



# **Wpływ wybranych miąższości filtrów piaskowych o przepływie pionowym na jakość oczyszczonych ścieków bytowych**

*Ewa Dacewicz, Grzegorz Kaczor, Piotr Bugajski*  
*Uniwersytet Rolniczy, Kraków*

## **1. Wprowadzenie**

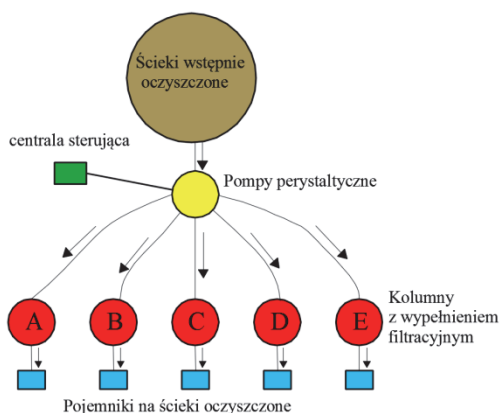
Na rynku jest wiele rozwiązań pozwalających oczyścić ścieki bytowe z pojedynczego gospodarstwa lub niewielkiej grupy gospodarstw. Selekcja systemu zastosowanego w małych oczyszczalniach ścieków wymaga uwzględnienia kryteriów zrównoważonego rozwoju, obejmujących aspekty techniczne, środowiskowe i społeczne (Józwiakowski 2012, Józwiakowski i in. 2015, Mucha i Generowicz 2015, Wójcik i in. 2014). Jednak o wyborze układu optymalnego tak w systemach wodociągowych, jak i kanalizacyjnych, decydują często aspekty ekonomiczne (Jawecki i in. 2013, Kaczor i in. 2017, Nowak i Wawryca 2015, Tchórzewska i Rak 2010). Jako przydomowe oczyszczalnie ścieków coraz częściej stosuje się systemy hydrofitowe (Józwiakowski 2012, Józwiakowski i in. 2016, Józwiakowski 2017). Dominującą rolę zaczynają odgrywać oczyszczalnie na bazie osadu czynnego tj. reaktory przepływowe lub pracujące w układzie sekwencyjnym (SBR), które charakteryzują się niskimi kosztami eksploatacyjnymi (Nowak i Wawryca 2015). Wśród innowacyjnych rozwiązań są też takie, które wykorzystują nietypowe materiały jako element nośnika biomasy (Mazur i in. 2016, Wąsik i Chmielowski 2017). Są to najczęściej obiekty wykonane z tworzywa sztucznego o stosunkowo niewielkich gabarytach. Problem stanowi obsługa tego typu urządzeń, która często wymaga fachowej wiedzy w zakresie ustawiania parametrów poszczególnych urządzeń (dmuchawy,

pompy recyrkulujące). Sam właściciel często nie jest zorientowany, a wręcz nie chce ingerować w obsługę tego typu obiektów. Jednym z takich rozwiązań są filtry piaskowe o przepływie pionowym (Chmielowski i Wałęga 2009). Znacznie mniejsze kłopoty eksploatacyjne sprawia obsługa układów składających się z osadnika gnilnego i filtra piaskowego o przepływie pionowym. Jest to od dawna stosowane rozwiązanie, którego zasadniczą wadą jest możliwość kolmatacji złoża filtracyjnego, zwłaszcza przy niepoprawnie eksploatowanym osadniku gnilnym. Celem pracy było określenie wpływu miąższości złoża filtracyjnego z wypełnieniem piaskowym na jakość oczyszczonych ścieków bytowych.

## 2. Materiały i metody badawcze

### 2.1. Obiekt badań

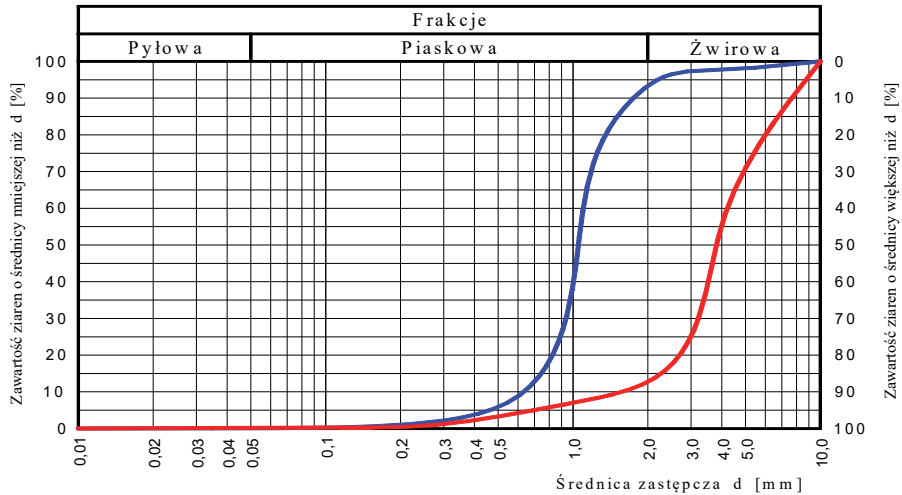
W celu określenia wpływu miąższości warstwy filtracyjnej w filtrze piaskowym o przepływie pionowym na jakość ścieków oczyszczonych zbudowany został model wycinkowy filtra piaskowego o przepływie pionowym, który był eksploatowany w pomieszczeniu zwanym "Modelarnią" w Katedrze Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Model badawczy składał się z pięciu jednakowych kolumn wykonanych z PCV o średnicy 200 mm i wysokości 1100 mm (rysunek 1).



**Rys. 1.** Schemat technologiczny modelu kolumnowego (opracowanie własne)

**Fig. 1.** Technological scheme of the column model (own elaboration)

Wypełnienie kolumn stanowił płukany piasek o średnicy uziarnienia  $d_{10} = 0,62$  mm. Podstawowe parametry zastosowanego materiału filtracyjnego przedstawiono w tabeli 1. Krzywe granulometryczne poszczególnych warstw filtracyjnych, wykonane na podstawie pomiarów masy ziaren zatrzymanych na poszczególnych sitach wytrząsarki do gruntów sypkich, zobrazowano na rysunku 2. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry warstwy filtracyjnej oraz podtrzymującej w modelu kolumnowym.



