

Wpływ natlenienia złóż hydrofitowych na efektywność usuwania zanieczyszczeń

*Agnieszka Tuszyńska, Hanna Obarska-Pempkowiak
Politechnika Gdańska*

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania hybrydowymi systemami hydrofitowymi. Systemy te budowane są zwykle z kilku złóż o zmiennym przepływie ścieków. W Polsce dotychczas stosowano jedynie konfigurację zaproponowaną przez Brixę i Ariasa (2005) ze złożem z poziomym przepływem ścieków (w jęz. ang. *Horizontal Flow Constructed Welland, HF-CW*) ustawionym na początku biologicznego oczyszczania. Natomiast w Niemczech i Wielkiej Brytanii popularne są również rozwiązania ze złożem z pionowym przepływem ścieków (w jęz. ang. *Vertical Flow Constructed Welland, VF-CW*) na początku procesu biologicznego oczyszczania (Luckner i in., 1998; Mueller i Lutzner, 1999; Plazer i Mauch, 1997; Winter i Goetz, 2004). Udokumentowano, że najbardziej efektywne i stabilne w czasie usuwanie zanieczyszczeń dla obiektów lokalnych obsługujących od 50 do 100 mieszkańców jest możliwe jedynie w Hybrydowych Systemach Hydrofitowych (HSH). Dotychczas wykazano, że złoża trzcinowe typu HF-CW zapewniają dogodne warunki do rozkładu substancji organicznej oraz denitryfikacji. Natomiast złoża VF-CW, dzięki korzystnym warunkom tlenowym wynikającym z pulsacyjnego doprowadzania ścieków, zapewniają nityfikację oraz bardzo wydajną mineralizację substancji organicznej (Felde i Kunst, 1996; Obarska-Pempkowiak i Gajewska, 2003a i 2003b). HSH łączą zalety złóż z pionowym i poziomym przepływem. Dzięki zmiennym warunkom tlenowym zapewniają znacznie lepsze efekty oczyszczania z powierzchni jednostkowej w porównaniu ze złożami jednostopniowymi (Kayser i in., 2001; Cooper, 2004). Skuteczność usuwania substancji organicznej oraz zawiesiny ogólnej w złożach typu HF-CW w obiektach badanych przez Vymazal'a i in. (1998), Brix'a i in. (1998), zmieniała się odpowiednio dla zawiesiny ogólnej od 72,0 do

95,5%, dla BZT₅ od 71,2 do 94,1% oraz dla ChZT od 59,7 do 89,0%. Wg Kottrup'a (1999) skuteczność usuwania substancji organicznej wyrażonej w ChZT w złożach VF-CW zasilanych ściekami bytowymi z częstotliwością 3-12 razy na dobę była wysoka i wynosiła 90,0%. Dla porównania dla podobnych obiektów zasilanych ściekami bytowymi w Belgii Vandaele i in. (1999) uzyskali skuteczność 98,3% dla BZT₅ i 89,1% dla ChZT.

Wielu autorów, m.in. Langergraber (2003), Mueller i Lutzner (1999), Plazer i Mauch (1997), Winter i Goetz (2004) w swoich badaniach wykazało, że blokowanie przestrzeni gazowych w materiale filtracyjnym wskutek dopływu zawiesiny powodowało ograniczenie dopływu tlenu do filtrów gruntowych. Wg Luckner'a i in. (1998) niedostateczne zaopatrzenie złoża w tlen, może spowodować, że pewien ładunek substancji organicznej w złożu nie będzie ulegał biodegradacji, co z kolei jest przyczyną jej akumulacji w wolnych przestrzeniach materiału filtracyjnego. W konsekwencji postępujący proces akumulacji substancji organicznej może doprowadzić do obniżenia efektywności usuwania zanieczyszczeń ze ścieków. Wg Boerner'a i in. (1998) skuteczność usuwania zanieczyszczeń w skolmatowanym złożu hydrofitowym ulegała obniżeniu o 35,0% dla ChZT oraz o 46,0% dla BZT₅ w odniesieniu do początkowych wartości.

W pracy wykazano, że nie tylko obciążenie, ale również jakość substancji organicznej ma wpływ na szybkość jej rozkładu w złożach trzciniowych i może powodować jej akumulację, co z kolei powoduje obniżenie efektywności usuwania zanieczyszczeń.

