

Anna Czaplicka-Kotas, Zbigniew Ślusarczyk, Małgorzata Pięta, Anna Szostak

Analiza zależności między wskaźnikami jakości wody w Jeziorze Goczałkowickim w aspekcie zakwitów fitoplanktonu

Wyniki dotychczasowych badań jednoznacznie wskazują na zanieczyszczenie wód Jeziora Goczałkowickiego biogenami, powodujące okresowe zakwity sinic, zielenic i okrzemek [1–4]. Zakwit sinic lub glonów planktonowych występuje wówczas, gdy w 1 cm³ wody znajduje się ponad 500 jednostek organizmów [5] oraz gdy przezroczystość wody mierzona krążkiem Secchiego wynosi ≤ 1 m. Podczas zakwitu obserwuje się również zmianę intensywności barwy wody.

Ponieważ Jezioro Goczałkowickie zaopatruje w wodę mieszkańców Górnego Śląska, a także odławiane są z niego ryby oraz stanowi ono naturalne siedlisko ptactwa wodnego objętego ochroną w ramach programu Obszar Natura 2000, problem zanieczyszczenia tego akwenu biogenami oraz zakwity fitoplanktonu mają ogromne znaczenie gospodarcze i przyrodnicze.

Pochodzenie biogenów w zbiorniku przypisywane jest działalności antropogenicznej, a przede wszystkim odprowadzaniu ścieków bytowych i gospodarczych z terenów nieskanalizowanych, spływów z terenów rolniczych, ścieków przemysłowych oraz odprowadzaniu wód z kompleksu hodowlanych stawów rybnych. Ścieki przemysłowe wprowadzane są głównie przez Wisłę, która ma również znaczny udział we wprowadzaniu ładunku zanieczyszczeń pochodzących ze ścieków komunalnych. Bezpośredni wpływ na przyspieszenie eutrofizacji wód Jeziora Goczałkowickiego mają spływy z użytków rolnych, zasobnych w azot i stymulatory wzrostu roślin. Pola uprawne zlokalizowane są w jego północnej części oraz dolnej i środkowej części zlewni Wisły powyżej zbiornika. Ścieki bytowo-gospodarcze oraz spływy rolnicze przedostają się do zbiornika również za pośrednictwem przepompowni odwadniającej tereny położone po jego południowej i zachodniej stronie (przepompownie w Zarzeczcu, Frelichowie, Zabłociu, Podgroblu i Strumieniu) (rys. 1).

Wody zawierające zanieczyszczenia organiczne, związki azotu i fosforu oraz zawiesiny pochodzące z hodowlanych stawów rybnych wnoszone są do zbiornika jesienią, przez Wisłę, Bajerkę i potok Zbytkowski. Łączna powierzchnia stawów usytuowanych w zlewni Wisły i Bajerki powyżej Jeziora Goczałkowickiego wynosi ok. 900 ha.

Stwierdzono, że woda pochodząca ze stawów rybnych zawierała dziesięciokrotnie większą ilość chlorofilu niż woda podczas zakwitu glonów [6].

Celem niniejszej pracy było określenie zależności między wskaźnikami jakości wody w Jeziorze Goczałkowickim w czasie zakwitu fitoplanktonu.

Materiał i metody

Wyniki badań jakości wody w latach 1994–2009 zostały udostępnione przez laboratorium Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów w Goczałkowicach. Próbkę wody pobrano w punktach pomiarowych zlokalizowanych w obrębie Jeziora Goczałkowickiego, przy czym wodę przypowierzchniową pobrano w 8 punktach, wodę z głębokości 6 m pobrano w trzech punktach, a wodę z głębokości 2 m w jednym punkcie pomiarowym (rys. 1). Próbkę wody pobrano jednokrotnie w miesiącu w punkcie pomiarowym zlokalizowanym przy ujęciu wody oraz 4–5-krotnie w roku w pozostałych punktach pomiarowych zlokalizowanych w obrębie zbiornika. Analizę fizyczno-chemiczną próbek wody wykonano według wytycznych zawartych w polskich normach. Uzyskane wyniki na potrzeby niniejszej pracy przeanalizowano metodami statystycznymi, które umożliwiają m.in. ocenę jakości wody na podstawie wzajemnych korelacji między wskaźnikami jakościowymi [7]. Bazę danych uzupełniono o dodatkowe atrybuty umożliwiające łatwą selekcję danych odpowiednio do ograniczeń stawianych im w procesie badawczym. W wielu przypadkach otrzymane podzbiory danych były wystarczająco liczne, aby można było je potraktować jako próby duże z możliwością użycia rozkładów granicznych. Jednak w innych przypadkach rozbudowane klucze selekcji danych ograniczały podzbiory spełniających warunki rekordów na tyle,



Rys. 1. Zarys Jeziora Goczałkowickiego wraz z punktami poboru próbek wody
Fig. 1. Contour of Lake Goczałkowickie with water sampling site

Dr inż. A. Czaplicka-Kotas, dr Z. Ślusarczyk, mgr inż. M. Pięta: Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów, Kanalizacji i Monitoringu Środowiska, ul. Warszawska 24, 30-155 Kraków aczapl@pk.edu.pl

Mgr inż. A. Szostak: Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów SA, Zakład Uzdatniania Wody Goczałkowice, ul. Jeziorna 5, 43-230 Goczałkowice-Zdrój

że do badania testów istotności niezbędne były założenia o rozkładzie badanej cechy. Niestety, w wielu przypadkach hipoteza o normalności badanych rozkładów została odrzucona, co uniemożliwiało zastosowanie wygodnych (często wykorzystywanych) i stosunkowo precyzyjnych testów opartych na tym założeniu. W większości przypadków badanych hipotez statystycznych oraz przy obliczaniu korelacji pomiędzy wskaźnikami jakości wody użyto ich nieparametrycznych odpowiedników. Przyjęto założenie, że jeśli podzbiór danych choćby w przypadku jednej cechy nie spełniał założenia o normalności rozkładu, to we wszystkich przypadkach wskaźników używano odpowiedników nieparametrycznych, aby wyniki były porównywalne.

