

## **Efekty inaktywacji fosforu w osadach dennych jeziora Wolsztyńskiego**

The effects of inactivation of phosphorus in bottom sediments of the Wolsztynskie Lake

Łukasz Bryl<sup>1</sup>, Ryszard Wiśniewski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PROTE Technologie dla Środowiska Sp. z o.o.

<sup>2</sup>Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

### **Streszczenie**

Jeziora zawsze pełniły istotną rolę w przyrodzie oraz w życiu gospodarczym człowieka (Kajak Z., 1998). Niestety w wyniku wzmożonej antropopresji nastąpiło wyraźne pogorszenie stanu ekologicznego i chemicznego większości akwenów, w tym również jeziora Wolsztyńskiego.

Jezioro Wolsztyńskie położone jest na Równinie Nowotomyskiej, od północy granicząc z miejscowością Karpicko, a od południa z miastem Wolsztyn (Kondracki J., 2001). Jest jeziorem przepływowym, przez które przepływa rzeka Dojca (prawostronny dopływ Północnego Kanału Obry). Uzupełnienie układu hydrologicznego zlewni omawianego zbiornika stanowią inne mniejsze dopływy (cieki), mające bardzo istotny wpływ na jego żyzność (Gawrońska H., i in. 2006).

Gospodarka wodno-ściekowa w obrębie jeziora Wolsztyńskiego od kilku lat jest uregulowana. Wszelkie zanieczyszczenia komunalne kierowane są do zmodernizowanej oczyszczalni ścieków, której odbiornikiem jest rzeka Dojca poniżej jeziora Berzyńskiego (Gawrońska H., i in. 2006). Jednak na skutek niewłaściwej działalności człowieka w latach wcześniejszych, polegającej na bezpośrednim zrzucie ścieków komunalnych oraz stałym zasilaniu związkami biogennymi doprowadzanymi ze zlewni wraz z dopływami, jezioro Wolsztyńskie zaliczane jest do jezior eutroficznych. Wysoki poziom żyzności potwierdzają m.in. pojawiające się co jakiś czas zakwity fitoplanktonu (Wiśniewski R., i in., 2014).

Niniejsza praca zawiera syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych w latach 2012-2014 zabiegów rekultywacyjnych jeziora Wolsztyńskiego, wśród których wiodącą metodą była inaktywacja fosforu w osadach dennych, z wykorzystaniem opatentowanej jednostki pływającej – PROTEUS. Przedstawia również zachodzące zmiany w ekosystemie wodnym omawianego zbiornika po przeprowadzonej rekultywacji.

### **Abstract**

Lake has always played an important role in nature and in the economic life of human (Kayak Z., 1998). Unfortunately, due to increased human pressure led to a significant deterioration of ecological and chemical status of most water reservoirs, including Lake Wolsztynskie.

Wolsztynskie Lake is located on the Nowotomyska Plain. From north side is bordering with the village Karpicko, and from the south side with city of Wolsztyn (Kondracki J., 2001). Lake is cut through by the Dojca River. Supplementing the hydrological catchment area of this lake are the other smaller inlets (streams), which have a very significant impact on his fertility (Gawrońska H., i in. 2006)

For several years water and sewage management around the Wolsztynskie Lake is regulated. All municipal pollution are directed to the modernized sewage treatment plant, which receiver is the River Dojca below the Berzynskie Lake (Gawrońska H., i in. 2006). However, due to inappropriate human activity in previous years, involving the direct discharge of waste water and solid waste biogenic compounds which are supplied from the catchment and tributaries, the lake Wolsztynskie is classified as eutrophic lake. High levels of fertility is proved by phytoplankton blooms appearing from time to time (Wisniewski R., i in., 2014).

This dissertation contains a summary of the reclamation treatments carried out on Wolsztynskie lake, in 2012-2014, among which the leading method was inactivation of phosphorus in bottom sediments, using patented vessel named PROTEUS. It also presents the changes in the aquatic ecosystem of the Wolsztynskie lake, after finished reclamation works.

## **1. WSTĘP**

Jeziro Wolsztyńskie odgrywa bardzo istotną rolę turystyczno-rekreacyjną dla mieszkańców gminy Wolsztyn ale również dla osób przyjezdnych. Niestety w związku ze stale pogarszającym się stanem ekologicznym, użytkowanie tego akwenu jest w pewnym stopniu ograniczone. Wyniki badań przeprowadzonych w 1989 roku wyraźnie wskazują, że wody jeziora Wolsztyńskiego nie spełniały większości norm. Przeprowadzone w latach wcześniejszych zabiegi inwestycyjne, m.in. rozbudowa kanalizacji sanitarnej na obszarze miasta Wolsztyna i przyległych miejscowości, całkowite odcięcie dopływu ścieków bytowych (rok 1995), czy też zabiegi rekultywacyjne jeziora z wykorzystaniem chlorku poliglinu – PAX18 (rok 2001) oraz inaktywacja fosforu w toni wodnej w celu redukcji produkcji pierwotnej i rozwoju glonów (rok 2005), stały się niewystarczające, tylko chwilowo hamując dalsze zanieczyszczenie zbiornika (Łopata M., i in., 2010). Przyczyną braku wyraźnej

poprawy stanu czystości wód jeziora Wolsztyńskiego jest stały dopływ dużych ilości biogenów ze źródeł zewnętrznych, jak również z wewnętrznego zasilania przez osady dennie (Gawrońska H, i in., 2006; Wiśniewski R., i in., 2014). Szczególnie, że zlewnia jeziora Wolsztyńskiego jest użytkowana w sposób różnorodny (m.in. rolniczo, turystycznie) a do zbiornika odprowadzane są stale wody deszczowe z miasta oraz zanieczyszczenia pośrednie dopływające wraz z ciekami. Zagrożeniem stwarzają również nieprawidłowości w gospodarce ściekowej na terenach indywidualnej zabudowy letniskowej w Karpicku (WIOŚ 2003). Potwierdziły to przeprowadzone analizy fizyczno-chemiczne wody oraz osadów dennych, a także inne badania biologiczne (np. określające stan ilościowy i jakościowy fito- i zooplanktonu), w trakcie których okazało się, że obciążenie jeziora substancjami biogennymi w skali całego roku jest wysokie i kilkakrotnie przekracza dopuszczalne normy (Wiśniewski R., i in., 2014). Poziom troficzny omawianego zbiornika stał się tak znaczący, że proces samooczyszczania się wód jeziora jest praktycznie niemożliwy.

