

SKUTECZNOŚĆ FILTRÓW WŁÓKNINOWYCH DO OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW W WARUNKACH STAŁEGO POZIOMU PIĘTRZENIA

Marcin Spychała

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. Głównym celem badań była ocena przydatności filtrów włókninowych ze stałym poziomem piętrzenia jako elementu indywidualnej oczyszczalni ścieków w kontekście osiągnięcia na odpływie stężeń zanieczyszczeń dopuszczalnych w świetle Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. [Rozporządzenie... 2014]. Do badań użyto dwóch filtrów 8-warstwowych (7,2 mm grubości) oraz jednego filtra 4-warstwowego (3,6 mm grubości). Średnie stężenia wskaźników zanieczyszczeń w ściekach dopływających na filtry wynosiły: $\text{ChZT}_{\text{Cr}} - 377,1 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$, $\text{BZT}_5 - 149,4 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$, zawiesina ogólna – $166,8 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. W ściekach dopływających i odpływających oznaczano: ChZT_{Cr} , BZT_5 , zawiesinę ogólną i fosfor ogólny. Najwyższą skuteczność oczyszczania dla większości wskaźników zanieczyszczeń uzyskano dla filtrów o największej grubości, a obserwowane różnice w średnich skutecznościach usuwania zanieczyszczeń pomiędzy różnymi grubościami warstwy filtracyjnej zostały potwierdzone statystycznie. Zdaniem autora można uznać, że filtry w warunkach technicznych będą spełniać wymogi Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. [Rozporządzenie... 2014] dla lokalizacji w ramach aglomeracji pod warunkiem zachowania optymalnych warunków ich pracy. Badania filtrów włókninowych wykazały, że filtry ze stałym poziomem piętrzenia mogą stanowić bardzo przydatną technologię, stanowiącą drugi etap oczyszczalni indywidualnej (za osadnikiem gnilnym), zwłaszcza w warunkach odprowadzania ścieków oczyszczonych do wód powierzchniowych.

Słowa kluczowe: usuwanie zanieczyszczeń, oczyszczanie ścieków, osadnik gnilny, ścieki bytowe

WSTĘP

W kraju istnieje wiele obszarów niemających uregulowanej gospodarki ściekowej, które ze względu na rozproszoną zabudowę nie zostały włączone do krajowego programu oczyszczania ścieków komunalnych. Obszary te praktycznie ze względów techniczno-

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr Marcin Spychała, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94A, 60- 649 Poznań, e-mail: marsp@up.poznan.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

-ekonomicznych w dużej mierze będą musiały uciekać się do rozwiązań w postaci systemów indywidualnych. Zainteresowanie małymi indywidualnymi oczyszczalniąmi wzrasta w ostatnich latach także z uwagi na możliwość miejscowego wykorzystania oczyszczonych ścieków i pełną kontrolę ich użytkowania [Ho 1998].

Istnieje potrzeba poszukiwania technologii alternatywnych do tradycyjnych – w postaci osadu czynnego czy też złożeń biologicznych [Crites i in. 1997, Hellstroem i Jonsson 2005], a także nowszych – w postaci filtrów (złożeń) o różnych wypełnieniach, najczęściej w formie filtrów wiszących, zraszanych lub filtrów usypanych z kawałków włókniny [Lacasse i in. 2001]. Te ostatnie znalazły zastosowanie w małych oczyszczalniąch ścieków w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Większość zastosowań dotyczy oddzielania zawieszin, w tym osadu czynnego, oczyszczania biologicznego towarzyszącego spływowi ścieków po powierzchni włókniny oraz użycia włókna w postaci nośnika biomasy w reaktorach beztlenowych lub napowietrzanych [Ho 2007]. Nieliczne tylko badania prowadzono z zastosowaniem filtracji ścieków przez włókninę w warunkach beztlenowych [Yaman i in. 2005]. Opublikowano również wyniki badań oraz symulacje modelowe podobnych rozwiązań, różniących się jednak od opisywanych w niniejszej publikacji jakąś istotną cechą, np. włókniny były zanurzone w reaktorach napowietrzanych, przy czym przepływ ścieków odbywał się głównie przy powierzchni włókna, a nie była to filtracja przez ich pory [Korkut i in. 2006, Ren i in. 2010].

Przeprowadzone wcześniej badania [Spychała i in. 2013] wykazały charakterystyczną strukturę biomasy w postaci gruzełkowatych cząstek utwierdzonych nie tylko na powierzchni włókna, ale również w przestrzeniach między włóknami (w porach). Podobną formę zaobserwowali inni autorzy [Yaman i in. 2005, Korkut i in. 2006, Jenssen i in. 2010].

Obecnie istnieje wiele technologii wykorzystujących filtry, włącznie z filtrami wykonanymi z włókna. Jednak do tej pory procesy biochemiczne i zjawiska hydrauliczne badano dla innych urządzeń oraz innych warunków, niż będące przedmiotem niniejszego artykułu. Wcześniejsze badania innych autorów były też prowadzone w ograniczonym zakresie, np. na włókninach, ale umieszczonych pod warstwą gruntu [Yaman i in. 2005].

Dotychczasowe badania nad filtrami włókninowymi ze zmiennym poziomem piętrzenia [Spychała i Łucyk 2015] wykazały możliwość jednoczesnego oczyszczania ścieków z zanieczyszczeń mechanicznych i biologicznych w warunkach tlenowych o znacznej skuteczności, jednak uzyskanie jakości ścieków oczyszczonych, umożliwiającej ich odprowadzanie do wód powierzchniowych lub ziemi, w świetle obowiązujących przepisów jest wątpliwe ze względu na dużą zmienność jakości ścieków oczyszczonych w odniesieniu do wskaźników określanych przez rozporządzenie (ChZT_{Cr} , BZT_5 i zawiesina ogólna).

Filtry włókninowe wykazują duży stosunek powierzchni materiału filtracyjnego do objętości oczyszczanych ścieków, dzięki czemu dyfuzja tlenu z powietrza atmosferycznego do ścieków przebiega wystarczająco intensywnie, aby nie było potrzebne wymuszone napowietrzanie ścieków. Filtry mogą zatem pracować praktycznie przy bardzo małym zużyciu energii – poniżej $0,5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$. Biomasa wytworzona na obydwu powierzchniach włókna ma mało spójną strukturę i jej nadmiar odpada, głównie po stronie zewnętrznej – ściekowej, co przeciwdziała kolmatacji filtra.

Technologia mechaniczno-biologicznego oczyszczania na filtrach włókninowych pozwala na zatrzymywanie zawiesiny wypływającej z osadnika gnilnego, zabezpieczając jednocześnie system odprowadzania ścieków oczyszczonych do gruntu przed kolmatacją.

Podstawowymi procesami zachodzącymi w trakcie oczyszczania ścieków na filtrach włókninowych jest usuwanie zanieczyszczeń organicznych, oznaczanych jako BZT_5 i $ChZT_{Cr}$, przy czym na najbardziej efektywnych 8-warstwowych filtrach ze zmiennym poziomem piętrzenia uzyskano stopień usuwania zanieczyszczeń na poziomie $64,3 \pm 1,84\%$ ($n = 62$) i $78,9 \pm 2,43\%$ ($n = 14$) w zakresie BZT_5 i $ChZT_{Cr}$ odpowiednio [Spychała i Łucyk 2015].

