

Krzysztof Józwiakowski

**WPLYW WYCINKI ROŚLIN NA SKUTECZNOŚĆ
USUWANIA ZANIECZYSZCZEŃ W OCZYSZCZALNI
HYDROFITOWEJ Z PIONOWYM PRZEPLYWEM**

***THE INFLUENCE OF PLANTS CUTTING
ON EFFICIENCY OF POLLUTIONS REMOVAL
IN A VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM***

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę wyników 4-letnich doświadczeń z eksploatacji hydrofitowej, jednoetapowej, trzcinowej oczyszczalni z pionowym przepływem. Głównym celem badań była analiza skuteczności oczyszczania i ocena jakości odpływających ścieków. Badania wykonywano w latach 2006–2009. Średni dopływ ścieków wynosił $13,9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Coroczna wycinka i usuwanie trzciny ze złóż przyczynia się do wzrostu efektów eliminacji zanieczyszczeń w tej oczyszczalni. Podczas eksploatacji oczyszczalni w latach 2006–2007, kiedy nie usuwano trzciny ze złóż efekty usuwania zawiesin ogólnych, BZT₅, ChZT, azotu amonowego, ogólnego i fosforu ogólnego wynosiły odpowiednio: 78,6%, 76,1%, 81,8%, 15,3%, 23,5% i 57,2%. W okresie badawczym, w którym wycinano i usuwano trzcinę ze złóż (lata 2008–2009) skuteczność usuwania zawiesin ogólnych, BZT₅, ChZT, azotu amonowego, azotu ogólnego i fosforu ogólnego wzrosła i wynosiła odpowiednio: 83,1%, 76,7%, 85,4%, 49,8%, 45,1% i 65,6%. W analizowanym systemie skuteczniejsze usuwanie zanieczyszczeń prawdopodobnie byłoby możliwe po przekształceniu obecnie funkcjonujących jednoetapowych złóż trzcinowych w system czterech, szeregowo ustawionych złóż z naprzemian pionowym i poziomym przepływem ścieków.

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków, oczyszczalnie hydrofitowe, złoża trzcinowe, pionowy przepływ

Summary

The paper presents an analysis of results from four-year operation of a single-stage reed bed constructed wetland system with vertical flow. The main goals of the study were to monitor the treatment efficiency of the system and to assess the quality of the outflow sewage. The study was performed in 2006–2009. Average wastewater flow was $13.9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Yearly cutting and removing of reed from the bed contributed to an increase in pollution removal efficiency in that wastewater treatment plant. During the operation of the system in the period of 2006–2007, when no reed was removed from the beds, the efficiency of removal of total suspended solids, BOD_5 , COD, ammonium nitrogen, total nitrogen and total phosphorus was 78.6%, 76.1%, 81.8%, 15.3%, 23.5% and 57.2%, respectively. During the period studied, when the reed was cut and removed from the beds (2008–2009), the efficiency of removal of total suspended solids, BOD_5 , COD, ammonium nitrogen, total nitrogen and total phosphorus increased and amounted to 83.1%, 76.7%, 85.4%, 49.8%, 45.1% and 65.6%, respectively. In the analysed system, removal of pollution would be probably more efficient after changing the single-stage reed beds functioning at present to four parallel beds with alternately arranged vertical and horizontal sewage flows.

Key words: wastewater treatment; constructed wetland; reed bed; vertical flow

WSTĘP

Pierwsze sztuczne systemy hydrofitowe do oczyszczania ścieków zaczęto stosować w Niemczech w latach 50. XX wieku [Seidel 1955]. Na podstawie wieloletnich doświadczeń Seidel [1965], wprowadziła systemy hydrofitowe z pionowym i poziomym przepływem ścieków, w których zastosowała materiał filtracyjny o wysokiej przewodności hydraulicznej. Inny rodzaj oczyszczalni hydrofitowych zaproponował Kickuth [1969, 1977], który do ich wypełnienia stosował drobnoziarnisty materiał filtracyjny.

