

Michał RYBAK¹, Tomasz JONIAK¹ i Tadeusz SOBCZYŃSKI²

MONITORING ZANIECZYSZCZENIA AZOTEM I FOSFOREM BEZODPŁYWOWEGO JEZIORA PO ODCIĘCIU DOPŁYWU ŚCIEKÓW

THE MONITORING OF NITROGEN AND PHOSPHORUS CONTENT IN WITHOUT-FLOW LAKE AFTER ELIMINATION OF WASTEWATER INFLOW

Abstrakt: Przedstawiono wyniki badań koncentracji związków azotu i fosforu w jeziorze bezodpływowym, dokumentujące zmiany jakościowe po odcięciu dopływu ścieków. Uwzględniono zmiany, jakie nastąpiły w zbiorniku po pierwszej fazie rekultywacji (chemiczne strącanie fosforanów, biomanipulacja i natlenianie hypolimnionu). Obniżanie się poziomu wody jeziora zasilanego z poziomu wodonośnego wielkopolskiej doliny kopalnej spowodowało ustanie odpływu powierzchniowego. Redukcja wielkości zasilania przez wody podziemne w ciągu kilkudziesięciu lat spowodowała zmniejszenie powierzchni jeziora o ponad 3 ha, a głębokości średniej o 1 m. Jezioro było przez ponad 40 lat odbiornikiem ścieków bytowych z pobliskiego sanatorium. Eliminacja dopływu ścieków w końcu lat 80. XX wieku nie spowodowała oczekiwanej poprawy stanu jakościowego wód jeziora, lecz intensyfikację eutrofizacji. Cechą jeziora były obfite zakwity fitoplanktonu i wyczerpanie tlenu od głębokości 5-6 m. Analiza przyczyn pogarszającego się stanu jeziora oparta m.in. na gradientach głębokościowych form azotu i fosforanów rozpuszczonych wykazała znaczącą rolę wtórnego zasilania wewnętrznego z osadów dennych. Wydzielanie fosforanów z osadów dennych było stymulowane przez warunki silnie redukujące. W wyniku rekultywacji nastąpił wzrost przezroczystości wody, ale warunki tlenowe nie zmieniły się. Znacznie wzrosły stężenia fosforu całkowitego, a azotu zmniejszyły się.

Słowa kluczowe: monitoring jezior, antropopresja, fosforany, azot, zasilanie wewnętrzne

Wprowadzenie

Jezioro Góreckie jako jeden z najcenniejszych obiektów przyrodniczych Wielkopolskiego Parku Narodowego ma interesujące walory krajobrazowe, co czyni z niego niewątpliwie najbardziej znane miejsce w okolicy Poznania. Doceniają to liczni turyści oraz młodzież szkolna, dla której pełni ono również funkcję dydaktyczną. Niestety od wielu lat stan czystości jeziora był zły. Co roku w jeziorze występują masowe zakwity glonów, czyniąc wodę zieloną i zawieszistą, a w odbiorze społecznym po prostu brudną. Dzieje się tak pomimo odcięcia już prawie 20 lat temu wszystkich źródeł zanieczyszczeń i objęcia jeziora ochroną ścisłą.

Teren badań

Jezioro Góreckie położone jest w polodowcowej rynnicy górecko-budzyńskiej [1], znajdującej się w obrębie niewielkiego mikroregionu Pojezierze Stęszewskie (północno-wschodnia część mezoregionu Pojezierze Poznańskie w podprovincji Pojezierze

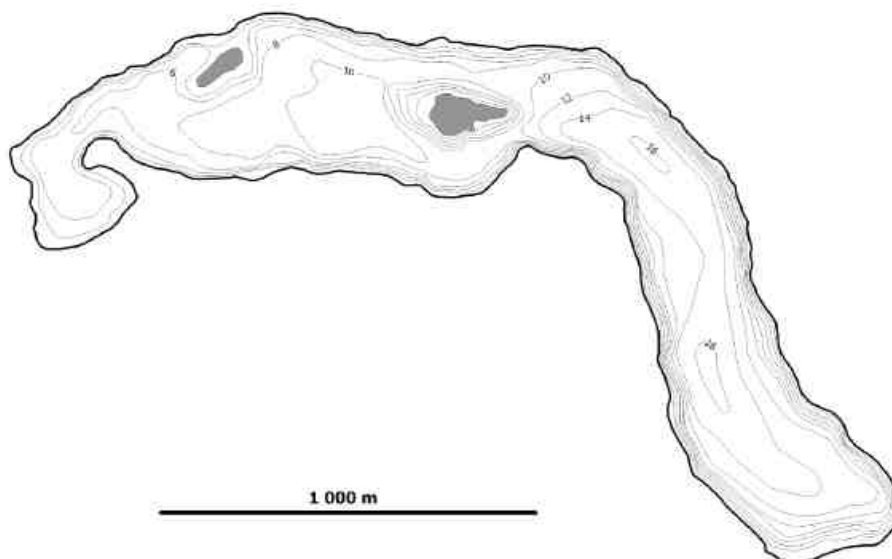
¹ Zakład Ochrony Wód, Instytut Biologii Środowiska, Wydział Biologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Umultowska 89, 61-614 Poznań, tel. 61 829 57 82, email: m.rybak@amu.edu.pl

