



Oczyszczalnie hydrofitowe jako wdrożenie założeń idei gospodarki o obiegu zamkniętym

*Katarzyna Kolecka, Hanna Obarska-Pempkowiak,
Magdalena Gajewska
Politechnika Gdańska*

1. Wstęp

Komisja Europejska w dn. 2 grudnia 2015 r. przyjęła nowy, ambitny pakiet dotyczący przekształcenia dotychczasowych działań na wdrożenia funkcjonujące w obiegu zamkniętym (tzw. circular economy) (Komisja Europejska 2015). Gospodarka o obiegu zamkniętym to koncepcja zakładająca ograniczenie do minimum wpływu oddziaływania na środowisko podczas tworzenia produktów, polegająca na wyborze substratów oraz stosowanej technologii, która umożliwi ponowne wykorzystanie emitowanych do środowiska składników i energii (zanieczyszczeń). Idea gospodarki o obiegu zamkniętym polega na zamknięciu cyklu życia produktu. Idea ta ma zmienić dotychczasowe podejście, określane jako linearne, wykorzystania produktu (tj. produkcja – użytkowanie – usunięcie odpadów) na zamknięty obieg materii i energii (tj. produkcja – użytkowanie – wykorzystanie odpadów w kolejnym cyklu produkcyjnym) (Abec 2015). Działania te mają pozwolić na maksymalne wykorzystanie stosowanych surowców, wytwarzanych produktów i produktów ubocznych, aby przyczynić się do oszczędności energii i zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych (Braungart i in. 2007).

W nowym pakiecie Komisji Europejskiej (2015) wśród planowanych działań dotyczących gospodarki komunalnej i wód powierzchniowych wymieniane są m.in.:

- opracowanie norm środowiskowych dla surowców wtórnych, w celu ułatwienia ich identyfikacji i zwiększenia potencjału ich wykorzystania w gospodarce,
- wdrożenie strategii dotyczącej tworzyw sztucznych w gospodarce o obiegu zamkniętym, odnoszącej się do kwestii recyklingu, biodegradowalności i obecności substancji niebezpiecznych w tworzywach sztucznych w myśl realizacji działań celów zrównoważonego rozwoju ukierunkowanych na znaczne zmniejszenie ilości zanieczyszczeń odprowadzanych do mórz, które m.in. ulegają bioakumulacji w organizmach zwierząt morskich i ptaków,
- działania związane ze zmniejszenia ilości odpadów spożywczych o połowę do roku 2030, w tym wspólna metodyka pomiarów, poprawa oznaczania dat ważności i wykorzystanie narzędzi umożliwiających zrównoważony rozwój,
- zmiana rozporządzenia w sprawie nawozów, aby ułatwić identyfikowanie nawozów organicznych i wytwarzanych z odpadów oraz wspieranie działań związanych z rolą biologicznych składników pokarmowych w środowisku,
- działania na rzecz wtórnego wykorzystywania wody, w tym wniosek ustawodawczy w sprawie minimalnych wymogów dotyczących wtórnego wykorzystywania oczyszczonych ścieków (Komisja Europejska 2015).

W ideę gospodarki zamkniętej bardzo dobrze wpisują się systemy hydrofitowe stosowane w gospodarce komunalnej do oczyszczania wód i ścieków, pochodzących ze źródeł punktowych i obszarowych (Obarska-Pempkowiak i in. 2015a, 2015 b, Adyel i in. 2016), m.in. w celu usuwania specyficznych zanieczyszczeń, np. farmaceutyków, metali ciężkich i niebezpiecznych trwałych zanieczyszczeń mikro- i nanoorganicznych, które ulegają bioakumulacji w organizmach żywych (Vymazal i Brezinová 2015). Stosowane są do oczyszczania odpływu z kanalizacji ogólnospławnej (Masi i in. 2017), do oczyszczania ścieków oraz odcieków z przemysłu (Vymazal 2014, Dąbrowski i in. 2017), do nieczystości ciekłych ze zbiorników bezodpływowych (Karolinczak i Dąbrowski 2017), czy do odwadniania i stabilizacji osadów ściekowy w celu ich późniejszego wykorzystania w rolnictwie (Kołęcka i in. 2017, Pempkowiak i Obarska-Pempkowiak 2002, Boruszko i in. 2017). Systemy hydrofitowe



mogą być stosowane jako trzeci stopień doczyszczenia ścieków, umożliwiając ich późniejsze wykorzystanie (Ayaz 2008). Budowane są również jako strefy buforowe wzdłuż jezior i rzek (Obarska-Pempkowiak i in. 2011). Dodatkowo systemy te są bardzo atrakcyjne pod względem ekonomicznym (Karolinczak i in. 2015).

Ze względu na liczne zastosowania, są tworzone różne rodzaje systemów hydrofitowych i są one wciąż rozwijane w okresie ostatnich 20 lat. Warunki siedliskowe w systemach hydrofitowych tworzonych jako rozwiązania ekoinżynierskie symulują warunki charakterystyczne dla ekosystemów bagiennych, czyli zapewniają nasycenie gruntów wodą przez znaczną część roku i rozwój roślin wodnych i wodnolubnych, tzw. hydrofitów. W celu uzyskania lepszych efektów, w niektórych przypadkach stosowane są dodatkowe zabiegi techniczne jak np. wymuszone napowietrzanie (Nivala i in. 2013) czy stosowanie nowych wypełnień do usuwania fosforu (Józwiakowski i in. 2017). Tego typu systemy mogą być tak zaprojektowane, aby tworzyły integralną część ogrodu lub parku. Mogą być projektowane wewnątrz budynków, np. na ich dachach (Masi i in. 2015), czy np. na statkach (Van Oirschot i in. 2015).

