

Kinga PACHUTA

Możliwości zastosowania hydromakrofitów w procesie oczyszczania wody

Abstract

Hydromacrophytes in water purification process. There are 150 species of hydromacrophytes in Poland. Most of them can be used: for the plant method in sewage purification, in final cleaning treated effluence, to dry liquid sludge or for indicating non-polluted water. It is proposed to put into practice in treatment plant a lot of taxons simultaneously. It would increase pollution reduction, improved cleaning efficiency, keep persistence and aesthetic aspects. Also they prolong function in the growing season. Biological and ecological characteristic also environmental feature hydromacrophytes are present.

Key words: hydromacrophytes, sewage treatment plant, wastewater, constructed wetlands.

Wstęp

W odniesieniu do roślin wodnych często używa się terminu hydrofity. Rośliny związane ze strefą brzegową określa się mianem helofitów. W przedstawionej pracy dla hydrofitów i helofitów użyto nazwy hydromakrofity. Grupa ta obejmuje rośliny całkowicie zanurzone w wodzie, w całości lub częściowo pływające po powierzchni oraz rozwijające ponad wodą liście lub kwiaty. Należą do nich gatunki z klas jedno- i dwuliściennych,

niektóre glony, mchy, wątrobowce, skrzypy i paprocie.

W polskich wodach występuje około 150 gatunków hydromakrofitów. Część spośród nich, przy swojej niewątpliwie dużej roli, którą pełnią w ekosystemach, nie ma większego znaczenia w procesie oczyszczania wody. Dlatego też nie są one brane pod uwagę w badaniach nad sztucznymi biocenozy, tworzonymi dla oczyszczalni roślinnych. W tej grupie roślin znajdują się m.in.: gatunki wód czystych (poryblin, lobelia), gatunki wód ubogich w związki azotowe (pływacz, aldrowanda), rzadko spotykane (jezierza, gałuszka, grzybieńczyk) i chronione (kotewka, azolla).

Pozostała większość gatunków występuje w Polsce pospolicie lub często w toni i strefie brzegowej wód stojących i płynących. W akwenach eutroficznych tworzą one szczególnie bujne biocenozy. Ich zróżnicowana struktura przestrzenna i bogactwo taksonów są najlepszą wskazówką dla projektantów sztucznych zbiorowisk, konstruowanych dla oczyszczalni ścieków. W przyszłości, w miarę postępu badań, mogą one uzupełnić monokulturowe oczyszczalnie korzeniowe, zbio-

rowiska doczyszczające wody pościekowe i osuszające osady.

W celu usprawnienia funkcjonowania oczyszczalni, poprawienia ich parametrów i uzyskania niezawodności należy tak ułożyć kompozycję roślin, aby maksymalnie wykorzystać cechy biologiczne i ekologiczne poszczególnych gatunków. Ważne są również struktury przestrzenne biocenozy oczyszczającej: pionowa (strefowość) i pozioma (mozaikowość). Obok względów estetycznych przemawia za tym sprawniejsze i bardziej efektywne funkcjonowanie modelu, który odwzorowuje naturę.

Poniżej przedstawiono koncepcje trzech szeregowych zbiorników oczyszczających wodę, każdy z trzema strefami siedliskowymi. Zaproponowano składy gatunkowe biocenz oraz wielkości poszczególnych stref w każdym ze zbiorników. Ponadto przedstawiono cechy biologiczne hydromakrofitów, które powinny być brane pod uwagę w praktyce urządzania obiektów oczyszczających. Proponowane rozwiązanie uwzględnia właściwości ekologii tych roślin. Zalecenia odnośnie stosowania niektórych z nich wymagają dalszych, szczegółowych badań.

Podstawę koncepcji stanowią wieloletnie obserwacje roślin wodnych, biocenz siedlisk eutroficznych i wylewisk ścieków. Skorzystano również z niektórych obserwacji przeprowadzonych w trakcie 3-letnich badań roślinnych układów oczyszczających ścieki bytowe w IMUZ w Falentach. Obecnie na terenie Pola Ekologicznego Katedry Przyrodniczych Podstaw Melioracji funkcjonują modelowe zbiorniki ściekowe sztucznie

zasiedlone hydromakrofitami, uzyskanymi z hodowli w basenach szklarni i na stanowiskach badawczych w laboratorium naszej Katedry. Doświadczenia przeprowadane są w ramach grantu KBN.

Struktura przestrzenna biocenozy oczyszczających

Biocenozie, która jest na ogół tylko jednym ze składników oczyszczalni ścieków, przypada w udziale ostatni etap oczyszczania wody. Dla pełnego przebiegu tego procesu zbiorowiska oczyszczające powinny zajmować trzy przestrzennie wyodrębnione strefy, są to:

- strefa podtopiona, z lustrem wody położonym na głębokości 0–25 cm, głównie dla gatunków bagiennych i lęgowych,
- strefa wypłycona, o głębokości 0–15 cm, dla gatunków powietrzno-wodnych oraz niektórych gatunków z następnej strefy,
- strefa otwartej toni wodnej, o głębokości do 15–25 cm, przeznaczona głównie dla gatunków zanurzonych i pływających po powierzchni (rys.1).

