

Efektywność usuwania zanieczyszczeń w filtrach hydrofitowych z sekwencyjnym pionowym i poziomym przepływem ścieków

Agnieszka Tuszyńska, Hanna Obarska-Pempkowiak

Politechnika Gdańska

Matthias Worst

Wasserwirtschaftsamt Hof, Deutschland

1. Wstęp

W latach dziewięćdziesiątych w Polsce powstało kilkadziesiąt obiektów hydrofitowych w postaci złóż z poziomym przepływem ścieków, zwanych w literaturze angielskiej jako „horizontal flow constructed wetlands” (HF-CW). Obiekty te są wykorzystywane przede wszystkim w II a niekiedy w III stopniu oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych. Są one budowane jako systemy przyzagrodowe albo obiekty lokalne o wielkości od 5 do 2000 M (mieszkańców). Wiele z tych obiektów nie pracowało prawidłowo. Główną przyczyną była niewłaściwa eksploatacja osadników gnilnych. Brak odpowiednich połączeń pomiędzy ich komorami powodował przedostawanie się tłuszczów bądź zawiesin do złóż hydrofitowych. Dopływ tych zanieczyszczeń był przyczyną zmniejszenia przewodności hydraulicznej tych obiektów. Powodowało to niekiedy zmianę ich charakteru z obiektów z podpowierzchniowym przepływem ścieków na obiekty z powierzchniowym przepływem, dla których obowiązują inne zasady projektowania i eksploatacji.

Ocenia się, że zaledwie 10% obiektów pracujących w świecie stanowią złoża hydrofitowe z pionowym przepływem ścieków zwane w literaturze angielskiej jako „vertical flow constructed wetland” (VF-CW). Ich zastosowanie ciągle wzrasta, ponieważ posiadają one dużą zdolność do zapewnienia dobrej jakości odpływu (szczególnie, gdy należy przeprowadzić utlenianie amoniaku).

Dotychczas przeprowadzone badania pilotowe w instalacjach doświadczalnych m.in. w Danii, Anglii i Polsce [1,3,5,9] wykazały, że taki system jest bardzo skuteczny w usuwaniu zanieczyszczeń ze ścieków odprowadzanych z domków jednorodzinnych w porównaniu z obiektami wielostopniowymi.

W przypadku obiektów hydrofitowych projektowanych w warunkach lokalnych, na terenach o umiarkowanym klimacie, kiedy wymagane jest spełnienie dopuszczalnych stężeń związków biogenych, rozważa się stosowanie układów złożonych ze złożeń z przepływem podpowierzchniowym pionowym i poziomym (tzw. obiektów hybrydowych). W razie potrzeby układy te można rozbudowywać o dodatkowe urządzenia doczyszczające. Obecnie wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje systemów hybrydowych w zależności od tego, czy złożo HF-CW, czy też VF-CW znajduje się na początku biologicznego oczyszczania.

Zainteresowanie systemami hybrydowymi wzrasta od kilku lat. W systemach hybrydowych złoża typu HF-CW zapewniają wysoką skuteczność usuwania substancji organicznej, zawiesiny ogólnej oraz mogą tworzyć dogodne warunki do denitryfikacji. Natomiast w złożach typu VF-CW tworzą się dogodne warunki do nityfikacji, a ich bardziej efektywne natlenienie powoduje również bardzo skuteczne usuwanie substancji organicznej wyrażonej w BZT₅ i ChZT_{Cr}. W rezultacie w systemach hybrydowych można połączyć zalety obiektów HF-CW i VF-CW, dzięki czemu można uzyskać niższe stężenia substancji organicznej wyrażonej w BZT, całkowitą nityfikację oraz częściową denitryfikację, a co za tym idzie dużo niższe stężenie azotu ogólnego [1].

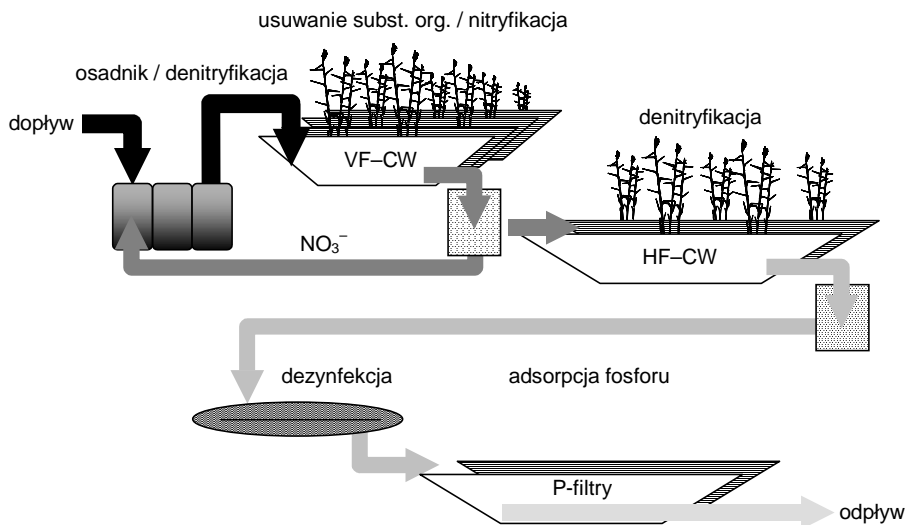
W Polsce dotychczas stosowano wyłącznie konfigurację zaproponowaną przez Johansena i Brixę [4] ze złożem HF-CW ustawionym na początku biologicznego oczyszczania. Charakterystyka funkcjonowania tych obiektów została opracowana przez Obarską-Pempkowiak i Gajewską [5]. W porównaniu z obiektami jednostopniowymi wydajność usuwania zanieczyszczeń była wyższa i wynosiła dla BZT₅ od 59,2% do 92,3%, średnio 86,7% w zakresie obciążeń 21 kg/ha·d do 123 kg/ha·d. Obiekty hybrydowe charakteryzowały się wyższą i bardziej stabilną zdolnością do usuwania azotu. Średni ładunek usuwanego azotu wynosił 7,8 kg/ha·d.