Pod koniec XX wieku na świecie zazwyczaj stosowano jednostopniowe systemy hydrofitowe, w których najczęściej wykorzystywano trzcinę *Phragmites australis* [Brix 1994; Haberl i in. 1995; Kowalik, Obarska-Pempkowiak 1998; Vymazal 2005]. Od kilkunastu lat coraz częściej stosuje się wielostopniowe systemy hydrofitowe – tzw. oczyszczalnie hybrydowe, zapewniające większą skuteczność usuwania zanieczyszczeń, a szczególnie związków biogenych [Haberl i in. 1995; Kowalik, Obarska-Pempkowiak 1998; Luederitz i in. 2001; O'Hogain S. 2003; Arias i in. 2003; Vymazal 2005; Krzanowski i in. 2005].

Dotychczasowe doświadczenia w zakresie eksploatacji oczyszczalni hydrofitowych na całym świecie przedstawili w obszernym opracowaniu Vymazal i Kröpfelová [2008]. Wcześniej ich historyczny rozwój, obecny status oraz perspektywy na przyszłość przedstawił w swej pracy Brix [1994]. W Polsce oczyszczalnie hydrofitowe zostały szczegółowo opisane przez Obarską-Pempkowiak [2002].

Oczyszczanie ścieków w sztucznych systemach hydrofitowych zachodzi dzięki wykorzystaniu złożonych procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych zachodzących w podłożu przy udziale makrofitów i mikroorganizmów [Brix, Schierup 1989; Haberl i in 1995; Vymazal 2005]. Według Mæhluma i Stålnacke [1999] głównymi czynnikami, które mają wpływ na skuteczność usuwania zanieczyszczeń w systemach hydrofitowych są temperatura powietrza, pora roku, obciążenia hydrauliczne oraz obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń. Podczas eksploatacji trzcinowych systemów hydrofitowych zazwyczaj nie zaleca się usuwania roślin ze złóż [Cooper 1990], jednak na podstawie badań wykonanych w Szwecji stwierdzono, że około 10% azotu i 20% fosforu jest usuwane z oczyszczalni z biomasą roślinną [Gumbrecht 1993].

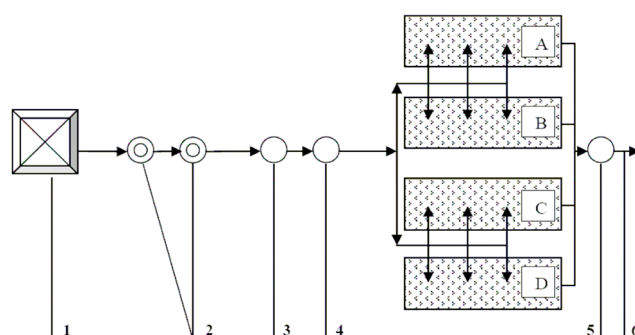
Celem tej pracy jest ocena wpływu wycinki roślin (trzciny) na skuteczność usuwania zanieczyszczeń w hydrofitowej oczyszczalni z pionowym przepływem ścieków.

METODYKA I MATERIAŁY BADAWCZE

Charakterystyka obiektu badawczego. Przedmiotem badań była hydrofitowa (jednostopniowa) oczyszczalnia ścieków z pionowym przepływem z trzciną pospolitą *Phragmites australis* Cav. Trin. Ex Steud. Obiekt ten funkcjonuje od 1995 r. i jest zlokalizowany przy Zespole Szkół Rolniczych w Sobieszynie koło Kocka w woj. lubelskim. Maksymalna przepustowość obiektu wynosi $60 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. W skład badanej oczyszczalni wchodzi: dwukomorowy osadnik wstępny (o pojemności czynnej 75 m^3), pompownia ścieków, studnia rozdzielcza, cztery równoległe złoża z trzciną o łącznej powierzchni 1227 m^2 oraz studzienka zbiorcza (rys. 1).