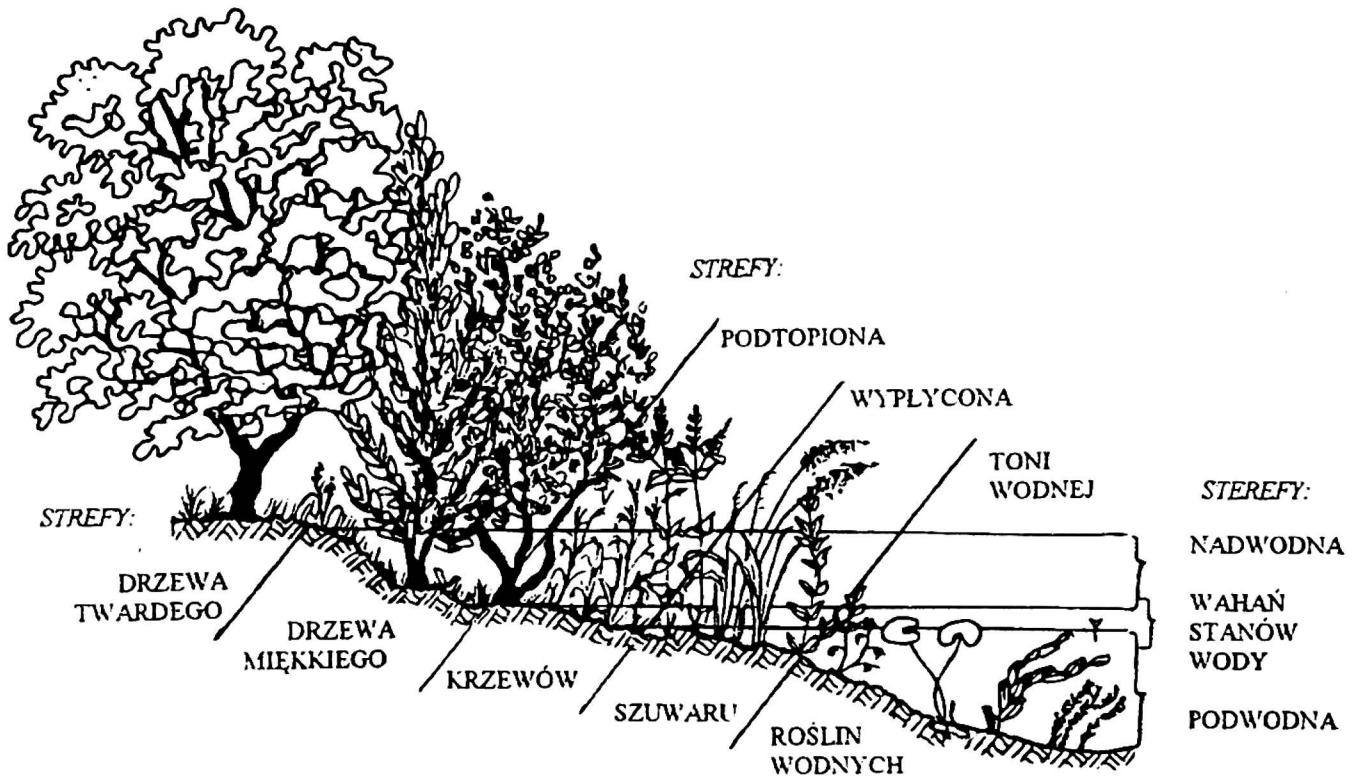
Wielkość stref powinna zależeć od etapu oczyszczania, w którym uczestniczą rośliny, rodzaju ścieków, stopnia ich rozcieńczenia, spodziewanych okresów przetrzymania lub wzmożonego obciążenia oczyszczalni i innych, przewidzianych w projekcie indywidualnych warunkowań oczyszczalni.

Poza wymienionymi strefami, z których każda powinna odzwierciedlać pionową strukturę przestrzenną odpowiadającą jej naturalnej biocenozy, w dobrze

funkcjonującej oczyszczalni bardzo istotne jest poziome zróżnicowanie siedlisk. Można to łatwo uzyskać poprzez urozmaicenie linii brzegowej zakolami, zatoczkami, wcięciami i wyspami (rys. 2). Zróżnicowanie struktury poziomej umożliwia implantowanie wielu gatunków o odmiennych wymaganiach siedliskowych i niejednakowej odporności na zanieczyszczenia. Gatunki najbardziej odporne rosną na ogół bezpośrednio, w mniej lub bardziej rozcieńczonych ściekach, w miejscu ich wypływu z oczyszczalni. Pozostałe, im bardziej wrażliwe,

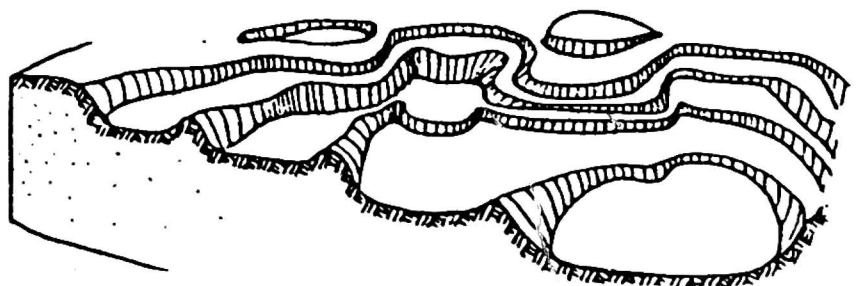
tym dalsze opanowują siedliska, korzystając z filtrujących właściwości podłoża, na którym rosną. Wkraczają one w strefę płycizn, w pewnej odległości od miejsca zrzutu zanieczyszczeń, tam gdzie rozcieńczenie lub działalność innych gatunków spowodowały zmniejszenie ich stężenia.

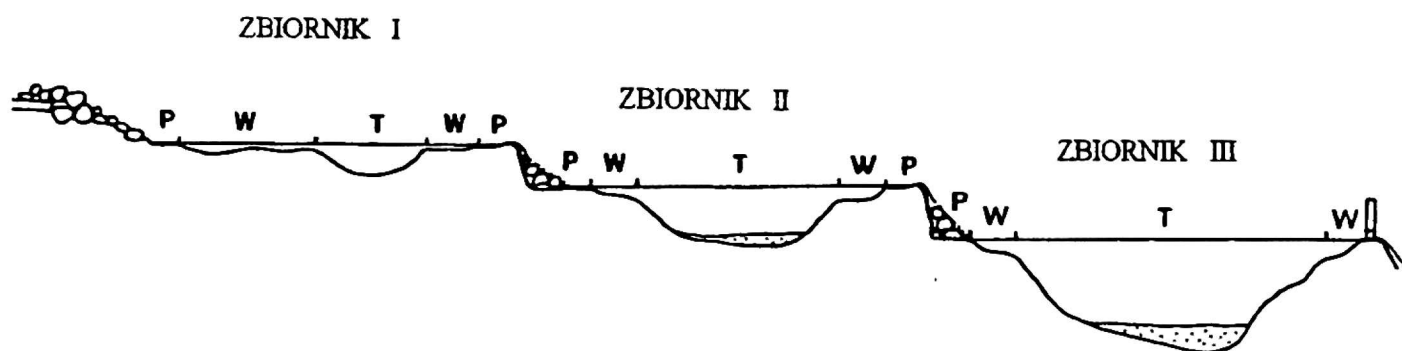
Układ przestrzenny, odzwierciedlany przez strefy pionowe i poziome, powinien występować w każdym z trzech kolejnych zbiorników oczyszczających (rys. 3.).



