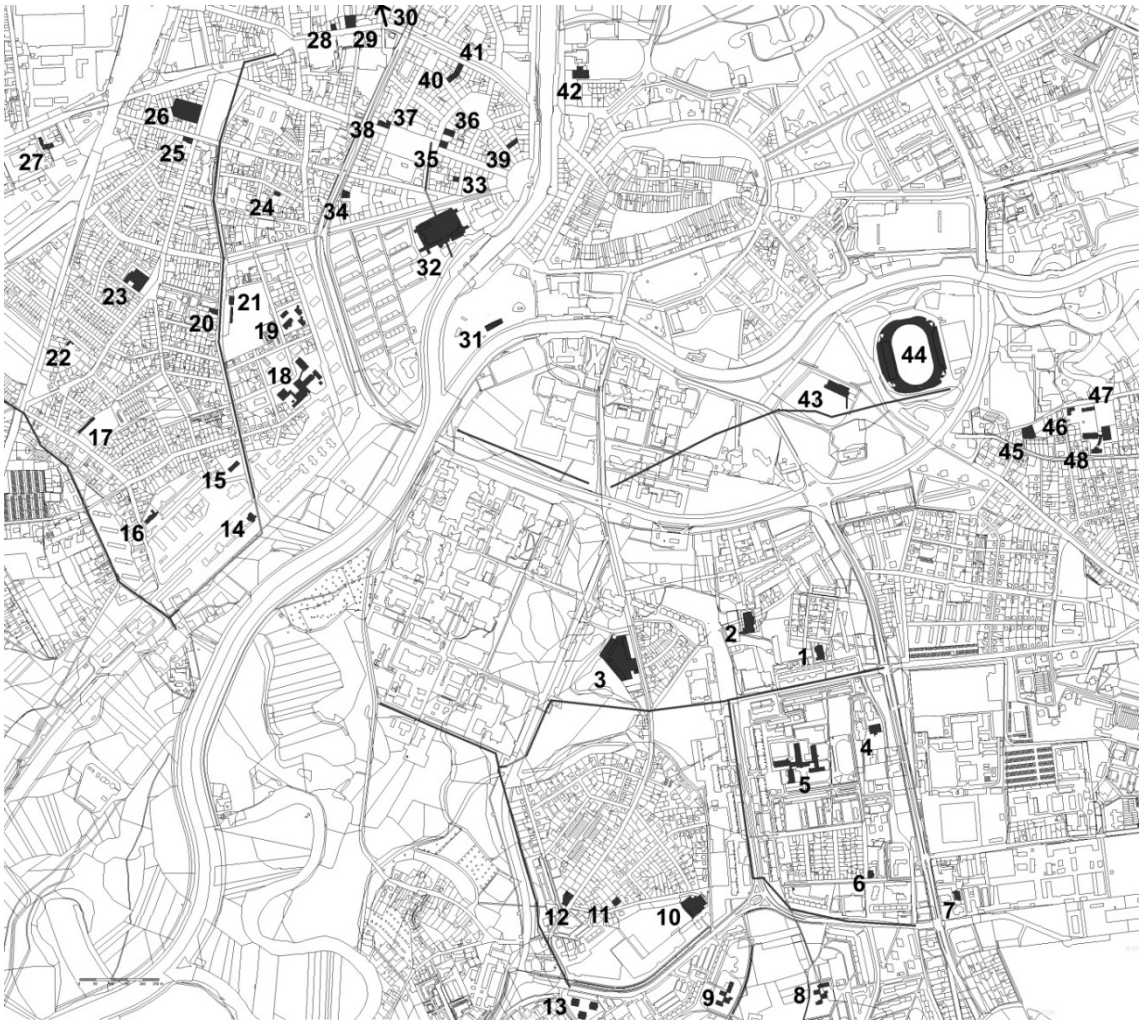
Diskontovaná doba návratnosti *DDN* je pak hodnota *n* ze vzorce (1), když *PV* je rovno výši investičních nákladů, resp. *NPV* = 0.