Warto podkreślić, że jezioro było także głównym odbiorcą kanalizacji deszczowej z miasta i okolicznych wsi. Dopiero od kilku lat wody deszczowe są podczyszczane. Wprowadzały bowiem do zbiornika mnóstwo zanieczyszczeń mineralnych i organicznych. Spływami powierzchniowymi do zbiornika dostają się takie zanieczyszczenia jak: pestycydy, nawozy (w tym gnojowica, gnojówka), środki zwalczające gołoledź, produkty ścierania się opon oraz utwardzonych nawierzchni (Łopata M., i in. 2010).

Rekultywacja jeziora Wolsztyńskiego metodą inaktywacji fosforu w osadach dennych zrealizowana została przez firmę PROTE z Poznania wiosną w latach 2012-2013 (aplikacja chlorku żelaza). Cały projekt natomiast zakończył się w roku 2014, w którym skupiono się głównie na monitoringu i kontroli uzyskanych efektów, a także inaktywacji fosforu w wodzie dopływającej do jeziora rzeką Dojcą. Wszystkie zabiegi, których głównym celem była ochrona ekosystemu jeziornego (szczególnie zahamowanie procesu eutrofizacji) zostały zrealizowane w oparciu o naukowe rozpoznanie naturalnej odporności jeziora Wolsztyńskiego na degradację oraz określeniu roli, jaką spełnia zlewnia w hamowaniu lub przyspieszaniu tego procesu (Bajkiewicz-Grabowska E., 1981).

## **2. WSTĘP**

Jezioro Wolsztyńskie odgrywa bardzo istotną rolę turystyczno-rekreacyjną dla mieszkańców gminy Wolsztyn ale również dla osób przyjezdnych. Niestety w związku ze stale pogarszającym się stanem ekologicznym, użytkowanie tego akwenu jest w pewnym stopniu ograniczone. Wyniki badań przeprowadzonych w 1989 roku wyraźnie wskazują, że

wody jeziora Wolsztyńskiego nie spełniały większości norm. Przeprowadzone w latach wcześniejszych zabiegi inwestycyjne, m.in. rozbudowa kanalizacji sanitarnej na obszarze miasta Wolsztyna i przyległych miejscowości, całkowite odcięcie dopływu ścieków bytowych (rok 1995), czy też zabiegi rekultywacyjne jeziora z wykorzystaniem chlorku poliglinu – PAX18 (rok 2001) oraz inaktywacja fosforu w toni wodnej w celu redukcji produkcji pierwotnej i rozwoju glonów (rok 2005), stały się niewystarczające, tylko chwilowo hamując dalsze zanieczyszczenie zbiornika (Łopata M., i in., 2010). Przyczyną braku wyraźnej poprawy stanu czystości wód jeziora Wolsztyńskiego jest stały dopływ dużych ilości biogenów ze źródeł zewnętrznych, jak również z wewnętrznego zasilania przez osady dennie (Gawrońska H, i in., 2006; Wiśniewski R., i in., 2014). Szczególnie, że zlewnia jeziora Wolsztyńskiego jest użytkowana w sposób różnorodny (m.in. rolniczo, turystycznie) a do zbiornika odprowadzane są stale wody deszczowe z miasta oraz zanieczyszczenia pośrednie dopływające wraz z ciekami. Zagrożeniem stwarzają również nieprawidłowości w gospodarce ściekowej na terenach indywidualnej zabudowy letniskowej w Karpicku (WIOŚ 2003). Potwierdziły to przeprowadzone analizy fizyczno-chemiczne wody oraz osadów dennych, a także inne badania biologiczne (np. określające stan ilościowy i jakościowy fito- i zooplanktonu), w trakcie których okazało się, że obciążenie jeziora substancjami biogennymi w skali całego roku jest wysokie i kilkukrotnie przekracza dopuszczalne normy (Wiśniewski R., i in., 2014). Poziom troficzny omawianego zbiornika stał się tak znaczący, że proces samooczyszczania się wód jeziora jest praktycznie niemożliwy.

Warto podkreślić, że jezioro było także głównym odbiorcą kanalizacji deszczowej z miasta i okolicznych wsi. Dopiero od kilku lat wody deszczowe są podczyszczane. Wprowadzały bowiem do zbiornika mnóstwo zanieczyszczeń mineralnych i organicznych. Spływami powierzchniowymi do zbiornika dostają się takie zanieczyszczenia jak: pestycydy, nawozy (w tym gnojowica, gnojówka), środki zwalczające gołoledź, produkty ścierania się opon oraz utwardzonych nawierzchni (Łopata M., i in. 2010).

Rekultywacja jeziora Wolsztyńskiego metodą inaktywacji fosforu w osadach dennych zrealizowana została przez firmę PROTE z Poznania wiosną w latach 2012-2013 (aplikacja chlorku żelaza). Cały projekt natomiast zakończył się w roku 2014, w którym skupiono się głównie na monitoringu i kontroli uzyskanych efektów, a także inaktywacji fosforu w wodzie dopływającej do jeziora rzeką Dojcą. Wszystkie zabiegi, których głównym celem była ochrona ekosystemu jeziornego (szczególnie zahamowanie procesu eutrofizacji) zostały zrealizowane w oparciu o naukowe rozpoznanie naturalnej odporności jeziora Wolsztyńskiego na

degradację oraz określeniu roli, jaką spełnia zlewnia w hamowaniu lub przyspieszaniu tego procesu (Bajkiewicz-Grabowska E., 1981).

### 3. MATERIAŁ I METODY

#### 3.1. Jezioro Wolsztyńskie

Jezioro Wolsztyńskie ze względu na małą głębokość maksymalną (3,9 m) i średnią (2,3 m) zaliczyć można do zbiorników polimiktycznych, czyli niestratyfikowanych, bez trudu mieszających się do dna przez większą część roku. O intensywności ruchów cyrkulacyjnych świadczy teoretyczny zasięg epilimnionu, który dla tego zbiornika (obliczony wg wzoru Patalasa 1960) wynosi 5,7 metra, znacząco przekraczając głębokość maksymalną jeziora. (Łopata M., i in. 2010; Wiśniewski R. i in. 2014).



Ryc. 1. Jezioro Wolsztyńskie z lotu ptaka – u dołu zdjęcia wyraźnie widać dopływającą do jeziora rzekę Dojcę (źródło: [www.dojca.cba.pl](http://www.dojca.cba.pl)).

Fig. 1. A bird's eye of Wolsztyńskie Lake. At the bottom of the picture is located a lake tributary named: river Dojca (source: [www.dojca.cba.pl](http://www.dojca.cba.pl)).