RYSUNEK 1. Odniesienie pionowych stref roślinności w proponowanych zbiornikach oczyszczających do naturalnego pionowego układu zbiorowisk w zależności od położenia lustra wody

RYSUNEK 2. Struktura pozioma zbiornika oczyszczającego – zróżnicowanie linii brzegowej i urozmaicenie przebiegu stref pionowych





RYSUNEK 3. Układ trzech zbiorników oczyszczających wodę o przestrzennie wyodrębnionych strefach: T – otwartej toni wodnej (toni ścieków), W – wypłyconej, P – podtopionej

Zbiornik pierwszy w stosunku do pozostałych dwóch obciążony jest największym ładunkiem zanieczyszczeń, toteż strefy "wypłycona" i "podtopiona" powinny być znacznie większe niż strefa "toni wodnej = toni ścieków". Umożliwi to lepszy proces oczyszczania, bardziej intensywne filtrowanie w podłożu, wydłużenie czasu zatrzymania materii organicznej oraz mniej bezpośredni kontakt organów roślin ze ściekami.

Wielkość drugiego zbiornika oczyszczającego lub odpowiadającej mu przestrzeni, wydzielonej z większego akwenu, zależy od charakteru ścieków i koniecznego czasu ich przetrzymywania. Ogólnie w stosunku do pierwszego zbiornika można tu zwiększyć głębokość i powierzchnię strefy otwartej toni wodnej. Ponadto do drugiego zbiornika powinno się wprowadzić wszystkie gatunki występujące w pierwszym – najbardziej obciążonym zbiorniku. W razie obumarcia niektórych roślin drugi zbiornik służy jako bank diaspor do implantacji (kłączy, rozłogów, nasion, całych roślin).

Strefa otwartej toni wodnej w trzecim zbiorniku powinna zajmować największą przestrzeń. Obok roli siedliska dla proponowanych poniżej gatunków może ona spełniać funkcje rekreacyjne,

użytkowe (hodowla ryb), może stanowić zbiornik retencyjny lub przeciwpożarowy.

Skład gatunkowy biocenozy oczyszczających

Do najbardziej odpornych na eutrofizację i zanieczyszczenia wód należą rośliny używane w oczyszczalniach z monokulturami rzęsy drobnej, trzciny pospolitej i wierzby wiciowej. W prezentowanym tu przestrzennym modelu biocenozy oczyszczającej w pierwszym zbiorniku proponuje się wprowadzić te trzy gatunki jednocześnie: rzęsę drobną (*Lemna minor*) w strefie otwartej toni wodnej, trzcinę pospolitą (*Phragmites australis*) w strefie wypłyconej, wierzbę wiciową (*Salix viminalis*) w strefie podtopionej. Skład gatunków w strefie wypłyconej można wzbogacić o pałkę wąskolistną i szerokolistną (*Typha angustifolia* i *T. latifolia*), oczeret jeziorny (*Schoenoplectus lacustris*), szczawie (*Rumex maritimus*, *aquaticus*, *conglomeratus*, *obtusifolius*, *crispus*, *hydrolapatium*), łącznia baldaszkowatego (*Butomus umbellatus*), tatarak (*Acorus calamus*), kosaćca żółtego (*Iris pseudoacorus*) i mannę mielec (*Glyceria aquatica*),

które również dobrze tolerują ścieki. W strefie brzegowej można spodziewać się samorzutnego pojawienia, a z czasem bujnego rozwoju pokrzywy zwyczajnej, uczeput trójlistkowego i uwisłego, psianki słodkogórz i bzu czarnego. Sztuczne lub naturalne wprowadzenie nowego gatunku hydromakrofitu wzbogaca biocenozę o przybywające wraz z nim mikroorganizmy, bezkręgowce (robaki, pierścienice, owady, pajęczaki, małże, ślimaki) i drobne kręgowce, którym towarzyszą "ich" mikroorganizmy, pełniące w zbiorniku oczyszczalni rolę destruentów.

Zbiornik o powyższym składzie biocenozy może być odrębną, samodzielną jednostką lub jedynie wydzieloną częścią dużego akwenu. Najlepiej jednak, jeśli jest jednym np. z trzech kolejnych zbiorników, ze zróżnicowaną roślinnością, stopniowo oczyszczających wodę.

Ciągle niewiele jest badań na temat zależności gatunków roślin od charakterystyk fizykochemicznych ścieków (Pachuta 1995). Jednak o dużej odporności roślin na określone zanieczyszczenia wód świadczy częste występowanie niektórych gatunków w pobliżu ujść kolektorów ściekowych w akwenach, do których zrzuca się nieczystości, oraz na płytkich wylewiskach ścieków (Pachuta, Nowak 1995). Na tej podstawie można wytypować gatunki nadające się do zasiedlenia drugiego zbiornika oczyszczającego lub, w przypadku dysponowania jednym akwenem, obszaru bardziej oddalonego od miejsca wypływu zanieczyszczeń.

Do zasiedlenia strefy otwartej toni wodnej w drugim z kolei zbiorniku nadają się: rogatek sztywny (*Ceratophyllum*

demersum), mech zdrojek (*Fontinalis antipyretica*), moczarka kanadyjska (*Elodea canadensis*), grążel żółty (*Nuphar lutea*), rdestnice: grzebieniasta, połykliwa i przeszyta (*Potamogeton pectinatus, lucens i perfoliatus*).

