

Změna mikrobiálního společenství při terciárním čištění odpadních vod

ANDREA BENÁKOVÁ, ELIŠKA VOBECKÁ, MARTIN PEČENKA, JANA ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, JIŘÍ WANNER

Klíčová slova: dezinfekce — *Escherichia coli* — odpadní voda — opětovné využívání — poloprovozní jednotka — terciární čištění — závlahy

SOUHRN

Cílem příspěvku je prezentace dílčích výsledků testování terciární technologie pro recyklaci vyčištěných městských vod tak, aby mohly být využity pro závlahy městské zeleně, hřišť či pro čištění ulic. Kvalita získané vody závisí na oblasti použití. Důraz je kladen zejména na mikrobiologickou kvalitu získané vody, neboť chemické ukazatele upravované odpadní vody nepředstavují významné riziko při využívání vody pro nepitné účely. Byl potvrzen význam dezinfekčního stupně. Kvalita vody byla dostatečně hygienicky zabezpečena i při skladování.

ÚVOD

Cílem příspěvku je prezentace dílčích výsledků společného projektu Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, Fakulty technologie a ochrany prostředí a Pražských vodovodů a kanalizací, a. s., TA ČR TH03030080 „Recyklace odpadních vod pro využití ve vodním hospodářství měst budoucnosti“. Projekt je zaměřen na testování vhodné kombinace vodárenských a čistírenských technologií pro dočištění odtoku z městské čistírny odpadních vod tak, aby byl svojí kvalitou vhodný zejména pro využití ve městě. Ve městech je využívána pro nepitné účely voda pitná. Navrhované technologie si kladou za cíl nahradit využívání drahé pitné vody levnější vodou recyklovanou a šetřit zásoby podzemních a povrchových vod. V rámci testování byly odzkoušeny kombinace běžně používaných technologií úpravy a čištění vod jako koagulace, písková filtrace, membránová filtrace, filtrace přes granulované aktivní uhlí a hygienické zabezpečení (dezinfekce) chlorací a UV zářením. Koagulace byla zařazena pro odstranění zbytkových koncentrací organického znečištění, separace po koagulaci byla řešena pískovou či membránovou filtrací. Membránová filtrace je sice dražší na pořízení a provoz, ale přispívá ke zvýšení účinnosti hygienického zabezpečení upravované vody. Pro odstranění mikropolutantů, např. léčiv, pesticidů apod. byla zařazena filtrace přes granulované aktivní uhlí.

Jako příklad terciárního dočištění odpadních vod a jejich využití v praxi lze uvést jižní Austrálii, kde byl v roce 1999 uveden do provozu projekt, který zahrnuje využití sekundárního čištění (primární sedimentace, zkrápěné filtry a stabilizační rybníky) následovaného terciárním čištěním (flotace, filtrace a dezinfekce). Následný distribuční systém dodává ročně přes 20 mil. m³ závlahové vody ročně. V australském Sydney bylo již v roce 2000 zásobeno 15 000 domů v nové rezidenční čtvrti denně 25 000 m³ vody pro nepitné účely s využitím duálního distribučního systému. Čistírna odpadních vod se zde skládá z primární sedimentace, biologického odstraňování dusíku a fosforu, koagulace, flokulace, usazování, filtrace, dezinfekce chlorem a úpravy hodnoty pH. Kanadské City of Vernon čerpá svoji vyčištěnou odpadní vodu do reservoáru, kde setrvává téměř celý rok, než je dezinfikována chlorem a používána pro závlahy v zemědělství i v rekreačních oblastech. Při rozšiřování zavlažované oblasti byla navíc uvedena do provozu čistírna s biologickým odstraňováním nutrientů, filtrací, UV zářením a chlorací. V japonském Tokiu již od roku 1989 běží projekt využívající vyčištěnou odpadní vodu pro splachování toalet, úklid v komerčních budovách a hotelích a zalévání v okolních parcích. Čištění zahrnuje biologické čištění, chemickou koagulaci, filtraci, ozonizaci a chloraci. Průměrně je tak denně dodáváno 2 372 m³ vyčištěné odpadní vody.

Z Evropy je možné zmínit Španělsko, kde je ve městě Portbou odpadní voda čištěna s využitím koagulace, flokulace, filtrace a dezinfekce UV zářením i chlorem. Kapacita systému je 15 m³·h⁻¹ a vyčištěná voda je využívána pro městské nepitné účely, včetně zavlažování, čištění ulic a požární ochrany [1–3].

Reálné možnosti opětovného využívání recyklovaných odpadních vod závisí na vývoji evropské a národní legislativy. V květnu roku 2020 vešlo v platnost nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2020/741 o minimálních požadavcích na opětovné využívání vod, které reaguje na nedostatek vodních zdrojů, a podporuje tak využívání recyklovaných odpadních vod zejména pro závlahy v zemědělství, ale i v dalších odvětvích [4]. Mezi dodatečnými parametry se rovněž vyskytují těžké kovy, pesticidy, léčivé přípravky, vedlejší produkty dezinfekce, mikroplasty či geny rezistence na antibiotika. V souvislosti

Tabulka 1. Požadavky na kvalitu recyklované vody pro závlahy podle [4, 5]

Table 1. Requirements for the quality of recycled water for irrigation according to [4, 5]

