

# Rekultywacja jeziora Siekiera. Zmiany jakości wody i osadów dennych w okresie 2014-2016 r.

## Restoration of Siekiera Lake. Changes in quality of water and bottom sediment in years 2014-2016

Łukasz Bryl<sup>1</sup>, Ryszard Wiśniewski<sup>2</sup>, Tadeusz Sobczyński<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Zakład Hydrobiologii, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

<sup>3</sup> Zakład Chemii Analitycznej, Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu

### Streszczenie

Jezioro Siekiera położone jest na terenie miejscowości Szamocin w województwie wielkopolskim. Jest zbiornikiem polodowcowym, polimiktycznym, o cechach eutroficznych. Jego powierzchnia wynosi około 12 ha, głębokość maksymalna około 6,0 m, a średnia około 3,0 m. Zasilany jest wodami gruntowymi. Posiada jeden odpływ, ciek o nazwie Młynówka Szamocińska. Zlewnia zbiornika składa się z użytków i gospodarstw rolnych, terenów zielonych oraz mokradeł, a także zabudowy mieszkalnej oraz turystyczno-rekreacyjnej. W sezonie letnim jezioro odgrywa ważną rolę rekreacyjną dla okolicznych mieszkańców. Oprócz kąpieliska i uprawiania sportów wodnych, eksploatowane jest również wędkarsko.

W związku z postępującą eutrofizacją jeziora Siekiera, jego użytkowanie w ostatnich latach zostało w pewnym stopniu ograniczone, głównie ze względu na intensywny rozwój rogatka sztywnego (*Ceratophyllum demersum*).

Praca zawiera podsumowanie przeprowadzonych w latach 2014-2016 działań monitoringowych i rekultywacyjnych na jeziorze Siekiera, ze szczególnym uwzględnieniem zmian jakości wody i osadów dennych.

### Abstract

Siekiera lake is located in the town of Szamocin in Wielkopolska province. It is glacial and polymictic lake of eutrophic characteristics. Its area is about 12 hectares, maximum depth is approximately 6.0 m, and the average depth is about 3.0 meters. It is powered by groundwater. It has one drain - watercourse called Młynówka Szamocińska. The basin of the Siekiera lake has an agricultural character. It also includes green areas and wetlands. It also consists of residential buildings and tourism and recreation infrastructure. During the summer time the lake plays an important recreation role for local residents. Apart from the swimming area and opportunities for water sports, lake is also exploited by anglers.

Due to the progressive eutrophication of the Siekiera lake in recent years its use has been limited. Mostly because of the intensive development of *Ceratophyllum demersum*.

The present work contains a summary of the activities involving the restoration and monitoring of the Siekiera lake in the period 2014-2016, with particular emphasis on changes in water and bottom sediment quality.

## 1. WSTĘP

Obecnie coraz częściej dochodzi do sytuacji, w których czyste niegdyś jeziora na skutek antropresji tracą swoje walory estetyczne, użytkowe i rekreacyjne. Postępująca ich degradacja związana jest ściśle z intensyfikacją procesu eutrofizacji (Smith, 2003; Withers i in., 2014). Podobną sytuację odnotowano na jeziorze Siekiera, gdzie w ostatnich latach obserwowano: intensywny rozwój zespołu rogatka sztywnego (*Ceratophyllum demersum*), kilkukrotne pojawienie się deficytu tlenu - zjawisko

przyduchy, a także, w rejonie kąpieliska, intensywniejszy niż zwykle zakwit fitoplanktonu. Problemu nie wolno bagatelizować, bowiem zarastanie jezior jest jednym z etapów charakterystycznych dla procesu ich zanikania (Ławniczak i in., 2015). Stąd też podjęcie decyzji przez władze gminy, aby w latach 2014-2015 przeprowadzić szczegółowe badania fizyczno-chemiczne jeziora oraz wdrożyć w 2016 roku pierwsze koncepcje zabiegów rekultywacyjnych. Wszystkie prace wykonywane były przez Spółkę PROTE Technologie dla Środowiska z Poznania.

Jezioro Siekiera odgrywa ważną rolę rekreacyjną dla mieszkańców Szamocina oraz pobliskich miejscowości. Informacje o jeziorze Siekiera nie pojawiają się w żadnym „Raportcie o stanie środowiska w Wielkopolsce” (WIOŚ Poznań), co świadczy o tym, że nie było ono badane w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska w ostatnich kilkunastu latach. O pogarszającym się stanie jeziora świadczy ekspansywny rozwój *Ceratophyllum demersum*, charakterystycznego dla wód eutroficznych, który zdominował zbiornik wypierając tym samym wielogatunkowe łąki podwodne, o których pisał Piotrowski (1992). Pod kątem przydatności wody do kąpiei jezioro Siekiera nie budzi zastrzeżeń i co roku SANEPID Chodzież, na podstawie własnych analiz, wydaje pozytywną opinię w tym zakresie. Jezioro przez cały rok intensywnie wykorzystywane jest wędkarsko.

W obrębie jeziora Siekiera nigdy nie podejmowano żadnych działań rekultywacyjnych. Ze względu na to, że obszar kąpieliska w ostatnim czasie stał się mniej atrakcyjny pod kątem jego użytkowania, postanowiono w latach 2014-2015 określić stan zbiornika i rozpoznać źródła postępującej eutrofizacji. Na podstawie wykonanych analiz opracowano projekt prac rekultywacyjnych, który częściowo wdrożono w 2016 roku. Zabiegi obejmowały głównie prace pielęgnacyjno-rekultywacyjne, polegające na uatrakcyjnieniu strefy kąpieliska oraz przycinaniu roślinności wodnej. Przeprowadzono również badania fizyczno-chemiczne wody i osadów dennych, a także badania biologiczne, tak aby określić, czy wykonywane przed sezonem letnim zabiegi wpłynęły na poprawę stanu jeziora, czy może jego pogorszenie.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie zmian wybranych parametrów jeziora Siekiera w latach 2014-2016, wraz z uwzględnieniem wszelkich zmian zaistniałych po przeprowadzeniu w 2016 roku zabiegów pielęgnacyjno-rekultywacyjnych.

