INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 3/I/2012, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 123–132
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Katarzyna Pawęska, Krzysztof Pulikowski, Maria Strzelczyk, Aleksandra Steinhoff-Wrześniewska

ZMIANY STĘŻEŃ FOSFORU OGÓLNEGO W ODPŁYWACH Z KOLEJNYCH STOPNI ZŁOŻA ROŚLINNO-GRUNTOWEGO

CHANGES IN TOTAL PHOSPHORUS CONCENTRATIONS IN EFFLUENTS FROM FOLLOWING BEDS OF CONSTRUCTED WETLAND

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących zmian stężeń fosforu ogólnego na odpływie z kolejnych złóż gruntowo-roślinnej oczyszczalni w Paszkowie. Analizowano ścieki bytowe wprowadzane na cztery złoża pracujące w technologii *constucted wetland*. Złoża zaprojektowano z poziomym przepływem podpowierzchniowym w konfiguracji mieszanej (szeregowo – równoległej). Ocenie poddano skład ścieków bytowych wprowadzanych na złoża jak również skład fizyko-chemiczny odpływów. Badania prowadzono w okresie VII 2008 – III 2011. Stwierdzono średnią skuteczność pracy obiektu dla fosforu ogólnego na poziomie 40,0 %, przy czym najwyższe roczne efekty pracy obserwowano dla złoża 1. Średnie stężenie fosforu ogólnego w ściekach odprowadzanych do odbiornika wynosiło 4,4 $mgP \cdot dm^{-3}$. Ze względu na warunki jakim powinien odpowiadać odpływ z oczyszczalni dla RLM < 2000, oczyszczalnia spełniała warunki jedynie dla wartości BZT_5 i ChZT. W przypadku zawiesiny przekroczenia dopuszczalnych norm obserwowano przez cały okres badawczy.

Słowa kluczowe: fosfor ogólny, złoże gruntowo-roślinne, efekty oczyszczania\

Summary

The paper presents results of research concerning changes in total phosphorus concentrations from outflow from following beds of constructed wetland in Paszkow. There was analyzed domestic wastewater which was supplied to the four beds made as constructed wetland.

The beds were designed with horizontal subsurface flow in a mixed configuration (serial – parallel). The evaluation assessed the composition of domestic wastewater supplied to the beds and as well as physico-chemical composition of the outflows. The research was conducted during July 2008 – March 2011. It was found that the average treatment efficiency for total phosphorus was at 40,0 %, with the highest annual treatment effects were observed for bed no.1. The average concentration of total phosphorus in the effluent discharged to the receiver was 4,4 mgPdm^{-3}. Due to requirements to be met by the outflows form wastewater treatment plants for P.E < 2000, the wastewater treatment plant meets the conditions only for values of BOD_5 and COD. In the case of the suspension exceeded to the limit values were observed during whole research period.

Key words: *total phosphorus, constructed wetland, treatment effects*

WSTĘP

Oczyszczalnie gruntowo-roślinne to prosty sposób oczyszczania małych ilości ścieków bytowych na terenach pozbawionych centralnej kanalizacji. Budowane są w celu zapewnienia redukcji podstawowych wskaźników zanieczyszczeń organicznych wyrażanych poprzez wartość BZT_5, ChZT oraz ilość zawiesin. Lokalizowane na terenach szczególnie chronionych powinny zapewniać również eliminację związków azotu i fosforu. Ze względu na specyfikę zachodzenia procesów nitryfikacji, denitryfikacji oraz procesów prowadzących do redukcji związków fosforu skuteczność usuwania tych związków na złożach gruntowo-roślinnych może być różna [Pawęska Malczewska 2009].

Związki fosforu mogą zostać zredukowane w środowisku wodno-gruntowym na skutek zachodzenia kilku procesów między innymi: sorpcji, strącania, akumulacji w tkance roślinnej. Jednakże po wyczerpaniu pojemności sorpcyjnej złoża, zdolność redukcji ilości fosforu w danym środowisku obniża się lub może całkowicie zaniknąć. Według Kadlec'a [Kadlec 1994] jedną z najważniejszych ścieżek przemieszczania się fosforu w środowisku roślinno-wodno-gruntowym jest w pierwszej kolejności przemieszczenie się fosforu ze środowiska wodnego do osadu lub pobór bezpośrednio przez makrofity, następnie wbudowanie fosforu w tkanki organizmów. Jednocześnie fosfor może zostać unieruchomiony w materiale gruntowym wykorzystanym jako wypełnienie złoża. Aby środowisko wodno-gruntowe osiągnęło równowagę, a procesy usuwania fosforu ustabilizowały się złoża te potrzebują czasu, który Kadlec [Kadlec 1994] szacuje na dwa lata. Czas ten ulega zmianie w zależności od użytego wypełnienia oraz gatunków roślin porastających powierzchnię złoża.

