

Seweryn Gołowin
Andrzej Szykowski

WPLYW SPOSOBU RETENCJI NA SYMPTOMY EUTROFIZACJI I JAKOŚĆ WÓD

Dla racjonalnego wykorzystania skąpych zasobów wodnych kraju niezbędna jest retencja wód, umożliwiająca w okresach niedoboru wody wykorzystywanie zapasów zgromadzonych w okresach występującego ich nadmiaru, a tym samym zapewniająca większą równomierność w zaopatrzeniu w wodę różnych dziedzin gospodarki, poprzez zmniejszenie bezpośredniej zależności zaopatrzenia od aktualnych (chwilowych) warunków meteorologicznych i hydrologicznych.

W celu zapewnienia możliwości wykorzystania retencjonowanych zasobów wodnych zgodnie z ich przeznaczeniem, a szczególnie w przypadku, gdy mają one służyć zaopatrzeniu w wodę do celów komunalnych, muszą być spełnione odpowiednie warunki retencji gwarantujące utrzymanie ich jakości na wymaganym poziomie. Spełnienie tych warunków jest zadaniem trudnym, gdyż wody stojące są szczególnie wrażliwe i podatne na degradację ze względu na swoiste procesy w nich zachodzące.

Procesem, który w głównej mierze zagraża wodom stojącym jest eutrofizacja, której skutki mają wtórne znaczenie i wpływ na jakość wód. Proces eutrofizacji, jego przebieg, nasilenie, symptomy i skutki zależne są od wielu współdziałających czynników, z których każdy w zależności od konkretnych warunków może wywierać bardziej lub mniej istotny wpływ. Przyjmuje się, że głównym czynnikiem warunkującym proces eutrofizacji jest obciążenie mas wodnych substancjami biogennymi, głównie azotem i fosforem. Przebieg nasilenia tego procesu wraz z jego objawami i skutkami jest funkcją obciążenia tymi dwoma pierwiastkami, zależną od warunków retencji, z których najbardziej istotne znaczenie odgrywa głębokość zbiornika i czas retencji (wymiana) wód.

Do oceny stanu troficznego mas wodnych można zastosować m.in. indeksy Carlsona [2] i Walkera [5], opierające się na dokonanych pomiarach stężeń fosforu i chlorofilu. Indeksy te są wygodne do stosowania, gdyż wykorzystują oznaczenia z reguły wykonywane w badaniach jezior, a przy tym opierając się na przyczynie (stężenie fosforu) i skutku (rozwój fitoplanktonu mierzony stężeniem chlorofilu) dają możliwość liczbowej oceny reakcji mas wodnych w danych warunkach retencji na dane warunki troficzne. Jak wykazały wyniki badań zbiornika Lubachów, zastosowanie indeksów trofii i wskaźnika dynamiki wymiany wody, przy konstrukcji równania prognozującego stężenie chlorofilu przy danej zawartości fosforu, dają dużą zgodność wyników obliczeń ze stanem faktycznym [3].

Celem niniejszej pracy jest konfrontacja założeń wypracowanych przy realizacji PR-7 z wynikami

dotychczasowych badań zbiornika Lubachów oraz przeprowadzenie próby ich uogólnienia na podstawie wyników badań innych zbiorników zaporowych.

Teren i metodyka badań

Ocenę wpływu retencji na symptomy eutrofizacji i jakość wód dokonano na podstawie wyników badań zbiorników zaporowych różniących się właściwościami hydrologicznymi i obciążeniem substancjami biogennymi. Były to: zbiornik Lubachów na Bystrzycy w woj. wałbrzyskim, zbiornik Leśna i zbiornik Złotniki na Kwisie w woj. jeleniogórskim, zbiornik Słup na Nysie Szalonej w woj. legnickim i zbiornik Mietków na Bystrzycy w woj. wrocławskim. Dla tych zbiorników dokonano obliczeń bilansu wodnego w celu określenia wymiany ich wód [1]. Ponadto określono dynamikę wymiany wody, którą wyrażano krotnością wymiany, jaka nastąpiłaby w ciągu roku, gdyby średnie tempo wymiany w okresie miesiąca poprzedzającego dane badanie trwało cały rok.