Przy użyciu filtrów włókninowych ze zmiennym poziomem piętrzenia można również uzyskać usuwanie azotu amonowego na poziomie około 29% (dla filtrów 8-warstwowych) oraz fosforu ogólnego do 40% (również dla filtrów 8-warstwowych), przy czym efektywności tych procesów towarzyszyła duża zmienność.

Z praktycznego punktu widzenia nawet niezbyt wysokie skuteczności oczyszczania na poziomie około 70–80% są wystarczające dla spełnienia warunków rozporządzenia, dając jednocześnie możliwość zmniejszenia powierzchni rozsączania w przypadku odprowadzania ścieków do ziemi lub ich dalszego doczyszczania na filtrach gruntowych (np. piaskowych). I tak na przykład przy BZT_5 około $30 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ i stężeniu zawiesiny ogólnej około $50 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ na dopływie umożliwia zmniejszenie powierzchni rozsączania ścieków prawie o połowę (40%) w stosunku do układu współpracującego tylko z osadnikiem gnilnym [Laak 1986].

Celem badań była ocena przydatności technologii filtrów włókninowych ze stałym poziomem piętrzenia jako elementu przydomowej oczyszczalni ścieków z odprowadzaniem ścieków do wód powierzchniowych w kontekście osiągania na odpływie stężeń zanieczyszczeń dopuszczalnych w świetle Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. [Rozporządzenie... 2014].

Celem pracy była również weryfikacja hipotezy o większej skuteczności usuwania zanieczyszczeń rozpuszczonych i w postaci zawiesiny przez filtry włókninowe ze stałym poziomem piętrzenia niż przez filtry ze zmiennym poziomem piętrzenia.

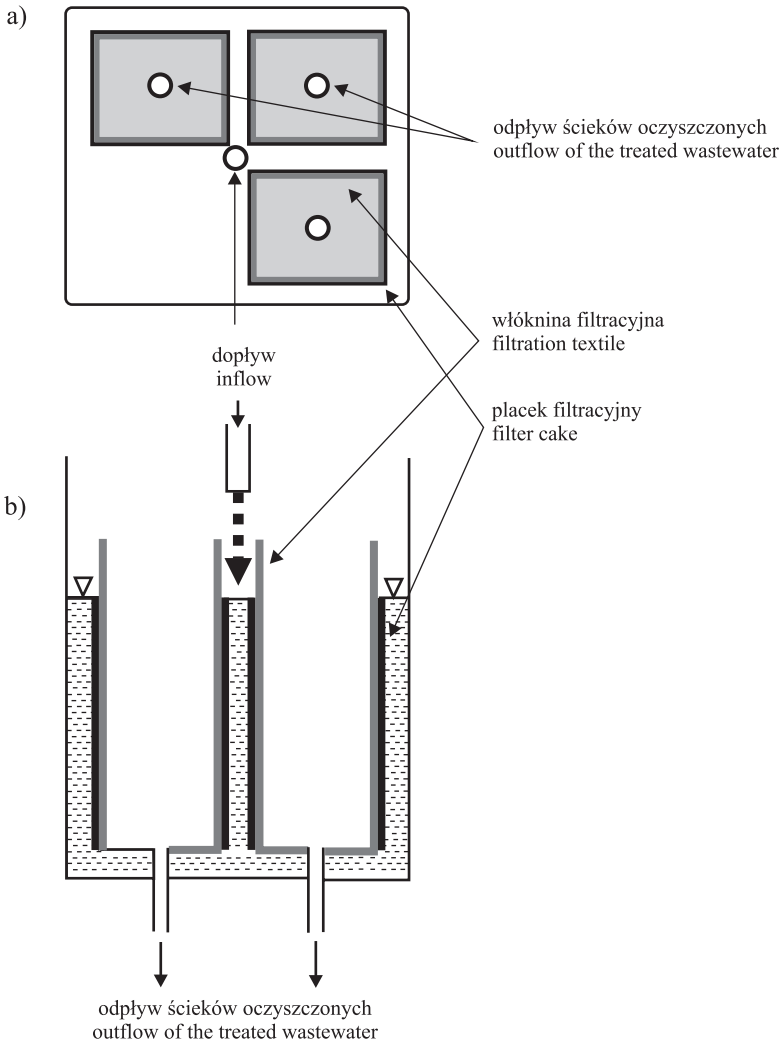
METODYKA

Badania w zakresie kontroli wydatku (przepuszczalności filtrów) i poziomu piętrzenia na nich ścieków prowadzono od czerwca 2014 roku. Pod koniec września 2014 uzyskano stałe piętrzenie – obniżenie zwierciadła ścieków pomiędzy kolejnymi dawkami w stosunku do poziomu przelewu nie większe niż 5,0 cm. Badania nad skutecznością prowadzono od 10.2014 do 11.2015 na filtrach o takiej samej konstrukcji jak filtry, które scharakteryzowano we wcześniejszych publikacjach [Spychała i Łucyk 2015, Spychała i Starzyk 2015, Spychała i in. 2015].

Do badań użyto dwóch filtrów 8-warstwowych (nr 1 i nr 2 – jako dwa powtórzenia jednego doświadczenia) oraz jednego filtra 4-warstwowego (ryc. 1). Ze względu na małą stabilność wydatku oraz niższe i wykazujące większą zmienność (w porównaniu z filtrami o większej grubości) skuteczności usuwania zanieczyszczeń przez filtry 2-warstwowe zrezygnowano z ich badania w warunkach stałego piętrzenia. Filtru 4-warstwowego użyto

w celu potwierdzenia wykazanej wcześniej zależności – niższej skuteczności filtrów o mniejszej grubości [Spychała i Łucyk 2015], przy czym zależność tę stwierdzono dla filtrów eksploatowanych przy zmiennym poziomie piętnienia ścieków.

Założono jednocześnie, że filtry 8-warstwowe będą w stanie spełnić wymogi Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. [Rozporządzenie... 2014] ze względu na stosunkowo wysoką ich skuteczność. Obwód w rzucie z góry pojedynczego filtra wynosił 32 cm w przypadku filtra 4-warstwowego (4W) i 33 cm – w przypadku filtra 8-warstwowego (8W). Były to filtry o grubości warstwy filtracyjnej 3,6 mm i 7,2 mm (cztery i osiem warstw geowłókniny TS 20 o grubości 0,9 mm).



Ryc. 1. Reaktor badawczy wyposażony w filtry włókninowe
Fig. 1. Research reactor equipped with a non-woven filters

Właściwości geowłókniny TS 20 przedstawiono szczegółowo w ramach wcześniej prezentowanych wyników innych badań [Spychała i Łucyk 2015]. W badaniach będących przedmiotem niniejszej publikacji zastosowano jednak zasadniczo inny sposób piętrzenia ścieków niż w badaniach Spychały i Łucyka [2015].