² Zakład Chemii Analitycznej, Wydział Chemii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Umultowska 89b, 61-614 Poznań, tel. 61 829 16 03, email: sobczyn@amu.edu.pl

*Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'14, Jarnołtówek, 15-17.10.2014

PołudniowoBałtyckie). Obszar ten cechuje bardzo bogata i urozmaicona rzeźba terenu charakterystyczna dla krajobrazu młodoglacjalnego [2].

Jezioro reprezentuje typ abiotyczny 2a - jezioro o wysokiej zawartości wapnia, o małym wpływie zlewni, stratyfikowane. Jest to typowy zbiornik rynnowo-morenowy o podłużnym kształcie, zakrzywiony w połowie długości (rys. 1). Powierzchnia lustra wody wynosi 101,63 ha, głębokość średnia 8,5 m, głębokość maksymalna 16,6 m [3]. Długość jeziora to około 3000 m przy szerokości średniej około 350 m. Linia brzegowa jest słabo rozwinięta i liczy 8300 m. Jezioro jest prawie w całości otoczone przez wysokie zalesione brzegi, a tylko w północno-zachodniej części rozlewa się wśród terenów płaskich użytkowanych rolniczo. Zasilane jest głównie przez źródła, posiada odpływ do Jeziora Łódzko-Dymaczewskiego, który od wielu lat jest niedrożny z powodu niskiego stanu wody.



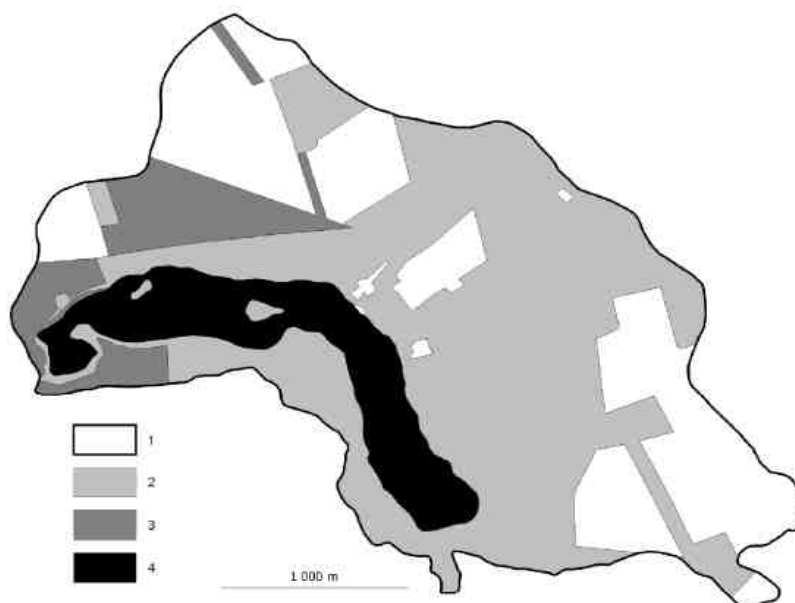
Rys. 1. Mapa batymetryczna Jeziora Góreckiego [4]

Fig. 1. Bathymetric map of Goreckie Lake [4]

Naturalna płycizna biegnąca w poprzek jeziora na wysokości Wyspy Zamkowej dzieli je na dwa baseny: południowy i północno-zachodni. Basen południowy charakteryzuje się stromo opadającymi stokami misy jeziornej i większą głębokością, która na prawie 1/3 jego obszaru waha się w granicach 10-15 m. Znajduje się tu głęboczek. Basen północno-zachodni jest znacznie płytszy - średnia głębokość zawiera się między 5 a 10 m, a maksymalna wynosi 12 m [1].