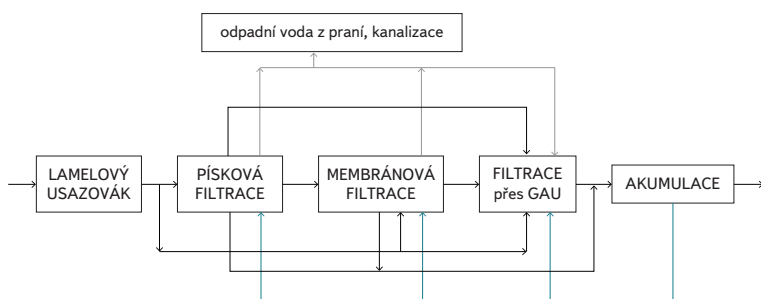
		ČSN 75 7143 [5]			Nařízení EU 2020/741 [4]			
		Třída I	Třída II	Třída III	Třída A	Třída B	Třída C	Třída D
Koliformní bakterie	KTJ/ml	100	1 000	> 1 000	x	x	x	x
Enterokoky	KTJ/ml	10	100	> 100	x	x	x	x
<i>Escherichia coli</i>	číslo/100 ml	x	x	x	≤ 10	≤ 100	≤ 1 000	≤ 10 000

s těmito látkami však bude nutné vypracovat metodiku pro rizikovou analýzu těchto látek při daném využití recyklované odpadní vody. Dalším závazným dokumentem v oblasti zemědělských závlah je norma ČSN 75 7143 Jakost vody pro závlahy, která je platná již od roku 1992 [5]. Oba tyto dokumenty jsou v příspěvku využity pro posouzení mikrobiální kvality vody upravené čtyřmi vybranými technologickými uspořádáními. Požadavky na námi sledované ukazatele podle těchto dvou dokumentů jsou uvedeny v *tabulce 1*. Pro využití recyklované vody v městském vodním hospodářství je důležitá i norma ČSN ISO 20761 Opětovné využití vody v městských oblastech [6].

METODIKA

Poloprovozní jednotka

Pro terciární dočištění odpadních vod bylo na základě laboratorního testování navrženo poloprovozní zařízení o kapacitě $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ vyprodukované vody (viz *obr. 1*). Navržené zařízení kombinuje různé typy filtrace a dezinfekce pro hygienické zabezpečení vody a umožňuje získat produkt s různou kvalitou podle způsobu využití. Navržená jednotka je testována od září 2019 na Ústřední čistírně odpadních vod Praha.



Obr. 1. Schéma poloprovozního zařízení

Fig. 1. Schema of pilot plant

V *tabulce 2* jsou definovány parametry dílčích technologií, které je možné provozovat v různých kombinacích. Do surové vody je možné dávkovat koagulační činidlo, polymerní organický flokulant či chlornan sodný pro předchloraci vody. Následuje lamelová usazovací nádrž, ve které dochází k odstranění sraženin vzniklých během procesu koagulace. Pro filtrace vody se v úplném uspořádání jedná o pískovou filtraci, membránovou filtraci (ultrafiltraci) a filtraci přes granulované aktivní uhlí (GAU), hygienické zabezpečení UV lampou (UVAT001) a chlornanem sodným (postupně zkoušené koncentrace chloru $3,5$ a $4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Upravená voda je jímána do akumulací nádrže (doba zdržení 90 minut). Na vstupu a výstupu je kontinuálně měřen zákal, hodnota pH a teplota vody. Za každým technologickým stupněm jsou umístěna odběrová místa pro pravidelné vzorkování upravované vody. V předložené práci jsou prezentovány výsledky následujících technologických uspořádání:

- uspořádání A: koagulace – písková filtrace – dezinfekce – akumulace,
- uspořádání B: písková filtrace – membrána – dezinfekce – akumulace,
- uspořádání C: písková filtrace – GAU – dezinfekce – akumulace,
- uspořádání D: koagulace – písková filtrace – membránová filtrace – GAU – dezinfekce – akumulace.

Tabulka 2. Charakterizace dílčích technologií poloprovozního zařízení

Table 2. Characterization of partial technologies of pilot unit

Technologie	Parametr	Hodnota
Písková filtrace	zrnitost podložní vrstvy	1,6–4 mm
	zrnitost náplně	1–2 mm
	průtočná rychlost	$1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
	filtrační cyklus	16 hodin
	max. tlaková ztráta	6,2 bar
	výška filtrační náplně	1 m
Membránová filtrace	velikost vláken	0,8–1,2 mm
	velikost pórů	$0,08 \text{ } \mu\text{m}$
	režim	out-in
	průtočná rychlost	$1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
	filtrační cyklus	15 min.
	max. transmembránový tlak	2,2 bar
GAU filtrace	typ uhlí	Filtrisorb F300
	velikost částic	$8 \times 30 \text{ mesh}$
	koef. stejnorodnosti	1,9
	jodové číslo	min. $950 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$
	BET	$950 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
	výška filtrační náplně	1 m

Mikrobiologické analýzy

Jako mikrobiální indikátory účinnosti terciárního čištění odpadních vod byly zvoleny kultivovatelné mikroorganismy při $22 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $36 \text{ } ^\circ\text{C}$ podle normy ČSN EN ISO 6222 [7] či psychrofilní a mezofilní bakterie podle norem ČSN 75 7842 [8] a ČSN 75 7841 [9]. Dále koliformní bakterie a *Escherichia coli* podle normy ČSN EN ISO 9308-2 [10], koliformní bakterie podle normy ČSN 75 7837 [11], *Escherichia coli* podle normy ČSN 75 7835 [12], intestinální enterokoky podle normy ČSN EN ISO 7899-2 [13] a *Clostridium perfringens* podle přílohy č. 6 vyhlášky č. 252/2004 Sb. [14]. Protože byla na určitou dobu uzavřena biologická laboratoř ÚTVP VŠCHT Praha z důvodů pandemie koronaviru a bylo zapotřebí zachovat kontinuitu sledování provozu poloprovozního zařízení, byly vzorky zpracovávány pracovištěm PVK, a. s., Laboratoř pracoviště PVK, a. s., má pro námi sledované ukazatele mikrobiální kvality vody zavedené trochu jiné metody (na základě jiných norem). V tomto případě namísto kultivovatelných mikroorganismů při $22 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $36 \text{ } ^\circ\text{C}$ byly stanovovány psychrofilní a mezofilní bakterie (ČSN 75 7842; ČSN 75 7842), koliformní bakterie kultivačně na Endoagaru (ČSN 75 7837) a *E. coli* na m-FC médiu (ČSN 75 7835).