Pro vyhodnocení efektivity se jako vyhovující uvažují objekty s *DDN* do 10 let a jako částečně vyhovující s hodnotou *DDN* do 15 let. Objekty se hodnotou *DDN* vyšší než 15 let jsou hodnoceny jako nevyhovující.

Výsledky

Výběr vhodných objektů

Dle kritéria maximální vzdálenosti od vhodného či částečně vhodného úseku stokové sítě pro instalaci tepelného výměníku bylo vybráno 48 objektů v plném či částečném vlastnictví města (Obr. 1). Z nich byly 4 objekty (č. 3, 17, 22 a 43) vyřazeny na základně nevhodného využití (autoservis, sklady apod.), jeden objekt (č. 13) byl vyřazen z hlediska podílového vlastnictví a dalších 9 objektů bylo vyřazeno kvůli problematickému vedení a napojení na stokovou síť (např. přes soukromé pozemky) (č. 9, 27, 30, 31, 39 a 41). Do ekonomického hodnocení tak vstupuje 34 objektů (Tab. 1).



Obr. 1. Vhodné objekty pro využití tepla z odpadní vody z hlediska vlastnického a vzdálenosti od vhodných a částečně vhodných stokových úseků (zvýrazněné linie)

Investiční a provozní náklady

<u>Tepelné výměníky</u>

Na základě podkladů firmy ATEKO a.s. byly vyčísleny náklady na dodávku a montáž jednoho modulu vyvinutého deskového výměníku na 11 710 Kč bez DPH. Poskytovaný výkon jednoho modulu (rozměry 1800x250x30 mm) je uvažován na základě provozních testů jako 0,6 kW. Celková cena výroby a montáže výměníků je tedy dána počtem modulů potřebných

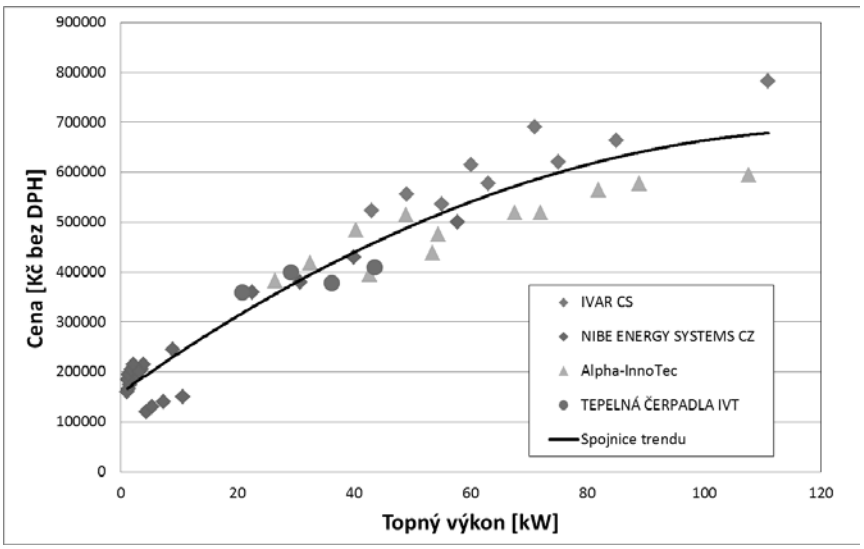
k dosažení požadovaného výkonu tepelného čerpadla. K investičním nákladům byly připočítány náklady na převedení odpadní vody během instalace na základě reálných cen při instalaci funkčních vzorků v pilotním povodí.

