TEORETICKÝ POTENCIÁL ZÍSKÁVÁNÍ TEPLA Z ODPADNÍ VODY VE STOKOVÉM SYSTÉMU

David Stránský[1], Ivana Kabelková[1], Zdeněk Nový[1], Vojtěch Bareš[1] a Gabriela Štastná[1]

Abstract

The present paper deals with the assessment of the theoretical potential of wastewater in the sewer system for heating of buildings. Suitability criteria for installation of a developed heat exchanger were specified (theoretically available heat, sewer diameter, number of the heat exchanger parallel modules in the sewer cross-section, hydraulic conditions) in order to classify sewers as suitable, party suitable and unsuitable. The approach was applied in a pilot catchment of Hradec Kralove. The total length of the reaches suitable for installation of the heat exchangers is 642 m, of the partly suitable ones 8,645 m.

Úvod

Jedním z alternativních způsobů využívání druhotných zdrojů energie jsou tepelná čerpadla. Dosud značně opomíjeným zdrojem energie pro tepelná čerpadla je odpadní voda v kanalizaci, která je přitom vzhledem k poměrně stálé teplotě mezi cca 10 a 20°C po celý rok ideálním médiem využitelným k vytápění budov nebo ke kombinaci zimního vytápění a letního chlazení budov [1]. Ve světě existuje zhruba 500 zařízení (zejména Švýcarsko, Skandinávie, Německo) s výkonem 100 až 70 000 kW, přičemž první z nich byla vybudována již před více než 30 lety [2].

Oproti tomu v České republice je tepelná energie z odpadní vody využívána dosud velmi omezeně, a to spíše v budovách (z šedé vody) než v kanalizaci nebo na ČOV. Zatím proběhla pouze ojedinělá testování výměníků tepla na přítoku na ČOV [3] a jedna instalace v kanalizaci (ZUŠ Košíře v r. 2007, bez pravidelné údržby a bez sledování provozu). Důvody malého rozšíření výměníků tepla v kanalizaci v České republice jsou obavy z málo vyzkoušené technologie, z vysokých investičních nákladů a dlouhé doby návratnosti a z negativních vlivů snížené teploty odpadní vody na biologické čištění na ČOV (zejména na nitrifikaci a tedy odstraňování dusíku) a s tím spojené zvýšení provozních nákladů [4].

Proto vznikl výzkumný projekt Získávání tepelné energie z odpadní vody v kanalizačních sítích (TA03020600), který se zabývá třemi hlavními aspekty získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci:

1. Vytvořením metodického postupu pro začlenění využití tepelné energie odpadní vody do generelů odvodnění,
2. Vývojem ekonomicky rentabilního tepelného výměníku pro prostředí kanalizačních sítí (řešení používaná v zahraničí jsou často ekonomicky nákladná); typ výměníku má následně částečný vliv na specifikaci kritérií vhodnosti instalace výměníku do jednotlivých stok a na optimální způsob údržby výměníku,

[1]ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6;
stransky@fsv.cvut.cz; kabelkova@fsv.cvut.cz; bares@fsv.cvut.cz; stastnag@fsv.cvut.cz;

3. Zkoumáním optimálního způsobu provozu a údržby výměníku, tak aby nedocházelo k významnému snižování dlouhodobé účinnosti výměníku v důsledku zarůstání teplosměnné plochy biofilmem [5][6].

V tomto článku je popsán postup určení teoretického potenciálu pro získávání tepla z odpadní vody pomocí definice a kvantifikace kritérií vhodnosti a ukázána aplikace postupu na pilotním povodí.

Metody

Určení teoretického potenciálu zahrnovalo následující kroky:

- specifikace kritérií vhodnosti jednotlivých stok pro instalaci tepelných výměníků,
- monitoring v pilotním povodí,
- rekalibrace srážko-odtokového modelu pilotního povodí (bezdeštné průtoky),
- vyhodnocení jednotlivých stok v pilotním povodí podle jednotlivých kritérií a podle jejich kombinace a
- vyhodnocení stokové sítě jako celku.