W strefie wypłyconej powinny znajdować się: zabieniec babka wodna (*Alisma plantago aquatica*), jeżogłówki gałęzista i prosta (*Sparganium ramosum i simplex*), strzałka wodna (*Sagittaria sagittifolia*), szalej jadowity (*Cicuta virosa*), marek szerokolistny (*Sium latifolium*), gorysz błotny (*Peucedanum palustre*), potocznik wąskolistny (*Berula erecta*), kropidło wodne (*Oenanthe aquatica*), przetaczniki: mułowy, bobownik i bobowniczek (*Veronica anagalloides, anagallis i beccabunga*), szczywół plamisty (*Conium maculatum*), arcydziegiel li-twor (*Archangelica officinalis*), tojeść rozesłana (*Lysimachia nummularia*), okrzęznica bagienna (*Hottonia palustris*), rukiew wodna (*Nasturtium officinale*), rzepichy: ziemnowodna, leśna i błotna (*Rorippa amphibia, silvestris, palustris*), sitowie leśne (*Scirpus silvaticus*), sity (*Juncus sp.*), ponikła (*Heleocharis sp.*) i turzyce (*Carex sp.*)

Strefę podtopioną mogą zajmować łany mozgi trzcinowatej (*Phalaris arundinacea*), nasuwające się na lustro wody kozuchy mietlicy białawej i psiej (*Agrostis alba i canina*), manny jadalnej i fałdowanej (*Glyceria fluitans i plicata*), wyczyńca kolankowatego (*Alopecurus geniculatus*) oraz kępy kaczyńca (*Caltha palustris*). Zbiorowisko to można wzbogacić w następujące helofity: karbieńca pospolitego (*Lycopus europaeus*), bobrka trójlistkowego (*Menyanthes trifoliata*),

wiązówkę bagienną (*Filipendula ulmaria*), sadźca konopiastego (*Eupatorium cannabinum*), krwawnicę pospolitą (*Lyt-hrum salicaria*), wierzbownice (*Epilo-bium hirsutum, parviflorum, palustre, ro-seum, adnatum*), wierzbówkę kiprzycę (*Chamaenerion angustifolium*), czyścica błotnego (*Stachys palustris*), jaskra: pło-miennika, wielkiego, jadowitego, rozło-gowego (*Ranunculus flammula, lingua, sceleratus, repens*), pięciornika gęsiego (*Potentilla anserina*), rutewkę żółtą (*Tha-lictrum flavum*), mydlnicę lekarską (*Sa-ponaria officinalis*), miętę (*Mentha longi-folia, aquatica, verticillata*), żywokost le-karski (*Symphytum officinale*), rdesty (*Polygonum minus, hydropiper, mite, to-mentosum, persicaria, nodosum*), bodzi-szka błotnego (*Geranium palustre*), sie-dmiopalecznika błotnego (*Comarum pa-lustre*), kuklika zwisłego (*Geum rivale*), kozłki (*Valeriana officinalis, sambucifo-lia, dioica*), niezapominajki (*Myosotis palustris, caespitosa*).

W proponowanym systemie współ-pracujących trzech zbiorników, ostatni – trzeci zbiornik, odbiera oczyszczoną wo-dę (wymagane normą: BZT5 < 30 mg O₂/l, ChZT < 150 mg O₂/l, N_{og} < 30 mg/l, N-NH₄ < 6 mg/l, P_{og} mg/l*). Pełni on funkcje raczej obszaru testowania czysto-ści wody i zabezpieczenia, umożliwia-jącego rozcieńczanie ścieków, w razie ich nadmiaru, niż zbiornika oczyszczające-go. Mogą tu znaleźć swoje miejsce gatun-

* Rozporządzenie Min. Ochr. Środ. Zas. Natur. i Leś. z 5 listopada 1991r. dotyczące wskaźników zanieczyszczeń odprowadzanych do wód płynących.

ki siedlisk mezotroficznych i oligotrofi-cznych.

Zróżnicowane siedliska trzeciego zbiornika (podłoże żwirowe, piaszczyste, gliniaste, miejsca wypłycone i zagłębienia, obszary otwarte i osłonięte przed wiatrem) mogą być zasiedlane przez następujące gatunki: wywłóczniki kłosowy i okółkowy (*Myriophyllum spicatum i verticillatum*), włosieniczniki – wodny, rzeczny, krążkolistny (*Batrachium aqu-atile, fluitans i circinatum*), wgłębka (*Riccia sp.*), przesiąkra okółkowa (*Hydrilla verticillata*), rzęśl wiosenna, je-sienna i długoszyjkowa (*Callitriche ver-na, autumnalis i polymorpha*), osoka aloesowata (*Stratiotes aloides*), rzęsa trójrowkowa i garbata (*Lemna trisulca i gibba*), spirodela wielokorzeniowa (*Spi-rodela polyrrhiza*), wolfia (*Wolfia arrhi-za*), salwinia pływająca (*Salvinia na-tans*), żabiściek pływający (*Hydrocharis morsus ranae*), grązel drobny (*Nuphar pumilum*), grzybień biały i północny (*Nymphaea alba i candida*), grzybień-czyk wodny (*Limnanthemum nymphoi-des*), żabieniec pływający (*Elisma na-tans*), brzeżyca jednokwiatowa (*Litorella uniflora*), zdrojek wodny (*Montia rivula-ris*), rdestnice – gęsta, kędzierzawa, nit-kowata, grzebieniasta (*Potamogeton de-nsus, crispus, filiformis, pectinatus*).

W strefie wypłyconej o zmiennej sze-rokości i urozmaiconej linii brzegowej można nasadzać: rdest ziemnowodny (*Polygonum amphibium*), czermień błotną (*Calla palustris*), przestkę pospolitą (*Hippuris vulgaris*) i wszystkie gatunki tej strefy z poprzednich zbiorników.

Strefa podtopiona może być ograni-czona obszarowo i nieciągła. Mogą w niej

znaleźć miejsce następujące gatunki: trzcinnik szuwarowy, lancetowaty, piaskowy (*Calamagrostis pseudophragmites*, *canescens*, *epigeios*), różne gatunki sitów (*Juncus sp.*) i turzyc (*Carex sp.*), kłoc wiechowata (*Cladium mariscus*), zamokrzyca ryżowa (*Leersia oryzoides*), brodobrzanka wodna (*Catabrosa aquatica*), kłoc wiechowata (*Cladium mariscus*).

Wiele z przedstawionych tu gatunków, umownie przyporządkowanych zbiornikowi drugiemu i trzeciemu, wymaga przebadania pod kątem wytrzymałości na zanieczyszczenia. Z drugiej strony niektóre gatunki zwyczajowo przypisywane siedliskom i wodom czystym, dobrze znoszą środowisko ścieków po osadniku Imhoffa, łatwo dają się przesadzać i dobrze zimują, np. sitowie leśne (*Scirpus silvaticus*), oczeret jeziorny (*Schoenoplectus lacustris*), szalejadowity (*Cicuta virosa*) (Pachuta 1992, 1993).