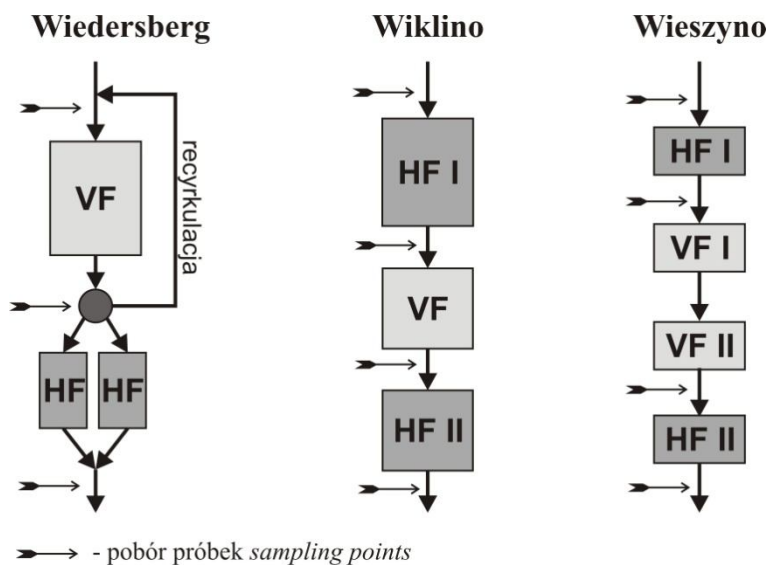
2. Obiekty i metodyka badań

Obiekty badań

Na rysunku 1 przedstawiono schematy HSH, w których realizowano badania. Obiekty zlokalizowane w Wiklinie i Wieszynie charakteryzowały się konfiguracją ze złożem HF-CW na początku biologicznego oczyszczania, podczas gdy w obiekcie w Wiedersbergu zastosowano na początku złożę VF-CW. W tabeli 1 podano charakterystykę analizowanych systemów.

Obiekty były zunifikowane w odniesieniu do materiału filtracyjnego, ich głębokości oraz czasu eksploatacji. Różniły się natomiast obciążeniem hydraulicznym i ładunkiem substancji organicznej doprowadzanej ze ściekami bytowymi. Obiekt w Wieszynie charakteryzował się wysokim obciążeniem zarówno złoża HF-CW jak i VF-CW wynoszącym odpowiednio: 40 i 80 mm/d. Natomiast w Wiklinie obciążenie złoża były prawie dwukrotnie niższe.





Rys. 1. Przepływ ścieków oraz stosowane konfiguracje złożeń trzcinowych w analizowanych obiektach

Fig. 1. Sewage flow and configurations of the analysed HS beds

Tabela 1. Charakterystyka analizowanych obiektów

Table 1. Characteristics of the investigated facilities

Obiekt	Czas eksploatacji	Konfiguracja	Obciążenie [m ³ /d]	Powierzchnia [m ²]	Głębokość [m]	Wypełnienie	
						Materiał	Średnica d ₁₀ i d ₆₀ , mm
Wiklino/ Polska	7 lat	HF I	18,6	1050	0,6	piasek gruboziar.	0,41 i 1,17
		VF		624	0,4		0,34 i 1,17
		HF II		540	0,6		0,36 i 1,11
Wieszyno/ Polska	6 lat	HF I	24,5	600	0,6	piasek gruboziar.	0,33 i 1,40
		VF		300	0,6		0,30 i 1,27
		HF II		600	0,6		-
Wiedersberg/ Niemcy	7 lat	VF*	22,1	464	0,8	piasek gruboziar.	0,36 i 1,12
		HF		540	0,7		0,40 i 1,35

*) recyrkulacja ścieków



Zakres badań

Badania prowadzono w okresie dwóch lat. Próbkę ścieków pobierano raz w miesiącu. Jakość substancji organicznej obecnej w ściekach określono na podstawie pomiarów stężeń substancji organicznej wyrażonej w ChZT i BZT₅. Specjację substancji organicznej wykonywano w celu określenia udziału i rodzaju rozpuszczonych związków organicznych biologicznie rozkładalnych (S_S) i nierozkładalnych (S_I) oraz zawiesin organicznych biologicznie rozkładalnych (X_S) i nierozkładalnych (X_I), zgodnie z metodyką podaną w niemieckich wytycznych ATV-131 (1995).

