LIFE2Water

Ověření a vyhodnocení technologií pro terciární dočištění komunálních odpadních vod

ZÁPIS Z KONFERENCE ODPADOVÉ VODY 2016

SOUČÁST VÝSTUPU D6d1 PROJEKTU LIFE2WATER

PART OF DELIVERABLE D6D1 OF LIFE2WATER PROJECT

ŘÍJEN 2016

www.life2water.cz

AQUA PROCON

Brněnské vodárny a kanalizace a.s.

ALS

1. INFORMACE O KONFERENCI

Konference Odpadové vody je mezinárodní konference organizovaná Asociací čistírenských expertů SR v spolupráci s dalšími asociacemi, výzkumnými ústavy a akademickými institucemi. Ve dnech 19. až 21. 10. 2014 se konal devátý ročník konference. Hlavním cílem konference je vytvořit prostor pro otevřenou prezentaci nejnovějších informací, výzkumných projektů a provozních zkušeností z následujících oblastí: (1) aktuální legislativní a zákonodárné aktivity v oblasti odvádění a čištění odpadních vod; (2) integrovaný přístup k ochraně recipientů; (3) zachytávání a odvádění odpadních vod; (4) mechanické a fyzikálně-chemické způsoby čištění odpadních vod; (5) biologické způsoby čištění odpadních vod (aerobní a anaerobní procesy, aktivace, biofilmové reaktory, dosazovací nádrže apod.); (6) odstraňování nutrientů; (7) domovní a malé ČOV; (8) komunální ČOV; (9) kalové hospodářství ČOV; (10) čištění průmyslových odpadních vod; a (11) měření, regulace a optimalizace procesů čištění odpadních vod..

Odborná náplň konference byla rozdělena na několik sekcí: (1) komunální ČOV, (2) stokové sítě a odvádění dešťových vod, (3) legislativa a ochrana vod, (4) nové procesy a technologie, (5) specifické polutanty, (6) provozování a kontrola ČOV, (7) nástroje hodnocení ČOV, (8) nové trendy v technologii čištění OV, (9) anaerobní procesy, kalové hospodářství ČOV, (10) odstraňování nutrientů, (11) specifické polutanty v odpadních vodách, (12) průmyslové odpadní vody, monitoring znečištění.

2. PŘÍSPĚVEK NA KONFERENCI

Na konferenci byly prezentovány dva příspěvky (přednáška a posterové sdělení) a ve sborníku konference byly otištěny příspěvky LIFE2Water – vyhodnocení pilotního provozu a LIFE2Water – pilotní jednotky pro dočištění komunálních odpadních vod.

Příspěvky ve sborníku konference:

STŘÍTESKÝ, L., PEŠOUTOVÁ, R., HABR, V., HRICH, R., HALEŠOVÁ, T. LIFE2Water – vyhodnocení pilotního provozu. In *Odpadové vody 2016.* 1. Bratislava: Vydavateľstvo NOI, 2016. s. 186-191. ISBN: 978-80-89882-00-7.

STŘÍTESKÝ, L., PEŠOUTOVÁ, R., HRICH, R., HABR, V., ADAMEC, T. LIFE2Water – pilotní jednotky pro dočištění komunálních odpadních vod. In *Odpadové vody 2016.* 1. Bratislava: Vydavateľstvo NOI, 2016. s. 87-92. ISBN: 978-80-89882-00-7.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: LIFE2Water – vyhodnocení pilotního provozu

Příloha č.2: LIFE2Water – pilotní jednotky pro dočištění komunálních odpadních vod

Příloha č.3: Prezentace na konferenci

Příloha č.4: Posterové sdělení

LIFE2WATER – VYHODNOCENÍ PILOTNÍHO PROVOZU

Luboš Stříteský[1], Radka Pešoutová[1], Vladimír Habr[2], Robert Hrich[2], Taťána Halešová[3]

[1]AQUA PROCON s.r.o., Palackého tř. 12, Brno
[2] Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., Pisárecká 555/1a, Brno-Pisárky
[3] ALS Czech Republic, s.r.o., Na Harfě 336/9, Praha 9 - Vysočany

Abstrakt
V tomto příspěvku jsou představeny výsledky poloprovozního ověření technologií využívající sonolýzy ozonu a kombinace mikrosítové filtrace s UV zářením a peroxidem vodíku probíhající na ČOV Brno-Modřice. Pro účely řešení projekty byly navrženy a zkonstruovány dvě pilotní jednotky. Po dobu jednoho roku byly pilotní jednotky sledovány z hlediska odstranění sledovaného znečištění ale i dalších provozních aspektů.

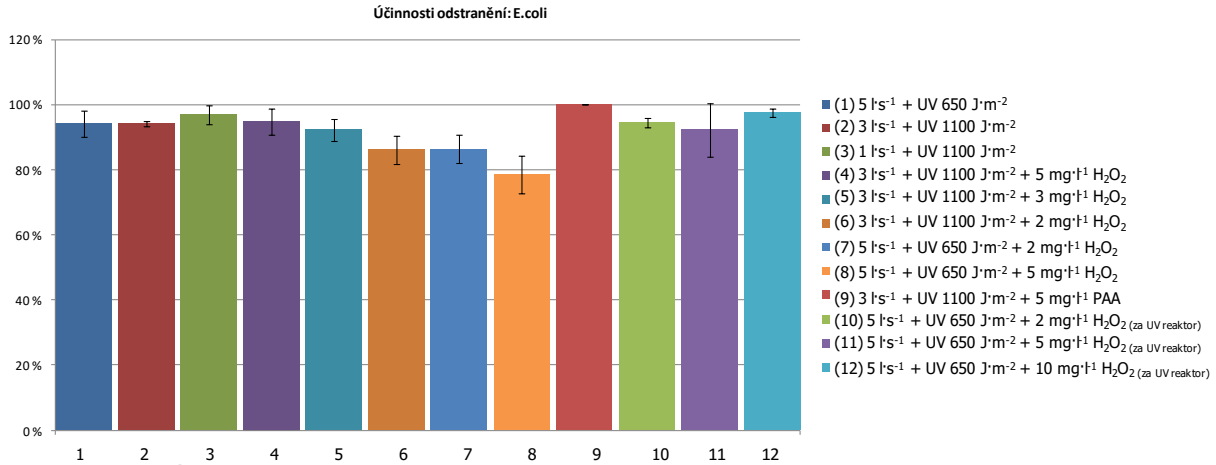
Úvod
Konveční metody čištění odpadních vod se zaměřují na odstranění organických látek, snížení koncentrací dusíku a fosforu na míru přijatelnou pro ekosystém daného toku. Zatížení toků mikrobiálním znečištěním a dalšími negativně působícími látkami jako například léčivy a jejich metabolity, produkty osobní péče, pesticidy a různými průmyslovými chemikáliemi zůstává vysoké, jelikož nedochází k žádným technologickým opatřením na jeho minimalizaci.
Odstraňování tohoto znečištění je technicky náročné, ale důležité pro snížení negativních dopadů na vodní ekosystémy. Reakcí na potřeby zlepšování kvality vypouštěných komunálních odpadních vod je projekt LIFE2Water, jehož cílem je uplatnění inovativních technologií na dočištění komunálních odpadních vod a jejich poloprovozní ověření tak, aby se přispělo k dosažení dobrého ekologického stavu vodních ekosystémů.
V průběhu řešení projektu je sledována účinnost odstranění znečištění (mikrobiální znečištění a znečištění vybranými chemickými látkami) a provozní parametry s důrazem na snížení spotřeby elektrické energie a dalších vstupů na vlastní proces dočištění. V závěru projektu bude vytvořen soubor postupů k výběru vhodné technologie pro terciární dočištění komunálních odpadních vod využitelný provozovateli a projektanty čistíren odpadních vod pro volbu vhodné technologie dočištění. Koordinujícím příjemcem projektu je projektová a inženýrská firma AQUA PROCON s.r.o. Přidruženými příjemci projektu jsou Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. a analytická laboratoř ALS Czech Republic, s.r.o. Projekt je řešen od září 2014 do prosince 2017.

Pilotní jednotky
První pilotní jednotka mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku (MFO/UV) využívá fotochemického rozkladu organických polutantů a inaktivaci mikroorganismů ultrafialovým zářením. Účinnost UV záření je podpořena přídavkem peroxidu vodíku, případně kyseliny peroctové (PAA) a předřazenou mikrosítovou filtrací. Druhá pilotní jednotka sonolýzy ozonu (O_3/UZ) využívá sonolýzy ozonu, která kombinuje ozonizaci s akustickou kavitací (sonolýzou). Při sonolýze ozonu dochází působením ultrazvuku ke zrychlenému rozkladu ozonu na hydroxylové radikály a ve srovnání se samotnou ozonizací nebo se samotnou sonolýzou se dosahuje rychlejšího rozkladu mnoha znečišťujících látek. Dodatečně je umožněno dávkování peroxidu vodíku za účelem srovnání kombinace peroxidu vodíku a ozonu se sonolýzou ozonu.
Pilotní jednotky byly zkonstruovány, na jaře 2015 umístěny na ČOV Brno-Modřice a po dobu jednoho roku provozovány. Průtoky zpracované pilotními jednotkami odpovídají v závislosti na konkrétním provozním stavu průtokům na ČOV velikosti od 400 do 3000 EO.
Bližší popis pilotních jednotek je uveden v příspěvku „LIFE2water – pilotní jednotky pro dočištění komunálních odpadních vod“. V příspěvku je uveden i popis třetí pilotní, která je v současnosti provozována.

Sledované znečištění a použité analytické metody
Primárním sledovaným znečištěním byly vybrané chemické látkami. Mezi sledované chemické látky byly zahrnuty pesticidní látky (celkem sledováno dvacet šest pesticidních látek a jejich metabolitů, mezi nimi atrazin a jeho metabolity, MCPA, MCPP, MCPB), vybrané průmyslové látky (bisfenol A, nonylfenol a oktylfenol a

jejich metability), vybraná léčiva (celkem sledováno dvacet tři látek, mezi nimi diclofenac, karbamazepin, naproxen, vybrané rentgenové kontrastní látky a antibiotika).
Mezi sledované znečištění byly dále zahrnuty běžně sledované základní parametry (BSK_5, $CHSK_{Cr}$, NL, N_C a P_C) a mikrobiální znečištění (*Escherichia coli*, fekální koliformní bakterie a enterokoky).
K vlastnímu testování pilotních jednotek byla využívána biologicky vyčištěná odpadní voda. K zajištění reprezentativnosti odběru vzorků byla pro účely řešení projektu vypracována metodika odběru vzorků. Čtyřiadvaceti hodinové slévané vzorky byly odebírány na vstupu do pilotní jednotky a na výstupu z každé pilotní jednotky pomocí automatických vzorkovačů. Vzorkovače byly připojeny teflonovým potrubím, vzorkování bylo realizováno do sterilních skleněných nádob a následně bylo se vzorky manipulováno tak, aby bylo zamezeno kontaminaci vzorku z hlediska mikrobiologického a také z hlediska kontaminace sledovanými látkami (velmi problematické jsou z tohoto hlediska alkylfenoly, konkrétně všudypřítomný bisfenol A).
Pro stanovení sledovaných chemických látek byly využívány chromatografické metody s hmotnostní detekcí typu trojitého kvadrupolu (LC/MS/MS – pesticidní látky, léčiva; GC/MS/MS – alkylfenoly a bisfenol A). Tyto multireziduální analýzy umožňují nejen stanovení velkého množství analytů, ale díky citlivosti hmotnostního spektrometru lze dosáhnout požadovaných nízkých mezí kvantifikace (cca 0,01 $\mu g \cdot l^{-1}$) nezbytných k posouzení míry odstranění sledovaných látek.

