

Doświadczenia związane z wykorzystaniem wikliny *Salix viminalis* w usuwaniu zanieczyszczeń z wód i ścieków

Hanna Obarska-Pempkowiak, Katarzyna KołECKA
Politechnika Gdańska

1. Wstęp

Wierzba jest bardzo popularną rośliną w Polsce. Przez wieki jest postrzegana jako symbol polskiego krajobrazu. Wierzbę krzewiastą, czyli wiklinę (*Salix*) stosuje się w plecionkarstwie, a także jako surowiec do produkcji mebli oraz jako surowiec do wzmacniania brzegów rzek, jezior oraz morskich wybrzeży. Ma znaczenie jako pionierska roślina przy zagospodarowywaniu nieużytków (wydm, wyrobisk, dołów potorfowych i innych zdegradowanych obszarów).

Praktyczna przydatność wikliny przyczyniła się do koncepcji jej hodowli na plantacjach nawadnianych ściekami [12]. Ścieki komunalne zawierające duże stężenia przyswajalnych form azotu i fosforu mogłyby być stosowane do nawadniania i nawożenia plantacji wiklinowych. Możliwość tę dostrzeżono i udokumentowano w latach sześćdziesiątych i późniejszych [1÷11]. Przeprowadzone badania miały na celu przede wszystkim określenie optymalnych warunków przyrostu biomasy, a ścieki traktowano jako źródło substancji odżywczych i wody.

Białkiewicz [2, 6÷8] na podstawie wieloletnich badań wykazał, że nawadnianie ściekami miejskimi spowodowało wzrost plonu wszystkich gatunków wierzby w stosunku do biomasy uzyskiwanej z pól nie nawadnianych. Dodatkowo wykazał, że kulminacja plonów wierzby została przyspieszona z czwartego do drugiego roku wzrostu.

W omawianych badaniach uzyskano wysokie (wynoszące 41÷43%) wykorzystanie wartości nawozowych ścieków (głównie azotu i fosforu) oraz znaczną obniżkę BZT₅ (około 90%) Stwierdzono, że stosowanie mniejszej jed-

norazowej dawki nawadniającej pozwala na pełniejsze wykorzystanie wartości zwilżających i nawożących ścieków [1÷7].

Nowym zastosowaniem wikliny, jest jej wykorzystanie jako surowca energetycznego. W Szwecji na szeroką skalę drewno wiklinowe wytwarza się na „plantacjach energetycznych”, które są wysoko zmechanizowanymi uprawami rolnymi z genetyczną selekcją szybko rosnących roślin, odrastających po ścięciu i uprawianych metodami rolniczymi [23÷25]. Prawidłowe postępowanie umożliwiła średnią roczną produkcję biomasy na poziomie 12÷15 t/ha-rok w okresie 20÷30 lat. Gotowa, po 3÷5 latach do zbioru plantacja porośnięta jest drzewami o wysokości 5÷7 m i średnicy 3÷5 cm [23, 24].

Perttu [24] wykazał, że podczas spalania 1 tony drewna wiklinowego uzyskuje się 1,65 razy mniej energii, aniżeli podczas spalania 1 tony węgla kamiennego. Oznacza to, że przy produkcji drewna w ilości 20 t/ha w ciągu roku otrzymuje się biomasę równoważną energetycznie 12,1 ton węgla kamiennego.

Prowadzone w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych terenowe badania wykorzystania ścieków miejskich do zasilania plantacji wiklinowych miały na celu określenie optymalnych warunków dla przyrostu biomasy roślin [12]. Ścieki traktowane tam były jako źródło substancji odżywczych i wody. Wykorzystanie wikliny do oczyszczania ścieków wymaga zmiany priorytetów. Najważniejsze jest uzyskanie możliwie dużej różnicy ładunków zanieczyszczeń doprowadzanych i odprowadzanych z obszaru porośniętego wikliną. Wartość tej różnicy uzależniona będzie od szeregu czynników biotycznych (np. typ wikliny, wiek) i abiotycznych (np. ładunek, częstotliwość nawodnień, typ ścieków, temperatura) wpływających na wzrost roślin.

W pracy przedstawiono obecne doświadczenia związane z wykorzystaniem wikliny do usuwania zanieczyszczeń ze źródeł punktowych i obszarowych oraz do utylizacji osadów ściekowych.