Ponieważ już wcześniej filtry o zmiennym poziomie wykazywały tendencję do zwiększania powierzchni zwilżanej (do pewnego stopnia zakolmatowanej) i zwiększającego się z czasem poziomu piętrzenia, co stwierdzono już we wcześniejszych badaniach [Spychała i in. 2013] prowadzonych na filtrach różnego typu (TS i TC/PP), o innych grubościach, także z użyciem ścieków po osadniku gnilnym, lecz o nieco innych stężeniach zanieczyszczeń.

Po czterech miesiącach uzyskano piętrzenie sięgające poziomu przelewu. W tym czasie wydatek filtrów był już na tyle niski i w miarę ustabilizowany, że spracowanie pojedynczej dawki (czas pomiędzy załączeniem kolejnych dawek) skutkowało nieznacznym obniżeniem poziomu ścieków do 2,9–4,3 cm poniżej poziomu przelewu.

Badania prowadzono w laboratorium technologicznym Katedry Inżynierii Wodnej i Sanitarnej Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu przy ul. Piątkowskiej 94A. Pomieszczenie laboratorium było okresowo dogrzewane w celu utrzymania temperatury nie niższej niż 18–20°C.

W ściekach rzeczywistych dopływających na filtry i odpływających z nich oznaczano: zawiesinę ogólną (metodą suszarkowo-wagową), fosfor ogólny (metodą kolorymetryczną na spektrofotometrze), chemiczne zapotrzebowanie na tlen (metodą dwuchromianową) i pięciodobowe biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (metodą respirometryczną).

Stężenia podstawowych wskaźników zanieczyszczeń w ściekach dopływających na filtry wynosiły: ChZT_{Cr} : $377,1 \pm 23,0 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 22$), BZT₅: $149,4 \pm 22,9 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 16$), zawiesina ogólna: $166,8 \pm 20,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 20$).

Do wykonania wymienionych oznaczeń i pomiarów wykorzystano następującą aparaturę: spektrofotometri firmy Merck, zestaw do pomiaru BZT₅ typu OXI-TOP firmy WTW.

Wykonywano również badania stężenia biomasy na włókninie filtracyjnej. Próbki biomasy (na skrawkach włókniny filtracyjnej o powierzchni 2,8–11,4 cm²) pobierano w kilku powtórzeniach dla każdej z badanych grubości warstwy filtracyjnej, z wysokości filtra 0–15 cm. Próbki te wyciskano mechanicznie i przepłukiwano wodą destylowaną, a następnie popłuczyny suszono w temp. 105°C do uzyskania stałej wagi i określano jako suchą masę odniesioną do jednostkowej powierzchni filtracyjnej. Próbki ścieków do analiz fizyko-chemicznych pobierano (z nielicznymi odstępstwami) raz w tygodniu.

Filtry ze stałym poziomem piętrzenia były zasilane 6 razy dziennie (co 4 godziny) dawką o średniej objętości, wynoszącej 288,0 cm³ do poziomu przelewu – 33,0 cm.

Wydatek hydrauliczny obliczano jako iloraz objętości odpływu z danego filtra i jego czynnej powierzchni filtracyjnej w jednostce czasu.

Poszczególne wartości pomiarowe zawartości zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych dla tego samego rodzaju filtra (4 lub 8 warstw) były mniej zróżnicowane niż w przypadku filtrów o zmiennym poziomie piętrzenia.

Analizę statystyczną wykonano zgodnie z procedurą opisaną przez Łomnickiego [1999] w postaci testowania hipotezy zerowej o braku różnicy między średnimi. Dla porównania średnich wartości dla filtrów ze zmiennym i stałym poziomem piętrzenia zastosowano

klasyczny test na różnicę średnich, natomiast dla porównania skuteczności filtrów ze stałym poziomem piętrzenia o różnej grubości – test na różnicę średnich dla par wiązanych, jako że porównywane wartości (pary) stwierdzane były dla tej samej próbki ścieków dopływających i w tym samym czasie dla próbek ścieków oczyszczonych.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wydatek hydrauliczny filtrów i zawartość suchej masy (biomasy) na powierzchni i wewnątrz filtrów

W miarę upływu czasu podczas prowadzenia eksperymentu wydatek zmniejszał się nieznacznie i w ostatnich kilku tygodniach wyniósł średnio $1,57 \pm 0,19 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ dla filtra 4W i $1,12 \pm 0,09 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ dla filtra 8W. Wydatek hydrauliczny filtrów pracujących w reżimie stałego poziomu piętrzenia był wobec powyższego znacząco niższy niż w przypadku filtrów pracujących ze zmiennym poziomem piętrzenia (4W: $6,4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ i 8W: $5,8 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$, średnio [Spychała i Łucyk 2015]). Jednak należy tu zwrócić uwagę na to, że w przypadku filtrów pracujących przy zmiennym poziomie piętrzenia wyższe partie filtrów odznaczały się mniejszym stężeniem biomasy, a tym samym większą przepuszczalnością hydrauliczną.

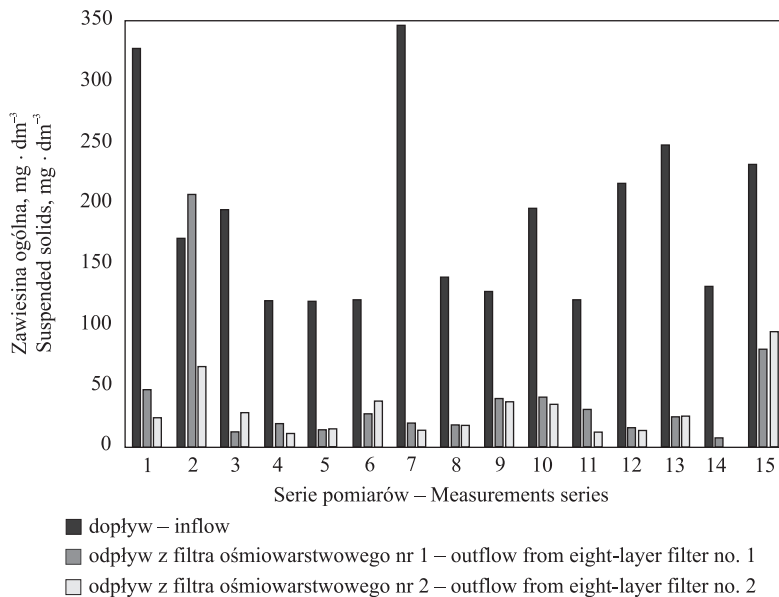
Zaobserwowane stężenie suchej biomasy na włókninie filtracyjnej filtrów 8-warstwowych wynosiło średnio $31,3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ i było zbliżone wartością do obserwowanych dla strefy zatopionej filtrów w ramach eksperymentu ze zmiennym poziomem piętrzenia z okresu 01.2013–08.2013 ($26,9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ i $36,7 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ dla filtrów 4- i 8-warstwowych, odpowiednio [Spychała i Łucyk 2015]), oraz z okresu 01.2013–06.2014 ($17,4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ i $28,8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ dla filtrów 4- i 8-warstwowych, odpowiednio [Spychała i Sowińska 2015]).