Jednak wstępne wyniki badań prowadzonych w Europie wskazują, iż wersja ze złożem VF-CW jest bardziej efektywna, ze względu na wyższą skuteczność usuwania związków azotu oraz brak kolmatacji złoża HF-CW w czasie. Niestety w Polsce brak jest takich rozwiązań. Z tego powodu dzięki współpracy z Urzędem Gospodarki Wodnej w Hof wykorzystano wyniki pomiarów uzyskane w czasie 3 letniej eksploatacji w takim obiekcie znajdującym się w Wiedersbergu w Saksonii w Niemczech.

2. Obiekt i metody badań

2.1. Charakterystyka obiektu

Obiekt badań stanowiła oczyszczalnia w Wiedersbergu w Saksonii w Niemczech zasilana ściekami bytowo-gospodarczymi pochodzącymi od 145 mieszkańców. Schemat stosowanych urządzeń przedstawiono na rysunku 1. Ścieki po mechanicznym oczyszczeniu w trójkomorowym osadniku wstępnym są oczyszczane w złożach hydrofitowych usytuowanych w kolejności: złożo VF-CW i HF-CW o powierzchniach jednostkowych wynoszących odpowiednio: $3,2 \text{ m}^2/\text{M}$ i $3,75 \text{ m}^2/\text{M}$. Złożo VF-CW zostało podzielone na 4 kwatery podczas gdy złożo HF-CW ma dwie kwatery. Ścieki odprowadzane ze złoża VF-CW są kilkakrotnie w ciągu doby zawracane do jednej z komór osadnika wstępnego w celu zapewnienia warunków dla procesu denitryfikacji. Złoża HF-CW i VF-CW zostały zasiedlone trzcina pospolitą (*Phragmites australis*) wiosną 1998 r.



Rys. 1. Schemat oczyszczalni ścieków w Wiedersbergu
Fig. 1. A scheme of wastewater treatment plant in Wiedersberg

Odbiornikiem oczyszczonych ścieków jest zbiornik retencyjny, na którym usytuowane jest ujęcie wody pitnej. Z tego powodu oczyszczone ścieki muszą spełniać bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące wartości stężeń związków azotu oraz powinny być bezpieczne pod względem sanitarnym. Dopuszczalne wartości stężeń na odpływie stanowiące podstawę projektowania podano w tabeli 1. Zostały one przyjęte na podstawie rozporządzenia UE na poziomie dopuszczalnych stężeń obowiązujących dla wody kąpieliskowej [8].

Tabela 1. Dopuszczalne wartości stężeń i ładunków zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych przyjęto na podstawie rozporządzenia EU obowiązującego dla wody kąpieliskowej

Table 1. Admissible values of concentrations and loads of contaminants in treated wastewater according to EU regulation concerning water at the bathing places

Parametr	Stężenie mg/dm ³	Ładunek g/d
BZT ₅	20	580
ChZT	90	2610
Nnieorg (w temp. >12°C)	18	522
N-NH ₄ ⁺ (w temp. >12°C)	10	290
P _{og}	1 lub 2*	58
Bakterie coli w 100 cm ³ wody	10 ⁴ /100 cm ³	
Bakterie <i>Escherichia-coli</i> w 100 cm ³ wody	2 × 10 ³ /100 cm ³	

*) poza sezonem

Charakterystykę kolejnych obiektów i urządzeń stosowanych w oczyszczalni w Wiedersbergu podano w tabeli 2.

Dodatkowo oczyszczone ścieki poddawane są dezynfekcji promieniami UV w komorze zbierającej oraz defosfatacji w złożu z wypełnieniem zapewniającym adsorpcję związków fosforu. Oczyszczone ścieki przed odprowadzeniem do odbiornika ulegają renaturalizacji w dwóch stawach o pojemności 10 m³ każdy, skąd dopływają do rzeki Droda, na której usytuowany jest wspomniany zbiornik retencyjny.