2. Zabezpieczenie wód powierzchniowych przed splywem zanieczyszczeń obszarowych

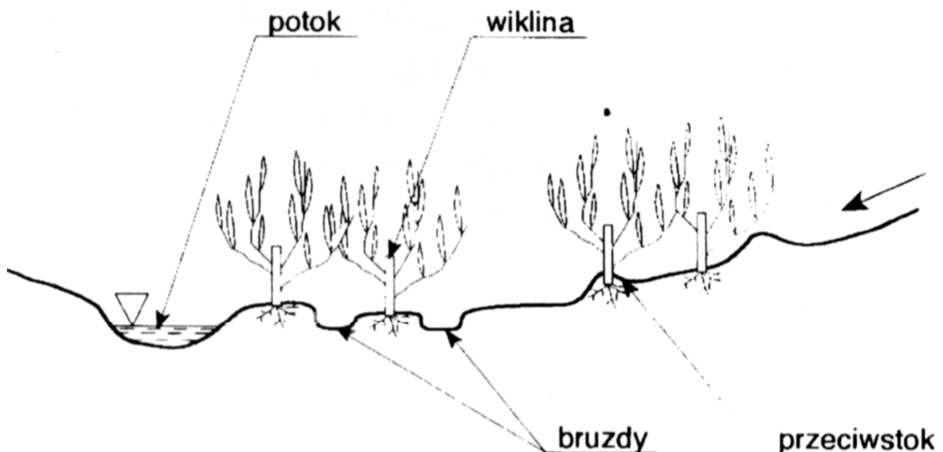
Jedną z sozologicznych funkcji wikliny jest tworzenie pasów buforowych zasiedlonych prętami wikliny celem zabezpieczenia wód powierzchniowych przed obszarowym splywem związków biogenych [14, 21]. Na terenie Miejskiego Ogrodu Zoologicznego w Oliwie zbudowano pięć buforowych stref wiklinowych o łącznej powierzchni 6650 m², które zabezpieczają przed zanieczyszczeniami Potok Rynaszewski ($Q_z \cong 701/s$), będący głównym dopływem Potoku Jelitkowskiego ($Q_z \cong 250$ 1/s) [18].

Strefy wiklinowe założono na obrzeżach stawów oraz wzdłuż koryta potoku. Są one wbudowane w naturalne koryto potoku ze względu na dostępność terenu oraz dla zminimalizowania kosztów. W celu zapewnienia lepszej

retencji wód opadowych strefy poprzecinano bruzdami i przeciwskokami równoległymi do nurtu (rysunek 1).

Zadaniem stref jest usuwanie zanieczyszczeń spływających z wybiegów i pomieszczeń dla zwierząt.

Analiza jakości wód Potoku Rynaszewkiego wykazała, że w okresie ośmiu lat po zastosowaniu opisanego systemu średni ładunek substancji niesionych przez potok uległ obniżeniu o 14,3% (1,1 t/rok) – dla BZT₅, 45,9% (11,9 t/rok) – dla utlenialności oraz 85,2% (19 t/rok) – dla N_{og} i 89,2% (1,2 t/rok) – dla P_{og} [20].



Rys. 1. Strefa buforowa [18]

Fig. 1. Buffer zone [18]

3. Usuwanie zanieczyszczeń ze źródeł punktowych

Doświadczenia wazonowe

Badania laboratoryjne dotyczące oceny efektywności usuwania zanieczyszczeń ze ścieków prowadzono w wazonach. Wazonową hodowlę wikliny (*Salix viminalis*) założono w pojemnikach polietylenowych o średnicy 0,80 m, które były wypełnione piaskiem o średnicy $0,25 \pm 0,5$ mm i porowatości gazowej $n_g = 0,30$. Objętość piasku w wazonach wynosiła $55,00 \text{ dm}^3$. Badano również pojemnik bez roślin, który stanowił tło. Sześć zrzędów wikliny *Salix viminalis* rozkrzewiono na podłożu piaszczystym, uprzednio wypłukanym w celu usunięcia szczątków organicznych. W pierwszym okresie stosowano pożywki bogate w mikroelementy oraz ścieki syntetyczne produkowane z peptonu. Następnie

stosowano i analizowano ścieki miejskie przed i po oczyszczeniu. Obciążenie hydrauliczne ściekami wynosiło 100 mm/2 tygodnie (w okresie wiosna-lato) oraz 50 mm/2 tygodnie (jesienią) [16].

Uzyskaną zależność skuteczności usuwania związków azotu, fosforu oraz substancji organicznej jako BZT i ChZT od doprowadzonego ładunku tych zanieczyszczeń podano w tabeli 1. Najwyższą efektywność uzyskano dla doświadczenia W_B (tzn. wazonów nawadnianych ściekami po biologicznym stopniu oczyszczania), natomiast najniższą dla wazonów bez wikliny (doświadczenie T_B).

Tabela 1. Skuteczność usuwania zanieczyszczeń ze ścieków miejskich η^* (w procentach) oraz doprowadzony ładunek zanieczyszczeń Σ w $\text{g/m}^2\cdot\text{rok}$ [15]

Table 1. Efficiencies of pollutants removal η^* and the discharged load of pollutants $[\text{g/m}^2\cdot\text{year}]$ [15]

Wazon	W_M		W_B		T_B	
	Σ	η	Σ	η	Σ	η
N_{og}	31,7	67,5	44,3	82,1	41,7	35,4
N_{org}	9,3	70,2	8,9	91,1	8,3	57,7
$N-NH_4^+$	19,8	68,4	20,6	89,5	17,9	39,5
$P-PO_4^{3-}$	7,4	70,0	10,5	83,1	10,1	22,5
ChZT	125,1	61,1	104,6	81,1	113,4	39,0
BZT ₇	69,3	68,3	56,7	84,2	55,7	46,7

η^ skuteczność usuwania zanieczyszczeń jako iloraz różnicy ładunku na wejściu (Σ_0) i wyjściu (Σ) do ładunku na wejściu (Σ_0); W_M - wazon z wikliną nawadniany ściekami po mechanicznym stopniu oczyszczania, W_B - wazon z wikliną nawadniany ściekami po biologicznym stopniu oczyszczania, T_B - wazon bez wikliny nawadniany ściekami po biologicznym stopniu oczyszczania.*

Uzyskane wyniki skuteczności usuwania azotu ogólnego, fosforu fosforanowego i ChZT w zależności od stosowanych obciążeń powierzchniowych podano w tabeli 2.