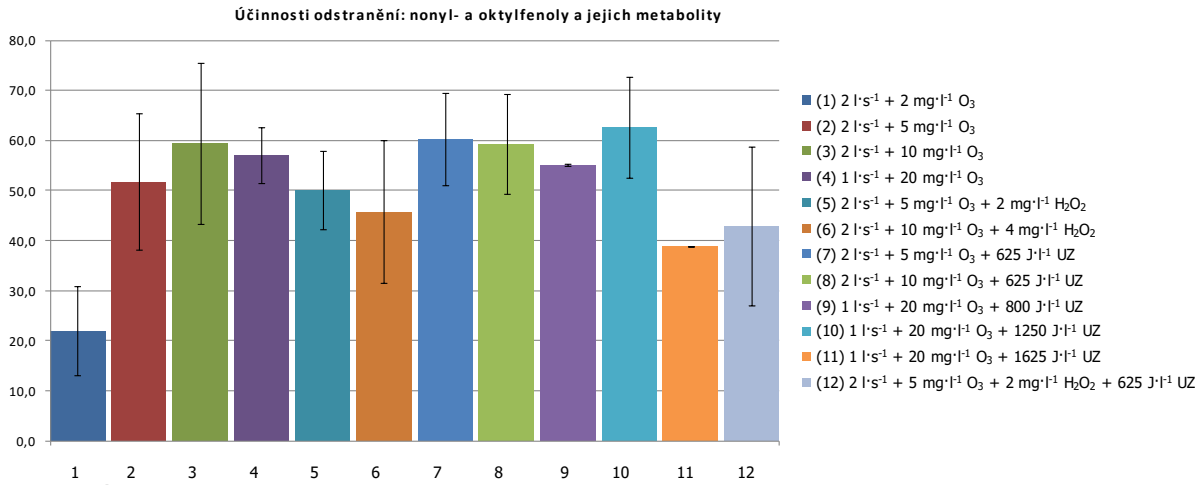
Odstranění sledovaného znečištění
Každá z pilotních jednotek byla testována v provozních podmínkách po dobu jednoho roku. Během testování je několikrát otestováno několik provozních stavů (změny průtoku vody pilotní jednotkou, dávky UV záření, ozonu a dalších chemikálií) s cílem ověřit účinnosti odstranění vybraného znečištění a nároky na provoz a obsluhu za různých provozních podmínek. Všechny provozované stavy jsou patrné z tab. 2 a tab. 3. Účinnosti odstranění pro jednotlivé provozní stavy jsou v grafech uváděny jako průměry a jsou doplněny chybovými úsečkami reprezentující směrodatnou odchylku.
V případě dosažení limitů detekce jsou účinnosti odstranění chemického znečištění vypočítány za předpokladu, že koncentrace na odtoku jsou rovny limitům detekce. Zde uváděné účinnosti odstranění chemického znečištění jsou proto vždy menší než 100 %. Nejvýznamněji se toto projevuje tam, kde jsou koncentrace na vstupu jen málo odlišné od limitů detekce. Pro průměrné vstupní koncentrace a dané limity detekce jsou maximální vykazované účinnosti odstranění cca 75 % pro nonyl- a oktylfenoly a jejich metability, cca 88 % pro atrazin a jeho metability, cca 92 % pro sumu pesticidů, cca 90 % pro sumu pesticidy včetně sledovaných metabolitů a více jak 97 % pro ostatní sledované znečištění. To však nevylučuje, že k dalšímu odstranění látek nedochází.



Obr. 1 Účinnosti odstranění *E. coli* na pilotní jednotce MFO/UV při různých provozních stavech

Účinnosti odstranění sledovaných mikrobiologických parametrů se u pilotní jednotky MFO/UV pohybovaly mezi 64 % a 100 % (ukazatel E. coli viz obr. 1). Nejvyšších účinností odstranění mikrobiologického znečištění bylo dosaženo při použití samotného UV záření, kde se účinnosti odstranění sledovaných ukazatelů pohybovaly mezi 87 % a 92 %. Nulových koncentrací mikrobiologických ukazatelů bylo dosaženo pouze v několika vzorcích s velkou dávkou UV (3300 $J \cdot m^{-2}$) a dále ve všech vzorcích s dávkováním kyseliny peroctové (1100 $J \cdot m^{-2}$ UV a 5 $mg \cdot l^{-1}$ PAA). Při dávkování peroxidu vodíku docházelo oproti všem předpokladům ke snižování účinnosti odstraňování mikrobiologického znečištění, a to pravděpodobně vlivem pohlcování UV záření molekulami peroxidu vodíku. Dodatečně bylo testováno i dávkování peroxidu vodíku za UV reaktor, čímž nebylo dosaženo zlepšení ve srovnání se samotným UV. V tomto případě je navíc v odtoku přítomný nežádoucí

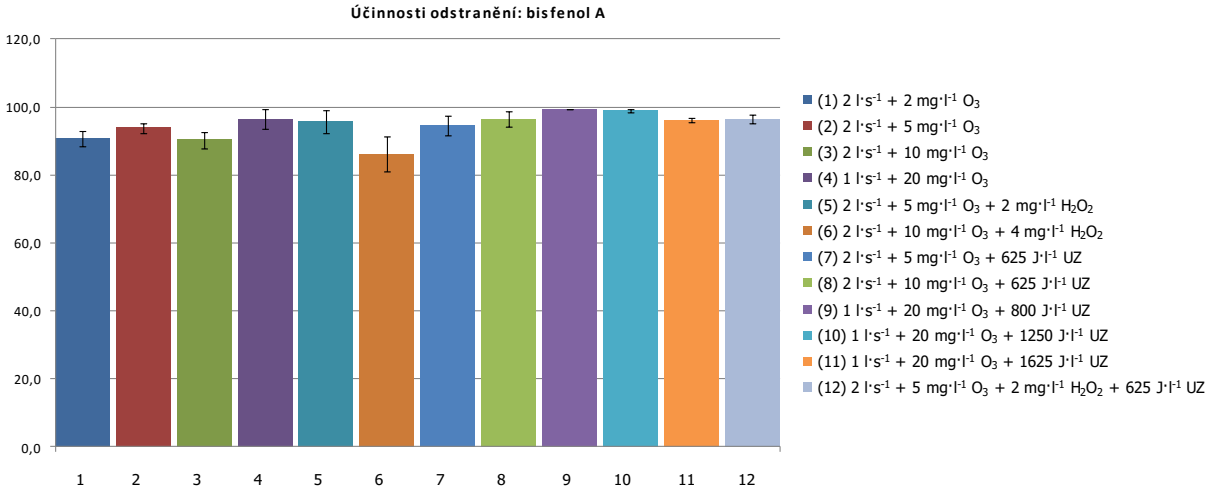
peroxid vodíku. U pilotní jednotky sonolýzy ozonu byly účinnosti odstranění mikrobiologického znečištění blízké 100 %. Nulových koncentrací mikrobiologických ukazatelů bylo dosaženo při vysoké dávce ozonu (50 $mg \cdot l^{-1}$ O_3) a při sonolýze nižší dávky ozonu (20 $mg \cdot l^{-1}$ O_3 + 800 $J \cdot l^{-1}$ UZ).



Obr. 2 Účinnosti odstranění nonyl- a oktyl-fenolů a jejich metabolitů na pilotní jednotce O_3/UZ při různých provozních stavech

Odstranění základních parametrů na jednotce MFO/UV bylo následující: do 30 % P_C, 10 až 50 % NL, do 20 % $CHSK_{Cr}$; BSK_5 a N_C bez významných změn mimo dávkování PAA, která zvyšuje BSK_5 odtoku o cca 5 $mg \cdot l^{-1}$.
Odstranění základních parametrů na jednotce O_3/UZ bylo následující: 10 až 60 % NL, 15 až 45 % $CHSK_{Cr}$, -10 až -90 % BSK_5; P_C a N_C bez významných změn.
Nízké účinnosti odstranění základních parametrů jsou dány již velmi nízkými průměrnými koncentracemi na vstupu do pilotních jednotek: BSK_5 3,0 $mg \cdot l^{-1}$, $CHSK_{Cr}$ 25 $mg \cdot l^{-1}$, NL 10 $mg \cdot l^{-1}$, N_C 7,0 $mg \cdot l^{-1}$ a P_C 0,4 $mg \cdot l^{-1}$.

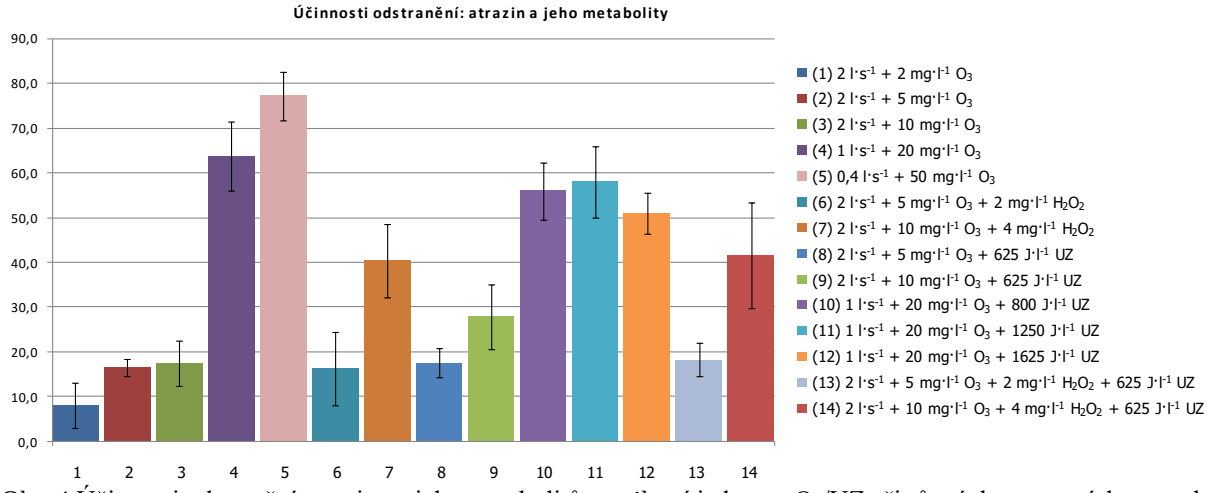
Rozdílná situace nastává při odstraňování znečištění sledovanými průmyslovými látkami, pesticidy a léčivy. Dosažené účinnosti odstranění průmyslových látek a pesticidů pilotní jednotkou MFO/UV byly minimální, jednotlivá léčiva byla v závislosti na provozním stavu odstraňována maximálně do 50 %.