Jezioro ma kształt wydłużony, o osi z północnego zachodu na południowy zachód. W części centralnej znacznie poszerza się w kierunku wschodnim. Na środku zbiornika znajduje się charakterystyczna wyspa – „Wyspa Tumidaj” o powierzchni 1,3 ha (Mikołajczak E., 2000, 2006).

Dane literaturowe opisujące charakterystykę morfometryczną jeziora Wolsztyńskiego zestawiono ze sobą wg opracowania Instytutu Rybactwa Śródlądowego (1964r.), Choińskiego (1992r.), a także na podstawie sporządzonego cyfrowego planu batymetrycznego według pomiarów PROTE (2012r.) (Wiśniewski R., i in. 2014).

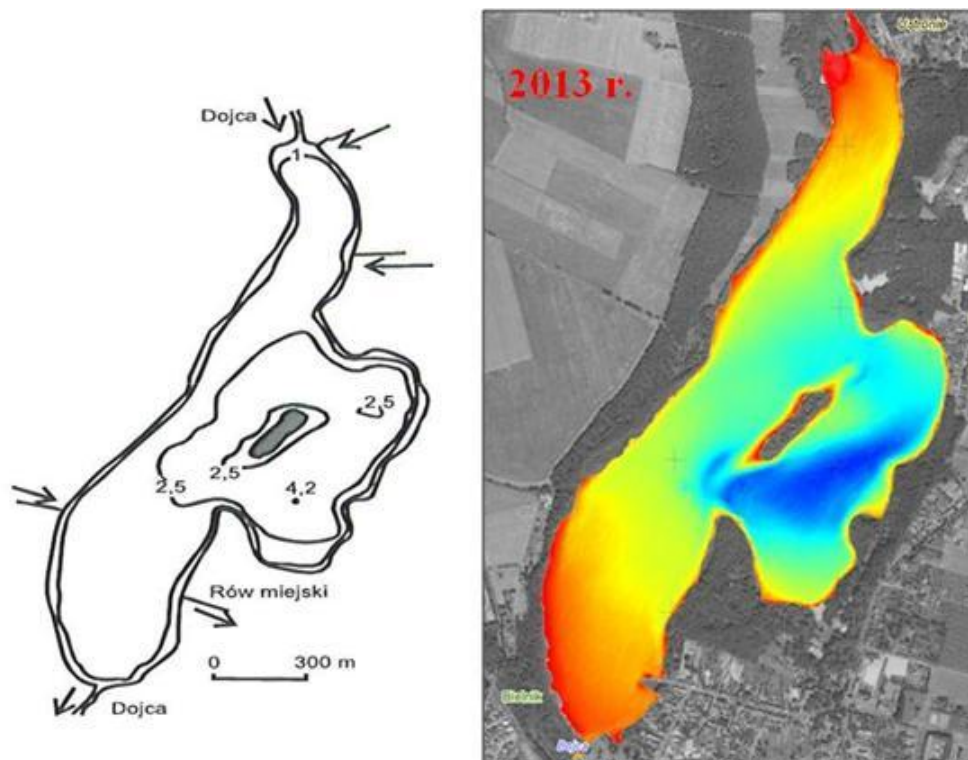
Tabela 1. Zestawienie danych morfometrycznych Jeziora Wolsztyńskiego na podstawie badań własnych i źródeł literaturowych.

Table 1. Lake Wolsztynskie morphometric features determined on the basis of published data and own research.

	dane wg IRS (1964)	dane wg Choińskiego (1992)	dane wg PROTE (2012-2013)
Powierzchnia [ha]	124,2	116,0	-
Głębokość maksymalna [m]	4,2	3,6	3,9
Głębokość średnia [m]	2,0	1,6	2,3
Objętość [tyś. m <sup>3</sup> ]	2522	1840	-

Objętość zbiornika wynosi około 2,5 mln m<sup>3</sup>, a wymiana wody w tym akwencie znajduje się na poziomie 950%/rok. Jezioro Wolsztyńskie o wielkości zlewni wynoszącej 193,5 km<sup>2</sup> posiada średnio rozwiniętą linię brzegową. W zlewni całkowitej jeziora Wolsztyńskiego dominują jednak grunty orne – 77,8%, natomiast lasy zajmują zaledwie niespełna – 12%, zaś tereny zabudowane około 8% powierzchni (WIOŚ., 2003, Mikołajczak E., 2006).

W ramach przygotowań do realizacji precyzyjnego dozowania koagulantów do osadów dennych w roku 2012 i 2013 wykonany został każdorazowo cyfrowy plan batymetryczny jeziora Wolsztyńskiego. Badania wyraźnie pokazały, że ukształtowanie misy jeziora w stosunku do lat wcześniejszych nie uległo większym zmianom. Akwen ma jeden rozciągnięty głęboczek położony pomiędzy plażą w Wolsztynie a wyspą. Natomiast rejon dopływu rzeki Dojcy jest mocno wypłycony – sprzyjając rozwojowi makrofitów, podobnie jak w przypadku części miejskiej oraz w rejonie odpływu z jeziora.



Ryc. 2. Batymetria jeziora Wolsztyńskiego w 2003 i 2013 roku (źródło: WIOŚ., 2003; Wiśniewski R., i in., 2014).

Fig. 2. Bathymetry of the Lake Wolsztyńskie in 2003 and 2013.

### 3.2. Inaktywacja fosforu w osadach dennych

Głównym celem przeprowadzonej rekultywacji było zahamowanie postępującej eutrofizacji jeziora Wolsztyńskiego poprzez: eliminację fosforu mineralnego z toni wodnej, do wartości śladowych, rozumianych jako ilość fosforu mineralnego pozostającą poniżej granicy wykrywalności analitycznej (zgodnie z Polską Normą – wartość poniżej 0,05 mg  $\text{PO}_4/\text{dm}^3$ ); redukcję zawartości fosforu ogólnego w toni wodnej do wartości poniżej 0,2 mg P/l; wzrostu przezroczystości wody (powyżej 1 metra); redukcję zawartości chlorofilu-a (poniżej 40  $\mu\text{g/l}$ ) i spadek produkcji fitoplanktonu; odbudowę zespołów roślin zanurzonych; wzrost bioróżnorodności zbiorowisk fito- i zooplanktonu; likwidację zakwitów sinicowych. Wymienione parametry należało traktować jako wartości średnie z monitoringu wykonywanego w ostatnim roku dawkowania koagulantu (2013 r.) oraz musiały zostać zachowane również w roku kontrolnym (2014 r.).