Usuwanie substancji odżywczych ze ścieków miejskich powiązane było z produkcją biomasy. Największy udział w wytworzonej biomacie miały pręty wikliny. Średnie wartości przyrostu masy prętów wikliny uzyskane w dwuletnich badaniach wynosiły odpowiednio dla wazonu W_M 183 g s.m./m²·rok, dla W_B 248 g s.m./m²·rok.

Tabela 2. Efektywność usuwania fosforu fosforanowego, azotu ogólnego oraz ChZT w zależności od obciążenia powierzchniowego [15]**Table 2.** Efficiencies of total nitrogen, phosphate phosphorus and COD removal for different loads of pollutants [15]

P-PO ₄ ³⁻						
Ładunek [g/m ² ·d]	0,02	0,03	0,03	0,07	0,08	0,09
Efektywność [%]	84,2	81,1	64,4	53,9	48,9	44,4
N _{og}						
Ładunek [g/m ² ·d]	0,12	0,13	0,15	0,21	0,23	0,25
Efektywność [%]	79,9	91,1	74,7	51,1	41,3	45,6
ChZT						
Ładunek [g/m ² ·d]	0,26	0,31	0,36	0,4	0,48	0,52
Efektywność [%]	80,5	93,9	64,4	81,1	50,1	38,9

Średnie stężenie azotu i fosforu w biomase poszczególnych części wikliny *Salix viminalis* podano w tabeli 3.

Tabela 3. Średnia zawartość azotu i fosforu w biomase *Salix Viminalis* w [%] [16]**Table 3.** Average contents of nitrogen and phosphorus in the biomass of *Salix viminalis* [%] [16]

Część rośliny	Stężenie [%]	
	Azot	Fosfor
Liście	3,5	0,4
Pręty	0,4	0,1
Korzenie	0,9	0,1

Największą zawartość azotu i fosforu stwierdzono w liściach. Stwierdzono również znaczną ilość tych pierwiastków w korzeniach. Podział azotu i fosforu pomiędzy poszczególne komponenty układów pomiarowych w formie bilansu podano w tabeli 4.

Tabela 4. Bilans związków biogennych (azotu i fosforu) w doświadczeniach W_M, W_B w $g/m^2 \cdot rok$ [15]**Table 4.** The balance of nutrients (nitrogen and phosphorus) in the W_M and W_B pots [$g/m^2 \cdot year$] [15]

Wazon	W_M	W_B	W_M	W_B
	Azot		Fosfor	
Dopływ	+31,7	+44,3	+7,4	+10,5
Pręty	-0,7	-1,0	-0,2	-0,3
Liście	-0,4	-9,0	-0,5	-0,9
Korzenie	-1,2	-1,7	-0,2	-0,5
Grunt	-6,8	-9,6	-2,9	-7,3
Odciek	-10,3	-7,9	-2,2	-1,8
Różnica	+8,7	+15,1	+1,4	-0,3

Analiza bilansu związków azotu w poszczególnych wazonach wykazuje różnicę pomiędzy azotem doprowadzonym a odprowadzonym wynoszącą $8,7 g/m^2 \cdot rok$ dla W_M oraz $15,1 g/m^2 \cdot rok$ dla W_B , co stanowi odpowiednio 27,4% i 34,1%. Analogicznie obliczone różnice dla fosforu wynoszą $1,4 g/m^2 \cdot rok$ dla W_M oraz $-0,3 g/m^2 \cdot rok$ dla W_B . Stanowi to w stosunku do doprowadzonego ładunku fosforu odpowiednio 18,9% i 2,9%.

Oczyszczalnie przydomowe

Analizowano dziewięć obiektów przyzgodowych z poziomym przepływem ścieków (HF-CW) zasiedlonych wikliną *Salix viminalis*. Obiekty były zlokalizowane k. Ciechanowa, Lublina i w Lubiejewie k. Ostrołęki. Uzyskane wyniki trzyletniego monitoringu wykazały, że systemy hydrofitowe typu HF-CW, stanowiące drugi stopień oczyszczenia ścieków zapewniały skuteczne usuwanie substancji organicznej wyrażonej w BZT₅ i ChZT oraz zawiesiny ogólnej. Efektywność usuwania BZT₅ wynosiła od 45,6 do 99,1%, średnio 76,4% w zakresie obciążeń od 15 do 115 kg/ha·d. Natomiast skuteczność usuwania azotu ogólnego w tych obiektach była niższa i wynosiła od 22,4 do 84,2%, średnio 44,5% w zakresie obciążeń od 2,5 do 37,0 kg/ha·d. Wydajność jednostkowa usuwania substancji organicznej i azotu ogólnego zmieniała się w szerokim zakresie (tabela 5).