Specifikace kritérií vhodnosti stok pro instalaci výměníku

Kritéria vhodnosti stok pro instalaci výměníku závisí do určité míry na typu a konstrukci výměníku. Pro vyvinutý typ výměníku byla specifikována následující kritéria ovlivňující možnost jeho instalace a množství tepelné energie získané z odpadní vody:

- teoreticky dostupný tepelný výkon,
- průměr stoky,
- počet možných paralelních modulů výměníku v profilu stoky,
- hydraulické podmínky (hydraulická kapacita stoky, tlakové proudění),
- riziko tvorby většího množství biofilmu.

<u>Teoreticky dostupný tepelný výkon</u>

Hodnota teoreticky dostupného tepelného výkonu v jednotlivých úsecích stok WWT (kW) se vypočte jako:

$$W_{WT} = c \,.\, \rho \,.\, Q \,.\, \Delta T \qquad (1)$$

kde je

c	($kW.s.kg^{-1}.°C^{-1}$)	měrná tepelná kapacita odpadní vody (pro teplotu vody od 0°C do 20 °C lze použít konstantní hodnotu 4,19 $kW.s.kg^{-1}.°C^{-1}$,
ρ	($kg.l^{-1}$)	hustota odpadní vody (pro teplotu vody od 0°C do 20 °C lze použít konstantní hodnotu 1 $kg.l^{-1}$,
Q	($l.s^{-1}$)	průtok odpadní vody,
ΔT	(^{o}C)	rozdíl teplot odpadní vody při nátoku T_1 (°C) a odtoku T_2 (°C) z výměníku.

Z rovnice 1 je patrno, že důležitými faktory ovlivňujícími tepelný výkon výměníku jsou průtok odpadní vody Q a využitelný rozdíl teplot ΔT.

Stanovili jsme, že pro potřeby vytápění je směrodatný průměrný denní průtok odpadní vody Q v topném období (1.9. – 31.5.). Jeho hodnoty v jednotlivých stokách byly získány ze simulačního modelu kalibrovaného na bezdeštné průtoky.

Čím vyšší je teplota odpadní vody T_1, tím více tepla je z ní možno odebrat. Určili jsme, že směrodatná je průměrná denní teplota odpadní vody v topném období vyjádřená na dolní hranici intervalu spolehlivosti 95%. Data byla získána monitoringem v uzávěrných profilech kmenových stok pilotního povodí. Při vyhodnocování jsme předpokládali, že teploty podél

kmenových stok jsou konstantní. Tento předpoklad je na straně bezpečnosti [7][8]. Dále jsme stanovili, že odpadní voda ve stoce se nesmí ochladit na méně než 8°C, což je hodnota T_2. Toto číslo odpovídá v pilotním povodí průměrné denní teplotě odpadní vody cca 12°C (Tab. 1), což je teplota, při níž není ohrožena nitrifikace a odstraňování dusíku na ČOV [1].

Tabulka 1 - Statisticky vyhodnocená data z monitoringu průtoků (*Q*) a teplot (T_1) v uzávěrných profilech kmenových stok v pilotním povodí

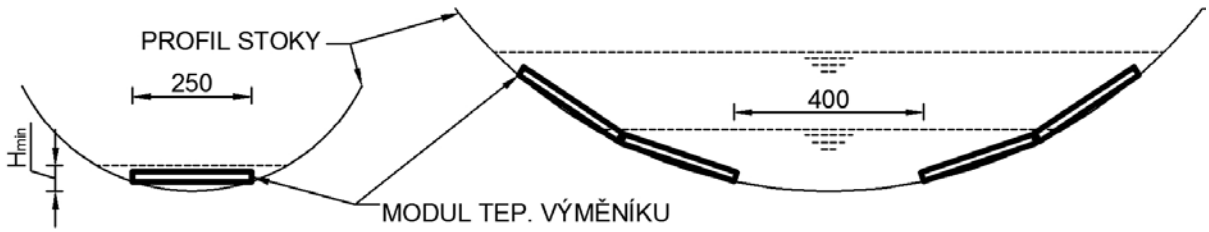
			A	1A	B	C	1C	D	E
Q	průměr	($l.s^{-1}$)	60	26	58	61	27	65	31
T_1	průměr	(°C)	12,9	13,4	12,1	14,8	13,7	14,1	13,8
	dolní hranice intervalu spolehlivosti 95%	(°C)	7,6	9,9	8,6	10,3	8,9	10,9	9,6

Průměr stoky

Toto kritérium zohledňuje možnost instalace výměníku a přístupnost pro údržbu a čištění výměníku. Data byla získána z GIS stokového systému pilotního povodí.