Kryteria wyboru i wymagania stawiane gatunkom roślin biocenozy oczyszczających wodę

Spośród wielu kryteriów doboru hydromakrofitów do celów oczyszczania wody najważniejsze są: odporność na hipertrofię i zanieczyszczenia siedliska (gatunki roślin pierwszego zbiornika), tolerowanie eutrofizacji (gatunki drugiego zbiornika) i właściwości wskaźnikowe czystości wody (gatunki trzeciego zbiornika).

Wymagania, jakie teoretycznie powinny spełniać wszystkie gatunki, które chcielibyśmy zastosować w proponowanym trzyzbiornikowym systemie oczysz-

czania o trójstrefowym podziale pionowym i zróżnicowaniu poziomym są następujące:

- powszechne występowanie gatunku (w Polsce) lub jego dostępność (z hodowli),
- łatwość implantowania (pobierania i przechowywania diaspor oraz ich wprowadzania na nowe obiekty),
- szybki przyrost biomasy i intensywny pobór biogenów,
- mała wrażliwość na koncentrację zanieczyszczeń i zmienne ładunki biogenów,
- długi okres wegetacyjny,
- duża i możliwie urozmaicona powierzchnia organów roślinnych zanurzonych w ściekach, stwarzająca różne rodzaje siedlisk, które umożliwiają osiedlanie się i rozwój peryfitonu, dzięki czemu zwiększa się aktywna powierzchnia zetknięcia ścieków z organizmami oczyszczającymi,
- odporność na mróz,
- możliwość dalszego wykorzystania roślin (kompostowanie, biogaz, pasza),
- walory estetyczne (udział w zbiorowisku gatunków o różnych kształtach i kolorach liści i kwiatów, różnej wysokości, możliwość eksponowania gatunków okazale kwitnących lub owocujących),
- odporność na choroby.

Oczywiście najkorzystniejsze byłyby gatunki szybko pobierające i wbudowujące związki pokarmowe, wolno uwalniające je do środowiska, o całorocznym okresie wegetacji, dające gęsty porost, rozbudowany system kłaczy i korzeni, obficie i atrakcyjnie kwitnące, łatwo dające się rozmnażać i przesadzać. W praktyce dostępne są gatunki spełniające

tylko niektóre z wymienionych wymagań, mniej lub bardziej odporne na specyfikę siedlisk ściekowych. Tak więc mnogość warunków stawianych komponentowi roślinnemu proponuje się zaspokoić poprzez wachlarz gatunków. Im więcej z wymienionych cech spełniają wybrane taksony biocenozy oczyszczającej, tym większa jest jej skuteczność działania i niezawodność.

Przedstawione wymagania, sprowadzone do właściwości ekologicznych i cech biologii hydromakrofitów, dotyczą przede wszystkim gatunków siedlisk eutroficznych. Brak naukowych informacji na temat możliwości i sposobu pozyskiwania, przechowywania, rozmnażania i wprowadzania na obiekty ogromnej większości wymienionych roślin, stanowi przeszkodę w ich wykorzystaniu. Niedostatki te częściowo tylko kompensują analogie do gatunków o znanej biologii i ekologii.

Wybrane właściwości ekologii i niektóre cechy biologii hydromakrofitów wód eutroficznych

Budowa anatomiczna i morfologia roślin mogą ulegać licznym modyfikacjom pod wpływem zmieniających się w środowisku warunków hydraulicznych, świetlnych i pokarmowych. Jeśli tylko pozwala na to zakres tolerancji gatunku (amplituda ekologiczna), dostosowuje się on do otoczenia.

Właściwości, które umożliwiają hydromakrofitom wegetację w siedliskach eutroficznych, stają się przydatne przy opanowaniu siedlisk zanieczyszczonych ściekami. Cechy te sprowadzają się prze-

de wszystkim do specyficznej budowy, umożliwiającej wzrost w warunkach beztlenowych, przy ograniczonym dostępie światła, i utrzymanie się w grząskim, niestabilnym podłożu, silnie przesyconym związkami pokarmowymi, szczątkami organicznymi, zalany ściekami o szybko zmieniających się właściwościach fizyczno-chemicznych, często o dużej zawartości związków trujących, kancerogennych, herbicydów i innych pochodzenia antropogenicznego.

Poniżej przedstawiono niektóre znane cechy rozwoju i budowy hydrofitów i helofitów na tle ich ekologii, tj. oddziaływania na środowisko i inne organizmy. Cechy te powinny być brane pod uwagę przy ustalaniu składu biocenoz oczyszczających.

U większości polskich hydromakrofitów wegetatywny sposób rozmnażania jest bardziej skuteczny niż generatywny (Pachuta 1993). Moczarka i tatarak w ogóle nie rozmnażają się generatywnie w warunkach polskiego klimatu. Wiele gatunków wprawdzie zakwita, lecz zawiązuje niewiele nasion (łączeń baldaszkowy) albo wytwarza dużą ilość nasion płonnych (pałka wąskolistna).

Do rozmnożenia wegetatywnego czasami wystarcza niewielki fragment pędu (moczarka, rogatek, wywłócznik, rdestnice), przypadkowo oderwany przez prąd wody lub zwierzęta. Jednocześnie jest to sposób ułatwiający przetrwanie zimy. Wykształcające się jesienią skrócone pędy lub pączki zimujące wymienionych hydrofitów, ciężkie od nagromadzonych zapasów skrobi, opadają na dno. Tam nie dosięga ich zlodzenie. Wiosną uruchomienie aktywnego metabolizmu, rozpad

zużywanej skrobi i wydzielanie CO₂ w wyniku oddychania powodują, że ciężar właściwy przetrwalników maleje i wypływają one bliżej powierzchni i światła oraz mogą rozprzestrzeniać się z prądem wody. Wkrótce pełne uruchomienie asymilacji i oddychania powoduje wypełnienie tkanek gazami oraz, w ciągu dnia, wydzielanie pęcherzyków tlenu do wody. Rozpoczyna się intensywny przyrost biomasy. W tej fazie rozwojowej, trwającej aż do kwitnienia, hydromakrofitów pobierają najczęściej związków pokarmowych, oczyszczając wodę z biogenów i jednocześnie wydzielając tlen. Umożliwia to rozwój drobnym organizmom tlenowym, niezwykle ważnym dla prawidłowego funkcjonowania biocenoz oczyszczających wodę.