Metoda inaktywacji fosforanów wykorzystana na potrzeby niniejszego projektu, skierowana była bezpośrednio do osadów dennych, które poddane zostały zjawisku sztucznie wywołanej resuspensji (wzburzenia) w kontrolowanej objętości, do których podawano odpowiednio dobrany koagulant wiążący fosforany (ograniczenie występowania

biodostępnych form fosforu) i przyspieszający ponowną sedymentację osadów. Do tego celu wykorzystana została jednostka pływająca o nazwie PROTEUS (Ryc. 3), składająca się z dwóch modułów: nawodnego (odpowiada za: przemieszczanie, transport substancji chemicznych, precyzyjną nawigację i kontrolę dna, przemieszczanie i sterowanie modulem podwodnym) oraz podwodnego (odpowiadającego za: wywołanie kontrolowanej resuspensji osadów, napowietrzenie osadów, podawanie do osadów dobranych substancji chemicznych, koagulację i sedymentację osadów). Jest jedynym na rynku dostępnym urządzeniem pozwalającym na precyzyjne dawkowanie substancji m.in. bezpośrednio do osadów, w ich 10-20 cm warstwę, przy jednoczesnej kontrolowanej resuspensji tych osadów. Prace te zostały wykonane w warunkach kontrolowanych i nie spowodowały zagrożenia dla zdrowia i życia ludzi, środowiska naturalnego i ekosystemu jeziora, a także nie przyczyniły się do destabilizacji naturalnego funkcjonowania jeziora.



Ryc. 3. PROTEUS w trakcie wykonywania prac rekultywacyjnych – rok 2012.

Fig. 3. PROTEUS during the execution of reclamation works in 2012.

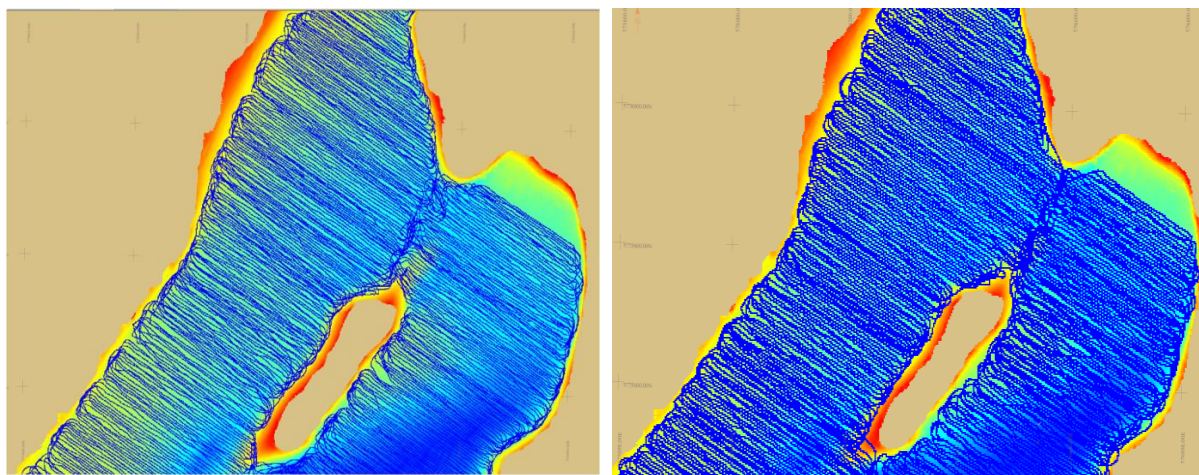
Stosowany do rekultywacji jeziora chlorek żelaza nie stwarza możliwości powstania sytuacji niepożądanych lub niebezpiecznych. Sposób podawania chlorku żelaza bezpośrednio do osadów dennych w zamkniętej objętości urządzenia dozującego przemieszczającego się bezpośrednio nad osadami powoduje, że środek ten dociera do osadów równomiernie, w dokładnie określonym stężeniu, niewpływającym negatywnie na organizmy wodne. To właśnie żelazo reguluje dynamikę obiegu fosforu - kumulację w osadach i wydzielanie do toni



wodnej. Chlorek żelaza odpowiedzialny jest za tworzenie wiązania z formą mineralną fosforu blokując tym samym możliwość wykorzystania fosforu przez glony fitoplanktonowe i sinice.

Zastosowana metoda usuwa źródło problemu jakim jest fosfor nagromadzony w około 15 cm warstwie osadów, w której to jest najbardziej aktywny i niezablokowany może przechodzić do toni wodnej, gdzie jest głównym źródłem zasilania zakwitów. Wytworzona warstwa ochronna jest stabilna w przeciwieństwie do warstwy wytworzonej na skutek dozowania substancji jedynie z powierzchni, gdzie mimo opadnięcia substancji na dno następuje jej podrywanie na skutek m.in. falowania wody, prądów wodnych, czy też żerowania ryb w dnie. Warstwa taka nie pełni wtedy funkcji blokującej i wiążącej fosfor w osadach dennych.

Zabieg inaktywacji fosforu w jeziorze Wolsztyńskim przeprowadzono za pomocą urządzeń technicznych pozwalających na dokładne dozowanie koagulantów bezpośrednio do osadów dennych, zachowując przy tym skuteczność prac oraz bezpieczeństwo ekologiczne. W celu osiągnięcia maksymalnej precyzji dozowania w trakcie realizacji prac rekultywacyjnych, na jeziorze zakotwiczona była stacja referencyjna wprowadzająca poprawki do sygnału GPS, co pozwalało na nawigację z dokładnością, aż do 5 cm (Ryc. 5). Dla potwierdzenia należytego rozprowadzenia koagulantu w roku 2012 i 2013 przygotowano raporty z pozycjonowania jednostki w czasie wykonywanej pracy przy wykorzystaniu systemu GPS (Ryc. 4.).



Ryc.4. Trasy równoległych przepłyń „pas przy pasie” PROTEUSA w powierzchniowej warstwie osadów w roku 2012 (po lewej) i 2013 (po prawej).

Fig. 4. The route of Proteus movement during the dosing of coagulants to the bottom sediments. Picture on the left - year 2012, on the right - year 2013.



Ryc. 5. Stacja referencyjna zakotwiczona na jeziorze - wspomagająca dokładność prac rekultywacyjnych.

Fig. 5. Reference station anchored on the lake - supporting the accuracy of the reclamation works.

Dozowanie chlorku żelaza do osadów dennych nie zostało zrealizowane tylko blisko linii brzegowej w miejscu występowania makrofitów, a także na prośbę Gospodarstwa Rybackiego, które wskazało niewielki fragment ochronny jeziora, gdzie swoje tarliska ma sandacz (Ryc. 4.).