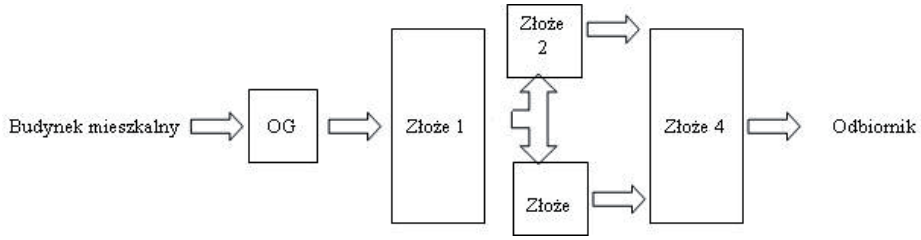
Fosfor ogólny wprowadzany wraz ze ściekami na złoża gruntowo-roślinne jest sumą ortofosforanów, polifosforanów oraz fosforu organicznego. Występuje w postaci rozpuszczonej w formie koloidów i zawiesin. Jego głównym źródłem są przede wszystkim ścieki, dlatego też skuteczna eliminacja związków fosforu powinna się rozpocząć już u źródła jego powstania. Powinno się zadbać również o wysoce sprawne urządzenia redukujące związki biogenne w małych oczyszczalniach ścieków.

Celem pracy było przedstawienie zmian stężeń fosforu ogólnego w gruntowo-roślinnej oczyszczalni ścieków zlokalizowanej w terenie górskim oraz analiza skuteczności usuwania tego pierwiastka na kolejnych złożach wchodzących w skład oczyszczalni

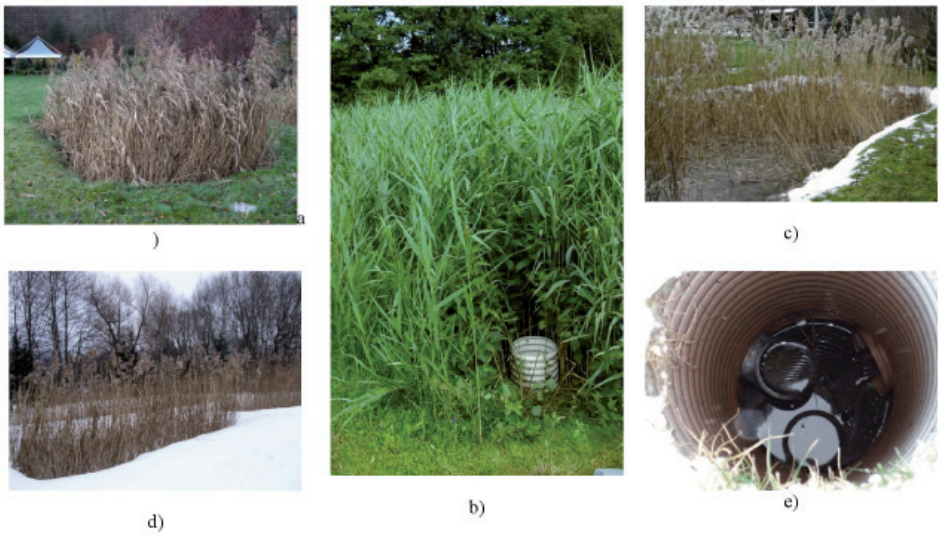
MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Badania prowadzone były na oczyszczalni gruntowo-roślinnej zlokalizowanej w miejscowości Paszków, która przeznaczona jest do II ° oczyszczania ścieków bytowych pochodzących z przyległego ośrodka wypoczynkowego. Ścieki po wstępnym mechanicznym oczyszczeniu w osadniku gnilnym o dobowym przepływie ścieków 11,0 m^3 wprowadzane są kolejno na 4 złoża z podpowierzchniowym poziomym przepływem, o łącznej powierzchni 214,1 m^2. W omawianym rozwiązaniu przyjęto jednostkową powierzchnię złoża równą 9,7 m^2 M^{-1}. Zastosowane wypełnienie to mieszanka żwirowa, oddzielona od gruntu rodzimego geomembraną. Schemat oczyszczalni przedstawiono na rysunku 1. Ścieki bytowe po mechanicznym oczyszczeniu w osadniku gnilnym zaadaptowanym do tego celu z bezodpływowego dołu gnilnego wpływają na pierwsze złoże (fot. 1 b). Powierzchnia złoża jest płaska i obsadzona trzciną. Brzegi uformowano w postaci skarp o wysokości 0,6 m. Pozwala to na piętrzenie ścieków w celu usunięcia niepożądanej roślinności. Ze złoża 1 ścieki kierowane są poprzez studzienkę rozdzielczą (fot. 1 e) na złoża 2 i 3 (fot. 1 a). Ostatnim etapem przed wprowadzeniem ścieków do odbiornika jest złoże 4 (fot. 1 c). Oczyszczalnia gruntowo-roślinna przystosowana jest do oczyszczania ścieków w okresie całego roku. W okresie zimowym trzcina jest wykaszana.