Koliformní bakterie, *Escherichia coli*, intestinální enterokoky, *Clostridium perfringens* a kultivovatelné mikroorganismy jsou sledované mikrobiologické parametry v pitné vodě (dané vyhláškou č. 252/2004 Sb.). Norma ČSN 75 7143 Jakost vody pro závlahy předepisuje sledování parametrů koliformní bakterie, fekální koliformní bakterie, intestinální enterokoky, salmonely a somatické kolifágy [5]. Nařízení EU 2020/741 o minimálních požadavcích na opětovné využívání vod

předepisuje pravidelné sledování *Escherichia coli* a *Clostridium perfringens* při testování účinnosti nového zařízení pro dočištění odpadní vody. V případě možnosti vzniku aerosolů rovněž legionely [4]. Koliformní bakterie, *Escherichia coli* a intestinální enterokoky jsou indikátory fekálního znečištění. *Clostridium perfringens* je uváděn jako indikátor přítomnosti parazitických prvoků *Cryptosporidium* či *Giardia* a kultivovatelné mikroorganismy jsou indikátorem účinnosti jednotlivých technologií [15].

V případě kultivovatelných mikroorganismů, psychofilních a mezofilních bakterií byl očkovan objem 1 ml ředěného či neředěného vzorku (titr ředění byl vždy zvolený podle stupně mikrobiálního znečištění vzorku vody, např. 10^{-1} až 10^{-4}). Pro ostatní mikrobiální ukazatele (koliformní bakterie, *E. coli*, intestinální enterokoky a *C. perfringens*) byl použit objem 0,1, 1, 10 a 100 ml neředěného vzorku (volba objemu neředěného vzorku se řídila stupněm mikrobiálního znečištění).

Mikrobiologické analýzy byly prováděny s četností 1x týdně. Pro lepší přehlednost uvádíme sledované mikrobiologické parametry v tabulce 3.

Tabulka 3. Sledované mikrobiologické parametry

Table 3. Monitored microbial parameters

Parametr	Norma	Zkratka v textu
Kultivovatelné mikroorganismy při 22 °C, 36 °C	ČSN EN ISO 6222	Kumi 22 °C, 36 °C
Psychofilní bakterie	ČSN 75 7842	PB
Mezofilní bakterie	ČSN 75 7841	MB
Koliformní bakterie	ČSN EN ISO 9308-2 ČSN 75 7837	Koli
<i>Escherichia coli</i>	ČSN EN ISO 9308-2 ČSN 75 7835	<i>E. coli</i>
Intestinální enterokoky	ČSN EN ISO 7899-2	Ent
<i>Clostridium perfringens</i>	vyhláška č. 252/2004 Sb., příl. č. 6	CP

Tabulka 4. Mikrobiální kvalita vstupní odpadní vody

Table 4. Microbial quality of incoming wastewater entering the pilot plant

	Jednotka	Průměr	Medián	Minimum	Maximum
Koliformní bakterie (ČSN EN ISO 9308-2)	MPN/100 ml	553 315	387 300	24 000	2 419 600
Koliformní bakterie (ČSN 75 7837)	KTJ/100 ml	169 969	142 500	46 000	420 000
<i>E. coli</i>	MPN/100 ml	151 235	101 700	3 000	1 203 300
Enterokoky	KTJ/100 ml	30 385	18 050	2 000	550 000
<i>Clostridium perfringens</i>	KTJ/100 ml	5 626	2 450	500	40 000
Psychofilní bakterie	KTJ/ml	79 875	98 000	7 000	129 000
Mezofilní bakterie	KTJ/ml	56 778	56 000	8 000	107 000
Kultivovatelné mikroorganismy 22 °C	KTJ/ml	256 211	180 000	21 800	1 090 000
Kultivovatelné mikroorganismy 36 °C	KTJ/ml	183 167	159 000	5 400	970 000

VÝSLEDKY A DISKUSE

Kvalita vstupní odpadní vody

Z pohledu fyzikálně-chemických parametrů, vyčištěná odpadní voda, která byla dále terciárně dočišťována, vyhovuje mezinárodním standardům pro opětovné využívání vody a jejich snižování nebylo předmětem návrhu polopropovozní jednotky. I tak lze říci, že při zařazení technologických stupňů písková filtrace, membránová filtrace a filtrace přes GAU docházelo ke snížení o 28 % v případě organického znečištění charakterizované parametrem chemická spotřeba kyslíku ($CHSK_{Mn}$), amoniakální dusík byl odstraněn z cca 28 %, koncentrace celkového fosforu byla snížena v průměru o 46 % a koncentrace orthofosforečnanového fosforu o 40 %. Po zařazení sorpčního stupně analýzy prokázaly, že GAU snižuje obsah organického znečištění vody. Oproti uspořádání bez sorpčního stupně došlo k odstranění tohoto typu znečištění o 72 %.

Vstupní odpadní voda obsahuje vysoké počty mikroorganismů (tabulka 4), což by znamenalo zdravotní riziko při jejím využívání, proto je důraz kladen na mikrobiologickou kvalitu výstupní odpadní vody po terciární úpravě. V tabulce 4 jsou průměrná data mikrobiálních ukazatelů za období 10/19–11/20. Z hodnot je patrné, že mikrobiální kvalita vstupní odpadní vody je kolísavá. Koliformní bakterie byly nejčastěji přítomny v řádech 10^5 MPN/100 ml, resp. KTJ/100 ml, *E. coli* v řádech 10^4 či 10^5 MPN/100 ml, intestinální enterokoky 10^4 KTJ/100 ml, *Clostridium perfringens* v řádech 10^3 KTJ/100 ml, psychofilní bakterie v řádech 10^4 či 10^5 KTJ/ml, mezofilní bakterie v řádech 10^4 KTJ/ml, kultivovatelné mikroorganismy při 22 °C v řádech 10^5 KTJ/ml a kultivovatelné mikroorganismy při 36 °C v řádech 10^5 KTJ/ml. Ukazatel *E. coli* představoval průměrně 19 % z celkového počtu zastoupených koliformních bakterií. Nebyl prokázán významný vliv ročního období na mikrobiální kvalitu vstupní odpadní vody.