## 2. MATERIAŁ I METODY

### 2.1. JEZIORO SIEKIERA

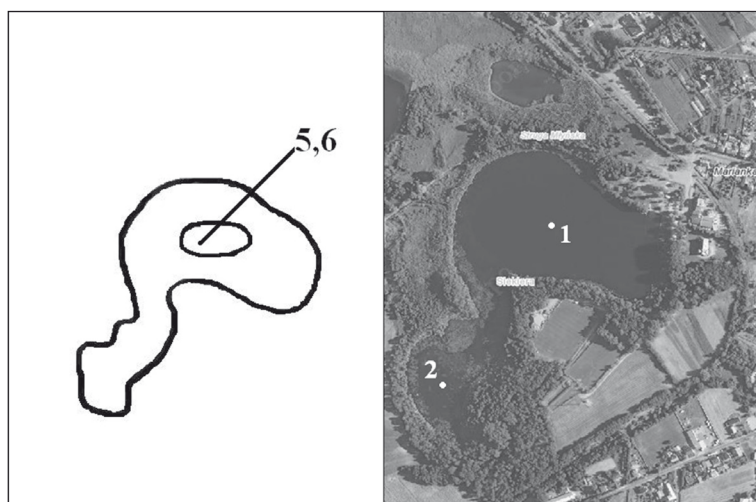
Jezioro Siekiera leży w dorzeczu Margoninka – Noteć – Warta, wchodząc w skład mezoregionu fizycznogeograficznego Pojezierza Chodzieskiego (Kondracki, 2001). Ma nieregularny kształt, z silnym rozszerzeniem w części północnej i dużą zatoką w części południowo-zachodniej. Od strony wschodniej brzeg kończy się stromą skarpią porośniętą lasem. Jezioro Siekiera połączone jest 100-metrowym ciekiem (Młynówka Szamocińska) z niewielkim jeziorem Marglewo, o powierzchni 1,48 ha (Piotrowski, 1992). Nie jest jeziorem przepływowym, a zasilane jest wodami gruntowymi. W jego bezpośredniej zlewni dominują zadrzewienia i zakrzaczenia oraz nieduża zabudowa w części północno-wschodniej. Jezioro należy do typu abiotycznego 2b, czyli jezior niestratyfikowanych o wysokiej zawartości wapnia, współczynnika Schindlera  $\leq 2$ , zlokalizowanych na Niziu Środkowopolskim, na utworach młodo glacialnych. W klasyfikacji rybackiej oznaczone jest jako jezioro leszczowe (Piotrowski, 1992). Z informacji uzyskanych od PZW skład gatunkowy ichtiofauny w 2015 roku wyglądał następująco: sandacz, sum, węgorz, płoć, jaź, szczupak, lin, okoń, amur i karp. Według typu miktycznego zbiornik

zakwalifikować należy jako jezioro polimiktyczne. Źródła literaturowe podają różne, niejednolite parametry morfometryczne jeziora Siekiera (Piotrowski, 1992; Jańczak, 1996; Chojiński, 2006) (Tab. 1.). Na przykład według rastrowej Mapy Podziału Hydrograficznego Polski w skali 1:10000 jego powierzchnia wynosi 13,19 ha. Zbiornik ma jeden owalny głęboczek, zlokalizowany w centralnej części północnego fragmentu jeziora. Południowa część zbiornika jest bardziej wypłycona (głębokość średnia 1,5-1,7 m). Sprzyja to rozwojowi roślinności wodnej, szczególnie zanurzonej oraz o liściach pływających. Strefa przybrzeżna charakteryzuje się średnią głębokością 0,5-1,0 m. Dokładny plan batymetryczny jeziora jeszcze nie powstał (Ryc. 1.).

**Tab. 1. Wskaźniki morfometryczne jeziora Siekiera**

Tab. 1. Morphometric indicators of Siekiera Lake

Parametry	Literatura (źródło)		
	Atlas jezior Polski (1996)	Katalog jezior Polski (2006)	Piotrowski (1992)
Powierzchnia [ha]	12,2	11,0 – 12,5	11,71
Objętość [tys. m <sup>3</sup> ]	329,4	344,4	-
Głębokość maksymalna [m]	5,6	6,2	12
Głębokość średnia [m]	2,7	3,1	4,2
Długość maksymalna [m]	660	-	850
Szerokość maksymalna [m]	310	-	405
Długość linii brzegowej [m]	2000	-	2000
Rozwinięcie linii brzegowej	1,62	-	-
Wskaźnik odsłonięcia	4,5	-	-



**Ryc. 1. Uproszczona batymetria (Atlas jezior Polski, 1996) oraz lokalizacja punktów monitoringowych na jeziorze Siekiera w latach 2014-2016**

Fig. 1. Simplified bathymetry (Atlas jezior Polski, 1996) and location of monitoring points on the Siekiera Lake in 2014-2016

Jezioro posiada dość dobrze rozwiniętą strefę roślinności brzegowej, której skład gatunkowy zdominowany jest przez zespół *Phragmites australis*. Intensywnie występujące łąki podwodne, szczególnie w południowej części, zdominowane są przez *Ceratophyllum demersum*, który wyparł występujące w tym miejscu w latach 90' XX wieku inne gatunki, w tym z rodzajów: *Potamogeton* oraz *Myriophyllum* (Piotrowski, 1992).

Siekiera jest zbiornikiem chętnie wykorzystywanym rekreacyjnie. W jego sąsiedztwie znajduje się camping Amsterdam, plaża, kilkadziesiąt pomostów wędkarskich oraz trasa spacerowo-rowerowa. Szacuje się, że latem na kąpielisku przebywa około 150-200 osób dziennie.

## 2.2. MONITORING I BADANIA

Pierwszy etap prac obejmował określenie stanu jeziora Siekiera, w ramach którego wykonano analizy fizyczno-chemiczne wody oraz osadów dennych (październik 2014 r., kwiecień i sierpień 2015 r.). W szczycie sezonu wegetacyjnego (sierpień 2015 r.) dokonano analizy makrofitów, określając ich skład gatunkowy i ilościowy. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono projekt prac rekultywacyjnych, który częściowo wdrożono w czerwcu 2016 r. Po przeprowadzonych zabiegach kontynuowano monitoring. Badania zrealizowano w sierpniu i październiku 2016 r., w takim samym zakresie jak w latach wcześniejszych.

Wybór punktów monitoringowych został dokonany na podstawie powszechnie obowiązujących standardów, zgodnie z literaturą, podręcznikami oraz posiadaną praktyką. Wzięto pod uwagę wielkość jeziora oraz charakter jego zlewni. Wszystkie pobory próbek w okresie 2014-2016 przeprowadzono w tych samych lokalizacjach (Ryc. 1.).