Złoża zbudowane są z kilku warstw gruntu, jednej warstwy tkaniny i drenów. Warstwę powierzchniową o miąższości 0,2 m stanowi nadkład próchniczny. Podściela go warstwa piasku luźnego o tej samej miąższości. Bezpośrednio pod piaskiem ułożona jest tkanina filtrująca o grubości 1,2 mm. Pod nią zalega 0,3 m warstwa tłuczni dolomitowego o wymiarach odłamków 16–32 mm. Poniżej znajduje się warstwa drenów zbierających ścieki. Średnica każdego drenu wynosi 100 mm. Kolejną najniższą warstwą o miąższości 0,1 m jest piasek, a bezpośrednio pod nim ułożona jest geomembrana PEHD o grubości 1 mm, której zadaniem jest całkowita izolacja złoża od naturalnej gleby. Odbiornikiem ścieków odpływających z obiektu jest przyleśny rów, który odprowadza je do gleby [Łoszak, Podlaszewski 2000].

Metodyka badań. Skuteczność usuwania zanieczyszczeń w omawianej oczyszczalni analizowano w dwóch okresach badawczych: 1) lata 2006–2007 oraz 2) lata 2008–2009. W okresie pierwszym nie wykonywano wycinki trzciny na złożach, natomiast w okresie drugim wycinano i usuwano całą masę trzciny ze złóż. Zabieg ten wykonywano pod koniec okresu zimowego – w marcu.



Rysunek 1. Schemat technologiczny hydrofitowej oczyszczalni ścieków w Sobieszynie: 1 – szkoła, 2 – osadnik wstępny, 3 – pompa dozująca, 4 – studzienka rozdzielcza (dopływ ścieków na złoża), 5 – studzienka zbiorcza (odpływ ścieków ze złożów), 6 – odpływ ścieków do lasu, A, B, C, D – złoża gruntowo-roślinne z trzcina *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. [Łoszak, Podlaszewski 2000]

Figure 1. Technological scheme of constructed wetland system in Sobieszyn: 1 – school, 2 – chamber septic tank, 3 – metering pump, 4 – distribution well (sewage inflow to the beds), 5 – collecting well (sewage outflow from the beds), 6 – sewage outflow to the forest, A, B, C, D – reed beds with *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.

Próby ścieków surowych i oczyszczonych do analiz z badanego obiektu pobierano we wszystkich latach badań 4 razy w roku (w lutym, maju, sierpniu i listopadzie). W sumie wykonano 16 serii analiz, podczas których pobrano 32 próby ścieków. W pobranych próbach oznaczano pH, stężenie tlenu rozpuszczonego i zawartość zawiesin ogólnych oraz określano BZT₅, ChZT_{Cr}, stężenie azotu amonowego i ogólnego oraz fosforu ogólnego. Analizy wykonywano według powszechnie stosowanych metod [Hermanowicz i in. 1999].

Skuteczność usuwania zanieczyszczeń w poszczególnych okresach badawczych obliczano na podstawie średnich wartości wskaźników i składników zanieczyszczeń w dopływie (C_d) i odpływie (C_o) z oczyszczalni: $\eta = (C_d - C_o)/C_d \cdot 100\%$. Skład ścieków odpływających z obiektu porównano z wymaganiami zawartymi w Rozporządzeniu MŚ [2006].

W celu określenia wpływu sposobu eksploatacji hydrofitowej oczyszczalni na skuteczność redukcji analizowanych wskaźników zanieczyszczeń zbadano istotność różnic średnich wartości uzyskanych efektywności przed i po wycince trzciny. W pierwszym etapie zbadano hipotezę zerową o braku podstaw do odrzucenia rozkładu normalnego, którą weryfikowano testem Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Ze względu na fakt, iż analizowane zmienne nie podlegały rozkładowi normalnemu zastosowano nieparametryczny test U Manna-Whitneya, który jest nieparametrycznym odpowiednikiem testu t-Studenta.