Počet paralelních modulů výměníku

Počet paralelních modulů výměníku (Obr. 1), které je možno do určité stoky instalovat, je závislý na typu výměníku, minimální denní výšce hladiny protékající odpadní vody H_{min} a na dimenzi potrubí (Tab. 2). Potřebné informace byly získány ze simulačního modelu kalibrovaného na bezdeštné průtoky. Výměník je deskového typu, instalovaný v modulech velkých 250x1800x30 mm [9].



Obrázek 1 – Schéma instalace výměníku (vlevo: 1 modul; vpravo: 4 paralelní moduly)

Tabulka 2 - Počet paralelních modulů výměníku pro různé rozsahy minimálních denních výšek hladiny vody v kruhových stokách (pro vyvinutý typ)

Průměr kruhové stoky (mm)	Počet paralelních modelů výměníku			
	0	1	2	4
	Rozsah minimálních denních výšek hladiny vody (mm)			
800	< 50	50–266	267–511	> 51
1000	< 45	45–223	224–451	> 451
1200	< 43	43–193	194–397	> 397
1500	< 40	40–162	163–335	> 335
2000	< 37	37–129	130–265	> 265

Hydraulické podmínky

Výměníky nesmí významně snižovat hydraulickou kapacitu stoky a nesmí být instalovány v přetížených stokách. Analýza stokového systému pilotního povodí byla provedena pomocí původního simulačního modelu kalibrovaného na dešťové průtoky 10 leté dešťové řady.

Klasifikace

Číselné hodnoty kritérií a klasifikace vhodnosti stok pro instalaci výměníku jsou v Tab. 3. Hraniční hodnota dostupného tepla 100 kW je založena na ekonomické rentabilitě [10]. Celkové vyhodnocení je dáno nejhorší hodnotou jednotlivých kritérií.

Tabulka 3 - Kritéria vhodnosti stok pro instalaci výměníku

Kritérium		Klasifikace vhodnosti stok		
		nevhodné	částečně vhodné	vhodné
Teoreticky dostupný tepelný výkon	(kW)	< 100	---	≥ 100
Průměr stoky	(mm)	< 800	800–1200	> 1200
Paralelní moduly	(počet)	0	1	> 1
Snížení hydraulické kapacity	(%)	> 5%	---	≤ 5%
Tlakové proudění	(četnost)	> 1 za 2 roky	---	≤ 1 za 2 roky