Zdolność substancji organicznej do mikrobiologicznego rozkładu określono na podstawie stałej szybkości biodegradacji ścieków (k), wg równania 1.1:

$$k = - \ln[(L_o - BZT_t)/L_o]/t, \quad (1/d) \quad (1.1)$$

gdzie:

- L_o – stężenie BZT po stabilizacji substancji organicznej w ściekach, mg O₂/dm³,
- BZT_t – aktualne stężenie BZT w czasie t, mg O₂/dm³,
- t – czas, d.

Stopień dyspersji ścieków określono na podstawie ilorazu frakcji rozkładalnych biologicznie w postaci zawiesiny (X_S) i substancji rozpuszczonej (S_S): (X_S/S_S).

W celu określenia zdolności materiału filtracyjnego do natlenienia wykonywano pomiary współczynnika dyfuzji tlenu (D_g) w gruncie. Pomiary współczynnika D_g przeprowadzono w niezależnych doświadczeniach, przy użyciu specjalnie do tego celu zbudowanego zestawu pomiarowego (rysunek 2).

W skład zestawu wchodziła komora, w której wykonywano pomiary stężenia tlenu w czasie. Wartość współczynnika D_g wyznaczono z równania 1.2:

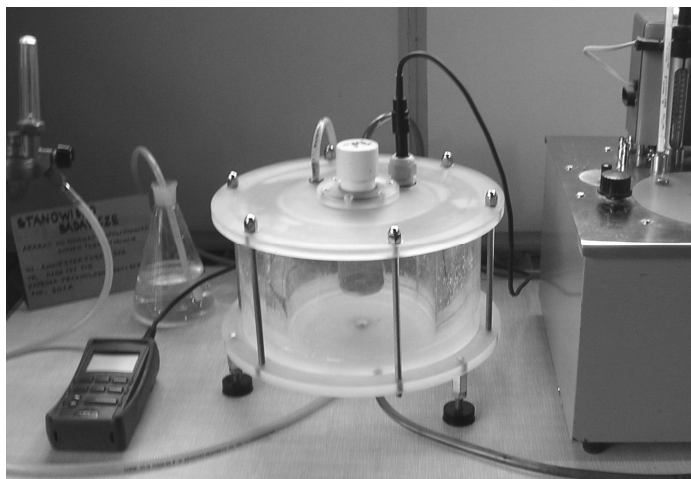
$$D_g = \frac{\ln \{(C_p - C_o)/(C_p - C_t)\}}{s_A \cdot t}, (cm^2 / s), \quad (1.2)$$

gdzie:

- D_g – współczynnik dyfuzji tlenu w fazie gazowej gruntu, cm²/s,
- C_k – stężenie tlenu w komorze pomiarowej, mg O₂/cm³,
- C_p – stężenie tlenu w powietrzu atmosferycznym, mg O₂/cm³,



- C_0 – stężenie tlenu w komorze pomiarowej w czasie $t = 0$, mg/cm^3 ,
 C_t – stężenie tlenu w komorze pomiarowej po czasie t , mg/cm^3 ,
 t – czas, d,
 $S_A = S/h$,
 V – stała aparaturowa, $1/\text{cm}^2$,
 S – powierzchnia próbki gruntu, cm^2 ,
 h – wysokość próbki gruntu, cm,
 V – objętość komory pomiarowej, cm^3 .



Rys. 2. Zestaw do pomiaru współczynnika dyfuzji tlenu
Fig. 2. Set for measurement of oxygen diffusion coefficient

3. Wyniki badań i dyskusja

Obciążenie złóż oraz jakość substancji organicznej obecnej w ściekach

Najwyższym obciążeniem substancją organiczną złóż zarówno HF-CW i VF-CW charakteryzował się obiekt w Wieszynie (tabela 2). Obciążenie ładunkiem substancji organicznej i zawiesiny ogólnej pierwszego złoża HF-CW w Wiklinie było dwukrotnie niższe w porównaniu z Wieszynem i wynosiło odpowiednio: $9,0 \text{ gO}_2/\text{m}^2\text{d}$ dla BZT₅, $14,7 \text{ gO}_2/\text{m}^2\text{d}$ dla ChZT oraz $9,1 \text{ g}/\text{m}^2\text{d}$ dla zawiesiny ogólnej.