Obr. 3 Účinnosti odstranění bisfenolu A na pilotní jednotce O_3/UZ při různých provozních stavech

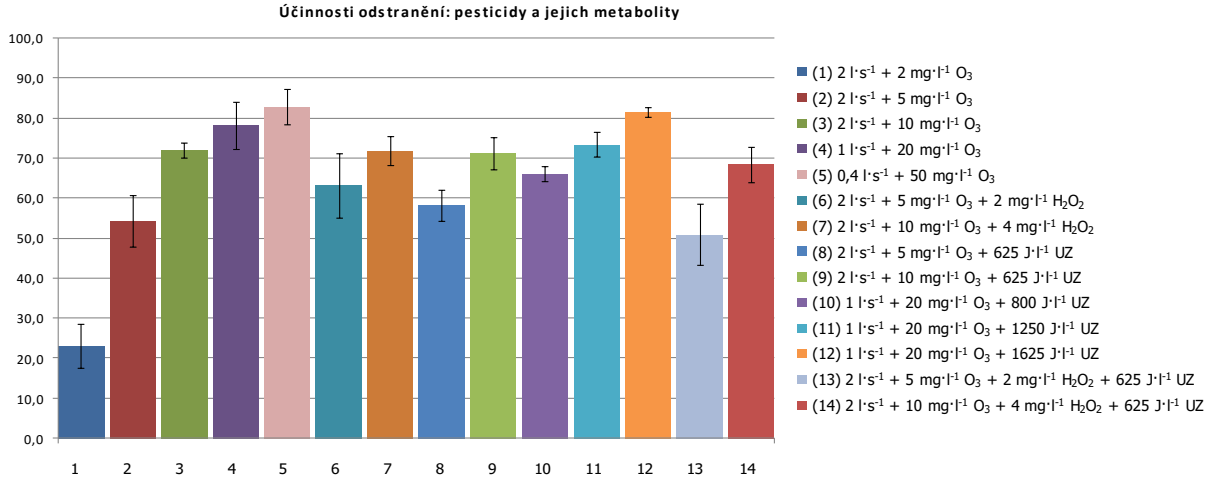
Účinnosti odstranění nonyl- a oktyl-fenolů a jejich metabolitů patřily u pilotní jednotky O_3/UZ mezi nejmenší ze sledovaného chemického znečištění. I při vysokých dávkách ozonu a ultrazvuku docházelo k odstranění pouze do 60 % (viz obr. 2). Důvodem je jejich vyšší odolnost vůči oxidaci a dále u dávky 50 $mg \cdot l^{-1}$ i vysoký limit detekce. Přídavek peroxidu vodíku nemá na odstranění látek z této skupiny pozitivní vliv. Naopak sonolýza ozonu vykazuje dobré výsledky. Např. při dávce 5 $mg \cdot l^{-1}$ O_3 a 1250 $J \cdot l^{-1}$ UZ bylo dosaženo odstranění 60,3 %, kdežto při samotné ozonizaci při stejné dávce ozonu byla účinnost odstranění pouze 51,8 %.

Naopak míra odstranění bisfenolu A byla vysoká již při malých dávkách ozonu (90,7 % při 2 mg·l^{-1} O_3, viz obr. 3), nicméně bylo nezbytné zabránit kontaminaci vzorků při jejich manipulaci (například použitím vhodných nádob a hadic vzorkovačů). Například při sonolýze ozonu při 20 mg·l^{-1} O_3 a 800 nebo 1200 J·l^{-1} UZ byl bisfenol A odstraněn pod mez detekce. Kombinace ozonu s peroxidem vodíku vede ve srovnání se samotným ozonem k vyšším účinnostem odstranění, avšak přínos není tak patrný.



Obr. 4 Účinnosti odstranění atrazinu a jeho metabolitů na pilotní jednotce O_3/UZ při různých provozních stavech

Účinnosti odstranění atrazinu a jeho metabolitů (viz obr. 4) jsou velmi variabilní, hodnoty odstranění se pohybují od 8 % do 77 %. Např. u řady dávek samotného ozonu je variabilita dána tím, že při nižších dávkách ozonu se atrazin přeměňuje na metabolity a suma atrazinu a jeho metabolitů se tedy výrazně nemění. K vyššímu odstranění metabolitů atrazinu dochází až při dávkách ozonu 20 mg·l^{-1} O_3 a vyšších. Sonolýza ozonu nemá na odstraňování atrazinů a jeho metabolitů pozitivní vliv. Naopak kombinace ozonu s peroxidem vodíku má výrazný pozitivní vliv. Např. při provozním stavu dávce 10 mg·l^{-1} O_3 a 4 mg·l^{-1} H_2O_2 bylo dosaženo účinnosti odstranění 40,4 %, kdežto bez dávkování peroxidu vodíku pouze 17,5 %.

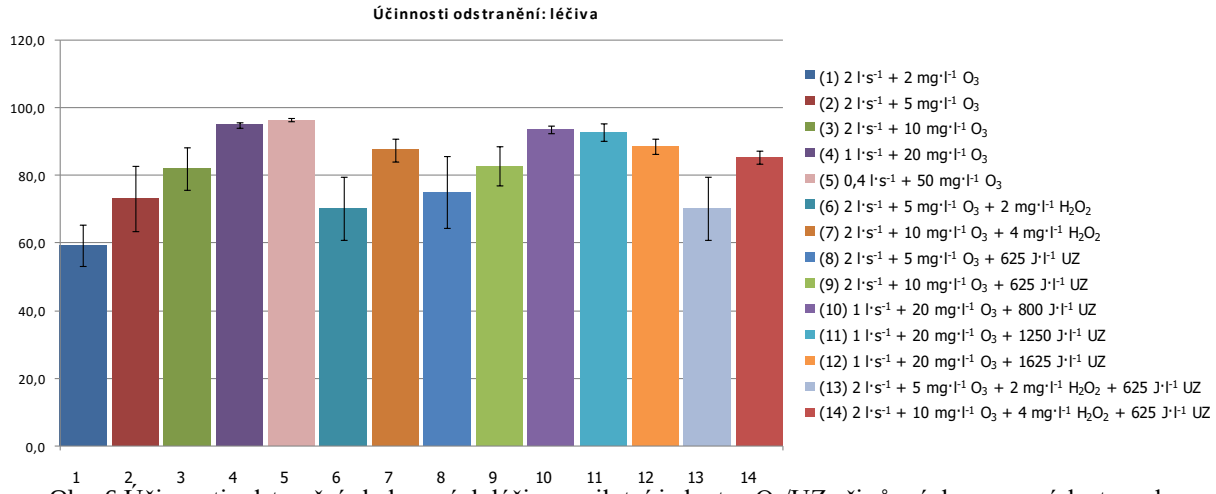


Obr. 5 Účinnosti odstranění sledovaných pesticidů a jejich metabolitů na pilotní jednotce O_3/UZ při různých provozních stavech

Účinnosti odstranění účinných látek pesticidů (viz obr. 5) i pesticidů včetně jejich metabolitů mají podobný průběh (účinnosti odstranění účinných látek jsou obecně o cca 5 % vyšší). Se zvyšující-se dávkou ozonu rostou účinnosti odstranění účinných látek pesticidů a pesticidů včetně jejich metabolitů od 27,1 % respektive 23,0 % do 87,3 % respektive 82,8 % (dávky ozonu od 2 mg·l^{-1} O_3 do 50 mg·l^{-1} O_3). Přídavek peroxidu vodíku nemá výrazný pozitivní vliv na účinnosti odstranění účinných látek pesticidů, avšak má malý pozitivní vliv na účinnosti odstranění pesticidů včetně jejich metabolitů. Např. při dávce 5 mg·l^{-1} O_3 a 2 mg·l^{-1} H_2O_2 bylo dosaženo účinnosti odstranění pesticidů a jejich metabolitů 63,1 %, kdežto při samotné ozonizaci pouze 54,4 %.

U sonolýzy ozonu to platí obdobně, např. při dávce 5 mg·l^{-1} O_3 a 1250 J·l^{-1} UZ bylo dosaženo účinnosti odstranění pesticidů a jejich metabolitů 58,3 %, kdežto při samotné ozonizaci pouze 54,4 %.

Účinnosti odstranění jednotlivých léčiv jsou závislé na odolnosti daného léčiva. Např. diklofenak a karbamazepin byly ve všech provozních stavech mimo nejnižší dávky ozonu (2 mg·l^{-1} O_3) odstraněny v míře větší než 96,9 %. Účinnosti odstranění sumy sledovaných léčiv (viz obr. 6) jsou výrazně nižší ve srovnání s účinnostmi odstranění samotného diklofenaku nebo karbamazepinu. Nejvíce se na tom podílí rentgenové kontrastní látky (iohexol, iomeprol, iopamidol a iopromid), které jsou těžko rozložitelné a na vstupu do pilotní jednotky tvoří průměrně cca 36 % hm. ze všech sledovaných léčiv. V případě samotné ozonizace jsou účinnosti odstranění léčiv od 59,4 % do 96,5 % pro dávky ozonu od ozonu 2 mg·l^{-1} O_3 do 50 mg·l^{-1} O_3. Sonolýza ozonu, ani kombinace ozonu s peroxidem vodíku nemají na účinnosti celkových léčiv výrazný pozitivní vliv.



Obr. 6 Účinnosti odstranění sledovaných léčiv na pilotní jednotce O_3/UZ při různých provozních stavech

V rámci testování pilotní jednotky sonolýzy ozonu bylo dodatečně odebráno několik vzorků pro stanovení AOX a dále pro stanovení ekotoxicity vyčištěné vody. Testy ekotoxicity byly provedeny na perloočkách (*Daphnia magna*), luminiscenčních bakteriích (*Vibrio fischeri*), zelené mikrořase (*Scenedesmus subspicatus*) a na vyšší rostlině (*Sinapis alba*).
V tabulce 1 jsou uvedeny výsledky testů ekotoxicity na vstupu a výstupu z pilotní jednotky O_3/UZ.

