

DIAGNOZOWANIE STANU ŚRODOWISKA
METODY BADAWCZE - PROGNOZY

Kompleksowe badania i ochrona środowiska naturalnego

Zbiór rozpraw pod redakcją Jerzego K. Garbacza



Bydgoszcz 2017

RECENZENCI

prof. dr hab. Marcin Dramiński
dr hab. inż. Waław Mozolewski, prof. nadzw. UWM
prof. dr hab. inż. Piotr Palich
dr hab. Jacek Piszczek, prof. nadzw. IOR-PIB
dr hab. Wojciech Popławski, prof. nadzw. WSB

FOTOGRAFIA NA OKŁADCE

mgr inż. Jerzy Ciechalski

© Copyright by Bydgoskie Towarzystwo Naukowe
Bydgoszcz 2017

ISSN 1898-6706

ISBN 978-83-60775-47-9

Objętość ark. wyd. 

Monografia dofinansowana ze środków
WOJEWÓDZKIEGO FUNDUSZU OCHRONY ŚRODOWISKA
I GOSPODARKI WODNEJ W TORUNIU



Wojewódzki Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej
w Toruniu

Dziękujemy za wsparcie finansowe w realizacji niniejszej monografii
następującym Firmom:

Zakłady Przetwórstwa Mięsnego – Niewieścín
Zakłady Mięsne „Prosiaczek” – Krąplewice
Partner XXI PIK – Bydgoszcz

Rozpowszechnianie:
Bydgoskie Towarzystwo Naukowe
ul. Jezuicka 4
85-102 Bydgoszcz
tel. 52 322 22 68
btn@um.bydgoszcz.pl
www.btn.bydgoszcz.eu

Projekt i opracowanie graficzne, skład, łamanie, druk i oprawa:

Argrafpol Agnieszka Blicharz-Krupińska
ul. Czarnieckiego 1, 53-650 Wrocław, tel. 507 096 545, argrafpol@argrafpol.pl



Łukasz Bryl¹, Tadeusz Sobczyński², Ryszard Wiśniewski³

¹ PROTE Technologie dla Środowiska Sp. z o.o. ul. Dziadoszańska 10; 61-248 Poznań

² Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Chemii, Zakład Chemii Analitycznej,
ul. Umultowska 89b; 61-614 Poznań

³ Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Instytut Biologii Środowiska, Zakład Hydrobiologii,
ul. Jana Karola Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz

Metody ochrony i rekultywacji jezior

Streszczenie

Publikacja zawiera podstawowe informacje na temat ochrony i rekultywacji zbiorników wodnych zmagających się z problemem eutrofizacji. Oprócz przedstawienia głównych źródeł zanieczyszczeń ekosystemów wodnych, autorzy przygotowali przegląd zastosowanych w ostatnim czasie metod rekultywacyjnych, wśród których wymienić należy metody biologiczne, chemiczne oraz mechaniczne. Szczegółowo opisano również kilka przykładowych realizacji tego typu przedsięwzięć, wraz z przedstawieniem uzyskanych wyników badań oraz osiąganych efektów. W pracy odniesiono się także do coraz częściej pojawiającego się problemu etyki w rekultywacji jezior.

Słowa kluczowe: jezioro, rekultywacja, eutrofizacja, biogeny, inaktywacja fosforu, capping.

Wstęp

Degradacja środowiska jest jednym z najpoważniejszych problemów, które musi rozwiązać współczesny człowiek. W minionych latach rozwój cywilizacji, zwłaszcza intensyfikacja rolnictwa, uprzemysłowienie, urbanizacja, znacznie wyprzedził wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa. Nie dostrzeżono, że te korzystne dla człowieka procesy powodują jednak negatywne skutki w otaczającym nas środowisku przyrodniczym. W konsekwencji dzisiaj zmuszeni jesteśmy podjąć wysiłek zmierzający do odwrócenia niekorzystnych zmian i, w miarę możliwości, przywrócenia środowisku jego naturalny stan.

Jednymi z najbardziej zagrożonych elementów naszego środowiska są ekosystemy wodne, zwłaszcza jeziora [1]. Ich degradacja jest najczęściej wynikiem wzmożonej eutrofizacji, spowodowanej dopływem substancji biogennych, głównie związków azotu i fosforu [2 - 6].

Ochrona zbiorników wodnych

Pierwszym działaniem, mającym na celu zahamowanie eutrofizacji, jest ochrona zbiorników polegająca na radykalnym, najlepiej całkowitym odcięciu dopływu azotu i fosforu. Rozróżnia się trzy źródła tych pierwiastków:

- źródła punktowe,
- źródła rozproszone,
- źródła obszarowe.

Źródła punktowe, to wszelkiego rodzaju ujścia kolektorów wprowadzających do zbiorników, częściej jednak do cieków zasilających te zbiorniki, ścieki bytowe, przemysłowe lub wody opadowe zmieszane ze ściekami bytowymi. Występują one głównie na terenach zurbanizowanych [7]. Źródła punktowe są stosunkowo łatwo rozpoznawalne i lokalizowane. Systematycznie wzrastająca liczba oczyszczalni ścieków oraz poprawiająca się ich sprawność powodują, że stosunkowo łatwo można ograniczyć lub całkowicie wyeliminować ich oddziaływanie na ekosystemy wodne.

Źródłami rozproszonymi nazywamy nieszczelne szamba, rowy chłonne, źle zabezpieczone składowiska obornika, nielegalne składowiska odpadów itp. Zazwyczaj funkcjonują one z naruszeniem prawa, są trudne do zlokalizowania i zwalczania. Jakimś rozwiązaniem są kontrole prowadzone przez Inspektoraty Ochrony Środowiska, ale równie ważna jest edukacja ekologiczna społeczeństwa.

Obszarowe źródła zanieczyszczeń to przede wszystkim pola uprawne. Jest to bardzo znaczące źródło, bowiem większość zlewni jezior użytkowanych jest rolniczo. Ograniczenie dopływu biogenów z tych terenów wymaga dostosowania struktury upraw, ze wskazaniem na trwałe użytki zielone, racjonalnej gospodarki nawozami, w tym przestrzegania terminów ich stosowania [8].

Oddziaływanie źródeł rozproszonych i obszarowych można ograniczyć kształtując zespoły roślinności brzegowej tak, aby stanowiła ona biologiczną barierę zatrzymującą biogeny. Korzystne są nadbrzeżne pasy zadrzewień i zakrzaczeń oraz pas szuwarów przybrzeżnych [6, 9]. Pewnym rozwiązaniem są rowy opaskowe, okalające zbiornik wodny, zbierające wody spływu powierzchniowego i odprowadzające je poza misę jeziora [2, 10].

Rekultywacja zbiorników wodnych

Często okazuje się, że pomimo radykalnego ograniczenia dopływu pierwiastków biogennych spoza akwenu, działania ochronne nie przynoszą oczekiwanego efektu. Substancje biogenne, dopływające latami do jeziora, kumulowały się w osadach dennych i przy sprzyjających warunkach uwalniane są ponownie do toni. Dotyczy to zwłaszcza fosforu, który zazwyczaj pełni funkcję limitującą i uwalniany z osadów napędza produkcję pierwotną. To wewnętrzne źródło biogenów może przewyższać ich dopływ spoza ekosystemu i całkowicie niweczyć wysiłek związany z uporządkowaniem zlewni. W takiej sytuacji koniecznym jest przeprowadzenie rekultywacji samego zbiornika wodnego.