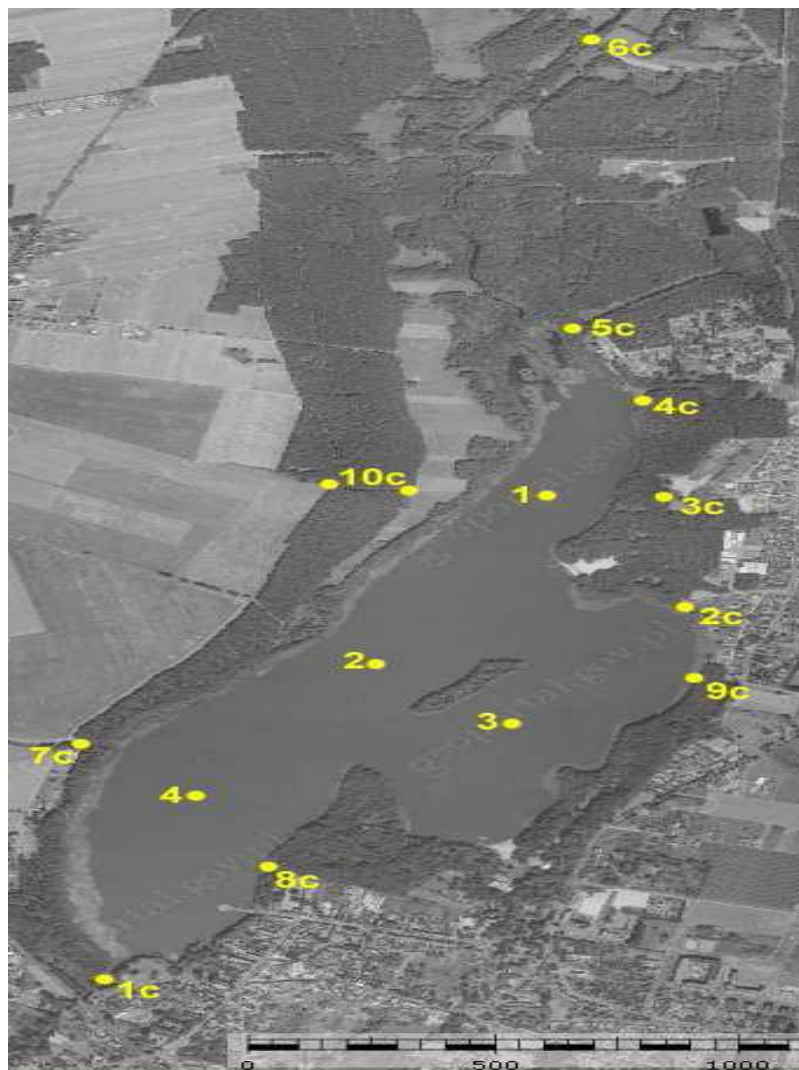
Na potrzeby projektu w roku 2014 uruchomiono również instalację dozującą chlorek żelaza bezpośrednio do rzeki Dojcy. Urządzenie zlokalizowane zostało w pobliżu punktu monitoringowego 6c – przy moście stanowiącym drogę powiatową w kierunku Chorzemina (na prawym brzegu rzeki), w odległości od jeziora wynoszącej w linii prostej około 1,3 km.

### **3.3. Monitoring**

Monitoring efektu wykonanych prac rekultywacyjnych sprawdzany był przez cały okres trwania projektu (czterokrotnie podczas każdego roku jeziorowego: w okresie wiosennej cyrkulacji wód, na początku stagnacji letniej, w szczycie stagnacji letniej, podczas cyrkulacji jesiennej). Oprócz badań wody i osadów dennych jeziora Wolsztyńskiego, analizom poddano również wodę rzeki Dojcy i pozostałych cieków doprowadzających i odprowadzających wody z jeziora Wolsztyńskiego (w celu określenia wpływu zlewni na stan czystości jeziora). Badania cieków przeprowadzono w terminach wskazanych dla monitoringu jeziora. Analizie poddano kilkadziesiąt parametrów, które pozwoliły ocenić stan

czystości jeziora, zarówno w trakcie, jak również po zakończonej rekultywacji. Badania biologiczne objęte zostały w ramach następujących biocenoz: fito- i zooplankton, bentos, struktura ichtiofauny, badania mikrobiologiczne oraz makrofity. Dla parametrów mierzonych w punktach pomiarowych przyjęto wartości średnie z wszystkich badań monitoringowych prowadzonych w danym roku - średnia arytmetyczna z pomiarów wykonywanych na wszystkich stanowiskach badawczych. W związku z rezygnacją podawania chlorku poliglinu oraz z uwagi na dawkowanie koagulantu całkowicie bezpiecznego dla środowiska gruntowo-wodnego (chlerek żelaza), w trakcie trwania zabiegów rekultywacyjnych (2012 i 2013) nie wykonywano badań określających stężenia glinu rozpuszczonego [ $\text{mg Al/dm}^3$ ] oraz zmian pH w wodzie.

Dobór punktów monitoringowych dostosowany został do powierzchni zbiornika oraz w związku z potencjalną podatnością na oddziaływanie danych stref jeziora wynikających z działalności człowieka (Ryc. 6.).

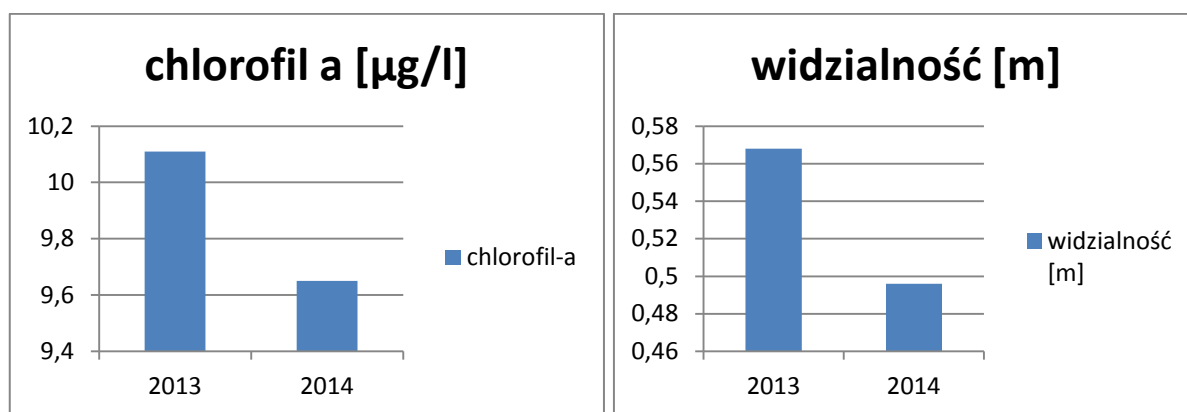


Ryc. 6. Lokalizacja punktów monitoringowych i badawczych na jeziorze Wolsztyńskim oraz na ciekach.