**Rys. 2.** Krzywe granulometryczne warstw filtracyjnych: kolor niebieski – warstwa piaskowa; kolor czerwony – warstwa podtrzymująca, drobny żwir (opracowanie własne)

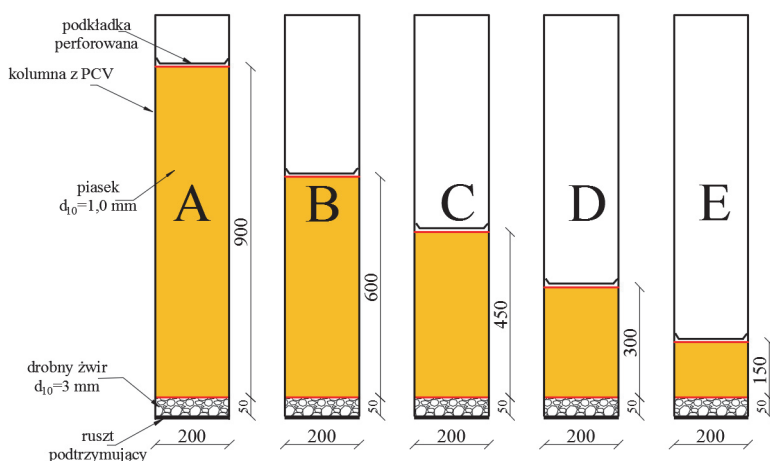
**Fig. 2.** Granulometric curves of filter layer: blue – sand layer; red – support layer, gravel (own elaboration)

**Tabela 1.** Zestawienie parametrów złoża filtracyjnego (model kolumnowy)

**Table 1.** Summary of parameters of filter bed layers (column model)

Rodzaj warstwy	Porowatość [%]	$d_{90}$ [mm]	$d_{60}$ [mm]	$d_{50}$ [mm]	$d_{10}$ [mm]	$U_1 = d_{60}/d_{10}$	$U_2 = d_{90}/d_{10}$	$U_3 = d_{90}/d_{60}$
Warstwa filtracyjna – piaskowa	37	1,80	1,15	1,10	0,62	1,85	2,90	1,57
Warstwa podtrzymująca – żwirowa	41	7,70	4,15	3,80	1,70	2,44	4,53	1,86

Miąższość warstw w poszczególnych kolumnach była następująca A = 15 cm, B = 30 cm, C = 45 cm, D = 60 cm oraz E = 90 cm. Na dnie każdej warstwy filtracyjnej znajdował się ruszt podtrzymujący złożę a na nim warstwa podtrzymująca z drobnego żwiru o miąższości 5 cm (rysunek 3). Model badawczy przez 45 dób był zasilany wstępnie oczyszczonymi ściekami bytowymi pochodzącymi z obiektu użyteczności publicznej. Dawkowanie ścieków do kolumn modelu w ilości 24 dawkowania na dobę, odbywało się za pomocą pompki perystaltycznych, które były łączone cyklicznie co godzinę. W danej serii pomiarowej każda z kolumn modelu była poddawana zróżnicowanemu obciążeniu hydraulicznemu w przedziale od 20 do 80  $\text{dm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .



**Rys. 3.** Schemat kolumn modelu badawczego (opracowanie własne)

**Fig. 3.** The scheme of the column model (own elaboration)

## 2.2. Analizy fizykochemiczne

Ścieki wstępnie oczyszczone pobierano średnio, co trzy doby z komory rozdzielczej po osadniku gnilnym, a ścieki oczyszczone pobierano z taką samą częstotliwością jako filtry z poszczególnych kolumn modelu. Próbkę ścieków poddawano analizie fizykochemicznej w laboratorium Wydziału Inżynierii Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, którą wykonano dla następujących wskaźników zanieczyszczenia ścieków: BZT<sub>5</sub>, ChZT<sub>Cr</sub>, tlen rozpuszczony, zawiesina ogólna. Analizę fizykochemiczną przeprowadzono łącznie dla 15 serii pomiarowych,

podczas których pobrano 90 próbek ścieków wg norm PN-74/C-04620-11:1974 oraz PN-EN ISO 5667-1:2007. Pomiary stężenia tlenu rozpuszczonego wykonano zgodnie z normą PN-EN 5814:2013-04 za pomocą miernika wieloparametrowego CPO-401 firmy ELMETRON. Badanie BZT<sub>5</sub> przeprowadzono przy użyciu zestawu butelek OXITOP® według normy PN-EN 1899-1:2002 metodą manometryczną z rozcieńczeniami oraz normy PN-EN 1899-2:2002 metodą manometryczną bez rozcieńczeń. Oznaczanie ChZT<sub>Cr</sub> wykonano zgodnie z normą PN-ISO 6060:2006 z wykorzystaniem fotometru Aquanal Spectro 3. Badanie zawiesiny ogólnej wykonano zgodnie z normą PN-EN 872:2007 metodą z zastosowaniem filtracji przez sączki z włókna szklanego.

### 2.3. Analizy statystyczne

Obliczeń statystycznych dokonano w oparciu o określenie, czy średnie wartości stężeń badanych wskaźników w ściekach pobieranych z zadanych głębokości złoża filtracyjnego w istotny sposób się od siebie różnią. W tym celu zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA. Jako zmienną zależną przyjęto wartości badanych wskaźników zanieczyszczenia ze ścieków oczyszczonych dla poszczególnych poziomów złoża filtracyjnego (BZT<sub>5</sub>, ChZT<sub>Cr</sub>, zawiesina ogólna). Czynnikiem determinującym jakość ścieków w odpływie z poszczególnych głębokości złoża filtracyjnego była jego miąższość.

Wstępna analiza danych polegała na wykonaniu testu Grubbsa na wielkości odstające oraz na ocenie normalności rozkładu zmiennych z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilka na założonym poziomie istotności równym 0,05. Do dalszej analizy wykorzystano tylko te zmienne, które można było opisać rozkładem normalnym. Dane poddano następnie analizie homogeniczności wariancji jednym z testów stosowanych w celu sprawdzenia istotności różnic pomiędzy wariancjami. Wykorzystano do tego test jednorodności wariancji Leven'a, którego statystyka  $F$  charakteryzuje się rozkładem Fishera.