W oczyszczanych ściekach oznaczano podstawowy skład fizykochemiczny w tym związki fosforu wyrażone przez fosfor ogólny w okresie badawczym VII 2008 – III 2011. Próbki ścieków bytowych pobierane były w odstępach miesięcznych na odpływie z osadnika oraz na odpływie z poszczególnych złóż do polietylenowych pojemników o pojemności 1,5 dm^3. Analizy fizykochemiczne przeprowadzono w Wydziałowym Laboratorium Technologii Wody i Ścieków Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu maksymalnie do 3 godzin od pobrania próbki. Fosfor ogólny oznaczano przy użyciu metody Testów Mercka, z wcześniejszą mineralizacją próbki. Następnie wyniki opracowano statystycznie przy użyciu programu STATISTICA firmy StatSoft.



Rysunek 1. Schemat oczyszczalni roślinno-gruntowej w Paszkowie
Figure 1. Scheme of constructed wetlands in Paszkow



Fotografia 1. Złoża gruntowo-roślinne w Paszkowie, widok oraz elementy konstrukcji, a-złoże 2, b- wylot z osadnika na złoże 1, c- złoże 4 widok w zimie, d – eksploatacja w zimie, e – studzienka rozdzielcza [fot. Katarzyna Pawęska]
Phot. 1. Constructed wetlands in Paszkow, view and construction elements, a-bed no.2, b-outflow from settling tank to bed no.1, c-bed no.4, d- winter operating, e-distribution well [phot. Katarzyna Paweska]

WYNIKI BADAŃ

Skład fizykochemiczny ścieków wprowadzanych na złoża (tab. 1) różnił się w poszczególnych latach obserwacji. W latach 2008, 2009 wartość BZT_5 utrzymywała się na stałym poziomie (196,7; 196,2 $mgO_2 \cdot dm^{-3}$), a następnie znacznie się obniżyła (tab. 1). Wartość $ChZT_{Cr}$ wahała się w granicach 537,6 do 617,5 $mgO_2 \cdot dm^{-3}$ w latach 2008, 2010 i 2011. Jedynie w roku 2009 średnia

wartość ChZT była zdecydowanie niższa i wyniosła 318 $mgO_2 \cdot dm^{-3}$. Stężenie fosforu ogólnego w ściekach doprowadzanych na złoże 1 było wysokie (7,6-13,1 $mgP \cdot dm^{-3}$) w porównaniu ze stężeniem tego wskaźnika w typowych ściekach bytowych [Szpindor 1998]. Najwyższe średnie stężenie obserwowano w roku 2010. W przypadku azotu ogólnego w kolejnych latach obserwowano systematyczne zmniejszanie się stężenia tego pierwiastka (od 101,0 do 48,2 $mgN \cdot dm^{-3}$). W przypadku zawiesin wykazano znaczny wzrost ich ilości w ściekach.