Próbki wody w każdym zbiorniku pobierano na stanowisku zlokalizowanym ok. 100 m powyżej zapory z trzech głębokości: 0, 1, 3 m i dokonywano oznaczeń stężeń azotu całkowitego, fosforu całkowitego oraz chlorofilu. Jako wartości do obliczeń indeksów TSI (TP) i TSI (chl.) wg [2] przyjęto średnią arytmetyczną wyników uzyskanych z trzech głębokości. Szczegółowe zestawienia tabelaryczne zawarte są w opracowaniu CPBP 03.09.05.01 [4], natomiast w niniejszej pracy podano średnie wartości wskaźników uzyskane w trakcie prowadzonych badań.

Dyskusja wyników badań

Wśród sposobów oceny stopnia zeutrofizowania wód stojących znane są dwa indeksy stanu troficznego: TSI Carlsona i TSI Walkera. Są one szczególnie dogodnie w praktyce, ich zastosowanie nie wymaga skomplikowanej procedury badawczej, ponieważ opierają się na danych pomiarowych, które uzyskać można nawet w ramach prowadzonych rutynowo prac kontrolnych. Daje to możliwość stosunkowo łatwego zebrania obszernego materiału porównawczego. Ponadto ich zaletą jest fakt, że każdy z nich składa się z trzech odrębnie obliczanych elementów, z których jeden opiera się na stężeniu fosforu całkowitego TSI (TP), drugi na stężeniu chlorofilu TSI (chl.), a trzeci na przezroczystości wody mierzonej krążkiem Secchiego TSI (SD), i w ten sposób ujmuje przyczynę — zawartość (stężenie) fosforu oraz skutek — rozwój fitoplanktonu (mierzony stężeniem chlorofilu), a także objaw tego skutku — przezroczystość wody.

Dla oceny stanu zeutrofizowania, w szczególności małych zbiorników retencyjnych, wątpliwą wartość ma przezroczystość wody, gdyż wody dopływające po okresach silnych opadów wprowadzają z reguły znaczne ilości zawieszin powodujących zmętnienie retencjonowanych mas wodnych i wpływających na

zmniejszenie ich przezroczystości, nie związane z rozwojem fitoplanktonu. Dlatego też w rozważaniach przeprowadzonych w tej pracy pominięto ten element indeksu.

Obydwa wymienione indeksy są do siebie bardzo podobne, gdyż opierają się na takich samych założeniach, a różnią się jedynie procedurą obliczeniową. Dlatego też w pracy zastosowano indeks wg Carlsona [2]:

$$TSI(TP) = 10 \left(6 - \frac{\ln(48/TP)}{\ln 2} \right) \quad (1)$$

$$TSI(chl.) = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,68 \ln chl.}{\ln 2} \right) \quad (2)$$

gdzie:

TP — stężenie fosforu [mg/m³],
chl. — stężenie chlorofilu [mg/m³].

Do obliczeń indeksu troficznego TSI wykorzystano wyniki oznaczeń przeprowadzonych w okresie letnim w powierzchniowej warstwie wody zbiornika Lubachów w latach 1975/76 (roczny cykl badań) i w latach 1981÷1983 (dwuletni cykl badań). Zbiornik Lubachów wybrano z tego względu, że jest to zbiornik mały, o pojemności około 7 mln m³ i stąd ma mniejszą bezwładność, silniej reaguje na każdą zmianę warunków hydrologicznych, przez co łatwiej jest uchwycić na nim wpływ czasu retencji.

Założono, że jeśli układ równań (1) i (2) jest prawidłowy i jeśli istnieje zależność przyczynowa pomiędzy rozpatrywanymi dwoma elementami, tj. pomiędzy stężeniem fosforu i stężeniem chlorofilu oraz jeśli przebieg procesów w masie wodnej zbiornika nie jest zakłócony innymi czynnikami, to wówczas wskazania obydwu równań indeksu powinny być zgodne. To znaczy, że jeśli indeks TSI (TP) wskazuje na eutrofię, na eutrofię powinien wskazywać również wynik obliczeń TSI (chl.).