Rekultywacja jeziora ma na celu przywrócenie jego poprzedniego, dobrego stanu. Istnieje wiele metod rekultywacji. Generalnie można je podzielić na dwie grupy:

- metody polegające na usunięciu nadmiaru biogenów poza ekosystem jeziora;
- metody polegające na częściowym wyłączeniu biogenów, zwłaszcza fosforu, z obiegu materii w ekosystemie jeziornym [10].

Do pierwszej grupy zaliczyć można przepłukiwanie zbiorników, usuwanie wód hypolimnionu, usuwanie osadów dennych jak również wykaszanie i usuwanie biomasy roślinności wodnej.

Do drugiej grupy zalicza się przede wszystkim inaktywację fosforu, napowietrzanie toni, bio-manipulację, konsolidację i izolowanie osadów dennych (capping) [10].

Z uwagi na sposób prowadzenia zabiegów rekultywacyjnych różni się metody:

- fizyczne (mechaniczne),
- chemiczne,
- biologiczne [11, 12].

Metody usuwania biogenów poza ekosystem jeziorny

Mechaniczne usuwanie osadów dennych jest niewątpliwie skutecznym sposobem eliminacji dużego ładunku biogenów, zwłaszcza fosforu, jak również innych zanieczyszczeń antropogenicznych, np. metali ciężkich, z ekosystem. Metoda ta jest jednak bardzo kosztowna i trudna technicznie, co związane jest z bardzo dużą objętością osadów zalegających misy jeziorne [3, 10, 13, 14]. Bardziej realne jest usuwanie tylko powierzchniowej warstwy osadu, jednak wymaga to szczegółowych badań pozwalających określić skład i właściwości osadów głębiej położonych, które w wyniku tego zabiegu zostaną odkryte i oddziaływać będą z tonią wodną [15, 16]. Usuwanie osadów jest dużą ingerencją w ekosystem jeziorny, co może odbić się znacząco na biocenozie i zagrozić jego funkcjonowaniu [10, 17]. W trakcie wykonywania tego typu prac szczególnie niebezpieczne jest zjawisko resuspensji osadu, podczas którego z reguły dochodzi do uwalniania się znacznych ilości fosforu do wody, wykorzystywanego następnie przez organizmy fitoplanktonowe do swojego rozwoju, a także do pojawienia się warunków redukujących.

Innym sposobem usuwania fosforu z ekosystemu jeziornego jest odprowadzanie wód hypolimnionu za pomocą tzw. rury Olszewskiego. Metodę tą stosować można tylko w przypadku głębokich jezior odpływowych ale nie wymaga ona nakładu energii i jest stosunkowo tania. Usuwanie tą metodą fosforu nie jest tak wydajne, jak jego usuwanie wraz z osadem dennym, ale jest zdecydowanie mniej inwazyjne a prowadzone w sposób ciągły pozytywne efekty daje po latach funkcjonowania [1, 10, 12, 13, 18, 19].

W przypadku płytkich jezior polimiktycznych stosować można jego przepłukiwanie czystszyimi wodami cieków lub w przypadku małych zbiorników - wodą wodociągową [10, 12, 13, 20].

Metody polegające na wyłączeniu biogenów, głównie fosforu, z bioobiegu

Bardzo często stosowaną metodą rekultywacji jest napowietrzanie toni jeziornej. Z jednej strony powodować ma ona poprawę warunków habitatowych, jednocześnie jednak wpływa na wartość potencjału redoks. Wprawdzie środowisko utleniające w warstwie nadosadowej sprzyja procesowi mineralizacji materii organicznej i tym samym uwalnianiu biogenów, jednak niewielkie stężenie tlenu rozpuszczonego, rzędu dziesiątych części mg O₂/l, kształtują potencjał redoks na bardzo niskim poziomie, ale wystarczającym, aby zatrzymać redukcję Fe(III) do Fe(II) i unieruchomić fosforany związane w nierozpuszczalnym kompleksie z żelazem trójwartościowym [2, 13, 21 - 23].

Istnieje wiele systemów wprowadzania powietrza do wody. Jedne z nich burzą stratyfikację termiczną w jeziorze, inne zachowują ją, napowietrzając np. tylko wody hypolimnionu [10, 14]. Ciekawym rozwiązaniem jest rozpylanie wody w powietrzu, gdzie następuje wymiana gazów, np. siarkowodoru na tlen rozpuszczony. Ostatnio bardzo popularne są aeratory pulweryzacyjne, napędzane siłą wiatru, jednak są one mało wydajne i o ich skuteczności panują różne opinie [24 - 31].

Drugą, równie często stosowaną metodą rekultywacji, jest inaktywacja fosforu i deponowanie go w osadach dennych. Polega ona na wprowadzaniu do toni lub bezpośrednio do osadów dennych jonów żelaza, glinu lub wapnia, które tworzą z fosforanami nierozpuszczalne kompleksy [20, 32 - 36]. Ich trwałość zależy od panujących w strefie naddennej warunków fizyczno-chemicznych, stąd przed podjęciem decyzji o zastosowaniu konkretnego koagulantu konieczne jest przeprowadzenie szczegółowych badań [37, 38].

Unieruchomienie fosforu w osadach dennych można osiągnąć poprzez odizolowanie ich od toni, np. zasypując je warstwą piasku. Metoda ta, zwana cappingiem, nadaje się w przypadku jezior głębokich, bowiem w przypadku jezior płytkich powoduje dodatkowe wypływanie [12, 39, 40].

Metody biologiczne

Do metod tych zaliczyć można zarówno działanie związane z kontrolą biomasy roślinnej jak i biomanipulację, rozumianą jako sterowanie populacją ichtiofauny w ten sposób, aby ograniczyć liczebność fitoplanktonu. Metody te są zazwyczaj stosowane jako uzupełnienie innych, np. opisanych powyżej, metod rekultywacji [11, 14, 29, 41 - 45].

Praktyczne zastosowanie metod rekultywacji jezior

PROTE Technologie dla Środowiska Sp. z o.o. z Poznania jest firmą działającą od 1995 r. na rzecz poprawy jakości wody i ochrony środowiska naturalnego w Polsce. PROTE-fos to kompleksowa usługa rekultywacji jezior, zwłaszcza akwenów o wysokiej trofii i z zakwitami sinicowymi. Polega ona na chemicznym blokowaniu fosforu w osadach dennych, w trakcie kontrolowanego i sztucznie wywołanego przy pomocy tlenu wzburzenia tych osadów. Dodatkowo inaktywacja fosforu wspierana jest przez metody wspomagające, indywidualnie dobierane na podstawie przeprowadzonych szczegółowych badań ekosystemu wodnego i jego zlewni. Wśród nich znajdują się głównie metody biologiczne, takie jak reintrodukcja makrofitów, zatapianie słomy jęczmiennej, czy też biomanipulacja, jak również metody mechaniczne, np. bagrowanie wydzielonych fragmentów dna. Poniżej przedstawiono opis przykładowych projektów realizowanych przez PROTE, wraz z prezentacją wyników i efektów prowadzonych prac rekultywacyjnych.