Uspořádání koagulace – písková filtrace – dezinfekce – akumulace (uspořádání A)

V tabulce 5 jsou uvedeny průměrné hodnoty mikrobiálních parametrů z jednotlivých stupňů daného uspořádání. V tabulce 6 jsou zaznamenány účinnosti odstranění sledovaných mikroorganismů v jednotlivých stupních technologického uspořádání. Z tabulky 5 je patrné, že koagulace nemá zásadní vliv na eliminaci mikrobiálního znečištění. Počty koliformních bakterií, *E. coli* a kultivovatelných mikroorganismů při 22 °C byly zvýšeny. Po pískové filtraci došlo ke snížení

Tabulka 5. Mikrobiální kvalita v jednotlivých stupních uspořádání A
Table 5. Microbial quality in individual stages of arrangement A

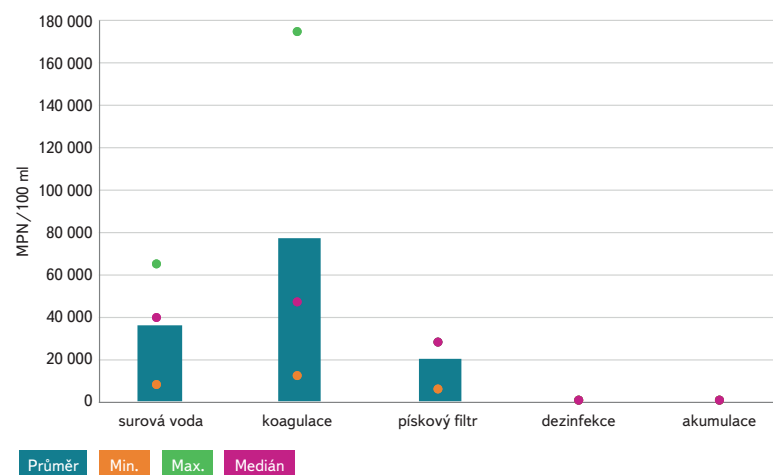
	Koli (MPN/100 ml)	<i>E. coli</i> (MPN/100 ml)	Ent (KTJ/100 ml)	CP (KTJ/100 ml)	Kumi 22 °C (KTJ/ml)	Kumi 36 °C (KTJ/ml)
Vstup	173 830	36 587	9 807	2 633	73 833	56 800
Koagulace	196 180	76 840	8 447	2 550	84 733	39 533
Pískový filtr	128 829	19 995	6 310	537	40 800	14 243
Dezinfekce	0	0	0	45	1 939	240
Akumulace	0	0	1	28	82	47

Tabulka 6. Účinnost odstranění mikroorganismů v jednotlivých stupních uspořádání A
Table 6. Efficiency of microorganisms removal in individual stages of arrangement A

	Koli (%)	<i>E. coli</i> (%)	Ent (%)	CP (%)	Kumi 22 °C (%)	Kumi 36 °C (%)
Koagulace	-13	-110	14	3	-15	30
Pískový filtr	26	45	36	80	45	75
Dezinfekce	100	100	100	98	97	cca 100
Akumulace	100	100	100	99	cca 100	cca 100

Pozn.: Porovnáno vždy s počty ve vstupní vodě.

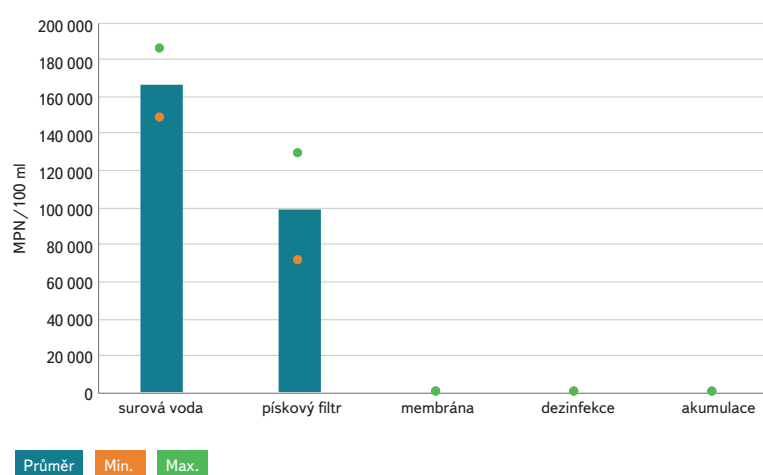
počtů všech sledovaných mikroorganismů, ale pouze u ukazatele *Clostridium perfringens* bylo toto snížení o jeden řád (80% účinnost ve srovnání se vstupem). Za dezinfekční stupněm byly se 100% účinností odstraněny koliformní bakterie, *E. coli* a intestinální enterokoky, a dále *Clostridium perfringens* a kultivovatelné mikroorganismy s účinností vyšší než 97%. Akumulace kvalitu vody nezhorsila, naopak došlo k dalšímu mírnému snížení počtů *Clostridium perfringens* a kultivovatelných mikroorganismů. Voda po dezinfekci a akumulaci splňovala kritéria pro závlahové vody třídy I. podle ČSN 75 7143 [5] v ukazatelích koliformní bakterie a enterokoky a kritéria pro recyklaci vod třídy A podle nařízení EU 2020/741 [4] v ukazateli *E. coli*. Na obr. 2 jsou vyobrazeny statistické charakteristiky pro *E. coli* podle normy ČSN EN ISO 9308-2 (lit. 10, tři měření). U pískového filtru je hodnota mediánu a maxima přibližně shodná.