Tab. 1. Vhodné objekty vybrané pro ekonomické posouzení

č.	Využití	č.	Využití
1	Centrum sociální pomoci a služeb	23	Základní a mateřská škola
2	Dům služeb	24	Mateřská škola
4	Knihovna	25	Školní jídelna a družina
5	Základní a mateřská škola	26	Základní škola
6	Okresní organizace SPMP ČR	28	Bytový dům
7	Bytový dům	29	Bytový dům
8	Základní a mateřská škola	32	Mateřská, základní, střední škola
10	Sportovní hala	33	Jídelna důchodců
11	Hasičský záchranný sbor	34	Magistrát města, ŽÚ
12	Mateřská škola	35	Bytový dům a nebytové prostory
14	Bytový dům	36	Bytový dům a nebytové prostory
15	Mateřská škola	37	Bytový dům a nebytové prostory
16	Mateřská škola	38	Bytový dům a nebytové prostory
18	Základní škola	40	Bytový dům a nebytové prostory
19	Mateřská škola	44	Všesportovní stadion (zázemí)
20	Knihovna	45	Bytový dům
21	Fotbalový areál (zázemí)	47	Školní jídelna

Tepelná čerpadla

Pro sestavení závislosti ceny tepelného čerpadla na požadovaném výkonu bylo použito celkem 54 typů tepelných čerpadel různých výkonů od různých výrobců (Obr. 2). Dále bylo počítáno s průměrnou cenou dle proložené křivky. Náklady na instalaci a zapojení do topného systémy byly uvažovány ve výši 20% z pořizovacích nákladů.



Obr. 2. Cena tepelných čerpadel

Vedení potrubí

Trasa výkopové rýhy byla uvažována výhradně na pozemcích ve vlastnictví města Hradce Králové. V některých případech to vedlo k prodloužení délky výkopu, ale ke snížení nákladů a náročnosti projednání. Pro snížení nákladů byla rovněž snaha vést trasu výkopu v zeleni a případné vedení v chodnících a zvláště v komunikacích omezit na minimum. Průměrná hloubka výkopu byla uvažována 1,2 m. Cena za jeden běžný metr instalace v komunikaci byla spočtena na 5368,- Kč bez DPH, a dle předpokladů se jednalo o nejdražší skladbu. Za instalaci v chodníku dosáhla cena na hodnotu 2811 Kč bez DPH. A jako ekonomicky nejvýhodnější byla spočtena skladba v zeleni s hodnotou 1577 Kč bez DPH za běžný metr instalace.

Provozní náklady tepelného čerpadla

Na provoz tepelného čerpadla je třeba dodávat elektrickou energii. Příkon tepelného čerpadla uváděný výrobci dostatečně nereflektuje reálné podmínky provozu. Rovněž nelze vycházet z topného faktoru *COP*, jehož hodnoty jsou stanoveny v laboratořích za optimálních podmínek, a tudíž neodráží reálný provoz. Jako nejvíce se blížící skutečnému provozu se jeví sezonní topný faktor *SFP*, který popisuje účinnost systému tepelného čerpadla v reálných podmínkách během roku. Jelikož se jedná o instalace do stávajících objektů, uvažuje se s hodnotou *SFP* = 3,3 [11]. Samotný výpočet celkem spotřebované elektrické energie ΣE [kWh] vychází ze vzorce (3).

$$\sum \boldsymbol{E} = {}^{\Sigma \boldsymbol{Q}}/_{\boldsymbol{SFP}} \tag{3}$$

kde: ΣQ [kWh] je celkem dodaná tepelná energie a

SFP [-] je sezónní topný faktor.

Dle dostupného ceníku ČEZ se uvažovalo s navýšením měsíčního paušálu o 800 Kč bez DPH (nutné vyšší jištění) a sazbou za 1 kWh ve výši 2,00 Kč bez DPH.

Náklady na údržbu výměníků

Četnost údržby je pro určení nákladů klíčová. Na základě testování funkčních vzorků ve stokové síti (vč. sledování biofilmu [12]) je uvažováno s čištěním výměníků jednou za 4 týdny tak, aby přestup tepla nebyl významně omezen. Výpočet pro jednotlivé varianty pak vychází z paušálu za provedení čištění, který činí 1250 Kč bez DPH, a hodinové sazby za pracovní skupinu třech lidí 1000 Kč bez DPH. V paušálu je obsažen dojezd na místo údržby, zabezpečení a příprava pracoviště. Doba čištění jednoho modulu je uvažována 2 minuty.