Porównywano między sobą efekty usuwania zanieczyszczeń, które uzyskiwano w hydrofitowej oczyszczalni ścieków w Sobieszynie w latach 2006–2007 (w okresie tym nie wycinano trzciny z oczyszczalni) oraz w latach 2008–2009 (w okresie tym wycinano trzcinę z oczyszczalni). Test U Manna – Whitneya weryfikuje hipotezę zerową, że dwie losowo wybrane próby pochodzą z tej samej populacji lub bardziej szczegółowo, z populacji o równych medianach:

$$H : F(x) = G(x) \quad 0$$

$$H : F(x) \neq G(x) \quad 1$$

Weryfikacja hipotezy oparta jest na statystyce określonej wzorem:

$$U = n_1 + n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1$$

gdzie:

n_1, n_2 – liczebności prób 1 i 2,

$F(x), G(x)$ – dystrybuanty rozpatrywanych prób,

R_1 – suma rang przyznanych wartościom pierwszej próby.

WYNIKI BADAŃ

Obciążenie hydrauliczne. W okresie badawczym średnia dobowa ilość ścieków, doprowadzanych do oczyszczalni w poszczególnych miesiącach wahała się od 9,0 do 17,6 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, a średnio wynosiła 13,9 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Najmniejsze ilości ścieków dopływały do obiektu w miesiącach wakacyjnych: lipiec, sierpień. Obciążenie hydrauliczne powierzchni złóż ściekami wahało się od 0,007 do 0,014 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, a średnio wynosiło 0,011 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Według danych amerykańskich [Metcalf and Eddy 1991] zaleca się eksploatację oczyszczalni hydrofitowych przy obciążeniu hydraulicznym nie większym niż 0,015–0,050 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, a według danych duńskich [Brix 1987] 0,020–0,070 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Z kolei Schierup i in. [1990] podali, że w Danii 49 systemów trzcinowych pracowało przy obciążeniu hydraulicznym 0,083 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, natomiast Cooper [1990] opisał funkcjonowanie oczyszczalni w Wielkiej Brytanii przy obciążeniu 0,067–0,100 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

Skład ścieków doprowadzanych do oczyszczalni. Odczyn ścieków dopływających do oczyszczalni wahał się od 7,02–7,55 pH, co wskazuje na ich lekko zasadowy charakter. Stężenie tlenu rozpuszczonego mieściło się w przedziale od 0,18 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ do 2,85 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. W miesiącach chłodniejszych ścieki były lepiej natlenione niż w okresie wegetacyjnym.

Średnie stężenie zawiesiny ogólnej w ściekach dopływających do oczyszczalni w dwóch badanych okresach było podobne i wynosiło odpowiednio: 166 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (lata 2006–2007) i 145 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (lata 2008–2009). Zawartość materii organicznej w ściekach doprowadzanych do badanego obiektu w analizowanych okresach, mierzona za pomocą wskaźników BZT₅ i ChZT wynosiła odpowiednio 202 i 191 $\text{mg} \text{O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ (BZT₅) oraz 376 i 405 $\text{mg} \text{O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ (ChZT) (tab. 1).

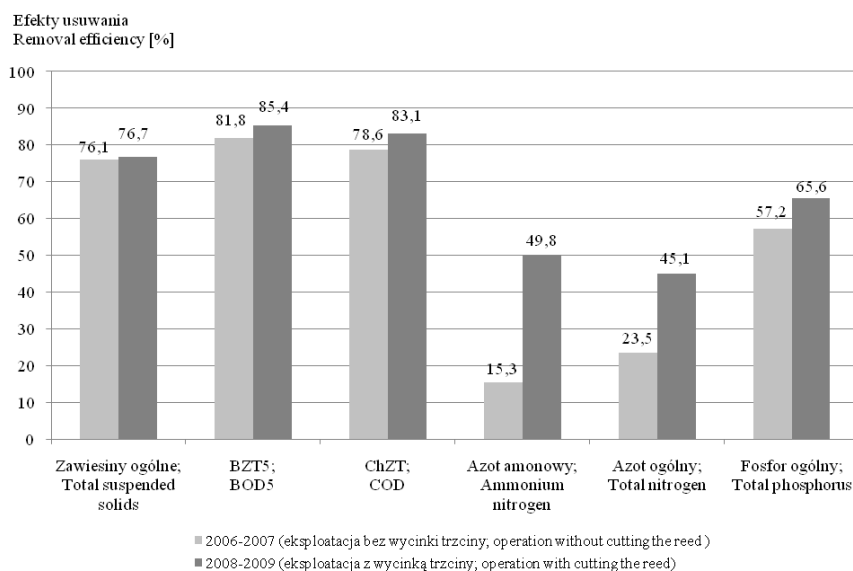
Tabela 1. Skład ścieków oczyszczanych w hydrofitowej oczyszczalni w Sobieszynie w latach 2006–2009
Table 1. Composition of treated sewage in constructed wetland system in Sobieszyn in 2006–2009