Obr. 2. Statistické charakteristiky pro *E. coli*, uspořádání A
Fig. 2. Statistical characteristics for *E. coli*, arrangement A

Uspořádání písková filtrace – membrána – dezinfekce – akumulace (uspořádání B)

V tabulce 7 jsou uvedeny průměrné hodnoty mikrobiálních parametrů z jednotlivých stupňů daného uspořádání. V tabulce 8 jsou zaznamenány účinnosti odstranění sledovaných mikroorganismů v jednotlivých stupních technologického uspořádání. Z tabulky 7 je patrné, že písková filtrace snížila počty všech mikroorganismů, maximálně však o jeden řád u počtů *E. coli* podle ČSN EN ISO 9308-2, koliformních bakterií podle ČSN 75 7837 a psychrofilních bakterií. Největší účinnost odstranění na pískovém filtru byla zaznamenána u psychrofilních bakterií (79%), nejmenší pak u koliformních bakterií podle ČSN 75 7837. Zařazení membránové filtrace významně vylepšilo účinnost eliminace zejména



Obr. 3. Statistické charakteristiky pro *E. coli*, uspořádání B
Fig. 3. Statistical characteristics for *E. coli*, arrangement B

Tabulka 7. Mikrobiální kvalita v jednotlivých stupních uspořádání B
Table 7. Microbial quality in individual stages of arrangement B

	Koli (MPN/100 ml)	<i>E. coli</i> (MPN/100 ml)	Koli (KTJ/100 ml)	Ent (KTJ/100 ml)	CP (KTJ/100 ml)
Vstup	726 250	166 650	130 833	25 450	1 900
Pískový filtr	327 700	99 550	93 733	10 595	1 150
Membrána	0	0	2	77	1 121
Dezinfekce	0	0	1	2	0
Akumulace	3	0	1	1	11

Tabulka 7. Mikrobiální kvalita v jednotlivých stupních uspořádání B – pokračování
Table 7. Microbial quality in individual stages of arrangement B – continuation

	PB (KTJ/ml)	MB (KTJ/ml)	Kumi 22 °C (KTJ/ml)	Kumi 36 °C (KTJ/ml)
Vstup	19 000	34 500	326 500	381 000
Pískový filtr	4 000	10 750	140 000	109 500
Membrána	20	401	890	1 640
Dezinfekce	0	3	386	106
Akumulace	0	2	92	198

Tabulka 8. Účinnost odstranění mikroorganismů v jednotlivých stupních uspořádání B
Table 8. Efficiency of microorganisms removal in individual stages of arrangement B

	Koli 1 (%)	Koli 2 (%)	<i>E. coli</i> (%)	Ent (%)	CP (%)	PB (%)	MB (%)	Kumi 22 °C (%)	Kumi 36 °C (%)
Pískový filtr	55	28	40	58	39	79	69	57	71
Membrána	100	cca 100	cca 100	99,7	41	99,9	99	99,7	99,6
Dezinfekce	100	cca 100	cca 100	cca 100	100	100	cca 100	99,9	cca 100
Akumulace	cca 100	cca 100	cca 100	cca 100	99	100	cca 100	cca 100	99,9

Pozn.: Porovnáno vždy s počty ve vstupní vodě, Koli 1 hodnoty podle metody ČSN EN ISO 9308-2 [11], Koli 2 hodnoty podle metody ČSN 75 7837 [12].

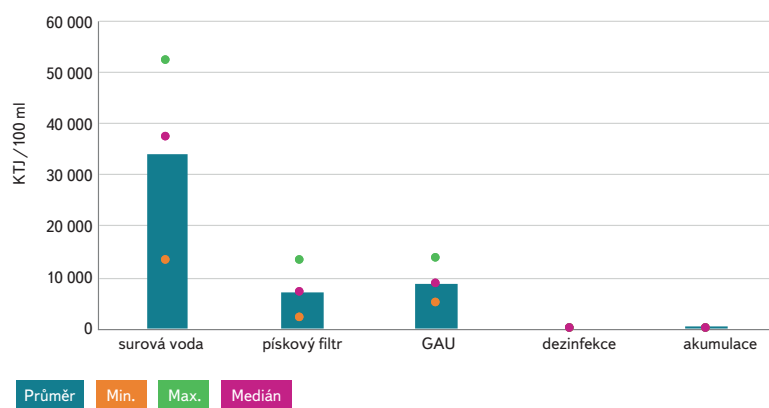
v ukazatelích koliformní bakterie a *E. coli*, které byly sníženy na nulové či téměř nulové hodnoty. Rovněž s velkou účinností byly odstraněny intestinální enterokoky (99,7 % ve srovnání se vstupem), psychofilní a mezofilní bakterie (více jak 99 % ve srovnání se vstupem) a dále kultivovatelné mikroorganismy při 22 °C a 36 °C (více než 99 % ve srovnání se vstupem). Ukazatel *Clostridium perfringens* byl eliminován pouze s 41% účinností za membránou. Dezinfekční krok pak eliminoval *Clostridium perfringens* na nulové hodnoty, které byly mírně zvýšeny během akumulace. Celková účinnost odstranění *Clostridium perfringens* však zůstala na vysokých hodnotách 99 %. Kritéria pro závlahové vody třídy I. podle ČSN 75 7143 [5] v ukazatelích koliformní bakterie a enterokoky a kritéria pro recyklaci vod třídy A podle nařízení EU 2020/741 [4] v ukazateli *E. coli* byla již splněna po membránové filtraci. Na obr. 3 jsou vyobrazeny statistické charakteristiky pro *E. coli* podle normy ČSN EN ISO 9308-2 [10]. Medián není uveden, protože jsou prezentována data ze dvou hodnot.

Uspořádání písková filtrace – GAU – dezinfekce – akumulace (uspořádání C)

V tabulce 9 jsou uvedeny průměrné hodnoty mikrobiálních parametrů z jednotlivých stupňů daného uspořádání. V tabulce 10 jsou zaznamenány účinnosti odstranění sledovaných mikroorganismů v jednotlivých stupních technologického uspořádání. Z tabulky 9 je patrné, že písková filtrace snížila počty všech sledovaných mikrobiologických ukazatelů, avšak pouze u enterokoků a *E. coli* podle normy ČSN 75 7835 došlo ke snížení o řád (účinnost 49 %, resp. 80 %). Psychofilní a mezofilní bakterie byly na pískovém filtru odstraněny s více než 50% účinností. Filtrace přes granulované aktivní uhlí dále kvalitu vody vylepšila. Řádové změny byly zaznamenány u počtu koliformních bakterií (účinnost 82 % ve srovnání se vstupem) a psychofilních bakterií (účinnost 91 % ve srovnání se vstupem). K významnému snížení počtů všech sledovaných mikroorganismů došlo až po dezinfekci. Po akumulaci došlo k navýšení počtu psychofilních bakterií, avšak účinnost odstranění zůstává na hodnotách vyšších než 99 %. Voda po dezinfekci a akumulaci splňovala kritéria pro závlahové vody