Tab. 1 Ekotoxicita vzorků na vstupu a výstupu ze sonolýzy ozonu

		vstup	2 mg·l^{-1} O_3	vstup	10 mg·l^{-1} O_3	vstup	10 mg/L O_3 + 4 mg/L H_2O_2	vstup	20 mg·l^{-1} O_3	vstup	50 mg·l^{-1} O_3
Daphnia magna	% imobilizace	3	8	2	12	2	5	2	5	3	3
Vibrio fischeri	% inhibice	6	17	2	28	-14	16	6	9	9	61
Scenedesmus	% inhibice					-2	-8	27	22	7	7
Sinapis alba	% inhibice			29	31	28	25	17	31	27	19

Ekotoxicita vůči perloočkám *Daphnia magna* a mikrořase *Scenedesmus subspicatus* se výrazně nemění. Luminiscenční bakterie *Vibrio fischeri* jsou z vybraných organismů nejcitlivější, nárůst inhibicí na odtoku z pilotní jednotky je výrazný s výjimkou dávky 20 mg·l^{-1} O_3. V případě hořčice seté (*Sinapis alba*) se prokázal předpoklad, že při nejvyšší dávce ozonu bude ekotoxicita nižší. Příčinou je odstranění účinných látek pesticidů, které způsobují inhibici růstu kořene v biologicky vyčištěné odpadní vodě.

Účinnosti odstranění AOX jsou 23 ± 5 % při dávce 2 mg·l^{-1} O_3 a 44 ± 9 % při dávce 50 mg·l^{-1} O_3. Průměrné AOX na vstupu je 33 ± 5 µg·l^{-1}. Účinnosti odstranění AOX korespondují s účinnostmi odstranění sumy sledovaných kontrastních látek (iohexol, iomeprol, iopamidol a iopromid). U ostatních provozních stavů, kde nebylo AOX sledováno je tedy možné účinnost odstranění AOX odhadnout na základě účinnosti odstranění kontrastních látek.

V tabulkách 2 a 3 jsou uvedeny provozní a celkové náklady na dočištění odpadních vod pomocí MFO/UV a O_3/UZ. V provozních nákladech jsou zahrnuty náklady na elektrickou energii, kyslík, chemikálie (peroxid vodíku, kyselina peroctová a čistící roztok pro UV lampy), vodu, výměnu UV lamp a plachetky mikrosíta a osobní náklady. V celkových nákladech jsou zahrnuty náklady provozní a odpisy ze stavební a strojní části společně s náklady na údržbu. Níže uvedené náklady jsou relevantní pro ČOV velikostní kategorie blízké k velikostem pilotních jednotek, tj. pro ČOV o kapacaitě v řádu jednotek tisíců EO. Pro větší instalace by byly především celkové náklady nižší.

Tab. 1 Provozní a celkové náklady na dočištění odpadní vody pomocí MFO/UV

provozní stav	náklady provozní	náklady celkové
	[Kč·m^{-3}]	
5 l·s^{-1} + UV 650 J·m^{-2}	0,75	2,38
3 l·s^{-1} + UV 1100 J·m^{-2}	1,22	3,52
1 l·s^{-1} + UV 3300 J·m^{-2}	3,53	8,93
3 l·s^{-1} + UV 1100 J·m^{-2} + 5 mg·l^{-1} H_2O_2	1,66	4,13
3 l·s^{-1} + UV 1100 J·m^{-2} + 3 mg·l^{-1} H_2O_2	1,53	4,00
3 l·s^{-1} + UV 1100 J·m^{-2} + 2 mg·l^{-1} H_2O_2	1,43	3,89
5 l·s^{-1} + UV 650 J·m^{-2} + 2 mg·l^{-1} H_2O_2	0,94	2,64
5 l·s^{-1} + UV 650 J·m^{-2} + 5 mg·l^{-1} H_2O_2	1,15	2,85
3 l·s^{-1} + UV 1100 J·m^{-2} + 5 mg·l^{-1} PAA	1,70	4,16
5 l·s^{-1} + UV 650 J·m^{-2} + 2 mg·l^{-1} H_2O_2 (za UV reaktor)	0,88	2,49
5 l·s$_{-1}$ + UV 650 J·m^{-2} + 5 mg·l^{-1} H_2O_2 (za UV reaktor)	1,07	2,69
5 l·s^{-1} + UV 650 J·m^{-2} + 10 mg·l^{-1} H_2O_2 (za UV reaktor)	1,40	3,01

Tab. 2 Provozní a celkové náklady na dočištění odpadní vody pomocí O_3/UZ

provozní stav	náklady provozní	náklady celkové
	[Kč·m^{-3}]	
2 l·s^{-1} + 2 mg·l^{-1} O_3	0,48	1,40
2 l·s^{-1} + 5 mg·l^{-1} O_3	1,08	3,16
2 l·s^{-1} + 10 mg·l^{-1} O_3	2,07	5,89
1 l·s^{-1} + 20 mg·l^{-1} O_3	4,05	11,11
0,4 l·s^{-1} + 50 mg·l^{-1} O_3	10,00	26,28
2 l·s^{-1} + 5 mg·l^{-1} O_3 + 2 mg·l^{-1} H_2O_2	1,29	3,43
2 l·s^{-1} + 10 mg·l^{-1} O_3 + 4 mg·l^{-1} H_2O_2	2,51	6,48
2 l·s^{-1} + 5 mg·l^{-1} O_3 + 625 J·l^{-1} UZ	1,60	3,86
2 l·s^{-1} + 10 mg·l^{-1} O_3 + 625 J·l^{-1} UZ	2,67	6,89
1 l·s^{-1} + 20 mg·l^{-1} O_3 + 800 J·l^{-1} UZ	4,94	12,46
1 l·s^{-1} + 20 mg·l^{-1} O_3 + 1250 J·l^{-1} UZ	5,25	12,95
1 l·s^{-1} + 20 mg·l^{-1} O_3 + 1625 J·l^{-1} UZ	5,51	13,26
2 l·s^{-1} + 5 mg·l^{-1} O_3 + 2 mg·l^{-1} H_2O_2 + 625 J·l^{-1} UZ	1,81	3,95
2 l·s^{-1} + 10 mg·l^{-1} O_3 + 4 mg·l^{-1} H_2O_2 + 625 J·l^{-1} UZ	3,11	7,41

Závěr

Po ročním testování byly patrné rozdíly v míře odstranění sledovaného znečištění a provozní náročnosti obou pilotních jednotek, což se promítá do nákladů na vlastní čištění. Více informací a další výsledky testování jsou k dispozici na webových stránkách projektu www.life2water.cz.

Poděkování

Projekt LIFE2Water (LIFE13 ENV/CZ/000475) je realizován z programu LIFE+ Evropské komise. Program LIFE+ je evropský finanční nástroj podporující projekty zaměřené na ochranu přírody a životního prostředí v Evropské unii. Program sdružuje zdroje a odborné zkušenosti, poskytuje platformu pro přípravu a výměnu osvědčených postupů a znalostí pro zlepšení stavu v prioritních oblastech daných Evropskou unií.

LIFE2WATER – PILOTNÍ JEDNOTKY PRO DOČIŠTĚNÍ KOMUNÁLNÍCH ODPADNÍCH VOD

Luboš Stříteský[1], Radka Pešoutová[1], Robert Hrich[2], Vladimír Habr[2], Tomáš Adamec[1]

[1]AQUA PROCON s.r.o., Palackého tř. 12, Brno
[2] Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., Pisárecká 555/1a, Brno-Pisárky

Abstrakt
V příspěvku je představena pilotní jednotka využívající sonolýzu ozonu, pilotní jednotka kombinující mikrosítovou filtraci s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku a dále ultrafiltrační pilotní jednotka s adsorpcí na aktivní uhlí. Všechny jednotky byly navrženy, zkonstruovány a provozovány v rámci řešení projektu LIFE2Water.

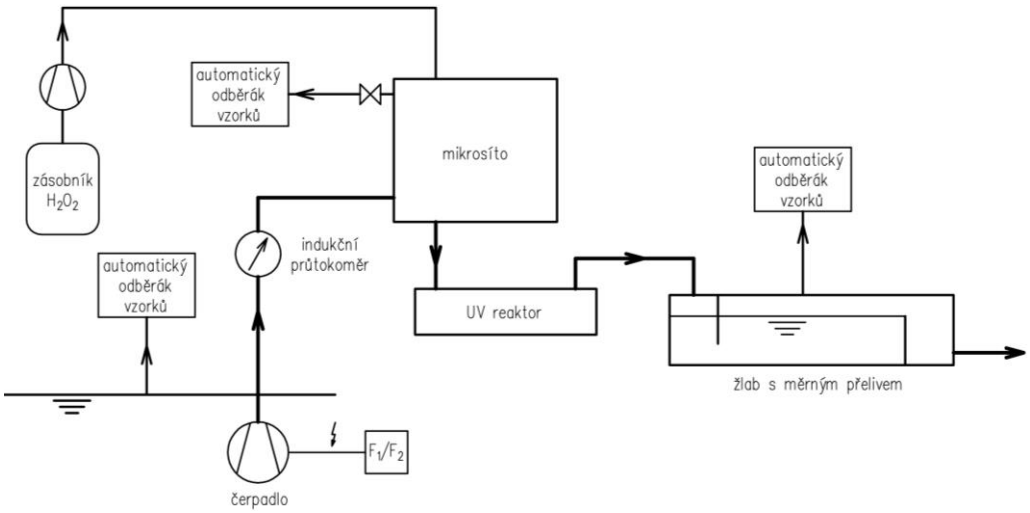
Úvod
Projekt LIFE2Water je řešen na základě problémů spojených se stávajícími technologiemi čištění komunálních odpadních vod, které jsou nedostatečné pro odstranění zbytkových koncentrací celé řady chemických látek a mikrobiálního znečištění. Problém s vnosem zbytkových koncentrací tohoto znečištění do vodního prostředí lze řešit dodatečným zařazením dalšího čistícího stupně. Zde mají prostor nové metody a technologie.
V projektu LIFE2Water byly příjemci projektu AQUA PROCON s.r.o. a Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. vytipovány technologie s potenciálem k eliminaci sledovaného znečištění, které se běžně na dočištění komunálních odpadních vod nepoužívají. Jejich spojením do unikátních celků byla posílena účinnost odstranění sledovaného znečištění. V rámci řešení projektu byla navržena a zkonstruovány pilotní jednotka využívající kombinaci mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku, jednotka sonolýzy ozonu a ultrafiltrační jednotka s adsorpcí na aktivní uhlí. Všechny tři pilotní jednotky jsou představeny v tomto příspěvku.

