Popis poloprovozu

projekt č. VI20172020097 – „Ochrana kritické infrastruktury – vodního zdroje Želivka - před účinky PPCP a pesticidů v podmínkách dlouhodobého sucha“

1 Název poloprovozu

Poloprovoz filtru s náplní granulovaného aktivního uhlí (GAU) pro odstraňování mikropolutantů z upravované vody

2 Autorský tým

Rambousek Libor[1], Pěkný Petr[1] a Nováková Zuzana[2]

[1] Želivská provozní, a. s.

[2] Pražské vodovody a kanalizace, a. s.

3 Cíl poloprovozu

Cílem realizace poloprovozu je ověření účinnosti technologie filtrace přes granulované aktivní uhlí (GAU) při odstraňování mikropolutantů z upravované vody na úpravně vody (ÚV) Želivka. Dále jsou srovnávány 4 různé typy granulovaného aktivního uhlí. Dlouhodobé testování GAU v konkrétních podmínkách ÚV Želivky poskytuje kromě odhadu účinnosti sorpčního stupně i odhad životnosti tohoto GAU. Výsledky testování vedou k výběru nejvhodnějšího materiálu pro doplnění technologie určené pro výrobu vody pitné.

4 Místo realizace

Místem realizace je úpravna vody Želivka nacházející se v katastrálním území středočeské obce Hulice. Surovou vodu úpravna odebírá z vodní nádrže Švihov, jež stojí v těsné blízkosti úpravny. Jedná se o nejvýznamnější vodní zdroj surové vody pro úpravu na vodu pitnou v ČR. Jeho ohrožení průnikem pesticidů a dalších látek označovaných jako PPCP představuje významné riziko, které by mohlo akutním i chronickým působením ovlivnit značnou část obyvatel napojených na tento zdroj. Poloprovozní kolony byly za účelem testování na ÚV Želivka technologicky řazeny za jednostupňovou koagulační pískovou filtraci a ozonizaci.

5 Technické provedení

Poloprovoz byl tvořen čtyřmi otevřenými filtračními kolonami plněnými granulovaným aktivním uhlím, viz Obr. 1. Jejich specifikace je uvedena v následujících podkapitolách.

Obr. 1: Kolony naplněné granulovaným aktivním uhlím na ÚV Želivka

5.1 Technické parametry kolon

Jednotlivé kolony byly provedeny jako atmosférické, shora dolů protékané válcovité nádoby o průměru 0,124 m a výšce 2,9 m. Jako filtrační náplň bylo použito černé aglomerované granulované aktivní uhlí. Základní technické parametry kolon jsou uvedeny v Tab. 1. Provozovány byly v paralelním uspořádání, jejich vzájemné propojení a testování kombinovaného technologického uspořádání nebylo cílem poloprovozních zkoušek.

Tab. 1: Technické parametry kolon včetně jejich naplnění GAU

Technické parametry	Kolona č. 1 - 4
průměr kolony	0,124 m
výška kolony	2,9 m (voda nad GAU cca 110 cm)
plocha kolony	0,01207 m^2
typ filtru	otevřený
výška náplně	1,7 m
objem náplně	0,02052 m^3

5.2 Specifikace filtrační náplně

Jako filtrační materiál pro kolony bylo použito aglomerované granulové aktivní uhlí vyráběné z černého uhlí. Pro porovnání sorpční účinnosti různých materiálů byly zkoušeny následující typy GAU: AquaSorb 6300 (K1), Norit GAC 1020 EN (K2), Chemviron Carbon Filtřasorb 400 (K3), Sorbotech LG 95 (K4). Specifikace jednotlivých materiálů je uvedena v Tab. 2.

Specifikace granulovaného uhlí je uváděna vícero parametry. Koeficient stejnozrnitosti (uniformity coefficient) je indikátorem distribuce velikosti částic aktivního uhlí. Čím je hodnota nižší, tím je podíl velikosti největších a nejmenších částic menší. Parametr „tvrdost" vyjadřuje pevnost aktivního uhlí. Otěr (abraze) je indikátor mechanické pevnosti granulovaného aktivního uhlí v kapalné fázi s ohledem na zmenšení průměru. K otěru dochází zejména při plnění do filtrů, praní a reaktivaci. Významným provozním parametrem je provozní hustota (bed volume nebo backwashed and drained density), která vyjadřuje hustotu po vyprání a vysušení GAU a používá se pro přepočet objemu a hmotnosti aktivního uhlí. Vysoká hustota znamená vyšší kapacitu na jednotku objemu a také zajišťuje minimalizaci ztrát GAU během praní (granule AU nebudou plavat). Typicky se jedná o cca 85 % sypné hustoty (apperent density). Sypná hmotnost (apparent density) je max. hustota po vibračním setřesení.