Inaktywacja fosforu w osadach dennych (PROTE-fos)

Inaktywacja fosforu bezpośrednio w osadach dennych, jako metoda chemiczna rekultywacji jezior, wykorzystana została m.in. do oczyszczania jezior gnieźnieńskich w latach 2009-2010, czy też Jeziora Wolsztyńskiego, w latach 2012-2014. Jako główna metoda rekultywacji stanowi doskonałą alternatywę dla aplikowania koagulantów bezpośrednio do toni, ponieważ, jak pokazują badania, jej efekty są bardziej trwałe [36]. Metoda inaktywacji fosforu w osadach dennych jest opatentowana i możliwa do wykonania tylko i wyłącznie z wykorzystaniem dwumodułowej jednostki pływającej „Proteus” (ryc. 1.). Moduł powierzchniowy odpowiada za przemieszczanie, precyzyjną nawigację, transport substancji chemicznych, kontrolę, sterowanie i zasilanie modułu podwodnego. Moduł podwodny wykorzystywany jest do wywołania kontrolowanej resuspensji osadów, ich napowietrzania, a także do dozowania substancji chemicznych, np. wiążących fosfor [46].



Ryc. 1. Dwumodułowa jednostka pływająca PROTEUS. Widok na moduł podwodny (góra) oraz powierzchniowy (dół)

Fig. 1. PROTEUS is a two-module vessel. View on underwater (up) and surface module (down)

Projekt pod nazwą „Rekultywacja jezior Jelonek i Winiary w Gnieźnie metodą inaktywacji fosforu w osadach dennych” został współfinansowany przez Wspólnotę Europejską w ramach Instrumentu Finansowego LIFE+ i był podzielony na następujące działania: monitoring i poprawienie sytuacji w zlewniach jezior Winiary i Jelonek oraz regeneracja możliwości retencyjnych stawu przy jeziorze Jelonek (A1), inaktywacja fosforu w osadach dennych jezior oraz likwidacja zakwitów sinicowych w stawie i jeziorach (A2), regulacja i restrukturyzacja obsady ryb (A3) oraz stymulacja rozwoju i dosadzanie makrofitów w jeziorach (A4). Działania te miały doprowadzić do realizacji następujących założeń: redukcji zawartości fosforu w toni wodnej do ok. 0,1-0,2 mg/l, podwyższenia widzialności krążka Secchiego do ok. 1,0 m, redukcji chlorofilu w okresie letnim do ok. 15 mg/l. Pierwszym etapem prac na obu jeziorach było podanie koagulantu z powierzchni, aby wytrącić zawieszinę oraz związać biodostępne formy fosforu, przyspieszając ich deponowanie na dnie zbiorników. Następnie przeprowadzono zabieg inaktywacji fosforu w osadach dennych. Działania wykonano zgodnie z wydanym pozwoleniem wodno-prawnym (Jelonek: FeCl_3 - 46,4 m^3 , Phoslock - 32,0 t; Winiary: FeCl_3 - 58,9 m^3 , Phoslock - 7,7 t). Wśród metod wspomagających metodę główną wykonano następujące działania:

- regenerację możliwości retencji fizycznej stawu na dopływie do jeziora Jelonek (pogłębienie jego części, poprawa warunków sedymentacji, wydobyto 52 t osadu) oraz jego retencji biologicznej (wykonanie nasadzeń roślinności wodnej zanurzonej i wynurzonej, akumulującej substancje biogenne w swoich tkankach);
- zatapianie słomy jęczmiennej w celu ograniczenia rozwoju glonów planktonowych, w tym sinic (łącznie około 6 t słomy);

- restrukturyzację i regulację obsady ryb: odłowiono około 237 kg (Jelonek) i około 209 kg (Winiary) tzw. ryby białej, a następnie dokonano zarybień jesiennym i wiosennym narybkiem szczupaka, około 250 kg (Jelonek) i 300 kg (Winiary);
- nasadzenie i reintrodukcję makrofitów (łącznie na obu jeziorach i stawie w latach 2009-2010 wprowadzono 7050 sztuk sadzonek roślinności wodnej, w szczególności następujących gatunków: pałka szerokolistna (*Typha latifolia*), grąźel żółty (*Nuphar lutea*), łączeń baldaszkowaty (*Butomus umbellatus*), oczeret jeziorny (*Schoenoplectus lacustris*), kosaciec żółty (*Iris pseudacorus*), wywłócznik kłosowy (*Myriophyllum spicatum*), rogatek sztywny (*Ceratophyllum demersum*), rdestnica połyskująca (*Potamogeton lucens*), osoka aloesowata (*Stratiotes aloides*).

Na skutek przeprowadzonych działań rekultywacyjnych stan obu jezior uległ znacznej poprawie już po pierwszym etapie ich wdrażania. Wzrostu przezroczystości wody, szczególnie w jeziorze Winiary, doprowadził do naturalnego odbudowania się roślinności wodnej i poprawił się średnio o 97% (Winiary) i 103% (Jelonek) w stosunku do okresu przed rozpoczęciem prac, wynosząc w zależności od miejsca od 1,1 m do 4,0 m. W toni wodnej zaobserwowano spadek stężenia P_{og} średnio w zakresie od 55% (Winiary) do 58% (Jelonek), spadek średnich stężeń chlorofilu-a w zakresie od 52% (Jelonek) do 67% (Winiary) oraz zmniejszenie udziału sinic w fitoplanktonie z 60% do 2% (Winiary), a także z 81% do 65% (Jelonek). W osadach dennych obu jezior również obserwowano znaczną poprawę. Wzrosła wartość stosunku Fe:P od 18% (Jelonek) do 114% (Winiary). Zaobserwowano również spadek zawartości frakcji mobilnych fosforu w głęboczkach obu jezior w zakresie 16-19% oraz wzrost zawartości frakcji niemobilnych, np. o 21% (Jelonek). Poprawiła się również wartość parametru EPC-0 i np w jeziorze Jelonek udało się uzyskać poprawę na poziomie 57-85%. W związku z pozytywnym efektem ekologicznym zastosowanych działań oraz innowacyjnym charakterem całego przedsięwzięcia, w roku 2012 Komisja UE uznała projekt rekultywacji jezior gnieźnieńskich jako jeden z pięciu najlepszych projektów realizowanych ze środków LIFE+.

Przeprowadzenie rekultywowanych ekosystemów wodnych w alternatywny stan stabilny – czystowodny z dominacją makrofitów udało się utrzymać przez 5 lat (Jelonek) i 6 lat (Winiary) od momentu zakończenia projektu. Powodem tego były najprawdopodobniej niezidentyfikowane źródła zanieczyszczeń oraz przestarzała, ogólnospławna instalacja kanalizacyjna.

Projekt pod nazwą „Inaktywacja fosforu w osadach dennych Jeziora Wolsztyńskiego”, realizowany w latach 2012-2014, opierał się wyłącznie na chemicznym blokowaniu biogenów, a także na szczegółowym monitoringu zbiornika i jego zlewni. Jezioro Wolsztyńskie o pow. ok. 120 ha jest akwenem przepływowym, polimiktycznym. Uzupełnienie układu hydrologicznego zlewni tego zbiornika stanowią inne, mniejsze dopływy (cieki), mające bardzo istotny wpływ na jego żyzność [47].

Zabieg inaktywacji PO_4 w osadach wykonano dwukrotnie: wiosną w 2012 i 2013 roku. W roku 2014 utworzono na rzece Dojcy strefę inaktywacji fosforu z wykorzystaniem $FeCl_3$, powodującego strącenie fosforanów w wodzie dopływającej do jeziora. Głównym celem przeprowadzonej rekultywacji było: zahamowanie postępującej eutrofizacji Jeziora Wolsztyńskiego poprzez eliminację fosforu mineralnego z toni wodnej do wartości śladowych (poniżej 0,05 mg PO_4 /l); redukcja zawartości fosforu ogólnego w toni wodnej do wartości poniżej 0,2 mg P/l; wzrost przezroczystości wody (powyżej 1 metra); redukcja zawartości chlorofilu-a (poniżej 40 μ g/l) i spadek produkcji fitoplanktonu; odbudowa zespołów roślin zanurzonych; wzrost bioróżnorodności zbiorowisk fito- i zooplanktonu; likwidacja zakwitów sinicowych.