Poza typowymi zadaniami systemów hydrofitowych, jakimi są oczyszczanie wód i ścieków czy odwadnianie i stabilizacja osadów, pełnią one funkcje typowych ekosystemów oraz usuwają CO₂ z atmosfery w procesach realizowanych przez hydrofity, są siedliskiem wielu organizmów. Zwiększają transpirację, przyczyniają się do gromadzenia wody, poprawiając retencję. Przy zastosowaniu systemów hydrofitowych mogą być tworzone obszary zielone w miejskiej zabudowie, oczekiwane przez mieszkańców aglomeracji miejskich.

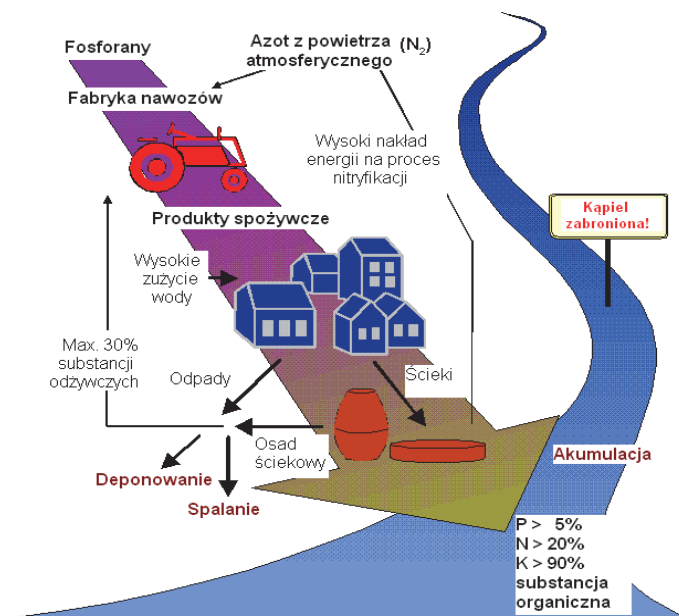
Celem pracy jest przedstawienie znaczenia systemów hydrofitowych jako istotnych elementów w kreowaniu założeń gospodarki o obiegu zamkniętym.

2. Gospodarka wodno-ściekowa na obszarach miejskich

W przyszłości podejście do gospodarki wodno-ściekowej będzie wymagało znaczących zmian. W celu spełnienia wymogów obiegu zamkniętego należy zmienić obecny sposób odprowadzania i oczyszczania ścieków. Obecnie zużyte wody i powstające nieczystości są przeważnie wspólnie gromadzone, transportowane za pomocą systemu kanalizacyj-



nego do oczyszczalni ścieków, gdzie są oczyszczone i dalej odprowadzane do odbiorników, zwykle wód powierzchniowych (rys. 1). Również wody opadowe za pomocą systemu kanalizacyjnego odprowadzane są jak najszybciej do odbiornika (rys. 1).



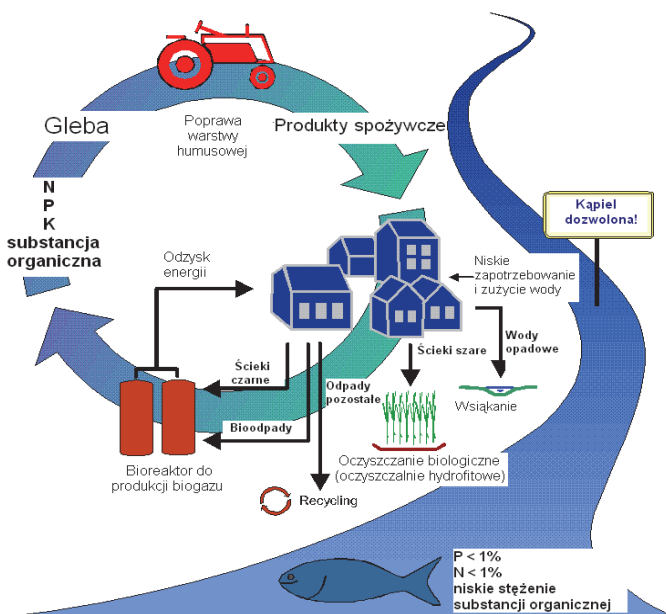
Rys. 1. Dotychczasowe funkcje gospodarki wodno-ściekowej na terenach miejskich, opracowanie własne

Fig. 1. The current functions of water and wastewater management in urban areas, own elaboration

Takie podejście powodują "utrata" cennych substancji biogenych, które trafiając do cieków wodnych powodują ich eutrofizację.

W nowym podejściu uwzględniającym obieg zamknięty konieczny będzie rozdział ścieków (separację) na frakcje użyteczne i szkodliwe w miejscu powstawania (Yacooubi i Fresner 2006). Takie systemy będą musiały być zaprojektowane dla konkretnego źródła z uwzględnieniem możliwości ponownego użycia wody. W tym celu substancje szkodliwe stanowiące zagrożenie dla środowiska przyrodniczego będą musiały być eliminowane, jednak nie w oczyszczalni ścieków, ale w miejscu ich powstawania. Charakterystyczną cechą przyszłych systemów gospodarki

wodno-ściekowej będzie systematyczne podejście do rozwiązywania problemów, zintegrowane w kompleksowe zarządzanie przepływem ścieków, które będzie uwzględniało wszystkie obszary miejskie. Z założenia, z produkowanych np. zakładach przemysłowych ścieków będzie odzyskiwana energia oraz substancje biogenne, a same ścieki w miarę możliwości będą oczyszczane na miejscu. Natomiast odzyskane substancje i biogenne będą mogły zostać wykorzystane w rolnictwie, a nie będą przyczyniać się do eutrofizacji cieków wodnych (rys. 2). Takie podejście przyczyni się do zwiększenia bioróżnorodności biologicznej, poprawy klimatu w warunkach lokalnych (zmniejszenie miejskich wysp ciepła), pozwoli na tworzenie nowych miejsc rekreacji, czy miejsc, gdzie produkować będzie się żywność.