Pilotní jednotka mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku
UV záření je běžně využíváno k odstranění mikrobiálního znečištění. Dále je možné jej využívat k fotochemickému rozkladu organických polutantů přímou fotolýzou (přímá reakce UV záření s odstraňovanou látkou) a nepřímou fotolýzou (reakce UV záření s peroxidem vodíku, vznik hydroxylových radikálů a jejich následná reakce s látkami ve vodě). Fotolýza peroxidu vodíku přináší ve srovnání se samotným UV zářením vyšší efektivitu a současně nižší spotřebu elektrické energie. Pro zvýšení účinnosti čištění a snížení energetické náročnosti je před samotný UV reaktor předřazen mikrosítový filtr na odstranění nerozpuštěných látek.
Základními komponentami poloprovozní testovací jednotky jsou:

- čerpadlo biologicky vyčištěné odpadní vody;
- mikrosíto;
- dávkovací čerpadlo peroxidu vodíku;
- UV reaktor;
- měrný žlab;
- měření, řízení a elektroinstalace.

Schéma zapojení všech komponent jednotky je uvedeno na následujícím obrázku (obr. 1).
Čerpadlo dopravuje biologicky vyčištěnou odpadní vodu ze zásobní jímky automatické tlakové stanice technologické vody do mikrosítového filtru. Čerpadlo je ponorné, je dimenzováno na maximální průtok 10 $l \cdot s^{-1}$ a je řízeno frekvenčním měničem. Výtlak čerpadla je hadicí veden do budovy s pilotní jednotkou, kde je napojen na pevné potrubí DN150 a následně na mikrosítový filtr.
Mikrosítový bubnový filtr je sériovým výrobkem o kapacitě do 10 $l \cdot s^{-1}$ s ocelovou filtrační tkaninou s průlinami 63 µm. V případě dodržení provozních podmínek zajistí mikrosítový filtr odstranění nerozpuštěných látek na úroveň 5 - 8 $mg \cdot l^{-1}$. Toto napomůže snižování potřebné dávky UV záření k zajištění desinfekce vody a rozkladu peroxidu vodíku na hydroxylové radikály.
Dávkovací čerpadlo musí vzhledem k malé hydraulické době zdržení vody v systému splňovat dostatečně plynulý průtok. Z tohoto důvodu bylo pro dávkování peroxidu vodíku zvoleno peristaltické čerpadlo zajištující

nepřetržitý a rovnoměrný přítok peroxidu vodíku do odpadní vody. Výtlak tohoto čerpadla je zapojen do šachtového přelivu uvnitř mikrosítového filtru, ze kterého odpadní voda přitéká do UV reaktoru.



Obr. 1 Technologické schéma pilotní jednotky mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku

Obr. 2 Pilotní jednotka mikrosítové filtrace se zabudovaným UV reaktorem a dávkováním peroxidu vodíku

Jako zdroj UV záření je použit homologovaný zářič vhodný pro průtoky až do 10 $l \cdot s^{-1}$, při kterých se při UV transmisi 60 % dávka záření pohybuje kolem 220 $J \cdot m^{-2}$. UV reaktor je válcový, vybavený deflektory pro usměrnění proudění a je v něm osazeno 6 ks nízkotlakých UV zářičů. Chemické čištění vnitřních částí reaktoru probíhá recirkulací chemické lázně v reaktoru přes dvojici pracích ventilů.

Poproudně posledním objektem je měrný žlab s trojúhelníkovým přelivem a ultrazvukovým hladinoměrem sloužící k měření průtoku pilotní jednotkou a současně jako vzorkovací místo.

V pilotní jednotce je z důvodu vyhodnocení ekonomiky provozu monitorována spotřeba elektrické energie jednotlivých komponent. Dalšími sledovanými veličinami je průtok čištěné odpadní vody a celkový objem vyčištěné vody. U zásobní jímky automatické tlakové stanice technologické vody, za mikrosítovým filtrem a u měrného žlabu jsou instalovány automatické odběráky.

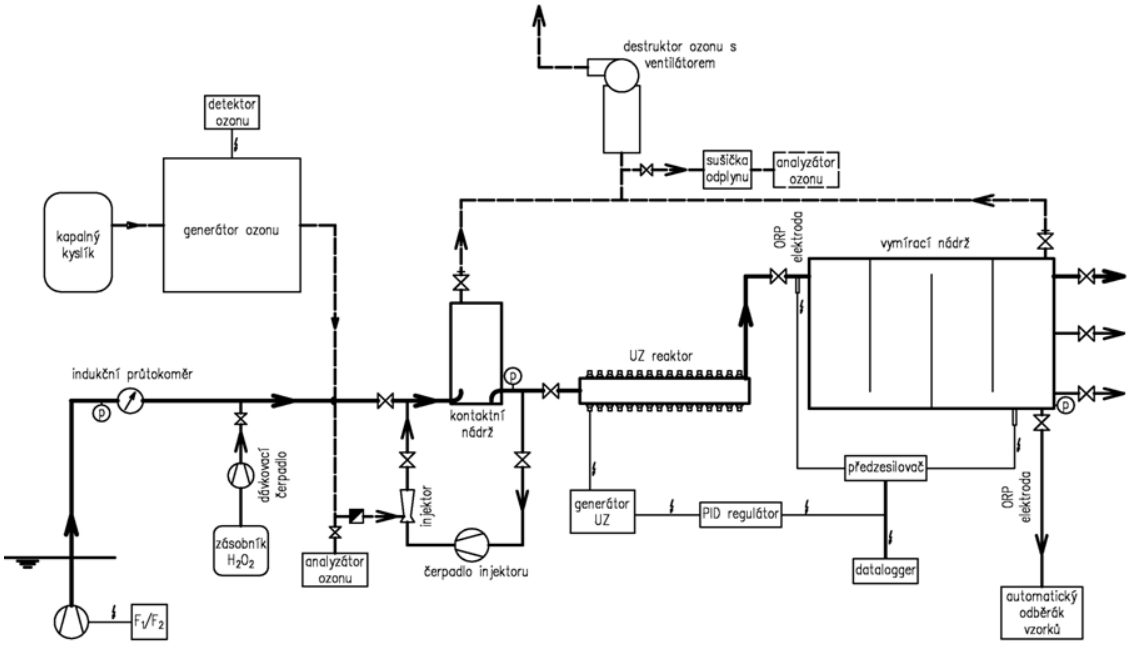
Pilotní jednotka sonolýzy ozonu

Sonolýzou ozonu se rozumí kombinace akustické kavitace (sonolýzy) s ozonizací. Při sonolýze dochází k odbourávání znečištění oxidací hydroxylovými radikály, pyrolýzou látek uvnitř kavitační bubliny, hydrodynamickou erozí a nadkritickou mokrou oxidací na povrchu kavitační bubliny. Sonolýzou ozonu se ve srovnání se samotnou ozonizací nebo se samotnou sonolýzou dosahuje rychlejšího rozkladu mnoha látek a umožňuje snížit dávky ozonu až na třetinu při zachování stejné efektivity čištění. Pro srovnání z hlediska ekonomického i z hlediska účinností odstranění byla zvolena možnost dávkování peroxidu vodíku.

Základními komponenty pilotní jednotky sonolýzy ozonu jsou:

- čerpadlo biologicky vyčištěné odpadní vody.
- dávkovací čerpadlo H_2O_2;
- generátor ozonu;
- zdroj plynného kyslíku;
- systém vnosu plynu do vody;
- kontaktní nádrž;
- ultrazvukový reaktor s generátory ultrazvuku;
- vymírací nádrž;
- systém destrukce přebytečného ozonu; a
- měření, řízení a elektroinstalace.

Schéma zapojení všech komponent jednotky je uvedeno na následujícím obr. 3.



Obr. 3 Technologické schéma pilotní jednotky sonolýzy ozonu

Ponorné čerpadlo biologicky vyčištěné odpadní vody je osazeno v zásobní jímce automatické tlakové stanice technologické vody v sacím koši společném s čerpadly ostatních pilotních jednotek. Čerpadlo je dimenzováno na maximální průtok 5 $l \cdot s^{-1}$ a je řízeno frekvenčním měničem. Jeho výtlak je pohyblivým potrubím veden přes indukční průtokoměr do kontaktní nádrže.

Jako dávkovací čerpadlo peroxidu vodíku bylo zvoleno peristaltické čerpadlo, ze stejných důvodů jako u první pilotní jednotky, jehož výtlak je zapojen před kontaktní nádrž.

K výrobě ozonu slouží vodou chlazený generátor ozonu o jmenovitém výkonu 100 g $O_3.h^{-1}$ využívající čistého kyslíku, jehož zdrojem kyslíku je mobilní odpařovací stanice. Generátor je dále vybaven detektorem ozonu v okolí, který odstaví generátor v případě překročení bezpečné koncentrace ozonu v okolí. Nezbytným doplňkem generátoru je katalytický destruktor ozonu sloužící k likvidaci nerozpuštěného ozonu.

Obr. 4 Pilotní jednotka sonolýzy ozonu - celkový pohled na pilotní jednotku (vlevo) a detail systému vnosu ozonu do vody (vpravo)

Ozonem se s vodou mísí ve vedlejším proudu vody, ve kterém je Venturiho injektor a čerpadlo zajišťující vhodné hydraulické podmínky v injektoru. Součástí systému pro vnos plynu do vody je kontaktní nádrž, ve které se za zvýšeného tlaku rozpouští ozon. Nerozpuštěný kyslík a ozon je z nádrže odváděn do destruktoru ozonu.