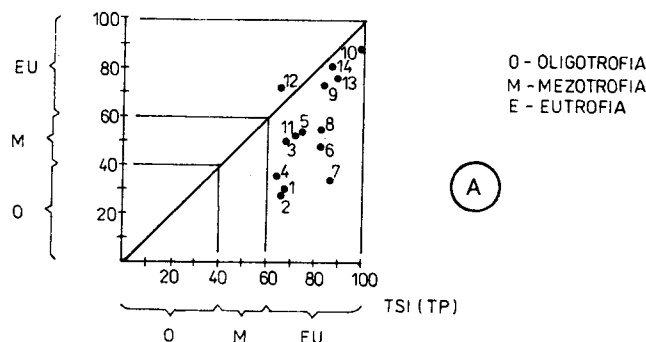
Celem sprawdzenia słuszności tego założenia na układ współrzędnych naniesiono obliczone wartości TSI (TP) i TSI (chl.) każdej próbki (rys. 1A). Przy ścisłej zgodności wskazań obydwu równań indeksu, punkty powinny ułożyć się wzdłuż przekątnej wykresu. W rzeczywistości, układ punktów dla rozpatrywanej zależności znacznie odbiega od położenia przekątnej. Wszystkie wartości TSI obliczone na podstawie stężeń fosforu znajdują się w obrębie eutrofii. Odpowiadające im wartości TSI obliczone na podstawie stężeń chlorofilu układają się zupełnie inaczej: temu samemu stanowi troficznemu, z 14 punktów mających określić tę zależność, odpowiada zaledwie 5 punktów (nr 9, 10, 12, 13, 14). Wartości TSI (chl.) 5 punktów (nr 3, 5, 6, 8, 11) odpowiadają mezotrofii, a pozostałych punktów (nr 1, 2, 4, 7) — oligotrofii.

Tak więc rozwój fitoplanktonu równoważny zawartości fosforu stwierdzono w 5 przypadkach, a badania z których pochodziły te wyniki, przypadły na okres lub bezpośrednio po okresie wybitnie zwolnionej wymiany wody w zbiorniku (rys. 1B). Największą rozbieżność wskazań, polegającą na najslabszym rozwoju fitoplanktonu w stosunku do aktualnej zawartości fosforu, stwierdzono w 4 przypadkach, z których 3 pochodziły z okresu lub bezpośrednio po okresie najbardziej nasilonej wymiany

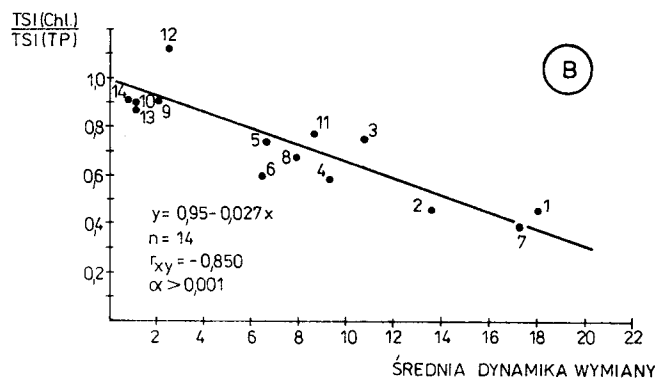
wody (próbki nr 1, 2, 7). To spostrzeżenie sugerowało, że w zbiorniku rozwój fitoplanktonu (mierzony stężeniem chlorofilu) w znacznej mierze warunkowany jest dynamiką wymiany wody.

Dla zbiornika, w którym procesy przebiegają w sposób niezakłócony zachodzi zgodność wskazań TSI (TP) i TSI (chl.). W takim przypadku stosunek TSI (chl.) / TSI (TP) powinien wynosić 1. Natomiast każde zakłócenie normalnego przebiegu procesów zachodzących w zbiorniku, powodujące osłabienie rozwoju fitoplanktonu, powoduje w konsekwencji stężenie chlorofilu niższe niż odpowiadające danemu stężeniu fosforu i w takim przypadku stosunek TSI (chl.) / TSI (TP) ≠ 1. W celu ustalenia w jakim stopniu dynamika wymiany wody (DWW) wywiera wpływ na rozwój fitoplanktonu, na układzie współrzędnych naniesiono wartości ilorazu TSI (chl.) / TSI (TP) i dynamikę wymiany wody w zbiorniku ustaloną dla każdej próbki (rys. 1B). Jako dynamikę wymiany wody (wskaźnik wymiany wody) przyjęto krotność wymiany, jaka nastąpiłaby w ciągu roku, gdyby średnie tempo wymiany zachodzące w miesiącu poprzedzającym badania trwało cały rok. Na wykresie tym punkty układają się w wyraźną zależność liniową osiagającą dla ilorazu TSI (chl.) / TSI (TP) wartość zbliżoną do 1, a więc zgodność wskazań TSI (chl.) i TSI (TP), przy wartości DWW mniejszej od 1. Oznaczałoby to, że rozwój fitoplanktonu, wynikający z funkcyjnej zależności stężeń chlorofilu od stężeń fosforu, osiagany jest przy średniej dynamice wymiany wody w miesiącu poprzedzającym pobór próbki, odpowiadającej rzadszej wymianie wody od jednokrotnej w roku. Przy

TSI (Chl.)