Z pohledu charakterizace sorpčního povrchu je důležitým parametrem jodové číslo, které charakterizuje celkové sorpční vlastnosti aktivního uhlí. Je vyjádřeno v mg jodu adsorbovaného na 1 g aktivního uhlí, čím níže je jodové číslo pod hodnotou nového aktivního uhlí, tím vyšší je míra saturace aktivního uhlí (minimální hodnota jodového čísla použitého aktivního uhlí vhodného pro reaktivaci je 400 - 450 mg/g). Specifický povrch vyjadřuje celkovou plochu pórů povrchu granulovaného aktivního uhlí. Čím je číslo vyšší, tím je vyšší celková kapacita GAU.

Tab. 2: Specifikace GAU v kolonách 1 až 4

Parametry	Kolona 1	Kolona 2	Kolona 3	Kolona 4
typ GAU	AquaSorb 6300	NORIT GAC 1020 EN	Chemviron Carbon Filtrasorb 400	Sorbotech LG 95
velikost částic	0,85 - 2,0 mm	0,85 - 2,0 mm	0,425 - 1,7 mm	0,6 - 2,36 mm
koeficient stejnozrnnosti	<1,5	1,4	1,7	-*
velikost zrn menší než 0,85 mm	<5,0	<4,0	-*	-*
velikost zrn menší než 2,00 mm	<5,0	<5,0	-*	-*
tvrdost	-*	98	-*	97
otěr	-*	-*	min. 75	-*
provozní hustota	430 kg/m^3	400 kg/m^3	450 kg/m^3	-*
jodové číslo	min. 950 mg/g	min. 1000 mg/g	min. 1000 mg/g	950 mg/g
BET	1000 m^2/g	1150 m^2/g	1050 m^2/g	950 m^2/g

* parametr nebyl k dispozici ve specifickém listu od výrobce

6 Popis poloprovozních zkoušek

Poloprovozní testování probíhalo v období od 6. 2. 2017, resp. od 22. 2. 2017 do 31. 12. 2020, přičemž na kolony byla přiváděna voda z ÚV Želivka, a to po technologickém stupni ozonizace.

6.1 Příprava kolon GAU

GAU použité pro poloprovozní zkoušky bylo na počátku testování smočeno vodou, plnění kolon a prvotní praní proběhlo dle doporučení dodavatele GAU. Po naplnění byly náplně obou kolon důkladně proprány vzduchem (cca 1 minutu 40 - 50 m/hod při snížené hladině vody cca 15 cm nad náplní) a následně prací vodou při expanzi materiálu cca 25 - 30 % po dobu cca 20 minut (2 až 3 min praní vodou průtokem 120 l/hod, kdy dojde k odvzdušnění náplně a pak cca 17 minut praní vodou při max. prací rychlosti - průtokem 355 l/h). Jako prací voda byla použita voda po ozonizaci ÚV Želivka (tj. voda po pískové filtraci, ošetřená ozonem, bez alkalizace a dávkování Cl_2).

6.2 Filtrační fáze

Vstupní voda je před nátokem na kolony nejprve vedena přes průtokoměr a rotametr, před kterým je škrtící ventil na nastavení požadovaného průtoku. Nátok vody na jednotlivé kolony je řešen otevřeným volným nátokem vody nad filtrační náplň. Přes filtrační náplň voda následně protéká směrem shora dolů. Výška vody nad filtrační náplní je udržována kolem 110 cm. Všechny kolony byly provozovány s výškou filtrační náplně 1,7 m, průtokem upravované vody 95 l/h, filtrační rychlostí 7,5 m/h a dobou zdržení 13 minut.

Filtrát, tzn. voda, která prošla přes filtrační náplň, je z kolony odváděn přes drenážní systém. Odtok filtrátu je veden až do výše vody nad filtrační náplní s odečtem tlakové ztráty, pro regulaci výše hladiny vody na GAU. Každá kolona je osazena havarijním přepadem v případě, že by z důvodu tlakové ztráty vystoupala hladina vody nad filtrační náplní až nad konstrukční výšku kolony.

Odběrová místa pro vzorky vod nátoků a odtoků (filtrátů) jsou pro jednotlivé kolony řešena samostatně.