Oczyszczalnia w Wiedersbergu została zaprojektowana przez Rustige i Platzer [8]. Wymiarowanie złóż VF-CW i HF-CW zostało przeprowadzone wg wytycznych do projektowania sformułowanych przez Platzer [7]. Złoże VF-CW zostało obliczone na podstawie możliwości zaopatrzenia złoża w tlen. W tym celu założono dopływ ładunku substancji organicznej wyrażonej w ChZT wynoszący 25 g O₂/m²d oraz powierzchnię jednostkową złoża wynoszącą 3,2 m²/M. Na podstawie przyjętych założeń powinno występować 30% usuwanie substancji organicznej (w odniesieniu do doprowadzonego ładunku ChZT). W opisanych warunkach przeprowadzenie procesu nityfikacji azotu będzie wymagało doprowadzenia 90 g O₂/Md.

Tlen do złoża VF-CW będzie dopływał wskutek procesu dyfuzji i konwekcji. Przy założeniu czasu 15 godzin, w których dopływ powietrza odbywa się wskutek dyfuzji teoretycznie jego ilość będzie wynosiła 15 g O₂/m²d lub 36 g O₂/m²d podczas 3 lub 4 krotnego zasilania złoża. Oznacza to również, że 45 g O₂/Md będzie dopływać dzięki konwekcji.

Tabela 2. Charakterystyka kolejnych obiektów i urządzeń zastosowanych w oczyszczalni w Wiedersbergu [8]

Table 2. Characteristics of subsequent objects and facilities applied in the wastewater treatment plant in Wiedersberg [8]

Obiekt/urządzenia	L. kwater/ obj. lub pow.	Obciążenie hydrauliczne	Czas zatrzymania	Znaczenie w ciągu technologicznym oczyszczalni
Osadnik wstępny	$1 \times 55 \text{ m}^3$		> 1d	oczyszczanie wstępne, denitryfikacja
VF-CW	$4 \times 116 \text{ m}^2$	63–97 mm/d (3–4 razy/d)	1,4–2,2 d	usuwanie substancji organicznej, nityfikacja, denitryfikacja
HF-CW	$2 \times 270 \text{ m}^2$	21–34 mm/d	3,3–5,4 d	denitryfikacja, zatrzymanie mikroorganizmów w złożu
Promieniowanie UV	Lampa (36 VA)	<1,1 m ³ /h	> 10 s	dezynfekcja
Filtry do usuwania związków fosforu	$2 \times 10 \text{ m}^3$	280–460 mm/d	0,3–0,5 d	adsorpcja związków fosforu

Przy założeniu, że stężenie tlenu w powietrzu wynosi 300 mg O₂/dm³ i jednostkowa objętość ścieków wynosi 150 dm³/Md zaprojektowana powierzchnia złoża jest wystarczająca.

W przypadku minimalnego obciążenia hydraulicznego wynoszącego 22 mm/d, dopływ ścieków powinien wynosić 22 m³/d. Podczas pogody bezdeszczowej i założonym dopływie ścieków (11,3 m³/d) należy zastosować 94% recyrkulację ścieków na dopływie, aby utrzymać optymalne dostarczenie tlenu do złoża.

Przyjęto założenie za Platzerem [7], że ładunek azotu usuwany w złożu HF-CW wynosi 0,65 g N/m²d dla ładunku doprowadzonego wynoszącego 1 g N/m²d. Dostępna powierzchnia filtru wynosi 3,75 m²/M. Zatem może zostać usunięty ładunek azotu o wielkości wynoszącej 2,4 g N/Md. Oznacza to, że dopływający ładunek azotu wynoszący 7,8 g N/Md ze złoża VF-CW może zostać usunięty w złożu HF-CW do wartości 5,4 g N/Md. W rezultacie stężenie azotu na odpływie wynosić będzie 36 mg N/dm³. Dlatego należy zastosować

recyrkulację, aby uzyskać końcowe stężenie wynoszące 18 mg N/dm³ w odpływie lub końcowy ładunek wynoszący 3,6 g N/Md. Usunięcie 1 g N/Md wymaga zastosowania minimalnej recyrkulacji wynoszącej 10%. Bez recyrkulacji stężenie azotu na odpływie z filtra VF-CW wyniesie 70 mg N/dm³. Natomiast zastosowanie 50% pozwala oczekiwać wzrost denitryfikacji o 25% [7]. Przy takich założeniach po złożu HF-CW można będzie uzyskać oczekiwane końcowe stężenie azotu wynoszące 18 mg/dm³.

Adsorpcja fosforu jest realizowana w dwóch dodatkowych kwaterach złóż typu HF-CW o powierzchni wynoszącej 40 m² każda. Złoże wypełniono piaskiem z domieszką żelaza (III). Wysokość wypełnienia wynosi 0,5 m, co oznacza, że objętość wypełnienia w każdej kwaterze wynosi 20 m³. Aby obniżyć stężenie fosforu na odpływie do wartości 1 mg P/dm³, założono, że wypełnienie w filtrze adsorpcyjnym będzie obciążone fosforem na poziomie 400÷1500 g P/m³. Obliczono, że czas eksploatacji wypełnienia wynosić będzie od 230 do 600 dni. W tabeli 3 podano charakterystykę materiałów stosowanych do wypełnienia złóż.