Skuteczność usuwania zawiesiny ogólnej

Stężenie zawiesiny ogólnej w ściekach dopływających do filtrów wynosiło średnio $186,6 \pm 19,3 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 15$). Stężenie zawiesiny ogólnej na odpływie z filtrów 4W wynosiło średnio $55,1 \pm 8,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, $n = 21$ (ryc. 2), z filtra 8W nr 1: $39,7 \pm 12,9 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 15$), a z filtra 8W nr 2: $30,5 \pm 6,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 15$).

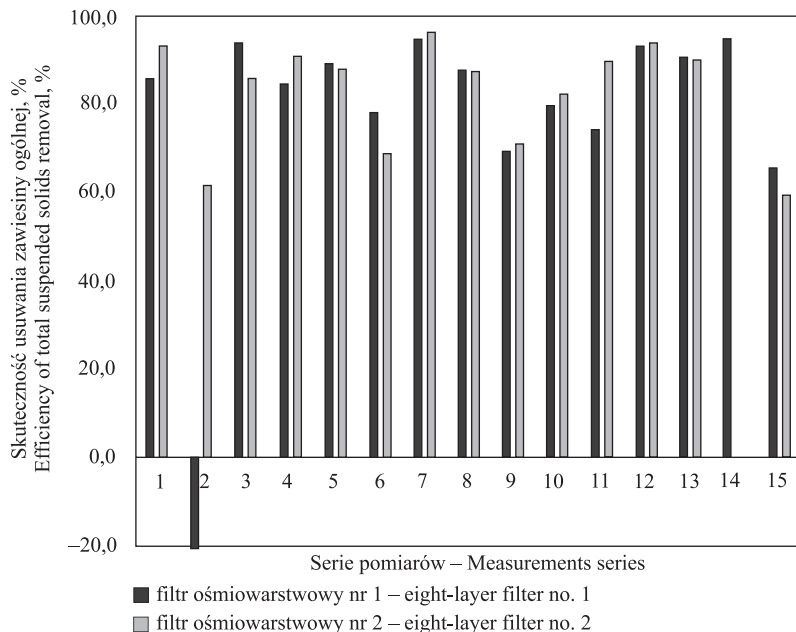
Zaobserwowano wyższe skuteczności usuwania zanieczyszczeń przez oba filtry 8-warstwowe (filtr nr 1: $77,2 \pm 7,5\%$, $n = 15$ i filtr nr 2: $82,6 \pm 3,3\%$, $n = 14$, średnio oba filtry 8W uzyskały $79,3 \pm 3,9\%$, $n = 29$) niż skuteczność wykazywana przez filtr 4-warstwowy ($67,3 \pm 4,9\%$, $n = 21$). Skuteczność usuwania zawiesiny ogólnej przez filtry 8-warstwowe przedstawia ryc. 3.

Różnicy tej nie udało się jednak potwierdzić statystycznie testem na różnicę średnich dla par wiązanych na poziomie istotności dla testu dwustronnego, wynoszącej 0,05 [Łomnicki 1999], ze względu na stosunkowo niewielką różnicę średnich oraz dużą zmienność uzyskanych wyników. Uzyskano wartość statystyki t , wynoszącą 0,01 dla filtra nr 1 (wartość krytyczna dla $d_f = 13$: 2,160) i wartość statystyki t , wynoszącą 0,39 dla filtra nr 2 (wartość krytyczna dla $d_f = 14$: 2,145). Na dużą zmienność uzyskanych skuteczności usuwania zawiesiny ogólnej wskazują wartości odchylenia standardowego: 22,4, 28,5 i 12,1 dla filtra 4W, filtra 8W nr 1 i filtra 8W nr 2, odpowiednio.



Ryc. 2. Stężenie zawiesiny ogólnej w ściekach dopływających do oraz odpływających z filtrów 8-warstwowych nr 1 i nr 2

Fig. 2. The concentration of total suspended solids in wastewater inflowing to and outflowing from eight-layer filters



Ryc. 3. Skuteczność usuwania zawiesiny ogólnej przez filtry 8-warstwowe

Fig. 3. Total suspended solids removal efficiency of eight-layer filters

Skuteczność usuwania zawiesiny ogólnej przez filtry 8-warstwowe była niższa od zaobserwowanej w ramach badań nad oczyszczaniem odpływu z osadnika gnilnego z użyciem geowłókniny wykonanej z włókien kokosowych [Mukulath i in. 2011], wynoszącej 98%.

Spółród 29 wartości stężeń zawiesiny ogólnej na odpływie z filtrów 8-warstwowych tylko w czterech przypadkach odnotowano przekroczenie dopuszczanej rozporządzeniem maksymalnej wartości $40 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, co można uznać za satysfakcjonujący wynik, biorąc pod uwagę brak osadnika wtórnego za filtrami. Niskie i dość stabilne stężenia zawiesiny na odpływie są związane z dość niskimi stężeniami w dopływie (ścieki pochodzą z osadnika gnilnego), wysoką skutecznością cedzenia zawiesiny na filtrach (małe rozmiary umownej średnicy porów – około 0,1 mm) oraz niskim stężeniem biomasy zasiedlającej filtry po stronie odpływu (związanym z niskim stężeniem substratu w odpływie z filtrów).

Pewne nieznaczne ilości zawiesiny w odpływie z filtrów są raczej nieuniknione ze względu na aktywność, przyrost i odrywanie części nadmiernej biomasy zasiedlającej filtr. Wpływ na wzrost stężenia i zwiększenie niestabilności zawiesiny ogólnej w odpływie mógł mieć również rozwój muchówek z rodzaju *Psychoda*, których masowe pojawy (do kilku osobników na 1 cm^2) obserwowano okresowo, przy czym warto zauważyć większy ich wpływ na filtry o mniejszej grubości (głębokość penetracji przez larwy) oraz na filtry o zmiennym poziomie piętrzenia ze względu na preferowanie przez te owady biomasy ściekowej o powierzchni lekko przesuszonej, co zaobserwowano w trakcie badań.

Skuteczność usuwania zawiesiny przez filtry ze stałym poziomem piętrzenia okazała się wyższa i bardziej stabilna (niższe wartości odchylenia standardowego średniej) niż w przypadku filtrów ze zmiennym poziomem (4W: $63,1 \pm 8,3\%$, $n = 25$, 8W: $37,8 \pm 10,6\%$, $n = 18$). Za ciekawą należy uznać tendencję dla filtrów ze zmiennym poziomem piętrzenia – zmniejszania się skuteczności usuwania zawiesiny wraz ze zwiększaniem grubości warstwy filtracyjnej [Spychała i Łucyk 2015]. Podobnie jak różnicy pomiędzy skutecznością filtrów o różnej grubości, także tej różnicy nie udało się jednak potwierdzić statystycznie [Łomnicki 1999]. Uzyskano wartość statystyki t , wynoszącą 1,85 (wartość krytyczna dla $d_f = 42$: 2,01).