Wiele z analizowanych obiektów nie pracowało prawidłowo. Główną przyczyną była niewłaściwa eksploatacja osadników gnilnych, brak odpowiednich trójników umożliwiających przepływ ścieków bez tłuszczów i zawiesin do filtrów hydrofitowych. Dopływ tych zanieczyszczeń był przyczyną zmniejszenia przewodności hydraulicznej tych obiektów. Powodowało to niekiedy zmia-

nę ich charakteru z obiektów z podpowierzchniowym na obiekty z powierzchniowym przepływem ścieków, gdzie obowiązują odmienne zasady projektowania i eksploatacji.

Tabela 5. Wydajność usuwania substancji organicznej (w BZT₅) z jednostkowej powierzchni (1 m²) analizowanych obiektów przyzagrodowych [19]

Table 5. BOD₅ and N_{tot} removal efficiency per 1 m² for the analysed HF-CW individual household plants [19]

Obiekty przydomowe		
k. Ciechanowa	k. Lublina	Lubiejewo k. Ostrołęki
BZT ₅ [g/m ² d]		
I - 0,7	1 - 4,2	5 - 0,8
II - 3,4	2 - 8,2	
III - 2,3	3 - 10,8	
IV - 0,4	4 - 2,1	
N _{og} [g/m ² d]		
I - 2,2	1 - 0,6	5 - 0,8
II - 1,1	2 - 0,2	
III - 0,7	3 - 0,1	
IV - 0,6	4 - 0,1	

Dodatkowo w przypadku oczyszczalni przydomowej w Lubiejewie k. Ostrołęki przeprowadzono bilans doprowadzonego i odprowadzanego ładunku azotu i fosforu w okresie trzech lat eksploatacji (tabela 6).

Natomiast ilość suchej biomasy zebranej z powierzchni złoża (60 m²) w analizowanym okresie podano w tabeli 7.

Tabela 6. Doprowadzony i odprowadzany ładunek azotu i fosforu do oczyszczalni przydomowej zasiedlonej wikliną *Salix viminalis* w Lubiejewie w [kg] [17]
Table 6. The inflowing and outflowing loads of nitrogen and phosphorus for the individual household WWTP in Lubiejewo near Ostrołęka [kg] [17]

		Miesiące											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I rok eksploatacji													
N _{og} dopr.	nb*	nb	nb	1,442	1,543	2,170	2,047	1,978	1,747	1,695	1,858	2,082	16,562
N _{og} odpr.	nb	nb	nb	0,517	0,0	0,0	0,0	0,0	0,561	1,479	0,975	1,415	4,947
Różnica													11,615
P _{og} dopr.	nb	nb	nb	0,338	0,270	0,647	0,286	0,100	0,462	0,405	0,429	0,483	3,420
P _{og} odpr.	nb	nb	nb	0,042	0,0	0,0	0,0	0,0	0,004	0,003	0,006	0,007	0,062
Różnica													3,358
II rok eksploatacji													
N _{og} dopr.	1,801	1,943	1,175	1,061	1,859	1,683	1,415	2,410	2,086	2,246	2,030	1,830	21,539
N _{og} odpr.	1,110	1,118	1,323	0,590	0,0	0,0	0,0	0,0	0,361	0,726	1,026	1,510	7,764
Różnica													13,775
P _{og} dopr.	0,286	0,210	0,305	0,092	0,106	0,336	0,186	0,474	0,334	0,318	0,330	0,247	3,224
P _{og} odpr.	0,004	0,004	0,004	0,003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,001	0,003	0,003	0,006	0,028
Różnica													3,196
III rok eksploatacji													
N _{og} dopr.	1,798	1,380	2,048	1,680	2,077	1,937	1,847	1,716	1,565	1,540	1,872	1,890	21,350
N _{og} odpr.	0,716	0,855	1,051	0,863	0,0	0,0	0,0	0,0	0,411	0,563	0,690	0,871	6,020
Różnica													15,330
P _{og} dopr.	0,210	0,232	0,281	0,190	0,257	0,204	0,194	0,221	0,342	0,302	0,222	0,273	2,928
P _{og} odpr.	0,006	0,013	0,004	0,003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,003	0,003	0,047	0,004	0,083
Różnica													2,845

*) nb – nie badano

Tabela 7. Produkcja biomasy z powierzchni złoża w kg s.m./rok [17]**Table 7.** Biomass production of the hydrophite bed in Lubiejewo [kg d.m./year][17]

Rok eksploatacji	Produkcja biomasy (prętów)
I	88,8
II	89,1
III	90,3

Uzyskane wyniki oraz procentowa zawartość azotu i fosforu w suchej biomase umożliwiły obliczenie ilości azotu i fosforu w zebranej biomase. Uzyskane wartości stanowiły podstawę do przeprowadzenia szacunkowego bilansu tych pierwiastków dla ekosystemu oczyszczalni gruntowo-wiklinowej w Lubiejewie (tabela 8).