Rys. 2. Schemat zrównoważonej gospodarki wodno-ściekowej funkcjonującej zgodnie z zasadami zamkniętego obiegu, opracowanie własne

Fig. 2. The scheme of sustainable water and wastewater management in accordance to circular economy, own elaboration

3. Znaczenie systemów hydrofitowych w gospodarce o obiegu zamkniętym

Systemy hydrofitowe obecnie są powszechnie akceptowane jako technologia wykorzystywana przede wszystkim do oczyszczania różnego rodzaju ścieków i jako systemy ochrony wód oraz obiekty do odwadniania i stabilizacji osadów ściekowych. Jednak wraz ze zmianą podejścia i ukierunkowania się na gospodarkę o obiegu zamkniętym przed tego typu systemami stawiane są nowe cele i wymagania. Należy pamiętać, że zmiana podejścia będzie prawdopodobnie musiała nastąpić już na poziomie gospodarstwa domowego, gdzie w przyszłości konieczna będzie segregacja ścieków. Oczyszczanie wytwarzanych ścieków będzie zależało od odbiornika, do którego będą odprowadzane. Z tego względu przed systemami hydrofitowymi pojawiają się następujące nowe cele:

1. Ponowne wykorzystanie wody

- oczyszczanie ścieków szarych (wewnątrz lub na zewnątrz budynku) w celu ich ponownego użycia lub do rekreacji; prawdopodobnie oczyszczanie jedynie fazy ciekłej (faza stała będzie zbierana i utylizowana oddzielnie) (Masi i in. 2016),
- oczyszczanie i magazynowanie wody deszczowej (Nolde 2007);
- usuwanie trwałych zanieczyszczeń organicznych o niskich stężeniach (Matamoros i in. 2016, Verlicchi i Zambello 2014),
- doczyszczanie ścieków po procesie oczyszczania jako trzeci stopień w celu ponownego wykorzystania oczyszczanych ścieków (Ayaz 2008, Rousseau i in. 2008).

2. Odzysk związków biogennych

- produkcja nawozów z osadów ściekowych (Kołęcka i in. 2017, Nielsen i Bruun 2015),
- wstępne oczyszczenie przed fertygacją (redukcja liczby mikroorganizmów chorobotwórczych, oddzielenie fazy stałej i ciekłej),
- odzysk związków fosforu ze ścieków za pomocą nowych wypełnień zapewniających efektywną adsorpcję (Jóźwiakowski i in. 2017).

3. Produkcja energii

- biogazownie – systemy hydrofitowe do oczyszczania wód pofermentacyjnych,
- systemy hydrofitowe jako miejsca do produkcji biomasy.



4. Ekosystemy

- wielofunkcyjne systemy hydrofitowe do gromadzenia wód deszczowych, rekreacji i sztucznych mokradeł,
- tworzenie sztucznych ekosystemów (zielone dachy, zielone ściany, obszary zielone wewnątrz budynków, parki).

Uzyskanie wyżej wymienionych celów jest możliwe przy zastosowaniu odpowiedniej konfiguracji systemów hydrofitowych lub ich połączenia z innymi, dostępnymi technologiami, dzięki którym są bardziej efektywne i ekonomicznie opłacalne, niż dotychczas stosowane metody (Gajewska i Obarska-Pempkowiak 2011).

Do oczyszczania ścieków szarych (które przeważnie zawierają mniej niż 5 mg NH_4^+ /l, bez usuwania azotu) dobrze sprawdzają się proste systemy hydrofitowe o przepływie poziomym (HSSF z ang. Horizontal Subsurface Flow). Prawidłowo zaprojektowane systemy tego typu pracują grawitacyjnie i efektywnie usuwają zawieszinę oraz materię organiczną. Dużą zaletą tego rozwiązania jest niski tzw. "ślad węglowy" (Masi i in. 2010). Systemy hydrofitowe o przepływie pionowym (VSSF z ang. Vertical Subsurface Flow), których wypełnienie najczęściej stanowi piasek, dobrze sprawdzają się do oczyszczania ścieków szarych oraz wód deszczowych czy usuwania trwałych zanieczyszczeń organicznych (Matamoros i in. 2017). W porównaniu do systemów HSSF, systemy VSSF oferują większą elastyczność w odniesieniu do kształtu złoża, chociaż w tym przypadku najczęściej zachodzi konieczność korzystania z urządzeń doprowadzających ścieki pod ciśnieniem (Gross i in. 2007). Jako trzeci stopień doczyszczania ścieków dobrze sprawdzają się systemy hydrofitowe o przepływie powierzchniowym (SFS z ang. Surface Flow Systems). W porównaniu do innych konfiguracji systemy tego typu wyróżniają się znacznie większą bioróżnorodnością (Hsu i in. 2011). Obecność organizmów na powierzchni biomasy (glony, łodygi roślin wynurzonych, pływających i zanurzonych, itp.) sprzyjają adsorpcji trwałych zanieczyszczeń organicznych, które są następnie powoli rozkładane (Matamoros i in. 2016). Zatem duże ilości biomasy w systemie stwarzają warunki do przechwycenia materii organicznej.

Dla odzysku związków biogenych projektuje się i wdraża, tzw. systemy francuskie w postaci złoż trzciniowych (FRB z ang. French Reed Beds). Są to nowe, bardzo obiecujące rozwiązania, których podstawową