W celu wskazania, pomiędzy którymi grupami różnice średnich są najbardziej istotne wykorzystano test post hoc Tukaya dla  $N$  zmiennych. Test ten sprawdza istotność różnicy średnich dla wszystkich par grup. W wynikach badań empirycznych przedstawiono tablice wartości prawdopodobieństw testowych (p-value) dla każdej pary grup. Różnica średnich dla danej pary grup została uznana jako istotna, jeśli prawdopodobieństwo testowe (p-value) było mniejsze od 0,05.

### 3. Analiza wyników badań i dyskusja

W tabeli 2 przedstawiono podstawowe statystyki opisowe ścieków wstępnie oczyszczonych dopływających do modelu badawczego.

**Tabela 2.** Charakterystyka jakościowa ścieków wstępnie oczyszczonych dopływających do kolumn modeli

**Table 2.** Quality characteristics of pre-treated sewage inflowing to model columns

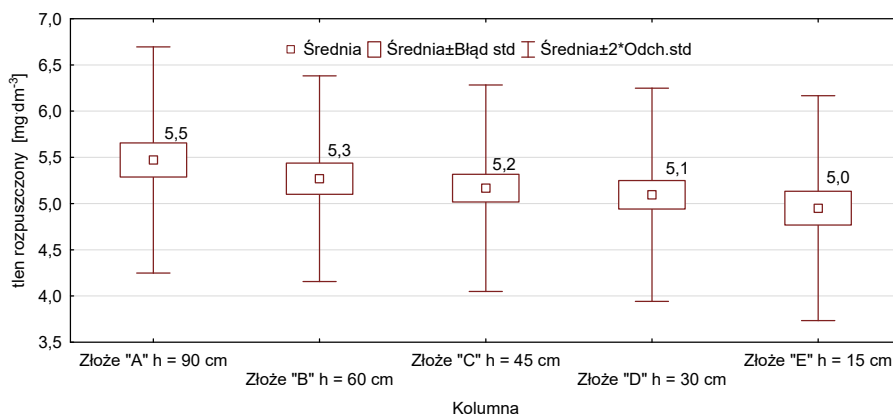
Wskaźnik	Statystyki opisowe (liczba próbek = 15)					
	Wartość średnia	Mediana	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchyl. std.	Kurt oza
BZT <sub>5</sub> [mg O <sub>2</sub> ·dm <sup>-3</sup> ]	238,7	240,0	120,0	480,0	93,87	1,83
ChZT <sub>Cr</sub> [mg O <sub>2</sub> ·dm <sup>-3</sup> ]	376,2	363,0	275,0	556,0	96,58	-1,00
Zawiesina ogólna [mg·dm <sup>-3</sup> ]	100,2	99,0	38,0	229,6	54,15	0,92
Tlen rozpuszczony [mg O <sub>2</sub> ·dm <sup>-3</sup> ]	0,38	0,40	0,07	0,60	0,19	-1,24

Ścieki wstępnie oczyszczone dopływające do modelu badawczego charakteryzowały się zmiennością wartości wskaźnika BZT<sub>5</sub> na poziomie 0,39. Średnia wartość BZT<sub>5</sub> wyniosła 238,7 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>, odchylenie standardowe 93,9 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>. Wartość minimalna (120,0 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>) i maksymalna (480,0 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>) świadczą o znacznym rozstępie jakości dopływających ścieków (360,0 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>), co potwierdzają inni autorzy (Metcalf Eddy 1991, Pawęska i in. 2011, Pawęska i Kuczewski 2013).

Analizując wartości ChZT<sub>Cr</sub> ścieków wstępnie oczyszczonych należy stwierdzić, że średnia wartość ukształtowała się na poziomie 376,2 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>. Dane literaturowe, dotyczące wartości ChZT<sub>Cr</sub> ścieków wstępnie oczyszczonych kształtują się w podobnych granicach (Jóźwiakowski 2012, Wąsik i Chmielowski 2013, Wąsik i Chmielowski 2014, Wąsik i Chmielowski 2017).

Biorąc pod uwagę wartości zawiesiny ogólnej w ściekach dopływających do modelu badawczego stwierdzono jej zakres w przedziale od 38,0 mg·dm<sup>-3</sup> do 229,6 mg·dm<sup>-3</sup>, natomiast średnia wartość ukształtowała się na poziomie 100,2 mg·dm<sup>-3</sup>. W badaniach przeprowadzonych przez

innych autorów średnia wartość zawiesiny ogólnej po osadniku gnilnym wyniosła  $134,4 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Chmielowski 2013). Również inni autorzy podają podobne wartości zawiesiny ogólnej po osadniku gnilnym (Chmielowski i Ślizowski 2008a, Chmielowski i Ślizowski 2008b, Józwiakowski 2012, Pawęska i in. 2011).



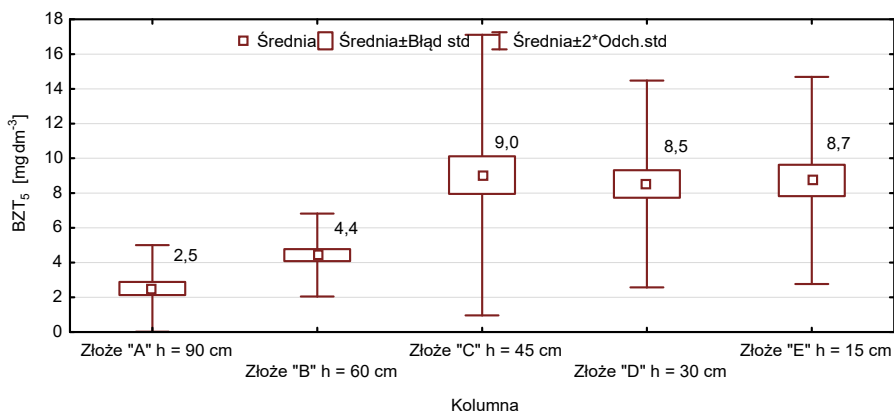
**Rys. 4.** Wykres ramka-wąsy dla stężenia tlenu rozpuszczonego w ściekach oczyszczonych w poszczególnych kolumnach modelu