Powierzchnia zlewni to 671 ha (rozciągnięcie w kierunku wschodnim oraz północno-wschodnim) (rys. 2). W zlewni występuje niewielka przewaga lasów (52,0%) nad terenami rolniczymi (47,7%) i zabudowanymi (0,3%). Obecnie w obrębie zlewni brak jest punktowych źródeł zanieczyszczeń, lecz nadal zagrożeniem są źródła przestrzenne,

zwłaszcza spływ powierzchniowy z upraw rolniczych i dopływ zanieczyszczeń porolniczych z wodami gruntowymi [4]. Według danych z 2001 roku, obciążenie azotem w przeliczeniu na jednostkę powierzchni jeziora wynosiło $9,5 \text{ g/m}^2\cdot\text{rok}$, a fosforem $0,36 \text{ g/m}^2\cdot\text{rok}$ [1].



Rys. 2. Struktura zlewni jeziora (1 - pola uprawne, 2 - obszary leśne, 3 - młode lasy, 4 - jezioro) [3]

Fig. 2. Structure of land use the lake catchment area (1 - farmland, 2 - forest, 2 - young forest, 4 - lake) [3]

Do końca lat 80. XX wieku do jeziora dopływały ścieki socjalno-bytowe z sanatorium położonego w Jeziorach. W celu ochrony jeziora jego północna część została włączona do rezerwatu ścisłego. W jeziorze wprowadzono zakaz kąpieli i wędkowania. Jezioro jest zasilane przez wody podziemne poziomu wodonośnego międzyglinowego górnego i z wielkopolskiej doliny kopalnej. Istotny jest też wpływ zasilania powierzchniowego z powodu braku stałych cieków [3].

Rekultywacja jeziora

W celu odnowy stanu jeziora w 2010 roku przeprowadzono rekultywację przy zastosowaniu: a) natleniania wód hypolimnionu przez aerator wiatrowy bez burzenia stratyfikacji; przy optymalnym wietrze może wprowadzić do hypolimnionu do 12 kg tlenu na dobę [5], co w świetle wiedzy o rozległości strefy beztlenowej jest wysoce niewystarczające; b) strącania fosforanów przy użyciu koagulantu żelazowego (siarczan żelaza III, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, nazwa handlowa PIX) (rys. 3); c) biomanipulacji polegającej na selektywnych odłowach ryb z gatunku *Rutilus rutilus* L. i *Perca fluviatilis* L.



Rys. 3. Rekultywacja chemiczna Jeziora Góreckiego - maj 2010 r. (fot. T. Joniak)

Fig. 3. Chemical recultivation of Goreckie Lake - May 2010 (photo T. Joniak)