zaletą jest bardzo niskie zapotrzebowanie na powierzchnię (ok. 2 m²/mieszkańca) oraz brak konieczności stosowania osadnika gnilnego (Chojnicka i Gajewska 2014). Zasada działania tych systemów polega na tym, że ścieki podawane są na pierwsze złożę porcjami (bez wcześniejszego mechanicznego oczyszczenia). Większość zawiesiny oraz materii organicznej tworzy na złożu powierzchniową warstwę organiczną, bogatą w związki biogenne. Warstwa ta wraz z upływem czasu ulega tlenowej stabilizacji i mineralizacji. Po okresie około 10 lat skompostowana biomasa jest usuwana z systemu i może być wykorzystana do jako materiał strukturotwórczy dla zdegradowanej gleby lub jak nawóz (Paing i in. 2015). System francuski buduje się z dwóch złożów pracujących sekwencyjnie. Drugi etap ma na celu poprawienie efektywność usuwania zawiesiny i materii organicznej, a także zakończenie procesu nitryfikacji (rozpoczętego w pierwszym etapie) oraz w pewnym stopniu również denitryfikacji. Zatem w razie potrzeby istnieje możliwość, aby wykorzystać ścieki oczyszczone w pierwszym etapie jako źródło azotu (zamiast zamknąć obieg azotu w samej oczyszczalni). Do odzysku związków biogenych z osadów ściekowych generowanych w komunalnych oczyszczalniach ścieków są wykorzystywane specjalnie w tym celu skonstruowane złoża trzcinowe, tzw. STRBs (z ang. Sludge Treatment Reed Beds). Metoda ta polega na stosowaniu wielowarstwowych zalewów osadami ściekowymi, bez konieczności ich wcześniejszego odwodnienia lub zagęszczenia (Nielsen 2011, Kołecka i Obarska-Pempkowiak 2008). Systemy te nie wymagają stosowania dodatkowych środków chemicznych (tj. koagulantów, czy polielektroliów) do usprawnienia procesu. Dlatego nie powodują dodatkowego obciążenia środowiska nieznanymi substancjami pochodzenia antropogenicznego. Ze względu na tlenowy charakter procesu nie powstają nieprzyjemne zapachy. Jest to metoda niskoemisyjna oraz niskoenergochłonna, ponieważ zużycie energii elektrycznej jest związane jedynie z pracą pomp doprowadzających osady do systemu. W eksploatacji systemów trzcinowych nie stosuje się sprzętu ciężkiego i innych uciążliwych urządzeń. Są one potrzebne jedynie podczas wyładowywania (opróżniania) złożów trzcinowych, co 10-15 lat (Obarska-Pempkowiak i in. 2015c, Kołecka i Obarska-Pempkowiak 2015).

Uwzględniając cykl obiegu wody jako integralną część produkcji energii, systemy hydrofitowe oferują wiele możliwości. Np. pierwszy etap w systemach francuskich może być wykorzystany do oczyszczania



wód pofermentacyjnych z biogazowni produkując kompost lub bogate w związki biogenne ścieki, które mogą zostać wykorzystane zarówno do nawodnień systemów, jak również jako naturalny nawóz. Takie rozwiązania mogą być bardzo interesujące szczególnie w ciepłym klimacie (Barbera i in. 2009, Barbagallo i in. 2014, Ciria i in. 2005, La Bella 2016, Wang i in. 2011).

Integracja naturalnych systemów retencji w mieście daje możliwość szeregu zastosowań systemów hydrofitowych. Ich rola jest jeszcze bardziej istotna, jeśli pojęcie "retencja" nie będzie odnosić się tylko do prostego zapobiegania powodziom, ale również będzie uwzględniać wychwytywanie związków biogenych i materii organicznej, a w szczególności trwałych i niebezpiecznych mikro- i nanozanieczyszczeń organicznych. To podejście wymaga jednak wielu kompetencji, aby wykorzystać możliwości systemów hydrofitowych, które mogą zarówno zwiększyć potencjał do gromadzenia wody całego miasta, jak i lokalnie wpływać na bioróżnorodność. Dzięki temu można tworzyć przestrzenie na granicy człowiek – woda oraz poprawić jakość powietrza i pozytywnie wpłynąć na lokalny klimat. Odpowiednio zaprojektowane systemy hydrofitowe mogą stanowić wielofunkcyjną zieloną infrastrukturę miast (Liquete i in. 2016, Masi i in. 2017). Mogą też tworzyć zrównoważone miejskie systemy drenażowe i oczyszczać spływy powierzchniowe, a także wydawnie zmniejszać ładunki zanieczyszczeń odprowadzanych do wód powierzchniowych (Woods Ballard i in. 2015, Fletcher i in. 2015).

4. Przykłady wdrożeń systemów hydrofitowych w gospodarce o obiegu zamkniętym

4.1. Fusina (Włochy)

System hydrofitowy Fusina we Włoszech (rys. 3) zbudowano jako trzeci stopień doczyszczenia ścieków komunalnych w celu ich renaturalizacji i do wykorzystania w przemyśle w regionie Veneto. Powierzchnia systemu wynosi 100 ha, a przepływ wody 4000 m³/h (w porze deszczowej 8000 m³/h przez max. 3 dni). Obciążenie hydrauliczne wynosi 0,1 m³/m². Jakość ścieków dopływających i odpływających podano w tabeli 1.





Rys. 3. System trzcinowy Fusina, foto M. Gajewska
Fig. 3. Treatment wetland in Fusina, foto M. Gajewska

Tabela 1. Jakość ścieków na dopływie i odpływie w systemie hydrofitowym Fusina, (Kantawanichkul 2009)

Table 1. The quality of influent and effluent from TW in Fusina, (Kantawanichkul 2009)

| Parametr | Stężenia średnie, mg/l | |
|------------------|------------------------|--------|
| | Dopływ | Odpływ |
| Zawiesina og. | 15 | 10 |
| BZT ₅ | 25 | 15 |
| N _{og} | 12 | 6 |
| P _{og} | 2 | 0,75 |

4.2. System trzcinowy do odwadniania i stabilizacji osadów ściekowych Helsinge (Dania)

System trzcinowy w Helsinge (rys. 4) odwadnia i stabilizuje nadmierny osad ściekowy pochodzący z konwencjonalnej oczyszczalni ścieków obsługującej 42 000 RLM (Równoważna Liczba Mieszkańców) i stabilizuje 630 ton suchej masy osadów w ciągu roku. System ten zajmuje powierzchnię wynoszącą 10 ha i jest złożony z 10 basenów trzcinowych. Jest eksploatowany od 1996 roku.