Do badań wykorzystano: krążek Secchiego, aparat Ruttnera, aparat Kajaka, multimiernik Elmetron CX-105 i GC-105. Pobrane próbki przechowywano w niskiej temperaturze w torbach termoizolacyjnych i transportowano w dniu pobrania do akredytowanego laboratorium. Analizy wykonano zgodnie z obowiązującą metodyką przyjętą w badaniach hydrochemicznych i hydrofizycznych (Namięnik i in., 1995; Hermanowicz i in., 1999). Parametry badane w próbkach wody: odczyn, przewodnictwo elektrolityczne, tlen rozpuszczony, % nasycenia tlenem, temperatura, chlorofil *a*, biochemiczne zapotrzebowanie tlenowe BZT<sub>5</sub>, ogólna liczba bakterii *Coli* i liczba bakterii z grupy *Coli* typu kałowego, widzialność, azot ogólny, azot azotynowy, azot azotanowy, azot amonowy, fosfor ogólny i fosforany, żelazo, zawiesina ogólna, zawiesina mineralna, zawiesina organiczna, chlorki, magnez, potas, wapń, mangan, glin. Parametry badane w próbach osadów dennych: pojemność sorpcyjna osadów względem fosforanów EPC-0, fosfor ogólny i jego frakcje, azot ogólny, żelazo, krzem, glin, wapń, magnez, mangan, materia organiczna, materia mineralna, uwodnienie. Analiza elementów biologicznych stanowi podstawowe kryterium oceny stanu i potencjału ekologicznego wód w Polsce. Aktualnie uważa się, że organizmy żywe, zwane „bioindykatorami”, najlepiej określają wpływ zanieczyszczeń na kondycję oraz zmiany w funkcjonowaniu ekosystemów wodnych, odgrywając jednocześnie decydującą rolę w ocenie stanu wód powierzchniowych. Badania składu ilościowego i gatunkowego makrofitów jeziora Siekiera przeprowadzono wspólnie z dr inż. Szymonem Jusikiem (Katedra Ekologii i Ochrony Środowiska UP Poznań) w roku 2015 i 2016. Inwentaryzację makrofitów wykonano z pontonu z silnikiem motorowym z wykorzystaniem kotwiczki hydrobiologicznej i grabek teleskopowych. W celu określenia głębokości występowania makrofitów użyto echosondy i tyczek geodezyjnych. Lokalizację transektów określono przy pomocy GPS'a.

Ocena roślinności jeziora Siekiera została wykonana zgodnie z makrofitową metodą oceny stanu ekologicznego jezior – ESMI (Makrofitowy Indeks Stanu Ekologicznego) (Ciecierska i in., 2006; Ciecierska i Dynowska, 2013). Badania terenowe prowadzone były w transektach prostopadłych do linii brzegowej, których minimalną liczbę obliczono według wzoru przedstawionego w metodycie badawczej (Ciecierska i Dynowska, 2013). W celu uzyskania precyzyjnych wyników przebadano 10 transektów o średniej szerokości 30-50 m, obejmujących całą szerokość strefy litoralnej zasiedlonej przez roślinność. Badania uwzględniały identyfikację zbiorowisk makrofitów występujących w transektach i ich udział w pokryciu, według siedmiostopniowej skali Braun-Blanqueta (1951). Sposób obliczania wskaźnika ESMI oparto na metodycie badawczej (Ciecierska i Dynowska, 2013). Przyjmuje on wartość od 0 do 1, gdzie 0 oznacza stan najbardziej zdegradowany, a 1 stan, najbardziej zbliżony do naturalnego. Uzyskany wynik ESMI pozwala przyporządkować dany zbiornik do klasy stanu ekologicznego, na podstawie rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 21 lipca 2016 r. w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych.

### 2.3. PRACE WYKONYWANE W 2016 ROKU

Części zabiegów, określonych w przygotowanym w 2015 r. projekcie prac rekultywacyjnych, wdrożono na przełomie czerwca i lipca 2016 r. Zakres prac obejmował głównie zabiegi pielęgnacyjno-rekultywacyjne, polegające na uatrakcyjnieniu strefy kąpieliska jeziora Siekiera oraz na koszeniu makrofitów występujących w litoralu. Precyzyjne, nieinwazyjne koszenie (przycinanie) roślinności podwodnej wykonywane było głównie w części północnej zbiornika przy pomocy kosiarki pływającej, a skoszona biomasa została wyłowiona i przekazana na składowisko odpadów (Ryc. 2.). Prace na kąpielisku odbywały się zgodnie z następującym harmonogramem:

- wykonanie analiz laboratoryjnych osadu dennego pod kątem możliwości jego konsolidacji,
- ręczne oczyszczenie terenu kąpieliska z elodeidów, innej biomasy roślinnej oraz przedmiotów niebezpiecznych (np. szkło, puszki),
- przeprowadzenie zabiegu konsolidacji osadów dennych kąpieliska w celu ograniczenia zjawiska resuspensji namułu, które pojawiłoby się w kolejnym etapie prac. Do konsolidacji osadu wykorzystano w odpowiednich proporcjach bentonit oraz wodorowęglan sodu,
- wyprofilowanie brzegu jeziora, usunięcie nasypu brzegowego w okolicach pomostów oraz pogłębienie brodzika w okolicach pomostu pierwszego. Zamieniono również trawiastą plażę na plażę piaszczystą,
- przykrycie organicznych osadów dennych około 15 cm warstwą piasku płukanego (frakcja 0,1-2,0 mm), zwiększając tym samym atrakcyjność tego miejsca, ograniczając rozwój roślinności wodnej na kąpielisku oraz odcinając wewnętrzne źródło zasilania jeziora w substancje biogenne.

## 3. WYNIKI BADAŃ

Analiza stanu ilościowego i gatunkowego makrofitów potwierdziła fakt postępującej eutrofizacji jeziora Siekiera. W latach 90. XX wieku zbiornik charakteryzował się niezbyt silnie rozwiniętą roślinnością brzegową. Trzyciny otaczały jezioro szerszym pasem od północnego-zachodu po północny-wschód. W centralnej i południowej części szuwar składający się z zespołów *Schoenoplectus* i *Phragmites* był rzadki. Podwodne łąki były wielogatunkowe, tworzone przez *Potamogeton*, *Ceratophyllum* i *Myriophyllum*.