Fig. 6. The location of monitoring points located on the Lake Wolsztynskie and another watercourses.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

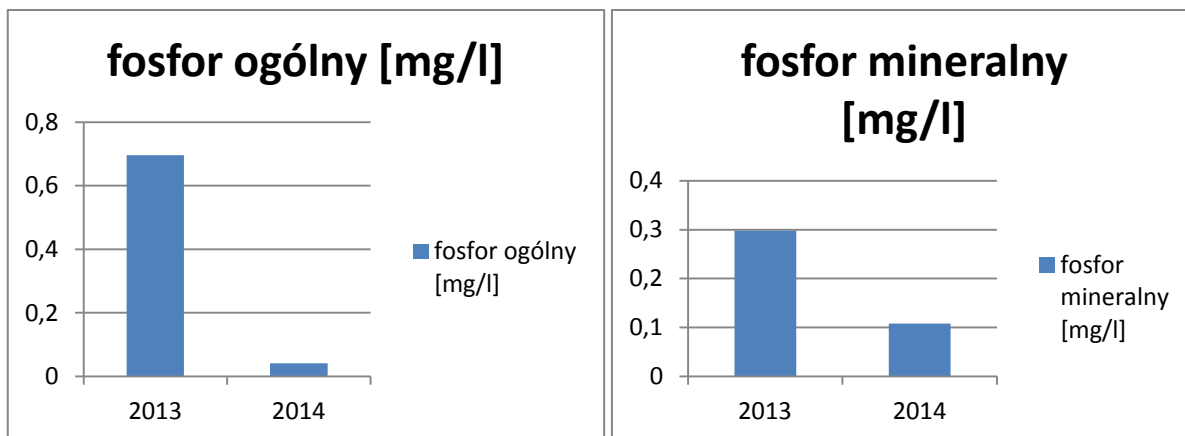
Średnia roczna stężenie chlorofilu-a w roku 2014 (9,62  $\mu\text{g/l}$ ) w wodzie jeziora Wolsztyńskiego poprawiła się w stosunku do lat wcześniejszych (22,8  $\mu\text{g/l}$  w 2012r., 10,1  $\mu\text{g/l}$  w 2013r.). Mimo niskich wartości fosforu oraz chlorofilu-a przezroczystość wody w całym analizowanym okresie badań mierzona za pomocą krążka Secchiego była niska, a wartość średnioroczna wynosiła 0,568 m – rok 2012-2013 oraz 0,486 m – rok 2014. Wpływ na osiągnięte wyniki miała zawiesina ogólna (15,5 – 39,0  $\text{mg/l}$ ) oraz rozwój fitoplanktonu w okresie letnim.



Ryc. 7. Średnia roczna stężenia chlorofili-a i widzialności w jeziorze Wolsztyńskim.

Fig. 7. The average annual concentration of chlorophyll-a and visibility in the Lake Wolsztynskie.

Zawartość fosforu ogólnego w wodzie powierzchniowej w skali całego roku 2012, wahała się w granicach 0,014 do 0,417  $\text{mg/l}$ . W roku 2013 zawartość fosforu ogólnego w wodzie mieściła się w granicach 0,029 do 1,08  $\text{mg/l}$ , a w 2014 r. średnio wynosiła 0,04  $\text{mg/l}$ . Stężenia fosforu mineralnego w roku 2014 w stosunku do lat poprzednich wyraźnie zmalały osiągając wartości 0,1  $\text{mgPO}_4/\text{l}$ . Natomiast wartości BZT<sub>5</sub> oscylują w granicach 5,0  $\text{mg O}_2$ .



Ryc. 8. Średnie stężenia roczne fosforu ogólnego i mineralnego w jeziorze Wolsztyńskim.

Fig. 8. The average annual concentrations of P and PO<sub>4</sub> in the Lake Wolsztyńskie.

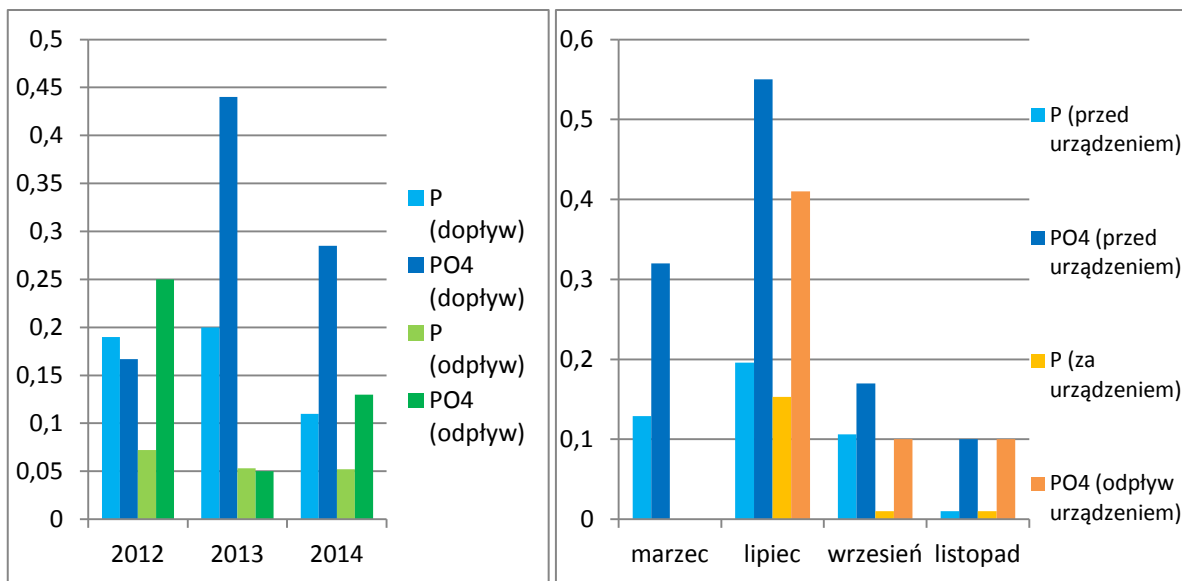
Stężenia fosforu ogólnego oraz mineralnego we wszystkich badanych ciekach kształtują się w każdym roku bardzo podobnie. Analizy wykazały, że na uwagę zasługują następujące cieki nr 2c, 5c i 7c, a także rzeka Dojca (6c). Niosą one bowiem duży ładunek biogenów mający wpływ na jakość wody jeziora Wolsztyńskiego.