Tabela 1. Średni skład ścieków mechanicznie oczyszczonych doprowadzanych na złoża roślinno-gruntowe w okresie badawczym VII 2008 – III 2011
Table 1. The average composition of mechanical treated wastewater supplied on red beds in research period VII 2008 – III 2011

Wskaźnik zanieczyszczenia Pollution index		Lata obserwacji Years of observation			
		2008*	2009	2010	2011*
BZT_5 BOD_5	mgO_2dm^{-3}	196,7	196,2	115,4	53,3
$ChZT_{Cr}$ COD_{Cr}	mgO_2dm^{-3}	565,0	318,4	537,6	617,5
pH	-	6,4-7,5	6,7-7,4	6,7-8,4	7,3-8,1
Fosfor ogólny Total phosphorus	$mgPdm^{-3}$	12,6	11,5	7,6	13,1
Azot ogólny Total nitrogen	$mgNdm^{-3}$	101,0	67,8	52,5	48,2
Zawiesina Suspension solids	$mgdm^{-3}$	128,7	317,7	306,9	396,0

*obserwacje prowadzone do marca 2011 r.

Oczyszczalnię w Paszkowie zaprojektowano jako złoże z przepływem w konfiguracji mieszanej (szeregowo – równoległej) [Steiner, Freeman 1991]. Ścieki przepływają kolejno z osadnika na złoże 1, a następnie ulegają rozdziałowi i zasilają równolegle złoże 2 i 3, w końcowym etapie oczyszczania pełna dawka ścieków wprowadzana jest na powierzchnię złoża 4. Ścieki oczyszczone wprowadzane są do odbiornika, który stanowi przyległy potok. Średnie parametry ścieków wprowadzanych do odbiornika przedstawiono w tabeli 2. Małe oczyszczalnie poniżej 2000 RLM zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [RMŚ 2006] powinny zapewnić redukcję trzech podstawowych parametrów: BZT_5, ChZT oraz zawiesiny, jednakże ze względu na lokalizację oczyszczalni w Paszkowie (tereny górskie, bez centralnej kanalizacji, atrakcyjne krajobrazowo) powinno się w tym przypadku zadbać również o wysoką redukcję ilości związków biogennych. Złoża gruntowo-roślinne w Paszkowie wykazały wysoką skuteczność oczyszczania ścieków wyrażoną w BZT_5. Średnia wartość tego wskaźnika na odpływie wyniosła od 0,5 do 4 $mgO_2 \cdot dm^{-3}$, co oznacza, że

wymagania stawiane tego typu obiektom zostały spełnione (tab. 2). Kolejny tlenowy wskaźnik zanieczyszczeń ChZT w poszczególnych latach badawczych systematycznie obniżał się (tab. 2). W roku 2008 notowano przekroczenia dopuszczalnych stężeń a średnia wartość ChZT wyniosła 171,20 $mgO_2 \cdot dm^{-3}$).

Tabela 2. Charakterystyka ścieków oczyszczonych odpływających z oczyszczalni roślinno-gruntowej (po złożu 4) w okresie badawczym VII 2008 – III 2011
Table 2. Characteristic of treated sewage outflowed from constructed wetland treatment plant (after bed no.4) in research period VII 2008 – III 2011