**Fig. 4.** Box-plot graphs of dissolved oxygen concentration in sewage from each model column

Biorąc pod uwagę dane przedstawione na rysunku 4 można zauważyć, że ścieki odpływające z poszczególnych kolumn modelu odznaczały się wysokim stężeniem tlenu rozpuszczonego (średnia od  $5,0 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$  przy miąższości złoża filtracyjnego 15 cm, do  $5,5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$  przy miąższości złoża filtracyjnego 90 cm). Świadczy to, o bardzo dobrym przewietrzeniu złoża filtracyjnego. Wraz ze wzrostem miąższości warstwy filtracyjnej dało się zauważyć wzrost stężenia tlenu rozpuszczonego w ściekach oczyszczonych. Potwierdzenie wysokiego stężenia tlenu w odpływie ze zmodyfikowanego filtra żwirowo-piaskowego uzyskano na podstawie badań terenowych (Chmielowski 2013).

Analizując dane przedstawione na rysunku 5 można stwierdzić, że we wszystkich badanych kolumnach uzyskano wartości BZT<sub>5</sub> ścieków oczyszczonych na poziomie zdecydowanie niższym niż dopuszczalna przez Rozporządzenie (2014) wartość  $40 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ . Wartość średnia dla ścieków oczyszczonych w kolumnie „A” wyniosła  $2,5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ , a przy

miąższości złoża filtracyjnego 60 cm – wyniosła  $4,4 \text{ mg O}_2\text{dm}^{-3}$ . Są to wartości zbliżone do otrzymanych przez innych autorów (Asenizacja indywidualna 1982, Osmulka-Mróż 1995, Ślizowski i Chmielowski 2007). Dla kolumn „C”, „D” i „E” zaobserwowano podobne wartości BZT<sub>5</sub> ścieków oczyszczonych, które nie przekroczyły  $9,0 \text{ mg O}_2\text{dm}^{-3}$ . W badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych przez Chmielowskiego i Ślizowskiego (2008a, 2008b) autorzy Ci uzyskali średnią wartość BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych na poziomie  $8,9 \text{ mg O}_2\text{dm}^{-3}$ .



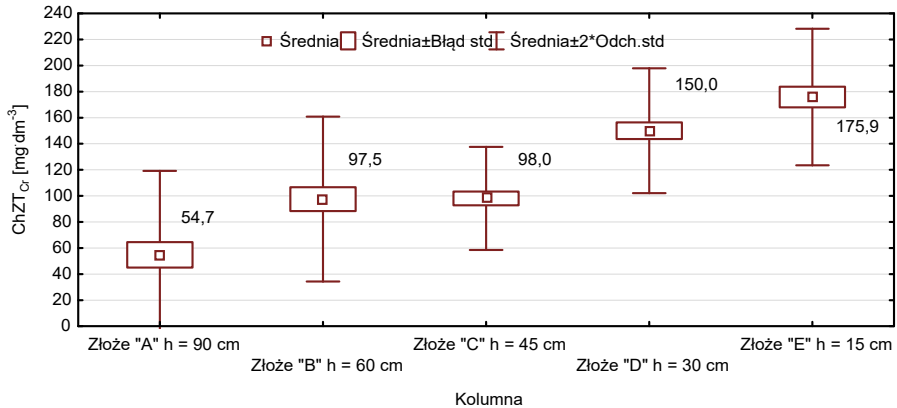
**Rys. 5.** Wykres ramka-wąsy dla BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych w poszczególnych kolumnach modelu

**Fig. 5.** Box-plot graphs of BOD<sub>5</sub> in sewage from each model column

Wysokie stężenia tlenu rozpuszczonego oraz niskie wartości BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych pozwalają stwierdzić, że w samym złożu zachodziły procesy tlenowe ze znaczną intensywnością. Pozwoliło to na rozwój odpowiednich szczepów mikroorganizmów zdolnych do usuwania związków węgla ze ścieków. Na uwagę zasługuje fakt, że nawet przy najmniejszej miąższości złoża filtracyjnego (15 cm) uzyskano bardzo niskie wartości BZT<sub>5</sub>. Dla średniej wartości BZT<sub>5</sub> ścieków dopływających do modelu wynoszącej  $238,7 \text{ mg O}_2\text{dm}^{-3}$ , nastąpiło znaczne zmniejszenie tego wskaźnika w wysokości ponad 96%. Biorąc pod uwagę wyniki badań przeprowadzonych przez Józwiakowskiego (2012), średnia wartość BZT<sub>5</sub> ścieków oczyszczonych w hydrofitowym złożu gruntowo-roślinnym o przepływie pionowym wyniosła  $27,4 \text{ mg O}_2\text{dm}^{-3}$ .



Dla złoża o głębokości autor wykazał 84%-ową średnią skuteczność zmniejszania tego wskaźnika, natomiast w przypadku ChZT – 78%-ową.



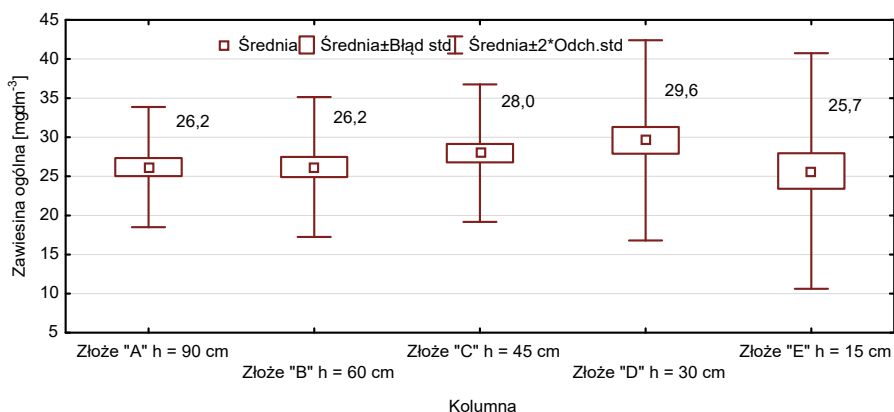
**Rys. 6.** Wykres ramka-wąsy dla ChZT<sub>Cr</sub> w ściekach oczyszczonych w poszczególnych kolumnach modelu