Omówiono rozstrzygnięcia przede wszystkim testów istotności z hipotezą, że średnia wartość wskaźnika jakości wody z jednej populacji jest równa średniej wartości wskaźnika z innej populacji, przy czym populacja charakteryzowana była w każdym przypadku przez różne wartości cechy różnicującej (rodzaj punktu pomiarowego, rodzaj zakwitu, pora roku). Użyto w takich przypadkach testu rang U Manna-Whitney'a dla dwóch prób niezależnych. W przypadku dużych prób stosowano test z należącego do grupy testów t-Studenta. Przy porównywaniu większej liczby populacji zastosowano test Kruskala-Wallisa. Rang użyto także do określenia siły korelacji pomiędzy wskaźnikami przy zadanych warunkach wykorzystując współczynnik korelacji Spearmana.

Wyniki

Każdemu pomiarowi wartości wskaźnika jakości wody z Jeziora Goczałkowickiego można przyporządkować pewną liczbę atrybutów, którymi były czas pomiaru, usytuowanie punktu pomiarowego w obrębie zbiornika, głębokość poboru próbki wody oraz zakwit fitoplanktonu lub jego brak. Ze względu na głębokość poboru próbki wody wszystkie badane wskaźniki jakości wody istotnie różniły się w grupie punktów pomiarowych usytuowanych przy powierzchni lustra wody (punkty P) od grupy punktów pomiarowych usytuowanych na głębokościach 2 m i 6 m (punkty G) w tym samym czasie (dotyczyło to pomiarów zarówno przy braku zakwitu, jak i podczas zakwitu) (tab. 1). Tak mocna odpowiedź spowodowała, że w pozostałych testach osobno analizowano wyniki z punktów pomiarowych G i P. W przypadku każdego ze wskaźników (nie sprawdzono testu w przypadku chlorofilu *a* ze względu na niewielką liczbę pomiarów tego wskaźnika w punktach P) zastosowano test z, a ponadto wyniki sprawdzono nieparametrycznym testem U Manna-Whitney'a. Badając jednorodność punktów pomiarowych w obrębie grupy P przeanalizowano, że w przypadku wszystkich wskaźników jakości wody (z wyjątkiem żelaza) nie stwierdzono zróżnicowania wartości średnich ze względu na usytuowanie punktu pomiarowego. W przypadku żelaza wyodrębniono trzy grupy istotnie różniące się między sobą – grupę punktów pomiarowych położonych w północnej i wschodniej części zbiornika (pięć punktów pomiarowych z najniższymi średnimi), punkty pomiarowe położone w okolicy przepompowni Zarzeczce i przy ujściu Bajerki oraz punkt usytuowany w cofce Wisły z maksymalną średnią zawartością żelaza. Omawiając podobnie badanie jednorodności punktów pomiarowych w obrębie grupy G należy zaznaczyć, że do tej grupy należały cztery punkty pomiarowe, z czego najwięcej pomiarów realizowano z brzegu na głębokości 6 m w punkcie usytuowanym nieopodal ujęcia wody i jedynie te wielkości

Tabela 1. Średnie wartości wskaźników jakości wody (g/m³) w Jeziorze Goczałkowickim oraz test równości średnich ze względu na rodzaj punktu pomiarowego
Table 1. Average water quality parameter values (g/m³) in Lake Goczałkowickie and mean value equality test related to the type of measuring station

Wskaźnik	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Liczebność próby
punkty pomiarowe G			
Chlorofil <i>a</i>	0,016	0,016	112
Żelazo	0,272	0,132	195
Mangan	0,161	0,124	200
Azot amonowy	0,256	0,168	172
Azotany	2,521	2,288	178
Azotyny	0,054	0,036	178
Tlen rozpuszczony	8,82	2,72	156
Ortofosforany	0,113	0,060	153
Fosfor ogólny	0,088	0,038	194
punkty pomiarowe P			
Chlorofil <i>a</i>	0,020	0,022	3
Żelazo	0,219	0,153	245
Mangan	0,176	0,127	226
Azot amonowy	0,124	0,118	230
Azotany	0,539	0,784	249
Azotyny	0,031	0,038	249
Tlen rozpuszczony	9,08	1,53	249
Ortofosforany	0,101	0,075	193
Fosfor ogólny	0,140	0,177	228

były średnimi arytmetycznymi z czterech do pięciu pomiarów w danym miesiącu. Pomiar wartości wskaźników jakości wody w pozostałych trzech punktach należących do grupy G były nieliczne i badane tylko w miesiącach późnowiosennych i letnich. Celem sprawdzenia, czy wartości wskaźników jakości wody zmierzone w punkcie usytuowanym nieopodal ujęcia mogą być reprezentatywne w grupie punktów G, przeprowadzono dwa warianty testu Kruskala-Wallisa. W pierwszym przypadku wzięto pod uwagę wszystkie dane pomiarowe. Wystąpiło wówczas zróżnicowanie średnich wartości takich wskaźników, jak azotyny i tlen rozpuszczony oraz fosfor ogólny. Jednakże w zawiązaniu do pomiarów w tych samych miesiącach we wszystkich punktach G istotne różnice wystąpiły już tylko w przypadku wskaźników tlenowych. W związku z tym wykazano brak podstaw do odrzucenia hipotezy, że punkt pomiarowy usytuowany przy ujściu wody może reprezentować wszystkie punkty należące do grupy G (nie dotyczyło to wskaźników tlenowych).