Obr. 5 Pilotní jednotka sonolýzy ozonu - generátor ozonu (vlevo) a ultrazvukový reaktor (vpravo)

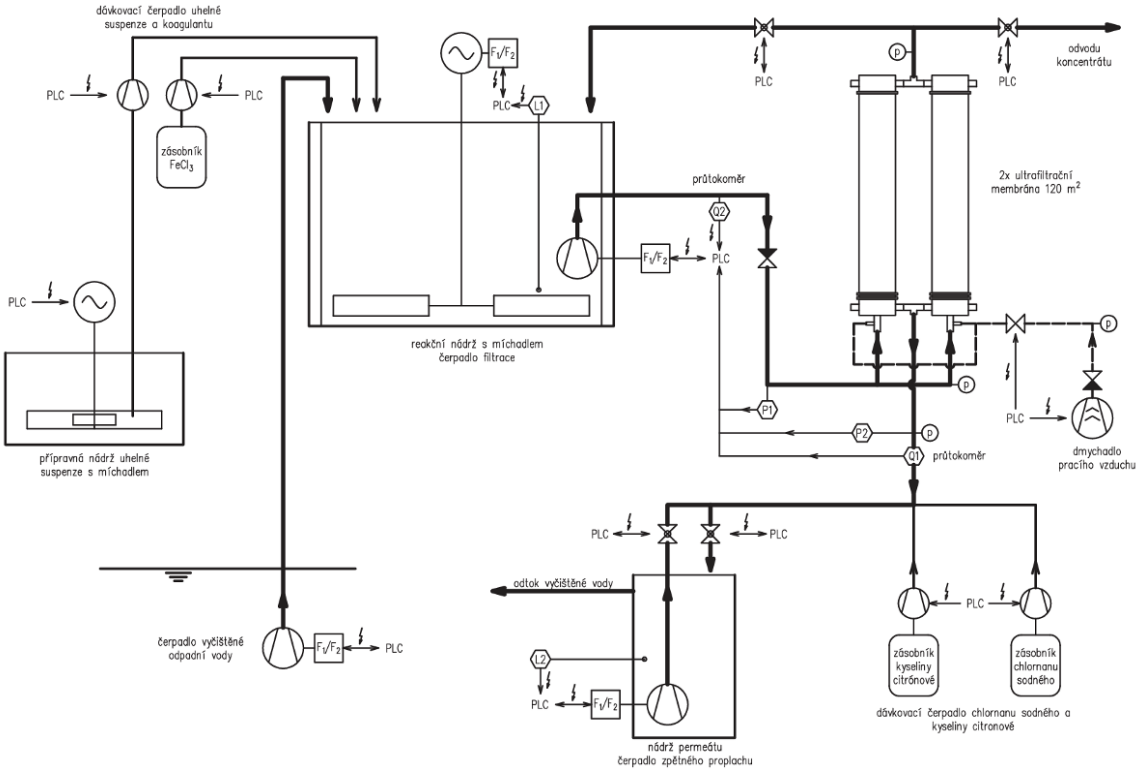
Další komponentou pilotní jednotky je ultrazvukový reaktor s generátory ultrazvuku s pracovní frekvencí 25 kHz. Výkon generátoru je možné řídit na místě nebo dálkově (dle hodnoty redox potenciálu pomocí PID regulátoru). Za ultrazvukovým reaktorem je umístěna vymírací nádrž, kde dochází k reakci zbývajícího ozonu se znečištěním a tím ke snížení koncentrace ozonu na mez, kdy je možné vodu bezpečně vypouštět. Odtok z vymírací nádrže je ve třech výškových úrovních umožňující nastavení různé doby hydraulického zdržení.
V pilotní jednotce je měřeno několik veličin. Z důvodu vyhodnocení ekonomiky provozu je monitorována spotřeba elektrické energie jednotlivých komponent. Na přítoku a odtoku z vymírací nádrže je měřen a zaznamenáván redox potenciál. Dále je sledován průtok a celkový objem čištěné vody. Na přítoku a na odtoku z pilotní jednotky jsou instalovány automatické odběráky vzorků. Součástí pilotní jednotky je rovněž analyzátor koncentrace ozonu sloužící ke stanovení množství ozonu vyrobeného a nevyužitého.

Ultrafiltrační pilotní jednotka s adsorpcí na aktivní uhlí
Ultrafiltrace je tlaková membránová technologie využívající porézní membrány jako separačního elementu a gradientu tlaku jako hnací síly transportu vody přes membránu. Ultrafiltrační membrány jsou vzhledem k velikosti pórů, které se pohybují v rozmezí přibližně 1 nm až 0,1 μm, schopny odstranit zákal, bakterie, látky

s molekulární hmotností větší než cca 20 kDa a většinu virů a to při konstantní kvalitě bez ovlivnění změnami ve složení nátokové vody. Potřebný transmembránový tlak je nízký a pohybuje se v desítkách kPa. Ultrafiltrace se jeví jako optimální membránový proces – při mikrofiltraci není separační efekt výrazný a při nanofiltraci jsou pracovní tlaky výrazně větší, což se promítá v nákladech. Protože samotné ultrafiltrační membrány nezachycují nízkomolekulární látky, je filtrace kombinována adsorpcí na aktivním uhlí a koagulací. Kromě samotného zlepšení účinnosti odstranění nežádoucích látek má tato kombinace pozitivní vliv na zanášení membrán.
Základními komponenty ultrafiltrační pilotní jednotky jsou:

- čerpadlo odpadní vody;
- reakční nádrž s míchadlem;
- dávkovací čerpadlo koagulantu;
- přípravná nádrž uhelné suspenze s míchadlem a dávkovacím čerpadlem;
- čerpadlo filtrace a ultrafiltrační moduly;
- nádrž permeátu a čerpadlo zpětného proplachu;
- dávkovací čerpadla chemického proplachu a dmychadlo pracího vzduchu; a
- měření, řízení a elektroinstalace.

Schéma zapojení všech komponent jednotky je uvedeno na následujícím obr. 6.



Obr. 6 Technologické schéma ultrafiltrační pilotní jednotky

Ponorné odstředivé čerpadlo o kapacitě 3 $l \cdot s^{-1}$ dopravuje biologicky vyčištěnou odpadní vodu ze zásobní jímky automatické tlakové stanice technologické vody do reakční nádrže. V reakční nádrži dochází k adsorpci znečištění na aktivní uhlí, hydraulická doba zdržení v nádrži je závislá na výšce hladiny a průtoku vody v režimu filtrace. Při průtoku vody 2 $l \cdot s^{-1}$ a maximální hladině je hydraulická doba zdržení v cca 50 minut.
Do reakční nádrže vyrobené z nerezové oceli je mimo výtlaku čerpadla biologicky čištěné odpadní vody vyústěn i výtlak dávkovacího čerpadla uhelné suspenze, dávkovacího čerpadla chloridu železitého a potrubí koncentrátu. V nádrži je dále čerpadlo filtrace, plovákové spínače, hydrostatický hladinoměr, na nosné lávce míchadlo obsahu nádrže a dále i tři rozrážeče proudu.
Přípravná nádrž uhelné suspenze o objemu 0,4 m^3 je vyrobena z PP, je vybavena míchadlem. Suspenze z této nádrže je peristaltickým čerpadlem dopravována do reakční nádrže.
Čerpadlo filtrace slouží primárně k dopravě směsi biologicky vyčištěné odpadní vody s aktivním uhlím do membránových modulů. Vlivem přetlaku je voda filtrována přes membránu a odtéká do nádrže permeátu. V režimu praní vodou čerpadlo slouží zároveň jako čerpadlo prací vody.

V pilotní jednotce je měřeno několik veličin (výšky hladiny, průtoky a tlaky na vybraných místech). Veškeré měřené veličiny jsou sledovány PLC a ve zvoleném časovém intervalu jsou ukládány do paměti. Z důvodu vyhodnocení ekonomiky provozu je monitorována spotřeba elektrické energie celé pilotní jednotky a samostatně i spotřeba čerpadla biologicky vyčištěné odpadní vody. V pilotní jednotce jsou instalován dva automatické odběráky vzorků. První je instalován u zásobní jímky automatické tlakové stanice technologické vody a druhý odebírá vzorek z nádrže permeátu (výstup z pilotní jednotky.

Obr. 7 Ultrafiltrační pilotní jednotka - reakční nádrž (vlevo) a zásobní nádrž uhelné suspenze (vpravo)

Chod všech strojů a zařízení je řízen pomocí PLC na základě programu v něm uloženém. V automatickém provozu je definováno celkem pět po sobě jdoucích fází: fáze reakční (probíhá pouze po chemickém čištění); fáze filtrace; fáze praní vzduchem; fáze praní vodou; a fáze zpětného proplachu.

Obr. 8 Ultrafiltrační pilotní jednotka – rozvaděč (vlevo) a membránové moduly (vpravo)

Poděkování
Projekt LIFE2Water (LIFE13 ENV/CZ/000475) je realizován z programu LIFE+ Evropské komise. Program LIFE+ je evropský finanční nástroj podporující projekty zaměřené na ochranu přírody a životního prostředí v Evropské unii. Program sdružuje zdroje a odborné zkušenosti, poskytuje platformu pro přípravu a výměnu osvědčených postupů a znalostí pro zlepšení stavu v prioritních oblastech daných Evropskou unií.

LIFE2Water

LIFE2Water

vyhodnocení pilotního provozu

Ing. Luboš STŘÍTESKÝ
AQUA PROCON, s.r.o.

LIFE2Water, testovací lokalita

- **Projekt reaguje na současný stav: konvenční metody čištění mají omezenou účinnost odstranění farmaceutik, pesticidů, průmyslových látek a mikrobiálního znečištění**
- **Trvání projektu 09/2014-12/2017, 50% kofinancování Evropskou komisí, příjemci projektu: AQP, ALS, BvK**
- **Testovací lokalita ČOV Brno-Modřice**
- **HLAVNÍ AKTIVITY:**
  - ⇨ Návrh, konstrukce, optimalizace a vyhodnocení účinnosti odstranění sledovaného znečištění u tří pilotních jednotek
  - ⇨ Propagace projektu, výsledků, zkušeností a přenos dobré praxe

Pilotní jednotky

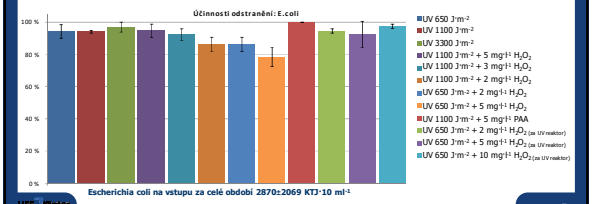
- **Navrženy a zkonstruovány 3 pilotní jednotky**
  - ⇨ Pilotní jednotka mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku (MFO/UV)
  - ⇨ Pilotní jednotka sonolýzy ozonu (O_3/UZ)
  - ⇨ Ultrafiltrační pilotní jednotka s adsorpcí na aktivní uhlí
- **Provoz pilotních jednotek:**
  - ⇨ Mikrosítová filtrace s UV zářením (MFO/UV) od března 2015 do března 2016
  - ⇨ Sonolýza ozonu (O_3/UZ) od dubna 2015 do dubna 2016
  - ⇨ Ultrafiltrace s adsorpcí na aktivní uhlí od března 2016 do dubna 2017
- **Více o pilotních jednotkách viz poster**

Monitoring pilotních jednotek

- **Základní parametry** (BSK_5, $CHSK_{Cr}$, NL, N_C, P_C, 200 vz./jednotka)
- **Mikrobiologické parametry** (fekální koliformní bakterie, enterokoky, *Escherichia coli*, 200 vzorků/jednotka)
- **Znečištění chemickými látkami** (100 vzorků/jednotka)**:**
  - ⇨ Alkylfenoly (bisfenol A, nonyl- a oktylfenoly a jejich metabolity)
  - ⇨ Pesticidy (celkem 26 látek vč. vybraných metabolitů)
  - ⇨ Farmaceutika (celkem 23 látek)
- **Ekotoxicita** (*Daphnia Magna, Vibrio fischeri, Scenedesmus subspicatus, Sinapis alba*)
- **AOX**
- **Provozní aspekty** (provozní náklady, nároky na obsluhu a údržbu)
- **Veškeré vzorky 24 hodinové směsné**