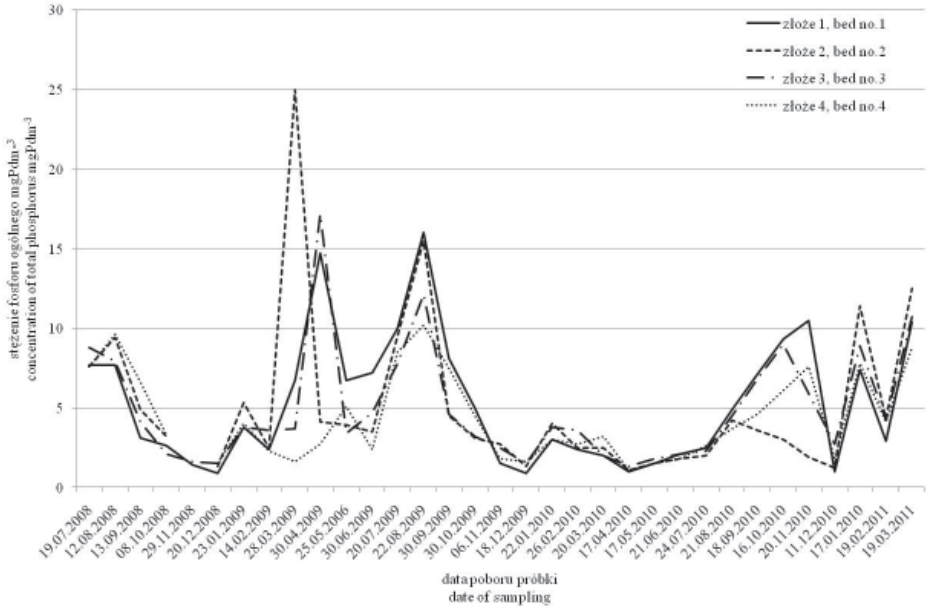
Wielkości charakterystyczne dla okresu badawczego Characteristic parameters for research period	BZT_5 BOD_5	$ChZT_{Cr}$ COD_{Cr}	pH pH	Fosfor ogólny Total phosphorus	Azot ogólny Total nitrogen	Zawiesina Suspension
	mgO_2dm^{-3}	mgO_2dm^{-3}	-	$mgPdm^{-3}$	$mgNdm^{-3}$	$mgdm^{-3}$
Rok 2008, Year 2008						
Średnia, Average	4,00	171,20	6,00-6,40	5,72	33,40	95,20
Min., Min.	0,50	66,00	-	1,50	15,00	20,00
Max., Max.	11,00	280,00	-	9,60	64,00	160,00
Odch.standard., Stand. dev.	3,89	90,05	-	3,28	20,82	61,61
Rok 2009, Year 2009						
Średnia, Average	1,96	85,25	6,10-6,60	4,35	34,58	206,36
Min., Min.	0,50	40,00	-	1,60	14,00	56,00
Max., Max.	9,00	182,00	-	10,20	75,00	492,00
Odch. standard. Stand. dev.	2,69	38,16	-	2,93	17,79	125,53
Rok 2010, Year 2010						
Średnia, Average	2,58	70,69	6,10-7,00	3,65	21,78	100,54
Min., Min.	0,10	31,00	-	1,10	5,00	4,00
Max., Max.	14,00	113,00	-	7,80	35,10	396,00
Odch. standard. Stand.dev.	4,01	24,90	-	2,24	8,47	106,90
Rok 2011, Year 2011						
Średnia , Average	0,50	52,00	6,20-7,00	6,90	32,97	109,33
Min., Min.	0,50	32,00	-	4,10	18,70	64,00
Max., Max.	0,50	72,00	-	8,80	45,10	180,00
Odch. standard. Stand. dev.	0,00	28,28	-	2,48	13,33	62,01

Badania lizymetryczne dotyczące redukcji ładunku zanieczyszczeń organicznych ze ścieków w glebowo-roślinnym systemie oczyszczania wskazują na wysoką, sięgającą 99,6 % w przypadku BZT_5 i 98 % ChZT skuteczność [Strzelczyk 2011]. W przypadku zawiesin oczyszczalnia wykazała niską skuteczność

oczyszczania ścieków (26 %) zwłaszcza w pierwszym roku prowadzenia badań. Z czasem skuteczność systematycznie rosła (35; 67; 72 %).

Gruntowo-roślinne oczyszczalnie ścieków budowane były początkowo w celu zapewnienia redukcji zanieczyszczeń wyrażanych wskaźnikami tlenowymi oraz zawiesin. Redukcja biogenów traktowana było drugoplanowo [Faithful 1996, Kadlec, Wallace 2009].

W większości obserwacji przeprowadzonych w omawianym okresie badawczym stężenie fosforu ogólnego na odpływie z każdego ze złóż kształtowało się podobnie (rys. 2).