Parameters	Lata 2006–2007 Eksploatacja bez wycinki trzciny; Operation without cut out of the reed						Lata 2008–2009 Eksploatacja z wycinką roślin; Operation with cut out of the reed						
	Dopływ Inlet			Odpływ Outlet			Dopływ Inlet			Odpływ Outlet			
	min	max	x	σ	min	max	x	σ	min	max	x	σ	
pH	7,10	7,48	–	0,13	7,30	7,82	–	0,19	7,02	7,43	7,83	–	0,15
tlen rozpuszczony dissolved oxygen [mg O ₂ ·dm ⁻³]	0,25	2,85	0,80	0,84	0,52	8,30	5,61	2,40	0,18	0,65	9,06	6,95	1,49
zawiesiny ogólne total suspended solids [mg·dm ⁻³]	42,4	347	166	111	3,7	90	39,7	34,5	80,7	244	70	33,8	25,9
BZT ₅ BOD ₅ [mg O ₂ ·dm ⁻³]	16,8	395	202	141	6,8	162	36,7	52,7	100,0	248	80	27,9	22,7
ChZT COD _{Cr} [mg O ₂ ·dm ⁻³]	50,0	670	376	205	37,0	230	80,4	62,2	150,0	570	147	68,4	39,0
azot amonowy ammonium nitrogen [mg·dm ⁻³]	15,5	82,0	54,4	28,0	28,2	83,0	46,1	18,3	32,9	79,2	63,5	29,9	20,2
azot ogólny total nitrogen [mg·dm ⁻³]	18,0	135	72,4	40,7	38,0	96	55,4	20,2	41,0	111	80	43,6	22,1
fosfor ogólny total phosphorus [mgP·dm ⁻³]	3,9	70,9	26,6	20,8	4,1	26,0	11,4	6,9	10,9	34,5	17,1	8,4	6,0

min. – wartość minimalna, max – wartość maksymalna, x – wartość średnia, σ – odchylenie standardowe

Średnie stężenie azotu amonowego w oczyszczanych ściekach wynosiło $54,4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ – w okresie pierwszym oraz $59,6 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ – w okresie drugim. Natomiast średnie stężenie azotu ogólnego wynosiło odpowiednio: $72,4$ i $79,5 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Ścieki doprowadzane do oczyszczalni w analizowanych okresach zawierały podobne ilości fosforu: średnio $26,6 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w latach 2006–2007 oraz $24,4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w latach 2008–2009 (tab.1).

Efekty usuwania zanieczyszczeń. Skuteczność usuwania analizowanych parametrów w oczyszczalni w drugim okresie badań (z wycinką trzciny – lata 2008–2009) była większa niż w okresie pierwszym (bez wycinki trzciny – lata 2006–2007) (rys. 2). W pierwszym okresie badań efekty usuwania zawiesin, BZT₅ i ChZT wynosiły odpowiednio: 78,6%, 76,1% i 81,8%, natomiast w drugim okresie: 83,1%, 76,7% i 85,4% (rys. 2).



Rysunek 2. Efekty usuwania zanieczyszczeń w hydrofitowej oczyszczalni ścieków w Sobieszynie

Figure 2. Efficiency of pollutions removal in the constructed wetland system in Sobieszyn

Dla porównania w 268 europejskich oczyszczalniach hydrofitowych z trzcina stwierdzono eliminację BZT₅ i ChZT na poziomie 79,1% i 69,5% [Börner 1992]. Z kolei Haberl i Perfler [1993] podają, że w badanym przez nich systemie trzcinowym z pionowym przepływem w Austrii skuteczność usuwania BZT₅ i ChZT wynosiła 90% i 96%.