Tabulka 9. Mikrobiální kvalita v jednotlivých stupních uspořádání C
Table 9. Microbial quality in individual stages of arrangement C

	Koli (KTJ/100 ml)	<i>E. coli</i> (KTJ/100 ml)	Ent (KTJ/100 ml)	PB (KTJ/ml)	MB (KTJ/ml)
Vstup	180 000	34 067	11 917	81 000	50 000
Pískový filtr	120 000	6 983	6 083	26 833	21 467
GAU	32 167	8 687	3 287	6 973	12 190
Dezinfekce	0	0	0	0	1
Akumulace	1	1	0	281	6



Obr. 4. Statistické charakteristiky pro *E. coli*, uspořádání C
Fig. 4. Statistical characteristics for *E. coli*, arrangement C

třídy I. podle ČSN 75 7143 [5] v ukazatelích koliformní bakterie a intestinální enterokoky a kritéria pro recyklaci vod třídy A podle nařízení EU 2020/741 [4] v ukazateli *E. coli*. Na obr. 4 jsou vyobrazeny statistické charakteristiky pro *E. coli* podle metody ČSN 75 7835 (lit. 12, pět měření).

Uspořádání koagulace – písková filtrace – membránová filtrace – GAU – dezinfekce – akumulace (uspořádání D)

V tabulce 11 jsou uvedeny průměrné hodnoty mikrobiálních parametrů z jednotlivých stupňů daného uspořádání. V tabulce 12 jsou zaznamenány účinnosti odstranění sledovaných mikroorganismů v jednotlivých stupních technologického uspořádání. Opět bylo potvrzeno, že koagulace se významně nepodílí na eliminaci sledovaných mikroorganismů. Zvýšeny byly počty intestinálních enterokoků, *Clostridium perfringens* a kultivovatelných mikroorganismů při 22 °C.

Tabulka 10. Účinnost odstranění mikroorganismů v jednotlivých stupních uspořádání C
Table 10. Efficiency of microorganisms removal in individual stages of arrangement C

	Koli (%)	<i>E. coli</i> (%)	Ent (%)	PB (%)	MB (%)
Pískový filtr	33	80	49	67	57
GAU	82	75	72	91	76
Dezinfekce	100	100	100	100	cca 100
Akumulace	cca 100	cca 100	100	99,7	cca 100

Pozn.: Porovnáno vždy s počty ve vstupní vodě.

Písková filtrace snížila počty sledovaných mikroorganismů kromě ukazatele *E. coli*. S největší účinností byly odstraněny koliformní bakterie (účinnost 60 % ve srovnání se vstupem). Filtrace přes membránu způsobila významné snížení sledovaných mikroorganismů. Účinnost jejich eliminace byla téměř 100 % (ve srovnání se vstupem).

GAU způsobilo mírné navýšení téměř všech mikroorganismů. Dezinfekce snížila počty koliformních bakterií, *E. coli*, intestinálních enterokoků a *Clostridium perfringens* na nulové hodnoty. Kultivovatelné mikroorganismy při 22 °C a 36 °C snížily počty na jednotky KTJ/ml. Stejná kvalita vody byla udržena i během akumulace. Voda splňovala kritéria pro zvlahové vody třídy I. podle ČSN 75 7143 v ukazatelích koliformní bakterie a intestinální enterokoky a kritéria pro recyklaci vod třídy A podle nařízení EU 2020/741 [4] v ukazateli *E. coli* již po membránové filtraci. Po filtraci přes GAU byly zvýšeny počty intestinálních enterokoků, voda přestala splňovat v tomto ukazateli kritéria pro vodu kvality třídy I. podle ČSN 75 7143 [5]. Dezinfekce však následně snížila počty mikroorganismů na kvalitu pitné vody, kterou si udržela rovněž během akumulace. Na obr. 5 jsou vyobrazeny statistické charakteristiky pro *E. coli* podle normy ČSN EN ISO 9308-2 (lit. 10, čtyři měření).

Porovnání prezentovaných technologií

Koagulace neměla významný vliv na odstranění sledovaných mikroorganismů. Koagulační stupeň byl řešen způsobem tzv. in-line koagulace (jednostupňové koagulace) s dávkováním 10× ředěného koagulačního preparátu a pouze rychlým promícháním činidla. Tato technologie dlouhodobě nevykazuje vysokou účinnost na eliminaci mikrobiálního znečištění. Souběžný odběr bodových vzorků nátoky a vody po koagulaci (tento vzorek je navíc odebírán až po určité době zdržení v lamelovém usazováku) je pravděpodobnou příčinou zjištěných záporných hodnot odstranění mikrobiálního znečištění. Rodríguez-Chueca a kolektiv [16] studovali vliv kombinace koagulace, flokulace a Fentonovy

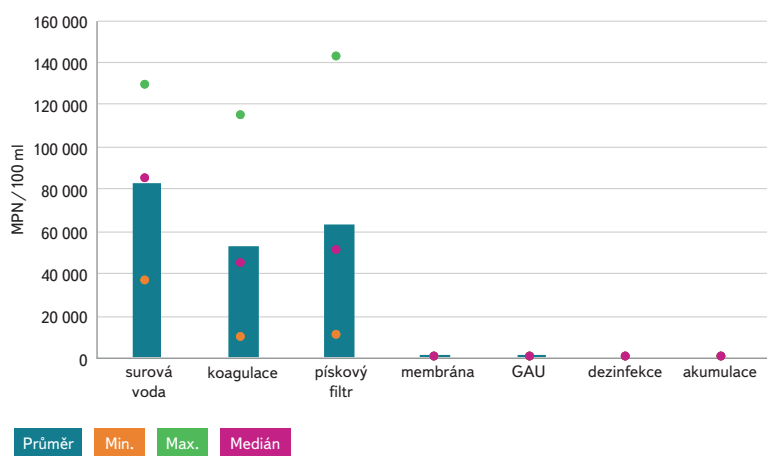
Tabulka 11. Mikrobiální kvalita v jednotlivých stupních uspořádání D
Table 11. Microbial quality in individual stages of arrangement D