Úspory nákladů na vytápění a ohřev

Úspory na vytápění jsou stanoveny na základě tepla dodaného tepelným čerpadlem a vynásobením jednotkovou cenou za kWh. Ta je uvažována v prvním roce 1,53 Kč bez DPH za kWh (případně 425,2 Kč bez DPH za GJ), a to dle aktuálních cen firmy Tepelné hospodářství Hradec Králové a.s., která je dodavatelem centrálně vyráběného tepla v Elektrárnách Opatovice a.s.

Ekonomická efektivita

Výsledky diskontované doby návratnosti *DDN* jsou uvedeny v Tab. 2. Je patrné, že 7 objektů bylo vyhodnoceno jako vyhovujících, 5 jako částečně vyhovujících a ostatní jako nevyhovující. Čistá současná hodnota *NPV* je uvedena při uvážení 20 leté doby provozu.

Je patrné, že nejefektivnější využití tepelné energie z odpadní vody ve stokové síti je v případech větších odběratelů a kontinuálním provozu tepelného čerpadla jako bivalentního zdroje (tj. podíl na celkové spotřebě objektu do cca 25%).

Sedm objektů, vyhodnocených jako vhodné, představuje dohromady instalaci 695 kW výkonu tepelných čerpadel. Z hlediska vyrobeného tepla tento instalovaný výkon odpovídá 6,9 TJ, což je zhruba 1% spotřeby centrálně dodávaného tepla do celého města Hradec Králové. Celková úspora za 20 let provozu je 50,4 mil. Kč, tj. v průměru zhruba 2,5 mil. Kč ročně. Ochlazení vody na přitékající na čistírnu je max. do 0,5°C, pravděpodobně však výrazně nižší, neboť bude působit efekt opětovného dodání tepla do odpadní vody z okolního prostředí stokové sítě pod tepelným výměníkem.

Tab. 2. Výsledky vyhodnocení ekonomické efektivity, řazené od nejnižší po nejvyšší *DDN* (u ostatních objektů k návratnosti nedojde ani po 20 letech provozu). Uvedený výkon TČ je optimalizován pro co nejnižší dobu návratnosti.

č.	**Využití**	**Výkon tepelného čerpadla (kW)**	**Pokrytí spotřeby objektu**	***NPV* (tis. Kč)**	***DDN* (roky)**
2	Dům služeb	150	24 %	12 305	6
32	Mateřská, základní, střední škola	150	25 %	12 145	6
14	Bytový dům	85	26 %	6 840	6
18	Základní škola	100	25 %	6 511	8
5	Mateřská a základní škola	100	24 %	6 364	8
26	Základní škola	70	35 %	3 612	9
1	Centrum sociální pomoci	40	22 %	2 608	9
23	Mateřská a základní škola	85	41 %	3 542	11
44	Všesportovní stadion (zázemí)	70	39 %	2 753	11
10	Sportovní hala	70	39 %	2 540	12
35	Bytový dům a nebytové prostory	40	42 %	1 201	13
15	Mateřská škola	30	47 %	586	15
8	Mateřská a základní škola	46	51 %	830	16
29	Bytový dům	40	42 %	479	18
7	Bytový dům	46	52 %	350	18
37	Bytový dům a nebytové prostory	40	47 %	175	19
21	Fotbalový areál (zázemí)	25	63 %	143	19
4	Knihovna	20	25 %	131	19
33	Jídelna důchodců	30	67 %	62	20
19	Mateřská škola	40	54 %	48	20

Diskuze a závěry

Výsledky práce ukázaly, že:

- v pilotním povodí existuje 12 objektů ve vlastnictví města či jím zřízených organizací, ve kterých je použití tepelného čerpadla výhodné s *DDN* do 15 let, z toho 7 objektů s *DDN* do 10 let,
- celkový instalovaný výkon tepelných čerpadel ve stokové síti může být u objektů s *DDN* < 10 let až 695 kW s tím, že nejsou ohroženy čisticí procesy na ČOV,
- instalovaný výkon na 1 tepelné čerpadlo by měl být alespoň 30 kW,
- využití tepelného čerpadla jako monovalentního zdroje není vhodné,

- u jednotlivých vhodných objektů s *DD*N < 10 let lze uvažovat o roční úspoře 130 – 620 tis. Kč,
- celková roční úspora u objektů s *DD*N < 10 let je zhruba 2,5 mil. Kč.