Zwiększanie powierzchni asymilacyjnej i biomasy hydromakrofitów ma ogromne znaczenie dla peryfitonu – zespołów drobnych organizmów roślinnych i zwierzęcych, potrzebujących do rozwoju stałego podłoża. Zasiedlają one zanurzone części makrofitów, korzystając w ten sposób z ich powierzchni, wydzielanego przez nie tlenu, stabilizującego śluzu, korzystnej ekspozycji na światło, ochrony przed splukaniem przez falowanie i porwaniem przez nurt wody. To właśnie peryfiton, na który składa się wiele jednostek taksonomicznych (zielonice, okrzemki, sprężnice, pierwotniaki, gąbki, skąposzczety, nicienie, larwy ochotkowatych, jętek i innych stawonogów, mszywioly i mięczaki), stanowi niezbędne ogniwo troficzne, a czasami siedlisko dla najważniejszych organizmów oczyszczalni: destruentów – bakterii i grzybów. Sprawne funkcjonowanie całej

go układu oczyszczającego wodę ma swój początek w możliwościach zasiedlania zbiornika przez makrofitów.

Wiele makrofitów związanych z eutroficznymi akwenami to byliny o silnie rozwiniętych kłęczach i rozłogach, które wraz z systemem korzeniowym stabilnie mocują części nadziemne lub wynurzone roślin w często półpłynnym podłożu. Należą do nich: trzcina, pałka, manna, mozga, mietlica, szczaw, żabieniec, potocznik, łączeń, jeżogłówka, strzałka i wiele innych gatunków szuwarowych. Dzięki gromadzonym w kłęczach substancjom zapasowym rośliny te rozpoczynają wegetację wczesną wiosną, przez cały sezon rozmnażają się wegetatywnie i jednocześnie intensywnie pobierają związki pokarmowe, co jest bardzo pożądane w zbiorowiskach oczyszczających.

Sz szczególnie okazałe są zagłębione w dnie kłęcza: grzybienia, grążela, irysa, tataraku, łącznia i szaleju. Zawierają one liczne komory wypełnione powietrzem, ułatwiające pływanie i wymianę gazową. Ten specyficzny układ przestworów międzykomórkowych wypełnionych powietrzem występuje tylko u helofitów i hydrofitów. Tworzy on tzw. system przewietrzający, integrujący całą roślinę poprzez szeregi kanałów i komór ciągnących się od liści do korzeni. Ma to zasadnicze znaczenie w środowisku oczyszczalni ścieków, gdzie często dyskomfort tlenowy połączony jest z wahaniami temperatury i poziomów wody.

Charakterystyczne są kanały powietrzne trzciny. Łączą one wynurzone źdźbła i liście z bogatą siecią kłęcz, które rozrastają się w strefie przydennej i pograżone są głęboko w mule. Umożliwia

to wegetację nawet w surowych ściekach pozbawionych tlenu.

Niektóre rośliny nie wytwarzają silnie rozbudowanego systemu przewietrzającego, ale podczas długotrwałego zalania wodą zdolne są do wykształcenia tkanki powietrznej (pseudoaerenchymy). Składa się ona z pojedynczych szeregów komórek, tworzących sieć dookoła wielkich przestworów wypełnionych powietrzem. Tkanka powietrzna powstaje w zewnętrznych partiach łodyg, np. u krwawnicy i uczepów. Cecha ta umożliwia sprawną adaptację roślin w razie zalania siedliska ściekami. Wymienione gatunki dobrze wiążą i stabilizują podłoże, a w czasie zwiększonego przyrostu biomasy szybko pobierają związki pokarmowe.

Tkanka przewietrzająca ma duże znaczenie dla roślin oczyszczających wodę, również z innych powodów. Zmiany wielkości, rozmieszczenia i stopnia wypełnienia powietrzem przestworów międzykomórkowych i tkanki przewietrzającej są niezbędnymi modyfikacjami w budowie wewnętrznej hydromakrofitów. Zachodzą one przez cały sezon wegetacyjny, w trakcie wzrostu i rozwoju rośliny, przystosowując ją ciągle do zmieniającego się środowiska. W ten sposób odbywa się regulacja ciężaru właściwego roślin, której efektem jest np. pionowe ustawienie pędów moczarki, rogatka, wywłócznika i pionowe oscylacje rzęsy trójrowkowej. Rozrastający się szkielet powietrzny może występować w całej roślinie (manna, pałka), silniej wypełniać niektóre części blaszek liściowych (osoka) lub ogonków liściowych (hiacynt wodny).

Z punktu widzenia siedlisk w oczyszczalniach ścieków bardzo istotną cechą tkanki przewietrzającej jest gromadzenie przez nią tlenu, powstającego w procesie fotosyntezy, a koniecznego do procesu oddychania.

Wśród helofitów spotyka się gatunki, tworzące kępy, jak np. sity i turzycyca sztywna, lub łany, jak np. manna, oczeret i turzycyca brzegowa. Obok rozłogów bardzo istotną rolę spajania, przerastania, natleniania i jednocześnie przetwarzania podłoża pełnią tu korzenie.

Niezwykle przydatne są rośliny ukorzenione na brzegu, które opanowują rozlewiska ściekowe, poprzez wchodzenie na ich powierzchnię. Do takich ekspansywnych gatunków zalicza się mietlicę białawą, psią i rozłogową oraz mannę jadalną i fałdowaną oraz wyczyńca kolankowatego, których pływające, nasuwające się od brzegu darnie bez szkody znoszą oscylacje poziomu ścieków.