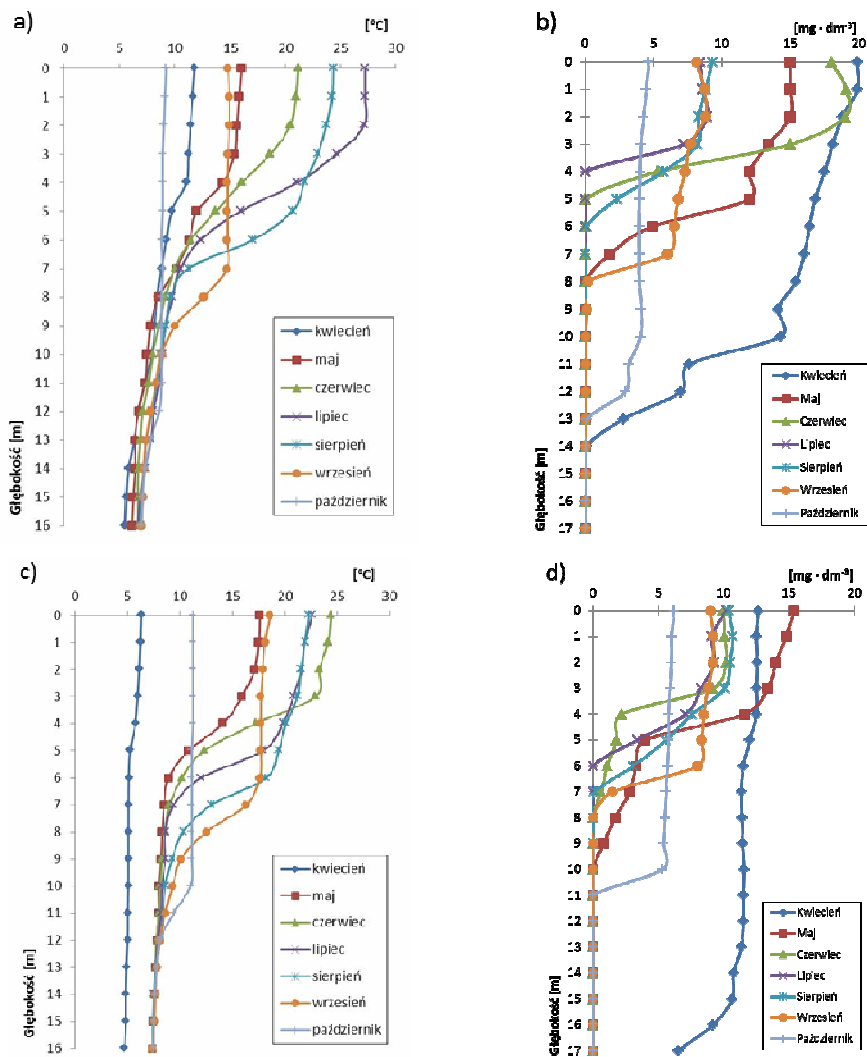
Metody badań

Badania obejmowały analizę stężeń związków azotu i fosforu oraz przezroczystości wód w latach 2010 i 2011. Pomiary terenowe i pobór próbek wody prowadzono co miesiąc od kwietnia do października w najgłębszym miejscu w pelagialu płosa południowego. Pomiary terenowe obejmowały profil termiczno-tlenowy od powierzchni do dna (miernik wieloparametrowy WTW) i przezroczystość za pomocą krążka Secchiego.

Próbki wody do analiz laboratoryjnych pobierano w przekroju pionowym zbiornika co 2 m od powierzchni do dna, przy użyciu elektrycznej pompki głębinowej (Eijkelkamp) do pojemników z tworzywa sztucznego o pojemności 5 l. Rozdział próbek i konserwacja stosownie do parametru przeprowadzane były w terenie. Laboratoryjnie oznaczano azot azotanowy (N_{NO_3}), amoniakalny (N_{NH_4}), organiczny (N_{org}) i ogólny (TN) oraz fosfor całkowity (TP) i fosforany, stosując metody odpowiednie do wód powierzchniowych słodkich [6, 7]. Analizę statystyczną wykonano w programie Statistica 8.0.

Wyniki badań i dyskusja

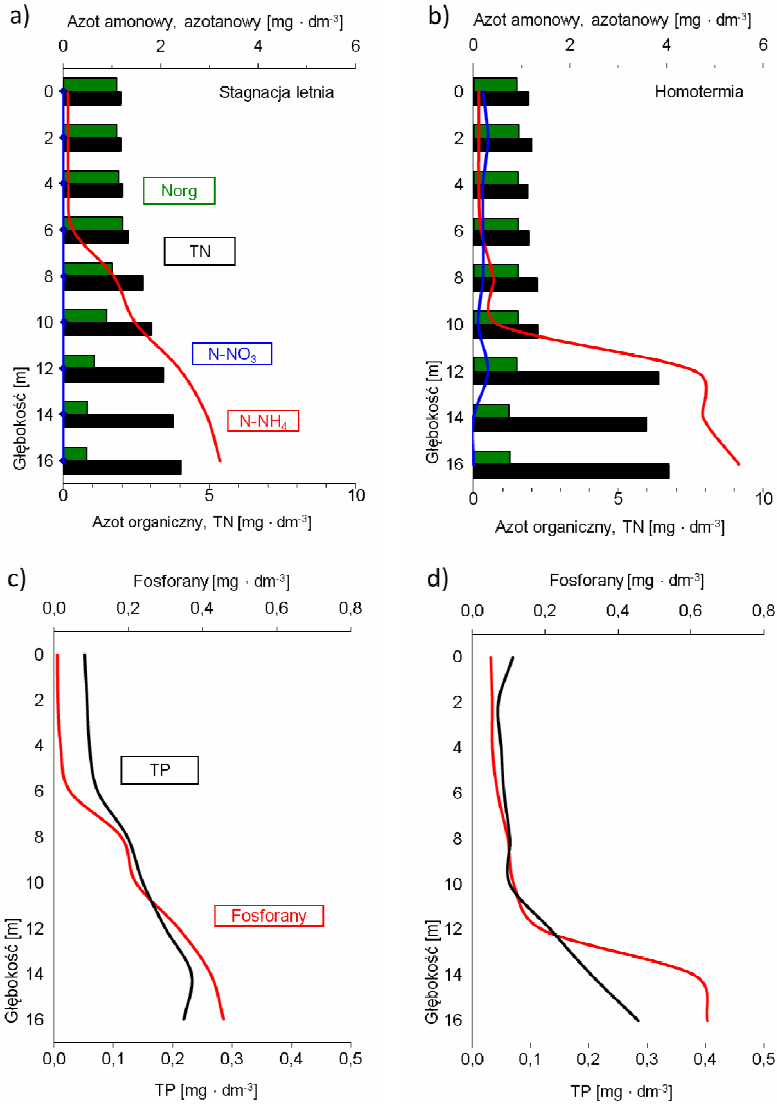
Warunki termiczne wód w obu latach były zbliżone. Stratyfikacja termiczna w pełni wykształcała się w maju z epilimnionem sięgającym maksymalnie 7 m głębokości (wrzesień). Metalimnion w okresie zmieniał zasięg od 2 m w maju do 5 m w ciągu lata. Gradient temperatury sięgał $6,0^{\circ}C/m$. W październiku następowała homotermia wód (rys. 4). Warunki tlenowe w sezonie wegetacyjnym były bardzo dobre tylko w epilimnionie. Metalimnion był odtleniony w około 1/3, a hypolimnion całkowicie. Stan utrzymywania się w jeziorze strefy wód permanentnie odtlenionych datowany jest od połowy lat 70. ubiegłego wieku [8]. Deficyty tlenu były na tyle duże, że nawet w okresach homotermii w wodach przydennych nie zawsze następowała poprawa natlenienia.