**Ryc. 2. Kosiarka pływająca wykorzystana do przycinania makrofitów oraz część biomasy roślinnej wyłowionej z jeziora Siekiera w trakcie wykonywania prac pielęgnacyjnych**

Fig. 2. Mowing boat used for cutting water plants and part of plant biomass pulled out from the lake during the performance of maintenance works

Makrofity o liściach pływających nie były w ogóle wymieniane (Piotrowski, 1992). Obecnie strefa szuwaru, jak pokazują badania z 2015 i 2016 roku, jest bardziej rozwinięta. Dominuje *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*. Odnotowano również występowanie *Phalaris arundinacea*, *Eleocharis palustris* oraz objętą ścisłą ochroną gatunkową w Polsce od 2004 r. kłoc wiechowatą - *Cladium mariscus* (Ryc. 3.). Łąki podwodne tworzy prawie wyłącznie zespół *Ceratophyllum demersum* (Ryc. 3.). Od kilkunastu lat, szczególnie w południowej części jeziora, obserwuje się również intensywny rozwój *Nuphar lutea* i *Nymphaea alba*. Odpływ z jeziora, o nazwie Młynówka Szamocińska, zdominowany został przez *Carex acutiformis*.

Uzyskane wyniki badań, wykonane w latach 2015-2016, na podstawie analizy roślinności wodnej pozwoliły ocenić stan ekologiczny jeziora Siekiera w oparciu o wskaźnik ESMI. Zbiornik charakteryzuje się bardzo dobrze rozwiniętymi makrofitami, szczególnie należącymi do grupy elodeidów, które występowały do średniej głębokości 2,8 m (w 2015 r.) i 2,9 m (w 2016 r.). W niektórych transektach głębokość ich występowania wynosiła nawet 3,1 m. Szuwar rozwija się nieco słabiej. Pomimo postępującej eutrofizacji obecny stan ekologiczny jeziora Siekiera znajduje się na granicy stanów bardzo dobrego i dobrego. Decyduje o tym przede wszystkim dobry rozwój nymfeidów i elodeidów w stosunku do szuwaru oraz znaczna głębokość maksymalna występowania roślin. Zgodnie z metodyką, jeśli wartość ESMI wskazuje na stan bardzo dobry lub dobry, ale  $\geq 75\%$  fitolitoralu zajmują fitocenozy gatunków negatywnych (eutroficznych), takich jak np. *Ceratophyllum demersum*, to wówczas klasę jakości należy obniżyć o jedną (Ciecierska, 2008).

Pomimo przeprowadzonego zabiegu koszenia roślinności wodnej w 2016 r. stwierdzono, że w porównaniu z 2015 r. zmiany w składzie gatunkowym i ilościowym makrofitów są niewielkie. Wskaźnik ESMI uległ obniżeniu tylko o 0,02, a powierzchnia fitolitoralu zmniejszyła się o około 0,6 ha. Dodatkowo zaobserwowano wzrost wskaźnika zróżnicowania fitocenotycznego o 0,04

oraz zmniejszenie udziału zespołu rogotka sztywnego w fitolitoralu o 6,14%, co należy uznać za zjawisko korzystne.

Badania fizyczno-chemiczne wody jeziora Siekiera również potwierdzają fakt jego postępującej eutrofizacji. W Atlasie jezior Polski znaleźć można informacje na temat wykonanych w dniu 17.06.1982 r. analizach (Jańczak, 1996). Woda zbiornika w tamtym okresie charakteryzowała się przewodnością na poziomie 340  $\mu\text{S}$ , zawartością tlenu – 9,7 mg  $\text{O}_2/\text{l}$  i odczynem pH 8,2. W tabeli 2 przedstawiono tylko niektóre parametry mające wpływ na określenie jakości wody jeziora, uwzględnione w przeprowadzonych badaniach w 2014-2016 r.

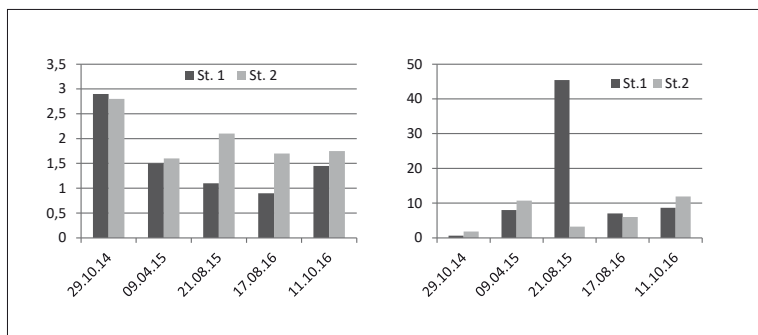


**Ryc. 3. Szuwar kłoci wiechowatej (*Cladietum marisci*) w transekcje nr 4 (po lewej) i zespół rogotka sztywnego (*Ceratophyllum demersum*) w transekcje nr 7 (po prawej)**

Fig. 3. *Cladietum marisci* in the transect No. 4 (on left) and Phytocoenoses of *Ceratophyllum demersum* in the transect No. 7 (on right)

Średnia widzialność krążka Secchiego z wszystkich punktów monitoringowych w całym okresie badawczym była na dobrym poziomie i wynosiła 1,8 m (Ryc. 4.). Pogorszenie się tego parametru obserwowano na stanowisku nr 1, po przeprowadzonych na zbiorniku pracach polegających na budowie nowych pomostów i pracach pielęgnacyjno-rekultywacyjnych. Najgorsze wartości odnotowano w sierpniu 2015 r. – 1,1 m oraz w sierpniu 2016 r. – 0,9 m, a najlepsze w październiku 2014 r. – 2,8 m (stanowisko nr 2) i 2,9 m (stanowisko nr 1).

Zawartości chlorofilu *a* w omawianym zbiorniku przyczyniały się do dobrej przezroczystości wody, ponieważ ilość biomasy glonów planktonowych w wodzie była na zadowalającym poziomie (średnia wartość dla całego zbiornika, podczas całego okresu badawczego wynosi – 10,34  $\mu\text{g/l}$ ). W sierpniu 2015 r. na stanowisku monitoringowym nr 1 odnotowano wyraźny wzrost chlorofilu *a* – 45,4  $\mu\text{g/l}$ , co przełożyło się na pogorszenie widzialności w tym okresie (Ryc. 4.).