Przyrost masy podziemnej skorelowany jest ze wzrostem biomasy nadziemnej. Każdego roku do jej odtwarzania rośliny zużywają związki zanieczyszczające wodę. Jedna tona świeżo skoszonej turzycy, trzciny i sitowia zawiera m.in. 32 kg związków azotowych, 109 kg błonnika, 2,2 kg wapnia i 0,8 kg fosforu. Z 1 ha powierzchni wody można zebrać: 40–60 t moczarki, 50–90 t rogatka, 50 t rdestnic lub aż 120 t rzęsy (Dorochow 1958). Pozyskana biomasa może być wykorzystana jako zielony nawóz lub kompostowana. W ten sposób w kolejnych sezonach można odzyskać większość związków pokarmowych. Nie zawsze jednak jest to konieczne lub uzasadnione ekonomicznie. Dużą ilość łatwo rozkładającej się

biomasy dają mięsiste liście i łodygi pokrzywy, babki, tataraku, szczawiu, rukwi, rzepichy. Trzeba jednak brać pod uwagę, że zawierają one na ogół ponad 90% wody. Zdolności produkowania biomasy przez poszczególne gatunki są różne. Wzrastają one w wielowarstwowych i różnorodnych gatunkowo biocenozach, w których każde mikrosiedlisko i każda nisza ekologiczna ma swoich udziałowców.

Szczególnie przydatna pod względem permanentnego odnawiania biomasy jest rzęsa drobna. Jej wegetatywny rozrost od dawna wykorzystywany jest w oczyszczalniach typu "Lemna". Rzęsa występuje w nich masowo, tworząc monokulturę. W przypadku proponowanych wielogatunkowych oczyszczalni byłaby ona ponadto komponentem przybrzeżnych zbiorowisk szuwarowych lub występowała jako pierwsze stadium zasiedlania grząskiego podłoża niewielkich wypłyceń i zatoczek zbiorników i obszarów podtopionych. Dalszych natomiast badań wymaga możliwość zastosowania rzęsy garbatej, trójrowkowej oraz spirodeli wielokorzeniowej.

Wśród pionierów zasiedlających brzegi zanieczyszczonych akwenów, świeżo wynurzone partie dna lub osady pościekowe, obok rzęsy drobnej często spotyka się uczepy: trójlistkowy i zwisty. Wśród omawianych gatunków stanowią one nieliczny wyjątek, gdyż są terofitami (roślinami jednorocznymi). W płytkiej wodzie mogą tworzyć rozległe, prawie jednogatunkowe kobierce. Ich nasiona są łatwe do pozyskania. W warunkach laboratoryjnych i szklarniowych potwierdzo-

no ich dużą zdolność kiełkowania (Pachuta 1994).

U większości hydrofitów i helofitów system rozmnażania wegetatywnego uzupełniany jest przez diaspory generatywne. Kwitnienie, a następnie produkcja nasion niektórych gatunków jest szczególnie obfita. Wydaje się, że duża ilość nasion jest wtedy płonna. Dotyczy to trzciny i innych traw, wierzbownicy i szczawiu. Należy również uwzględnić fakt, że wschody są nierównomierne, rozłożone w czasie i niektóre nasiona muszą przejść okres jarowizacji. Wiele roślin wytwarza mniej nasion, lecz są one zaopatrzone w haczykowate wyrostki lub kolce, jak np. u jaskrów i uczepów. Umożliwia to rozprzestrzenianie się nasion z pomocą zwierząt (zoochoria). Przypadkowe rozsiewanie nasion podczas żerowania lub przemieszczania się zwierząt zwiększa ich ekspansywność.

Jak wynika ze wstępnych badań (Pachuta 1994), barierą ograniczającą rozprzestrzenianie i ekspansję roślin nie są ich cechy biologiczne ani ich ekologia ale, w dużym stopniu, cechy konstrukcji i sposób urządzenia inżynierskiego akwenów, do których odprowadza się zanieczyszczoną wodę. Z reguły woda płynie w nich zbyt szybko, jest zbyt głęboka i nie napowietrzana, co drastycznie ogranicza rozwój roślinności.

W naturalnych zbiorowiskach gatunki wieloletnie mają czas i sposobność, aby przystosować się do warunków i zająć najbardziej dogodne siedlisko. W sztucznych zbiorowiskach oczyszczających człowiek planuje układ przestrzeny roślin i dokonuje nasadzeń. W proponowanych modelach zbiorowisk oczysz-

czających należy uwzględnić m.in. wymagania świetlne makrofitów. Wiele z nich lepiej rośnie w świetle przechodzącym przez inne rośliny. Na przykład żabiściek, salwinie, rogatka, wywłócznika, mech zdrojek dobrze jest zlokalizować pod osłoną szuwaru trzciniowego, pałkowego, wśród łądyg łącznia lub liści tataraku czy irysa. Jednocześnie należy uwzględnić fakt małej przejrzystości ścieków. Z tego powodu prawie wszystkie wymienione w pracy gatunki najlepiej realizować się będą w wypłyconych partiach zanieczyszczonych wód, o głębokości do 15–25 cm. Pewne znaczenie ma również gradient temperatury – zwłaszcza w zbiornikach z mało ruchliwą wodą, szybko nagrzewających się latem i przemarzających zimą. Wprawdzie wzrastająca temperatura przyspiesza przebieg reakcji biochemicznych, jednak z drugiej strony malejąca zawartość tlenu w wodzie drastycznie ogranicza czynności życiowe. Efekt "nożyc temperaturowych" można zmniejszyć poprzez napowietrzanie wody, które jednak podraża koszty eksploatacji oczyszczalni.

Wiele gatunków normalnie rozwijających się w wodzie daje sobie również radę w warunkach silnego wypłyconia lub wysuszenia partii podłoża. Wytwarzają one wtedy mniejsze i bardziej skórzaste, krótkoogonkowe liście (grązel), liście o kształcie i budowie skórki charakterystyczne dla form lądowych (strzałka, jeżogłówki). Niektóre rośliny adaptują się szybko (kilka razy w ciągu sezonu wegetacyjnego). Inne wytwarzają liczne stadia przejściowe pomiędzy formą wodną i lądową. U rdestu ziemnowodnego forma wodna ma liście eliptyczne, błysz-

czące, nagie i na ogół długoogonkowe; forma lądowa – lancetowate, owłosione i krótkoogonkowe. Gatunki o takich właściwościach, po przebadaniu pod kątem tolerancji na ścieki, będzie można stosować do osuszania osadów.