	Koli (MPN/100 ml)	<i>E. coli</i> (MPN/100 ml)	Ent (KTJ/100 ml)	CP (KTJ/100 ml)	Kumi 22 °C (KTJ/ml)	Kumi 36 °C (KTJ/ml)
Vstup	597 963	83 250	29 400	16 125	357 500	171 500
Koagulace	281 238	52 963	62 250	25 500	502 250	163 750
Písková filtrace	238 702	63 478	28 250	12 670	289 250	160 875
Membrána	3	2	8	1	2 193	927
GAU	16	2	167	4	2 864	652
Dezinfekce	0	0	0	0	5	10
Akumulace	0	0	0	0	1	2

Tabulka 12. Účinnost odstranění mikroorganismů v jednotlivých stupních uspořádání D
Table 12. Efficiency of microorganisms removal in individual stages of arrangement D

	Koli (%)	<i>E. coli</i> (%)	Ent (%)	CP (%)	Kumi 22 °C (%)	Kumi 36 °C (%)
Koagulace	53	36	-112	-58	-40	5
Písková filtrace	60	24	4	21	19	6
Membrána	cca 100	cca 100	cca 100	cca 100	cca 100	99
GAU	cca 100	cca 100	99	cca 100	cca 100	99
Dezinfekce	100	100	100	100	cca 100	cca 100
Akumulace	100	100	100	100	cca 100	cca 100

Pozn.: Porovnáno vždy s počty ve vstupní vodě.



Obr. 5. Statistické charakteristiky pro *E. coli*, uspořádání D
Fig. 5. Statistical characteristics for *E. coli*, arrangement D

reakce na počty bakterií druhů *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* a *Escherichia coli*. Během koagulace (Fe^{3+} , $15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) došlo ke snížení počtů všech bakterií druhů *Enterococcus faecalis* a *Pseudomonas aeruginosa* o 1,5 logaritmické jednotky, ale počet bakterií *E. coli* byl snížen pouze o 0,5 logaritmické jednotky.

Písková filtrace vždy snižovala počty sledovaných mikroorganismů, ale maximálně o jeden řád. Výjimkou je *E. coli*, která v jednom případě zvýšila počty po pískové filtraci přibližně o 20 %, ale koliformní bakterie své počty nezvýšily. Účinnosti eliminace mikroorganismů se nejčastěji držely pod 50 %. Vojtěchovská Šrámková a kolektiv ve studii [17] dosahovali účinností pro eliminaci koliformních bakterií, *E. coli*, intestinálních enterokoků a kultivovatelných mikroorganismů při 22 °C přes 90 % za použití pískové filtrace s náplní o jemnější zrnitosti 0,5–1 mm. Během laboratorního testování pískové filtrace jsme se v našem projektu potýkali se zhoršenou kvalitou vody za pískovou filtrací pravděpodobně díky nežádoucímu strhávání mikrobiálního biofilmu [18]. Tento jev se nám v poloprovzním uspořádání podařilo eliminovat.

Zařazení membránové filtrace za pískovou filtraci dosahovalo účinností odstranění všech mikroorganismů více než 99 %, voda splňovala vždy již za membránovou filtrací nejpřísnější kritéria podle nařízení EU 2020/741 [4] a v jednom případě i podle ČSN 75 7143 [5].

GAU za membránovou filtraci zhoršilo kvalitu zejména v ukazateli intestinálních enterokoků. Přesto by tato voda mohla být využita pro zemědělské závlahy podle nařízení EU 2020/741 [4].

Ve všech prezentovaných technologiích byla potvrzena nutnost zařazení hygienického stupně pro maximální eliminaci mikrobiálních parametrů, což je v souladu se studií Vojtěchovské Šrámkové a kol. [17], která potvrdila 100% účinnost odstranění *E. coli*, koliformních bakterií a intestinálních enterokoků za floataci, pískovým filtrem a filtrem s Filtralite až po dezinfekci UV zářením. Všechny

technologie po dezinfekci splňovaly požadavky pro závlahové vody třídy I. podle ČSN 75 7143 [5] v ukazatelích koliformní bakterie a enterokoky a kritéria pro recyklaci vod třídy A podle nařízení EU 2020/741 [4]. V případě uspořádání koagulace – písková filtrace – membránová filtrace – GAU – dezinfekce – akumulace byly dokonce po dezinfekci splněny požadavky na kvalitu pitné vody. V případě uspořádání filtrace – membrána – dezinfekce – akumulace a uspořádání koagulace – písková filtrace – membránová filtrace – GAU – dezinfekce – akumulace byla nejpřísnější kritéria pro *E. coli* podle nařízení EU 2020/741 [4] splněna již za membránou. Membrána v rozšířeném uspořádání eliminovala rovněž enterokoky na hodnoty splňující kritéria pro závlahové vody třídy I. podle ČSN 75 7143 [5]. Podobných výsledků dosáhli rovněž Hendricks a Pool [19], kteří detekovali za membránou při terciárním čištění odpadní vody počty *E. coli* nižší než 1 KTJ ve 100 ml.

Vysoká kvalita vody byla rovněž udržena i během akumulace. Obecně lze konstatovat, že akumulace neměla na zhoršení kvality získané vody významný vliv.

