

30 lat aplikacji metody hydrofitowej na Pomorzu – postęp i badania

Prof. dr hab. inż. Hanna Obarska-Pempkowiak, dr hab. inż. Magdalena Gajewska, dr hab. inż. Ewa Wojciechowska,
dr inż. Katarzyna Kolečka, dr inż. Arkadiusz Ostojki

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Celem aktualnych dążeń wszystkich działań związanych z szeroko pojętą gospodarką komunalną jest uwzględnienie zasady zrównoważonego rozwoju, aby zaspokajać potrzeby ludności bez pomniejszania zasobów dla przyszłych pokoleń. Zasada zrównoważonego rozwoju polega na wykorzystaniu najlepszych dostępnych technik i praktyk, które pomagają rozwijać się społecznościami, bez uszczerbku dla środowiska przyrodniczego.

Systemy hydrofitowe nazywane często systemami „zielonymi”, z powodu małego zapotrzebowania na energię, stanowią proekologiczną alternatywę dla konwencjonalnych systemów w oczyszczaniu różnych rodzajów ścieków. Obiekty hydrofitowe są wykorzystywane w gospodarce komunalnej do oczyszczania i podczyszczania ścieków: komunalnych, deszczowych i różnych rodzajów przemysłowych, do odwadniania i stabilizacji osadów ściekowych, a także w szeroko pojętej ochronie wód. Usuwanie zanieczyszczeń w systemach hydrofitowych zachodzi dzięki procesom fizycznym, chemicznym i biologicznym. Procesy te zachodzą w środowisku wodno-roślinnym lub grunto-roślinnym. W systemach tych dzięki obecności hydrofitów (roślin wodnych i wodolubnych) tworzą się specyficzne warunki umożliwiające rozwój różnorodnych mikroorganizmów. W rezultacie następuje intensyfikacja procesów utleniania i redukcji, odpowiedzialnych za przebieg procesów zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych. Procesy te są intensyfikowane przez procesy sorpcji, sedymentacji i asymilacji [6, 15].

Celem pracy jest przedstawienie doświadczeń z wdrażania, funkcjonowania oraz eksploatacji systemów hydrofitowych w województwie pomorskim w latach 1984-2014.

PIERWSZE APLIKACJE W REGIONIE

Przykładem pierwszego naturalnego systemu hydrofitowego jest obiekt we Fromborku, gdzie na początku lat osiemdziesiątych XX wieku prowadzono oczyszczanie ścieków komunalnych na trzcinowisku po oczyszczalni mechanicznej (osadnik Imhoffa). Obiekt ten stanowił miejsce zbierania doświadczeń przed ewentualnym rozpowszechnianiem metody.

Trzcinowisko przeznaczone do oczyszczania ścieków zapewniało biologiczny stopień oczyszczania ścieków. Był to wydzielony za pomocą grobli obszar zalewu Wiślanego porośnięty trzciną. Ilość doprowadzanych ścieków wynosiła 850 m³/d. Z przeprowadzonych badań w kwaterze doświadczalnej usuwanie materii organicznej ze ścieków oceniono na poziomie około 50% [21].

Począwszy od 1985 roku ścieki po mechanicznej oczyszczalni doprowadzono punktowo rurociągiem. Następnie ścieki meandrując swobodnie rozlewały się w sposób nieregulowany po powierzchni. Pracę tego obiektu w 1990 roku oceniono w artykule [14]. Określono obszar zasilania ściekami, który wynosił 2,2 ha. Bezpośrednio w sąsiedztwie rury dystrybucyjnej ścieki ulegały spiętrzeniu. Miąższość warstwy ścieków wynosiła

0,4 m, podczas gdy w rejonie wylotu osiągała wartość kilkudziesięciu centymetrów. Czas zatrzymania był równy 6,5 doby. Średnia skuteczność usuwania zanieczyszczeń wynosiła: zawiesina ogólna = 66,2%, BZT₅ = 57,5%, N_{og} = 26,5% i P_{og} = 2,7%.

Kolejne wdrożenie jest rezultatem badań modelowych dotyczących wpływu międzystrefowego napowietrzania ścieków na efektywność usuwania zanieczyszczeń [14]. Ideę tę zastosowano w praktyce w oczyszczalni ścieków komunalnych w miejscowości Przywidz na Pomorzu. Rolę zbiorników międzystrefowych spełniały rowy przedzielone groblami zasiedlonymi trzciną. Przepływ ścieków uzyskano dzięki usytuowaniu obiektu na zboczu wzniesienia. Zaprojektowany system nazwano Trzcinowo Kaskadowym Filtrem Gruntowym (TKFG). TKFG składał się z dwóch części: część wstępną stanowiło typowe złożę korzeniowe zasiedlone trzciną pospolitą, pracujące według metody *Root Zone Method* (RZM) z przepływem poziomym o zmniejszonej powierzchni jednostkowej [1 m²/Równoważną Liczbę Mieszkańców (RLM)] oraz części drugiej, którą stanowił system KFTG złożony z rowów i grobli o powierzchni 1500 m². Efektywność usuwania zanieczyszczeń zwiększała się tu w stosunku do tradycyjnych filtrów nie tylko dzięki wykorzystaniu w celu dotlenienia ścieków bezodpływowych rowów, ale również dzięki znacznej objętości gruntu, przez które przesiąkały ścieki. Oczyszczalnię oddano do eksploatacji w 1992 roku. Na podstawie wyników uzyskanych podczas monitorowania obiektu w latach 1993-1995 wykazano, że średnia skuteczność usuwania zanieczyszczeń wynosiła: BZT₅ = 89,6%, ChZT = 85,7%, zawiesina ogólna = 78,9%, N_{og} = 7,3% i P_{og} = 82,2%.