Biorąc pod uwagę zasadniczy cel niniejszej pracy zadano pytanie, czy średnie wartości wskaźników w okresach bez zakwitu fitoplanktonu były takie same jak podczas zakwitu. W tym celu przeprowadzono test równości średnich przy założeniu podziału danych na okresy braku zakwitu oraz zakwitu sinic, zielenic i okrzemek (cztery grupy) (tab. 2). Analizując dane z punktów pomiarowych należących do grupy G stwierdzono, że test równości średnich należy odrzucić w przypadku wszystkich wskaźników, natomiast analiza danych z punktów pomiarowych należących do grupy P nie dała podstaw do odrzucenia hipotezy o równości średnich zawartości fosforu ogólnego,

Tabela 2. Test równości średnich ze względu na rodzaj zakwit
Table 2. Mean value equality test related to the type of bloom

Wskaźnik	Wartości średnie			
	0, o, z, s	0, o	0, z	0, s
punkty pomiarowe G				
Chlorofil a	≠	=	=	≠
Żelazo	≠	=	≠	≠
Mangan	≠	=	≠	≠
Azot amonowy	≠	=	=	≠
Azotany	≠	=	≠	≠
Azotyny	≠	=	=	≠
Tlen rozpuszczony	≠	≠	≠	≠
Ortofosforany	≠	≠	=	=
Fosfor ogólny	≠	=	≠	≠
punkty pomiarowe P				
Chlorofil a	–	–	–	–
Żelazo	≠	≠	≠	≠
Mangan	≠	≠	≠	≠
Azot amonowy	≠	≠	≠	=
Azotany	≠	≠	=	≠
Azotyny	≠	=	≠	≠
Tlen rozpuszczony	≠	=	=	≠
Ortofosforany	=	=	=	=
Fosfor ogólny	=	=	=	=

0 – brak zakwit
o – zakwit okrzemek, z – zakwit zielenic, s – zakwit sinic
= – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy
≠ – hipotezę należy odrzucić

a w przypadku ortofosforanów statystyka testowa dała wynik na pograniczu decyzji odrzucenia hipotezy o równości średnich w obu grupach. Analizując poszczególne typy zakwitów stwierdzono jednak, że wartości średnie pewnych wskaźników podczas zakwitów nie zawsze różniły się od tych wartości w okresach bez zakwitów (test U Manna-Whitney'a) (tab. 2).

Warto podkreślić, że zakwit sinic najbardziej wpływał na zmianę jakości wody. Liczbowe wartości średnich wskaźników jakości wód pogrupowanych ze względu na rodzaj zakwitów zamieszczono w tabeli 3.

Ze względu na fakt, że w Jeziorze Goczałkowickim zakwit sinic obserwowano w lecie, podczas gdy zakwit zielenic i okrzemek pojawiały się w różnych porach roku, przeanalizowano sezonowe zmiany wartości poszczególnych wskaźników jakości wody (tab. 4). Większość wartości wskaźników miała istotne zróżnicowanie sezonowe, jedynie azot amonowy i azotyny nie wykazywały istotnych zmian ze względu na porę roku. Zmiany sezonowe były charakterystyczne w przypadku wody całego zbiornika (dotyczyło to zarówno punktów pomiarowych G, jak i P).

Zbadano także, czy zakwit fitoplanktonu wpływał na związki korelacyjne pomiędzy badanymi wskaźnikami jakości wody. Sześć tablic korelacji „wskaźnik–wskaźnik” w punktach pomiarowych G i P oraz w przypadku danych wyselekcjonowanych zależnie od warunków (brak zakwitów, zakwit i zakwit latem) zamieszczono łącznie w tabeli 5. Brak wartości oznaczał korelację nieistotną. Można zauważyć, że w wielu przypadkach nieistotne wartości współczynnika korelacji Spearmana przy braku zakwitów stały się istotne podczas zakwitów. Ze względu na ekstremalne wartości wskaźników występujących latem, osobno zbadano grupę pomiarów letnich.

Tabela 3. Średnie wartości wskaźników jakości wody (g/m³) pogrupowane ze względu na rodzaj zakwit
Table 3. Mean values of water quality parameters (g/m³) grouped according to the type of bloom

Wskaźnik	Brak Zakwit	Okrzemki	Zielenice	Sinice
punkty pomiarowe G				
Chlorofil a	0,012	0,019	0,014	0,050
Żelazo	0,260	0,240	0,312	0,479
Mangan	0,141	0,122	0,237	0,435
Azot amonowy	0,250	0,203	0,288	0,436
Azotany	2,583	3,350	1,800	0,776
Azotyny	0,055	0,045	0,047	0,120
Tlen rozpuszczony	9,02	10,27	7,62	5,39
Ortofosforany	0,122	0,086	0,106	0,144
Fosfor ogólny	0,087	0,073	0,098	0,132
punkty pomiarowe P				
Chlorofil a	–	–	–	–
Żelazo	0,203	0,376	0,274	0,319
Mangan	0,166	0,234	0,202	0,269
Azot amonowy	0,119	0,143	0,177	0,147
Azotany	0,564	0,182	0,632	0,154
Azotyny	0,031	0,013	0,039	0,048
Tlen rozpuszczony	9,01	10,00	9,73	8,47
Ortofosforany	0,102*	0,073*	0,116*	0,076*
Fosfor ogólny	0,144*	0,092*	0,096*	0,175*