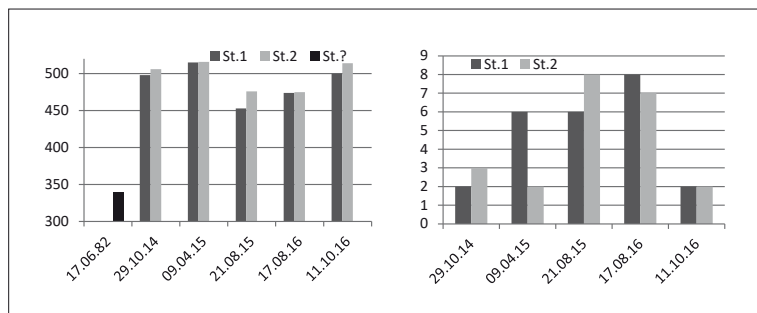


**Ryc. 4. Widzialność krążka Secchiego [m] (po lewej) oraz zawartość chlorofilu *a* [µg/l] (po prawej) w jeziorze Siekiera w okresie 2014–2016 r.**

Fig. 4. Visibility of Secchi disc [m] (left) and chlorophyll content [µg/l] (right) in Siekiera Lake in 2014–2016

Przewodność elektrolityczna mieściła się w przedziale wartości charakterystycznych dla zbiorników eutroficznych: 453–516 µs/cm, a średnia dla całego zbiornika wynosi 493 µs/cm. Uzyskane w 2014–2016 r. wyniki znajdują się na podobnym poziomie, jednak w stosunku do roku 1982, widać wyraźny wzrost wartości tego parametru (Ryc. 5.).

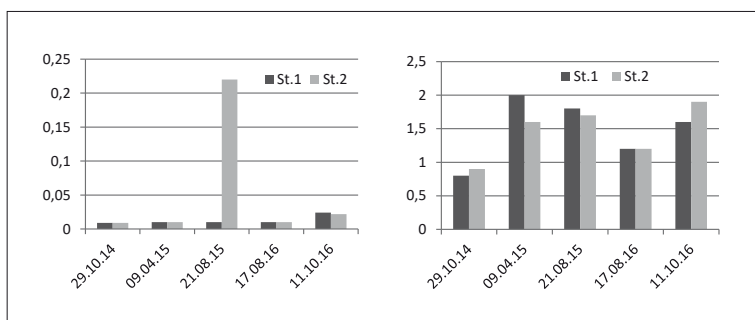
Zakłada się, że w poprawnie funkcjonującym ekosystemie wodnym, ilość zawiesiny ogólnej powinna mieścić się w bezpiecznym przedziale 4–6 mg/l. W przypadku jeziora Siekiera takie wartości udało się osiągnąć. Niezależnie od stanowiska badawczego w okresie 2014–2016 ilość zawiesiny ogólnej wynosiła 2–8 mg/l (średnia dla całego okresu 4,6 mg/l). Wzrost ilości zawiesiny w obu sezonach letnich spowodowany był najprawdopodobniej pracami, których zakres przyczynił się do wzburzenia osadów dennych, co mogło przełożyć się później na uzyskane wyniki (Ryc. 5.).



**Ryc. 5. Przewodność elektrolityczna [µs/cm] (po lewej) i wartości zawiesiny ogólnej [mg/l] (po prawej). Porównanie wyników z przeprowadzonych badań w latach 2014–16 i 1982 r.**

Fig. 5. Conductivity [µs/cm] (left) and value of total suspension [mg/l] (right). Results comparison of the studies conducted in the years 2014–2016 and 1982.





**Ryc. 6. Zawartość fosforu ogólnego [mg P/l] (po lewej) oraz azotu ogólnego [mg N/l] (po prawej) w wodach jeziora Siekiera. Zestawienie wyników badań z okresu 2014-2016 r.**

Fig. 6. Content of total phosphorus [mg P/l] (left) and total nitrogen [mg N/l] (right) in the water of Siekiera Lake. Summary of test results from the period 2014-2016 year.

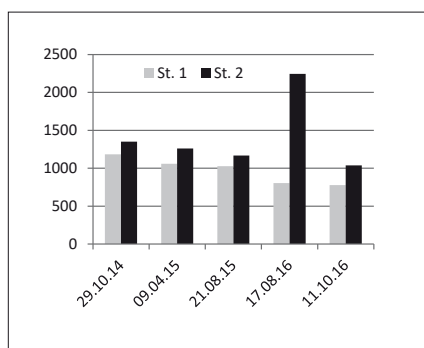
Fosfor jest zazwyczaj pierwiastkiem limitującym rozwój organizmów fitoplanktonowych. Im większe jego stężenie, tym zakwit w zbiorniku jest bardziej intensywny. W przypadku jeziora Siekiera w badanym okresie 2014-2016 stężenia fosforu ogólnego, jak również fosforanów, były na zadowalającym poziomie. W przypadku  $P_{og}$  wyniki mieściły się w przedziale: 0,009 – 0,22 mg P/l, a w przypadku  $PO_4$ : 0,03 – 0,10 mg  $PO_4$ /l. Najwyższe stężenia fosforu ogólnego odnotowano na stanowisku monitoringowym nr 2 latem 2015 roku (0,22 mg P/l) (Ryc. 6.).

Azot ogólny w badanym okresie mieścił się w przedziale 0,8 – 2,0 mg N/l (Ryc. 6). Najwyższe stężenia tego pierwiastka odnotowano w sezonie letnim, choć zaskakująco dużo pojawiło się w październiku 2016 r. (1,6-1,9 mg N/l). Średnia wartość dla całego zbiornika, w całym okresie badawczym wynosi: 1,47 mg/l.

**Tabela 3. Zestawienie wyników analiz laboratoryjnych próbek osadów dennych pobranych z jeziora Siekiera w okresie 2014-2016 r.**

Table 3. Summary of laboratory analyzes of bottom sediment samples taken from Siekiera Lake in the period 2014-2016

parametr	Punkt 1					Punkt 2				
	29.10.14	09.04.15	21.08.15	17.08.16	11.10.16	29.10.14	09.04.15	21.08.15	17.08.16	11.10.16
fosfor ogólny [mg/kg s.m.]	1183	1059	1026	804	777	1350	1262	1168	2246	1038
żelazo [mg/kg s.m.]	6138	1046	7453	2790	3160	10250	7106	12575	3250	3820
Fe/P	5,189	0,988	7,264	3,470	4,067	7,593	5,631	10,77	1,447	3,680
EPC-0 [mg $PO_4$ /l]	2,805	7,173	2,009	3,045	3,123	3,648	5,305	2,947	3,681	2,118

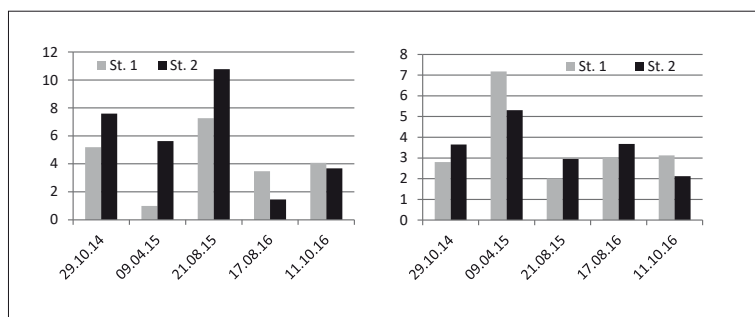


**Ryc. 7. Zawartość fosforu ogólnego [mg/kg s.m.] w osadach dennych jeziora Siekiera w okresie 2014-2016 r.**

Fig. 7. Content of total phosphorus [mg/kg d.w.] in the bottom sediments of Siekiera Lake in the period 2014-2016

Istotny wpływ na trofizm jeziora ma również zawartość fosforu w osadach dennych, które z reguły stanowią wewnętrzne źródło zasilania w substancje biogenne. W przypadku badań wykonanych w okresie 2014-2015 zawartości fosforu ogólnego w osadach dennych na obu stanowiskach monitoringowych, w różnych terminach poboru, były do siebie zbliżone i mieściły się w przedziale od 1026 mg/kg s.m. do 1350 mg/kg s.m. W roku 2016 zaobserwowano podobną tendencję jak w latach wcześniejszych (Ryc. 7.).