Tabela 8. Bilans azotu i fosforu w ekosystemie oczyszczalni gruntowo-wiklinowej w Lubiejewie w [kg] [17]**Table 8.** The balance of nitrogen and phosphorus for the hydrophite plant in Lubiejewo [kg] [17]

Pierwiastek	Dopływ	Wiklina	Odpływ	Różnica
I rok eksploatacji				
N	16,562	0,541	4,930	11,091
P	3,415	0,121	0,060	3,234
II rok eksploatacji				
N	21,539	0,732	7,764	13,043
P	3,224	0,098	0,028	3,098
III rok eksploatacji				
N	21,350	0,786	6,020	14,544
P	2,928	0,132	0,083	2,713

Na podstawie zebranych w tabeli rezultatów można wykazać dużą skuteczność działania oczyszczalni. Skuteczność usuwania azotu wynosiła odpowiednio 70,4%, 63,7% i 71,8%, zaś fosforu odpowiednio: 98,2%, 90,6% i 97,2%. Odpływ z oczyszczalni zawierał bardzo małe ilości tych niebezpiecznych dla środowiska przyrodniczego pierwiastków. Oczyszczalnia w Lubiejewie pracowała więc bardzo dobrze w ciągu analizowanych trzech lat pracy. Różnica pomiędzy dopływem a odpływem w przypadku fosforu jest spowodowana przede wszystkim procesami sorpcji jonów PO_4^{3-} w złożu wiklinowym i ewentualnymi błędami pomiarowymi, ponieważ akumulacja tego pierwiastka w biomase była mała i zmieniała się od 3,04 do 4,5%. W analizowanym okre-

się zwraca uwagę malejący udział tego procesu, co wskazywałoby na wyczerpywanie się zdolności sorpcyjnej złoża, chociaż nie można wykluczyć też błędów pomiarowych.

W przypadku azotu różnica pomiędzy dopływem a odpływem jest znacznie większa. Jest ona wynikiem procesów amonifikacji, denitryfikacji i sorpcji.

Przeprowadzona analiza wykazała, iż oczyszczalnia przydomowa charakteryzowała się małym odpływem azotu i fosforu do środowiska przyrodniczego – odpowiednio około 30% i około 10% doprowadzonego ładunku, czego nie zapewniają rozwiązania dotychczas stosowane w Polsce na terenach wiejskich.

4. Unieszkodliwianie osadów ściekowych

Unieszkodliwianie osadów za pomocą plantacji wikliny w oczyszczalni ścieków w Swarzewie

Badania przeprowadzono na pilotowym poletku wikliny (o powierzchni 2400 m²) skonstruowanym w 1993 roku. Poletka zasiedlono zrzesami wikliny *Salix viminalis*. Przeprowadzono nawadnianie osadami ściekowymi. W ciągu kolejnych 3 lat plantacja została zasilona warstwą osadów o miąższości około 1 m. Nawadnianie plantacji odbywało się w sezonie wegetacyjnym.

Tabela 9. Zmiany jakości osadów ściekowych unieszkodliwianych w pilotowym poletku wiklinowym w Swarzewie [22]

Table 9. Changes of sewage sludge quality in the pilot willow bed in Swarzewo [22]

Parametr	Jednostka	Osad surowy	Plantacja wikliny po 3 miesiącach	Plantacja wikliny po 1 roku	Plantacja wikliny po 2 latach	Plantacja wikliny po 11 latach
Wilgotność	%	94,62	94,83	82,43	68,75	32,1
Substancja organiczna	% s.m.o.	65,0	60,82	48,2	35,0	32,5
Azot ogólny	% s.m.o.	5,45	4,1	4,67	3,19	2,79
Azot amonowy	% s.m.o.	0,11	n.b.	0,13	0,08	nb*
Fosfor ogólny	% s.m.o.	1,94	1,72	2,38	1,91	0,22