Rys. 4. Miesięczne gradienty temperatury i tlenu w 2010 i 2011 roku; a) temperatura 2010; b) tlen 2010; c) temperatura 2011; d) tlen 2011

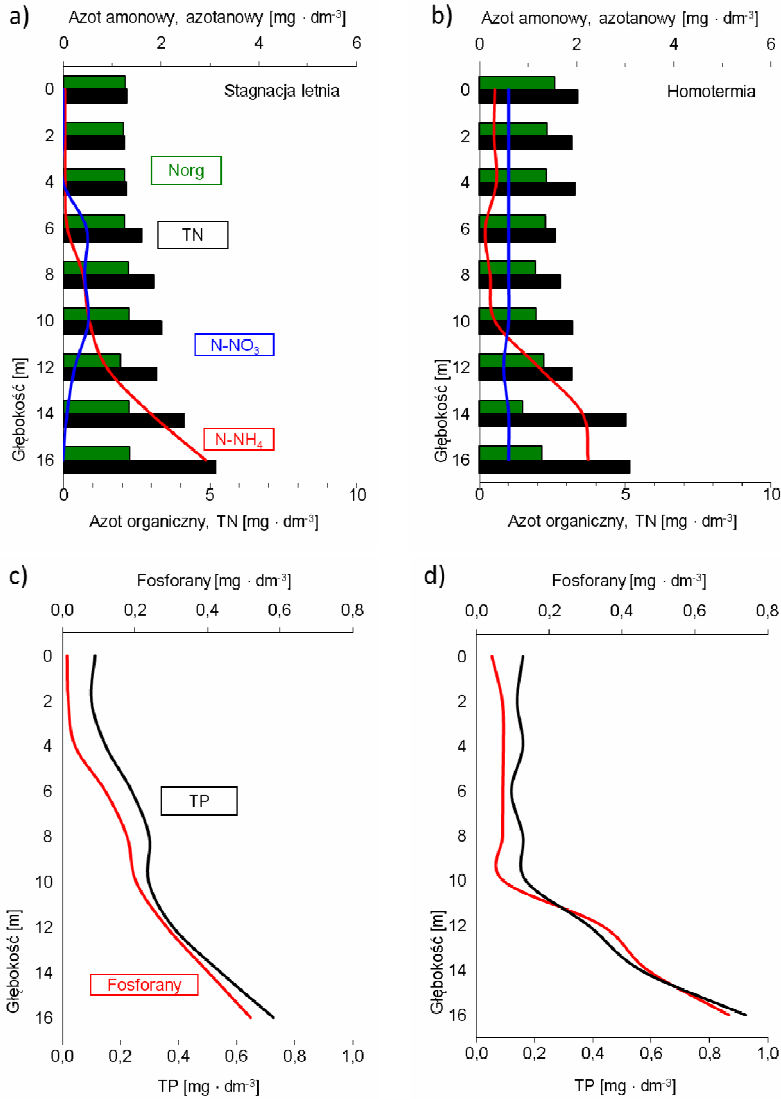
Fig. 4. Monthly gradients of temperature and oxygen in 2010 and 2011; a) temperature 2010; b) oxygen 2010; c) temperature 2011; d) oxygen 2011

Z porównania zasięgu wód odtlenionych wynika, że w 2010 roku był on większy. Deficyty tlenu zużywanego na utlenianie materii organicznej były i są poważnym problemem zbiornika. Skalę niekorzystnych zjawisk obrazuje zasięg wód dobrze natlenionych. W pierwszym roku badań w kwietniu odnotowano natlenienie jeziora do dna, ale już w czerwcu miąższość wód dobrze natlenionych wynosiła tylko 4 m, a w lipcu 3 m.