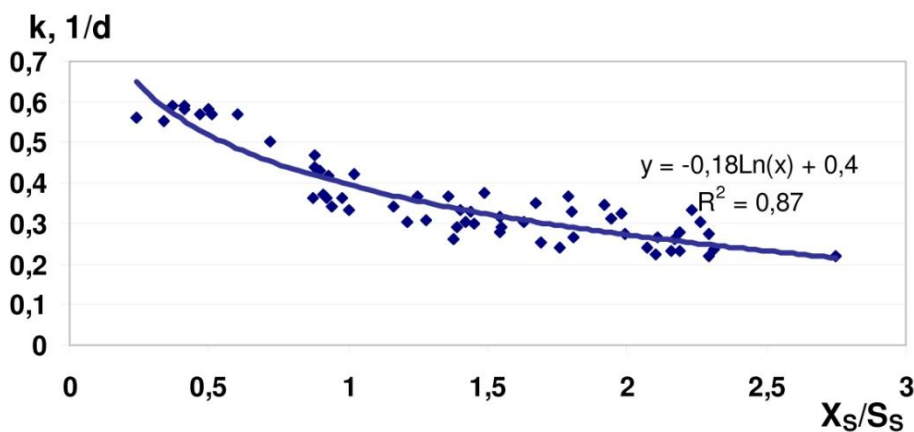
Na rysunku 3 przedstawiono wpływ dyspersji (X_s/S_s) ścieków na stałą szybkości biodegradacji ścieków (k). Złóża HF-CW I w polskich obiektach były znacznie bardziej obciążone zawiesiną w porównaniu z Wiedersbergiem.



Tabela 2. Obciążenie frakcjami ChZT w ściekach po kolejnych stopniach oczyszczania, w $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$

Table 2. Loadings with COD-fractions after subsequent stages of treatment, $\text{g}/\text{m}^2\text{day}$

Obiekt	Konfiguracja	Obciążenie frakcjami ChZT			
		X_S	X_I	S_S	S_I
Wiklino	HF-CW I	7,8	2,3	4,6	0,6
	VF-CW	0,7	0,4	1,2	0,5
	HF-CW II	0,4	0,08	0,2	0,5
Wieszyno	HF-CW I	20,3	5,2	11,9	2,3
	VF-CW	12,5	4,2	5,7	3,6
	HF-CW II	2,6	0,9	1,0	1,7
Wiedersberg	VF-CW	2,6	1,6	5,2	0,8
	HF-CW	0,2	0,07	0,1	0,4



Rys. 3. Wpływ stopnia dyspersji ścieków (X_S/S_S) na szybkość rozkładu substancji organicznej

Fig. 3. Constant of organic matter biodegradation rate (k) in relation to organic matter dispersion coefficient (X_S/S_S)

W Wiklinie obciążenie złoża HF-CW I frakcją X_S i X_I wynosiło odpowiednio: $7,8 \text{ g}/\text{m}^2\text{d}$ i $2,3 \text{ g}/\text{m}^2\text{d}$, zaś w Wieszynie obciążenie jednostkowe złoża było trzykrotnie wyższe zarówno dla frakcji X_S jak również X_I . Również złożo VF-CW w Wieszynie charakteryzowało się najwyższym obciążeniem jednostkowym frakcją zawiesinową (X_S) oraz frakcją substancji rozpuszczonych (S_S) rozkładalnych biologicznie.



Wysokie obciążenie złóż zawiesinami trudnorozkładalnymi oraz nie podatnymi na rozkład biologiczny było przyczyną blokowania przestrzeni gazowych materiału filtracyjnego. Natomiast ścieki dopływające do złóż stanowiących ostatni element oczyszczania w Wiklinie (złóżko HF-CW) i Wiedersbergu (złóżko HF-CW) charakteryzowały się wysokim udziałem substancji rozpuszczonych stabilnych, tzw. substancji refrakcyjnych (S_1). Dotychczas w literaturze pojawiły się pewne doniesienia dotyczące dopuszczalnych obciążeń złóż hydrofitowych substancją organiczną powyżej których następuje kolmatacja filtrów. Podane wartości różnią się jednak znacznie między sobą (tabela 2).

W tabeli 3 porównano obciążenie substancją organiczną w analizowanych obiektach w porównaniu z wartościami podanymi w literaturze.