Stosunek żelaza do fosforu w osadach dennych jest bardzo ważnym elementem w ich chemizmie. Wzrost ilości żelaza w osadach przyczynia się do zmniejszenia ilości fosforu uwalnianego do toni, ograniczając jego wpływ na trofę wody. W przypadku jeziora Siekiera badania pokazały, że efektywność żelaza w procesie inaktywacji fosforu jest ograniczona. Średnia wartość stosunku Fe/P w latach 2014-2016 dla punktu monitoringowego nr 1 wynosi: 4,2, a dla punktu nr 2: 5,8. Dla całego zbiornika utrzymuje się na poziomie: 5,0 (Ryc. 8.).



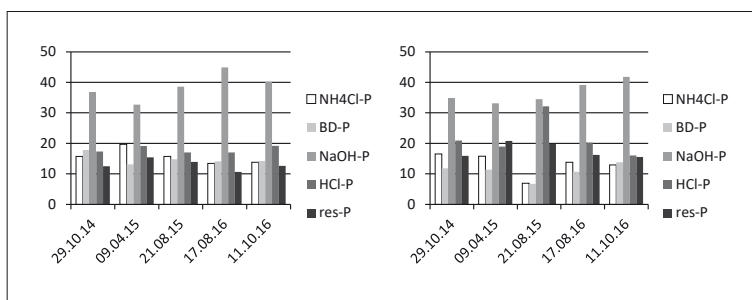
**Ryc. 8. Stosunek żelaza do fosforu w osadach dennych jeziora Siekiera (po lewej) oraz uzyskane wartości wskaźnika EPC-0 w okresie badawczym 2014-2016**

Fig. 8. The ratio of Fe/P (left) and the obtained values of the EPC-0 index (right) in the bottom sediments of the Siekiera Lake during the period 2014-2016

Pojemność sorpcyjna osadów dennych względem fosforanów (EPC-0) informuje, jaka jest kondycja osadu i ile fosforu jest on w stanie jeszcze zaabsorbować. Im większa

wartość współczynnika, tym zdolność pochłaniania fosforu jest mniejsza. W skali całego okresu badawczego na stanowisku nr 1 mieści się on w przedziale: 2,009 – 7,173 mg PO<sub>4</sub>/l, a dla stanowiska nr 2: 2,118 – 5,305 mg PO<sub>4</sub>/l. Najgorszą kondycję osadów odnotowano wiosną 2015 r. (7,173 mg PO<sub>4</sub>/l – stanowisko 1 i 5,631 mg PO<sub>4</sub>/l – stanowisko nr 2). Najlepszą latem 2015 r. (stanowisko nr 1 – 2,009 mg PO<sub>4</sub>/l) oraz jesienią 2016 r. (stanowisko nr 2 – 2,118 mg PO<sub>4</sub>/l) (Ryc. 8.).

Udział poszczególnych frakcji fosforu w osadach dennych jeziora Siekiera był do siebie zbliżony przez cały okres prowadzonych badań. Wyniki przedstawiono jako średnie wartości z wszystkich analiz. Kształtowały się one następująco: NH<sub>4</sub>Cl-P – 14,4 %, BD-P – 12,8 %, NaOH-P – 37,7 %, HCl-P – 19,8 %, res-P – 15,3 %. Dwie pierwsze, łatwo biodostępne frakcje: NH<sub>4</sub>Cl-P (wymienialna, luźno związana z osadem) i BD-P (związana z żelazem, wrażliwa na warunki redukujące) stanowiły około 27,2 %. Najwięcej, bo około 37,7%, było frakcji NaOH-P, związanej z materią organiczną i glinem. Fosfor związany z wapniem stanowi 19,77%, a frakcja res-P, całkowicie niedostępna biologicznie, wynosi 15,3% (Ryc. 9.).



**Ryc. 9. Udział procentowy frakcji fosforu w osadach dennych w 2014-2016 r. Stanowisko monitoringowe nr 1 (po lewej) i nr 2 (po prawej)**

Fig. 9. Percentage share of phosphorus fractions in bottom sediments of Siekiera Lake in 2014-2016. Monitoring point no. 1 (left) and point no. 2 (right)

#### 4. DYSKUSJA

Badania fizyczno-chemiczne i biologiczne jeziora Siekiera, prowadzone w okresie 2014-2016 r., potwierdziły fakt postępującej eutrofizacji oraz pozwoliły określić jego aktualny stan ekologiczny. Dostarczyły również cennych informacji na temat wpływu wykonywanych w ostatnim czasie prac na jakość wody i osadów dennych. Nie zaobserwowano niepokojących zjawisk, które mogłyby wpłynąć na niekorzystną zmianę ich chemizmów. Zlewnia jeziora Siekiera jest uregulowana, a ścieki socjalno-bytowe z okolicznej zabudowy mieszkalno-rekreacyjnej odprowadzane są do kanalizacji.