Rys. 5. Gradienty nutrientów w przekroju pionowym jeziora w okresie stagnacji letniej i homotermii w 2010 roku. a) formy azotu w okresie stagnacji letniej; b) formy azotu w okresie homotermii; c) fosforany i fosfor całkowity w okresie stagnacji letniej; d) fosforany i fosfor całkowity w okresie homotermii. Skróty: N_{org} - azot organiczny; TN - azot ogólny; N-NO₃ - azot azotanowy; N-NH₄ - azot amonowy; TP - fosfor całkowity

Fig. 5. Vertical gradients of nutrients in the lake during the summer stagnation and homothermy period in 2010. a) nitrogen forms during summer stagnation; b) nitrogen forms during homothermy; c) phosphate and total phosphorus during summer stagnation; d) phosphate and total phosphorus during homothermy. Symbols: N_{org} - organic nitrogen; TN - total nitrogen; N-NO₃ - nitrate nitrogen; N-NH₄ - ammonia nitrogen; TP - total phosphorus



Rys. 6. Gradienty nutrientów w przekroju pionowym jeziora w okresie stagnacji letniej i homotermii w 2010 roku. a) formy azotu w okresie stagnacji letniej; b) formy azotu w okresie homotermii; c) fosforany i fosfor całkowity w okresie stagnacji letniej; d) fosforany i fosfor całkowity w okresie homotermii. Skróty: patrz rys. 5

Fig. 6. Vertical gradients of nutrients in the lake during the summer stagnation and homothermy period in 2010. a) nitrogen forms during summer stagnation; b) nitrogen forms during homothermy; c) phosphate and total phosphorus during summer stagnation; d) phosphate and total phosphorus during homothermy. Symbols: see Fig. 5

Homotermia jesienna powodowała korzystną zmianę, ale z wyłączeniem strefy przydennej (rys. 4). Silny zapach siarkowodoru utrzymywał się od głębokości 12 m od maja do września.

W 2011 roku jeszcze przed rekultywacją warunki tlenowe były lepsze - w kwietniu tlen obecny był w całym jeziorze, osiągając przy dnie stężenie $6,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (rys. 4). Najwyższe stężenia tlenu notowano w epilimnionie w maju. Latem zasięg strefy wód natlenionych był większy niż rok wcześniej. Strefa beztlenowa była płytsza, ale i tak obejmowała część metalimnionu. W okresie homotermii jesiennej strefa wód natlenionych sięgała do 10 m. Zapach siarkowodoru w wodzie notowano przez całe lato od 10 m głębokości, a od 12 m wiosną i jesienią.

Pionowy gradient termiczno-tlenowy wywierał wpływ na rozkład stężeń związków mineralnych. O ile wiosną (homotermia) biologicznie łatwo dostępne azotany i fosforany występowały w całej toni jeziora, o tyle w czasie stagnacji były oznaczane tylko w wodach głębokich, zwłaszcza w warstwie beztlenowej (rys. 5). Kluczowe dla takiego rozkładu stężeń mineralnych form azotu i fosforu było masowe występowanie fitoplanktonu tworzącego masowe zakwity. W takich warunkach dominującą grupą organizmów są sinice, wyjątkowo dobrze rozwijające się w wodach ubogich w azotany [9].

Obecność dużych koncentracji jonów fosforanowych, zwłaszcza amonowych w strefie beztlenowej, a głównie przydennej wskazuje na intensywny biochemiczny rozkład materii organicznej [10]. Azot amonowy był w okresie letnim jedyną mineralną formą azotu występującą w jeziorze. W tym zakresie pozytywnej reakcji ekosystemu jeziora po rekultywacji nie stwierdzono (rys. 6).