Wyższą skuteczność filtrów ze stałym poziomem piętrzenia w stosunku do filtrów ze zmiennym poziomem piętrzenia można tłumaczyć bardziej jednorodnym pokryciem filtrów w ich części górnej. W przypadku filtrów o zmiennym poziomie piętrzenia wraz ze wzrostem wysokości stwierdzono spadek stężenia biomasy zasiedlającej, co wynikało z krótszego czasu kontaktu ze ściekami i mniejszego obciążenia substratem tej strefy. Z tego też powodu była ona bardziej podatna na wysychanie i oddzielanie się części biomasy.

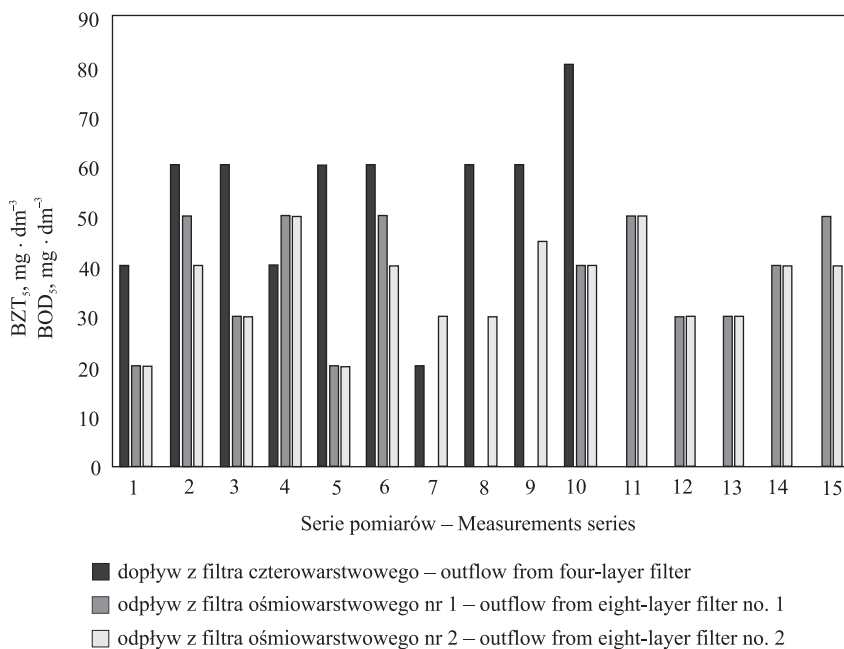
Warunki rozporządzenia dla zawiesiny w odniesieniu do lokalizacji w ramach aglomeracji spełniało 10 z 14 próbek w przypadku filtra nr 1 oraz 11 z 14 próbek w przypadku filtra nr 2. Są to na tyle wysokie wskaźniki, że można uznać za realne uzyskanie warunków rozporządzenia dla lokalizacji w ramach aglomeracji pod warunkiem utrzymywania optymalnych warunków dla pracy filtrów (usuwanie nagromadzonego osadu, unikanie niedociążenia ładunkiem zanieczyszczeń organicznych i zawiesiny dopływających wraz ze ściekami).

Skuteczność usuwania rozpuszczonych substancji organicznych oznaczanych jako BZT₅

BZT₅ w ściekach dopływających wynosiło średnio $127,3 \pm 6,8 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 15$), natomiast BZT₅ na odpływie z filtra 4W wynosiło średnio $54,0 \pm 5,2 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 10$), na odpływie z filtra 8W nr 1: $37,3 \pm 3,4 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 12$), a na odpływie z filtra 8W nr 2: $34,6 \pm 2,3 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 15$). BZT₅ w ściekach odpływających z filtrów 4- i 8-warstwowych przedstawia ryc. 4.

Zaobserwowano wyższe skuteczności usuwania zanieczyszczeń organicznych wyrażonych jako BZT₅ przez filtry 8-warstwowe ($71,7 \pm 3,7\%$, $n = 12$ dla filtra 8W nr 1 i $73,1 \pm 2,5\%$, $n = 15$ dla filtra 8W nr 2) niż skuteczność wykazywana przez filtr 4W ($51,3 \pm 5,9\%$, $n = 10$). Skuteczność usuwania BZT₅ przez filtry 4- i 8-warstwowe przedstawiono na ryc. 5. Różnicę potwierdzono statystycznie na poziomie istotności dla testu dwustronnego, wynoszącej 0,05 (test różnicy średnich dla par wiązanych [Łomnicki 1999]). Dla różnicy średnich pomiędzy filtrem 4-warstwowym i 8-warstwowym nr 1 uzyskano statystykę równą 3,67 (wartość krytyczna dla $d_f = 9$: 2,26), a dla różnicy średnich pomiędzy filtrem 4-warstwowym i 8-warstwowym nr 2 obliczona statystyka wynosiła 3,55 (wartość krytyczna dla $d_f = 9$: 2,26).

Zaobserwowano znaczne wartości odchyłeń standardowych i odchyłeń od średniej: 18,5 i 5,9, 12,7 i 3,7 oraz 9,6 i 2,5 odpowiednio dla filtra 4W, filtra 8W nr 1 i filtra 8W nr 2.

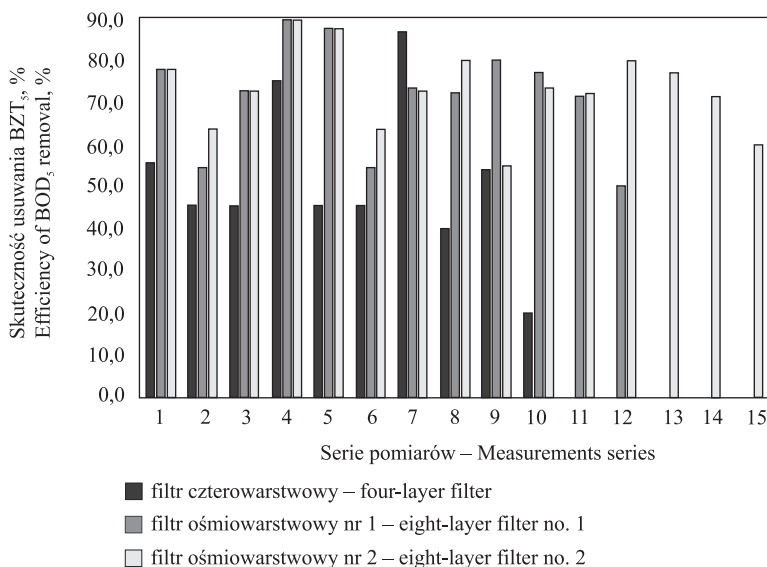


Ryc. 4. BZT₅ w ściekach odpływających z filtrów

Fig. 4. BOD₅ in wastewater outflowing from the filters

Stwierdzono istotną statystycznie różnicę średnich (na poziomie istotności dla testu dwustronnego wynoszącej 0,05) dla skuteczności usuwania BZT_5 przez filtry 8-warstwowe ze zmiennym i stałym poziomem piętrzenia (odpowiednio 78,9% i 72,5%), na korzyść filtrów ze zmiennym poziomem. Jednak, mając na uwadze znikomą różnicę pomiędzy obliczoną wartością statystyki a wartością krytyczną (odpowiednio 2,056 i 2,042) oraz dokładność wykonywanych oznaczeń BZT_5 ($\pm 5 - 20 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$), należy – zdaniem autora – wynik ten traktować jako mało znaczący. Nie stwierdzono statystycznej różnicy pomiędzy średnimi skutecznościami usuwania BZT_5 przez filtry 8-warstwowy nr 1 i 8-warstwowy nr 2.