Średnie stężenia zawiesin ogólnych, BZT₅, ChZT w ściekach odprowadzanych z oczyszczalni w Sobieszynie zarówno w pierwszym, jak i w drugim okresie badań nie przekraczały wartości dopuszczalnych określonych w Rozporządzeniu MŚ [2006]. W latach 2008–2009 notowano jednak niższe stężenia zawiesin ogólnych i substancji organicznej w ściekach oczyszczonych niż w latach 2006–2007 (tab.1).

Uzyskane wyniki wskazują, że jednostopniowa oczyszczalnia trzcinowa w Sobieszynie w pierwszym okresie badań, w którym nie wycinano trzciny (lata 2006–2007) nie zapewniała zbyt wysokiej skuteczności usuwania związków biogenych. W okresie tym średnie efekty eliminacji azotu amonowego, ogólnego i fosforu wynosiły odpowiednio 15,3%, 23,5% i 57,2% (rys. 2). W okresie badawczym, w którym wycinano i zbierano trzcinę ze złóż (lata 2008–2009) skuteczność usuwania związków biogenych znacznie wzrosła. Azot amonowy, ogólny i fosfor były usuwane ze skutecznością 49,8%, 45,1% i 65,6% (rys. 2).

Średnie efekty usuwania azotu ogólnego w badanej oczyszczalni (45,1%) w latach 2008–2009, podczas których wycinano trzcinę były większe od uzyskiwanych w 268 oczyszczalniach hydrofitowych w Europie – 39,6% [Börner 1992] oraz od tych, które uzyskali Perfler i Haberl [1993] w systemie trzcinowym z pionowym przepływem w Austrii (36%).

Również średnia skuteczność usuwania fosforu w badanym obiekcie (65,6%) w latach, w których wycinano trzcinę była większa od tej, którą uzyskiwano w 268 oczyszczalniach hydrofitowych w Europie – 47,1% oraz od uzyskanych w Austrii – 63% Haberl i Perfler [1993].

Tabela 2. Test U Manna Whitneya względem zmiennej: efektywność. Porównanie wyników efektywności usuwania zanieczyszczeń w hydrofitowej oczyszczalni przed i po wycince trzciny. Zaznaczone wyniki są istotne z $p < 0,5000$

Table 2. Mann Whitney U test for variable: efficiency. Comparison of results of the effectiveness of removing pollutants in constructed wetland system before and after reed cutting. Selected results are significant at $p < 0.05000$

Parametry/ Parameters	U	poziom p / level p
Zawiesiny ogólne / Total suspended solids	30,00000	0,833635
BZT ₅ / BOD ₅	30,00000	0,833635
ChZT / COD	22,00000	0,293622
azot amonowy / ammonium nitrogen	8,00000	0,011719
azot ogólny / total nitrogen	15,00000	0,074204
fosfor ogólny / total phosphorus	18,50000	0,156255

Z analizy statystycznej przeprowadzonej przy zastosowaniu testu nieparametrycznego U Manna-Whitneya wynika (tab. 2), że jedynie w przypadku azotu amonowego wycinka trzciny w istotny sposób przyczyniła się do zwiększenia efektywności redukcji tego wskaźnika w badanej oczyszczalni w Sobieszynie.

Na granicy istotności jest azot ogólny i w przypadku tego parametru z pewną ostrożnością można stwierdzić, że wycinka trzciny mogła w pewnym stopniu poprawić efektywność usuwania tego wskaźnika. W przypadku pozostałych parametrów różnice w wynikach obu prób (eksploatacja oczyszczalni bez wycinki i z wycinką trzciny) mają charakter losowy i wskazują, że wycinka trzciny nie odegrała istotnej roli w zwiększeniu skuteczności usuwania zanieczyszczeń w analizowanej oczyszczalni.