Tabela 3. Charakterystyka materiałów stosowanych do wypełnienia złóż [8]

Table 3. Characteristics of materials applied as beds' filling [8]

Złoże	Domieszka Fe (mg/kg)	Domieszka Al (mg/kg)	Średnica uziarnienia „d”	
			frakcja 10 mm	frakcja 60 mm
VF-CW 1 i HF-CW 1	85	53	0,21	0,86
VF-CW 2 i HF-CW 2	731	170	0,24	0,82
VF-CW 3	964	403	0,26	1,22
VF-CW 4	741	307	0,41	3,34
Filtr P1 i P2	20600	742	0,58	1,2

2.2. Zakres badań

Uśrednione próbki ścieków pobierano z częstotliwością dwa razy w miesiącu od stycznia 2000 do listopada 2003 na dopływie i odpływie z oczyszczalni oraz po kolejnych stopniach oczyszczania. Uzyskane wyniki pomiarów zostały opracowane dla okresu wegetacyjnego: od kwietnia do października i poza wegetacyjnego od listopada do marca.

Średnia temperatura powietrza w okresie wegetacyjnym dla 3 lat badań wynosiła 13,5°C podczas gdy w okresie poza wegetacyjnym była niższa i wynosiła 3,1°C.

W ściekach przepływających przez kolejne złoża wykonywano pomiary stężenia zawiesiny ogólnej, BZT₅ i ChZT_{Cr}, N_{og}, NH₄⁺, NO₃⁻, P_{og}. Określenie stężenia związków azotu wymagało wykonania oznaczeń azotu występującego w formie organicznej oraz w formach nieorganicznych: N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻ na podstawie norm obowiązujących w Niemczech [2]. Dodatkowo wykonywano pomiary temperatury dla ścieków po kolejnych stopniach oczyszczania.

Skuteczność usuwania analizowanych zanieczyszczeń obliczono jako iloraz różnicy stężeń na dopływie (C_d) i odpływie (C_o) po kolejnych elementach oczyszczalni hydrofitowej do stężenia na dopływie (C_d), $\eta = (C_d - C_o) / C_d$. Ładunki doprowadzanych (Ł_d) i odprowadzanych (Ł_o) zanieczyszczeń obliczono jako iloraz odpowiednich stężeń (C_d i C_o) i przepływu ścieków (Q).