Trzecim obiektem był staw trzcinowy o powierzchni 1,8 ha w Wieżycy, który wybudowano i oddano do eksploatacji w 1991 roku [10]. Zgodnie z założeniami projektowymi staw miał doczyszczać ścieki komunalne w ilości około 120 m³/d z kilku ośrodków wczasowych w rejonie Pojezierza Kaszubskiego. Według założeń ośrodki te miały doczyszczać ścieki po mechaniczno-biologicznych oczyszczalniach kontenerowych typu KOS-2. W latach 1993-1995 pobierano próby ścieków dopływających i odpływających ze stawu trzcinowego w celu sprawdzenia efektywności usuwania zanieczyszczeń. Średnia skuteczność usuwania zanieczyszczeń w analizowanym okresie badań wynosiła odpowiednio: BZT₅ = 88,7%, ChZT = 80,9%, zawiesina ogólna = 81,5%, N_{og} = 89,6% i P_{og} = 85,8%.

Na podstawie wyników uzyskanych z eksploatacji pierwszych obiektów hydrofitowych na Pomorzu zebrano pierwsze, pozytywne doświadczenia, które wykorzystano w późniejszych aplikacjach opisanych w kolejnych rozdziałach.

ZASTOSOWANIE OBIEKTÓW TRZCINOWYCH W SANITACJI WSI

Dotychczas wykazano w Europie, Ameryce i Australii, że oczyszczalnie hydrofitowe stanowią dobre rozwiązanie proble-

mu oczyszczania ścieków bytowych na terenach niezurbanizowanych pochodzących od nie więcej niż 2000 RLM. Dodatkowo zwykło się projektować oczyszczalnie hydrofitowe dla małej liczby odbiorców jako systemy jednostopniowe, a dla większej (powyżej 50 RLM) jako systemy wielostopniowe o zmiennym poziomym i pionowym przepływie ścieków [6, 13]. W pracy będą przedstawione zarówno doświadczenia z systemami wielostopniowymi pracującymi jako obiekty lokalne, jak i ostatnio wdrożone rozwiązania w postaci wielostopniowych obiektów hydrofitowych zastosowanych jako przydomowe oczyszczalnie ścieków (POŚ).

Wielostopniowe systemy hydrofitowe jako lokalne oczyszczalnie ścieków

Od lat dziewięćdziesiątych XX wieku dla większych jednostek osadniczych (> 50 RLM) preferowane są wielostopniowe systemy hydrofitowe (WSH) składające się z co najmniej dwóch stopni oczyszczania, realizowanych w złożach o zmiennym poziomym i pionowym przepływie ścieków. W Polsce były budowane przede wszystkim systemy hybrydowe ze złożem z poziomym przepływem ścieków na początku biologicznego oczyszczania nazywane często technologią duńską [1]. W rejonie Gdańska w latach 1995-2008 monitorowano pięć lokalnych WSH, prze-

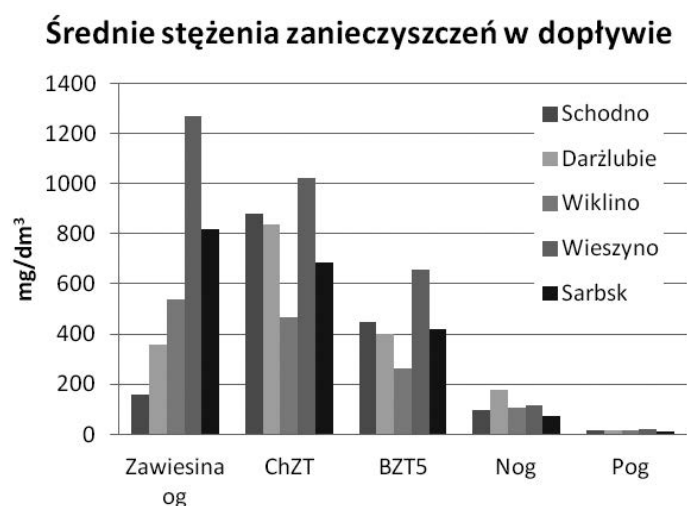
znaczonych do oczyszczania ścieków bytowych: w Darżlubiu w rejonie Pucka, w Wieszynie, Wiklinie i Sarbsku w rejonie Słupska oraz Schodnie koło Kościerzyny. Mieszkańcy tych wsi zaopatrywani są w wodę z wiejskiego wodociągu. Obiekty były zasilane ściekami pochodzącymi od 15 do 750 mieszkańców. Biologiczne oczyszczanie ścieków było poprzedzone usuwaniem zanieczyszczeń w osadnikach gnilnych. Na rys. 1 i 2 przedstawiono odpowiednio: jakość ścieków bytowych doprowadzanych i odprowadzanych z analizowanych WSH.