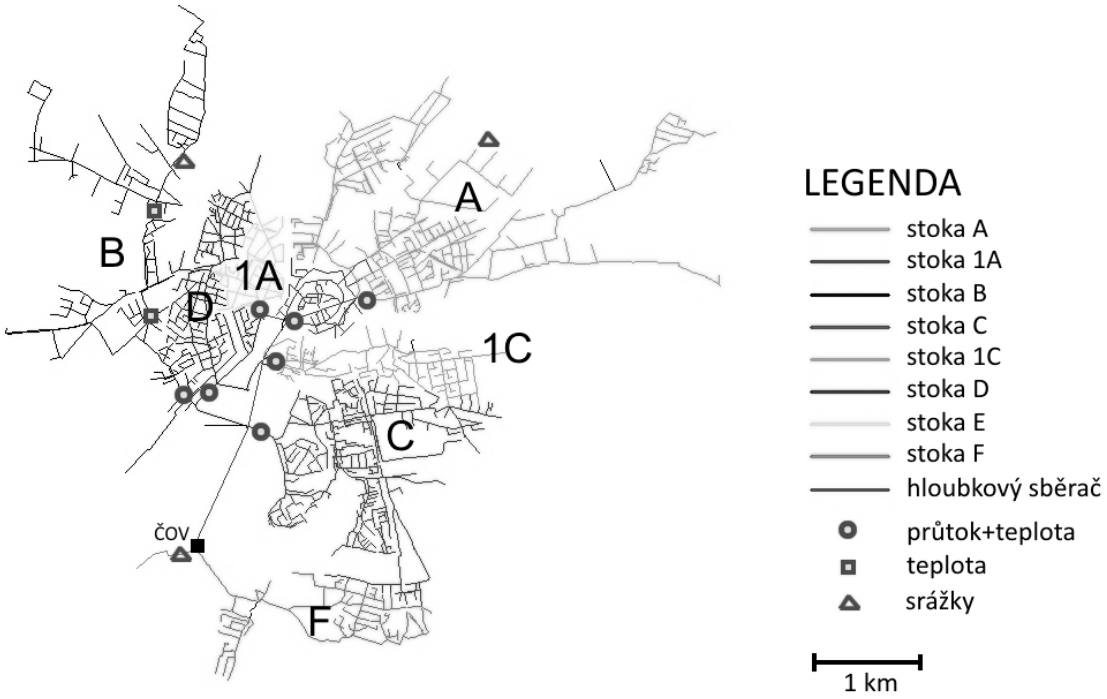
Monitoring v pilotním povodí

Pilotním povodím je Hradec Králové (90 000 obyvatel), který je odvodněn jednotnou kanalizací s osmi kmenovými stokami (A, 1A, B, 1C, C, D, E a F) zaústěnými do přivaděče na ČOV. Celková délka stok je 497 km.

V pilotním povodí byl proveden roční monitoring (02/2013–02/2014) průtoků odpadní vody, teplot odpadní vody a vzduchu a srážek. Přehledné schéma monitoringu je na Obr. 2. Měření průtoků bylo instalováno v 7 uzávěrných profilech kmenových stok, teplotní charakteristiky odpadní vody v 9 profilech (2x bez měření průtoků v dílčím povodí kmenové stoky B), měření srážek a teplot vzduchu ve dvou profilech. Měření všech charakteristik bylo prováděno v časovém kroku 6 minut s výjimkou teplot vzduchu (krok 60 min) a srážek (za deště 1 min).

Rekalibrace modelu

Srážko-odtokový simulační model stokové sítě vytvořený v r. 2005 pro účely Generelu odvodnění v DHI software MIKE URBAN 2012 byl původně kalibrován především se zřetelem na průtoky za deště. Rekalibrace modelu pro bezdeštné průtoky byla provedena na základě údajů získaných monitoringem průtokových charakteristik.



Obrázek 2 - Situační mapa monitoringu v pilotním povodí Hradec Králové

Vyhodnocení jednotlivých stok a stokové sítě jako celku

Vyhodnocení jednotlivých stok bylo provedeno na základě Tab. 3. Jeho výsledkem byla u každého jednotlivého stokového úseku informace, zda je (bez výhrad či částečně) či není pro umístění tepelného výměníku vhodné.

Z hlediska celého stokového systému je určující konektivita, tj. zda jednotlivé vhodné úseky na sebe bezprostředně navazují tak, aby celková délka navazujících úseků umožnila výkon tepelného výměníku alespoň 100 kW. Pokud tomu tak není, je u dotčeného stokového úseku klasifikace změněna na „nevhodný“. Výkon výměníku P_{WT} (kW) může být odhadnut pomocí následující rovnice [1]:

$$P_{WT} = k \,.\, f \,.\, A_{WT} \,.\, \Delta T^{*} \qquad (2)$$

kde je:

k	($kW.m^{-2}.°C^{-1}$)	koeficient přestupu tepla s uvažovanou hodnotou 0,75,
f	(-)	koeficient zohledňující snížení přestupu tepla díky růstu biofilmu na jeho povrchu s uvažovanou hodnotou 0,80,
A_{WT}	(m^2)	plocha výměníku pro přestup tepla (délka modulu x šířka modulu x počet modulů) a

$$\Delta T^{*} \,(^{o}C) = T_1 - (T_{sec}^{out} - T_{sec}^{in}) \qquad (3)$$

T_{sec}^{out}	(^{o}C)	teplota vody vstupující do tepelného čerpadla (tj. po ohřátí ve výměníku)
T_{sec}^{in}	(^{o}C)	Teplota vody vystupující z tepelného čerpadla po odebrání tepla)tj. voda přitékající do výměníku)

Jako optimální se v literatuře [1] udává $\Delta T^{*} \approx 3–4^{o}C$ (pro vyhodnocení byla použita hodnota $3.5^{o}C$).