6.3 Fáze praní

Prací cyklus byl prováděn jednou za dva až čtyři týdny a zahrnoval intenzivní praní vodou a vzduchem. Do potrubí filtrátu je zaústěno potrubí pracího vzduchu a prací vody, přičemž každé je osazeno samostatným uzávěrem. Před zahájením fáze praní je zastaven nátok vody na kolonu a hladina vody nad filtrační náplní je snížena na cca 15 cm nad filtrační náplň. Dále je uzavřen filtrát a spuštěno prací dmychadlo a otevřen ventil pracího vzduchu. Fáze praní vzduchem trvá cca 1 minutu s intenzitou 40 – 50 m/h. Ve druhé fázi je přívod pracího vzduchu uzavřen a otevřen přívod prací vody. Praní vodou trvá 3 minuty s intenzitou 120 l/h (jedná se o fázi odvzdušnění) a následuje 17 minut praní vodou s intenzitou 355 l/h.

7 Hodnocení výstupů

V průběhu poloprovozních zkoušek byla pravidelně sledována kvalita vstupní i upravené vody. Jednou měsíčně byla prováděna stanovení organických látek, biologických a mikrobiologických ukazatelů. Dále byly stanovovány mikropolutanty, zejména jednotlivé pesticidní látky a léčiva s jejich metabolity. Parametry byly porovnávány s dalšími technologickými stupni reálného provozu ÚV Želivka, konkrétně se surovou vodou, vodou po filtraci, vodou po ozonizaci a upravenou vodou na výstupu z objektu.

Pravidelně byly rovněž monitorovány technologické parametry délka filtračního cyklu, objem vody proteklé jednotkovou plochou filtru od začátku filtračního cyklu, dosahované tlakové ztráty, lineární filtrační rychlost a EBCT (empty bed contact time = doba kontaktu sorbentu s upravovanou vodou). Tyto výpočty byly prováděny v průběhu celého trvání poloprovozu.

V závěru posledního testovacího období (rok 2020) byly provedeny jednorázové testy vyčerpanosti granulovaného aktivního uhlí. Stanoveny byly jodové číslo a BET – specifický povrch, jejichž hodnoty byly následně porovnány s původními hodnotami garantovanými výrobcem jednotlivých sorbentů, čímž byla zjištěna míra vyčerpání GAU.

8 Výsledky testování poloprovozu

Kapitola uvádí dosahované provozní parametry i výsledky odstranění vybraných polutantů v rámci jednotlivých let i za celé sledované období.

8.1 Provozní parametry

V období od 6. 2. 2017 do 21. 8. 2019 bylo provedeno pro kolony K1 a K2 42 filtračních cyklů, pro kolonu K3 43 filtračních cyklů. Kolona K4 byla zprovozněna s více než čtrnáctidenním zpožděním, byla v provozu od 22. 2. do 21. 8. 2019 a bylo u ní zrealizováno 40 filtračních cyklů. Provozní parametry kolon K1 až K4 za cca dva a půl roku provozu jsou uvedeny v Tab. 3. Skutečný průtok byl u všech kolon v průměru o cca 10 % nižší než průtok požadovaný.

Tab. 3: Charakteristika dosahovaných provozních parametrů (průměrné hodnoty) za celé období provozu kolon K1 – K4

	Požadovaný objem proteklé vody [m³]	Požadovaný průtok [m³/h]	Skutečný objem proteklé vody [m³]	Skutečný průtok [m³/h]	EBCT [min]	Lf [m³/m²]
K1	2 038	0,09	1945	0,086	14,3	3 834,2
K2	2 038	0,09	1813	0,080	15,4	3 574,6
K3	2 048	0,09	1935	0,085	14,5	3 725,4
K4	1 994	0,09	1799	0,081	15,2	3 723,4

8.2 Fyzikálně-chemické a biologické parametry

V Tab. 4 je patrné statistické zpracování dosahovaných výsledků vybraných skupinových ukazatelů organických látek (celkového organického uhlíku, chemické spotřeby kyslíku manganistanem draselným, absorbance při 254 nm) a biologických i mikrobiologických