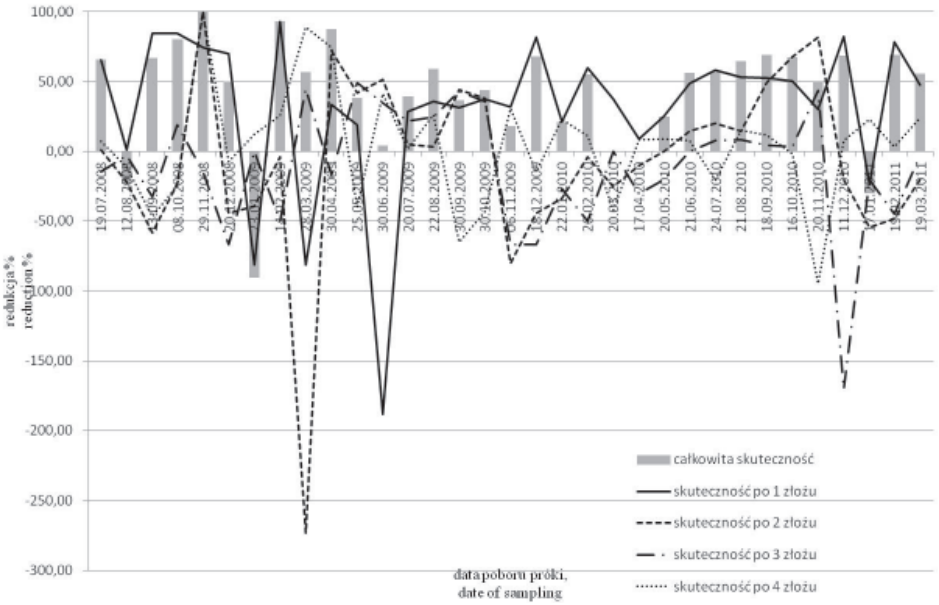


Rysunek 2. Zmiany stężenia fosforu ogólnego w ściekach odpływających z kolejnych złóż roślinno-gruntowych w okresie badawczym VII 2008 – III 2011
Figure 2. Changes in total phosphorus concentration in wastewater outflowing from beds in research period VII 2008 – III 2011

Wartość maksymalną stężenia dla wszystkich przypadków obserwowano dla odpływu ze złoża 2 w marcu 2009 r. Stężenie fosforu ogólnego na odpływie wyniosło wówczas 25,0 $mgPdm^{-3}$. Związki fosforu w oczyszczalniach typu *constructed wetlands* usuwane są najczęściej w procesie fizykochemicznej sorpcji wymiennej oraz w procesach sorpcji chemicznej i strącania. W procesie usuwania związków fosforu w złożach gruntowo-roślinnych biorą udział również rośliny [Vymazal 2010]. Dla obserwowanej oczyszczalni okresy podwyższonego stężenia wskaźnika na odpływie występowały w okresie wiosenno-letnim.

W pracy podjęto próbę określenia poziomów redukcji fosforu ogólnego po każdym złożu, jak również odniesiono ją do całkowitych efektów pracy oczyszczalni na rzecz usunięcia analizowanego wskaźnika.

Na rys. 3 przedstawiono miesięczne zmiany redukcji fosforu. Przez cały okres badawczy na złożu 1 odnotowano najwyższe poziomy redukcji tego biogenu (3,59 do 63,39 %). Najniższą skutecznością charakteryzowało się złoże 2, które spowodowało drastyczny wzrost stężenia fosforu ogólnego w odpływających ściekach.



Rysunek 3. Zmiany redukcji fosforu ogólnego po kolejnych złożach roślinno-gruntowej oczyszczalni w Paszkowie oraz całkowita skuteczność w okresie badawczym VII 2008 – III 2011

Figure 3. Changes in total phosphorus reduction after following beds of constructed wetlands in Paszkow and total treatment efficiency in research period VII 2008 – III 2011

Skuteczność pracy złóż *„constructed wetland*" zależy od wielu czynników, wśród nich wymienić należy rodzaj wypełnienia, jego skład fizykochemiczny i granulację, warunki hydrauliczne przepływu jak również wykorzystane rośliny. Złoża gruntowo–roślinne osiągają wysokie efekty pracy dla zanieczyszczeń: BZT_5, ChZT, zawiesina [Brix Denmark 1998], niestety w przypadku biogenów (związki azotu i fosforu) tego typu oczyszczalnie nie osiągają wysokiej skuteczności [Vymazal 1999].

Dla całego okresu badawczego średnia skuteczność pracy obiektu w odniesieniu do fosforu ogólnego wynosiła około 40 %. Najwyższe poziomy redukcji w latach 2008 – 2011 obserwowano dla złoża 1 (tab. 3). W 2008 roku poziom redukcji fosforu był najwyższy 63,4 %, podczas gdy w kolejnych latach obniżał się.

Tabela 3. Średnie skuteczności oczyszczania fosforu ogólnego w odniesieniu do poszczególnych złóż oraz całkowita skuteczność oczyszczania w okresie badawczym VII 2008 – III 2011wyrażona % redukcji stężenia.