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Ilość i jakość ścieków

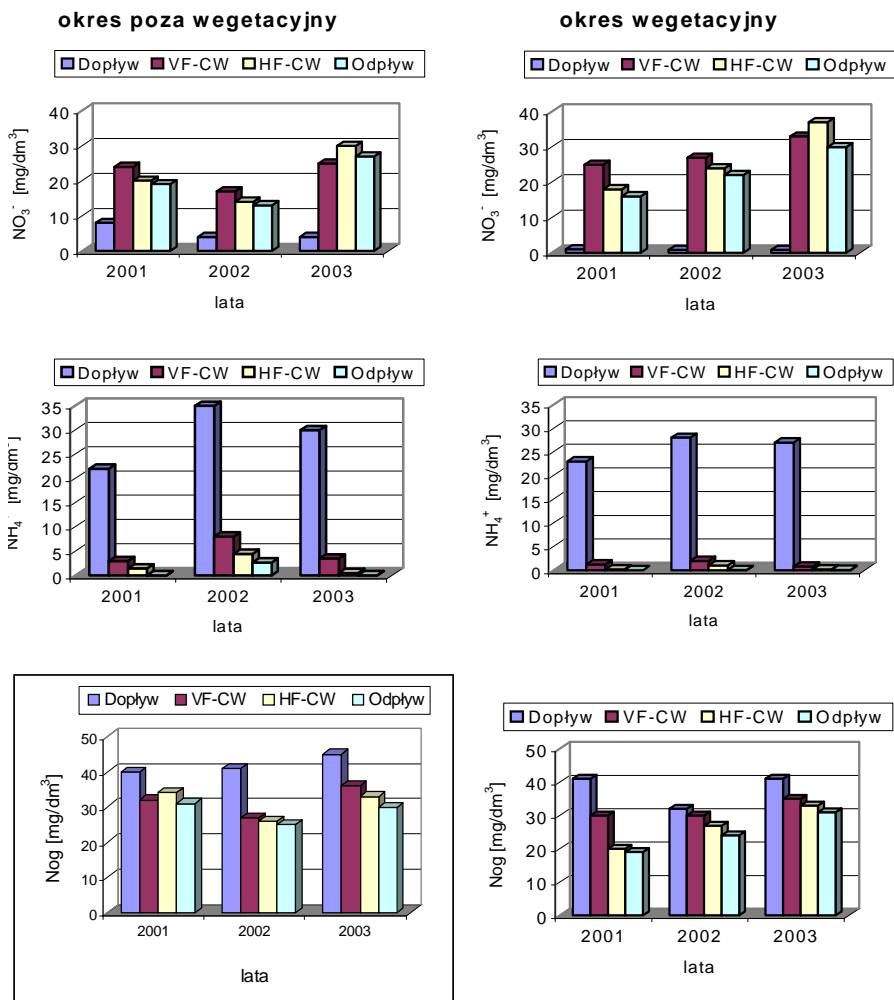
Obciążenie hydrauliczne

Do oczyszczalni dopływa znacznie więcej ścieków niż jak przewidywano w projekcie. Przeciętny średni dopływ ścieków wynosił od 26 do 28 m³/d. Zaledwie kilka razy dopływ ścieków był niższy i wynosił 19 m³/d. W okresie wegetacyjnym obciążenie hydrauliczne złóż ściekami było wyższe i wynosiło 28 m³/d w porównaniu do okresu poza wegetacyjnego (25,6 m³/d). Dopływ większej ilości ścieków był spowodowany nielegalnym przyłączeniem kilku gospodarstw do kanalizacji.

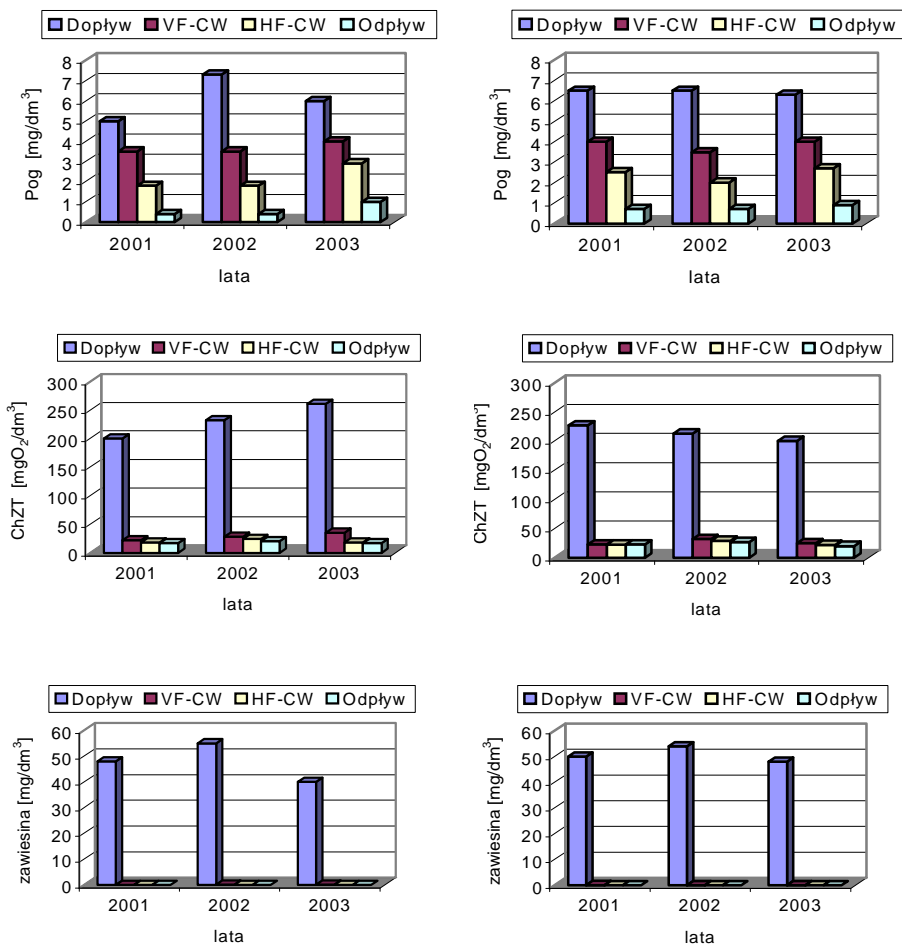
Substancja organiczna i zawiesina

Wyniki pomiarów średnich wartości stężeń analizowanych zanieczyszczeń w kolejnych latach przedstawiono na rysunku 2.

Średnie stężenia analizowanych zanieczyszczeń w ściekach doprowadzanych do oczyszczalni hydrofitowej w okresie wegetacyjnym były niższe niż w okresie poza wegetacyjnym. Dla okresu wegetacyjnego średnie stężenia substancji organicznej wyrażonej w ChZT wynosiło: 227 mg O₂/dm³ – w roku 2001, 213 mg O₂/dm³ – w roku 2002, 200 mg O₂/dm³ – w roku 2003 zaś dla okresu poza wegetacyjnego odpowiednio: 200 mg/dm³ – w roku 2001, 232 mg O₂/dm³ – w roku 2002, 261 mg O₂/dm³ – w roku 2003.



Rys. 2. Średnie wartości stężeń wybranych zanieczyszczeń w latach 2001÷2003
Fig. 2. The average concentrations of selected contaminants in the years 2001÷2003



Rys. 2. cd. Średnie wartości stężeń wybranych zanieczyszczeń w latach 2001÷2003
Fig. 2. cont. The average concentrations of selected contaminants in the years 2001÷2003

Średnie stężenia zawiesiny ogólnej w ściekach dopływających i oczyszczonych w obu okresach pomiarowych były podobne i wynosiły odpowiednio około 50 i 0,003 mg O₂/dm³ w roku 2001, 54 i 0,001 mg O₂/dm³ – w roku 2002, 48 i 0,004 mg O₂/dm³ – w roku 2003 zaś dla okresu poza wegetacyjnego odpowiednio: 48 i 0,008 mg/dm³ – w roku 2001, 55 i 0,004 mg O₂/dm³ – w roku 2002, 41 i 0,009 mg O₂/dm³ – w roku 2003r. Średnie stężenie zawiesiny w ściekach oczyszczonych po złożu VF-CW wynosiła 0,1 mg/dm³, co odpowiada około 90% efektywności jej usuwania w złożu pionowym.