Rys. 4. Konwencjonalna oczyszczalnia ścieków z częścią osadową realizowaną w złożach trzcinowych,

<http://www.globalwettech.com/references/sludgedewatering/item/87-helsinge-sludge-treatment-reed-bed-system.html>

Fig. 4. The conventional WWTP with management of sewage sludge in reed beds, <http://www.globalwettech.com/references/sludgedewatering/item/87-helsinge-sludge-treatment-reed-bed-system.html>

Po 10-15 latach eksploatacji ustabilizowane osady są wywożone i wykorzystywane rolniczo jako naturalny nawóz. Jakość odwodnionych i ustabilizowanych osadów z systemu trzcinowego w Helsinge podano w tabeli 2.

Tabela 2. Jakość osadów ściekowych (wartości średnie) po 9 latach odwadniania i stabilizacji w złożach trzcinowych w Helsinge, (Kołecka i Obarska-Pempkowiak 2013)

Table 2. The quality of sewage sludge after 9 years of dewatering and stabilization in reed beds in Helsinge, (Kołecka i Obarska-Pempkowiak 2013)

| Parametr | Stężenia średnie | | | |
|-----------|------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | Sucha masa | Materia organiczna | N _{og} | P _{og} |
| Jednostka | % | % s.m. | % s.m. | % s.m. |
| Wartość | 20,7 ± 2,6 | 41,1 ± 2,9 | 2,0 ± 0,1 | 3,8 ± 0,2 |

Dodatkowo przeprowadzone badania wykazały, że stężenia metali ciężkich były poniżej wartości dopuszczalnych przy rolniczym wykorzystaniu. Wykazano również, że ustabilizowane osady były bezpieczne pod względem mikrobiologicznym (Obarska-Pempkowiak i in. 2015c).

4.3. System francuski

Zasadniczą zaletą systemu francuskiego jest brak osadów. Osady te są gromadzone, stabilizowane i mineralizowane na złożu, skąd później mogą być usunięte i wykorzystane jako nawóz (odzysk związków biogenych). Według klasycznych wytycznych całkowita powierzchnia systemu wynosi 2 m²/mieszkańca i uwzględnia: 1,2 m²/mieszkańca w pierwszym stopniu (obciążenie materia organiczną wynosi 100 g ChZT/(m²·d), co odpowiada około 50 g/(m²·d) zawiesiny ogólnej i 8,3 g/(m²·d) azotu, przy obciążeniu hydraulicznym wynoszącym 12,5 m/d) oraz 0,8 m²/mieszkańca w drugim stopniu.

W pierwszym stopniu znajdują się trzy złoża, podczas gdy w drugim stopniu znajdują się dwa złoża hydrofitowe, zasilane naprzemiennie. Dotychczasowo jako wypełnienie złożów stosowano: żwir w złożu I stopnia oraz piasek w złożu II stopnia. Jakość ścieków doprowadzanych i odprowadzanych z analizowanych przez Boutin i in. (2010) obiektów we Francji podano w tabeli 3.



Tabela 3. Jakość ścieków dopływających do i odpływających z systemów hydrofitowych wykonanych metodą francuską, (Boutin i in. 2010)

Table 3. The quality of influent and effluent to French TW (Boutin et al. 2010)

| Parametr | Średnie stężenia [mg/l] | | | | | |
|----------|-------------------------|------|---------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| | BZT ₅ | ChZT | Zawiesina og. | N _{og} | NH ₄ ⁺ -N | P _{og} |
| Dopływ | 355 | 837 | 387 | 117 | 94 | 34 |
| Odpływ | 13 | 84 | 20 | 44 | 43 | 41 |

5. Proponowane zastosowania systemów hydrofitowych w gospodarce o obiegu zamkniętym

Systemy hydrofitowe już obecnie wpisują się bardzo dobrze w gospodarkę o obiegu zamkniętym. Natomiast wydaje się, że będą konieczne dalsze zmiany podejścia do tego typu rozwiązań, aby jeszcze lepiej spełniały swoją rolę. W tabeli 4 podano obecne zastosowanie hydrofitów oraz ich możliwe zmiany w przyszłości.

Tabela 4. Obecne i przyszłe zastosowania i wymagania wobec systemów hydrofitowych, opracowanie własne

Table 4. Present and future application and requirements for TWs, own elaboration

| Obecnie | W przyszłości |
|--|---|
| Oczyszczanie ścieków | Produkcja wody, nawozów (N, P, K), odzysk metali ciężkich, itp. |
| Pojedynczy cel, np. oczyszczanie ścieków, odzysk wody itp. | Podejście wielofunkcyjne |
| Centralne zastosowanie | Zoptymalizowane rozmieszczenie pomiędzy wytwarzaniem a wykorzystaniem produktu |
| Większe obiekty są zwykle bardziej opłacalne | Dowolne stosowanie różnej wielkości, przede wszystkim ze względu na jakość środowiska |
| Podejście techniczne | Podejście przyrodnicze |
| Wymogi niezachęcające | Atrakcyjne wymagania |
| Statyczne | Elastyczne |



Tabela 4. cd.
Table 4. cont.

| Obecnie | W przyszłości |
|--|---|
| Czułe | Sprężyste |
| Niedostępne dla dużej części światowej populacji | Dostępne dla wszystkich ze względu na wielofunkcyjność |
| Rozwiązania typu "high-tech" | Rozwiązani typu "smart" |
| Technologie typu "u końca rury" | Kontrola źródła |
| Rozwiązania bazujące na miejskiej kanalizacji | Wszystkie opcje od rozwiązań bez sieci do rozwiązań takich, jak obecnie (czyli wykorzystywanych w dużych aglomeracjach miejskich) |
| Rozwiązanie "wszystko w jednym" | Rozdzielenie u źródła w przypadku, gdy takie podejście ma wpływ na jakość produktu |
| Szybkie odprowadzenie wód opadowych | Zbieranie wód opadowych |
| Postępowanie z różnymi rodzajami wód w sposób niepowiązany: np. osobno system do odprowadzania ścieków, wody deszczowej, osobno wody naturalne lub łączenie ich w taki sposób, że później trudno ponownie je wykorzystać | Integrowanie wszystkich wód w unikalnym systemie z wieloma węzłami w celu wykorzystania lub separacji, gdy tego wymaga sytuacja |
| Niefektywne w usuwaniu wielu nowych zanieczyszczeń | Odpowiadające na pojawiające się nowe zanieczyszczenia przez kontrolę źródeł, system adaptacji, czy różnorodność |
| Selekcja mikroorganizmów chorobotwórczych odpornych na unieszkodliwianie | Zapobieganie selekcji mikroorganizmów odpornych przez odpowiedź systemu, np. przez izolację ścieków ze szpitala |