Najwyższą skuteczność usuwania materii organicznej (wyrażonej w ChZT) uzyskano w obiekcie w Wiklinie, a najniższą w Darżlubiu. Zdolność analizowanych obiektów do usuwania materii organicznej wyrażonej w ChZT i BZT₅ opisano następującym szeregiem:

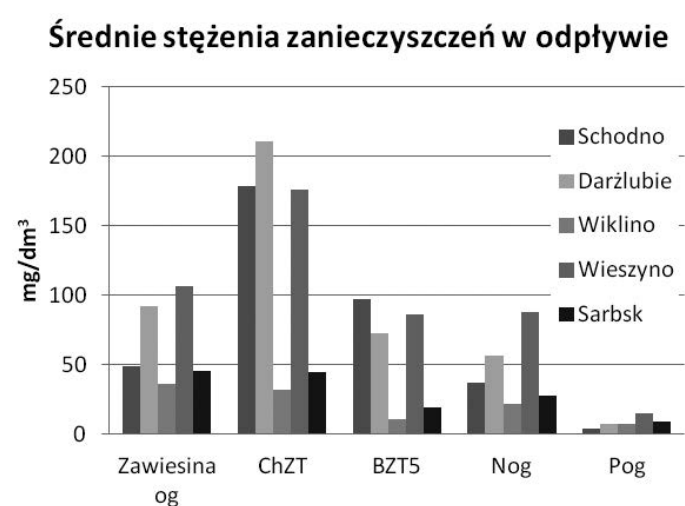
Wiklino > Sarbsk > Wieszyno > Schodno > Darżlubie
ChZT 95,5% > 93,6% > 84,7% > 79,8% > 74,9%

Wiklino > Sarbsk > Wieszyno > Darżlubie > Schodno
BZT₅ 95,9% > 95,1% > 86,9% > 82,1% > 78,5%

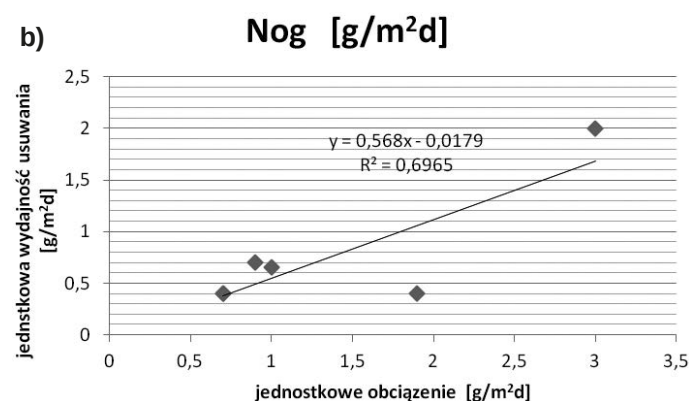
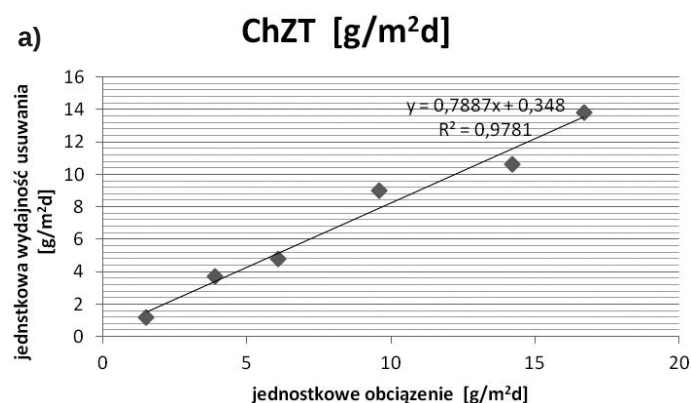
Najwyższą skutecznością usuwania azotu ogólnego charakteryzował się obiekt w Wiklinie, natomiast najniższą obiekt w Wieszynie. Uzyskane średnie efektywności usuwania N_{og} zestawiono następująco:



Rys. 1. Średnie stężenia zanieczyszczeń w ściekach doprowadzanych do pięciu analizowanych WSH w rejonie Gdańska



Rys. 2. Średnie stężenia zanieczyszczeń w ściekach odprowadzanych z pięciu analizowanych WSH w rejonie Gdańska



Rys. 3. Zależność średniej jednostkowej wydajności usuwania a) materii organicznej i b) azotu od średniego obciążenia w analizowanych WSH

Wiklino > Darżlubie > Sarbsk > Schodno > Wieszyno
 N_{og} 79,2% > 67,9% > 62,6% > 61,3% > 23,4%

Najwyższą skuteczność usuwania azotu zaobserwowano w obiekcie w Wiklinie, w którym kwatery złóż z pionowym przepływem (z jęz. ang. VF – *vertical flow*) pracowały naprzemiennie, a ścieki były podawane do nich okresowo. Podobnie w obiekcie w Schodnie (gdzie kwatery złóż VF były naprzemiennie zasilane ściekami za pomocą pompy) stwierdzono wysoką skuteczność usuwania azotu, pomimo bardzo wysokich stężeń azotu w ściekach doprowadzanych do obiektu. Skuteczność usuwania azotu z czterech przy pięciu analizowanych obiektach przekraczała 60%, potwierdzając, że zastosowana konfiguracja złóż naprzemiennych poziomych i pionowych sprzyja skutecznemu usuwaniu związków azotu.

Istotnymi parametrami charakteryzującymi działanie oczyszczalni hydrofitowej są obciążenie oraz jednostkowa wydajność usuwania zanieczyszczeń. Na rys. 3a i b przedstawiono powyższe zależności dla materii organicznej (wyrażonej w ChZT) i azotu ogólnego.

Pomimo szerokiego zakresu stosowanych obciążeń analizowane obiekty charakteryzowały się wysoką jednostkową wydajnością usuwania ChZT i N_{og} . Co więcej, w przypadku materii organicznej, jednostkowa wydajność usuwania zanieczyszczeń była wprost proporcjonalna do jednostkowego obciążenia ładunkiem ChZT.