**Fig. 6.** Box-plot graphs of COD<sub>Cr</sub> in sewage from each model column

Analizując wartości ChZT<sub>Cr</sub> w ściekach oczyszczonych z poszczególnych kolumn modelu (rysunek 6) należy zauważyć wyraźny wzrost średniej wartości ChZT<sub>Cr</sub> wraz ze zmniejszaniem się wysokości złoża filtracyjnego. Przy miąższości warstwy filtracyjnej równej 90 cm (kolumna „A”) średnia wartość ChZT<sub>Cr</sub> wyniosła 54,7 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>. Zdecydowanie wyższe wartości ChZT<sub>Cr</sub> uzyskano po przesączeniu ścieków przez kolumnę „B” i „C” gdzie uzyskano średnie wartości tego wskaźnika odpowiednio 97,5 i 98,0 mg O<sub>2</sub> dm<sup>-3</sup>. Na takie wyniki miał wpływ czas zatrzymania ścieków w złożu filtracyjnym. Uzyskane wyniki mogą być pomocne przy konstruowaniu hybrydowych rozwiązań w zakresie oczyszczania małych ilości ścieków. Stwierdzenie to dotyczy przede wszystkim układów wykorzystujących równocześnie kilka znanych rozwiązań, np. filtr piaskowy o przepływie pionowym plus osad czynny lub technologia MBBR. Analizując wartości ChZT<sub>Cr</sub> ścieków oczyszczonych na złożach o miąższości 15 cm i 30 cm zaobserwowano znacznie wyższe wartości tego wskaźnika (odpowiednio 150,0 dla złoża „D” oraz 175,9 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup> dla złoża „E”). Niemniej jednak zastosowanie złoża o miąższości 15 cm pozwoliło na zmniejszenie ChZT<sub>Cr</sub> średnio o 200,3 mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>, czyli o ponad 53%. Takie zmniejszenie świadczy o zachodzących procesach tlenowych w złożu.

Stosunek  $BZT_5$  do  $ChZT_{Cr}$  w ściekach oczyszczonych na poziomie 0,04-0,09 wskazywał na obecność w nich jedynie związków chemicznych nierozkładalnych na drodze biologicznej (Miksch i Sikora 2010).

Podobne wartości zmniejszenia  $ChZT_{Cr}$  uzyskano badając zmodyfikowany filtr żwirowo-piaskowy (Chmielowski 2013), gdzie po przesączeniu ścieków przez 10 cm warstwę złoża uzyskano zmniejszenie wskaźnika  $ChZT_{Cr}$  na poziomie 51,8%, a przez 50 cm warstwę - usunięcie na poziomie 83,7%. Józwiakowski (2012) uzyskał średnią wartość  $ChZT_{Cr}$  w ściekach odpływających ze złoża gruntowo-roślinnego o przepływie pionowym na poziomie  $61,8 \text{ mg O}_2 \text{ dm}^{-3}$ .



**Rys. 7.** Wykres ramka-wąsy dla stężenia zawiesiny ogólnej w ściekach oczyszczonych w poszczególnych kolumnach modelu

**Fig. 7.** Box-plot graphs of the total suspended solids in sewage from each model column

Analizując dane przedstawione na rysunku 7 można zauważyć zbliżone do siebie wartości średnich stężeń zawiesiny ogólnej odpływającej z poszczególnych kolumn modelu badawczego. Jest to cenna informacja, na podstawie której można wywnioskować, iż zasadnicza część zawiesiny zostaje zatrzymana w powierzchniowej części złoża filtracyjnego. Podobne wyniki uzyskano podczas badania obiektu w skali technicznej (Chmielowski 2013). Stwierdzono wtedy bardzo dużą redukcję zawiesiny oraz związków węgla oznaczanych jako  $BZT_5$ . Mając na uwadze, iż większa część zawiesiny zostaje zatrzymana na powierzchni złoża filtracyjnego, można zalecić dozowanie do złoża biopreparatów z wyse-

lekcjonowanymi szczepami bakterii. Ich zadaniem byłby rozkład substancji organicznych, co pozwoliłoby na znacznie dłuższą pracę filtra piaskowego bez jego wczesnej kolmatacji. Należy przeprowadzić dodatkowe badania w zakresie stosowania różnego rodzaju biopreparatów i zbadać ich wpływ na jakość ścieków oczyszczonych oraz na postęp procesu kolmatacji złoża filtracyjnego.

W dalszej kolejności przedstawiono wyniki istotności różnic wariancji dla badanych wskaźników w ściekach oczyszczonych w poszczególnych kolumnach modelu badawczego. Z tabeli 3 wynika, że istotne różnice pomiędzy wariancjami występują w przypadku wskaźników BZT<sub>5</sub> oraz ChZT<sub>Cr</sub>. Natomiast dla zawiesiny ogólnej i tlenu rozpuszczonego nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wariancjami dla tych zmiennych. Wyniki te sugerują, że wysokość złoża filtracyjnego istotnie wpływa na uzyskane wartości badanych wskaźników w ściekach oczyszczonych BZT<sub>5</sub> oraz ChZT<sub>Cr</sub>.