*różnice między średnimi nieistotne statystycznie

Tabela 4. Średnie wartości wskaźników jakości wody (g/m^3) pogrupowane ze względu na porę roku
 Table 4. Mean values of water quality parameters (g/m^3) grouped according to seasons

Wskaźnik	Zima	Wiosna	Lato	Jesień
punkt pomiarowy G				
Chlorofil a	0,008	0,020	0,019	0,017
Żelazo	0,249	0,236	0,312	0,282
Mangan	0,089	0,125	0,250	0,171
Azot amonowy	0,240*	0,237*	0,267*	0,274*
Azotany	3,966	4,441	1,104	1,139
Azotyny	0,047*	0,054*	0,059*	0,054*
Tlen rozpuszczony	11,37	10,32	6,98	8,08
Ortofosforany	0,105	0,083	0,118	0,143
Fosfor ogólny	0,074	0,070	0,100	0,104
punkt pomiarowy P				
Chlorofil a	–	–	–	–
Żelazo	–	0,165	0,240	0,187
Mangan	–	0,177	0,195	0,133
Azot amonowy	–	0,110*	0,133*	0,106*
Azotany	–	0,810	0,537	0,416
Azotyny	–	0,027*	0,034*	0,028*
Tlen rozpuszczony	–	8,41	9,35	8,69
Ortofosforany	–	0,082	0,092	0,129
Fosfor ogólny	–	0,096	0,140	0,157

*różnice między średnimi nieistotne statystycznie

Tabela 5. Powiązania korelacyjne wskaźników jakości wody w Jeziorze Goczałkowskim
 Table 5. Correlations between water quality parameters of Lake Goczałkowskie

$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	Zakwit	Chl. a	Fe	Mn	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	O_2	PO_4^{3-}	P
Fe	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	0,47	–	–	0,36	–	0,3	–
	1	0,29		0,58	–	–0,26	0,33	0,26	–	0,42
	1L	–		0,62	–	–	–	–	–	0,48
Mn	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	0,4	–	–	–	–	0,31	0,28
	1	–		0,5	–	0,27	–	–	–	–
	1L	–		0,48	–	–	–	–	–	–
NH_4^+	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	0,3	–	–	–	–	–	–
	1	–0,3		0,43	0,42	0,44	0,41	–	0,31	–
	1L	–		0,44	0,38	0,48	–	–	–	–
NO_3^-	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	–	–0,29	–	0,65	–	–	–0,31
	1	–		–0,26	–0,55	–	0,66	–	0,42	–
	1L	–		–	–	–	0,72	–	0,4	–
NO_2^-	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	0,26	–	0,33	0,51	0,32	0,31	–
	1	0,35		0,29	0,36	–	–	–	–	0,35
	1L	–		–	0,61	0,42	0,64	–	–	–
O_2	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	–	–0,42	0,41	0,39	–	–	–
	1	–		–0,26	–0,74	–	0,65	–0,3	–0,28	–
	1L	–		–	–0,64	–	–	–	–	–
PO_4^{3-}	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	0,3	0,27	–	–	–0,34	–	0,29
	1	–		0,26	0,36	–	–0,28	–	–0,5	–
	1L	–		–	0,5	–	–	–	–0,49	–
P	0	–	$\leftarrow G$ $P \rightarrow$	0,4	0,35	–	–0,42	–	–0,3	0,58
	1	–		0,52	0,6	0,32	–0,55	–	–0,59	0,49
	1L	–		–	0,44	–	–	–	–0,51	0,52

0 – brak zakwit, 1 – zakwit, 1L – zakwit latem, $\leftarrow G$ – punkty pomiarowe G, $\rightarrow P$ – punkty Pomiarowe P

Wiele różnic można także zauważyć porównując związki korelacyjne w przypadku pomiarów w punktach G i P. Przykładowo, silne ujemne korelacje pomiędzy tlenem rozpuszczonym a manganem w punktach G nie miały miejsca w punktach P. Wskaźnikami, które najczęściej korelowały z innymi były metale (żelazo i mangan) oraz biogeny (azotany i fosfor ogólny). W jakimś stopniu odzwierciedlały to wartości współczynników korelacji „wskaźnik–zakwit sinic” (tab. 6). Zmienną „zakwit sinic” przyjęto do obliczeń jako zmienną dwuwartościową (0 – brak zakwitów, 1 – wystąpił zakwit).