Według Börnera [1992], Haberla i in. [1995], Johansena i Brix [1996], Luederitza i in. [2001] usuwanie azotu ogólnego w jednostopniowych oczyszczalniach trzcinowych jest stosunkowo niewielkie, gdyż obiekty te zapewniają jedynie nitrifikację, brakuje w nich natomiast strefy denitryfikacji. Aby osiągnąć zarówno nitrifikację, jak i denitryfikację Haberl i in. [1995] proponują stosowanie wielostopniowych systemów hydrofitowych, składających się z dwóch lub trzech złóż z pionowym lub poziomym przepływem ścieków. Natomiast skuteczność usuwania fosforu w systemach hydrofitowych można zwiększyć przez odpowiedni dobór materiału filtracyjnego, np. piasku z dużą zawartością żelaza [Netter 1992; Brix i in. 2001].

WNIOSKI

1. Podczas eksploatacji oczyszczalni w latach 2006–2007, kiedy nie usuwano trzciny ze złóż efekty usuwania zawiesin ogólnych, BZT₅, ChZT, azotu amonowego, ogólnego i fosforu ogólnego wynosiły odpowiednio: 78,6%, 76,1%, 81,8%, 15,3%, 23,5% i 57,2%.

2. W okresie badawczym, w którym wycinano i zbierano trzcinę ze złóż (lata 2008–2009) skuteczność usuwania zawiesin ogólnych, BZT₅, ChZT, azotu amonowego, ogólnego i fosforu ogólnego wzrosła i wynosiła odpowiednio: 83,1%, 76,7%, 85,4%, 49,8%, 45,1% i 65,6%.

3. Z analizy statystycznej przeprowadzonej przy zastosowaniu testu U Manna-Whitneya wynika, że jedynie w przypadku azotu amonowego wycinka trzciny w istotny sposób przyczyniła się do zwiększenia efektywności redukcji tego wskaźnika.

4. W analizowanej oczyszczalni jeszcze większą skuteczność usuwania zanieczyszczeń można by było uzyskać po przekształceniu obecnie funkcjonujących jednoetapowych złóż trzcinowych w system czterech, szeregowo ustawionych złóż z naprzemian pionowym i poziomym przepływem ścieków.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N523 3495 33

BIBLIOGRAFIA

- Arias C.A., Brix H. and Johansen N.H. *Phosphorus removal from municipal wastewater in an experimental two-stage vertical flow constructed wetland system equipped with a calcite filter*. IWA Publishing, Water Science & Technology, Vol. 48, no 5, 2003. s. 51–58.
- Börner T. *Einflußfaktoren für die Leistungsfähigkeit von Pflanzenkläranlagen*. Schriftenreihe WAR, TH Darmstadt, 1992. 58 ss.
- Brix H., *Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives*. Water Science Technology, vol. 30, no.8: 1994. 209–223.
- Brix H. *Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants – the root – zone method*. Water Science Technology. vol. 19: 1987, s. 107–118.
- Brix H., Arias C.A. and del. Bubba M. *Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands*. Water Science and Technology, Vol 44, No 11–12, 2001, s. 47–54.
- Brix H., Schierup H. H. *The use of macrophytes in water pollution control*. Ambio 18, 1989, s. 100–107.
- Cooper P.F. *European design and operations guidelines for reed bed treatment systems*. Prepared by the EC/EWPCA Emergent Hydrophyte Treatment Systems Expert Contact Group, Revision, 1990. pp. 27.
- Gumbrecht T. *Nutrient removal capacity in submersed macrophyte pond systems in temperate climate*. Ecol. Eng., 2: 1993, s. 49–61.
- Perfler R., Haberl R. *Actual experiences with the use of reed bed systems for wastewater treatment in single households*. Wat. Sci&Tech. 28 (10), 1993. 141–148.
- Haberl R., Perfler R., Mayer H. *Constructed wetlands in Europe*. Water Science & Technology. vol. 32. No. 3, 1995, s. 305–315.
- Hermanowicz W., Dojlido W., Dożańska W., Kozirowski B., Zerbe J. *Fizykochemiczne badanie wody i ścieków*. Arkady. Warszawa, 1999, s. 556 ss.
- Johansen N. H., Brix H. *Design criteria for a two-stage constructed wetland*. Proceedings of 5th International conference on wetland system for water pollution control. Universitaet fuer Bandenkultur Wien and International Association on Water Quality, Vienna, IX 1996, s. 3–7.
- Kickuth, R. *Höhere Wasserpflanzen und Gewässerreinigung*. Schriftenreihe der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz EV-VDG 19, 1969, s. 3–14.
- Kickuth, R., *Degradation and incorporation of nutrients from rural wastewaters by plant rhizosphere under limnic conditions*. [in] Utilization of Manure by Land Spreading. Comm. Europ. Commun., EUR 5672e, London, UK, 1977, s. 335–343.
- Kowalik P., Obarska-Pempkowiak H. *Polish experience, with sewage purification in constructed wetlands*. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe, ed. J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green & R. Haberl, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 1998, s. 217–225.
- Krzanowski S., Jucherski A., Wałęga A. *Wpływ pory roku na niezawodność technologiczną wielostopniowej, gruntowo-roślinnej przydomowej oczyszczalni ścieków*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich Nr 1/2005, PAN Oddział w Krakowie, s. 2005, s. 37–55.
- Luederitz V., Eckert E., Lange-Weber M., Lange A., Gersberg R. M. *Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands*. Ecological Engineering, no 18, 2001, s. 157–171.
- Łoszak J., Podlaszewski Z. *Operat wodnoprawny na eksploatację mechaniczno-biologicznej (trzciniowej) oczyszczalni ścieków i odprowadzanie oczyszczonych ścieków za pośrednictwem rowu śródleśnego do gruntu*. Opracowanie wykonane na zlecenie Zespołu Szkół Rolniczych Sobieszynie. Lublin 2000.