Roślinność wodna, szczególnie elodeidy są bardzo ważne z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania ekosystemu wodnego. Poprzez stabilizację osadów dennych i ograniczenie ich resuspensji przyczyniają się do poprawy jakości wody w jeziorze, stanowiąc jednocześnie konkurencję dla organizmów fitoplanktonowych. Stwarzają również dogodne warunki do rozwoju innych organizmów wodnych. W przypadku jeziora Siekiera łąki podwodne w latach 90. XX wieku, jak pisał Piotrowski (1992), były wielogatunkowe. Obecnie są bardzo ubogie pod względem syntaksonomicznym

i tworzy je wyłącznie zespół rogotka sztywnego, charakterystycznego dla środowiska o wysokiej trofii. W literaturze naukowej odnaleźć można wiele publikacji odnośnie pozbywania się roślin wodnych, „uciążliwych” z punktu widzenia użytkownika jeziora. Zbiornik wodny o krystalicznie czystej wodzie, ale z nadmierną ilością makrofitów, z reguły nie jest oceniany pozytywnie. Rośliny przeszkadzają kąpiącym się, kajakarzom, windsurferom, a przede wszystkim wędkarzom. Być może ocena ta zmieni się, gdy znacznie brakować będzie źródeł wody pitnej, a czystowodne, zdominowane przez makrofity zbiorniki będą musiały stać się źródłami wody pitnej. Negatywny wpływ usuwania całych makrofitów opisywał James W. F. i in. (2004), a skutki oddziaływania podatnych na resuspensję osadów przedstawił Fan Cheng-Xin i in. (2001). Mając to na uwadze, zabiegi jakie zrealizowano w 2016 r. ograniczono tylko do koszenia roślinności zanurzonej, a nie usuwania całych roślin. Przycinanie roślinności ma za zadanie stymulować ich dalszy rozwój, i w konsekwencji doprowadzić do zmniejszenia ilości biogenów w toni, ograniczając tym samym zakwit organizmów fitoplanktonowych. Obecność roślinności wodnej w jeziorze Siekiera należy uznać za zjawisko pozytywne. Ich całkowite usunięcie mogłoby doprowadzić do przejścia ekosystemu w alternatywny stabilny stan mętnowodny, zdominowany przez sinice. Jak pokazały przeprowadzone w 2016 roku badania, zabieg koszenia roślinności nie wpłynął negatywnie na zmiany parametrów fizyczno-chemicznych wody i osadów dennych. Stan roślinności wodnej wrócił praktycznie do stanu pierwotnego (sprzed koszenia). Na skutek przeprowadzonych zabiegów o ponad 6%, w stosunku do roku 2015 zmniejszył się udział populacji rogotka sztywnego, osiągając tym samym zakładane przed pracami cele. Przeprowadzona w latach 2015-2016 inwentaryzacja roślinności potwierdziła również fakt występowania w strefie szuwarowej rzadkiego i cennego przyrodniczo gatunku, objętego ochroną prawną: kłoci wiechowatej (*Cladium mariscus*).

Wyniki badań fizyczno-chemicznych wody jeziora Siekiera w latach 2014-2016 mogą również wskazywać na trwający proces jego wewnętrznego wzbogacenia w fosfor uwalniany z osadów dennych. Szczególnie, że charakteryzują się one dużym uwodnieniem (91,5-95,5%), sporym udziałem materii organicznej (średnio 38,0%), niskim stosunkiem Fe/P (średnio na poziomie 5,01, gdy optymalny jest w granicach 15-20), dużym udziałem łatwo biodostępnych frakcji  $\text{NH}_4\text{-Cl-P}$  i  $\text{BD-P}$ , a także wysokimi wartościami pojemności sorpcyjnej osadów (EPC-0), charakterystycznych dla zbiorników zeutrofizowanych. W jeziorach eutroficznych wartość EPC-0 jest wyższa od 3,000 mg  $\text{PO}_4/\text{l}$ , a dla jeziora Siekiera wynosi ona około 3,500 mg  $\text{PO}_4/\text{l}$  (Tab. 3., Ryc. 9.). W warunkach oddlenienia wody naddennej, przy braku występowania makrofitów oraz pod wpływem silnej resuspensji, z osadów dennych jeziora Siekiera może wydzielić się do toni nawet 0,5-0,7 mg  $\text{PO}_4/\text{dm}^3$ . Niekorzystne zmiany obserwuje się również w przypadku konduktywności wody, która w 1982 r. wynosiła 340  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , a obecnie wykazuje wartość około 500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , a także w przypadku tlenu rozpuszczonego w wodzie (w roku 1982 – 9,7 mg  $\text{O}_2/\text{dm}^3$ , w latach 2014-2016 średnio 4,55 – 6,74 mg  $\text{O}_2/\text{dm}^3$ ) (Tab. 2.). Podwyższone wartości niektórych parametrów fizyczno-chemicznych wody jeziora Siekiera najczęściej obserwowano podczas badań w okresie letnim (np. w 2015 r. odnotowano stężenie chlorofilu *a* na poziomie 45,4  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ). Przezroczystość wody, mierzona przy pomocy krążka Secchiego, w okresie badawczym 2014-2016 osiągała zadowalające wartości. Pozwoliło to na rozwój roślinności wodnej w zbiorniku. Najniższą wartość tego parametru odnotowano na stanowisku nr 1 w okresach letnich (0,9 – 1,1 m). Woda w tym czasie miała barwę dość mocno brunatną. Nie były to jednak kwasy humusowe, które występują w środowisku o pH poniżej 7,0, gdyż wody jeziora miały pH w okolicach 8,0. Ze względu na mały udział chlorofilu *a* wykluczono intensywny zakwit fitoplanktonu w danym momencie. Niskie wartości zawiesiny ogólnej nie miały wpływu na ograniczenie widzialności. Prawdopodobnie czynnikiem ograniczającym przezroczystości wody w tym okresie był obumierający fitoplankton,

a zwłaszcza sinice, które podczas tego procesu mogą zmieniać barwę wody właśnie na kolor brunatny. Zjawisko to zaobserwowano głównie w rejonie głębozca (stanowisko monitoringowe nr 1), gdzie obumarły fitoplankton został skoncentrowany ze względu na hydrodynamikę wody jeziora Siekiera. Stężenia fosforanów w wodzie zbiornika były stosunkowo niskie, niesprzyjające zakwitom sinicowym. Przyjmuje się, że dopiero przy stężeniu  $0,05 \text{ mg PO}_4/\text{l}$  jest prawdopodobieństwo, że zakwit nie nastąpi. Pewność wymaga jednak stężenia  $0,005 \text{ mg PO}_4/\text{l}$ . W przypadku azotu ogólnego jako bezpieczną wartość jego stężenia, ograniczającą zakwit, przyjmuje się  $0,2 \text{ mg N/l}$ . Średnia wartość stężenia azotu w wodzie jeziora Siekiera wynosiła  $1,47 \text{ mg N/l}$  i przekraczała ponad siedmiokrotnie wartość bezpieczną.