Skuteczność usuwania BZT_5 przez filtry 8-warstwowe była wyraźnie niższa od uzyskanej dla nietkanej i tkanej geowłókniny wykonanej z włókien kokosowych (97,4% i 96,9%) zaobserwowanej w ramach badań wykonanych przez Mukkulatha i in. [2011]. Należy jednak zauważyć, że cytowane wyniki badań uzyskano dla filtrów nasypowych, działających na zasadzie biologicznych filtrów zraszanych o stosunkowo dużej wysokości – 0,9 m.

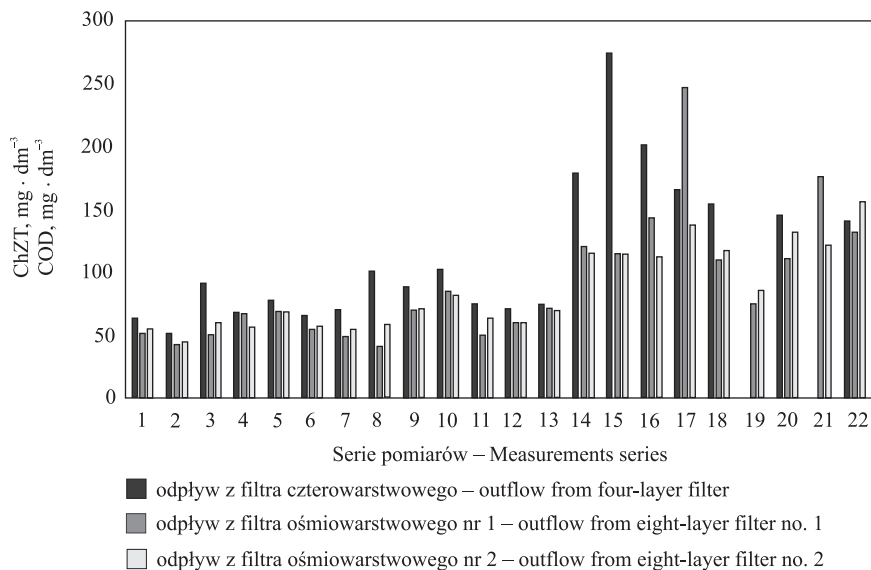


Ryc. 5. Skuteczność usuwania BZT_5

Fig. 5. BOD_5 removal efficiency

Skuteczność usuwania rozpuszczonych substancji organicznych oznaczanych jako $ChZT_{Cr}$

Chemiczne zapotrzebowanie na tlen ($ChZT_{Cr}$) w ściekach dopływających wynosiło średnio $377,1 \pm 23,03\%$ ($n = 22$). W odpływie z filtra 4W $ChZT_{Cr}$ wynosiło średnio $112,6 \pm 13,0 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 20$), z filtra 8W nr 1 – $89,9 \pm 10,8 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 22$), a z filtra 8W nr 2 – $85,8 \pm 7,1 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ($n = 22$). $ChZT_{Cr}$ w ściekach odpływających przedstawiono na ryc. 6.

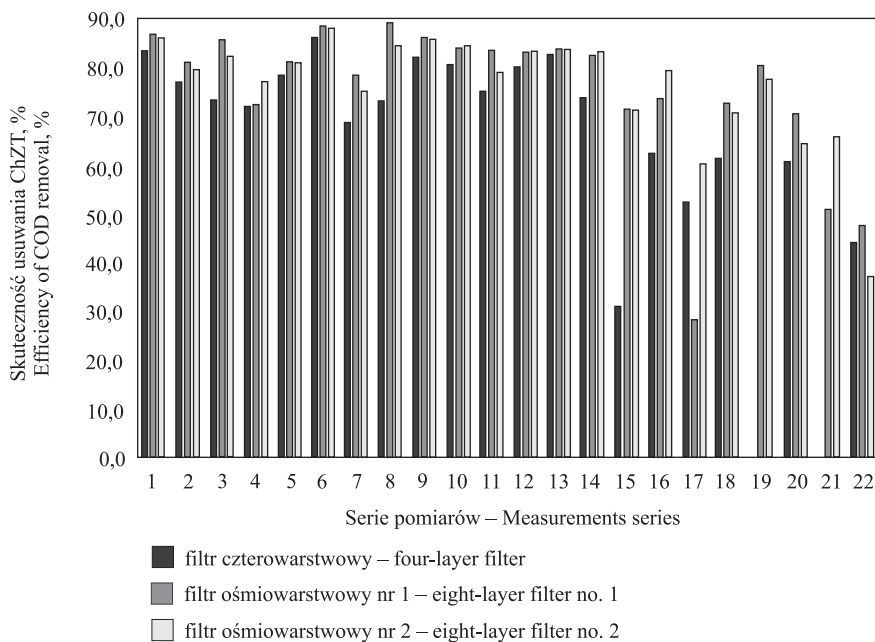


Ryc. 6. Wartość $ChZT_{Cr}$ w ściekach odpływających z filtrów
 Fig. 6. COD in wastewater outflowing from the filters

Skuteczności usuwania rozpuszczonych substancji organicznych, oznaczanych jako $ChZT_{Cr}$ (ryc. 7), w okresie badań ze stałym poziomem piętrzenia ścieków na filtrach ($76,0 \pm 2,4\%$, $n = 22$ dla filtra 8W nr 1, $75,1 \pm 3,2\%$, $n = 22$ dla filtra 8W nr 2 i $69,5 \pm 3,2\%$, $n = 20$ dla filtra 4W) były bardzo zbliżone do skuteczności stwierdzonych dla filtrów ze zmiennym poziomem piętrzenia [Spychała i Łucyk 2015] – $64,3\%$ dla filtrów 8-warstwowych i $56,9\%$ dla filtrów 4-warstwowych.

Nie stwierdzono statystycznie istotnej różnicy na poziomie istotności dla testu dwustronnego, wynoszącej $0,05$ [Łomnicki 1999], pomiędzy filtrami ze stałym poziomem piętrzenia i filtrami ze zmiennym poziomem piętrzenia (obliczona wartość statystyki i wartość krytyczna wynosiły odpowiednio: $2,017$ i $2,021$). Podobnie jak w przypadku pozostałych analizowanych wskaźników zanieczyszczeń, było to z jednej strony związane ze zmiennością uzyskanych wartości (składających się na wartość średnią), a z drugiej – brakiem możliwości zastosowania testu dla par wiązanych, dla którego łatwiej jest uzyskać statystyczną istotność. Test ten można było z kolei zastosować dla porównywania wartości średnich filtrów 4- i 8-warstwowych ze stałym poziomem piętrzenia ze względu na równoczesne wykonywanie pomiarów (w tym samym czasie do wszystkich filtrów doprowadzana była ta sama dawka ścieków).