Metoda hydrofitowa w indywidualnym gospodarstwie domowym

W ramach projektu „Innowacyjne rozwiązanie gospodarki ściekowo-osadowej dla terenów nieurbanizowanych” (współfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr E033/P01/2008/02 oraz Mechanizmu Finansowego EOG i Norweskiego Mechanizmu Finansowego Nr PL0271) zespół Katedry Technologii Wody i Ścieków oraz Katedry Inżynierii Sanitarnej Politechniki Gdańskiej opracował koncepcję i wdrożył model gospodarki ściekowo-osadowej dla indywidualnego gospodarstwa domowego. Przyjęto zasadę (zgodną z art. 42 Prawa Wodnego, 2001), że nowoczesny system sanitarny powinien funkcjonować w miarę możliwości jako zamknięty obieg materii w przyrodzie. Ideą jest pełne wykorzystanie substancji odżywczych, tj. związków: N i P, znajdujących się w ściekach jako substancji nawozowych w glebie. Ścieki pochodzące

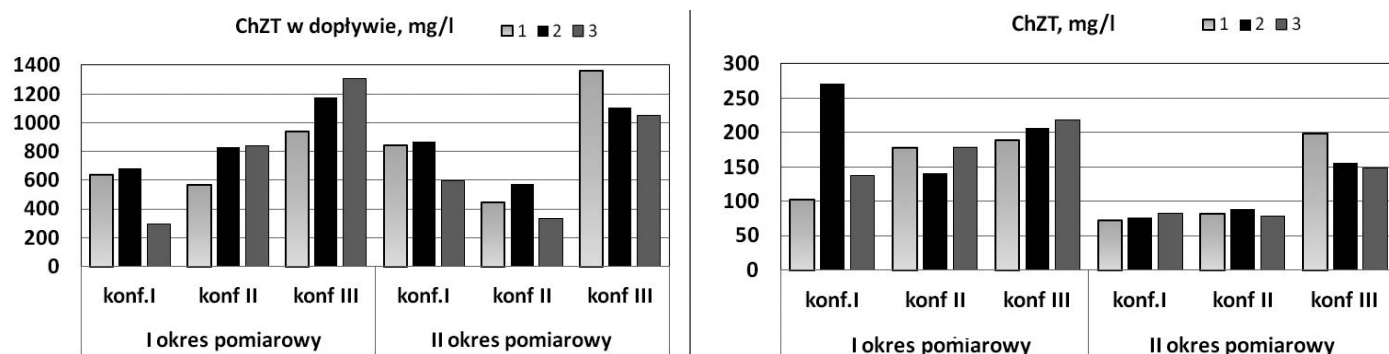
z indywidualnych gospodarstw są oczyszczane u źródła, czyli w indywidualnych przydomowych oczyszczalniach ścieków (POŚ) z wykorzystaniem obiektów hydrofitowych. Powstające w osadniku wstępnym osady są również utylizowane w specjalnie skonstruowanych złożach trzcinowych, które zapewniają ich odwodnienie i stabilizację. Natomiast powstające podczas odwadniania osadów ściekowych odcieki są zwracane do POŚ [16, 17]. W lipcu 2009 roku w ramach wspomnianego projektu wybudowano, na terenie gminy Stężycza, dziewięć oczyszczalni hydrofitowych, po trzy z każdej z zaproponowanych konfiguracji (rys. 4). Szczegółowy opis konfiguracji opisano w pracy [17].

Na rys. 4 przedstawiono wartości średnich stężeń zanieczyszczeń w ściekach doprowadzanych i odprowadzanych do analizowanych obiektów. Wartości średnie podano dla dwóch okresów badań: 2010-2011 (10 serii pomiarowych odnoszących się do wszystkich sezonów) i 2012-2013 (4 serie pomiarowe – okres poza wegetacyjny od października do maja).

Analiza wyników monitoringu funkcjonowania obiektów pozwoliła wykazać m.in., że systemy hydrofitowe stanowią rozwiązanie proekologiczne spełniające obowiązujące wymogi prawne w oczyszczaniu ścieków z indywidualnych gospodarstw domowych. Obiekty te były zasilane ściekami o wyższych wartościach stężeń w porównaniu z obiektami w innych krajach Europy (ChZT wyższe od 150 do 300%, N_{og} o 200%). W pierwszych dwóch latach eksploatacji skuteczność usuwania wynosiła dla: BZT₅ 64,0 ÷ 92,0%, N_{og} 44,0 ÷ 77,0%, P_{og} 24,0 ÷ 66,0%. Po trzech latach eksploatacji średnia skuteczność usuwania zanieczyszczeń wzrosła o 12 ÷ 20% (z wyjątkiem związków fosforu). Wykazano również, że w czwartym roku eksploatacji wzrosło stężenie azotanów (V) w odpływie w konfiguracji ze złożami pionowymi. Skuteczność usuwania materii organicznej i azotu była najwyższa w konfiguracji z sekwencyjnie pracującymi złożami pionowymi (tj. w konfiguracji II). Na podstawie przeprowadzonych wizji lokalnych utwierdził się pogląd, że w indywidualnych oczyszczalniach przydomowych właściciele obiektów niechętnie podejmują działania w kierunku zagospodarowywania osadów ściekowych powstających osadnikach.