ZÁVĚR

Cílem studie byla prezentace dílčích výsledků projektu TA ČR TH03030080 Recyklace odpadních vod pro využití ve vodním hospodářství měst budoucnosti. Na základě výsledků laboratorních testů byla navržena kontejnerová pilotní jednotka pro terciární dočištění biologicky vyčištěné odpadní vody s množností kombinace filtračních a dezinfekčních technologií. V příspěvku byla prezentována čtyři technologická uspořádání zahrnující různé kombinace koagulace, pískové filtrace, filtrace přes GAU a membránové filtrace včetně dezinfekce UV zářením a chlorací. Kvalita vody během akumulace nebyla významně negativně ovlivněna. I při nejjednodušším uspořádání koagulace – písková filtrace bylo po dezinfekci dosaženo mikrobiální kvality vody vhodné pro závlahy či pro vodní hospodářství ve městech, pokud nebude docházet k tvorbě aerosolů, neboť v rámci příspěvku nebyly sledovány počty legionel. O zařazení GAU, membránové filtrace či jejich kombinace budou rozhodovat další přísnější požadavky na chemickou kvalitu získané recyklované vody.

Poděkování

Práce byla vypracována v rámci projektu TA ČR TH03030080 Recyklace odpadních vod pro využití ve vodním hospodářství měst budoucnosti. Autoři děkují RNDr. Šárce Liškové z PVK, a. s., za provedené mikrobiologické analýzy.

Literatura

- [1] ASANO, T., BURTON, F.L., LEVERENZ, H.L., TSUCHIHASCHI, R., and TCHOBANOGLIOUS, G. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. 2007, Mc Graw-Hill, New York. ISBN 978-0-07-145927-3.
- [2] JIMENEZ, B. and ASANO, T. *Water Reuse: And international survey of current practice, issues and needs*. IWA Publishing, 2008. ISBN 9781843390893.
- [3] ESLAMIAN, S. *Urban Water Reuse: Handbook*. 2016, IWA Publishing. ISBN 978-1-4822-2914-1.
- [4] Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2020/741 ze dne 25. 5. 2020 o minimálních požadavcích na opětovné využívání vod.
- [5] ČSN 75 7143 *Jakost vod. Jakost vody pro závlahy*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
- [6] ČSN ISO 20761 *Opětovné využití vody v městských oblastech – Směrnice pro hodnocení bezpečnosti opětovného využití vody – Hodnocené ukazatele a metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [7] ČSN EN ISO 6222 *Jakost vod – Stanovení kultivovatelných mikroorganismů – Stanovení počtu kolonií očkovaním do živného agarového kultivačního média*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [8] ČSN 75 7842 *Jakost vod – Stanovení psychrofilních bakterií*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [9] ČSN 75 7841 *Jakost vod – Stanovení mezofilních bakterií*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [10] ČSN EN ISO 9308-2 *Kvalita vod – Stanovení Escherichia coli a koliformních bakterií – Část 2: Metoda nejpravděpodobnějšího počtu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [11] ČSN 75 7837 *Jakost vod – Stanovení koliformních bakterií v nedesinfikovaných vodách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [12] ČSN 75 7835 *Jakost vod – Stanovení termotolerantních koliformních bakterií a Escherichia coli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [13] ČSN EN ISO 7899-2 *Jakost vod – Stanovení intestinálních enterokoků – Část 2: Metoda membránových filtrů*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [14] Vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody, příl. č. 6, 2004.
- [15] BITTON, G. *Wastewater microbiology*, 3rd edition, 2005, John Wiley & Sons, Inc., USA, p. 740.
- [16] RODRÍGUEZ-CHUECA, J., MORALES, M., MOSTEO, R., ORMAD, M.P., and OVELLEIRO, J.L. Inactivation of *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* present in treated urban wastewater by coagulation–flocculation and photo-Fenton processes. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2013, Vol. 12, p. 864–871. DOI: 10.1039/c3pp25352j.
- [17] VOJTĚCHOVSKÁ SRÁMKOVÁ, M., DIAZ-SOSA, V., and WANNER, J. Experimental verification of tertiary treatment process in achieving effluent quality required by wastewater reuse standards. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, Vol. 22, p. 41–45. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.01.003.
- [18] PEČENKA, M., PETERKOVÁ, E., ČIHÁKOVÁ, P., JANDA, V., WANNER, J., et al. Tertiary treated effluent of municipal waste water treatment plants as an alternative water source for use in smart cities. ICETI 2018, 2nd International Conference on Environmental Technology and Innovations, Radek Vurm (Ed.), 21. 11.–22. 11. 2018, Prague, Czech Republic, 108–118. ISBN 978-80-7592-034-8 (on-line version).
- [19] HENDRICK, R. and POOL, E.J. The effectiveness of sewage treatment processes to remove faecal pathogens and antibiotic residues. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2012, Vol. 47, p. 289–297. DOI: 10.1080/10934529.2012.637432.

Autoři

Ing. Andrea Benáková, Ph.D.

✉ andrea.benakova@vscht.cz

ORCID: 0000-0001-8842-5262

Ing. Eliška Vobecká

✉ eliska.vobecka@vscht.cz

ORCID: 0000-0002-9779-8367

Ing. Martin Pečenka, Ph.D.

✉ martin.pecenka@vscht.cz

ORCID: 0000-0002-6412-1974

doc. RNDr. Jana Říhová Ambrožová, Ph.D.

✉ jana.ambrozova@vscht.cz

ORCID: 0000-0002-1503-409X

prof. Ing. Jiří Wanner, DrSc.

✉ jiri.wanner@vscht.cz

ORCID: 0000-0003-0788-995X

Ústav technologie vody a prostředí,
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2020.12.004

CHANGE OF MICROBIAL COMMUNITY IN TERTIARY WASTEWATER TREATMENT

**BENAKOVA, A.; VOBECKA, E.; PECENKA, M.;
RIHOVA AMBROZOVA, J.; WANNER, J.**

Department of Water Technology and Environmental Engineering,
University of Chemistry and Technology, Prague

Keywords: disinfection – *Escherichia coli* – wastewater –
reuse – pilot plant – tertiary treatment – irrigation

The aim of this contribution is the presentation of partial results of testing tertiary technology for recycling of treated urban wastewater. The obtained water will be used for watering of greenery, playgrounds, or for street cleaning. The quality of the treated water depends on the purpose of the use. Emphasis is placed especially on the microbiological quality of the obtained water because the chemical parameters of treated wastewater do not pose a significant risk when used for non-drinking purposes. The importance of the disinfection step was confirmed. The water quality was sufficiently hygienically ensured even during storage.