*) nb – nie badano

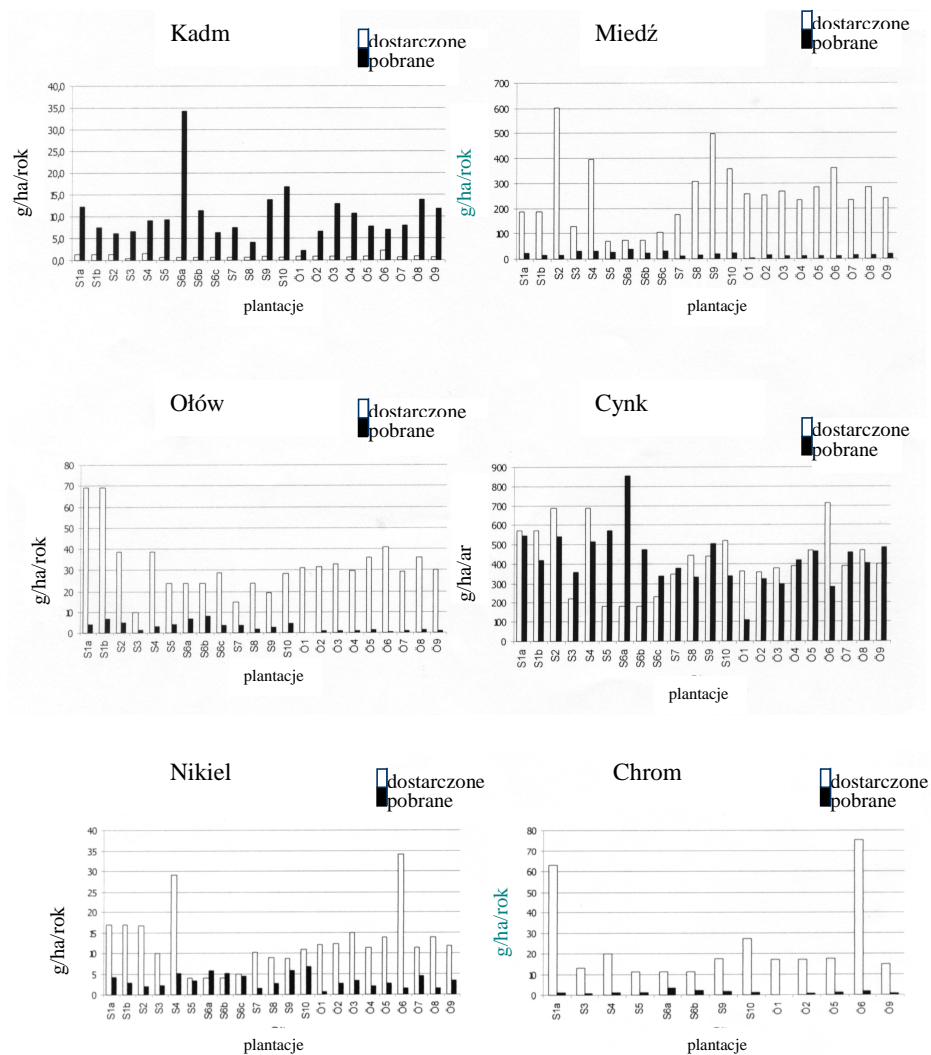
W początkowym okresie odwadnianie osadów z plantacji wikliny przebiegało stosunkowo wolno. W ciągu dwóch lat wilgotność zmalała jedynie o 27,3%. Brak systemu drenarskiego umożliwiającego odprowadzanie odcieków oraz brak substratu mineralnego w warstwie wylewanych osadów zapewniającego doprowadzenie tlenu do systemu korzeniowego wikliny był prawdo-

podobnie czynnikami odpowiedzialnymi za spowolnienie tego procesu. Pomimo to plantacja okazała się bardzo skuteczna w procesie stabilizacji unieszkodliwianych osadów. Świadczy o tym znaczny spadek ilości substancji organicznej: z 65,0 do 35,0% s.m.o. Stwierdzono również, że szybkość zmniejszania ilości substancji organicznej w unieszkodliwianych osadach była porównywalna dla pierwszego i drugiego roku unieszkodliwiania. Ilość azotu ogólnego uległa obniżeniu o 41,5%, a azotu amonowego o 27,3% w ciągu dwóch lat. W ciągu pierwszego roku stwierdzono wzrost ilości fosforu w osadach z 1,94 do 2,38% s.m.o [22]. Po 11 latach wilgotność zmalała o 66,1%, ilość substancji organicznej zmniejszyła się do 32,5%, natomiast ilość fosforu zmalała o 88,6%.

Doświadczenia z plantacjami wikliny ze Szwecji

W południowej Szwecji w latach 2002/2003 przeprowadzono badania dotyczące zawartości metali w glebie i biomase w plantacjach wikliny *Salix viminalis*. Analizowano 20 plantacji, które były używane w przeszłości osadami ściekowymi. Większość plantacji powstało w latach 1990÷2000. Analizowano stopień przyswajania metali przez nadziemne części wikliny w odniesieniu do ilości metali dostarczonych w osadach [13]. Stwierdzono, że w przypadku kadmu pobór tego pierwiastka był 10-krotnie większy niż jego zawartość w osadach. W przypadku cynku, pobór przez rośliny bilansował się z ładunkiem dostarczonym w osadach. Natomiast w przypadku miedzi i ołowiu następowała akumulacja w glebie (choć w porównaniu do ilości dostarczonej gromadzenie miało znacznie mniejsze znaczenie). Roczne zawartość miedzi i ołowiu w górnej warstwie gleby wynosiło kolejno: 0,5% i 0,06%. Dla innych metali wartości te wynosiły odpowiednio: 0,04% – dla niklu, 0,2% – dla cynku oraz 0,1% – dla kadmu. Zależności pomiędzy ilością dostarczonych metali a ich poborem przez pręty wikliny przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy statystycznej udokumentowano możliwość stosowania dawek 9÷10 t s.m. osadu/ha-rok wykluczającą akumulację Cd w glebie. Wykazano również, że w mniejszym stopniu następowało usuwanie Zn, Ni, Cu i Pb. Stwierdzone właściwości wikliny *Salix viminalis* potwierdzają więc możliwość jej wykorzystania do rekultywacji zdegradowanych obszarów [13].