Tabela 3. Porównanie średnich obciążeń substancją organiczną złóż z wartościami uzyskanymi w innych systemach hydrofitowych, g/m^2d

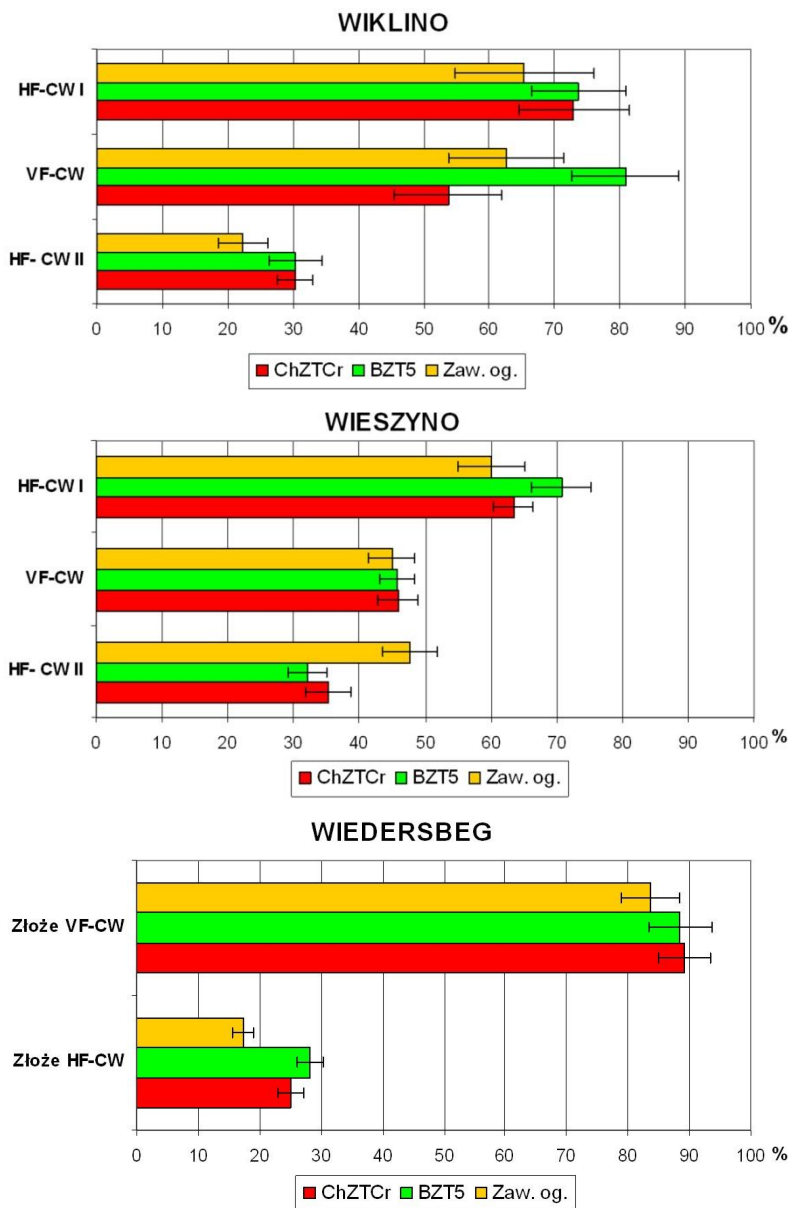
Table 3. Comparison of average loadings with organic matter with values from literature, g/m^2day

Obiekt	Obciążenie substancją organiczną wyrażoną wChZT
Wiklino	8,0÷14,7
Wieszyno	30,0÷38,0
Wiedersberg	0,9÷12,4
Wg [6]	5,0
Wg [12]	20,0÷30,0
Wg [8]	80,0

Wpływ obciążenia złóż substancją organiczną na ich natlenienie

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ obciążenia zawiesiną organiczną na dopływ tlenu do złóż typu HF-CW i VF-CW w systemach hybrydowych. Wzrost obciążenia złóż od 0,8 do 26,0 g/m^2d powodował obniżenie wartości współczynnika dyfuzji od 0,07 do 0,003 cm^2/s . Wg Kowalika (2001) grunty charakteryzujące się wartościami niższymi od $D_g \leq 2,0 \cdot 10^{-2} cm^2/s$ są niedostatecznie natlenione i powinny zostać wyeliminowane z intensywnych nawodnień. Analizowane złoża HF-CW uzyskały krytyczną wartość D_g , gdy obciążenie zawiesiną organiczną wynosiło 14,0 g/m^2d , podczas gdy dla złóż VF wartość ta była ponad trzykrotnie niższa i wynosiła 4,0 g/m^2d . Na tej podstawie można było przyjąć uzyskane wartości jako dopuszczalne obciążenia zawiesiną organiczną. Z uzyskanej zależności opisującej wpływ zawiesiny organicznej na natlenienie złóż (rys. 4) stwierdzono, że złożo typu VF-CW w oczyszczalni w Wiklinie było nawadniane ściekami w dawkach nie przekraczających określonych dopuszczalnych obciążeń. Natomiast w Wieszynie zarówno w złożu HF-CW jak i VF-CW zostały przekroczone dopuszczalne wartości obciążeń.