METODA HYDROFITOWA W OCZYSZCZANIU ODCIEKÓW O WYSOKICH STĘŻENIACH ZANIECZYSZCZEŃ

Jednym z bardzo istotnych problemów w gospodarce komunalnej jest oczyszczanie odcieków powstających na składowiskach odpadów oraz podczas odwadniania prefermento-



Rys. 4. Średnie wartości stężeń charakterystycznych zanieczyszczeń w ściekach oraz skuteczność ich usuwania w POŚ w gminie Stężycza, województwo pomorskie

wanych osadów ściekowych w miejskich oczyszczalniach. Ich oczyszczanie jest bardzo kosztowne i często trudne z powodu znacznych zmian ilości i składu w czasie oraz bardzo niekorzystnego wpływu na pracę konwencjonalnych oczyszczalni ścieków. Z tego powodu w ramach projektu badawczego PL 0085 „Nowe metody redukcji emisji zanieczyszczeń i wykorzystania produktów ubocznych oczyszczalni ścieków” finansowanego przez Norweski Mechanizm Finansowy oraz Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego E007/P01/2007/01 prowadzono badania, m.in. nad możliwością zastosowania metody hydrofitowej do oczyszczania odcieków: powstających na składowiskach (OS) oraz generowanych podczas odwadniania osadów ściekowych na wirówkach (OW). W 2008 roku wybudowano dwa obiekty pilotowe składające się z trzech złóż hydrofitowych: dwóch sekwencyjnie pracujących złóż z pionowym przepływem (VSSF → VSSF) oraz następującego po nich złoża z poziomym przepływem ścieków (HSSF) [19].

Średnie wartości stężeń zanieczyszczeń doprowadzanych i odprowadzanych z pilotowych obiektów do oczyszczania odcieków z wirówek i odcieków ze składowiska przedstawiono na rys. 5.

Uzyskane wyniki podczas dwuletniego okresu monitorowania obiektów pilotowych pozwoliły wykazać, że obiekty pilotowe zapewniały skuteczne usuwanie zanieczyszczeń odpowiednio: z odcieków z wirówek (OOS): ChZT – 76,0% i $N-NH_4^+$ – 93,0% i z odcieków ze składowiska (OS): ChZT – 87,3 % i $N-NH_4^+$ – 94,4%. Na podstawie charakterystycznego ilorazu $BZT_5/ChZT$, wynoszącego początkowo 0,3 dla OOS i 0,14 dla OS (który uległ obniżeniu do wartości 0,1 dla OOS i zaledwie 0,008 dla OS w oczyszczanych odciekach) wykazano, że występowała w nich materia organiczna niepodatna na biodegradację

[3, 24]. Analiza otrzymanych wyników potwierdziła, że odcieki, pomimo bardzo małych stężeń materii organicznej podatnej na rozkład biologiczny (BZT_5), były efektywnie oczyszczane w wielostopniowych systemach hydrofitowych. Porównanie jakości ścieków surowych doprowadzanych do oczyszczalni i odcieków oczyszczonych w hydrofitowym systemie pilotowym wskazuje, że zawracanie odcieków nie powinno negatywnie wpływać na pracę oczyszczalni [4, 19].

ZASTOSOWANIE METODY HYDROFITOWEJ W OCZYSZCZANIU ŚCIEKÓW DESZCZOWYCH

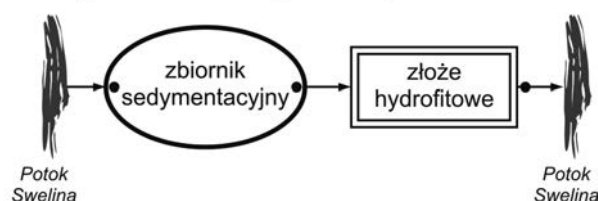
W Polsce przeważają systemy kanalizacji rozdzielczej i wiele sieci deszczowych odprowadza ścieki bezpośrednio do odbiorników, bez jakiegokolwiek oczyszczania, stanowiąc poważne zagrożenie dla wód powierzchniowych. Jest to szczególnie niebezpieczne dla płynących przez miasta małych cieków, dla których gwałtowne zrzuty z systemów kanalizacji deszczowej przekraczają możliwości hydrauliczne, a wprowadzany ładunek zanieczyszczeń stanowi poważne źródło zanieczyszczenia. Najbardziej poważny problem w odpływach z kanalizacji deszczowej stanowią zawiesiny [11].

Obecnie w ramach projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka prowadzone są badania w obiekcie hydrotechniczno-hydrofitowym zasilanym wodami Potoku Swelina, do którego odprowadzane są ścieki deszczowe. Pomiary wykonywane są w poszczególnych etapach oczyszczania w tym systemie (rys. 6).