Potwierdzeniem prawidłowo wykonanego zabiegu inaktywacji fosforu w osadach dennych są wyniki prowadzonego w latach 2012-2014 monitoringu [46]. Świadczą o tym zarówno badania osadów dennych jak i wartości badanych parametrów w toni. Stężenie fosforu mineralnego uległo obniżeniu do wartości poniżej 0,1 mg PO₄/l, doszło do redukcji P_{og} do średniej zawartości 0,04 mg/l, średnia zawartość chlorofilu-a wynosiła 10 µg/l, wzrosła bioróżnorodność zbiorowisk fito- i zooplanktonu, wzrosła liczebność zespołów bentosu, a skład gatunkowy i ilościowy makrofitów (szczególnie elodeidy) uległ poprawie (wzrost wskaźnika ekologicznego ESMI z 0,24 do 0,27). Na podstawie przeprowadzonych odłowów ryb stwierdzono, że stosunek biomasy ryb drapieżnych do niedrapieżnych jest właściwy (37%:63%).

Uzyskane pozytywne wyniki nie przełożyły się jednak na poprawę przezroczystości wody w Jeziorze Wolsztyńskim, która w roku 2014 średnio wynosiła 0,5 m. i spowodowana była dużą ilością zawiesiny ogólnej, niegenerowanej w jeziorze. Za główną przyczynę takiego stanu rzeczy uznano intensywny opad deszczu w lipcu 2013 r., podczas którego spadło 74 l/m², co stanowiło ponad 62% wszystkich opadów występujących w tym miesiącu, a także przede wszystkim stały dopływ substancji biogennych oraz zawiesiny ogólnej ze zlewni jeziora. W konsekwencji miało to przełożenie na wzrost produkcji pierwotnej i znaczne ilości zawiesiny.

Kluczowe dla stanu Jeziora Wolsztyńskiego okazały się, oprócz rzeki Dojcy, dopływające do niego ciekі, szczególnie z rejonu miejscowości Karpicko (północna i północno-wschodnia część zbiornika). Średnie stężenia związków fosforu w ich wodach wahały się w przedziale od 0,54 mg PO₄/l do 1,07 mg PO₄/l. Podczas jednorazowych pomiarów zawartości PO₄ niektórych dopływów wynosiły nawet 2,0-3,0 mg/l. Ciekі te charakteryzowały się również dużymi zawartościami zawiesiny ogólnej: 60,0 mg/l, 127,0 mg/l, czy też 150 mg/l. W niektórych przypadkach ciekі nosły ze sobą całkowicie odtlenioną wodę (poniżej 1,0% nasycenia) a konduktywność sięgała nawet 1200 µS/cm.

Powyższe wartości parametrów fizyczno-chemicznych uniemożliwiały uzyskanie trwałego efektu ekologicznego w postaci stabilnego, czystowodnego stanu jeziora w kolejnych latach i przyczyniły się do obniżenia przezroczystości wody w zbiorniku. Utrzymanie pozytywnych efektów rekultywacji w dużej mierze uzależnione jest od zabezpieczenia i oczyszczania wszystkich, stanowiących zagrożenie, cieków. Dopiero tego typu działanie ochronne pozwoli skutecznie utrzymać zakładany efekt ekologiczny i spowodować, że jakość wody w akwenu ulegnie systematycznej poprawie [46].

Konsolidacja osadów dennych

Mocno uwodnione, organiczne osady denne charakteryzują się dużymi stężeniami substancji biogennych, wpływającymi na żyzność zbiorników wodnych. Ich konsystencja sprawia, że są one szczególnie podatne na niekorzystne z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania ekosystemu wodnego zjawisko resuspensji, podczas którego oprócz fosforu z osadu uwalniane są do toni formy przetrwalnikowe sinic. Problem ten występuje m.in. w powstałych w latach 90. ubiegłego wieku wyrobiskach piasku w strefie brzegowej Zatoki Puckiej, dla których w 2009 roku opracowano szczegółowy program rekultywacji [48]. Koncepcja zakładała w pierwszej kolejności przeprowadzenie rekultywacji wyrobiska Władysławowo, ze względu na zaplanowane prace czerpalne piasku, stanowiące element rozbudowy pobliskiej przystani rybackiej w Kuźnicy. Przy opracowywaniu projektu rekultywacji wyrobiska jednym z głównych problemów stanowił wybór odpowiedniego, bezpiecznego dla środowiska rozwiązania technologicznego, które umożliwiłyby

sypianie pozyskanego piasku bez wzburzenia (resuspensji) warstwy płynnych osadów, zalegających na jego dnie. Ich wypłukanie z wyrobiska i rozprzestrzenienie po całej Zatoce mogłoby doprowadzić do katastrofy ekologicznej w postaci intensywnych zakwitów fitoplanktonu.

W 2012 roku rekultywacji głębokiego na około 8 m wyrobiska Władysławowo o powierzchni ok. 0,65 ha podjęła się Spółka PROTE [49]. Przed przystąpieniem do wykonania zabiegu polegającego na zasypaniu wyrobiska piaskiem, wykonano jednorazowe badania środowiskowe. Pobrano cztery próbki osadów dennych w celu określenia stężeń fosforu oraz pomiaru miąższości zalegających osadów dennych, wartości niezbędnych do obliczenia ich objętości. W próbkach osadu oznaczano uwodnienie oraz pojemność sorpcyjną względem fosforanów (EPC-0). Na tej podstawie określono dawki koagulantu $FeCl_3$, niezbędnego do inaktywacji nagromadzonego w osadzie fosforu, a także określono dawki bentonitu, niezbędne do wykonania zabiegu konsolidacji badanych namulów. Działania technologiczne, polegające na inaktywacji mobilnego fosforu oraz stabilizacji osadów przed zasypaniem wyrobiska piaskiem, były możliwe do wykonania tylko przy użyciu jednostki pływającej „Proteus”, ponieważ pozwalała ona na precyzyjne podawanie substancji chemicznych bezpośrednio do osadów, nawet na tak dużych głębokościach.

Po zakończeniu prac, polegających na podawaniu substancji chemicznych, określono efektywność przeprowadzonych działań. Potwierdzono ustabilizowanie bentonitem mobilnej warstwy osadów na dnie wyrobiska, a pobrane do badań próbki namułu wykazały prawidłowe związanie fosforu (zdolność sorpcyjna osadu wzrosła ponad pięciokrotnie) [49]. Dalsze obserwacje zasypanego wyrobiska potwierdziły fakt prawidłowej odbudowy ekosystemu morskiego. W miejscu wykonywanych zabiegów rekultywacyjnych pojawiły się podwodne łąki trawy morskiej (*Zostera marina*). Konsolidacja osadów dennych wyrobiska Władysławowo była pierwszymi w Polsce tego typu działaniami na obszarach morskich. W bieżącym roku planowane są dalsze badania osadów, aby określić skuteczność zastosowanej metody po 5 latach od jej wdrożenia oraz określić, jakie zmiany fizyczno-chemiczne zachodzą w organicznych osadach przykrytych warstwą piasku.