Przeciętnie obciążenie substancją organiczną wyrażoną w ChZT złoża VF-CW wynosiło od 22 g/m²d (od 6 do 46 g/m²d). Stanowi to 88% przewidywanej projektowanej wartości. Wartość ta odpowiada szacowanej ilości mieszkańców = 145 przyłączonych do systemu kanalizacji. Średnia wartość ilorazu BZT₅/ChZT dopływających ściekach wynosiła 0,51.

Średnie stężenie substancji organicznej wyrażonej w ChZT na odpływie z oczyszczalni wynosiła 18,5 mg/dm³ i było niższe od wartości dopuszczalnej. Również średnia wartość stężenia zawiesiny ogólnej w ściekach wynosząca 0,007 mg/dm³ była poniżej wartości dopuszczalnych obowiązujących dla wód kąpieliskowych w Niemczech.

Stężenie związków azotu i fosforu

Średnie obciążenie złoża VF – CW azotem w analizowanym okresie wynosiło 3,5 (1,9– 6,6) g N/m²d, podczas gdy dla złoża HF-CW wynosiło 1,4 (0,8–2,7) g N/m²d. Średni iloraz C/N dla tego złoża wynosił 0,25 (0,1–0,6) i C/N_{Kjeldahla} = 0,66 (0,2–2,5). W tych warunkach średnie stężenie azotu amonowego w ściekach oczyszczonych w kolejnych latach wynosiło: 0,04 mg/dm³ – w roku 2001; 1,0 mg/dm³ – w roku 2002; 0,06 mg/dm³ – w roku 2003 i było poniżej wartości dopuszczalnych.

Średnie stężenie azotanów (III) w odpływie ze złoża typu VF-CW w okresie wegetacyjnym wynosiło 25 mg/dm³, podczas gdy w okresie poza wegetacyjnym ulegało niewielkiemu obniżeniu o około 10% i średnio wynosiło 22 mg/dm³. W sezonie letnim ścieki charakteryzowały się wyższą temperaturą, co prawdopodobnie powodowało niższą rozpuszczalność tlenu. Średnia temperatura powietrza w okresie wegetacyjnym wynosiła 13,5°C podczas gdy w okresie poza wegetacyjnym tylko 3,1°C. Uzyskane rezultaty potwierdzają rezultaty potwierdzają obserwacje, że wydajność procesu nityfikacji jest uwarunkowana temperaturą. Wysoka efektywność utleniania azotu amonowego do azotanów (III) w złożu pionowym w okresie wegetacyjnym wynosząca ponad 90% świadczy o dobrym natlenieniu złoża i dostatecznej ilości tlenu w filtrze hydrofitowym. Niższa efektywność nityfikacji w okresie poza wegetacyjnym była prawdopodobnie uwarunkowana temperaturą.

Większe stężenie azotanów (III) w ściekach dopływających do złoża pionowego po osadniku wstępnym w okresie poza wegetacyjnym wynikała z recyrkulacji większej ilości ścieków.

Wartość dopuszczalną dla fosforu ogólnego wynoszącą 1 mg/dm³ obowiązująca w sezonie letnim i 2 mg/dm³ obowiązująca w sezonie zimowym uzyskano dopiero po oczyszczeniu ścieków na specjalnych filtrach z wypełnieniem z domieszką żelaza. W okresie poza wegetacyjnym wartość stężenia fosforu osiągała wartość dopuszczalną i była nieco wyższa (1 mg/dm³) w porównaniu z stężeniem na odpływie w okresie wegetacyjnym.

3.2. Skuteczność usuwania analizowanych zanieczyszczeń

Skuteczność usuwania substancji organicznej wyrażonej w ChZT oraz zawiesiny ogólnej i związków azotu i fosforu dla okresu wegetacyjnego i poza wegetacyjnego przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Skuteczność usuwania substancji organicznej oraz związków azotu i fosforu po kolejnych stopniach oczyszczania w Wiedersbergu, w %

Table 4. The efficiency of organic matter and nutrients removal after subsequent stages of treatment in Wiedersberg

Okres poza wegetacyjny, 2001						
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nog	ChZT	P _{og}	Zawiesina ogólna
Po VF-CW	86,4	76,6	20,5	89,9	30	99,8
Po HF-CW	60,1	–	–	18,2	28,5	3,1
Po filtrach P	96,6	–	8,8	5,5	60	–