**Tabela 3.** Wyniki istotności różnic wariancji dla badanych wskaźników

**Table 3.** Results of significance of differences of variance for the examined indicators

Wskaźnik	SS-Effect	df	MS	SS-Effect error	Df error	MS error	F	p-value
BZT <sub>5</sub>	422,051	4	105,513	447,153	57	7,845	13,4500	0,000000
ChZT <sub>Cr</sub>	105506,8	4	26376,7	40824,5	57	716,2	36,828	0,000000
Zawiesina ogólna	138,08	4	34,52	1720,36	57	30,18	1,144	0,345310
Tlen rozpuszczony	1,708	4	0,427	18,923	56	0,338	1,264	0,295037

SS-Effect – suma kwadratów (suma kwadratów odchyłeń od średniej),  
df – liczba stopni swobody, MS – średnia suma kwadratów, F – wartość empiryczna sprawdzianu testu, p – prawdopodobieństwo testowe (0,05)

Ostatnim etapem badań było określenie, czy miąższość złoża filtracyjnego jest czynnikiem istotnie różnicującym wartość BZT<sub>5</sub> oraz ChZT<sub>Cr</sub> w ściekach oczyszczonych, odpływających z poszczególnych głębokości złoża piaskowego.

W tabeli 4 przedstawiono wartości prawdopodobieństw testowych Tukaya, sprawdzających istotność różnic pomiędzy poszczególnymi parami średnich wartości BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych.

**Tabela 4.** Wartość prawdopodobieństwa testowego (Tukaya) istotności różnic pomiędzy poszczególnymi parami średnich wartości BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych

**Table 4.** Probability value (Tukay) of significance of difference between pairs of mean BOD<sub>5</sub> values in treated sewage

Miąższość złoża [cm]	Prawdopodobieństwa testowe (Tukaya) istotności różnic pomiędzy parami średnich wartości BZT <sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych w kolumnach o różnej miąższości złoża filtracyjnego				
	{15cm}	{30 cm}	{45 cm}	{60 cm}	{90 cm}
{15}	-	0,475177	0,000137	0,000148	0,000156
{30}	0,475177	-	0,001052	0,004262	0,004762
{45}	0,000137	0,001052	-	0,988431	0,998805
{60}	0,000148	0,004262	0,988431	-	0,999772
{90}	0,000156	0,004762	0,998805	0,999772	-

Kolorem czerwonym zaznaczono wartości prawdopodobieństwa testowego poniżej 0,05

Wartość prawdopodobieństwa testowego poniżej 0,05 informuje o istotnej różnicy poszczególnych par średnich wartości BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych. Oznacza to, że głębokość złoża filtracyjnego jest czynnikiem decydującym o wartości BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych. Dla par głębokości 15/30 cm, 45/60 cm, 45/60 cm oraz 60/90 cm (głębsze warstwy) nie zaobserwowano różnic pomiędzy średnimi wartościami BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych. Potwierdza to fakt, iż proces usuwania łatwo rozkładalnych substancji organicznych zachodzi najintensywniej w płytszych warstwach (15 i 30 cm).

W tabeli 5 przedstawiono wartości prawdopodobieństw testowych Tukaya sprawdzających istotność różnic pomiędzy poszczególnymi parami średnich wartości ChZT<sub>Ct</sub> w ściekach oczyszczonych.

Analizując powyższe dane należy stwierdzić, że głębokość złoża filtracyjnego jest czynnikiem decydującym istotnie o wartości ChZT<sub>Ct</sub> w ściekach oczyszczonych. Sytuacja ta nie dotyczy zależności pomiędzy średnią wartością BZT<sub>5</sub> w ściekach oczyszczonych dla par głębokości 30/45 cm oraz 60/90 cm. Świadczyć to może o tym, że w warstwach początkowych (do 30 cm) procesy tlenowe zachodzą najintensywniej.

**Tabela 5.** Wartość prawdopodobieństwa testowego (Tukaya) istotności różnic pomiędzy poszczególnymi parami średnich wartości  $\text{ChZT}_{\text{Cr}}$  w ściekach oczyszczonych

**Table 5.** Probability value (Tukay) of significance of difference between pairs of mean  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  values in treated sewage

Miąższość złoża [cm]	Prawdopodobieństwa testowe (Tukaya) istotności różnic pomiędzy parami średnich wartości $\text{ChZT}_{\text{Cr}}$ w ściekach oczyszczonych w kolumnach o różnej miąższości złoża filtracyjnego				
	{15cm}	{30 cm}	{45 cm}	{60 cm}	{90 cm}
{15}	-	0,002991	0,001687	0,000128	0,000128
{30}	0,002991	-	0,999999	0,000184	0,000128
{45}	0,001687	0,999999	-	0,000162	0,000128
{60}	0,000128	0,000184	0,000162	-	0,129933
{90}	0,000128	0,000128	0,000128	0,129933	-

Kolorem czerwonym zaznaczono wartości prawdopodobieństwa testowego poniżej 0,05

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysnuć następujące wnioski:

- stężenie tlenu rozpuszczonego w ściekach oczyszczonych we wszystkich kolumnach modelu kształtowało się na wysokim poziomie powyżej  $5,0 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ . Przy najmniejszej badanej wysokości złoża filtracyjnego (15 cm) uzyskano wysokie stężenie tlenu rozpuszczonego w ściekach oczyszczonych wynoszące  $5,0 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ . Oznacza to, iż warstwa filtracyjna wykonana z piasku płukanego jest bardzo dobrym elementem zapewniającym wysoki poziom tlenu rozpuszczonego w ściekach oczyszczonych. Można zatem zaproponować takie rozwiązanie w hybrydowym złożu filtracyjnym, którego pierwszy etap będzie stanowiła warstwa piasku małej miąższości (np. 15 cm do 30 cm). Kolejne warstwy stanowiłyby inne materiały, na których zachodziłby proces dalszego doczyszczania ścieków;
- usunięcie związków węgla na filtrze piaskowym o przepływie pionowym zachodziło z dużą intensywnością. W przypadku  $\text{BZT}_5$  zaobserwowano bardzo niskie wartości tego wskaźnika w ściekach oczyszczonych. Już przy złożu o wysokości warstwy filtracyjnej 15 cm uzyskano bardzo niskie wartości  $\text{BZT}_5$  (średnio  $8,7 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Takie wartości świadczą o bardzo intensywnych procesach zachodzących w wierzchniej warstwie złoża;