Tabela 2. Ilość fosforanów wnoszonych do jeziora Wolsztyńskiego w latach 2012-2014.

Table 2. The amount of phosphorus brought by the surrounding tributaries to the Lake Wolsztyńskie in 2012-2014.

	2c	5c	6c	7c
<b>Średnie stężenie fosforanów [mgPO<sub>4</sub>/l]</b>	0,538	0,933	0,168	1,073
<b>Średni przepływ w cieku [dm<sup>3</sup>/s]</b>	13,48	12,83	671,41	26,03
<b>Ładunek fosforanów wnoszony do jeziora [kg/rok]</b>	228,6	377,1	3546,6	880,4

Stężenie substancji biogenych niesionych wodami rzeki Dojcy w roku 2014 charakteryzowało się podobną tendencją co w latach poprzednich i było wyższe na dopływie, niż na odpływie (0,01 – 0,196 mgP/l oraz 0,1 – 0,55 mgPO<sub>4</sub>/l). Oprócz wysokich stężeń fosforu ogólnego i fosforanów niesionych ciekami 2c, 5c i 7c, dopływy te cechowały się również olbrzymią ilością zawiesiny wnoszonej do jeziora (ciek 2c: marzec 2014 – 127 mg/l zawiesiny; ciek 5c: lipiec 2014 – 150 mg/l zawiesiny).



Ryc. 9. Średnie stężenia P i PO<sub>4</sub> w skali całego roku w okresie 2012-2014 oraz stężenia P i PO<sub>4</sub> na rzece Dojcy przed i za urządzeniem dozującym w roku 2014.

Fig. 9. Average concentrations of P and PO<sub>4</sub> in the entire year in the period 2012-2014 and the concentration of P and PO<sub>4</sub> in the Dojca river before and after the dosing unit in 2014.

Dozowanie koagulantu do rzeki Dojcy rozpoczęto z początkiem czerwca 2014 r. Pierwsze analizy pod kątem parametrów fizykochemicznych wody wykonano w lipcu 2014 r. Analizy wyraźnie wskazują na widoczne wytrącenie fosforu. We wrześniu i listopadzie fosfor ogólny i fosforany za urządzeniem dozującym osiągnęły następujące wartości 0,01 mgP/l i 0,1 mgPO<sub>4</sub>/l.

W przypadku analiz pojemności sorpcyjnej osadów dennych (EPC-0) we wszystkich trzech latach widać, że wartość EPC-0 w mgPO<sub>4</sub>/l posiada stężenia, nie pozwalające fosforanom na wydzielanie się z osadu. Zauważalny jest fakt poprawy współczynnika EPC-0 po aplikacji koagulantu, który wyraźnie wskazuje na wzrost zdolności sorpcyjnej osadów dennych względem fosforanów. Jak wynika z badań frakcji fosforu zawartego w osadach, udział pierwszych trzech, tzw. mobilnych frakcji, jest wysoki bo aż 60-70% fosforu ogólnego. Pomiary pojemności sorpcyjnej osadów względem fosforanów, której miarą jest wartość EPC-0 wykazały, że inaktywacja fosforu została przeprowadzona właściwie. Przed wszystkim właściwie określono dawki koagulantu FeCl<sub>3</sub> (PIX 111).

## 5. DYSKUSJA

Uzyskane wyniki badań po zakończonej rekultywacji jeziora Wolsztyńskiego świadczą, że metoda inaktywacji fosforu w osadach dennych wpłynęła pozytywnie na jakość

jego wód. Szczególnie, że w latach wcześniejszych wyniki chemizmu wód wskazywały m.in. na trwający proces wzbogacania wewnętrznego jeziora w fosfor uwalniany z osadów, który sprawił, że w płytszych warstwach zbiornika dominowała forma organiczna tego pierwiastka, a w głębszych mineralna (Gawrońska H., i in., 2006; Łopata M, i in. 2010). Wykonane do roku 2012 analizy fizyczno-chemiczne podkreślają problem eutrofizacji jeziora Wolsztyńskiego, pomimo wykonanych już wcześniej prac rekultywacyjnych (Lossow K., i in., 1998; Gawrońska H., i in., 2006; Wiśniewski R. i in. 2014). W roku 2014 w stosunku do lat wcześniejszych wartości fosforu mineralnego uległy obniżeniu i średnio wynosiły  $\text{PO}_4 < 0,1$  mg/l, podobnie jak fosfor ogólny (0,04 mg/l), chlorofil-a, którego średnia w skali roku wynosiła ok. 10  $\mu\text{g/l}$ . Odnotowano również wzrost bioróżnorodności zbiorowisk fito- i zooplanktonu. Badania jeziora Wolsztyńskiego wskazują, że wraz z oddaleniem się punktów monitoringowych od miejsca gdzie rzeka Dojca wpływa do akwenu, parametry fizyczno-chemiczne ulegają poprawie (Wiśniewski R. i in. 2014). W związku z czym, o zasobności jeziora w związki biogenne decyduje ich stały dopływ ze zlewni (Łopata M, i in. 2010; Wiśniewski R. i in. 2014). Powszechnie uważa się, że wszystkie dopływy oprócz rzeki Dojcy, to cieków okresowe. Realizowany w latach 2012-2014 monitoring wskazał inaczej. Średni przepływ cieków mających największy wpływ na jakość jeziora (2c, 5c, 7c), nie uwzględniając rzeki Dojcy, wynosił 0,012  $\text{m}^3/\text{s}$ . Średnie stężenie związków fosforu wynosiło: 0,54 mg/l  $\text{PO}_4$  - dla cieków 2c; 0,93 mg/l  $\text{PO}_4$  - dla cieków 5c; 1,07 mg/l  $\text{PO}_4$  - dla cieków 7c, jednocześnie znacznie przekraczając wszelkie dopuszczalne normy. W przypadku rzeki Dojcy średnia wartość  $\text{PO}_4$  w skali całego projektu wynosiła powyżej 1,0 mg/l, jednocześnie wskazując, że jej funkcja nie opiera się na wymianie wody, lecz na wzbogacaniu jeziora w substancje biogenne (Wiśniewski R. i in. 2014). Szczególnie, że wg literatury światowej ilość 0,05 mg $\text{PO}_4/\text{l}$ , stanowi wartość graniczną, której przekroczenie przyczynia się do powstania zakwitów fitoplanktonu.