Jeszcze bardzo dużo jest do zrobienia, aby lepiej wykorzystać możliwości systemów hydrofitowych. Większość z wyżej podanych rozwiązań jest dość skomplikowana i wymaga przede wszystkim zmiany sposobu myślenia i podejścia do dostarczania i wykorzystania wody oraz odprowadzania i oczyszczania ścieków. Systemy hydrofitowe mają wielki potencjał, aby wspierać gospodarkę o obiegu zamkniętym. Konieczne są jednak dalsze badania, które będą stanowić nowe narzędzia, aby móc w pełni wykorzystać ich możliwości.

6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych aktualnych i przyszłych zastosowań systemów hydrofitowych w gospodarce o obiegu zamkniętym sformułowano następujące wnioski:

1. W najbliższych latach znaczenie gospodarki, której podstawę będzie stanowił obieg zamknięty będzie prawdopodobnie systematycznie się rozwijać.
2. Przyszłe rozwiązania wymagają radykalnej zmiany myślenia i podejścia do stosowanych obecnie rozwiązań gospodarki komunalnej.
3. Dotychczas systemy hydrofitowe ze względu na swoje zalety i naturalny przebieg procesów rozwiązań gospodarki komunalnej bardzo dobrze wpisują się w gospodarkę o obiegu zamkniętym.
4. W celu pełnego wykorzystania potencjału systemów hydrofitowych, konieczne są dalsze nowe zastosowania, analiza i porównanie z dotychczasowymi rozwiązaniami i tworzenie innowacyjnych rozwiązań.

Literatura

- Abec, A., (2015). Ekonomia od kołyski do kołyski, <http://odpowiedzialnybiznes.pl/artykuly/ekonomia-od-kolyski-do-kolyski/> (15.03.2017).
- Adyel, T.M., Oldham, C.E. and Hipsey, M.R. (2016). Stormwater nutrient attenuation in a constructed wetland with alternating surface and subsurface flow pathways: Event to annual dynamics, *Water Research*, 107, 66-82.
- Ayaz, S.Ç., (2008). Post-treatment and reuse of tertiary treated wastewater by constructed wetlands, *Desalination*, 226(1-3), 249-255.
- Barbagallo, S. Barbera, A. C., Cirelli, G. L., Milani, M. and Toscano, A., (2014). Reuse of constructed wetland effluents for energy crops, *Water Science & Technology*, 70(9), 1465-1472.



- Barbera, A.C., Cirelli, G.L., Cavallaro, V., Di Silvestro, I., Pacifici, P., Castiglione, V., Toscano, A., Milani, M. (2009). Growth and biomass production of different plant species in two different constructed wetland systems in Sicily, *Desalination*, 247, 130-137.
- Boruszko, D., Dąbrowski, W., Malinowski, P. (2017). Organic matter and heavy metals content modeling in sewage sludge treated with reed bed system, *E3S Web Conf.*, 22, DOI: 10.1051/e3sconf/20172200021.
- Boutin, C., Prost-Boucle, S., Boucher, M. (2010). *Robustness of vertical reed bed filters facing loads variations: The particular case of campsites*, International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, October 4-8 2010, Venice, Italy, 1, 177-184.
- Braungart, M., McDonough, W., Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 15(13-14), 1337-1348.
- Chojnicka, A., Gajewska, M. (2014). Systemy hydrofitowe do oczyszczania ścieków bytowych, projektowanie wg zasad francuskich. *Rynek Instalacyjny*, 11, 69-74.
- Ciria, M.P., Solano, M.L., Soriano, P. (2005). Role of Macrophyte Typhalatifolia in a Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Assessment of Its Potential as a Biomass Fuel, *Biosystems Engineering*, 92(4), 535-544; doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.08.007.
- Dąbrowski, W., Karolinczak, B., Gajewska, M., Wojciechowska, E. (2017). Application of subsurface vertical flow constructed wetlands to reject water treatment in dairy wastewater treatment plant. *Environmental Technology*, 38(2), 175-182.
- Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.L. and Mikkelsen, P.S. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542.
- Gajewska, M., Obarska-Pempkowiak, H. (2011). Efficiency of pollutant removal by five multistage constructed wetlands in a temperate climate. *Environment Protection Engineering*, 37(3), 27-36.
- Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z. and Raveh, E. (2007) Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) – a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households, *Chemosphere*, 66(5), 916-923.
- Hsu, C.B., Hsieh, H.L., Yang, L., Wu, S.H., Chang, J.S., Hsiao, S.C., Su, H.C., Yeh, C.H., Ho, Y.S. and Lin, H.J. (2011). Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment, *Ecological Engineering*, 37(10), 1533-1545.