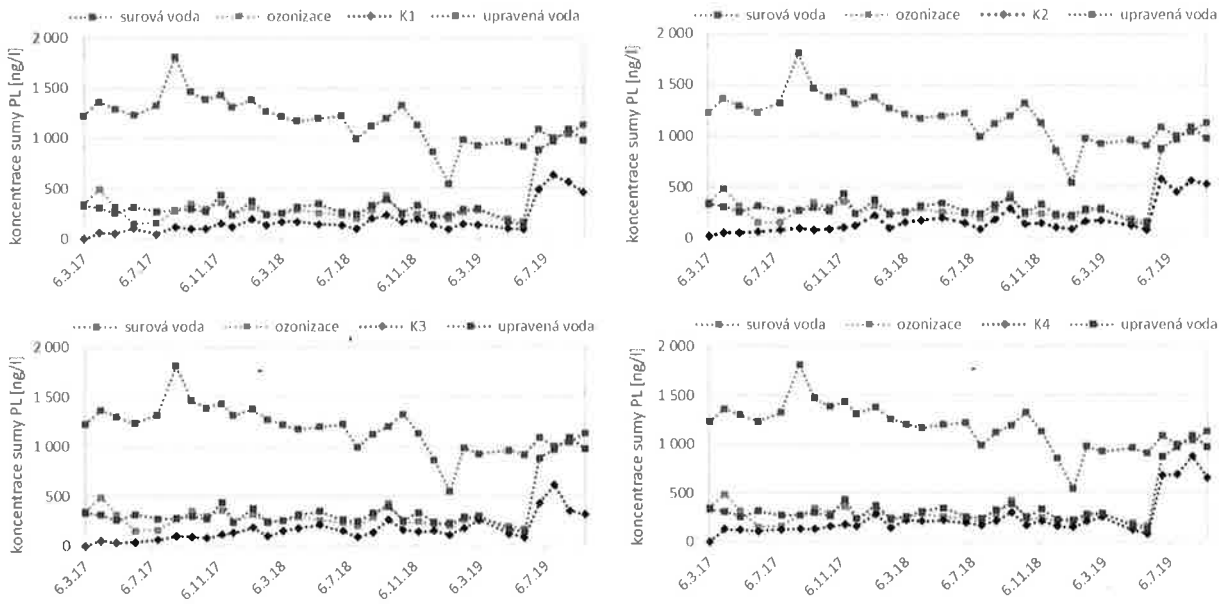
parametrů (celkové počty organismů, počet kolonií při 36 °C a 22 °C). Výsledky jsou hodnoceny pomocí průměrných, minimálních a maximálních hodnot včetně mediánu. Je zřejmé, že všechny kolony K1 až K4 dosahovaly mezi sebou z pohledu obsahu organických látek velmi srovnatelných hodnot. Hodnoty TOC se pohybovaly v rozmezí od 2,1 do 3,8 mg/l, $CHSK_{Mn}$ od 0,6 do 1,4 mg/l, A254 od 0,013 až 0,062. Ve filtrátech jednotlivých kolon byly obdobné rovněž celkové počty organismů, které se pohybovaly v rozmezí od 0 do 15 jedinců/ml. Zpočátku provozu dosahovaly počty kolonií při 22 °C u všech testovaných kolon vysokých hodnot (období únor až září 2017). Nicméně po ustálení přirozeného biofilmu byl zaznamenán pokles tohoto parametru, a to s výjimkou odběru v srpnu 2019, kdy byly výsledky ovlivněny odstavením stupně ozonizace. Počty kolonií při 36 °C dosahovaly od počátku provozu nízkých hodnot, a to v rozmezí hodnot od 0 do 49 KTJ/ml.

Tab. 4: Statistické zpracování vybraných fyzikálně chemických a biologických parametrů za celé období provozu kolon K1 až K4 (Pozn.: MO-CPO – mikroskopický obraz – celkový počet organismů, PK 36 °C/ 22 °C – počet kolonií při 36 °C a 22 °C)

		TOC [mg/l]	$CHSK_{Mn}$ [mg/l]	A254 [-]	MO-CPO [jed./ml]	PK 36 °C [KTJ/ml]	PK 22 °C [KTJ/ml]
K1	průměr	2,89	1,04	0,023	3	1	494
	minimum	2,07	0,60	0,014	0	0	3
	maximum	3,80	1,45	0,054	8	4	1 800
	medián	2,86	1,04	0,021	2	1	283
K2	průměr	2,87	1,04	0,024	3	1	356
	minimum	2,33	0,63	0,014	0	0	17
	maximum	3,41	1,40	0,057	15	3	1 430
	medián	2,88	1,05	0,021	2	0	263
K3	průměr	2,74	1,02	0,023	3	7	585
	minimum	2,06	0,67	0,013	0	0	0
	maximum	3,16	1,39	0,054	10	49	2 880
	medián	2,79	1,02	0,021	2	2	347
K4	průměr	2,91	1,06	0,024	2	5	311
	minimum	2,17	0,88	0,015	0	0	0
	maximum	3,39	1,42	0,062	11	31	2 050
	medián	2,86	1,05	0,022	1	2	89