Metoda inaktywacji fosforu w osadach dennych zbiorników wodnych poprzez podawanie koagulantów, przy jednoczesnej kontrolowanej resuspensji osadów, stanowi jedną z najbardziej efektywnych metod dostępnych i stosowanych obecnie na rynku. Świadczą o tym m.in. zrealizowane projekty na jeziorach: Winiary, Jelonek (Wiśniewski R., i in., 2010), czy też na jeziorze Wolsztyńskim (Wiśniewski R. i in. 2014). Jej inwazyjność z punktu widzenia elementów biotycznych jeziora jest niewielka, a zachodząca koagulacja cząstek zawiesiny wzburzonego osadu szybko opada na dno, nie powodując niekontrolowanej resuspensji w jeziorze. Jak pokazują wyniki badań dozowanie koagulantów w celu inaktywacji fosforu w toni wodnej, stanowi tylko formę działań doraźnych, o mniejszej

trwałości, nie mających żadnej możliwości oddziaływania na osady dennie jeziora i tam znajdujący się fosfor (Lossow K., i in., 1998; Gawrońska H., i in., 2006; Łopata M., i in., 2010; Wiśniewski R., i in., 2014). W procesie rekultywacji jeziora Wolsztyńskiego wykorzystano koagulant żelazowy, który w odróżnieniu od substancji zawierających glin, jest bardziej przyjazny środowisku i posiada większą efektywność wiązania fosforu. Od kilku lat pojawiają się publikacje naukowo-badawcze stwierdzające, że stosowanie związków glinu jest mało efektywne i niebezpieczne dla organizmów występujących w ekosystemach wodnych, ponieważ przyczyniają się m.in. do wzrostu stężenia rozpuszczonej, bardzo toksycznej formy „Al<sup>3+</sup>” w wodzie (Gawrońska H., i in., 2001).

## 6. PODSUMOWANIE

Zrealizowany w latach 2012-2014 projekt polegający na inaktywacji fosforu w osadach dennych jeziora Wolsztyńskiego, przyczynił się do znacznej poprawy podstawowych wskaźników jakości wody jeziora. Osiągnięto więc zakładane przed projektem cele dotyczące wartości stężeń parametrów fizyczno-chemicznych. Potwierdzeniem prawidłowo wykonanego zabiegu immobilizacji fosforu w osadach dennych są m.in. niskie wartości chlorofilu-a oraz fosforu ogólnego i mineralnego w wodzie. Dodatkowo odnotowano wzrost stanu jakościowego i ilościowego makrofitów, wzrost liczebności bentosu oraz ustabilizowanie się odpowiedniego stosunku biomasy ryb drapieżnych i niedrapieżnych. Osiągnięcie tak pozytywnych wyników nie przełożyło się jednak na przezroczystość wody w zbiorniku, za co odpowiedzialna była duża ilość zawiesiny ogólnej - niegenerowanej w jeziorze. Z reguły w jeziorach, w których przezroczystość przekracza 1,0 metr, notowane stężenie zawiesiny ogólnej wynosiło 4,0 - 6,0 mg/l. W przypadku jeziora Wolsztyńskiego wynosiło nawet powyżej 30 mg/l.

Przeprowadzone badania wykazały niesprzyjającą dla jeziora tendencję, ze względu na dużą ilość zawiesiny oraz fosforu w dopływających ciekach, które wykorzystane są w procesach produkcji pierwotnej w akwenie, intensyfikując proces jego eutrofizacji. W związku z czym, utrzymanie pozytywnych efektów przeprowadzonej rekultywacji oraz osiągnięcie stabilnej równowagi biochemicznej zbiornika, uzależnione jest od zabezpieczenia wszystkich dopływów do jeziora Wolsztyńskiego, wśród których należy w szczególności wymienić cieki oznaczone symbolem: 2c, 5c i 7c oraz rzekę Dojcę. To właśnie w tych dopływach ładunki biogenne oraz zawiesina przekraczają dopuszczalne normy i ograniczają skuteczność oraz trwałość przeprowadzonych zabiegów. Dopiero tak kompleksowe



rozwiązanie, pozwoli skutecznie utrzymać efekty rekultywacji i spowodować, że jakość wody w jeziorze będzie ulegała systematycznej poprawie.

## LITERATURA

Bajkiewicz-Grabowska E., 1981, The influence of the physical geographic environment on the biogenous matter delivery to the Lake., *J. Hydrol. Sci.*, 8 (1-2), s. 63-73.

Choiński A., 1992, Katalog jezior Polski. Część III – Pojezierze Wielkopolsko-Kujawskie i jeziora na południe od linii zasięgu zlodowaceniabałtyckiego. Wyd. Nauk. UAM. Poznań.

Gawrońska H., Brzozowska R., Grochowska J., Lossow K., 2001, Effectiveness of PAX and PIX coagulants in phosphorus reduction in a lake – laboratory experiments. *Limnological Review* 1.

Gawrońska H., Lossow K., Łopata M., Brzozowska R., Jaworska B., 2006, Rekultywacja Jeziora Wolsztyńskiego metodą inaktywacji fosforu. Opracowanie dla Gminy Wolsztyn (maszynopis).

Kajak Z., 1998, *Hydrobiologia-Limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, s. 1-355.

Kondracki J., 2001, *Geografia regionalna Polski*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.

Lossow K., Gawrońska H., Tonder J. 1998, Kryteria wyboru optymalnej metody rekultywacji zbiorników wodnych na przykładzie Jeziora Wolsztyńskiego. „Badania Limnologiczne”.

Łopata M. and G. Wiśniewski., 2010, Badania warunków środowiskowych jeziora Wolsztyńskiego pod kątem możliwości jego ochrony i rekultywacji, UW-M Olsztyn, 35 pp.

Mikołajczak E., 2000. *Przyroda Ziemi Wolsztyńskiej*. Wydawnictwo Biblioteka Publiczna Miasta i Gminy Wolsztyn.

Mikołajczak E., 2006, *Ziemia wolsztyńska Środowisko i jego ochrona*, Biblioteka Publiczna Miasta i Gminy Wolsztyn, s. 82.

WIOŚ Poznań, 2004, *Raport o stanie środowiska w Wielkopolsce w roku 2003*. Biblioteka Monitoringu Środowiska.

Wiśniewski R. and Bryl Ł. 2014, Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu pn.: „Rekultywacja jeziora Wolsztyńskiego metodą inaktywacji fosforu”. *PROTE Technologie dla Środowiska Poznań*, 115 pp.

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.*, vol. 30, Part 9, p. 1421–1424.