Rys. 5. Efektywność usuwania substancji organicznej oraz zawiesiny ogólnej ze ścieków po kolejnych stopniach oczyszczania w analizowanych HSH
Fig. 5. Effectiveness of organic matter and TSS removal after subsequent treatment stages in analysed HS



4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych rezultatów dotyczących wpływu stężeń i jakości substancji organicznej na dopływ tlenu oraz efektywności usuwania zanieczyszczeń, sformułowano następujące wnioski:

1. Wzrost obciążenia złóż rozkładalną zawiesiną organiczną (X_S) i niepodatną na rozkład biologiczny (X_I) powodował obniżenie dopływu tlenu określonego na podstawie pomiarów współczynnika D_g .
2. Na podstawie zależności $D_g = f(X_S + X_I)$ można określić dopuszczalne obciążenie złóż hydrofitowych substancją organiczną. W analizowanych systemach dopuszczalne obciążenie zawiesiną organiczną wynosiło dla złóż typu HF-CW $\leq 14,0 \text{ g/m}^2\text{d}$ zaś dla złóż typu VF-CW $\leq 4,0 \text{ g/m}^2\text{d}$.
3. W złożach, w których wartości obciążeń były poniżej wartości dopuszczalnych efektywność usuwania zanieczyszczeń wynosiła średnio: 71,2% dla BZT₅, 62,4% dla ChZT i 59,2% dla zawiesiny ogólniej.

Literatura

1. Arbeitsblatt ATV-A131. Bemessung und Betrieb von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnergleichwerten. St. Augustin, **1995**.
2. **Boerner T., von Felde K., Gschloessl E., Gschloessl T., Kunst S., Wissing F.:** *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. (Ed. J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green, R. Haberl), The Netherlands, Leiden: Backhuys Publishers, 169÷190, 1998.
3. **Brix H., Schierup H H., Lorenzen B.:** *Design criteria for BOD₅-removal in constructed reed beds*. W: International Conference on Design and Operation of Small Wastewater Treatment Plant (Ed. H. Odegaard). Trondheim, Norway, 407÷414, 1998.
4. **Brix, H., Arias, C.A.:** *Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage*. Water Science and Technology, vol. 51 nr 9, 1÷9, 2005.
5. **Cooper P.:** *The performance of Vertical Flow Constructed Wetland systems with special reference to the significance of Oxygen Transfer and Hydraulic Loading Rates*. W: 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Avignon (France), 26÷30th of September, 153÷163, 2004.
6. **Felde K., Kunst S.:** *N- and COD-removal in vertical flow systems*. Proceedings of 5th International Conference on Wetland System for Water pollution Control. Universitaet fuer Bodenkultur Wien and International Association on Water Quality, 1/8-8, 1996.
7. **Kayser K., Kunst S., Fehr G., Voermanek H.:** *Nitrification in reed beds-capacity and potential control methods*. World water congress, published at the IWA, Berlin, Germany, 2001.