Bariera biologiczna ze słomy jęczmiennej

Wysoka trofia zbiorników wodnych, w konsekwencji prowadzi do intensywnego zakwitów organizmów fitoplanktonowych, w skład których wchodzi mikroskopijne organizmy roślinne, głównie glony niższe, oraz także toksyczne sinice, ograniczając w ten sposób użytkowanie takich akwenów. Jedną z metod, która pozwala na ograniczenie tego typu zjawiska, jest zastosowanie bariery biologicznej ze słomy jęczmiennej (ryc. 2.). Funkcjonowanie tego typu rozwiązania opiera się na tlenowej mineralizacji słomy jęczmiennej z udziałem wodnych grzybów i bakterii, co w konsekwencji prowadzi do produkcji algistatyku odpowiadającego za blokowanie rozwoju komórek fitoplanktonu.

pozytywne efekty zastosowania słomy jęczmiennej zaobserwować można na 16 ha zbiorniku retencyjnym Grupy LOTOS w Przejazdowie, który sprawuje funkcję retencyjno-osadową i wykorzystywany jest głównie do celów technologicznych. Firma PROTE wdrożyła omawianą metodę w roku 2012, na podstawie przeprowadzonych w roku 2011 szczegółowych badań monitoringowych, nie tylko zbiornika, ale również jego zlewni. Lokalizacja bariery dostosowana została pod kątem najintensywniejszego przepływu wody w zbiorniku, dzięki czemu algistatyk jest rozprowadzany po całym akwenu. Słoma co roku jest wymieniana, co umożliwia osiągnięcie zakładanego celu, czyli minimalizację intensywnych zakwitów. Potwierdzają to również wyniki wykonywanych w latach 2011-2016 badań monitoringowych, których zakres obejmował głównie

stężenia substancji biogennej, zawiesinę, chlorofil, przezroczystością wody i określenie stanu ilościowego i gatunkowego fitoplanktonu.

Zbiornik podatny jest na eutrofizację z uwagi na rolniczy charakter zlewni, a rzeka Motława, z której pobierana jest woda do zbiornika, cechuje się dużymi stężeniami substancji biogennej (stężenia PO_4 na poziomie 1,57 mg/l). W samym zbiorniku, w latach 2011-2016 stężenia PO_4 wahały się od 0,03 mg/l, przez 1,36 mg/l, 1,7 mg/l, aż do 2,2 mg/l. Praktycznie na większości stanowisk monitoringowych stężenia PO_4 były wystarczające dla zainicjowania zakwitnięcia sinic (fitoplanktonu). Z literatury wiadomo, że dopiero przy stężeniu 0,05 mg PO_4 /l jest prawdopodobieństwo, że zakwit nie nastąpi. Pewność wymaga jednak stężenia 0,005 mg PO_4 /l. Pomimo takich zawartości PO_4 , po zastosowaniu biologicznej bariery ze słomy jęczmiennej udało się osiągnąć widzialność na średnim poziomie 1,64 m, a największa dotychczas odnotowana przezroczystość była na poziomie 3,3 m (lipiec 2012). W stosunku do roku 2011, gdzie widzialność krążka Secchiego była na poziomie 0,3-0,4 m, uzyskane wyniki są bardzo pozytywne. Skuteczność zastosowanego rozwiązania potwierdza również średnia liczebność fitoplanktonu, określona w 2011 roku (342094,9 komórek fitoplanktonu/ml wody), będąca czterokrotnie wyższa w stosunku do średnich wartości z 2016 roku (80647,9 komórek fitoplanktonu/ml wody). Znacznie zmieniły się również stężenia chlorofilu-a, których średnia wartość dla okresu 2012-2016 wynosiła 5,46 $\mu\text{g/l}$ i była dużo niższa w stosunku do wyników uzyskanych w 2011 r. (54,4 $\mu\text{g/l}$, 150 $\mu\text{g/l}$ i 191 $\mu\text{g/l}$). Zakłada się że bezpiecznym stężeniem chlorofilu-a w jeziorach jest zawartość $< 10 \mu\text{g/l}$.



Ryc. 2. Bariera biologiczna ze słomy jęczmiennej w okolicach pompowni zaraz po zainstalowaniu na zbiorniku (dół), oraz po 2 tygodniach od dnia montażu (górze)

Fig. 2. The biological barrier of barley straw in the area of the pumping station immediately after installing in the water reservoir (down) and after 2 weeks from the date of installation (up)

Pomimo wysokich stężeń substancji biogennych, dzięki zastosowanej barierze biologicznej udało się skutecznie ograniczyć zakwit fitoplanktonu. Efekt ten utrzymuje się stale od 2012 roku. Warto również podkreślić, że poprawa przezroczystości wody wpłynęła pozytywnie na występowanie makrofitów. Zmiany te obserwuje się od 2014 roku. Aktualnie roślinność zanurzona stanowi 95% powierzchni fitolitoralu, jednak jest bardzo uboga pod względem syntaksonomicznym i zupełnie zdominowana przez zespół rogatka sztywnego, charakterystycznego dla ekosystemów o wysokiej trofii. Cieszy również fakt pojawienia się w zbiorniku takich organizmów wodnych, jak gąbki słodkowodne, mszywioly, czy też racicznice zmienne (*Dreissena polymorpha*).

Wyspa makrofitowa

Roślinność wodna coraz częściej wykorzystywana jest w zabiegach rekultywacji jezior. Jej wykorzystanie i obecność w środowisku wodnym wpływa pozytywnie na wzrost bioróżnorodności, konkurując przy tym z fitoplanktonem o substancje biogenne i ograniczając w ten sposób możliwość występowania intensywnych zakwitów. Roślinność wodna charakteryzuje się dobrymi właściwościami filtracyjnymi, dlatego też sztuczne wyspy makrofitowe stosuje się do oczyszczania wody na całym świecie, np. w USA, czy w Chinach. Jak pokazują badania, tego typu rozwiązania dają pozytywne efekty. Efektywność usuwania nutrientów jest zadziwiająca, a ich redukcja, w zależności od zastosowanych rozwiązań technicznych, może wynosić nawet 94-96%. Wyspy makrofitowe to również świetne miejsca bytowania organizmów wodnych, w tym ryb. Strefa korzeniowa staje się doskonałym miejscem bytowania i schronienia dla zooplanktonu i narybku.

W latach 2011-2015 Spółka PROTE, na zlecenie WZMIUW w Płocku, zrealizowała projekt polegający na stworzeniu sztucznej wyspy makrofitowej na Jeziorze Zdrowskim (Gmina Łąck), w ramach programu „renaturyzacji jezior w gminie Łąck, powiat płocki”. Celem powstałej wyspy było stałe oczyszczanie wód jeziora z substancji biogennych.

Wyspa została stworzona zgodnie z zasadami hydrotechniki, ekologii roślin i technikami akwakultury oraz dostosowana do warunków atmosferycznych panujących na Jeziorze Zdrowskim. Pełni funkcję materaca hydroponicznego, który w przyrodzie w warunkach naturalnych występuje w postaci tak zwanego „pła”. Skonstruowana została w taki sposób, aby posiadała odpowiednią pływalność dla tworzącej się na niej fitomasie (ryc. 3.). W latach 2011-2015 do jej obsadzenia wykorzystano ponad 10 tysięcy sadzonek różnych gatunków roślinności wodnej. Skład gatunkowy dobrany został w ten sposób, aby tworzył integralną całość. Posiadał dużą tolerancję zarówno dla warunków mezotroficznycych jak i eutroficznycych. Wśród wykorzystanych gatunków wymienić należy: *Alisma plantago-aquatica*, *Alnus glutinosa*, *Butomus umbellatus*, *Calla palustris*, *Carex acutiformis*, *Carex pseudocyperus*, *Cicuta virosa*, *Dryopteris thelypteris*, *Glyceria aquatica*, *Iris pseudacorus*, *Lycopus europaea*, *Lysimachia numularia*, *Lythrum salicaria*, *Mentha aquatica*, *Phalaris arundinacea*, *Phragmites australis*, *Ranunculus lingua*, *Scirpus lacustris*, *Sparganium ramosum*, *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*.