Przeprowadzone w 2016 r. prace pielęgnacyjno-rekultywacyjne na jeziorze Siekiera miały za zadanie głównie poprawić walory estetyczne, wizualne i użytkowe tego miejsca (Ryc. 10.). Ostatni etap prac zbliżony był do metody „cappingu”. Zminimalizowano w ten sposób uwalnianie do toni nagromadzonych w tych osadach fosforanów, poprzez stworzenie stabilnego, piaszczystego dna. Zabiegi naprawcze, przeprowadzone w 2016 r. na jeziorze Siekiera, powinny przyczynić się do poprawy jego jakości.



**Ryc. 10. Zmiany, które zaszły na kąpielisku jeziora siekiera w czerwcu 2016 roku**

Fig. 10. Changes which occurred in the bathing of Siekiera Lake in June 2016

## 5. PODSUMOWANIE

Jak pokazują przeprowadzone w latach 2014–2016 badania, jezioro Siekiera zmagają się z problemem postępującej eutrofizacji. Choć stan ekologiczny jeziora jest na ogół dobry, wszystkie prace rekultywacyjne realizowane w 2016 roku oraz planowane do wykonania w terminach późniejszych mają za zadanie zminimalizować lub całkowicie zahamować to zjawisko. Za dobry stan wody w zbiorniku odpowiadają głównie makrofity, których brak spowodowałby przejście akwenu w alternatywny stabilny stan mętnowodny, z dominacją sinic.

Zagrożeniem dla jeziora, oprócz osadów dennych (wewnętrzne źródła zasilania biogenami), są również m.in. gorsze warunki hydrologiczne tego terenu (obniżenie się poziomu wody w je-



ziorze; w sierpniu 2015 r. Młynówka Szamocińska była ciekim suchym, a intensywność źródeł zasilających zbiornik znacznie zmalała - ograniczenie dopływu „świeżej wody” do zbiornika), a także intensywne użytkowanie wędkarskie (stosowanie dużych ilości zanęt).

Wykonane w 2016 roku zabiegi pielęgnacyjno-rekultywacyjne przyczyniły się do zmniejszenia udziału procentowego *Ceratophyllum demersum* i wpłynęły nieznacznie na wahania zmiany parametrów fizyczno-chemicznych wody, osiągając zakładany cel. Prognozuje się, że pozytywne zmiany w zbiorniku odnotowane będą w sezonie 2017 r., bądź też w momencie zastosowania pozostałych, wskazanych w projekcie prac rekultywacyjnych. Proces rekultywacji jezior jest procesem złożonym i długotrwałym.

Uzyskane wyniki analiz z okresu 2014–2016 pozwoliły sformułować wnioski, wśród których zaleca się objęcie jeziora Siekiera stałym monitoringiem, szczególnie w okresach, gdy na zbiorniku wykonywane są jakiegokolwiek prace i zabiegi rekultywacyjne. Zaleca się również zachowanie łąk podwodnych, tworzonych przez roślinność zanurzoną, oraz wdrożenie innych metod rekultywacyjnych, np. zintegrowanych, pływających wysp makrofitowych czy przeprowadzenie konsolidacji osadów w rejonie głębozeczka.

## LITERATURA

- Braun-Blanquet J., 1951, Pflanzensoziologie Grundzüge der vegetations Kunde, Springer, Vienne.
- Choiński A., 2006, Katalog jezior Polski. Część III – Pojezierze Wielkopolsko-Kujawskie i jeziora na południe od linii zasięgu zlodowacenia bałtyckiego, Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- Ciecierska H., 2008, Makrofity jako wskaźniki stanu ekologicznego jezior, Rozprawy i Monografie 139, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn.
- Ciecierska H., Dynowska M., 2013, Biologiczne metody oceny stanu środowiska. Tom 2 Ekosystemy wodne, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn, s. 106-128.
- Ciecierska H., Kolada A., Soszka H., Golub M., 2006, Opracowanie podstaw metodycznych dla monitoringu biologicznego wód powierzchniowych w zakresie makrofitów i pilotowe ich zastosowanie dla części wód reprezentujących wybrane typy i kategorie. Etap II. Opracowanie metodyki badań terenowych makrofitów na potrzeby rutynowego monitoringu wód oraz metoda oceny i klasyfikacji stanu ekologicznego wód na podstawie makrofitów. Tom II – Jeziora, Instytut Ochrony Środowiska. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Warszawa – Poznań – Olsztyn (maszynopis). 52.
- Fan Cheng-Xin, Zhang Lu, Qu Wen-Chuan, 2001, Lake sediment resuspension and caused phosphate release – a simulation study, J. Environ. Sci., Vol.13, No. 4, s. 406-410.
- Hermanowicz W., Dojlido J., Dożańska W., Koziorowski B., Zerbe J., 1999, Fizyczno-chemiczne badania wody i ścieków, Arkady, Warszawa, s. 556.
- Jańczak J., 1996, Atlas jezior Polski. Tom 1 Jeziora Pojezierza Wielkopolskiego i Pomorskiego w granicach dorzecza Odry, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- James W. F., Wright D. I., Eakin H. L., Barko J. W., 2004, Impacts of mechanical macrophyte removal devices on sediment scouring in littoral habitats: I. Historical survey of operations in Minnesota lakes, *APCRP Technical Notes Collection* (ERDC/TN APCRP-EA- 08), s. 1-13.
- Kondracki J., 2001, Geografia regionalna Polski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Ławniczak A. E., Achtenberg K., Kutyla S., 2015, Problem zarastania małych zbiorników wodnych położonych w zlewniach rolniczych, *Ochrona i rekultywacja jezior pod red. Ryszarda Wiśniewskiego, PZITS Oddział Toruń*, s. 169-180.

Namieśnik J., Łukasiak J., Jamrógiewicz Z., 1995, *Pobieranie próbek środowiskowych do analizy*, PWN, Warszawa, 278.

Piotrowski P., 1992, *Z wędką i plecakiem po Pilskiem*, Oficyna Wydawnicza AS spółka z o.o., Piła.

Psenner R., Boström B., Dinka M., Pettersson K., Pucsko R., Sager M., 1988, Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment, *Ergeb. Limnol.*, 30: s. 98–113.

Raport o stanie środowiska w Wielkopolsce w roku 2003, WIOŚ w Poznaniu, Biblioteka Monitoringu Środowiska (2004).

Raport o stanie środowiska w Wielkopolsce w roku 2005, WIOŚ w Poznaniu, Biblioteka Monitoringu Środowiska (2006).

Smith V. H., 2003, Eutrophication of freshwater and coastal Marine ecosystems a global problem, *Environmental Science and Pollution Research*, 10(2), s. 126-139.

Withers P. J. A., Neal C., Jarvie H. P., Doody D. G., 2014, Agriculture and Eutrophication: Where do we go from here?, *Sustainability*, 6(9), s. 5853-5875.