- Kantawanichkul, S. (2009). Newsletter, No. 35, November 2009. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control.
- Karolinczak, B., Dąbrowski, W. (2017). Effectiveness of septage pre-treatment in vertical flow constructed wetlands. *Water Science & Technology*, 77, 2544-2553.
- Karolinczak, B., Miłaszewski, R., Sztuk, A. (2015). Analiza efektywności kosztowej różnych wariantów technologicznych przydomowych oczyszczalni ścieków, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 726-746.
- Kolečka, K., Gajewska, M., Obarska-Pempkowiak, H., Rohde, D. (2017). Integrated dewatering and stabilization system as an environmentally friendly technology in sewage sludge management in Poland, *Ecological Engineering*, 98, 346-353.
- Kolečka, K., Obarska-Pempkowiak, H. (2008). The quality of sewage sludge stabilized for a long time in reed basins. *Environmental Protection Engineering*, 34(3), 13-20.
- Kolečka, K., Obarska-Pempkowiak, H. (2013). Potential fertilizing properties of sewage sludge treated in the Sludge Treatment Reed Beds (STRB). *Water Science & Technology*, 68(6), 1412-1418.
- Komisja Europejska (2015). Komunikat prasowy. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_pl.htm (02.12.2015).
- Józwiakowski, K., Gajewska, M., Pytka, A., Marzec, M., Gizińska-Górna, M., Jucherski, A., Walczkowski, A., Nastawny, M., Kamińska, A., Baran, S. (2017). Influence of the particle size of carbonate-siliceous rock on the efficiency of phosphorous removal from domestic wastewater, *Ecological Engineering*, 98, 290-296.
- La Bella, S., Tuttolomondo, T., Leto, C., Bonsangue, G., Leone, R., Virga, G., Licata, M. (2016). Pollutant removal efficiency of a pilot-scale Horizontal Subsurface Flow in Sicily (Italy) planted with *Cyperus alternifolius* L. and *Typhalatifolia* L. and reuse of treated wastewater for irrigation of *Arundodonax* L. for pellet production – Results of two-year tests under Mediterranean climatic conditions, *Desalination and Water Treatment*, 57, 22743-22763, doi:10.1080/19443994.2016.1173384.
- Liquete, C., Udias, A., Conte, G., Grizzetti, B., Masi, F. (2016). Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits, *Ecosystem Services*, 22, 392-401.
- Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Conte, G. (2017). Constructed wetlands for combined sewer overflow treatment: Ecosystem services at Gorla Maggiore, Italy, *Ecological Engineering*, 98, 427-438.



- Masi, F., El Hamouri, B., Abdel, Shafi, H., Baban, A., Ghrabi, A., Regelsberger, M. (2010). Segregated black/grey domestic wastewater treatment by Constructed Wetlands in the Mediterranean basin: the Zer0-m experience, *Water Science & Technology*, 61(1), 97-105, doi:10.2166/wst.2010.780.
- Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Edathoot, A., Patwardhan, N., Panse, D., Langergraber G. (2016). Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: a case-study in Pune, *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 6(2), 342-347; doi:10.2166/washdev.2016.019.
- Masi, F., Rizzo, A. and Bresciani, R. (2015). Green architecture and water reuse: examples from different countries, *Sustainable Sanitation Practice*, 23, 4-10.
- Matamoros, V., Rodríguez, Y., Albaigés, J. (2016). A comparative assessment of intensive and extensive wastewater treatment technologies for removing emerging contaminants in small communities. *Water Research*, 88, 777-785. doi: 10.1016/j.watres.2015.10.058.
- Matamoros, V., Rodríguez, Y., Bayona, J.M. (2017). Mitigation of emerging contaminants by full scale horizontal flow constructed wetlands fed with secondary treated wastewater, *Ecological Engineering*, 99, 222-227.
- Nielsen, S., Bruun, E.W. (2015). Sludge quality after 10-20 years of treatment in reed bed systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(17), 12885-12891.
- Nielsen, S. (2011). Sludge treatment reed bed facilities – organic load and operation problems, *Water Science and Technology*, 63(5), 941-947.
- Nivala, J., Wallace, S., Headley, T., Kassa, K., Brix, H., van Afferden, M., Müller, R. (2013). Oxygen transfer and consumption in subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 61, 544-554.
- Nolde, E. (2007). Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces, *Desalination*, 215, 1-11.
- Obarska-Pempkowiak, H., Gajewska, M., KołECKA, K., Wojciechowska, E., Ostojki, A. (2015a). Zrównoważone gospodarowanie ściekami na przykładzie obszarów wiejskich. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 585-603.
- Obarska-Pempkowiak, H., Gajewska, M., Wojciechowska, E., KołECKA, K. (2015b). Sewage gardens – constructed wetlands for single family households. *Environment Protection Engineering*, 41(4), 71-82.
- Obarska-Pempkowiak, H., KołECKA, K., Buchholtz, K., Gajewska, M. (2015c). Ekoinżynieria w zintegrowanym odwadnianiu i stabilizacji osadów ściekowych w systemach trzcinowych, *Przemysł chemiczny*, 94/12, 2299-2303, doi: 10.15199/62.2015.12.43.



- Obarska-Pempkowiak, H., Gajewska, M., Wojciechowska, E., Stosik, M. (2011). Constructed wetland systems for aerial run off treatment in the Gulf of Gdańsk region, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 13(1), 173-185.
- Paing, J., Guilbert, A., Gagnon, V. and Chazarenc, F. (2015), Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: a survey based on 169 full scale systems, *Ecological Engineering*, 80, 46-52.
- Pempkowiak, J., Obarska-Pempkowiak, H. (2002). Long-term changes in sewage sludge stored in a reed bed. *Science of The Total Environment*, 297(1-3), 59-65.
- Rousseau, D.P.L., Lesage, E., Story, A., Vanrolleghem, P.A., De Pauw, N. (2008). Constructed wetlands for water reclamation, *Desalination*, 218(1-3), 181-189.
- Van Oirschot, D., Wallace, S., Van Deun, R. (2015). Wastewater treatment in a compact intensified wetland system at the Badboot: a floating swimming pool in Belgium, *Environ Sci Pollut Res Int*, 22(17), 12870-12878, doi: 10.1007/s11356-014-3726-6.
- Verlicchi, P., Zambello, E. (2014). How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review, *Science of the Total Environment*, 470-471, 1281-1306.
- Vymazal, J. (2014) Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review, *Ecological Engineering*, 73, 724-751.
- Vymazal, J., Březinová, T. (2015). The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: a review, *Environment international*, 75, 11-20.
- Wang, Y., Ko, C., Chang, F., Chen, P., Liu, T., Sheu, Y., Shih, T., Teng, C. (2011). Bioenergy production potential for aboveground biomass from a subtropical constructed wetland. *Biomass and bioenergy*, 35, 50-58.
- Woods, Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashle, R., Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual, C753*, CIRIA, London, UK.
- Yacoub, A., Fresner J. (2006). *Half is Enough – An Introduction to Cleaner Production*. Beirut, Lebanon: LCPC Press.