Rys. 2. Zależności pomiędzy ilością dostarczonych metali (kadmu, miedzi, ołowiu, cynku, niklu i chromu) a ich poborem przez pręty wikliny[13]

Fig. 2. The relationships between the discharged load of metals (cadmium, copper, lead, zinc, nickel and chromium) and their uptake by willow shoots [13]

5. Wnioski

1. Buforowe strefy wiklinowe mogą być wykorzystywane do usuwania zanieczyszczeń obszarowych w warunkach lokalnych.
2. Na podstawie badań laboratoryjnych oraz terenowych wykazano, że wiklina *Salix viminalis* może być stosowana do oczyszczania ścieków w przydomowych oczyszczalniach. Wykazano, że zastosowanie wikliny powoduje wzrost efektywności oczyszczania ścieków w porównaniu z filtrami gruntowymi.
3. Niewłaściwa eksploatacja osadników gnilnych jest częstą przyczyną kolmatacji złóż i spadku skuteczności usuwania zanieczyszczeń w przydomowych oczyszczalniach ścieków zasiedlanych wikliną.
4. Na podstawie wstępnych wyników badań wykazano, że plantacje wikliny mogą być stosowane w procesie utylizacji osadów.
5. Wykazano, że pręty wikliny mogą pełnić rolę filtra eliminującego kadm z rekultywowanego podłoża nawadnianego osadami ściekowymi. Akumulacja Cd w prętach wikliny dziesięciokrotnie przewyższała ilość kadmu dostarczonego z osadami ściekowymi.

Literatura

1. **Białkiewicz F.:** *Możliwość wykorzystania ścieków miejskich w produkcji wierzby krzewiastej*. Sylwan, 113(4). 1969.
2. **Białkiewicz F.:** *Możliwości wykorzystania ścieków miejskich w gospodarstwie leśnym (doświadczenia lizymetryczne)*. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, 487. 1974.
3. **Białkiewicz F.:** *Leśne oczyszczanie i wykorzystanie ścieków miejskich*. Zeszyty Problemów Postępów Nauk Rolniczych. „Leśne oczyszczanie i wykorzystanie ścieków w aspekcie ochrony środowiska przyrodniczego”, 204. 1978a.
4. **Białkiewicz F.:** *Niektóre aspekty oczyszczania i wykorzystania ścieków miejskich pod uprawami leśnymi i plantacyjnymi*. Sylwan, 9. 1978b.
5. **Białkiewicz F.:** *Badania nad możliwością wykorzystania ścieków miejskich w uprawach leśnych i plantacyjnych*. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, 574. 1980.
6. **Białkiewicz F., Kermen J.:** *Środowisko leśne jako naturalna oczyszczalnia ścieków*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Inżynieria Sanitarna, 18. 1975.
7. **Białkiewicz F., Nowiński D.:** *Wpływ nawodnień nawożących ściekami miejskimi na wysokość i jakość plonu wierzby krzewiastej*. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, 342. 1968.
8. **Białkiewicz F., Boćko J., Nowiński S.:** *Oczyszczanie i wykorzystanie ścieków w środowisku gleb leśnych*. Zesz. Probl. Postępów Nauk Rol. z. 204. 1978.
9. **Białkiewicz F., Kieruzal M., Wawrzoniak T.:** *Badania nad utylizacją ścieków Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej w warunkach drzew i krzewów (wyniki doświadczeń lizymetrycznych)*. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, 702. 1989.