- zaleca się podjęcie badań w zakresie opracowania takiego rozwiązania, które umożliwiłyby płukanie wierzchniej (np. 15 cm warstwy złoża filtracyjnego), co z kolei pozwoliłoby zabezpieczyć cały filtr piaskowy przed przedwczesną kolmatacją, a tym samym wydłużyć okres jego poprawnej eksploatacji w terenie;
- piasek płukany o badanym uziarnieniu jest bardzo dobrym materiałem, który można stosować do oczyszczania ścieków bytowych. Fakt wysokiej redukcji zanieczyszczeń w złożu o niewielkiej miąższości (15 cm) pozwala na prowadzenie dalszych badań z wykorzystaniem różnych materiałów stosowanych naprzemiennie w warstwie filtracyjnej (np. z tworzywa sztucznego);
- oddzielenie wierzchniej warstwy od filtra zasadniczego pozwoli na wieloletnią pracę takiego układu bez procesu kolmatacji zasadniczej warstwy złoża filtracyjnego;
- zawiesina ogólna była zatrzymywana w badanych złożach niezależnie od ich wysokości (różnice średnich wartości zawiesiny ogólnej w odpływie były statystycznie nieistotne);
- zawiesina ogólna zatrzymana w powierzchniowej części złoża filtracyjnego (15 cm) miała w swoim składzie przede wszystkim związki łatwo rozkładalne, o czym świadczy stosunek  $BZT_5$  do  $ChZT_{Cr}$  w ściekach oczyszczonych na poziomie  $< 0,2$ . Proponuje się stosowanie dodatkowo biopreparatów do rozkładu substancji organicznych zatrzymanych w wierzchniej warstwie filtra piaskowego, co pozwoli na jego dłuższą eksploatację bez nadmiernej kolmatacji.

## Literatura

- Asenizacja indywidualna (1982). Zeszyty Techniczne Francuskiego Ministerstwa Ochrony Środowiska. Warszawa.
- Bugajski, P., Chmielowski, K., Kaczor, G. (2016). Optimizing the Percentage of Sewage from Septic Tanks for Stable Operation of a Wastewater Treatment Plant. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(4), 1421-1425. <http://doi.org/10.15244/pjoes/62299>.
- Bugajski, P., Chmielowski, K., Kaczor, G. (2016). Wpływ wielkości dopływu wód opadowych na skład ścieków surowych w małym systemie kanalizacyjnym. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 15(2), 3-11. <http://doi.org/10.15576/ASP.FC/2016.15.2.3>.
- Chmielowski, K. (2013). Skuteczność oczyszczania ścieków w przydomowej oczyszczalni z wykorzystaniem zmodyfikowanego filtra żwirowo-piaskowego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1.

- Chmielowski, K., Ślizowski, R. (2008a). Effect of grain-size distribution of sand on the filtrate quality in vertical-flow filters. *Przemysł Chemiczny*, 87(5), 432-434.
- Chmielowski, K., Ślizowski, R. (2008b). Defining the optimal range of a filter bed's  $d(10)$  replacement diameter in vertical flow sand filters. *Environment Protection Engineering*, 34(3), 35-42.
- Chmielowski, K. i Wałęga, A. (2009). Filtry piaskowe o przepływie pionowym jako drugi stopień oczyszczania małych ilości ścieków bytowych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 6/2009, 109-119.
- Jawecki, B., Marszałek, J., Pawęska, K., Sobota, M., Malczewska, B. (2013). Budowa i funkcjonowanie przydomowych oczyszczalni ścieków w świetle obowiązujących przepisów – część 1. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, II(2), 501-516, DOI:<http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2016.2.2.035>
- Józwiakowski, K. (2012). Badania skuteczności oczyszczania ścieków w wybranych systemach gruntowo-roślinnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1.
- Józwiakowski, K. (2017). Efficiency of organic substance removal in a hybrid sand filter with horizontal flow. *Journal of Water and Land Development* 35(1), 95-100.
- Józwiakowski, K., Gajewska, M., Bugajski, P., Mucha, Z., Wójcik, W., Jucherski, A., Nastawny, M. (2016), Reliability of pollutions removal processes during long term operation of one-stage constructed wetland, 15<sup>th</sup> IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, ICWS, 1, Gdańsk, Polska.
- Józwiakowski, K., Mucha Z., Generowicz, A., Baran, S., Bielińska, J. Wójcik, W. (2015). The use of multi-criteria analysis for selection of technology for a household WWTP compatible with sustainable development. *Archives of Environmental Protection*, 41(3), 76-82.
- Kaczor, G., Chmielowski, K., Bugajski, P. (2017). Wpływ sumy rocznej opadów atmosferycznych na objętość wód przypadkowych dopływających do kanalizacji sanitarnej. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 19, 668-681.
- Mazur, R., Bedla, D., Chmielowski, K., Nowak, A., i Mazurkiewicz, J. (2016). Wpływ warunków tlenowych na skuteczność oczyszczania ścieków bytowych w technologii zatapialnych filtrów włókninowych. *Przemysł Chemiczny*, 96(8), 1513–1517. <http://doi.org/10.15199/62.2016.8.18>.
- Metcalf i Eddy (1991). *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse*. Third edition. McGraw-Hill Ltd. New York.
- Miksch, K., Sikora, J. (2010), *Biotechnologia ścieków*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