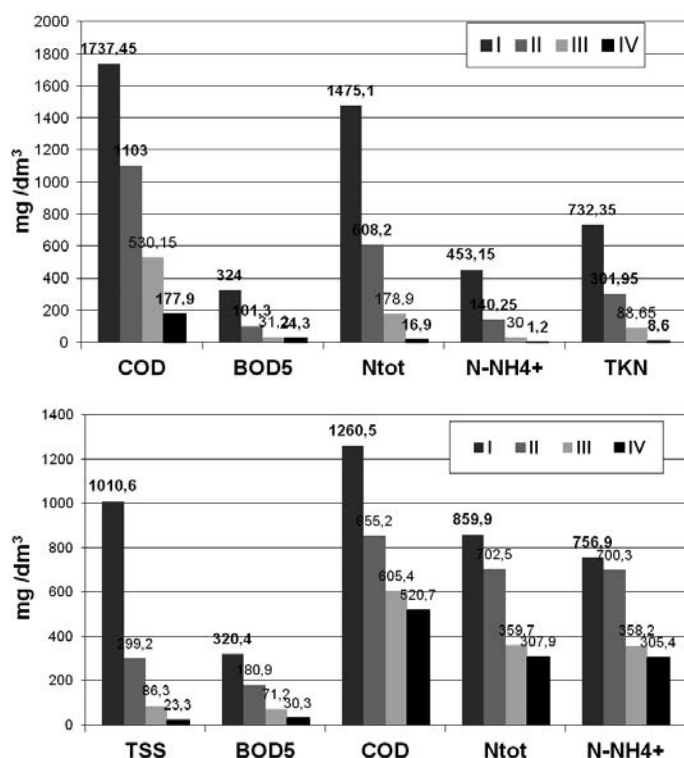
Celem badań jest określenie dyspersji oraz rozmieszczenie zanieczyszczeń w wyodrębnionych frakcjach cząstek zdyspergowanych w wodach potoku zasilonych ściekami opadowymi. Wielkość cząstek jest głównym czynnikiem wpływającym na ich fizyczne zachowanie oraz właściwości sorpcyjne. Pełnią one funkcję „nośników” hydrofobowych mikrozanieczyszczeń organicznych, a także związków fosforu, azotu i metali ciężkich. Przeprowadzone badania w tym zakresie uzupełniają brak dostatecznej wiedzy, która może być kluczowa, m.in. przy podejmowaniu decyzji dotyczących sposobów rozwiązania kanalizacji deszczowej oraz urządzeń podczyszczających ścieki opadowe odprowadzane z terenów zurbanizowanych.

Porównanie jakości wód i ścieków opadowych pobieranych na terenie obiektu hydrotechniczno-hydrofitowego przy pogodzie deszczowej i bezdeszczowej podano w tabl. 1 ÷ 3.

obekt hydrotechniczno-hydrofitowy



Rys. 6. Schemat kolejnych stopni oczyszczania w systemie hydrotechniczno-hydrofitowym na Potoku Swelina wraz z miejscem poboru próbek (•)



Rys. 5. Średnie wartości stężeń zanieczyszczeń doprowadzanych i odprowadzanych z pilotowych obiektów do oczyszczania odcieków z wirówek (OW) i odcieków ze składowiska (OS), mg/dm³

Tabl. 1. Jakość wód Potoku Swelina zasilanego ściekami opadowymi w próbkach pobieranych po kolejnych stopniach oczyszczania przy pogodzie deszczowej i bezdeszczowej

Miejsce poboru i parametr/pogoda	Dopływ do obiektu		Po zbiorniku sedimentacyjnym		Odpływ	
	pogoda deszczowa	pogoda bezdeszczowa	pogoda deszczowa	pogoda bezdeszczowa	pogoda deszczowa	pogoda bezdeszczowa
Zawiesina og, mg/l	272,0	163,1	249,0	147,9	173,0	139,4
BZT ₅ , mgO ₂ /l	15,6	11,6	15,0	10,1	12,2	7,8
ChZT, mgO ₂ /l	98,3	60,5	95,3	56,5	81,8	48,7

Tabl. 2. Średni udział procentowy frakcji w zawiesinie ogólnej dla analizowanych punktów pomiarowych

Miejsce poboru/pogoda	Dopływ do obiektu	Po zbiorniku sedimentacyjnym	Odpływ
Pogoda deszczowa	36,4%	69,9%	63,0%
Pogoda bezdeszczowa	82,6%	85,2%	62,4%

Tabl. 3. Spektrum rozmiarów cząstek zanieczyszczeń w próbkach pobieranych po kolejnych stopniach oczyszczania w obiekcie hydrotechniczno-hydrofitowym na Potoku Swelina, przy pogodzie deszczowej i bezdeszczowej [µm]

Miejsce poboru/pogoda	Dopływ do obiektu		Po zbiorniku sedimentacyjnym		Odpływ	
	zakres	50%*	Zakres	50%*	zakres	50%*
Pogoda deszczowa	0,05 ÷ 2000	50	0,05 ÷ 2000	30	0,05 ÷ 2000	40
Pogoda bezdeszczowa	0,05 ÷ 2000	105	0,05 ÷ 2000	102	0,05 ÷ 2000	120

* – 50% analizowanych cząstek charakteryzowało się mniejszymi średnicami zastępczymi

Przeprowadzone badania składu granulometrycznego wykazały, że zanieczyszczenia doprowadzane wraz ze ściekami opadowymi i wodami Potoku do zbiornika retencyjnego różniły się znacznie wielkością. Średnice zastępcze zawiesin ogólnych w dopływie zmieniały się w szerokim zakresie od 0,05 do 2000 µm, zarówno przy pogodzie deszczowej, jak i bezdeszczowej. Przy pogodzie deszczowej charakterystyczny jest większy procentowy udział cząstek od 50 do 2000 µm, podczas gdy przy pogodzie bezdeszczowej przeważają cząstki o wymiarach od 2 do 1000 µm.

Analiza rozkładu wielkości cząstek zawiesin dopływających do złoża hydrofitowego wykazała, że podczas pogody deszczowej zmniejsza się w odpływie ze zbiornika udział cząstek o wymiarach mniejszych od 80 µm, ale za to zwiększa udział cząstek o wymiarach większych mieszczących się w przedziale średnic zastępczych od 400 do 2000 µm. Podobnie w odpływie (czyli po złożu hydrofitowym) w okresie bezdeszczowym dominują cząstki o średnicach od 10 do 120 µm, podczas gdy przy pogodzie deszczowej ich udział łącznie wynosi poniżej 10%, natomiast dominują cząstki o średnicach od 80 do 2500 µm [5].