Výsledky

Vhodné stoky pro instalaci výměníku podle jednotlivých kritérií

Vyhodnocení vhodnosti stok pro instalace tepelných výměníků v pilotním povodí podle jednotlivých kritérií je shrnuto v Tab. 4. Hydraulické podmínky byly vyhodnocovány jen pro stoky s dostupným teplem ≥ 100 kW a nikde nebyly limitujícím faktorem. Jako nejpřísnější kritérium z vyhodnocení vyšlo dostupné teplo, jako nejmírnější průměr stoky. Z praktických důvodů se proto doporučuje začít vyhodnocování buď od nejpřísnějšího kritéria, nebo od toho, které se vyhodnocuje nejsnáze, a potom pokračovat vyhodnocením ostatních kritérií na omezeném souboru dat.

Tabulka 4 - Klasifikace vhodnosti stok v pilotním povodí pro instalaci tepelných výměníků podle jednotlivých kritérií

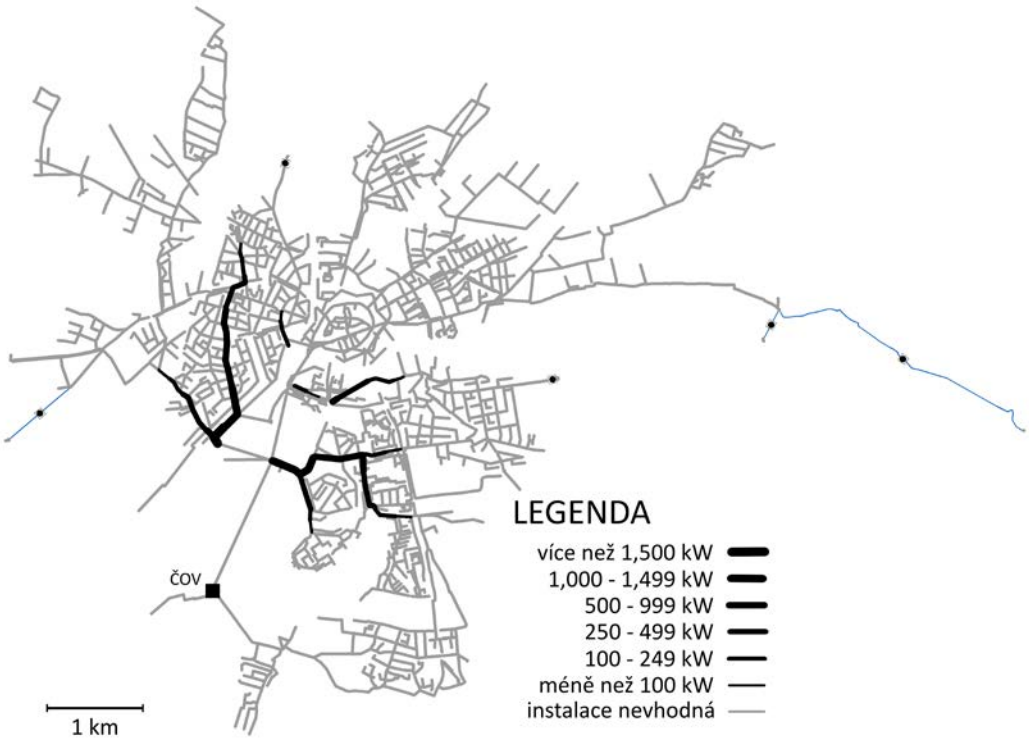
Klasifikace vhodnosti	Teoreticky dostupné teplo		Průměr stoky		Paralelní moduly	
	Počet stok	Délka (m)	Počet stok	Délka (m)	Počet stok	Délka (m)
Vhodné	182	10 742	293	17 920	25	1 851
Částečně vhodné	---	---	611	37 597	460	24 597

Celkové vyhodnocení stok v pilotním povodí pro kombinaci kritérií je zobrazeno na Obr. 3. Celková délka úseků vhodných pro instalaci tepelných výměníků je 642 m, délka částečně vhodných úseků je 8 645 m. Nejvíce úseků vhodných k instalaci bylo nalezeno ve spodních částech kmenových stok B, C, 1C a D, několik úseků pak i na kmenových stokách 1A a E.