Okres wegetacyjny, 2001						
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nog	ChZT	P _{og}	Zawiesina ogólna
VF-CW	94,7	96,1	26,8	89,9	23,1	97,2
HF-CW	83,3	–	33,3	2	37,5	2,4
Po filtrach P	80,1	–	5,1	–	72,3	–

Okres poza wegetacyjny, 2002						
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nog	ChZT	P _{og}	Zawiesina ogólna
VF-CW	77,1	76,4	34,5	87,9	52,1	98,3
HF-CW	43,7	–	3,7	14,2	48,5	5,3
Po filtrach P	40,2	–	3,5	16,6	77,7	–

Tabela 4. cd. Skuteczność usuwania substancji organicznej oraz związków azotu i fosforu po kolejnych stopniach oczyszczania w Wiedersbergu, w %

Table 4. cont. The efficiency of organic matter and nutrients removal after subsequent stages of treatment in Wiedersberg

Okres wegetacyjny, 2002						
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nog	ChZT	P _{og}	Zawiesina ogólna
VF-CW	92,8	97,1	6,2	84,9	46,1	97,8
HF-CW	46,5	–	10,5	9,3	42,8	4,1
Po filtrach P	95,3	–	11,1	6,9	65,0	–

Okres poza wegetacyjny, 2003						
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nog	ChZT	P _{og}	Zawiesina ogólna
VF-CW	88,3	84,3	20	86,6	33,3	98,1
HF-CW	85,7	–	8,3	48,5	27,5	5
Po filtrach P	88,1	–	9,1	5,5	65,5	–

Okres wegetacyjny, 2003						
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nog	ChZT	P _{og}	Zawiesina ogólna
VF-CW	97,0	97,6	14,6	87,5	36,5	98,5
HF-CW	75,1	–	5,7	12,2	32,5	4,4
Po filtrach P	69,8	–	6,1	9,1	66,7	–

Z najwyższą skutecznością była usuwana zawiesina ogólna i substancja organiczna w złożu VF-CW. Zawiesina ogólna była usuwana ze średnią skutecznością wynoszącą 97,8% w sezonie wegetacyjnym (od 97,2 do 99,8%). Natomiast średnia skuteczność usuwania substancji organicznej wyrażonej w ChZT w złożu VF-CW wynosiła w sezonie poza wegetacyjnym 88,1% (od 86,6 do 89,9%), zaś w sezonie wegetacyjnym była minimalnie niższa i wynosiła 87,1% (84,9÷89,9%).

Złoże VF-CW zapewniało skuteczne usuwanie azotu amonowego wynoszące średnio w sezonie wegetacyjnym 94,8% (92,8÷97,0%), w okresie poza wegetacyjnym zdolność złoża wyraźnie się obniżała, średnio do 83,9% (77,1÷88,3%). Natomiast skuteczność usuwania azotu ogólnego była niższa w sezonie letnim wynosiła 15,8% (6,2÷26,8%) podczas gdy poza sezonem była wyższa i wynosiła 28,3 (20,0÷34,5%). Było to spowodowane recyrkulacją ścieków stosowaną w tym okresie. W roku 2001 złożo HF-CW zapewniało skuteczne usuwanie azotu ogólnego wynoszące średnio w sezonie wegetacyjnym

33,3%. Niestety w kolejnych latach znacznie się obniżyło, co było spowodowane częściową kolmatacją złoża i powstawaniem uprzywilejowanych dróg przepływu. Analizowany obiekt był najbardziej skuteczny w usuwaniu N_{og} w roku 2001. Średnia skuteczność usuwania azotu ogólnego wynosiła 0,6 g N/m²d. Porównując uzyskany wynik ze zdolnością złożów hydrofitowych stosowanych w kombinacji HF-CW i VF-CW w Polsce i Danii wynoszącą około 7 g N/Md, że proponowane rozwiązanie nie zapewnia usuwania azotu ogólnego.

Złoże VF-CW i HF-CW miały wpływ na usuwanie związków fosforu średnio w roku 2001: 26,1% i 33,0%, w roku 2002 było wyższe i wynosiło: 49,1 i 45,5 podczas gdy w roku 2003 ulegało obniżeniu do 34,9% i 30,0%. Skuteczne usuwanie fosforu zapewniał dodatkowo zastosowany filtr adsorpcyjny, w którym usuwanie związków fosforu średnio było najwyższe w roku 2002 i wynosiło 77,7% zaś w roku 2003 ulegało obniżeniu do wartości 65,5%.

4. Wnioski

1. Przeprowadzono analizę efektywności usuwania zanieczyszczeń w filtrach hydrofitowych z sekwencyjnym pionowym i poziomym przepływem ścieków w okresie trzech lat eksploatacji.
2. Dominującą rolę w usunięciu substancji organicznej miał filtr VF-CW, którego średnia skuteczność wynosiła 98,0%.
3. Usuwanie związków fosforu następowało ze średnią skutecznością 36,5% w złożu VF-CW oraz z 32,9% w złożu HF-CW. Zastosowany dodatkowo filtr adsorpcyjny usuwał pozostałe związki do poziomu poniżej 1 mg/dm³.
4. Złoże VF-CW zapewniało skuteczną nityfikację związków azotu wynoszącą średnio w sezonie poza wegetacyjnym: 81,1% oraz w sezonie wegetacyjnym: 93,9%.
5. Proces denityfikacji w złożu HF-CW przebiegał efektywnie tylko w roku 2001 i wydajność tego procesu wynosiła jedynie około 0,5 g N/Md (poniżej założeń projektowych). W dalszych latach eksploatacji nastąpiła kolmatacja złoża spowodowana nadmiernym obciążeniem obiektu spowodowana nielegalnymi zrzutami ścieków.