Treatment Wetlands as the Implementation of the Circular Economy

Abstract

The aim of the circular economy is to reduce the impact of production and products on the environment by selecting the appropriate components and use the proper process design enabling reuse of products. On 2nd December 2015, the European Commission adopted a package of actions to implement the above-mentioned objectives. Treatment wetlands (TWs) used for treating water and wastewater as well as for dewatering and stabilization of sewage sludge are part of the circular economy. The aim of the study is to present the importance of TWs as new, essential elements in the creation of assumptions for circular economy idea.

In future, the approach to water and wastewater management will require significant changes. In order to meet the requirements of the circular economy, the current way of collecting, discharging and treating of wastewater will have to be changed. In the new approach, it will be necessary to separate the wastewater into useful and harmful fractions in the place of origin. Such systems will have to be designed for a particular source, with the possibility of re-use of water.

Currently TWs are widely accepted as a technology for treatment of various types of wastewater and as water protection systems, as well as facilities for dewatering and stabilization of sewage sludge. However new goals and requirements appears with changes of approach and the focus on the circular economy. These requirements will probably relate to the reuse of water (gray water treatment, treatment and storage of rainwater, removal of persistent organic pollutants with low concentrations, treatment of wastewater the third stage in WWTPs), recovery of nutrients (production of fertilizers from sewage sludge, recovery of phosphorus compounds from wastewater using new fillings ensuring effective adsorption), energy production (TWs for treatment of leachate from digestion chamber and biomass production) and ecosystems in urban areas. The appropriate configuration of TWs or their combination with other available technologies assures that the fulfill of mentioned-above goals will be possible and more efficiency and cost-effective solutions will be created.

The application of TWs according to the circular economy can be found in many places.

The use of TWs in the circular economy is reasonable and possible, however further research should be done.



Streszczenie

Gospodarka realizowana w obiegu zamkniętym ma na celu minimalizację wpływu na środowisko w procesie wytwarzania produktów przez wybór odpowiednich składników oraz sposobu i procesów projektowania umożliwiających powtórne wykorzystanie produktów ubocznych. Pakiet działań polegających na wdrożeniu wyżej wymienionych założeń przyjęła Komisja Europejska w dn. 2 grudnia 2015 roku. W ideę gospodarki zamkniętej bardzo dobrze wpisują się systemy hydrofitowe stosowane w gospodarce komunalnej między innymi do oczyszczania wód i ścieków oraz odwadniania i stabilizacji osadów ściekowych. Celem pracy jest przedstawienie znaczenia systemów hydrofitowych jako nowych, istotnych elementów w kreowaniu założeń gospodarki o obiegu zamkniętym ("circular economy").

W przyszłości podejście do gospodarki wodno-ściekowej będzie wymagało znaczących zmian. W celu spełnienia wymogów obiegu zamkniętego należy zmienić obecny sposób zbierania, odprowadzania i oczyszczania ścieków. W nowym podejściu konieczny będzie rozdział ścieków (separacja) na frakcje użyteczne i szkodliwe w miejscu powstawania. Takie systemy będą musiały być zaprojektowane dla konkretnego źródła z uwzględnieniem możliwości ponownego użycia wody.

Systemy hydrofitowe obecnie są powszechnie akceptowane jako technologia wykorzystywana przede wszystkim do oczyszczania różnego rodzaju ścieków i jako systemy ochrony wód oraz obiekty do odwadniania i stabilizacji osadów ściekowych. Jednak wraz ze zmianą podejścia i ukierunkowaniem się na gospodarkę o obiegu zamkniętym przed tego typu systemami stawiane są nowe cele i wymagania. Te wymagania dotyczyć będą między innymi ponownego wykorzystania wody (oczyszczanie ścieków szarych, oczyszczanie i magazynowanie wody deszczowej, usuwanie trwałych zanieczyszczeń organicznych o niskich stężeniach, doczyszczanie ścieków po procesie oczyszczania jako trzeci stopień), odzysku związków biogennych (produkcja nawozów z osadów ściekowych, wstępne oczyszczenie ścieków przed fertygacją, odzysk związków fosforu ze ścieków za pomocą nowych wypełnień zapewniających efektywną adsorpcję), produkcji energii (systemy hydrofitowe do oczyszczania wód pofermentacyjnych czy miejsca do produkcji biomasy) oraz tworzenia ekosystemów na terenach miejskich. Spełnienie wymienionych kryteriów jest możliwe przy zastosowaniu odpowiedniej konfiguracji systemów hydrofitowych lub ich połączenia z innymi, dostępnymi technologiami, dzięki którym mogą być bardziej efektywne i opłacalne pod względem ekonomicznym w porównaniu z dotychczas stosowanymi metodami.

Przykłady wdrożeń oczyszczalni hydrofitowych zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym można spotkać w wielu miejscach.



Pełne wykorzystanie potencjału obiektów hydrofitowych w gospodarce o obiegu zamkniętym jest dosyć trudne i wymaga przede wszystkim zmiany sposobu myślenia oraz podejścia do dostarczania i wykorzystania wody oraz odprowadzania i oczyszczania ścieków. Konieczne są jednak dalsze badania i udoskonalania, które będą stanowić nowe narzędzia, aby móc w pełni wykorzystać istniejące możliwości.

Słowa kluczowe:

gospodarka o obiegu zamkniętym, gospodarka komunalna, systemy hydrofitowe, ponowne użycie wody, odzysk substancji biogennych

Keywords:

circular economy, municipal management, treatment wetlands (TWs), water reuse, nutrients recovery