8. **Kottrup C.:** *Die Pflanzenklaranlage der Norddeutschen Naturschutzakademie auf Hof Mohr- Betrieb und Untersuchungsergebnisse.* NNA Berichte, Band 5, Heft 3, 25÷34, 1999.
9. **Kowalik P.:** *Ochrona środowiska glebowego.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 257, 2001.
10. **Langergraber G., Haberl R., Laber J., Pressl A.:** *Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands.* Water Science & Technology Vol 48, No 5, 25÷34, 2003.
11. **Loeffler H.:** *Das Pflanzenbeet- Klärverfahren Phytofilt, theoretische Grundlagen-praktische Anwendung.* NNA- Berichte Nr 5. Schneverdingen, 1992.
12. **Luckner L., Luetzner K., Mueller V.:** *Theoretische Grundlagen zur Bemessung von Pflanzenkläranlagen.* Dresdner Berichte, Band 12, 19÷46, 1998.
13. **Mueller V., Luetzner K.:** *Zur Verstopfungssicherheit bei Pflanzenkläranlagen.* Korrespondenz Abfall und Abwasser 46 (5), 701÷719, 1999.
14. **Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M.:** *The removal of nitrogen compounds in hybrid wetland systems.* Polish Journal of Environmental Studies 12(6), 739÷746, 2003 (a).
15. **Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M.:** *The Dynamics of Proceses Responsible for Transformation of Nitrogen Compounds in Hybrid Wetlands Systems in a Temperate Climate.* Wetlands- nutrients, metals and mass cycling (Ed.) J. Vymazal Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 129÷142, 2003 (b).
16. **Platzer C., Mauch K.:** *Soil clogging in vertical flow reed beds – mechanisms, parameters and... solutions?* Water Science&Technology, 35 (5), 13÷20, 1997.
17. **Tuszyńska A., Obarska-Pempkowiak H.:** *Wpływ substancji organicznej na natlenienie i efektywność usuwania zanieczyszczeń w złożach hydrofitowych.* Monografia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 74, 2006.
18. **Vandaele S., Thoeze C., Van Eygen B., De Gueldre G.:** *Swwtp's in Flanders (Belgium): Standard approach and experiences with constructed reed beds,* 1999.
19. **Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Haberl R., Perfler R., Laber J.:** *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe.* W: Removal mechanisms and types of constructed wetlands. The Netherlands, Lieden: Backhuys Publishers, 17÷66, 1998.
20. **Winter K., Goetz D.:** *Einfluss der Abwasserzusammensetzung auf die Kolmationsneigung vertical durchstroemter Bewachsener Bodenfilter.* KA-Abwasser und Abfall, Nr 51, 961÷966, 2004.



Influence of Oxygenation of Hydrophyte Beds on Effectiveness of Pollutants Removal

Abstract

In the recent years the increase of interest in the combined (hybrid) constructed wetland systems has been observed. These systems are composed of two or more filters with mixed vertical and horizontal flow of sewage. Hybrid constructed wetlands require smaller unit areas and secure higher efficiency of pollutants removal. In Poland up till now the configuration with Horizontal Flow Constructed Wetland (HF-CW) at the beginning of treatment system has been only used. Opposite configuration with Vertical Flow Constructed Wetland (VF-CW) at the beginning of biological process are applied mainly in Germany and the United Kingdom.

It is proved in literature that pores clogging because of organic suspended solids limits oxygen flux to filters. Moreover oxygen demand caused by organic matter decomposition can cause anaerobic conditions to occur in soil and significantly decrease organic matter decomposition processes. Insufficient supply of oxygen to beds can cause lack of biodegradation of part of organic matter in beds and its accumulation in free spaces of the filtration material or on its surface. Process of organic matter accumulation can lead to decrease of pollutants removal effectiveness and even decreased period of beds operation.

The aim of this paper is to evaluate not only organic loads applied to beds but also both the organic matter quality in the influent and accumulation in soil.

Investigations were carried out in three hybrid constructed wetlands with sub-surface flow of domestic sewage. These systems were composed of HF-CW and VF-CW flow filters planted with reed. Analysed objects were uniform in relation to their construction (material, depth and time of operation) but they had different hydraulic loadings. Object in Wieszyno has the highest loading of both horizontal and vertical beds, equal to 40.0 and 80.0 mm/day, respectively. While loadings of HF and VF beds in Wiklino were twice lower.

Quality of organic matter was estimated on the basis of its speciation according to German guideline ATV 131 (1995). Fractions of dissolved organic compounds easily degradable (S_s) and non-degradable (S_i) as well as organic suspension hardly degradable (X_s) and non-degradable (X_i) were determined.

It was proved that the decomposition rate of organic matter was determined by proportions of X_s and X_i fractions. On the basis of the function between the diffusion coefficient and suspended organic matter $D_g = f(X_s + X_i)$, it was shown that the object in Wieszyno underwent colmatation because inflow of oxygen was below the critical for sufficient supply of oxygen value of diffusion coefficient in soil (D_g). On the basis of the obtained results organic matter permissible loadings for both VF and HF beds were established. For HF beds the load is equal to 14.0 g/m²day and for VF beds it is lower than 4.0 g/m²day.