Table 3. Average values of treatment efficiency of total phosphors for following beds and total treatment efficiency in research period VII 2008 – III 2011

Średnie roczne skuteczności oczyszczania [%] Average yearly treatment effciency	Złoże 1 Bed no.1 [%]	Złoże 2 Bed no.2 [%]	Złoże 3 Bed no.3 [%]	Złoże 4 Bed no.4 [%]	Całkowita sprawność Total treatment [%]
2008	63,39	-	-	3,00	56,68
2009	3,59	-	4,50	11,65	37,89
2010	44,04	12,92	-	-	44,42
2011	34,17	-	-	16,94	31,65

-lata z ujemną skutecznością oczyszczania
-years with negative treatment efficiency

WNIOSKI

Na podstawie badań oraz analiz fizykochemicznych można sformułować następujące wnioski:

1. Złoża gruntowo-roślinne w Paszkowie pracowały z wysoką skutecznością dla wskaźników tlenowych takich jak BZT_5 i $ChZT_{Cr}$ i spełniały wymagania przedstawione w Rozporządzeniu Ministra Środowiska dotyczące oczyszczalni o RLM <2000 [Rozporządzenie 2006].
2. Średnia skuteczność redukcji fosforu dla całego okresu badawczego wyniosła 40,0 %
3. Najwyższe poziomy redukcji fosfory ogólnego obserwowano dla złoża 1.
4. Do usuwania ze ścieków związków fosforu można zmniejszyć jednostkową powierzchnię złoża. W przypadku oczyszczalni w Paszkowie, rozdział ścieków na dwa mniejsze złoża (złoże 2 i 3) skutkował pogorszeniem jakości odpływu.

BIBLIOGRAFIA

Faithful J.W. 1996, *The fate of phosphorus in wetlands.* A review, report no. 96/15, Australian Centre for Tropical Freshwater Research: 56

Kadlec R.H. 1994, *Phosphorus uptake in Florida marshes*. *Wat. Sci. Tech.,* 30(8): 225-234

Pawęska K., Malczewska B. 2009*, Nitrogen compounds in drain sewage after constructed wetlands.* Wat. Sci. Techn. 2009, 60.10::2613-2619

Strzelczyk M. 2011, *Wstępne wyniki badań redukcji ładunku zanieczyszczeń w ściekach wiejskich wykorzystywanych do nawadniania roślin energetycznych*. Nauka Przyroda Technologie, 2011, T. 5 z. 4,# 49 http://www.npt.up-poznan.net

Szpindor A. 1998, *Zaopatrzenie w wodę i kanalizacja wsi*. Arkady, Warszawa: 473

Steiner G.R., Freeman R.J.1991, *Configuration and substrate design consideration for constructed wetlands wastewater treatment plants*. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. (Ed. D.A. Hammer) Chelsea. Michigan: Lewis Publisher: 363-377.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 lipca 2006 r. w sprawie warunków jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziem, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz. U. Nr 137, poz. 984

Kadlec R.H. Wallace S.D. 2009, *Treatment wetlands*. Second edition. Taylor & Francis Group..: 1000.

Vymazal J. 2010, *Constructed wetlands for wastewater treatment*. Water 2010, vol. 2: 530-549

Brix H., Denmark W.1998, *Constructed wetlands for Wastewater treatment in Europe* (Eds. J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green, R.Haberl). The Netherlands, Leiden: Backhuys Publishers: 123 – 156.

Vymazal J. 1999, *Nirogen removal in constructed wetland with horizontal subsurface flow – can we determine the key process?* W: Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands (Ed. J. Vymazal). Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers:1-17

Dr inż. Katarzyna Pawęska
email: kpaweska@gmail.com
tel.: 071 3 205 556 email: kpaweska@gmail.com
tel.: 071 3 205 556

Dr hab. inż. Krzysztof Pulikowski prof. nadzw.
Instytut Inżynierii Środowiska
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
email: krzysztof.pulikowski@up.wroc.pl
tel.: 071 3 20 55 31

Instytut Inżynierii Środowiska
Uniwersytet Przyrodniczy
pl. Grunwaldzki 24
50-363 Wrocław

Dr inż. Maria Strzelczyk
e-mail: m.strzelczyk@itep.edu.pl

Dr inż. Aleksandra Steinhoff-Wrześniewska
e-mail: aleksandra.sw@gmail.com
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy,
Dolnośląski Ośrodek Badawczy
ul. Berlinga 7 51-209 Wrocław
tel. 71 367-80-92