Uvedené výpočty vycházely z obecných datových zdrojů a výpočet byl proveden na straně bezpečnosti. Dalším krokem je zpracování podrobné analýzy pro tři objekty, vybrané na základě analýzy představené v tomto článku a diskuze s městem Hradec Králové.

Poděkování

Projekt č. TA03020600 „Získávání tepelné energie z odpadní vody v kanalizačních sítích (enKAN)" je řešen s finanční podporou TA ČR. Tepelný výměník je vyvíjen ve spolupráci s firmou ATEKO, a.s. Instalaci funkčního vzorku a jeho monitoring umožnily Vodovody a kanalizace Hradec Králové a.s. a Královéhradecká provozní, a.s.

Literatura

[1] Mašek, A. (1988). Odpadní teplo v průmyslu. [autor knihy] Kolektiv autorů. *Využití netradičních zdrojů energie ve vytápění sluneční, geotermálníí, bioplyn, odpadní teplo*. Praha : Dům techniky ČSVTS.

[2] Sturdee, S. (2014). In Austria, heat is 'recycled' from the sewer. *Phys.org - News and Articles on Science and Technology*. [Online] 22. 6 2014. [Citace: 22. 2 2015.] http://phys.org/news/2014-06-austria-recycled-sewer.html.

[3] Zhou, Z. W. a Li, X. J. (2004). *Sewage Heat Source Pump System's Application Examples and Prospect Analysis in China*. Purdue, Spojené státy: International Refrigeration and Air Conditioning Conference.

[4] Higgs, L. (2014). *Gateway Theatre - Energy Retrofit Project*. Richmond BC, Kanada : City of Richmond, 06-2050-20-GT/Vol 01.

[5] Stránský, D., Kabelková, I., Jelínek, M., Bareš, V., Šťastná, G. (2014). Vývoj tepelných výměníků pro získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci a výběr vhodných míst jejich instalace. In: *Vodní hospodářství*, roč. 64, č. 10, s. 11-14.

[6] ÚRS Praha, a.s. (2014). Cenová soustava ÚRS. [Online] 22. 6 2014. [Citace: 11. 6 2015.] http:// http://www.cs-urs.cz/.

[7] Characklis W.G. (1981). Bioengineering report: Fouling biofilm development: A process analysis. *Biotechnology and Bioengineering*, 23(9), 1923–1960.

[8] *Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 291/2001 Sb.*, kterou se stanoví pordobnosti účinnosti užití energie při spotřebě tepla v budovách.

[9] *ČSN EN 15316-3-1 Tepelné soustavy v budovách - Výpočtová metoda pro stanovení potřeb energie a účinností soustavy* - Část 3-1: Soustavy teplé vody, charakteristiky potřeb (požadavky na odběr vody).

[10] Peráčková, J. (2010). Využití tepelné energie z kanalizačních systémů. *TZB HAUSTECHNIK,* Sv. 01.

[11] Bláha, M. (2010). Velký test tepelných čerpadel. TZB-info. [Online] Topinfo s.r.o., 11. 10 2010. [Citace: 16. 2 2015.] http://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/6841-velky-testtepelnych-cerpadel.

[12] Kabelková, I., Stránský, D., Šťastná, G., Bareš, V. (2015). Zarůstání, čištění a účinnost výměníků tepla v kanalizaci: Výsledky provozu funkčních vzorků. *Sborník konference Městské vody*, Velké Bílovice, Ardec (in print).