Literatura

1. **Cooper P.:** *Sizing vertical flow and hybrid constructed wetland systems*. Ed. [V. Dias & J. Vymazal] 1st International Seminar on “The use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands”, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisbona, Portugalia 2003.
2. Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser-, Schlammuntersuchung. Handbuch tGewA EA 4.1.5, Jan. 2002. Betriebsanweisung, Gefahrstoffhandbuch der Bayer. Staatsbauverwaltung, April 1992.
3. **Johansen N.H., Brix M., Arias C.A.:** *Design and characterization of compact constructed wetland system, removing BOD, nitrogen and phosphorus from single household sewage*. Proceedings of “8th International Conference on Wetland System for Water Pollution Control”. Arusha, Tanzania 2002, Chapter 1:47÷61. 2002.
4. **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” Univ. für Bandenkultur Vien and IAWQ, Vienna 1996, IX:3÷7. 1996.
5. **Mierzejewski M.:** *Efektywność usuwania zanieczyszczeń na złożach trzcinowych o przepływie pionowym*. W: Materiały Międzynarodowego Seminarium nt. „Oczyszczanie ścieków z wykorzystaniem roślin”. Fundacja Wspomagania Wsi, Cedynia k. Kielc, 1999:105÷117. 1999.
6. **Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M.:** *Recent development in wastewater treatment in constructed wetlands in Poland*. Kluwer Academic Publisher B-V, The Netherlands (in press).
7. **Platzer Chr.:** *Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitryfication*. In: Proceedings – “6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control”. 1998, Univ. of Estadual Paulista, São Pedro, Brazil 1998.
8. **Rustige H., Platzer Chr.:** *Nutrient removal in subsurface flow constructed wetlands for application in sensitive regions*. In: Proceedings of “7th International Conference on Wetland System for Water Pollution Control”. Univ. of Florida, Lake Buena Vista, Florida 2000:309÷316. 2000.
9. **Soroko M.:** *Skuteczność usuwania substancji organicznej oraz związków biogenych w kilku oczyszczalniach hydrofitowych*. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 1(1):173÷186. 2001.

Efficiency of Contaminants Removal on Hydrophyte Beds with Sequential Vertical and Horizontal Wastewater Flow

Abstract

For the recent years hybrid hydrophyte systems are becoming more and more popular. In the hybrid systems HF-CW (horizontal flow constructed wetland) beds assure high efficiency of organic matter and total suspension removal as well as they may create suitable conditions for denitrification. However in the VF-CW (vertical flow constructed wetland) create suitable conditions for nitrification, and their more efficient aeration causes also very effective removal of organic substance represented by BOD₅ and COD_{Cr}. As a result hybrid system joins advantages of HF-CW and VF-CW objects, what allows to gain lower concentrations of organic substances represented by BOD, total nitrification as well as partial denitrification, which means much lower concentration of total nitrogen [1].

The object of investigations was the constructed wetland in Wiedersberg in Saxonia in Germany supplied with domestic sewage from 145 inhabitants. Wastewater after mechanical treatment in three compartment primary settling tank is then treated on hydrophyte beds situated in the following combination: VF-CW bed and HF-CW bed with unit area accordingly: 3.2 m²/M and 3.75 m²/M. VF-CW bed is divided into 4 compartments while HF-CW bed has two compartments. Wastewater piped off from VF-CW bed are several times during a day recirculated to one of the compartments of the primary settling tank in order to assure proper conditions for the denitrification process. HF-CW and VF-CW beds were settled with reed (*Phragmites australis*) in the spring 1998. This is one of the new solutions, because up to now configuration with vertical bed situated at the beginning of the biological part of treatment plant was applied.

The evaluation of object performance was carried out basing on results of concentrations of organic matter, suspended solids and nutrients in the inflow and in the outflow as well as after subsequent stages of treatment. Evaluation period started in 2001 and lasted to 2003. It was proved that dominant role in removal of organic substances, equal to 98.0%, had vertical flow filter. The removal of phosphorus took place in horizontal flow constructed wetland with efficiency 36.5%, in vertical flow bed with efficiency 32.9%. Additionally applied adsorption filter removed the rest of phosphorus compounds below 1 mg/dm³.

Horizontal flow bed secured efficient nitrification of ammonia nitrogen, on average 81.1% during vegetation season and 93.9% during non-vegetation season. The efficient denitrification took place only in 2001 year in horizontal flow constructed wetland with efficiency equal to 0.5 g N/day (below project assumptions). In the further time of exploitation colmotation of filling material occurred due to excess load of contaminants due to illegal discharge of sewage from individual farms.