METODA HYDROFITOWA DO STABILIZACJI I ODWADNIANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Metoda hydrofitowa stosowana jest również do stabilizacji i odwadniania osadów ściekowych. Metodę tę po raz pierwszy wdrożono w latach osiemdziesiątych XX wieku w Danii i Niemczech.

Hydrofitowa metoda stabilizacji osadów ściekowych polega na stosowaniu wielowarstwowych zalewów osadów ściekowych, bez konieczności ich wcześniejszego odwodnienia lub zagęszczenia. Obiekty hydrofitowe są budowane w postaci konstrukcji betonowych (złoża) lub uszczelnionych zbiorników ziemnych (baseny) zasiedlonych hydrofitami, najczęściej trzciną pospolitą (*Phragmites australis*). Ważny element tego rodzaju obiektów stanowi drenaż. Zadaniem drenażu jest odprowadzenie wód odciekowych powstających w procesie odwadniania oraz w dalszym etapie doprowadzenie tlenu do stabilizowanych osadów [7, 8, 12].

Na Pomorzu badania nad obiektami hydrofitowymi stabilizującymi i odwadniającymi osady ściekowe były prowadzone w Darżlubiu oraz Swarzewie koło Pucka [16]. Stosowane dawki osadów, częstotliwość zasilania oraz liczbę kwater z trzciną podano w tabl. 4.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów w obiekcie trzcinowym stabilizującym osady ściekowe najwyższą intensywność odprowadzenia wód odciekowych wynoszącą średnio 0,081 dm³/min·m zanotowano po 1,5 godziny od momentu rozpoczęcia wylewania osadów [25]. Obiekty te charakteryzowały się bardzo wysoką efektywnością odwadniania, co dalej prowadziło do znacznego zmniejszenia objętości doprowadzonych osadów (tabl. 5).

Na podstawie wyników uzyskanych podczas monitorowania obiektu w Darżlubiu określono charakterystyczny skład osadów stabilizowanych, który odpowiednio wynosił: materia organiczna = 46,3% s.m., N_{og} = 2,35 % s.m., 0,23% s.m. Dodatkowo badania potwierdziły, że średnie stężenia metali ciężkich w osadach

Tabl. 4. Charakterystyka obiektów trzcinowych z Pomorza [2, 25]

Miejscowość	Rodzaj osadów	Dawka osadów m ³ /m ² rok	Częstotliwość zasilania	Liczba Kwater
Darżlubie	Stabilizowany beztlenowo	1,2	8-krotnie w roku	2
Swarzewo	Stabilizowany beztlenowo	3,2	w okresie adaptacyjnym w ilości 10 m ³ /d; potem zmiennie od kwietnia do listopada	1

Tabl. 5. Skuteczność odwadniania osadów ściekowych w obiektach trzcinowych na Pomorzu [18]

Obiekt	Obciążenie osadem obiektów, [m ³ /rok]		Wysokość warstwy osadu doprowadzonego [m]	Wysokość warstwy osadu po odwodnieniu [m]	Zmniejszenie objętości [%]
	doprowadzony	pozostały			
Darżlubie	3,2	0,1	3,15	0,18	94,3
Swarzewo	11,0	1,0	10,50	1,50	85,7

Tabl. 6. Stężenia metali ciężkich w osadach utylizowanych w obiektach trzcinowych w Darżlubiu i Swarzewie [18]

Obiekt	Metale ciężkie						
	Cu	Pb	Ni	Co	Zn	Cr	Cd
Darżlubie	28,20	31,39	16,68	4,08	869,32	22,46	1,69
Swarzewo	21,96	16,44	15,44	1,28	649,32	7,04	0,92
Wartości dopuszczalne przy rolniczym wykorzystaniu	800,00	500,00	100,00	–	2500,00	500,00	10,00

stabilizowanych w obiektach hydrofitowych były znacznie poniżej wartości dopuszczalnych podczas wykorzystywania osadów do celów rolniczych na podstawie [22] (tabl. 6).

Stosunkowo niskie stężenia metali ciężkich, a także obecność związków azotu i fosforu wskazują, że ustabilizowane osady ściekowe potencjalnie mogą stanowić cenną substancję nawozową. Dodatkowo dane literaturowe [13] wskazują, że otrzymany produkt jest bezpieczny pod względem mikrobiologicznym.

W ostatnich latach są podejmowane próby wykorzystania obiektów hydrofitowych do odwadniania i stabilizacji osadów powstających w procesie oczyszczania ścieków bytowych w przydomowych oczyszczalniach ścieków oraz pochodzących ze zbiorników bezodpływowych (tzw. szamb). Wymagają one jednak przeprowadzenia badań, w celu opracowania zasad eksploatacji obiektów hydrofitowych wykorzystywanych do stabilizacji osadów.

WNIOSKI

Na podstawie badań związanych z projektowaniem, budową i zastosowaniem obiektów hydrofitowych na Pomorzu w okresie ostatnich 30 lat sformułowano następujące wnioski:

Pierwsze aplikacje stanowiły systemy hydrofitowe wykorzystywane do biologicznego doczyszczania ścieków komunalnych w warunkach lokalnych wdrożone w latach 1984-1992.

Późniejsze aplikacje odnoszą się do oczyszczania ścieków w warunkach lokalnych w WSH oraz w POŚ, których funkcjo-

nowanie ma na celu realizację procesu oczyszczania ścieków zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, tzn. polegające na wykorzystaniu procesów naturalnych i eliminacji produktów ubocznych.