Ryc. 3. Sztuczna wyspa makrofitowa zlokalizowana na Jeziorze Zdrowskim
Fig. 3. Macrophytes artificial floating island located on Zdrowskie Lake

Wyspa makrofitowa nie tylko usuwa z wody nutrieny, ale wzbogaca również krajobraz jeziorny i stwarza dogodne siedlisko do bytowania organizmów wodnych. Przeprowadzone w latach 2011-2015 obserwacje funkcjonowania wyspy pokazały, że największe zagrożenie dla kondycji występujących na niej makrofitów stanowi ptactwo wodne, w szczególności mewa śmieszka (*Chroicocephalus ridibundus*), która zakładając swoje gniazda na wyspie ogranicza i hamuje rozwój niższych makrofitów (np. *Cicuta virosa*, *Iris pseudacorus*, *Mentha aquatica*). Niestety, w ramach projektu nie był prowadzony monitoring fizyczno-chemiczny wody, pozwalający określić skuteczność zastosowanego rozwiązania. Wnioskować jednak można, że ze względu na bliskie umiejscowienie wyspy od kąpieliska w Koszowlówce, wyspa spełniła swoją funkcję. W czasie trwania projektu nie doszło bowiem do jego zamknięcia przez Sanepid i nie odnotowano w tym miejscu intensywnych zakwitów fitoplanktonu.

Prace pielęgnacyjno-rekultywacyjne na jeziorze Siekiera

Jezioro Siekiera znajduje się na terenie miejscowości Szamocin (woj. wielkopolskie), a jego powierzchnia wynosi około 12 ha. Charakteryzuje się niewielką głębokością maksymalną, ok. 6,0 m, oraz głębokością średnią, ok. 3,0 m. Przeprowadzony w latach 2014-2016 monitoring potwierdził fakt pogorszenia się jakości jeziora w stosunku do roku 1982 [50]. W konsekwencji, na skutek postępującej eutrofizacji jego użytkowanie w ostatnich latach zostało ograniczone, głównie w wyniku intensywnej ekspansji rogatka sztywnego (*Ceratophyllum demersum*) oraz mulistego dna w rejonie kąpieliska, które charakteryzowało się dużym upłynnieniem i było bogate w materię organiczną.

W latach 2014-2015 przeprowadzono kompleksowe badania wody i osadów dennych, a na ich podstawie opracowano indywidualny projekt prac rekultywacyjnych, mających powstrzymać

proces wzmoczonej eutrofizacji jeziora. Wdrożone w pierwszym etapie rekultywacji zabiegi miały za zadanie polepszyć walory estetyczne i funkcjonalne strefy kąpieliska oraz ograniczyć ekspansywny rozwój rogotka. Zaproponowane rozwiązania mogą przyczynić się również do ewentualnej poprawy jakości wody w zbiorniku, co widoczne powinno być w latach późniejszych.

W pierwszym etapie prac pobrano do badań osady dennie w celu ustalenia dawek substancji chemicznych niezbędnych do przeprowadzenia konsolidacji. Następnie kąpielisko oczyszczono ręcznie z roślinności podwodnej, biomasy roślinnej oraz niebezpiecznych przedmiotów (butelki, puszki, itp.). Kolejne działania polegały na konsolidacji płynnego osadu w celu ograniczenia zjawiska jego resuspensji podczas wykonywanych dalszych prac. Do konsolidacji użyto bentonitu oraz aktywator w postaci wodorowęglanu sodu. Strefę kąpieliska, z wykorzystaniem metody „cappingu”, przykryto ok. 15 cm warstwą piasku płukanego o uziarnieniu 0-2 mm. Oprócz zwiększenia atrakcyjności tego miejsca, ograniczono w ten sposób rozwój roślinności podwodnej oraz zminimalizowano uwalnianie do toni wodnej fosforu z organicznych osadów dennych (piasek pełni funkcję izolacyjną). W następnej kolejności wyprofilowano brzegi kąpieliska oraz plażę trawiastą zamieniono na piaszczystą (ryc. 4).



Ryc. 4. Zmiany jakie zaszły na kąpielisku jeziora Siekiera (górze: okres przed przystąpieniem do prac, dół: zakończenie prac)

Fig. 4. Changes in the bathing area of the Siekiera Lake (up: period before work, down: completion of work)

Oprócz prac polegających na uatrakcyjnieniu kąpieliska przeprowadzono w wyznaczonych strefach jeziora (w strefie litoralu) zabieg precyzyjnego, nieinwazyjnego przycinania (koszenia) roślinności podwodnej, głównie rogotka sztywnego. Do tego celu wykorzystano kosiarkę pływającą (ryc. 5.). Skoszoną biomasę roślinną usunięto z wody i wywieziono na składowisko odpadów. Celem prac polegających na koszeniu makrofitów było zmniejszenie udziału substancji biogennej w zbiorniku i obniżenie jego trofii.



Ryc. 5. Kosiarka pływająca wykorzystana do przycinania roślinności wodnej oraz biomasa roślinna usuwana z jeziora w trakcie wykonywanych prac

Fig. 5. Mowing boat used for trimming water plants and the macrophytes biomass removed from the lake during the work

Badania jeziora Siekiera przeprowadzone w 2016 roku potwierdziły odbudowywanie się populacji makrofitów po zabiegu koszenia. Skład gatunkowy i ilościowy roślin wodnych był zbliżony do roku 2015 r. Przeprowadzone zabiegi przyczyniły się do zmniejszenia udziału występowania rogatka sztywnego o ponad 6%. Wyniki analiz fizyczno-chemicznych wody z lat 2014-2016 pokazały, że stężenia P_{og} mieściły się w przedziale 0,009 – 0,22 mg P/l, a mineralnego PO_4 , w przedziale 0,03 – 0,10 mg PO_4 /l i jesienią z reguły uzyskiwały najwyższą wartość. Zawartość chlorofilu-a wynosiła z reguły poniżej 10 μ g/l. Zawiesina ogólna mieściła się w przedziale od 1 do 8 mg/l. Najwyższe wartości odnotowano w sierpniu 2015 i 2016 roku, czyli w okresie, gdy na zbiorniku wykonywane były różnego rodzaju prace (budowa nowych pomostów, czy uatrakcyjnienie strefy kąpieliska). Widzialność krążka Secchiego była na dobrym poziomie. Średnia ze wszystkich stanowisk i terminów badań wynosiła ponad 1,7 m. Tylko na stanowisku badawczym w rejonie głęboczka, zarówno w 2015 jak i 2016 roku widzialność była najgorsza i wynosiła 0,9 – 1,1 m (wpływ wykonywanych prac).

Reasumując, wykonywane w 2016 roku prace pielęgnacyjno-rekultywacyjne nie wpłynęły negatywnie na jakość jeziora Siekiera. Zmniejszył się natomiast udział procentowy rogatka sztywnego, co może przyczynić się do pojawienia innych gatunków elodeidów w tym miejscu. Warto jednak zaznaczyć, że obecność roślinności wodnej w tym zbiorniku jest kluczowa, a jej całkowite usunięcie spowodowałoby przejście ekosystemu w alternatywny, stabilny stan mętnowodny, zdominowany przez sinice.