Różnicę pomiędzy średnią skutecznością filtra 4-warstwowego i średnią skutecznością filtrów 8-warstwowych potwierdzono statystycznie na poziomie istotności dla testu dwustronnego, wynoszącej $0,05$ (test różnicy średnich dla par wiązanych [Łomnicki 1999]). Dla różnicy średnich pomiędzy filtrem 4-warstwowym i 8-warstwowym nr 1 uzyskano statystykę równą $2,20$ (wartość krytyczna dla $d_f = 40$: $2,02$), a dla różnicy średnich pomiędzy filtrem 4-warstwowym i 8-warstwowym nr 2 – równą $2,68$ (wartość krytyczna dla $d_f = 40$: $2,02$).



Ryc. 7. Skuteczność usuwania $ChZT_{Cr}$
 Fig. 7. COD removal efficiency

Warunki rozporządzenia dla $ChZT_{Cr}$ w odniesieniu do lokalizacji w ramach aglomeracji spełniało 13 z 20 próbek w przypadku filtra 4-warstwowego, 18 z 22 próbek w przypadku filtra 8-warstwowego nr 1 oraz 19 z 22 próbek w przypadku filtra 8-warstwowego nr 2. Uznano za uzasadnione odniesienie uzyskanych wyników do warunków rozporządzenia mimo oznaczania $ChZT_{Cr}$ i BZT_5 dla próbek sączonych ze względu na brak osadnika wtórnego (podobnie jak w przypadku stawów biologicznych) oraz niskie stężenia zawiesiny ogólnej w ściekach oczyszczonych. Zdaniem autora, biorąc pod uwagę dość wysoki udział próbek spełniających wymogi rozporządzenia (zwłaszcza w przypadku filtrów 8-warstwowych – od 82 do 86%), można uznać, że filtry w warunkach technicznych powinny spełniać wymogi rozporządzenia dla lokalizacji w ramach aglomeracji pod warunkiem zachowania optymalnych warunków ich pracy.

Skuteczność usuwania innych rodzajów zanieczyszczeń oraz czynniki warunkujące tę skuteczność

Skuteczności usuwania fosforu ogólnego w okresie badań ze stałym poziomem piętrzenia ścieków ($39,1 \pm 2,8\%$, $n = 14$ dla filtra 8W nr 1, $37,6 \pm 3,3\%$, $n = 15$ dla filtra 8W nr 2 i $30,0 \pm 3,2\%$, $n = 15$ dla filtrów 4W) były bardzo zbliżone do skuteczności stwierdzonych dla filtrów ze zmiennym poziomem piętrzenia: $40,3\%$ dla filtrów 8-warstwowych i $32,4\%$ dla filtrów 4-warstwowych [Spychała i Łucyk 2015]. Nie stwierdzono statystycznie istotnej różnicy ani pomiędzy poszczególnymi filtrami ze stałym poziomem piętrzenia, ani też pomiędzy filtrami ze stałym poziomem piętrzenia i filtrami ze zmiennym poziomem piętrzenia.

Wyższa skuteczność filtrów o większej grubości warstwy filtracyjnej (osiem warstw) od filtrów o mniejszej grubości (cztery warstwy) była prawdopodobnie związana z większą zawartością biomasy ($17,45 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ dla filtrów 4W i $28,77 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ dla filtrów 8W) oraz, co się z tym wiąże, mniejszą prędkością filtracji i większym średnim czasem retencji. Obserwowano tę zależność także w ramach innych badań [Spychała i Sowińska 2015]. Podobne zależności opisano również wcześniej w odniesieniu do filtrów o zmiennym poziomie piętrzenia [Spychała i Łucyk 2015].

Czas zatrzymania ścieków na filtrze nie był wyznaczany, jednak biorąc pod uwagę porównywalne stężenie biomasy z filtrami o zmiennym poziomie piętrzenia (dla tego typu filtrów oszacowano średni czas retencji w oparciu o wyznaczone wartości porowatości, prędkości filtracji i grubości warstwy filtracyjnej [Spychała i Łucyk 2015]) oraz mniejszy wydatek (średnia prędkość filtracji), czas ten wynosił 1–3 godzin dla filtrów 4-warstwowych 3–7 godzin dla filtrów 8-warstwowych.

Warto zauważyć, że mimo długiego czasu eksploatacji filtrów (prawie trzech lat: 01.2013–08.2013 – etap ze zmiennym poziomem piętrzenia, 10.2014–11.2015 – etap ze stałym poziomem piętrzenia) skuteczność usuwania fosforu ogólnego nie spadła, co świadczy o jego biologicznym, a nie fizyko-chemicznym (sorpcja) usuwaniu.

Nie stwierdzono usuwania azotu ogólnego, co było konsekwencją braku warunków odpowiednich dla denitryfikacji. Sporadycznie – w pojedynczych próbkach stwierdzono obniżenie stężenia azotu ogólnego w stosunku do ścieków w reaktorze, jednak należy je wiązać raczej z niepewnościami i błędami pomiarowymi niż z rzeczywistym obniżeniem stężenia.

Analizę skuteczności oczyszczania przez filtry włókninowe utrudniała okresowa aktywność muszek *Psychoda*, która istotnie wpływała na prędkość przepływu przez filtry, a co za tym idzie również na skuteczności oczyszczania.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że:

1. Najwyższą skuteczność oczyszczania dla większości wskaźników zanieczyszczeń uzyskano dla filtrów o największej grubości (filtry 8-warstwowe nr 1 i nr 2), a obserwowane różnice w średnich skutecznościach usuwania zanieczyszczeń (oznaczanych jako ChZT_{Cr} , BZT_5 i zawiesina ogólna) pomiędzy różnymi grubościami warstwy filtracyjnej zostały potwierdzone statystycznie.
2. Biorąc pod uwagę dość wysoki udział próbek spełniających wymogi Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [Rozporządzenie... 2014] można uznać, że filtry w warunkach technicznych powinny spełniać wymogi dla lokalizacji w ramach aglomeracji pod warunkiem zachowania optymalnych warunków ich pracy; oba rodzaje filtrów (4- i 8-warstwowe) spełniają wymogi rozporządzenia pod względem nieprzekraczania najwyższych dopuszczalnych wartości wskaźników zanieczyszczeń dla ścieków bytowych lub komunalnych wprowadzanych do wód lub do ziemi dla RLM poniżej 2000 w zakresie zawiesiny ogólnej

i ChZT_{Cr} natomiast w odniesieniu do BZT_5 wartość dopuszczalną spełniały tylko filtry 8-warstwowe.