Tabela 6. Korelacje wskaźnik–zakwit sinic
Table 6. Water quality parameter–cyanobacteria correlations

Wskaźnik	Zakwit sinic	
	punkty G	punkty P
Chlorofil a	0,42	–
Żelazo	0,28	0,14
Mangan	0,36	0,15
Azot amonowy	0,26	0,02*
Azotany	–0,21	–0,13
Azotyny	0,3	0,19
Tlen rozpuszczony	–0,36	–0,14
Ortofosforany	0,02*	–0,11*
Fosfor ogólny	0,25	0,12*

*korelacje nieistotne

Dyskusja wyników

Wcześniejsze badania dowiodły, że biogeny w wodach Jeziora Goczałkowickiego w latach 1993–2009 występowały w sposób losowy i nie sposób wykazać trendu ich zmian [4]. Oznaczało to, że mogą mieć na nie wpływ nieregularnie odprowadzane zanieczyszczenia ze źródeł antropogenicznych oraz zjawiska pogodowe, takie jak wysokość opadów, powodujące wysokie lub niskie stany wody w zbiorniku, czy okresy wysokiej temperatury powietrza. Wiadomo również, że Jezioro Goczałkowickie jest zbiornikiem płytkim. Jego przeciętna głębokość wynosi 5,3 m, przy czym na przeważającej powierzchni nie przekracza ona 2 m, natomiast większa głębokość występuje w rejonie zapory. Powszechnie uważano, że jako zbiornik płytki, Jezioro Goczałkowickie podatne jest na falowanie na skutek działania wiatru, a w konsekwencji woda w nim jest dobrze wymieszana, przy czym stratyfikacja termiczna wody występuje jedynie zimą, gdy zbiornik jest zamrożony. Jednakże analiza statystyczna wyników pomiarów wskazuje, że teza o dobrym wymieszaniu wody w Jeziorze Goczałkowickim mogłaby być brana pod uwagę w zawężonym zakresie dotyczącym grupy punktów pomiarowych P, bowiem wszystkie analizowane średnie wartości wskaźników jakości wody pobranej z powierzchni lustra wody (z wyjątkiem żelaza), niezależnie od usytuowania punktu pomiarowego w strefie płytkiej czy w strefie przyzaporowej, nie wykazywały zróżnicowania. Zauważone zróżnicowanie średniej zawartości związków żelaza w punktach P wydaje się być istotne ze względu na bliskość źródeł zanieczyszczeń, takich jak Wisła z jej dominującym przepływem oraz małe lokalne dopływy z dużą ilością związków żelaza pochodzących z przepompowni Zarzecze i Frelichów [8] i rzeka Bajerka wraz z odciekami z rezerwatu torfowiskowego [9]. Pozostałe punkty pomiarowe tworzyły trzecią

grupę z najmniejszą ilością związków żelaza. Wyniki badań dotyczących grup punktów P i G nie były zgodne z tą tezą, bowiem średnie wartości wskaźników jakości wody różniły się istotnie w zależności od tego, czy woda była pobrana z warstwy przypowierzchniowej czy głębszej. Znane są mechanizmy i procesy, które mogą wpływać na zaobserwowane zróżnicowanie jakości wody z powierzchni i na różnych głębokościach. Na wartość danego wskaźnika jakości wody może mieć wpływ różna prędkość wody na różnych głębokościach oraz bliski kontakt lub jego brak z osadami dennymi. Równie silnie zaznaczyło się rozróżnienie chemizmu wód w okresach zakwitów fitoplanktonu i ich braku (tab. 2). Nie można też pominąć sezonowości zmian wskaźników jakości wody w Jeziorze Goczałkowickim. W niniejszej pracy wykazano istotne sezonowe zmiany wartości w wodzie zbiornika niektórych wskaźników, jak np. chlorofila a, azotanów, tlenu rozpuszczonego, ortofosforanów, fosforu ogólnego oraz manganu i żelaza (tab. 4). Niektóre z tych wyników były już przedmiotem badań w różnych zbiornikach zaporowych [10–12].

Wcześniejsze badania [1] wskazały, że wśród mineralnych form azotu w wodzie Jeziora Goczałkowickiego w latach 1988–1989 dominowały azotany. Zostało to potwierdzone również w latach 1994–2009. Zawartość azotanów w tym czasie była kilkadziesiąt razy większa niż azotynów, bądź azotu amonowego. Ponadto w wodzie Jeziora Goczałkowickiego w latach 1988–1989 zanotowano wzrost ilości azotanów w zimie i wczesną wiosną, natomiast spadek w lecie i jesienią [1]. Podobne zjawisko zaobserwowano w niniejszej pracy w rozważanym okresie (tab. 4). Wzrost ilości azotanów w zimie i wczesną wiosną zanotowano również w innych zbiornikach (Kozłowa Góra [10] i Czorsztyn [11]), natomiast w zbiorniku Siemianówka nie zauważono związku między porą roku i zawartością azotanów, jednak zaobserwowano wzrost ilości pozostałych mineralnych form azotu w czasie wiosennych roztopów i ich spadek w okresie wczesnoletnim [12]. Zmniejszenie ilości azotu w porze letniej powiązано z pierwszą fazą zakwitów glonów, kiedy to pierwiastek ten zostaje wbudowany w ich biomase [13]. W podobny sposób cykliczne wahania ilości azotanów w ciągu roku interpretowane są w pracy [14], w której stwierdzono, że latem zawartość azotanów była najmniejsza, ponieważ były one zużywane przez fitoplankton. W okresie jesiennym obumarły plankton opada na dno i ulega rozkładowi, uwalniając mineralne formy azotu. W zimie, kiedy ustaje produkcja biomasy, zawartość tego biogenu osiąga wartości maksymalne. W podobny sposób można interpretować zmiany ilości azotu w wodzie Jeziora Goczałkowickiego, gdyż w czasie zakwitów fitoplanktonu notowano trzykrotne zmniejszenie ilości azotanów (tab. 3). Obserwacja ta dotyczyła zarówno punktów pomiarowych G, jak i P. Zmniejszenie zawartości azotanów w wodzie Jeziora Goczałkowickiego może być również związane z niepełną nityfikacją azotu amonowego zachodzącą w warunkach zmniejszonej zawartości tlenu w wodzie. Ilustracją tego zjawiska mogą być korelacje między ilością tlenu rozpuszczonego i azotanów w punktach G (tab. 5). Podobnie można interpretować wzrost średniej zawartości azotynów podczas zakwitów sinic, przy zmniejszonej zawartości tlenu rozpuszczonego. Jednocześnie zauważyć można brak zmian sezonowych ilości azotynów, co tłumaczyć należy tym, że zakwit sinic nie przydarzają się każdego roku.