Podsumowanie

Rekultywacja zbiorników wodnych to szereg działań i prób ingerowania w struktury oraz funkcje bardzo złożonego ekosystemu wodnego, często przy niepełnej, ograniczonej wiedzy o tychże strukturach i funkcjach. Jak widać, jeziora są na tyle wielopłaszczyznowym układem, że przeprowadzenie prac oczyszczających i ochronnych nie może być działaniem jednorazowym i ostatecznym. Aby zapewnić pozytywne efekty wykonywanych zabiegów, jeziora wymagają ciągłej dbałości. Potwierdzają to zrealizowane prace rekultywacyjne i ich skutki. Oprócz uregulowania gospodarki wodno-ściekowej w zlewni, minimalizacji wszelkich źródeł zanieczyszczeń lub całkowitej ich likwidacji, należy również podnieść świadomość ekologiczną społeczeństwa. Szczególnie, że coraz intensywniejsze wykorzystywanie terenów wokół jezior na zabudowę mieszkalną i lotniskową nierzadko powoduje eutrofizację tych zbiorników. Warto podkreślić, że sukces rekultywacji nie opiera się tylko na ograniczeniu dopływu zanieczyszczeń do ekosystemu wodnego, lecz jest ściśle związany z prawidłowym rozpoznaniem problemu poprzez wykonanie szczegółowych badań fizyczno-chemicznych wody i osadów dennych. Dopiero takie podejście stwarza realne możliwości doboru najlepszej metody rekultywacji, nie tylko pod względem końcowego efektu ekologicznego, ale również pod kątem ekonomicznym.

Literatura

1. Kostecki M, 2012, Rekultywacja zbiornika antropogenicznego metodą usuwania hypolimnionu (południowo-zachodnia Polska), *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 15, nr 2: 101-117
2. Lampert W., Sommer U., 1996, *Ekologia wód śródlądowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN
3. Kajak Z., 1998, *Hydrobiologia - Limnologia, Ekosystemy wód śródlądowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN
4. Sojka M., Murat-Błażejewska S., Kanclerz J., 2008, Wymywanie związków azotu i fosforu ze zlewni rolniczej w zróżnicowanych okresach hydrometeorologicznych, *Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych*, z. 526: 443-450
5. Solovey T., 2008, Ocena potencjalnej eutrofizacji wód płynących w zlewni środkowej Wisły, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t. 8, z. 1 (22): 323-336
6. Izydorczyk K., Frątczak W., Drobnińska A., Badowska M., Zalewski M., 2010, Zastosowanie stref ekotonowych w ograniczeniu zanieczyszczeń obszarowych, w: *Ochrona i rekultywacja jezior* (red. R. Wiśniewski), *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń*: 63-71
7. Dunalska J., Grochowska J., Brzozowska R., Wiśniewski G., Szymański D., Sieńska J., Napiórkowska-Krzebietke A., 2015, Rekultywacja jezior miejskich – nowe wyzwania, w: *Ochrona i rekultywacja jezior* (red. R. Wiśniewski), *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń*: 19-30
8. *Kodeks dobrej praktyki rolniczej*, 2004, Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Ministerstwo Środowiska, Warszawa
9. Bydałek F., Frątczak, Cichowicz E., Gross R., Kaźmierczak K., Jarosiewicz P., Izydorczyk K., 2015, Redukcja dopływu zanieczyszczeń obszarowych z terenów zlewni zbiorników wodnych przy użyciu sieci stref ekotonowych - przykład Zbiornika Sulejowskiego, w: *Ochrona i rekultywacja jezior*, (red. R. Wiśniewski), *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Toruniu*: 107-124

10. Gawrońska H., Lossow K., Łopata M., 2003, Jeziora – metody ochrony i rekultywacji ze szczególnym uwzględnieniem Jeziora Głęboczek w Tucholi, Zakład Ochrony i Rekultywacji Wód, Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
11. Czerniawski R., Sługocki Ł., Domagała J., Pilecka-Rapacz M., 2015, Zabieg krótkoterminowej biomanipulacji ekologicznej zastosowany w trzech śródlęśnych płytkich jeziorach, *Rocznik Ochrona Środowiska*, vol. 17: 1207-1223
12. Pikuła K., Heese T., 2015, Metody rekultywacji jezior, w: *Sposoby ochrony i rekultywacji jezior poznańskich* (red. A.E. Ławniczak), Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań: 101-107
13. Wiśniewski G., Dunalska J., 2013, Rekultywacja Jeziora Kortowskiego, w: *Dziedzictwo przyrodnicze Warmii, Mazur i Powiśla* (red.: Cicierska H, Hołdyński C.), Wydawnictwo Mantis, Olsztyn
14. Chmist J., Hämmerling M., 2016, Wybór najskuteczniejszej metody rekultywacji zbiorników wodnych z wykorzystaniem metody AHP, *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus* 15 (2): 27–39
15. Sobczyński T., Joniak T., 2009, Vertical changeability of physical-chemical features of bottom sediments in three lakes in aspect type of water mixis and intensity of human impact, *Polish J. of Environ. Stud.* Vol. 18, No. 6: 1093-1099
16. Sobczyński T., Joniak T., 2009, Differences in composition and proportion of phosphorus fractions in bottom sediments of Lake Góreckie (Wielkopolska National Park), *Environment Protection Engineering.* Vol. 35, No. 2
17. Sychra J. Adamek Z., 2011, The impact of sediment removal on the aquatic macroinvertebrate assemblage in a fishpond littoral zone, *J. Limnol.*, 70(1): 129-138
18. Kostecki M., Suschka J., 2013, The successful results of Pławniowice Reservoir (Upper Silesia region – south of Poland) restoration by hypolimnetic withdrawal, *Archives of Environmental Protection*, vol. 39 no. 1: 17 - 25
19. Dunalska J., 2002, Influence of Limited Water Flow in a Pipeline on the Nutrients Budget in a Lake Restored by Hypolimnetic Withdrawal Method, *Polish Journal of Environmental Studies* Vol. 11, No. 6: 631-637
20. Gawrońska H., Lossow K., Grochowska J., 2005, Rekultywacja Jeziora Długiego w Olsztynie, *Wyd. Edycja, Olsztyn*
21. Hupfer M., Lewandowski J., 2008, Oxygen Controls the Phosphorus Release from Lake Sediments – a Long-Lasting Paradigm in Limnology, *Internat. Rev. Hydrobiol*, 93, 4-5: 415–432
22. Siwek H., Włodarczyk M., Brzostowska-Żelechowska D., Wachowiak M., 2009, Wpływ wybranych parametrów fizyczno-chemicznych osadu na zawartość nieorganicznych form fosforu w osadach dennych małych zbiorników polimiktycznych, *Acta Agrophysica*, 13(2): 497-503
23. Sobczyński T., 2009, The effect of abiotic conditions on release of biogenic substances from bottom sediments, *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 38 (1): 45-53
24. Konieczny R., 2004, Aeracja pulweryzacyjna w warunkach Jeziora Barlineckiego, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t. 4, z. 2b (12): 291–301