8.3 Pesticidní látky

Sumární koncentrace pesticidních látek včetně nerelevantních metabolitů (celkem 112 látek) jsou ve sledovaném období pro jednotlivé technologické stupně ÚV Želivka a testované GAU kolony zobrazeny na Obr. 1. Zvýšené koncentrace v upravené vodě a ve filtrátech z GAU kolon K1 – K4 v období od 20. 6. 2019 byly způsobeny plánovanou odstávkou ozonizace ÚV Želivka.



Obr. 1: Sumární koncentrace sledovaných pesticidních látek včetně jejich nerelevantních metabolitů (112 látek) v jednotlivých technologických stupních ÚV Želivka a GAU kolonách K1 až K4

V tab. 5 jsou dále shrnuty průměrné účinnosti jejich odstranění. Do vyhodnocení byly zahrnuty pouze výsledky získané v době provozu ozonizace, přičemž dávka ozonu se v daném období pohybovala v rozmezí 1,1 – 1,2 mg/l. Z výsledků je patrné, že všechny čtyři kolony dosahovaly velmi vysokých účinností odstranění a rozdíly mezi jednotlivými typy GAU byly nevýznamné. Zařazením kolon s GAU za technologickou linku ÚV Želivka (za ozonizaci) byla účinnost navýšena o cca 5 – 17 %.

Tab. 5: Průměrné účinnosti odstranění sumy pesticidních látek včetně jejich nerelevantních metabolitů ze surové vody technologickou linkou ÚV Želivka a následně zařazenými kolonami s GAU (Pozn.: SV/O_3 – technologická linka ÚV Želivka, SV/KX – technologická linka s následně zařazenou kolonou X)

	E [%]				
	SV/O_3	**SV/K1**	**SV/K2**	**SV/K3**	**SV/K4**
2017	78,5	94,1	94,6	95,3	91,3
2018	77,3	86,2	86,5	86,8	82,4
2019	74,0	87,0	85,9	83,0	80,6
2017 - 2019	77,1	89,3	89,4	89,2	85,3

8.4 Testy vyčerpanosti GAU

Na konci testování, tzn. v roce 2020, byly u všech zkoušených typů GAU provedeny analýzy zaměřené na vyčerpanost sorpční náplně. Výsledné hodnoty specifického povrchu a jodového čísla včetně procentuálního vyjádření jejich vyčerpané kapacity jsou uvedeny v Tab. 6. U žádného z testovaných typů GAU nebyla sorpční kapacita plně vyčerpána, což umožňuje jejich další použití bez nutnosti reaktivace.

Tab. 6: Posouzení vyčerpanosti sorpční kapacity testovaných typů GAU

	BET - specifický povrch [m^2/g]	**Využití v porovnání se specifickými listy – BET [%]**	**Jodové číslo [mg/g] (I_2, suš.)**	**Využití v porovnání se specifickými listy – jodové číslo [%]**
K1	838	16,2	777	18,2
K2	767	33,3	344	65,6
K3	701	33,3	795	20,5
K4	755	24,5	646	35,4

9 Závěr

Na základě poloprovozních zkoušek byly ověřeny výborné účinnosti odstranění pesticidních látek a jejich metabolitů (85 – 89 %), přičemž mezi jednotlivými kolonami, tzn. filtračními náplněmi, nebyl pozorován významný rozdíl. Poloprovozním testováním bylo prokázáno, že zařazením technologického stupně sorpce na vhodném GAU za ozonizací dojde k významnému zlepšení kvality dodávané pitné vody. Dále bylo zjištěno, že sorpční kapacita vybraných filtračních náplní nebyla během testování plně vyčerpána.

10 Poděkování

Poloprovoz filtru s granulovaným aktivním uhlím byl vytvořen a provozován za podpory Ministerstva vnitra České republiky prostřednictvím dotačního programu BV III/1-VS jako součást projektu č. VI20172020097 – „Ochrana kritické infrastruktury – vodního zdroje Želivka - před účinky PPCP a pesticidů v podmínkách dlouhodobého sucha".

Za řešitele projektu MV ČR č. VI20172020097

Ing. Petr Pěkný

odpovědná osoba za návrh, realizaci a vyhodnocování měření