Kształt i wielkość liści często związane są z warunkami świetlnymi i hydrodynamicznymi siedlisk. Lepsze wykorzystanie światła i wytrzymałość na napór wody rośliny osiągają przez zwiększenie powierzchni liści, przy jednoczesnym jej podzieleniu na drobne łatki, nitki lub wstęgi (kropidło, jaskier, strzałka). Dotyczy to w szczególności roślin strefy brzegowej, które okresowo mogą znaleźć się pod wodą, czasami szybko płynącą (potocznik, marek, przetacznik). Adaptacjom podlegają również rośliny wodne. Grązel, po uruchomieniu wody, wytwarza drobniejsze liście pływające po powierzchni i wiotkie, przydenne liście zanurzone, nieco podobne do liści sałaty. Moczarka i gatunki podobne do niej pokrojowo wytwarzają pędy o dłuższych międzywęzłach i drobniejszych liściach. Czasami jeden gatunek może tworzyć różne formy (wodną, ziemno-wodną, lądową), dostosowując się w zakresie swojej amplitudy ekologicznej do stopnia ekspozycji na ścieki. Wykorzystując hydromakrofitów w oczyszczaniu wody, należy uwzględniać zróżnicowanie ich form życiowych w różnych warunkach siedliska.

Podsumowanie i wnioski

1. Większość gatunków hydrofitów i helofitów, pospolicie i często spotykanych w Polsce, nadaje się do wykorzysta-

nia w jednym lub kilku etapach oczyszczania ścieków, doczyszczania wód pościekowych, osuszania osadów lub jako wskaźniki czystej wody, spełniającej wymagania klasyfikujące ją do wypuszczenia do wód powierzchniowych.

2. Biocenoza może być jedynym albo jednym z wielu składników oczyszczalni wody. Ponieważ stanowi ona ostatni, a często i samodzielny etap oczyszczania, jej znaczenie jest rozstrzygające dla stanu środowiska.

3. Celowe byłoby wzbogacenie zbiorowiska, na które oddziałują wpływające z oczyszczalni klasycznych tzw. wody pościekowe (oczyszczone zaledwie w 30–70%), o wiele nowych proponowanych gatunków.

4. Zastosowanie wielu gatunków w fitocenozach oczyszczających poprawiłoby ich trwałość, podniosło wydajność i zwiększyłoby redukcję zanieczyszczeń, a także przedłużyłoby czas funkcjonowania w sezonie wegetacyjnym.

5. Aktualne badania powinny określić wytrzymałość, a w związku z tym możliwość zastosowania określonych makrofitów do oczyszczania wody zanieczyszczonej w różnym stopniu i różnymi związkami chemicznymi.

6. Optymalnym (niskonakładowym i ekologicznym) sposobem oczyszczania małych ilości ścieków bytowych w punktowych źródłach zanieczyszczeń jest proponowany układ trzech zbiorników. Zbiornik pierwszy powinien mieć szeroką strefę podtopioną (odpowiadającą łągom) i wypłyconą (z roślinnością przybrzeżną). W obszarze otwartej toni głębokość ścieków nie powinna być zbyt duża ze względu na dyskomfort świetlny. Do

oczyszczania wody można tu wykorzystać ponad 15 gatunków roślin naczyniowych.

7. Zbiornik drugi powinien mieć, w stosunku do pierwszego, większą głębokość i większą powierzchnię strefy toni wodnej. W drugim zbiorniku, jako banku diaspor, powinny rosnać wszystkie gatunki występujące w pierwszym zbiorniku, ponadto można do niego wprowadzić największą liczbę gatunków (woda podczyszczona).

8. Zbiornik trzeci, pełniący funkcję odbiornika wody oczyszczonej, powinien mieć największą strefę toni wodnej. Liczbę gatunków roślin można tu ograniczyć do indykatorów czystego środowiska.

9. Kondycja roślin, a tym samym ich sprawność w oczyszczaniu wody, uwarunkowane są ich możliwościami dostosowania do środowiska. Adaptacji podlegają cechy budowy anatomicznej i morfologicznej. Dalszych badań wymaga ekologia roślin siedlisk: wodnych, wilgotnych i eutroficznych. Niewystarczająca znajomość biologii i ekologii większości hydrofitów powoduje, że nie są one szeroko stosowane w oczyszczalniach pracujących z udziałem roślin ani w niewielkich, przydomowych zbiornikach wodnych, pełniących funkcję oczyszczającą.

Literatura

- DOROCHOW S. 1958: za Wirberg G., Lachnowicz W. 1968: *Nawożenie sławów*. PWRiL.
OŚWIT J. 1980: *Rola roślinności bagiennej w środowisku przyrodniczym doliny Narwi w aspekcie oczyszczania się wód*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 234; 88–101.

- PACHUTA K 1992: *Przegląd krajowych i zagranicznych rozwiązań zastosowania roślin w procesie oczyszczania ścieków (w): Doskonalenie technologii i metod oczyszczania ścieków wiejskich z wykorzystaniem roślinności do eliminacji związków biogenych oraz sposobów unieszkodliwiania odpadów stałych*. Sprawozd. z tematu badawczego VI.4/SW/4 IMUZ, Falenty 36 s. (maszynopis).
- PACHUTA K. 1993: *Analiza wyboru najbardziej przydatnych metod pozyskiwania wybranych gatunków roślin hydrofilnych wraz z wynikami prób kiełkowania nasion tych roślin dla potrzeb zagrodowych oczyszczalni ścieków (w): Badanie możliwości i sposobów wykorzystania hydrofitów w wiejskich oczyszczalniach ścieków typu hydroponicznego*. Kier. tematu: I.Wojarska. Sprawozd. z tematu badawczego S-11/4.6/SW IMUZ, Falenty 33 s. (maszynopis).
- PACHUTA K. 1994: *Implantowanie roślin naczyniowych dla celów oczyszczania ścieków*. Grant KBN 50105080022 (wyniki badań).
- PACHUTA K. 1995: *Możliwości oczyszczania wody z pomocą hydrofitów*. Przegl. Nauk. Wydz. Mel. i Inż. Środ.7.
- PACHUTA K., NOWAK C. 1995: *Możliwości wzbogacania zbiorowisk roślin w hydrobotanicznych oczyszczalniach ścieków*. Przegl. Nauk. Wydz. Mel. i Inż. Środ. 8.
- PODBIELKOWSKI Z., PODBIELKOWSKA M. 1994: *Przystosowania roślin do środowiska*. Wyd. Szkol. i Pedagog., Warszawa: 583 ss.

Adres autorki

K. Pachuta
Katedra Przyrodniczych Podstaw Melioracji
SGGW
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166