MFO/UV: účinnosti odstranění mikrobiologického znečištění

- **Odstranění běžně přesahuje 90 %**
  - ⇨ UV 3300 $J \cdot m^{-2}$ → průměrné odstranění 95 %
  - ⇨ Dávkování 5 $mg \cdot l^{-1}$ PAA + UV 1100 $J \cdot m^{-2}$ → 0 $KTJ \cdot 10\ ml^{-1}$
  - ⇨ Dávkování H_2O_2 → odstranění nižší oproti samotnému UV
  - ⇨ H_2O_2 za UV reaktor → odstranění vyšší oproti dávkování před UV



MFO/UV: účinnosti odstranění ostatních sledovaných parametrů

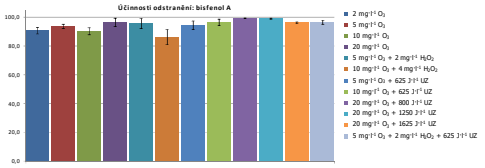
- **Odstranění BSK_5 a NL od nuly do cca 60 %**
  - ⇨ Vyšších vstupní koncentrace ⇔ vyšší účinnosti odstranění
  - ⇨ Dávkování PAA → BSK_5 na výstupu cca 3-násobně vyšší
- **$CHSK_{Cr}$ do 20 %**
- **K odstraňování N_C nedochází**
- **Odstranění P_C do cca 35 %, koresponduje s odstraněnými NL**
- **Chemické znečištění se neodstraňuje (nebo je odstranění nižší než chyba stanovení) mimo:**
  - ⇨ Dávka UV 1100 $J \cdot m^{-2}$ + 5 $mg \cdot l^{-1}$ H_2O_2 → 23 % a 17 % odstranění MCPA, respektive MCPP, 30 % bisfenolu A a 29 % diklofenaku
  - ⇨ Dávka UV 3300 $J \cdot m^{-2}$ → odstranění 33 % diklofenaku

O_3/UZ: účinnosti odstranění základních a mikrobiologických parametrů

- **Odstranění BSK_5 záporné (oxidace $CHSK_{Cr}$)**
  - ⇨ Průměrný nárůst do 95 %, směrodatné odchylky velmi velké
- **Odstranění $CHSK_{Cr}$ do 45 %, koncentrace P_C a N_C bez změny**
- **NL: účinnosti odstranění od 10 % do 60 %**
  - ⇨ Kombinace O_3 s H_2O_2 snižuje odstraňování NL
- **Mikrobiologické parametry: odstranění běžně nad 95 %**
  - ⇨ 50 mg·l^{-1} O_3 a 20 mg·l^{-1} O_3 + 800 a 1250 J·l^{-1} UZ → 0 KTJ·10 ml^{-1}
  - ⇨ 5 mg·l^{-1} O_3 + 2 mg·l^{-1} H_2O_2 → odstranění vzroste z 95 na 98 %
  - ⇨ 20 mg·l^{-1} O_3 + 800, 1250 a 1630 J·l^{-1} UZ → odstranění 100 %, 100 %, resp. 99,5 %
- **Obecně účinnosti odstranění zvyšuje sonolýza ozonu i H_2O_2; sonolýza ozonu je účinnější**

O_3/UZ: účinnosti odstranění alkylfenolů

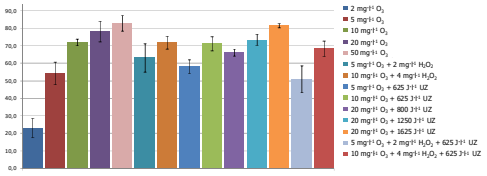
- **Bisfenol A vysoké odstranění, nonyl- a oktylfenoly a metabolity (ethoxyláty) nízké odstranění**
  - ⇨ 2 mg·l^{-1} O_3 → odstranění 91 % BPA a 22 % NP+OP(E)
  - ⇨ 20 mg·l^{-1} O_3 + 800/1250 J·l^{-1} UZ → BPA pod mezí detekce (>99 %)
  - ⇨ Kombinace O_3 s H_2O_2 nemá pozitivní vliv
  - ⇨ 1250 J·l^{-1} UZ + 5 mg·l^{-1} O_3: 52 % → 60 % oproti samotnému O_3



Bisfenol A na vstupu za celé období cca 0,5 µg·l^{-1} , v zimním období až k 2,0 µg·l^{-1}

O_3/UZ: účinnosti odstranění pesticidů

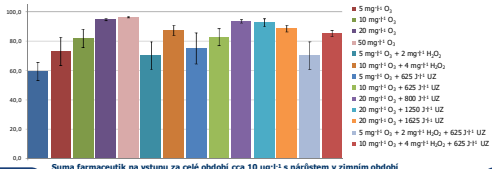
- **Účinné látky pesticidů a pesticidy vč. metabolitů**
  - ⇨ 2 mg·l^{-1} O_3 → 27 % resp. 23 %; 50 mg·l^{-1} O_3 → 87 % resp. 83 %
  - ⇨ O_3/H_2O_2 ani O_3/UZ nemají na odstranění účinných látek pesticidů pozitivní vliv, na odstranění pesticidů vč. metabolitů vliv mají
- **Odstranění atrazinu a metabolitů: do cca 20 mg·l^{-1} O_3 se suma nemění – atrazin se přeměňuje na metabolity**



Suma pesticidů vč. metabolitů na vstupu za celé období cca 0,9 µg·l^{-1} s poklesem v zimním období

O_3/UZ: účinnosti odstranění farmaceutik

- **Odstranění snadno rozložitelných látek (diklofenak nebo karbamazepin) od cca 80 % (2 mg·l^{-1} O_3) po mez detekce**
- **Odstranění sumy farmaceutik nižší – vliv RTG kontrastních látek (iohexol, iomeprol, iopamidol a iopromid)**
  - ⇨ Kombinace O_3 s H_2O_2 ani sonolýza O_3 nemají pozitivní vliv
  - ⇨ Odstranění sumy bez kontrastních látek shodné pro 5-50 mg·l^{-1} O_3



Suma farmaceutik na vstupu za celé období cca 10 µg·l^{-1} s nárůstem v zimním období (cca 10 µg·l^{-1}) a občasnými špičkami (až 35 µg·l^{-1}) tvořenými RTG kontrastními látkami

O_3/UZ: ekotoxicita, AOX

- **AOX**
  - ⇨ MFO/UV: bez vlivu na AOX
  - ⇨ O_3/UZ: při 10 mg·l^{-1} O_3 průměrné odstranění 23 %, při 50 mg·l^{-1} O_3 odstranění 44 % při průměrném vstupním AOX 33 µg·l^{-1}
- **Ekotoxicita**

		vstup	2 mg/L O_3	vstup	10 mg/L O_3	vstup	10 mg/L O_3 + 4 mg/L H_2O_2	vstup	20 mg/L O_3	vstup	50 mg/L O_3
Daphnia magna	% imob.	3	8	2	12	2	5	2	5	3	3
Vibrio fischeri	% inh.	6	17	2	28	-14	16	6	9	9	61
Scenedesmus subspicatus	% inh.					-2	-8	27	22	7	7
Sinapis alba	% inh.			29	31	28	25	17	31	27	19

UF/PAC: předběžné výsledky

- **Sledované mikrobiologické parametry 0 KTJ·10 ml^{-1} při udržení integrity membrány**
- **NL pod mezí detekce**
- **Odstranění BSK_5 a $CHSK_{Cr}$ do 60 % dle dávky PAC**
- **Odstranění P_{celk} 40 – 80 %, N_{celk} bez ovlivnění**
- **Odstranění chemického znečištění srovnatelné s O_3/UZ**
- **Zvolená membrána (duté vlákno PAN, potting epoxidová pryskyřice) kontaminuje vodu bisfenolem A, koncentrace bisfenolu A na výstupu jsou 2× až 6× vyšší než před membránou**
- **UF/PAC se zdá být plnohodnotnou alternativou k O_3/UZ se srovnatelnými provozními náklady a bez tvorby více toxických produktů oxidace**

Provozní poznatky, atd.

- **Vzorkování, analýzy**
  - ⇨ Provoz jednotek zahajován slepým vzorkováním – materiály jednotek kontaminují vodu alkylfenoly → nutná vhodná volba materiálů; hadice automatických odběráků PTFE místo PVC
  - ⇨ Odběr vzorků do skleněných vzorkovnic s PTFE uzávěry (zamezení kontaminace alkylfenoly)
  - ⇨ Nutná kázeň vzorkařů: s vodou na výstupu zacházet jako s pitnou (0 KTJ); s veškerými vzorky a vzorkovnicemi zacházet tak, aby se zabránilo kontaminaci (např. nedotýkat se hrdel lahví, atd.)
  - ⇨ Při odběru vzorků pro mikrobiologii nutné pravidelně desinfikovat vzorkovač a přívodní potrubí (příp. odebírat bodové vzorky)
- **Obecně není problém detekovat nízké koncentrace látek, klíčové je vzorky správně odebrat, aby byla zajištěna jejich reprezentativnost!**

Závěr

- **MFO/UV vhodné pouze na mikrobiologické znečištění**
  - ⇨ Kvalita užitkové vody při dávce UV 3300 $J \cdot m^{-2}$ nebo 1100 $J \cdot m^{-2}$ + 5 $mg \cdot l^{-1}$ PAA (úplná desinfekce, zvýšené BSK_5) s provozními náklady 0,13 $€ \cdot m^{-3}$ (3,5 $Kč \cdot m^{-3}$) respektive 0,06 $€ \cdot m^{-3}$ (1,7 $Kč \cdot m^{-3}$)
- **O_3/UZ je univerzální technologií**
  - ⇨ Kvalita užitkové vody při dávce 5 $mg \cdot l^{-1}$ O_3 + 625 $J \cdot m^{-3}$ UZ (nebo + 2 $mg \cdot l^{-1}$ H_2O_2) při provozních nákladech 0,06 $€ \cdot m^{-3}$ (1,6 $Kč \cdot m^{-3}$) resp. 0,05 $€ \cdot m^{-3}$ (1,3 $Kč \cdot m^{-3}$)
  - ⇨ Současně se odstraní 95 % bisfenolu A, 68 % účinných látek pesticidů a 73 % farmaceutik a 16 % AOX
  - ⇨ Ekotoxicita vůči perloočkách a řase se nemění, vůči hořčici ekotoxicita klesá a vůči bakteriím roste
- **O_3/UZ: vyšší dávka ultrazvuku nebo H_2O_2 ≠ lepší výsledky**
- **MFO/UV: zanášení UV reaktoru anorganickými usazeninami**