Najmniejsze średnie ilości ortofosforanów i fosforu ogólnego w wodzie Jeziora Goczałkowickiego zaobserwowano wiosną i zimą, a największe jesienią, natomiast

w zbiornikach Siemianówka [13] i Dobczyce [15] minimalną ilość fosforanów stwierdzono w lecie, zaś maksymalną w listopadzie i lutym. Badania dotyczące oceny stanu zanieczyszczenia wód azotanami oraz wpływu rolnictwa na ten stan w aspekcie wymogów tzw. dyrektywy azotanowej (Dyrektywa Rady 91/676/EWG z 12-12-1991) wskazały, że nadmierna eutrofizacja jezior i zbiorników leżących w zlewniach zagospodarowanych rolniczo powodowana jest głównie zawartością fosforu [16, 17]. Zaobserwowano, że czynnikiem decydującym o zakwicie sinic w Jeziorze Goczałkowskim były azotany (tab. 3), przy czym nie wydaje się, aby były nim fosforany, ze względu na kumulujące się duże ładunki fosforu dostarczane do zbiornika podczas zrzutów wód ze stawów rybnych hodowlanych. Jednakże wniosek ten powinien być zweryfikowany w dalszych badaniach.

Rozwój określonych organizmów obserwuje się na ogół zależnie od stosunku zawartości azotu do fosforu w wodzie. Przykładowo, przy stosunku N/P=5 zazwyczaj występuje rozwój sinic, a przy N/P=20 rozwój zielenic [5]. W Jeziorze Goczałkowskim w czasie najbardziej intensywnego rozwoju sinic w sierpniu 1994 r. stosunek N/P wynosił 6,3, natomiast w 2008 r. podczas wiosennego zakwitów zielenic był równy 21. W tych przypadkach sinice lub zielenice były organizmami dominującymi. Często proporcja ta nie jest tak oczywista, ponieważ zakwitom organizmów dominujących towarzyszył rozwój innych organizmów. Wiele okrzemek wymaga do swego wzrostu i rozwoju, oprócz mineralnych soli pokarmowych, także witamin lub wolnych aminokwasów. Okrzemki osiągają największą liczebność w wodach żyznych bogatych w związki organiczne [18]. Ze względu na warunki fizyczno-chemiczne panujące w wodach, najczęściej zakwitów sinic (*Cyanobacteria*) obserwowane są w lecie, podczas gdy zakwitów zielenic (*Chlorophyceae*) najczęściej notowane są późnym latem i wczesną jesienią, a okrzemek wiosną, zimą i późną jesienią [5]. Obserwację tę potwierdzono w niniejszych badaniach, przy czym dodatkowo zanotowano zakwitów zielenic trwające praktycznie cały rok po ciepłych latach (np. przełom 2007/2008).

Podczas zakwitów sinic i zielenic zaznacza się spadek zawartości tlenu rozpuszczonego w wodzie. W strefie fotycznej zbiornika mnożący się fitoplankton w warstwie powierzchniowej powoduje ograniczenie dopływu światła do głębszych poziomów wody i w konsekwencji następuje ustanie fotosyntezy i wydzielania tlenu. Pokrywa zakwitowa utrudnia również przenikanie do wody tlenu z powietrza [5]. Obumarła biomasa opada na dno, gdzie ulega rozkładowi, zużywając resztę tlenu zawartego w wodzie. W warunkach niedoboru tlenu niektóre pierwiastki (np. mangan) czy związki chemiczne (np. związane z niepełną nityfikacją amoniaku) migrują między osadami i wodą. Potwierdzają to obliczone korelacje tlen rozpuszczony–mangan w punktach pomiarowych G (tab. 5). Ujemna wartość korelacji rozumiana w taki sposób, że wraz ze spadkiem ilości tlenu rośnie zawartość manganu, może świadczyć o tym, że tlen jest czynnikiem lub jednym z czynników współuczestniczących w procesie migracji jonów z osadów do wody. Podobne wnioski wysnuto na podstawie wcześniejszych badań wody w Jeziorze Goczałkowskim [9, 19, 20]. Jednakże wyniki omawiane w niniejszej pracy, pochodzące z dłuższego czasu, wykazały silniejsze korelacje w okresie letnim. Dodatkowo zauważono, że w czasie zakwitów wartość współczynnika korelacji między tlenem i manganem była jeszcze większa. Mniejsza była również w warunkach

zakwitów sinic zawartość tlenu w wodzie w strefie przydennej, co najprawdopodobniej prowadziło do bardziej intensywnej migracji manganu z osadów do wody. Przydenny charakter tego zjawiska potwierdza fakt, że korelacje tlen rozpuszczony–mangan w punktach pomiarowych P nie były istotne.