25. Wesołowski P., Pawlas D., Bonisławska M., 2010, Wybrane parametry jakości wód jeziora Resko Górne w warunkach ich napowietrzania, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t. 10 z. 4 (32): 281–293
26. Wesołowski P., Brysiewicz A., Pawlos D., 2011, Właściwości fizykochemiczne wody jeziora Starzyc w warunkach napowietrzania za pomocą aeratora pulweryzacyjnego, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t. 11 z. 1 (33): 315–330
27. Wesołowski P., Brysiewicz A., 2015, The effect of pulverising aeration on changes in the oxygen and nitrogen concentrations in water of Lake Starzyc, *Journal of Water and Land Development*, No. 25 (IV–VI): 31–36
28. Heese T., Wilk-Woźniak E., Żurek R., Kaczorkiewicz M., Szmidt R., Arciszewski M., Pokuła K., Wojcieszonek A., Chrzczonowicz H., Zakościelna A., 2013, Ocena efektu ekologicznego zabiegu rekultywacji prowadzonego w latach 2005-2012 na Jeziorze Trzesiecko, *Ochrona i rekultywacja jezior* (red. R. Wiśniewski), *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń*: 65-80
29. Sobczyński T., Joniak T., Pronin G., 2012, Assessment of the multi-directional experiment of restoration of Lake Góreckie (western Poland) with particular focus to oxygen and light conditions: first results, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 21, No. 4: 1025-1031
30. Podsiadłowski S., Osuch E., Osuch A., 2015, Metody Rekultywacji jezior na przykładzie jezior wielkopolskich, w: *Sposoby ochrony i rekultywacji jezior poznańskich* (red. A.E. Ławniczak), *Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań*: 109-132
31. Rybacki P., Ratajczak J., Osuch E., Osuch A., 2016, Analiza procesu inaktywacji jonów fosforowych w wodzie Jeziora Durowskiego, *Inżynieria Ekologiczna*, Vol. 47: 33–39
32. Gawrońska H., Łopata M., Jaworska B., 2007, The effectiveness of the phosphorus inactivation method in reducing the trophy of lakes of different morphometric and hydrological features, *Limnological Review*, 7, 1: 27-34
33. Gawrońska H., Łopata M., 2009, Trwałość odnowy Jeziora Długiego metodą inaktywacji fosforu (Pojezierze Mazurskie), *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. T.LXXXIII, nr 9
34. Gołdyn R., Podsiadłowski S., Kowalczevska-Madura K., Dondajewska R., Kozak A., Budzyńska A., 2010, Efekty rekultywacji metodą inaktywacji fosforu w trzech jeziorach wielkopolski, w: *Ochrona i rekultywacja jezior*, (red. R. Wiśniewski), *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Toruniu*: 51-62
35. Wiśniewski R., Nowacki P., Szulczewski A., 2010, Inactivation of phosphorus in three shallow lakes in Poland, using an innovative two-unit device, *SIL Coingress*, Cape Town: 15-20
36. Wiśniewski R., Ślusarczyk J., Kaliszewski T., Szulczewski A., Nowacki P., 2010, “Proteus”, a new device for application of coagulants directly to sediment during its controlled resuspension, *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 30, 9: 1421-1424
37. Wiśniewski R., Nowacki P., Szulczewski A., 2010, Badania jeziora Jelonek w Gnieźnie i uwarunkowania programu jego rekultywacji, w: *Ochrona i rekultywacja jezior* (red. R. Wiśniewski), *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń*: 169-184
38. Sobczyński T., Joniak T., 2010, *Aspekty środowiskowe rekultywacji jeziora metodą inaktywacji fosforu – Jezioro Witobelskie (Wielkopolski Park Narodowy)*, *Ekologia i Technika*, Vol. XVIII, nr 5: 243-250

39. Wiśniewski R., 2009, Propozycje dotyczące działań rekultywacyjnych w rejonie wyrobisk w Zatoce Puckiej uwzględniające dotychczasową wiedzę o sposobach rekultywacji zdegradowanych akwenów, w: Program rekultywacji wyrobisk w Zatoce Puckiej. Przyrodnicze podstawy i uwarunkowania, Zakład Wydawnictw Naukowych Instytutu Morskiego w Gdańsku: 267-284
40. Wawrzonkowski J., Kaczorkiewicz M., Heese T., 2013, Rozpoznanie możliwości wykorzystania piasków w technice tzw. „cappingu”, celem ograniczenia resuspensji biogenów, w: Ochrona i rekultywacja jezior (red. R. Wiśniewski), Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń: 2015-226
41. Drenner, W., Hambright, K.T., 1999, Biomaniipulation of fish assemblages as a lake restoration technique, *Archiv für Hydrobiologie*, 146, 2: 129–165
42. Rosińska J., Gołdyn R., Podsiadłowski S., Dondajewska R., Kowalczevska-Madura K., Kozak A., Ruszkowska-Cichočka B., 2013, Wstępne rezultaty rekultywacji Jeziora Swarzędzkiego, w: Ochrona i rekultywacja jezior (red. R. Wiśniewski), Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń: 189-198,
43. Łopata M., Wiśniewski G., Czerniawski R., Czerniejewski P., Brzozowska R., Jaworska B., Korzeniewska E., 2015, Rekultywacja Jeziora Klasztornego Górnego w Strzelcach Krajeńskich metodą inaktywacji fosforu i biomanipulacji, w: Ochrona i rekultywacja jezior (red. R. Wiśniewski), Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń: 85-92
44. Dondajewska R., Gołdyn R., Kowalczevska-Madura K., Budzyńska A., Podsiadłowski S., 2015, Rekultywacja zbiornika Rusałka w Poznaniu - przeszłość, stan aktualny, perspektywy, w: Ochrona i rekultywacja jezior (red. R. Wiśniewski), Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń: 203-213
45. Gołdyn R., Messyasz B., Kowalczevska-Madura K., Dondajewska R., Cerbin S., 2015, Efekty rekultywacji Jeziora Durowskiego, w: Ochrona i rekultywacja jezior, (red. R. Wiśniewski), Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Toruniu: 189-201
46. Bryl Ł., Wiśniewski R., 2015, Efekty inaktywacji fosforu w osadach dennych jeziora Wolsztyńskiego, w: Ochrona i rekultywacja jezior, (red. R. Wiśniewski), Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Toruniu: 71-83
47. Gawrońska H., Lossow K., Łopata M., Brzozowska R., Jaworska B., 2006, Rekultywacja Jeziora Wolsztyńskiego metodą inaktywacji fosforu. Opracowanie dla Gminy Wolsztyn (maszynopis)
48. Kruk-Dowgiałło L., Opióła R., Dubrawski R., Wiśniewski R., Boniecka H., Cylkowska H., Osowiecki A., 2009, Program rekultywacji wyrobisk w Zatoce Puckiej, w: Program rekultywacji wyrobisk w Zatoce Puckiej, Przyrodnicze podstawy i uwarunkowania, (red. Kruk-Dowgiałło L. i Opióła R), Zakład Wydawnictw Naukowych Instytutu Morskiego w Gdańsku: 311–334
49. Opióła R., Kruk-Dowgiałło L., Wiśniewski R., Szulczewski A., 2013, Rekultywacja wyrobiska Władysławowo w Zatoce Puckiej, badania i wdrożenie metody, w: Ochrona i rekultywacja jezior, (red. R. Wiśniewski), Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Toruniu: 159-168
50. Piotrowski P., 1992, Z wędką i plecakiem po Pilskim, Oficyna Wydawnicza AS Spółka z o.o., Piła

Methods of protection and reclamation of lakes

Abstract

This publication contains basic information about the protection and reclamation of water reservoirs struggling with the problem of eutrophication. In addition to presenting the main sources of pollution of aquatic ecosystems, the authors have prepared a review of the recently applied reclamation methods, including biological, chemical and mechanical methods. A few examples of such projects have also been described in detail with the presentation of the results and the results achieved. In this paper, reference is made to the increasingly common problem of ethics in reclamation lakes.

Keywords: lake, reclamation, eutrophication, nutrients, phosphorus inactivation, capping.