- Mucha, Z. i Generowicz, A. (2015). Wybór systemu usuwania i oczyszczania ścieków z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej. *AUNC, EKONOMIA XLVI* (2) 259-269.
- Nowak, R. i Wawryca, M. (2015). Analiza kosztów funkcjonowania przydomowych oczyszczalni ścieków. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 680-691.
- Obarska-Pempkowiak, H., KołECKA, K., Gajewska, M., Wojciechowska, E., Ostojcki, A. (2015). Zrównoważone gospodarowanie ściekami na przykładzie obszarów wiejskich. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 585-602.
- Osmulski-Mróż, B. (1995). *Lokalne systemy unieszkodliwiania ścieków*. Poradnik Instytutu Ochrony Środowiska, Warszawa, 128-156.
- Pawełek, J. (2015). Water management in Poland in view of water supply and sewage disposal infrastructure development. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, II/2, 36-376.
- Pawęska, K. i Kuczewski, K. (2013). The small wastewater treatment plants – hydrobotanical systems in environmental protection. *Archives of Environmental Protection*, 39(1), 3-16, DOI: 10.2478/aep-2013-0005.
- Pawęska, K., Pulikowski, K., Strzelczyk, M., Rajmund, A. (2011). Osadnik gnilny – podstawowy element przydomowej oczyszczalni ścieków. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 10, 43-53.
- PN-74/C-04620-11:1974. Woda i ścieki – Pobieranie próbek – Pobieranie próbek ścieków z otwartych kanałów ściekowych do analizy fizycznej i chemicznej oraz bakteriologicznej.
- PN-EN ISO 5667-1:2007. Jakość wody – Pobieranie próbek – Wytyczne dotyczące technik pobierania próbek.
- PN-EN ISO 5814:2013-04. Jakość wody. Oznaczanie tlenu rozpuszczonego, metoda z czujnikiem elektrochemicznym.
- PN-EN 1899-1:2002 pt. Jakość wody – Oznaczanie biochemicznego zapotrzebowania tlenu po n dniach (BZTn) – Część 1: Metoda rozcieńczania i szczepienia z dodatkiem allilotiomicznika.
- PN-EN 1899-1:2002 pt. Jakość wody – Oznaczanie biochemicznego zapotrzebowania tlenu po n dniach (BZTn) – Część 2: Metoda do próbek nierozcieńczonych.
- PN-ISO 6060:2006 pt. Jakość wody – Oznaczanie chemicznego zapotrzebowania tlenu.
- PN-EN 872:2007 pt. Jakość wody – Oznaczanie zawiesin.
- Rozporządzenie 2014. 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. 2014 poz. 1800.



- Ślizowski, R. i Chmielowski, K. (2007). The efficiency of selected sewage pollutant reduction in a vertical flow sand filter. *Polish Journal of Environmental Studies*, 16(2A), 221-226.
- Tchórzewska-Cieślak, B. i Rak, J. (2009). Method of identification of operational states of water supply system, Conf. Proc. of 3rd Congress Environmental Engineering, Lublin, Poland, 521-526.
- Wąsik, E. i Chmielowski, K. (2013). Skuteczność oczyszczania ścieków bytowych w filtrach piaskowych o przepływie pionowym z dodatkiem ziarnistego węgla aktywnego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, vol. 1, nr 3, 7-17.
- Wąsik, E. i Chmielowski, K. (2014). Wpływ ułożenia warstwy węgla aktywnego na sprawność usuwania zanieczyszczeń ze ścieków bytowych na pionowych filtrach piaskowo-węglowych. *Nauka Przyroda Technologie*, 8(4/48), 1-11.
- Wąsik, E. i Chmielowski, K. (2017). Ammonia and indicator bacteria removal from domestic sewage in a vertical flow filter filled with plastic material. *Ecological Engineering*, 106, Part A, 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.015>
- Wójcik, W., Mucha, Z., Generowicz, A. (2014). Wybór wariantu usuwania i unieszkodliwiania ścieków z wykorzystaniem analizy decyzyjnej na przykładzie wiejskich jednostek osadniczych. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 13(3), 101-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/2014.13.3.101>

## **Impact of Selected Thicknesses of Vertical Sand Filters on the Quality of Treated Domestic Wastewater**

### **Abstract**

The paper presents the influence of the thickness of the filtration layer in the vertical flow sand filter on the quality of treated domestic wastewater. The thickness of the layers in individual columns was 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm and 90 cm. Studies on the removal efficiency of organic compounds and total suspended solids were carried out in the conditions of increasing hydraulic load within the range from  $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  to  $80 \text{ dm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . It was found that the treatment of domestic sewage in the sand filter with the height of filtration layer of 15 cm, allowed to obtain very low  $\text{BOD}_5$  (on average  $8.7 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ). The efficiency of reducing  $\text{BOD}_5$  in this filter was at the level of 96.4%. In the case of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ , a significant increase in its mean value – from  $54.7 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$  to  $175.9 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$  – was observed with the decreased height of the filter bed. For the thickness of the filtration layer equal to 90 cm, the average removal of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  was

85.5%, whereas the use of 15 cm thick filtration bed allowed for an average reduction of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  by over 53%. The total suspended solids were removed in the range from  $25.7 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  to  $29.6 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  regardless of the height of the filter bed. The mean reduction effectiveness of this indicator was 72.9%.

## **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wpływ miąższości warstwy filtracyjnej w filtrze piaskowym o przepływie pionowym na jakość oczyszczonych ścieków bytowych. Miąższość warstw w poszczególnych kolumnach wyniosła 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm oraz 90 cm. Badania efektywności usuwania związków organicznych oraz zawiesiny ogólnej wykonywano w warunkach zwiększającego się obciążenia hydraulicznego w zakresie od  $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  do  $80 \text{ dm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Stwierdzono, że oczyszczanie ścieków bytowych w filtrze piaskowym o wysokości warstwy filtracyjnej 15 cm pozwoliło na uzyskanie bardzo niskich wartości  $\text{BZT}_5$  (średnio  $8,7 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Skuteczność zmniejszenia  $\text{BZT}_5$  w tym filtrze ukształtowała się na poziomie 96,4%. W przypadku  $\text{ChZT}_{\text{Cr}}$  zauważono wraz ze zmniejszaniem się wysokości złoża filtracyjnego wyraźny wzrost jego średniej wartości od  $54,7 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$  do  $175,9 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ . Dla miąższości warstwy filtracyjnej równej 90 cm średnie usunięcie  $\text{ChZT}_{\text{Cr}}$  wyniosło 85,5%, natomiast zastosowanie złoża o miąższości 15 cm pozwoliło na średnie zmniejszenie  $\text{ChZT}_{\text{Cr}}$  o ponad 53%. Zawiesina ogólna była usuwana w zakresie od  $25,7 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  do  $29,6 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  niezależnie od wysokości złoża filtracyjnego. Średnia skuteczność zmniejszenia tego wskaźnika wyniosła 72,9%.

## **Słowa kluczowe:**

filtr piaskowy o przepływie pionowym, miąższość, ścieki bytowe

## **Keywords:**

vertical sand filter, thickness, domestic wastewater