W wodach naturalnych związki żelaza i manganu współwystępują zazwyczaj w stosunku od 5:1 do 10:1, natomiast w wodzie Jeziora Goczałkowskiego stosunek ten wynosił 2:1 w punktach pomiarowych G oraz 1,25:1 w punktach P, co było spowodowane zanieczyszczeniami antropogenicznymi. Wykazano korelację pomiędzy zawartością żelaza i manganu w wodzie Jeziora Goczałkowskiego w całym czasie obserwacji, zwłaszcza silna korelacja wystąpiła podczas zakwitów fitoplanktonu w punktach pomiarowych P (tab. 5). W pracy [21] stwierdzono, że wzrost zawartości związków żelaza w wodzie może być jedną z przyczyn zakwitów sinic. W wodzie Jeziora Goczałkowskiego zachodziła istotna korelacja między zakwitami sinic a ilością związków żelaza (tab. 6). Korelacja ta była jednak słaba, więc w tym przypadku wzrost ilości żelaza nie był równoznaczny z zagrożeniem zakwitami sinic.

Zachodziła również korelacja między zakwitami sinic a zawartością azotanów (tab. 6), co przypuszczalnie było związane z procesem nityfikacji zachodzącym w wodzie. Podczas zakwitów sinic maleje zawartość tlenu w wodzie (tab. 3 i 6), co może spowodować, że proces nityfikacji zatrzyma się na etapie azotanów, powodując tym samym zwiększenie ich zawartości w wodzie. Ponadto w czasie zakwitów sinic i zielenic zachodziła korelacja między azotem amonowym i zawartością związków żelaza w punktach pomiarowych G (tab. 5). Spadek zawartości tlenu rozpuszczonego w wodzie zbiornika podczas zakwitów sinic może powodować pozostanie w wodzie większej ilości azotu amonowego, ponieważ w warunkach niedoboru tlenu utrudniony jest proces nityfikacji. Potwierdza to obliczona zawartość azotu amonowego w wodzie Jeziora Goczałkowskiego (tab. 3). Ponadto w przypadku silnego niedoboru tlenu jony żelaza przechodzą z osadów do wody. Małą wartością współczynnika korelacji pomiędzy tlenem rozpuszczonym a żelazem w stosunku do związku korelacyjnego pomiędzy tlenem rozpuszczonym a manganem można tłumaczyć tym, że żelazo tworzy związki mniej ruchliwe niż mangan [22].

Jezioro Goczałkowskie podobnie jak większość zbiorników zaporowych, jest podatne na eutrofizację, dlatego bardzo ważne jest dalsze wyjaśnianie procesów w nich zachodzących. Należy podkreślić, że przy tak dużej zawartości biogenów, jak ma to miejsce w środowisku wodnym Jeziora Goczałkowskiego, wystarczą jedynie sprzyjające warunki klimatyczne, aby doszło do dominacji sinic. Część sinic wytwarza substancje silnie toksyczne (hepatotoksyny, neurotoksyny, cytotoxyny i dermatotoksyny), na które dużą wrażliwość wykazują hydrobionty i konsumenci wody, dlatego ochrona Jeziora Goczałkowskiego wymaga wyraźnego ograniczenia dopływu biogenów.

Wnioski

♦ Przyczyn zakwitów sinic i wzrostu trofii wody w Jeziorze Goczałkowskim należy upatrywać w biogenach pochodzenia antropogenicznego. W wodzie zbiornika zachodziły istotne sezonowe zmiany ilościowe takich wskaźników jakościowych, jak chlorofil *a*, azotany, tlen rozpuszczony, ortofosforany, fosfor ogólny oraz żelazo i mangan.

♦ Największe ilości ortofosforanów i fosforu ogólnego występowały jesienią, co było prawdopodobnie spowodowane odprowadzaniem wody z hodowlanych stawów rybnych, natomiast największa zawartość azotanów występowała w okresie roztopów (pod koniec zimy i wczesną wiosną), co wskazuje na rolnicze źródło ich pochodzenia.

♦ Najmniejsza zawartość tlenu rozpuszczonego w wodzie zbiornika występowała podczas letnich zakwitów fitoplanktonu, podczas których obserwowano zwiększone ilości azotu amonowego i azotanów, a zmniejszone azotanów, co można wiązać z niepełnym przebiegiem procesu nitrifikacji.

♦ Stwierdzono ujemną korelację między tlenem rozpuszczonym i manganem, co najprawdopodobniej wynikało z przechodzenia jonów manganu z osadów do wody. Korelacja ta była najsilniejsza podczas zakwitów.

Autorzy składają podziękowania Pani Mirosławie Gmur za hydrobiologiczną analizę danych.