LIFE2Water

LIFE2Water – pilotní jednotky pro dočištění komunálních odpadních vod

Luboš STŘÍTESKÝ[1], Vladimír HABR[2], Robert HRICH[2], Radka PEŠOUTOVÁ[1], Tomáš ADAMEC[1]
[1]AQUA PROCON s.r.o., Palackého tř. 12, 612 00 Brno
[2]Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., Pisárecká 555/1a, 603 00 Brno

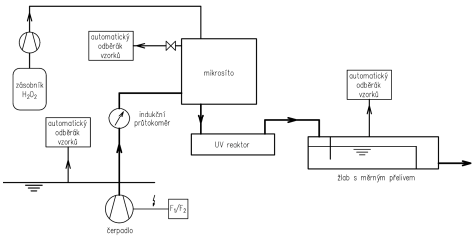
ÚVOD

Konvenční metody čištění odpadních vod jsou zaměřeny na snížení koncentrací organických látek, dusíku a fosforu na míru přijatelnou pro ekosystém daného toku. Zatížení toků mikrobiálním znečištěním a dalšími negativně působícími látkami (léčiva, pesticidy, průmyslové chemikálie, jejich metabolity a další) zůstává vysoké, jelikož nedochází k technologickým opatřením na jeho minimalizaci. V projektu LIFE2Water je řešeno nedostatečné odstranění zbytkových koncentrací celé řady chemických látek a mikrobiálního znečištění v rámci třetího stupně čištění.

V rámci řešení projektu byly vytipovány technologie s potenciálem k odstranění sledovaného znečištění, ale běžně se na dočištění komunálních odpadních vod nepoužívají. Spojením těchto technologií do unikátních celků byla posílena účinnost odstranění sledovaného znečištění. Navrženy a zkonstruovány byly celkem tři pilotní jednotky: pilotní jednotka využívající sonolýzy ozonu, pilotní jednotka kombinující mikrosítovou filtraci s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku a ultrafiltrační pilotní jednotka s adsorpcí na aktivní uhlí.

Pilotní jednotka mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním H_2O_2

Technologické schéma této pilotní jednotky je uvedeno na obrázku 1. Biologicky vyčištěná odpadní voda (provozní průtok 2 až 5 $l \cdot s^{-1}$) je čerpána ponorným čerpadlem umístěným v sacím koši v čerpací jímce technologické vody (viz obrázek 2A). Výtlak čerpadla je veden hadicí přes indukční průtokoměr a uklidňovací komoru do mikrosítového bubnového filtru (viz obrázek 2B, D).



Obrázek 1 Technologické schéma pilotní jednotky mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním peroxidu vodíku

Mikrosítový filtr s nerezovou filtrační tkaninou s průlinami o velikosti 63 µm je sériovým výrobkem o kapacitě 10 $l \cdot s^{-1}$. K dávkování H_2O_2 před UV reaktor je použito peristaltické čerpadlo zajišťující rovnoměrný přítok peroxidu vodíku do odpadní vody. Zdrojem UV záření je sériově vyráběný zářič s dávkou UV cca 220 $J \cdot m^{-2}$ (při 10 $l \cdot s^{-1}$ a UV transmisi 60%). Čištění zářičů z křemenného skla je realizováno pomocí automatického mechanického stěrače a dále chemicky pomocí recirkulačního pracího čerpadla. Poproudně posledním objektem je měrný žlab s trojúhelníkovým přelivem (obrázek 2C) a ultrazvukovým hladinoměrem sloužící současně jako místo odběru vzorků na výstupu.

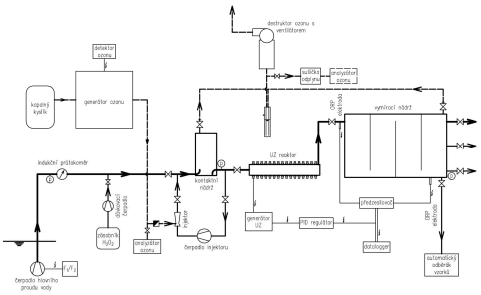
Obrázek 2 Pilotní jednotka mikrosítové filtrace s UV zářením a dávkováním H_2O_2: A) sací koš s čerpadly všech pilotních jednotek; B) mikrosítový filtr s UV reaktorem, vlevo automatický vzorkovač; C) měrný žlab; D) mikrosítový filtr s UV reaktorem – řez; E) rozvaděče pilotní jednotky

PODĚKOVÁNÍ

Projekt LIFE2Water (LIFE13 ENV/CZ/000475) je realizován z programu LIFE+ Evropské komise. Program LIFE+ je evropský finanční nástroj podporující projekty zaměřené na ochranu přírody a životního prostředí v Evropské unii. Program sdružuje zdroje a odborné zkušenosti, poskytuje platformu pro přípravu a výměnu osvědčených postupů a znalostí pro zlepšení stavu v prioritních oblastech daných Evropskou unií.

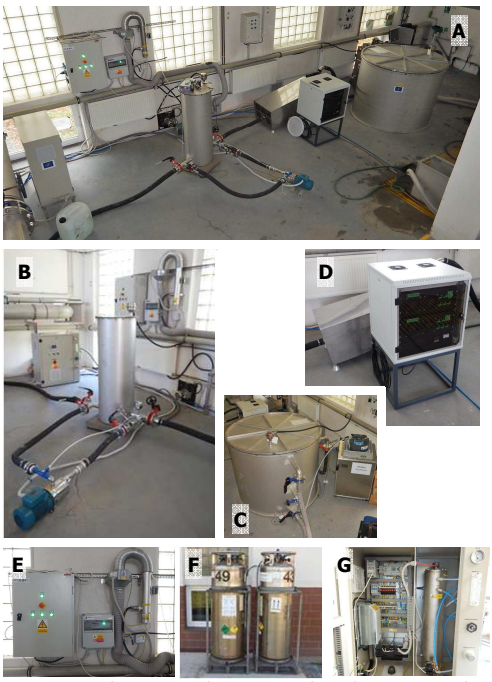
Pilotní jednotka sonolýzy ozonu

Technologické schéma pilotní jednotky sonolýzy ozonu je uvedeno na obrázku 3. Provozní průtok pilotní jednotkou je uvažován 1 až 5 $l \cdot s^{-1}$. Ponorné čerpadlo biologicky vyčištěné odpadní vody je osazeno v sacím koši společném s pilotní jednotkou mikrosítové filtrace (viz obrázek 2A). Jeho výtlak je pohyblivým potrubím veden přes indukční průtokoměr do kontaktní nádrže. Za indukčním průtokoměrem je peristaltické dávkovací čerpadlo peroxidu vodíku. K výrobě ozonu slouží generátor ozonu (viz obrázek 4B, G) o výkonu 100 g $O_3 \cdot h^{-1}$, ozon je do vody vnášen Venturiho injektorem a rozpouštěn v kontaktní nádrži (viz obrázek 4B).



Obrázek 3 Technologické schéma pilotní jednotky sonolýzy ozonu

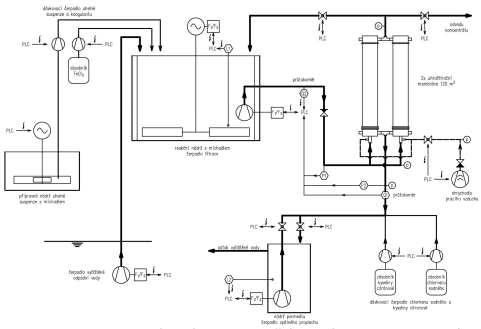
Zdrojem kyslíku je mobilní odpařovací stanice tvořená dvojicí nádob o užitném objemu 180 l (viz obrázek 4F). Nerozpuštěný ozon je odplyňovacími ventily odváděn z obou nádrží do destruktoru ozonu (viz obrázek 4E). Další komponentou je ultrazvukový reaktor s generátorem s pracovní frekvencí 25 kHz a výkonem 2,5 kW (viz obrázek 4D). Za ním je umístěna vymírací nádrž, kde dochází k reakci zbývajícího ozonu se znečištěním (viz obrázek 4C).



Obrázek 4 Pilotní jednotka sonolýzy ozonu: A) celá pilotní jednotka; B) systém vnosu ozonu (v pozadí destruktor a generátor ozonu a rozvaděče); C) vymírací nádrž a automatický vzorkovač; D) generátor ultrazvuku a v pozadí ultrazvukový reaktor; E) destruktor ozonu, ventilátor odplynu a rozvaděče; F) mobilní odpařovací stanice; G) pohled do generátoru ozonu.

Pilotní ultrafiltrační jednotka s adsorpcí na aktivní uhlí

Technologické schéma ultrafiltrační pilotní jednotky je uvedeno na obrázku 5. Biologicky vyčištěná odpadní voda je do kontaktní nádrže (viz obrázek 6B) čerpána ponorným čerpadlem umístěným v sacím koši společném pro ostatním pilotními jednotky (viz obrázek 2A). Do trvale promíchávané kontaktní nádrže je peristaltickým čerpadlem dávkována uhelná suspenze ze zásobní nádrže (viz obrázek 6D). Zásobní nádrž na uhelnou suspenzi slouží k nárazovému rozmíchání práškového aktivního uhlí s vodou a k trvalé homogenizaci jejího obsahu. Do reakční nádrže je dále dávkován chlorid železitý sloužící k omezení zanášení membrány.



Obrázek 5 Technologické schéma ultrafiltrační pilotní jednotky s adsorpcí na aktivní uhlí

Ponorné čerpadlo umístěné v reakční nádrži čerpá odpadní vodu přes membránové moduly do nádrže permeátu. Dva membránové moduly (viz obrázek 6A) s dutými vlákny z polyakrilnitrilu s póry o velikosti 25 nm mají celkovou filtrační plochu 120 m^2.

Praní membrány je zajištěno vzduchem, dopředným proplachem (čerpáním z reakční nádrže do kanalizace), zpětným proplachem a chemickým zpětným proplachem (kyselinou citronovou a chlornanem sodným, příp. peroxidem vodíku).

Obrázek 6 Pilotní ultrafiltrační jednotka s adsorpcí na aktivní uhlí: A) ultrafiltrační moduly umístěné na rámu s technologií; B) reakční nádrž s míchadlem a čerpadlem filtrace; C) rozvaděč na rámu a automatický vzorkovač; D) zásobní nádrž uhelné suspenze s míchadlem a peristaltickým čerpadlem; E) dmychadlo pracího vzduchu; F) dávkovací čerpadla chemikálií.