Tabela 1

Stan jakościowy Jeziora Góreckiego na podstawie wartości średnich parametrów fizyczno-chemicznych w sezonie wegetacyjnym 2010 i 2011

Table 1

Quality state of the Góreckie Lake based on average values of physical and chemical parameters in the vegetation season of 2010 and 2011

Rok	2010		2011	
	wartość	klasa	wartość	klasa
Przezroczystość [m]	2,5	I-II	3,2	I-II
Średnie nasycenie tlenem hypolimnionu [%]	0	> II	0	> II
Azot ogólny [mg N/dm^3]	2,0	> II	2,1	> II
Fosfor całkowity [mg P/dm^3]	0,05	I-II	0,11	> II
Stan jeziora	poniżej dobrego		poniżej dobrego	

Długotrwałe utrzymujące się w strefie beztlenowej warunki redukujące blokowały nityfikację amoniaku do azotanów. Efektem była koncentracja przy dnie stężeń sięgających $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ N}_{\text{NH}_4}$. Odtlenienie potęgowało uwalnianie fosforanów z osadów dennych, co obrazował wzrost w gradiencie głębokości wody (rys. 5 i 6). Wyraźne uwarstwienie wykazywał też fosfor całkowity. Choć odnotowana zmienność właściwości chemicznych w słupie wody w okresie stagnacji letniej, a zwłaszcza form fosforu jest typowa dla jezior zeutrofizowanych [11], to dużo wyższe stężenia jonów fosforanowych w strefie przydennej w 2011 roku były również skutkiem rozpadu w warunkach beztlenowych kompleksów żelazowo-fosforanowych. W sytuacji stosowania

w rekultywacji koagulantów żelazowych w jeziorach z beztlenową strefą przydenną redukcja związków żelaza i ponowne uwalnianie fosforanów to podstawowy i jak na razie nierozwiązywalny problem.

W obu latach ocena stanu jakościowego wykazała stan poniżej dobrego (tab. 1). Przed rekultywacją przekroczenia stanu dobrego dotyczyły nasycenia tlenem w hypolimnionie i azotu ogólnego. W następnym roku dosyć zaskakującą i niekorzystną zmianą był ponadnormatywny wzrost koncentracji fosforu, mimo chemicznej inaktywacji fosforanów. O ile dla stanu jakościowego miało to znaczenie, o tyle w wymiarze wielkości różnic nie było istotne. Podobną zmianę odnotowano w pierwszym roku rekultywacji Jeziora Strzeszyńskiego (Joniak, nieopublikowane wyniki) i może być interpretowane jako jeden z efektów zaburzenia homeostazy ekosystemu jeziora po zabiegach rekultywacji chemicznej. Za tą tezę przemawia fakt braku podobnych zmian w Jeziorze Góreckim w latach poprzedzających rekultywację [9]. Niemniej, wyniki badań prowadzone w innych rekultywowanych jeziorach wskazują na duże ryzyko braku efektywności zabiegów w stosunku do fosforanów, jak również azotu ogólnego [12].

Podsumowanie i wnioski

Kolejny okres badań monitoringowych Jeziora Góreckiego uwzględniający pierwsze efekty rekultywacji wykazał szereg zmian w chemizmie wody. Za korzystne uznać należy zmniejszenie koncentracji toksycznego dla organizmów żywych, a zwłaszcza ichtiofauny amoniaku. O istotnych dla jeziora zmianach jakościowych świadczyło pojawienie się azotanów w okresie sezonu wegetacyjnego w metalimnionie, których nie oznaczano wcześniej od przynajmniej kilkunastu lat. Stan ten wskazywał na potencjalnie duże możliwości zmian struktury fitoplanktonu z eliminacją masowych zakwitów toksycznych sinic, które występowały w zbiorniku od wielu lat od wczesnej wiosny do późnej jesieni. Za niekorzystny uznać należy wzrost koncentracji fosforu, a szczególnie łatwo biologicznie przyswajalnych fosforanów. Ich kumulacja w strefie przydennej w okresie stagnacji letniej nie jest bowiem stanem trwałym, gdyż wymieszanie wód w okresie jesiennym (homotermia) powoduje przywracanie ich do toni w całym jeziorze. Przeprowadzenie rekultywacji z użyciem metody chemicznego strącania fosforanów przy zastosowaniu koagulantu żelazowego uznać należy za nietrafione ze względu na nietrwałość chemicznych wiązań żelazowo-fosforanowych w warunkach beztlenowej strefy przydennej. Użycie aeratora wiatrowego daje wprawdzie pewne szanse na zmianę sytuacji tlenowej zbiornika, ale perspektywa czasowa jest niezwykle trudna do określenia. W tej sytuacji bardziej wskazane jest stosowanie koagulantów glinowych, np. chłorku poliglinu (Al_2Cl_3 , nazwa handlowa PAX), dającego gwarancję trwałości związania fosforanów przy braku tlenu.