LITERATURA

1. H. BUCKA, R. ŻUREK, H. KASZA: The effect of physical and chemical parameters on the dynamics of phyto- and zooplankton development in the Goczałkowice Reservoir. *Acta Hydrobiologica* 1993, Vol.35, No. 2, pp. 133–151.
2. H. KASZA: Antropopresja a rozwój trofii wody w zbiornikach zaporowych. Mat. konf. „Biologiczne aspekty funkcjonowania zbiorników zaporowych”, Akademia Rolnicza w Lublinie, Lublin 1999.
3. A. CZAPLICKA-KOTAS, A. SZOSTAK, R. KOCWA-HALUCH: Eutrofizacja wód Goczałkowickiego Zbiornika Wodnego. *Gospodarka Wodna* 2005, nr 12, ss. 490–495.
4. M. PIĘTA, A. CZAPLICKA-KOTAS, A. SZOSTAK, Z. ŚLUSARCZYK: Zmiany trofii wód Zbiornika Goczałkowice w latach 1956–2009. *Gospodarka Wodna* 2011, nr 7, ss. 278–284.
5. T. BEDNARZ, S. STARZECKA, G. MAZURKIEWICZ-BOROŃ: Procesy mikrobiologiczne towarzyszące glonowym i sinicowym zakwitom wody. *Wiadomości Botaniczne* 2002, nr 1/2, ss. 45–55.
6. I. ZIMOCH, A. SZOSTAK, A. GAWLIK, M. CZECHOWSKI: Zakład Produkcji Wody Goczałkowice w aspekcie nowych wdrożeń technologicznych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań 2004, ss. 751–762.
7. B. KOŁWZAN, W. KOŁWZAN, A.M. DZIUBEK, G. PASTERNAK: Statistical approach to assessing groundwater pollution from gasworks. *Environment Protection Engineering* 2011, Vol. 37, No. 1, pp. 119–126.
8. E. SZALIŃSKA, A. KOPERCZAK, A. CZAPLICKA-KOTAS: Badania zawartości metali ciężkich w osadach dennych dopływów Jeziora Goczałkowickiego. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 21–25.
9. A. CZAPLICKA-KOTAS, Z. ŚLUSARCZYK, J. ZAGAJSKA, A. SZOSTAK: Analiza zmian zawartości jonów wybranych metali ciężkich w wodzie Jeziora Goczałkowickiego w latach 1994–2007. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 4, ss. 51–56.
10. I. ZIMOCH, B. FALKUS: Ocena stanu eutrofizacji Zbiornika Kozłowa Góra. *Gaz woda i Technika Sanitarna* 2003, nr 10, ss. 373–376.
11. J. RACZAK: Dostawa substancji biogenych do Zbiornika Czorszyńskiego. *Gospodarka Wodna* 2002, nr 5, ss. 205–209.
12. J. SZCZYKOWSKA, A. SIEMIENIUK, J. LESZCZYŃSKI: Ocena stanu zanieczyszczenia związkami biogennymi wód zbiornika zaporowego Siemianówka. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań 2004, t. II, ss. 387–394.
13. J. SZCZYKOWSKA, A. SIEMIENIUK: Symptomy eutrofizacji w zbiorniku zaporowym Siemianówka. W: Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2005, vol. 30, ss. 919–928.
14. M. JANOSZ-RAJCZYK: Wybrane procesy jednostkowe w inżynierii środowiska. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
15. G. MAZURKIEWICZ-BOROŃ: Czynniki kształtujące procesy eutrofizacyjne w podgórskich zbiornikach zaporowych. *Supplementa ad Acta Hydrobiologica* 2002, vol. 2, ss. 1–68.
16. M. PODEDWORNA, M. MARCINIEWICZ: Eutrofizacja wód. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2004, nr 7–8, ss. 275–278.
17. W.P. BALCERZAK, S.M. RYBICKI: Ocena stopnia zagrożenia wody eutrofizacją na przykładzie zbiornika zaporowego w Świnnej Porębie. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 67–69.
18. T. BEDNARZ: Samożywność glonów. W: Encyklopedia Biologiczna. T. 9. OPRES, Kraków 2000, ss. 300–301.
19. A. CZAPLICKA-KOTAS, A. SZOSTAK: Mangan i żelazo w wodach zbiornika Goczałkowice i jego dopływach. *Gospodarka Wodna* 2006, nr 12, ss. 466–469.
20. A. CZAPLICKA-KOTAS, E. SZALIŃSKA, A. SZOSTAK, Z. ŚLUSARCZYK: Mangan w wodach zbiornika Goczałkowice i jego dopływach. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2007, nr 1, ss. 14–17.
21. A.K.M. KABZIŃSKI: Zakwity sinicowe. *Aura* 2006, nr 7, ss. 6–8.
22. D. CHAPMAN [Ed.]: Water Quality Assessments. E & FN Spon, London 1998.

Czaplicka-Kotas, A., Slusarczyk, Z., Pieta, M., Szostak, A. Analysis of Relations Between Water Quality Parameters of Lake Goczałkowickie with Regard to Phytoplankton Blooms. *Ochrona Srodowiska* 2012, Vol. 34, No. 1, pp. 21–27.

Abstract: Statistical relations between the water quality parameters were determined based on the analysis of ammonia nitrogen, nitrite, nitrate, orthophosphate and total phosphorus concentrations observed in Lake Goczałkowickie (impounding reservoir) over the period of 1994–2009. Measuring stations were divided into two groups: those located on the surface of the lake water and those situated at the depth of 2 m and 6 m. The mean value equality test verified that at either of the two depths the values of the water quality parameters measured during blooms of diatoms, cyanobacteria and green algae were different from the

values of these parameters measured over the period without blooms. When water samples were taken from the surface of the lake, significant differences in the values measured during blooms and the lack thereof were observed with ammonia nitrogen, nitrites and nitrates. The water quality parameters examined exhibited significant differences in their seasonal patterns, except ammonia nitrogen and nitrites, which did not show any significant seasonal variations. The study revealed that phytoplankton bloom affected the correlation between the water quality parameters tested. In many instances, Spearman correlation coefficient values that were insignificant in the absence of blooms became significant when blooms were present.

Keywords: Lake Goczałkowickie, phytoplankton blooms, seasonal variations, ammonia nitrogen, nitrite, nitrate, orthophosphate, total phosphorus, correlations.