Obrázek 3 - Vhodné a částečně vhodné stoky pro instalaci výměníků tepla v pilotním povodí Hradec Králové

Vyhodnocení stokové sítě jako celku

Vyhodnocení konektivity ukázalo, že pro instalaci tepelných výměníků jsou nevhodné krátké úseky na kmenových stokách 1A a 1C. Celková délka vhodných úseků se posouzení konektivity nezměnila (tj. zůstává 642 m), délka částečně vhodných úseků se snížila o 215 m a její výsledná délka je 8 430 m. Výsledná podoba teoretického potenciálu v pilotním povodí je na Obr. 4.



Obrázek 4 - Dostupný výkon tepelných výměníků v pilotním povodí. Šířkou čáry je rozlišen maximální odhadnutý výkon výměníku v případě, že by instalace byla provedena v celém úseku od dotčeného místa proti proudu (tj. v celé sekci vhodných či částečně vhodných úseků)

Závěry

Představený postup posuzování vhodnosti stok pro instalaci výměníku tepla je obecně použitelný, avšak v případě jiných typů výměníku nebo jiných klimatických a ekonomických podmínek musí být hodnoty kritérií vhodnosti příslušně upraveny.

Teplotní a průtokové charakteristiky použité pro identifikaci vhodnosti jednotlivých stok obsahují určité nejistoty, protože monitoring i kalibrace simulačního modelu byly provedeny pouze v uzávěrných profilech kmenových stok. Před každým zamýšleným projektem instalace tepelného výměníku do stoky by proto měl být proveden sezónní monitoring teplot a průtoků v místě instalace a jejich statistické vyhodnocení.

V rámci projektu bude provedeno vyhodnocení realizovatelného potenciálu stokové sítě pilotního povodí pro získávání tepla z odpadní vody, které bude zohledňovat informace o možných odběratelích tepla (v závislosti na vzdálenosti od stoky a potřebě energie), ekonomickou návratnost a okrajové podmínky dané především přípustným snížením teploty odpadní vody vzhledem k účinnosti a nákladům čištění odpadních vod.

Vyvinutý tepelný výměník bude instalován na dvou lokalitách v pilotním povodí a bude testován jeho provoz a různé způsoby údržby za účelem minimalizace nárostů biofilmu.

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. Simulační model poskytly Vodovody a kanalizace Hradec Králové, a.s. a monitoring umožnila Královéhradecká provozní, a.s.

Literatura

[1] DWA – M114 (2009). Energy from Wastewater – Thermal and Potential Energy. DWA Hennef.

[2] Schmid, F. (2008). Sewage Water: Interesting Heat Source for Heat Pumps and Chillers. 9th International IEA Heat Pump Conference, Switzerland. Paper No. 5.22, 1–12.

[3] Holba, M., Bartoník, A., Škorvan, O., Horák, P., Počinková, M. a Plotěný, K. (2012). Energetický potenciál odpadních vod. *Vodní hospodářství* 62(2), 42-48.

[4] Wanner, O., Panagiotidis, V., Clavadetscher, P. and Siegrist, H. (2005). Effect of heat recovery from raw wastewater on nitrification and nitrogen removal in activated sludge plants. *Water Research* 39, 4725-4734.

[5] Bott, T.R. (1995). Fouling of Heat Exchangers. Elsevier.

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

[7] Wanner, O. (2004). Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Dübendorf: EAWAG.

[8] Monsalve, S.N. (2011). Energy in the Urban Water Cycle: A Case Study of Heat Recovery in the Sewer System of Amsterdam. MSc Thesis, Waternet – Politecnico di Torino – TU Delft.

[9] Stránský, D., Kabelková, I., Jelínek, M., Bareš, V. a Šťastná, G. (2014). Vývoj tepelných výměníků pro získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci a výběr vhodných míst jejich instalace. *Vodní hospodářství* 64(8), 40-43.

[10] Müller, E.A. und Butz, J. (2010). Abwasserwärmenutzung in Deutschland – Aktueller Stand und Ausblick. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 57(5), 437–442.