10. **Hasselgren K.:** *Municipal wastewater reuse and treatment in energy cultivation*. In: Water Reuse Symposium III, San Diego, 26-31 VIII 1984, American Waterworks Association Research Foundation, Denver, Colorado. 1984.
11. **Hazuk A., Mazur Z.:** *Nawadnianie ściekami miejskimi plantacji wikliny*. Post. Nauk Rol. 1. 1969.
12. **Kutera J.:** *Wykorzystanie ścieków w rolnictwie*. Warszawa: PWRiL 1988.
13. **Lundstrom I., Haseelgren K.:** *Uptake of metals in willow biomass plantations fertilised with sewage sludge*. KALMAR ECO-TECH 2003. Bioremediation and Leachate Treatment. 25÷27.X.2003.
14. **Mander U., Matt O., Nugn U.:** *Perspectives on vegetated shoals, ponds, and ditches as extensive outdoor system of wastewater treatment in Estonia*. In.: C. Et-nier, B. Guterstam (Eds.). Ecological Engineering for Wastewater Treatment, Bok-skogen, Sweden. 1991.
15. **Obarska-Pempkowiak H.:** *Oczyszczanie ścieków metodą hydrobotaniczną z wy-korzystaniem filtrów gruntowych i stawów ściekowych*. Zeszyty Naukowe Politech-niki Gdańskiej Nr 38, Gdańsk 1992.
16. **Obarska-Pempkowiak H.:** *Removal of nitrogen and phosphorus from municipal wastewater by willow – laboratory approach*. Materiały z konferencji „Willow ve-getation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system”, Szwecja 5÷10. IV. 1994.
17. **Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M.:** *Czy oczyszczalnie hydrofitowe spraw-dzają się w Polsce*. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Kanalizacja wsi – stan obecny – perspektywy rozwoju”. Puszczykowo, Poznań: PZITS, Akad. 18÷20.II.2004.
18. **Obarska-Pempkowiak H., Kowalik P.:** *Ograniczenia dopływu zanieczyszczeń do Zatoki Gdańskiej w rejonie Trójmiasta*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 4. 1997.
19. **Obarska-Pempkowiak H., Kowalik P., Tuszyńska A., Gajewska M.:** *Doświad-czenia z eksploatacji oczyszczalni hydrofitowych*. Instal nr 5. 2004.
20. **Obarska-Pempkowiak H., Ozimek T., Chmiel W.:** *Protection of surface water against contamination by wetland systems*. Water Science and Technology vol. 44, no 11÷12, 2001
21. **Obarska-Pempkowiak H., Pempkowiak J., Falkowski W.:** *Propozycje poprawy czystości wód potoku przepływającego przez Ogród Zoologiczny*. Seminarium Na-ukowe Fundacji Ochrony Środowiska EKO. „Ochrona Wód”, Rybnik 1992.
22. **Obarska-Pempkowiak H., Zwara W., Cytawa S.:** *Utilisation of sewage sludge in reed beds and willow plantation*. In: Wastewater sludge: waste or resource? Bień J.,(Ed.), vol. 2, Tech. Univ. of Czestochowa, Poland, 1997.
23. **Perttu K.L.:** *Production of energy carries in short-rotation forestry in Sweden*. In: W.H. Bloss, F.Pfirterer (Eds.) Advances in solar energy technology, Pergamon Press, Oxford 1987.
24. **Perttu K.L.:** *Intensive short rotation forestry for energy purposes in Sweden*. Swe-dish University of Agricultural Sciences, Uppsala 1988, unpublished manuscript.
25. **Perttu K.L.:** *Filtry roślinne - połączenie produkcji energii oraz detoksykacji ście-ków i osadów ściekowych*. Aura, 1991.

Experiences from Application of *Salix viminalis* for Water and Sewage Treatment

Abstract

Willow (*Salix*) is a very popular plant in Poland, a symbol of Polish countryside. It is used for weaving baskets, for production of wicker furniture and for reinforcement of river and lake embankments. It is also a pioneer plant in land reclamation process (dunes, excavations etc.). These practical applications of *Salix* were taken into account when a conception of willow plantations watered with sewage was developed. New application of *Salix* is using it as an energy resource. In the article the up to date experiences with application of willow for removal of pollutants from point and aerial sources and for sewage sludge utilization are described.

At the zoo in Oliwa, along the bed of the Rynaszewski Stream, the main inflow of the Jelitkowski Stream, a set of 5 hygrophite facilities was constructed for decreasing the load of organic nitrogen and elimination of faecal coli bacteria. The willow buffer zones were located at the edges of the ponds and along the stream bed. The experiences show the buffer willow zones can be used for removal of pollutants from aerial sources.

Laboratory experiments were carried out in order to evaluate the effectiveness of pollutants removal from sewage. The seedlings of willow (*Salix viminalis*) were grown in PE pots, filled with sand. The highest removal efficiency of pollutants (nitrogen, phosphorus, BOD₅ and COD) was observed in the pots irrigated with biologically treated sewage and the lowest removal efficiency was observed for the pot without plants.

Nine individual household WWTPs with horizontal flow of sewage (HF-CW), inhabited with *Salix viminalis*, working as the second stage of treatment were analysed. The plants were located near Ciechanow, Lublin and in Lubiejewo near Ostrołęka.

On the basis of laboratory and field experiments it was proved that *Salix viminalis* can be applied for treatment of sewage in individual household treatment plants. Application of willow results in the increase of treatment efficiency in comparison to soil filters.

Sewage sludge utilization in a willow plantation in the WWTP Swarzewo. The investigations were carried out at the pilot willow bed (2400 m² area), planted with *Salix viminalis*. Sewage sludge from the WWTP Swarzewo was then discharged to the bed – in 3 years time the thickness of discharged sludge layer reached 1 m. Studies show willow plantations can be applied for sewage sludge utilization.

In the years 2002÷2003 in southern Sweden the content of heavy metals in soil and biomass in several willow plantations was analysed. All analysed plantations had been irrigated with sewage sludge in the past. The assimilability of metals by the above-ground tissues of willow was analysed with regard to the content of metals in discharged sludge. It was found out that in case of cadmium the uptake by plants was 10 times higher than the content in sludge. On the basis of investigation results and statistical analyses it was postulated that the yearly doses of 9÷10 t d.m. of sludge/ha will exclude potential cadmium accumulation in soil.