Na podstawie badań realizowanych w pilotowych obiektach hydrofitowych realizowanych w latach 2008-2010 wykazano, że mogą zapewnić skuteczne usuwanie toksycznych zanieczyszczeń z wód odciekowych generowanych podczas odwadniania osadów oraz z odcieków powstających na składowiskach odpadów komunalnych.

Nowym rozwiązaniem jest wykorzystanie systemów hydrofitowych do oczyszczania ścieków opadowych i ochrony cieków przed dopływem znacznych ładunków zanieczyszczeń podczas opadów.

Obiekty hydrofitowe zapewniają skuteczne odwadnianie i stabilizację osadów ściekowych na poziomie urządzeń mechanicznych stosowanych w wysokoefektywnych oczyszczalniach ścieków.

LITERATURA

1. Brix H., Johansen N. H.: Treatment of domestic sewage in a two-stage constructed wetland design and retention in natural and constructed wetland. Leiden: Backhuys Publishers, 1999, 155-165.
2. Cytawa S.: Odwadnianie osadów na poletkach trzcinowych. Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego w ramach programu szkoleniowego „Zlewnia Rzeki Rawki”, (Red.) Schleßler, „Przeróbka, wykorzystanie i usuwanie osadów ściekowych” Warszawa 1996, 62-65.

3. Gajewska M.: Wpływ składu chemicznego ścieków i odcieków na specjację, konwersję i usuwanie azotu w oczyszczalniach hydrofitowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2013, Seria Monografie, nr 136, 171G.
4. Gajewska M., Obarska-Pempkowiak H.: The Role of SSVF and SSHE beds in Concentrated Wastewater Treatment, Design Recommendation. *Water Science and Technology* 64 (2), 2011, 431-439.
5. Gajewska M., Stosik M., Wojciechowska E., Obarska-Pempkowiak H.: Wpływ technologii i oczyszczania ścieków na spektrum rozmiarów cząstek w odpływie. *Rocznik Ochrony Środowiska*, Tom 15, (część 2) 91, 2013, 1191-1207.
6. Kadlec R.H., Wallace S.: *Treatment wetlands*. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton: London. New York 2009, 1116.
7. Kolečka K., Obarska-Pempkowiak H.: The quality of sewage sludge stabilized for a long time in reed basins. *Environment Protection Engineering* 34 (3), 2008, 13-20.
8. Kolečka K., Obarska-Pempkowiak H.: Operation of reed systems used to stabilisation of sewage sludge. *Polish Journal of Environmental Studies*, 6, 2009, 60-69.
9. Kowalik P., Obarska Pempkowiak H.: Poland. In: *Constructed Wetlands for Wstewater Treatment in Europe*. Eds: J. Vymazal, H. Brix, M. B. Green, R. Harbel. Backhuys Publishers, Leiden 13, 1998, 227-240.
10. Kowalik P., Obarska-Pempkowiak H., Toczyłowska I.: Trzeci stopień oczyszczenia ścieków w stawie trzcinowym o serpentynowym kształcie. Problemy odprowadzania i unieszkodliwiania ścieków. III Kongres Kanalizatorów Polskich "Polkan", PZITS, Łódź 1991, 253-268.
11. Królikowska J., Królikowski A.: *Wody opadowe*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, 2012.
12. Nielsen S.: Sludge treatment reed bed facilities – organic load and operation problems. *Water Science and Technology* 63 (5), 2011, 941-947.
13. Nielsen S.: Helsing sludge reed bed systems – reduction of pathogenic microorganisms. *Water Science and Technology* 56 (3), 2007, 175-182.
14. Obarska-Pempkowiak H.: *Oczyszczanie ścieków metodą hydrobotaniczną z wykorzystaniem filtrów gruntowych i stawów ściekowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo 38, Gdańsk 1992.
15. Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E.: *Hydrofitowe oczyszczanie wód i ścieków*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.
16. Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E.: Skuteczność oczyszczania ścieków bytowych w przydomowych oczyszczalniach hydrofitowych na Pojezierzu Kaszubskim *Rocznik Ochrony Środowiska*. Tom 15, (część 1) 3, 2013, 81-96.
17. Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Ostojki A.: *Oczyszczalnia w ogrodzie. Poradnik jak zastosować innowacyjne rozwiązanie gospodarki ściekowej i osadowej z wykorzystaniem systemów hydrofitowych*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, 2012.
18. Obarska-Pempkowiak H., Tuszyńska A.: Utylizacja osadów ściekowych w złożach trzcinowych. I Kongres Inżynierii Środowiska. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 12 (33), Lublin 2002, 341-360.
19. Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Ostojki A.: The concept of sewage-sludge management system for an individual household. W: *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*, ed. J. Vymazal. London: Springer, 2010, 179-221.
20. Obarska-Pempkowiak H., Tuszyńska A., Sobociński Z.: Polish experience with sewage sludge dewatering in reed systems. *Water Science and Technology* 48 (5), 2003, 111-117.
21. Rajkiewicz M.: 1987. Sposób biologicznego oczyszczania ścieków i oczyszczalnia dostosowana do tego sposobu. Zgłoszenie patentowe Nr P-263862 z dn. 1987.01.27.
22. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. nr 134, poz. 1140).
23. Vymazal J.: *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. *Water*, 2, 2010, 530-549.
24. Wojciechowska E.: Procesy i efektywność usuwania zanieczyszczeń z odcieków ze składowisk odpadów komunalnych w oczyszczalniach hydrofitowych. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 106, 2013.
25. Zwara W., Obarska-Pempkowiak H.: Polish experience with sewage sludge utilization in reed beds. *Water Science and Technology*, 41 (1), 2000, 65-68.