3. Dalszych badań wymaga ewentualne uzyskanie przez filtry włókninowe skuteczności usuwania azotu ogólnego – modyfikacji lub rozbudowy systemu o element dający warunki odpowiednie dla denitryfikacji.
4. Filtry o stałym poziomie piętrzenia ścieków wykazują pewną przewagę nad filtrami z piętrzeniem zmiennym, w zakresie: skuteczności usuwania zanieczyszczeń (aczkolwiek nie potwierdziła tego analiza statystyczna), stabilności pracy, odporności na zmienność na dopływie oraz odporności na przesuszanie.
5. Badania filtrów włókninowych, które mają zarówno wymiar naukowy (procesy zachodzące w specyficznych warunkach), jak i aplikacyjny (możliwość praktycznego zastosowania zwłaszcza w ramach małych oczyszczalni ścieków) wykazały, że filtry ze stałym poziomem piętrzenia mogą, po przejściu ze skali półtechnicznej na techniczną – aplikacyjną, stanowić bardzo przydatną technologię, stanowiącą drugi etap oczyszczalni indywidualnej (za osadnikiem gnilnym), zwłaszcza w warunkach odprowadzania ścieków oczyszczonych do wód powierzchniowych. Reaktory tego typu umożliwiają spełnienie wymogów rozporządzenia (nie spełnia ich sam osadnik gnilny – zwłaszcza w zakresie związków węgla, oznaczanych jako ChZT_{Cr} i BZT_5), przy czym charakteryzują się prostą budową i można zakładać, że w warunkach technicznych nie będą wymagały skomplikowanej obsługi, a koszty eksploatacji będą bardzo niskie (maksymalnie kilka złotych miesięcznie za zużycie energii elektrycznej). Wykazano w ramach badań, że zarówno filtry ze zmiennym, jak i stałym poziomem piętrzenia mogą bez płukania działać co najmniej przez kilkanaście miesięcy, przy czym ewentualne płukanie można przeprowadzić w prosty sposób – omywając zakolmatowaną powierzchnię filtrów strumieniem wody bieżącej (dzięki małej spoistości nadmiar biomasy bardzo łatwo się odrywa).

PIŚMIENNICTWO

- Crites, R., Lekven, C., Wert, S., Tchobanoglous, G. (1997). A decentralized wastewater system for a small residential development in California. *The Small Flows J.*, 3(1), 3–9.
- Hellstroem, D., Jonsson, L. (2005). Evaluation of small on-site wastewater treatment systems. IWA conf. Nutrient Management in WTP and Recycle Streams. Kraków, LemTech Cons., 941–950.
- Ho, G. (1998). Appropriate waste management technologies. [W:] Koffel, P., Lowe, B., Ho, G., Newman, P., Sedyowati, T.L., (eds.) (1996). *Environmental technology: applications in principle and practice: proceedings of an International Symposium held at Merdeka University, Malang, Indonesia, July 1–3 1996.* Murdoch University, Perth, Western Australia, 33–35.
- Ho, J.H., Khanal, S.K., Sung, S. (2007). Anaerobic membrane bioreactor for treatment of synthetic municipal wastewater at ambient temperature. *Water Sci. Tech.*, 55, 79–86.
- Jenssen, P.D., Krogstad, T., Paruch, A.M., Mæhlum, T., Adam, K., Arias, C.A., Heistad, A., Jonsson, L., Hellström, D., Brix, H., Yli-Halla, M., Vråle, L., Valve, M. (2010). Filter bed systems treating domestic wastewater in the Nordic countries – Performance and reuse of filter media. *Ecol. Eng.*, 36, 1651–1659.

- Korkut, E.N., Martin, J.P., Yaman, C. (2006). Wastewater treatment with biomass attached to porous geotextile baffles. *J. Environ. Eng.*, 132, 284–288.
- Laak, R. (1986). *Subsurface Soil System*. [W:] *Wastewater Engineering Design for Unsewered Areas*; Technomic Publishing Company: Lancaster, PA, USA.
- Lacasse, R., Belanger, G., Henry, Y., Talbot, P., Młynarek, J., Vermersch, O. (2001). A denitrification process based on a new filtering media for onsite wastewater treatment. *Proc. of the IX Nat. Symp. on Ind. and Small Com. Sewage Systems*. ASAE, St Joseph, 235–244.
- Łomnicki, A. (1999). *Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników*. PWN, Warszawa.
- Mukulath, G., Biju, M.S., Thampi, S.G. (2011). Dug Well contamination by septic tank effluent and remediation using coir geotextiles. *Int. J. Earth Sci. and Eng.*, 4(3), 532–538.
- Ren, X., Shon, H.K., Jang, N., Lee, Y.G., Bae, M., Lee, J., Cho, K., Kim, I.S. (2010). Novel membrane bioreactor (MBR) coupled with a nonwoven fabric filter for household wastewater treatment. *Water Res.*, 44, 751–760.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. *Dz.U. z 2014 r., poz. 1800*.
- Spychała, M., Błażejowski, R., Nawrot, T. (2013). Performance of innovative textile biofilters for domestic wastewater treatment. *Environ. Technol.*, 34(2), 157–163.
- Spychała, M., Łucyk, P. (2015). Effect of thickness of textile filter on organic compounds and nutrients removal efficiency at changeable wastewater surface level. *Nauka Przyr. Technol.*, 9(3), 1–21.
- Spychała, M., Sowińska, A., Starzyk, J., Masłowski, A. (2015). Protozoa and metazoa relations to technological conditions of non-woven textile filters for wastewater treatment. *Environ. Technol.*, 36(15), 1865–1875.
- Spychała, M., Sowińska, A. (2015). Filter cake impact on the textile filters for wastewater treatment hydraulic capacity. *Nauka Przyr. Technol.*, 9(4), 1–27.
- Spychała, M., Starzyk, J. (2015). Bacteria in non-woven textile filters for domestic wastewater treatment. *Environ. Technol.*, 36(8), 937–945.
- Yaman, C., Martin, J.P., Korkut, E. (2005). Use of layered geotextiles to provide a substrate for biomass development in treatment of septic tank effluent prior to ground infiltration. *J. Environ. Eng.*, 131, 1667–1673.

THE EFFICIENCY OF TEXTILE FILTERS FOR WASTEWATER TREATMENT IN CONDITION OF STABLE WASTEWATER TABLE

Abstract. The main objective of this study was to evaluate the usefulness of nonwoven filters with a constant wastewater table as part of individual wastewater treatment plant in the context of achieving effluent concentrations of pollutants permissible by the Regulation of the Minister of the Environment of 18 November 2014. During the study two eight-layer filters (7.2 mm thickness) and one four-layer filter (3.6 mm thickness) were used. In the inflowing and outflowing wastewater COD, BOD₅, total suspended solids and total phosphorus were determined. Average concentrations of pollution indicators in wastewater inflowing to the filters were: COD – 377.1 mg O₂ · dm⁻³, BOD₅ – 149.4 mg O₂ · dm⁻³, total suspended solids – 166.8 mg · dm⁻³. The highest treatment efficiency for most of the pollution indicators were obtained for the filters having the maximum thickness and the observed differences in average removal effectiveness between the various thicknesses of the filter layer were confirmed statistically. In author's opinion the filters in the technical conditions should comply with the Regulation of the Minister of Environment of

18 November 2014 [Rozporządzenie... 2014]. The studies have shown that the nonwoven filter in condition of stable wastewater table can be a useful technology as the second stage of the individual (on-site) wastewater treatment plant (treatment unit used for septic tank effluent), especially in the conditions of discharge of treated wastewater into surface waters.

Key words: removal of pollutants, wastewater treatment, septic tank, domestic wastewater

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.03.2016

Do cytowań – For citation: Spychała, M., (2016). Skuteczność filtrów włókninowych do oczyszczania ścieków w warunkach stałego poziomu piętrzenia. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(1), 19–34.