- Mæhlum, T., Stålnacke P. *Removal efficiency of three cold-climate constructed wetlands treating domestic wastewater: effects of temperature, seasons, loading rates and input concentrations*. Water Sci. Technol. 40 (3), 1999, s. 273–281.
- Metcalf and Eddy *Wastewater Engineering – Treatment, Disposal, Reuse*. Third Edition McGraw-Hill, Inc., New York. 1991, ss.1825.
- Netter R. *The purification efficiency of planted soil filters for wastewater treatment*. Wat. Sci. Tech. 26 (10–12), 1992, s. 2317–2320.
- O’Hogain S. *The design, operation and performance of a municipal hybrid reed bed treatment system*. Water Sci. Technol. 48 (5), 2003, s. 119–126.
- Obarska-Pempkowiak H. *Oczyszczalnie hydrofitowe*. Politechnika Gdańska, 2002, ss. 214.
- Rozporządzenie MŚ z dnia 24 lipca 2006 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 nr 137, poz. 984.
- Schierup H. H., Brix H., Lorenzen B. *Wastewater treatment in constructed reed beds in Denmark – state of the art*. [in:] *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. Adv. Wat. Pollut. Control, No. 11, Cooper P.F. and Findlater B.C (eds.). Pergamon Press, Oxford: 1990, s. 495–504.
- Seidel K., *Die Flechtbinse Scirpus lacustris*. [in:] *Ökologie, Morphologie und Entwicklung, ihre Stellung bei den Volkern und ihre wirtschaftliche Bedeutung*. Schweizerbartische Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany, 1955, s. 37–52.
- Seidel K. *Neue Wege zur Grundwasseranreicherung in Krefeld*, vol. II. Hydrobotanische Reinigungsmethode. GWF Wasser/ Abwasser, 1965, s. 831–833.
- Vymazal J. *Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment*. Ecological Engineering, Vol. 25, Issue 5, 2005, s. 478–490.
- Vymazal J. Kröpfelová L. *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*. Environmental pollution 14. 2008, p. 556.

Dr Krzysztof Józwiakowski
Laboratorium Analitiky Wód i Ścieków
Katedra Melioracji i Budownictwa Rolniczego
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
tel. +48 81 524 81 23, e-mail: kylo71@tlen.pl

Recenzent: Prof. dr hab. Stanisław Węglarczyk