Literatura

- [1] Szyper H, Romanowicz W, Gołdyn R. Zagrożenie jezior Wielkopolskiego Parku Narodowego przez czynniki zewnętrzne. W: Burchard L, red. Ekosystemy wodne Wielkopolskiego Parku Narodowego. Poznań: Wyd Nauk UAM; 2001.
- [2] Kondracki J. Geografia regionalna Polski. Warszawa: Wyd Nauk PWN; 2003.
- [3] Kolenowicz L, Hauke J, Kaczmarek L, Lorenc M. Zmiany poziomu wody Jeziora Góreckiego (Wielkopolski Park Narodowy) w latach 2002-2007 na tle wahaniami poziomu wód wielkopolskiej doliny

- kopalnej i warunków atmosferycznych. W: Partyka J, Pociask-Karteczka J, redaktor. Wody na obszarach chronionych; Kraków: IGiGP UJ; 2008.
- [4] Walna B. Interdisciplinary study of postagricultural pollution in the Wielkopolski National Park (Poland). *J Integr Environ Sci.* 2013;10(1):17-38. DOI: 10.1080/1943815X.2012.759976.
- [5] Konieczny R, Podsiadłowski S. Technika filmowa w badaniach aeracji pulweryzacyjnej. *Inż Roln.* 2005;10:189-196. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-d16f679e-a996-42d0-9ac6-713836d23168>.
- [6] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edition. Washington DC: American Public Health Association; 1998.
- [7] Hermanowicz W, Dojlido J, Dożańska W, Koziorowski B, Zerbe J. Fizyczno-chemiczne badania wody i ścieków. Warszawa: Arkady; 1999.
- [8] Sobczyński T, Joniak T. The variability and stability of water chemistry in deep temperate lake: Results of long-term study of eutrophication. *Pol J Environ Stud.* 2013;22(1):227-237. <http://www.pjoes.com/pdf/22.1/pol.j.envIRON.stud.vol.22.no.1.227-237.pdf>.
- [9] Joniak T. Factors affecting range of photosynthetically active light in three lakes of Wielkopolska National Park. *TEKA Kom Ochr Kszt Środ Przyr.* 2009;6:123-128.
- [10] Kajak Z. *Hydrobiologia-Limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych.* Warszawa: Wyd Nauk PWN; 2001.
- [11] Klapper H. Technologies for lake restoration. *J Limnol.* 2003;62(1):73-90. DOI: 10.4081/jlimnol.2003.s1.73.
- [12] Berleć K, Traczykowski A, Budzińska K, Szejniuk B, Michalska M, Jurek A, et al. Effectiveness of the reclamation of Jelonek Lake based on selected physical and chemical parameters of water. *Roczn Ochr Środ.* 2013;15:1336-1351.

THE MONITORING OF NITROGEN AND PHOSPHORUS CONTENT IN WITHOUT-FLOW LAKE AFTER ELIMINATION OF WASTEWATER INFLOW

¹Department of Water Protection, Institute of Environmental Biology, Faculty of Biology
Adam Mickiewicz University, Poznań

²Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, Adam Mickiewicz University, Poznań

Abstract: The results of study the concentrations of nitrogen and phosphorus content in the lake without outflow after elimination of wastewater inflow were presented. The effects of first phase of the lake restoration (by aeration of the hypolimnion, chemical phosphorus inactivation and biomanipulation) were also noted. Several dozen years ago in result the change of groundwater level in Wielkopolska buried valley from the lake the water outflow was stopped. Reduction of supplying the underground water caused a decrease of the lake area of more than 3 hectares and average depth about 1 m. For the water quality changes in the lake during last 20 years (after 1989) a great impact had the inflow of domestic sewage from nearby sanatorium. The analyses performed after closing of sanatorium revealed the constant increase the concentrations of mineral biogenic compounds in the lake water. The intensification of the lake eutrophication was stated. Characteristic feature of lake was abundant algal blooms and depletion of oxygen from 5-6 m depth. Analysis of the causes of the deteriorating condition of the lake (based on depth gradients of nitrogen forms and dissolved phosphates) a significant role of secondary supplying from bottom sediments showed. Release of phosphate was stimulated by strongly reducing conditions. The result of restoration was improvement of the light conditions, but without improving of oxygen content in water column. In water chemistry higher concentration of TP and smaller of TN were recorded.

Keywords: lakes monitoring, human impact, phosphates, nitrogen, internal release