CARLSON



Rys. 1. Związek pomiędzy wzajemnym stosunkiem indeksów trofii (A) oraz jego relacją do średniej dynamiki wymiany wód (B) w zbiorniku Lubachów

zwiększającej się dynamice wymiany wody wartość ilorazu $TSI(chl.) / TSI(TP)$ proporcjonalnie zmniejsza się osiągając wartość 0,41 przy dynamice wymiany wody odpowiadającej 20-krotnej wymianie w ciągu roku. Oznaczałoby to, że jeśli w miesiącu poprzedzającym dany punkt czasowy, średnia wymiana wody w zbiorniku zachodziła w tempie odpowiadającym 20-krotnej wymianie w roku, wówczas $TSI(chl.)$ osiągnie zaledwie 41% wartości $TSI(TP)$. Przekształcenie wzorów Carlsona (1) i (2) do postaci:

$$\ln(TP) = 0,0693 TSI(TP) - 0,288 \quad (3)$$

$$\ln(chl.) = 0,1019 TSI(chl.) - 3,116 \quad (4)$$

umożliwia wykreślenie związku dla $TSI(TP)$ i stężenia całkowitego fosforu oraz $TSI(chl.)$ i stężenia chlorofilu (rys. 2).

W oparciu o rysunki 1 i 2 można przeprowadzić następujące rozważania:

Wiedząc jakie jest w wodzie stężenie całkowitego fosforu (TP) można przypuszczać, zgodnie z równaniem uzyskanym z przekształcenia równań (3) i (4):

$$\ln(chl.) = [\ln(TP) - 1,83] / 0,68 \quad (5)$$

jakiego stężenia chlorofilu należy się spodziewać przy niezakłóconym przebiegu procesów w masie

wodnej zbiornika. Jeśli stężenie TP wynosić będzie np. $0,1 \text{ g/m}^3$, należy spodziewać się takiego rozwoju fitoplanktonu, który spowoduje stężenie chlorofilu w wodzie równe $0,059 \text{ g/m}^3$ — obie wartości mieszczą się w obrębie eutrofii (rys. 2 linia przerywana 1). Wiedząc jaka była dynamika wymiany wody w okresie ubiegłego miesiąca, można przypuszczać jakie będzie rzeczywiste stężenie chlorofilu. Jeśli np. dynamika wymiany odpowiadała wartości 12, to (wg rys. 1B) można spodziewać się, że rzeczywista wartość $TSI(chl.)$ będzie stanowić 63% wartości $TSI(TP)$ odpowiadającej stężeniu $TP = 0,1 \text{ g/m}^3$. Można więc przypuszczać, że rzeczywista wartość $TSI(chl.)$ zamiast 70,6 wynosić będzie 44,5, a tej wartości $TSI(chl.)$ odpowiada stężenie chlorofilu równe $0,0041 \text{ g/m}^3$ (rys. 2 linia przerywana 2), co przy stężeniu TP odpowiadającym eutrofii daje stężenie chlorofilu w zakresie mezotrofii.

Dane liczbowe można również uzyskać po przekształceniu równania na rysunku 1B do postaci:

$$TSI(chl.) = TSI(TP) (0,95 - 0,027 DWW) \quad (6)$$

skąd po podstawieniu do równania (4) otrzymujemy:

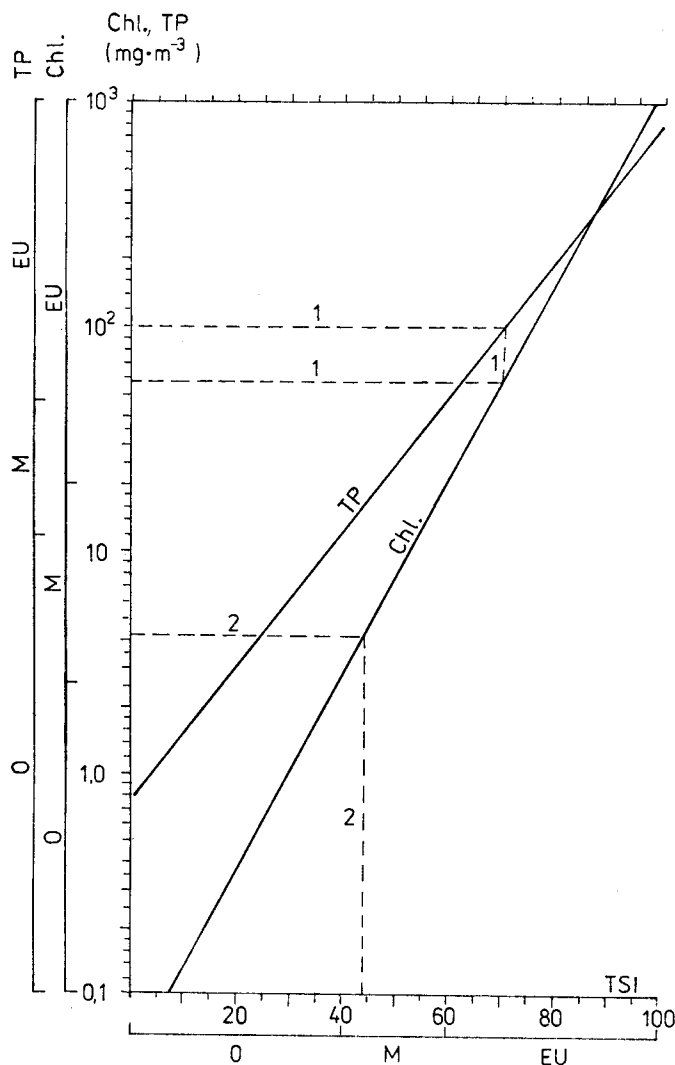
$$\ln(chl.) = [TSI(chl.) - 30,57] / 9,81 \quad (7)$$

co daje możliwość prognozowania stężeń chlorofilu z uwzględnieniem dynamiki wymiany wody.

Mając w wodzie stężenie $TP = 0,1 \text{ g/m}^3$ i nie chcąc w którymś punkcie czasowym dopuścić w wodzie zbiornika do silniejszego rozwoju fitoplanktonu niż równowaznego stężeniu chlorofilu $0,0041 \text{ g/m}^3$, należy przez miesiąc poprzedzający ten punkt czasowy spowodować dynamikę wymiany równoważną wartości 12, tj. w tym przypadku w ciągu miesiąca należy przeprowadzić wymianę wody w zbiorniku. Dla danego punktu czasowego można na tej podstawie prognozować prawdopodobne stężenia chlorofilu przy danym stężeniu TP i przy różnej dynamice wymiany wody w zbiorniku.

Weryfikację związku pomiędzy $TSI(chl.)/TSI(TP)$ a dynamiką wymiany wody, stanowiącego podstawę do oceny wpływu wody na rozwój fitoplanktonu, przeprowadzono na podstawie danych uzyskanych z badań pięciu zbiorników zaporowych różniących się właściwościami hydrologicznymi i obciążeniem substancjami biogennymi (tab. 1). W przypadku zbiornika Lubachów uzyskano potwierdzenie prawidłowości, co sugeruje kształtowanie rozwoju fitoplanktonu przez dynamikę wymiany wody oraz możliwość wpływu na zmianę jego wielkości sterowaniem wymiany wody w zbiorniku.

W pozostałych zbiornikach związek ten kształtował się w odmienny sposób (rys. 3). W przypadku Żłotnik i Leśnej, zbiorników o zbliżonej dynamice wymiany wody do zbiornika Lubachów, ale w znacznie mniejszym stopniu obciążonych fosforem, pierwiastek ten odgrywał główną rolę w ograniczaniu rozwoju fitoplanktonu, natomiast wpływ dynamiki wymiany wody był w tym przypadku odmienny niż w zbiorniku Lubachów i wraz ze wzrostem intensywności wymiany wody obserwowano tendencję wzrostu stosunku $TSI(chl.)/TSI(TP)$, co może być wynikiem uzupełniania z dopływem deficytowych związków fosforu. W dużych zbiornikach (Śluby i Mietków), o małej intensywności wymiany wody i dużym obciążeniu związkami azotu i fosforu, nie

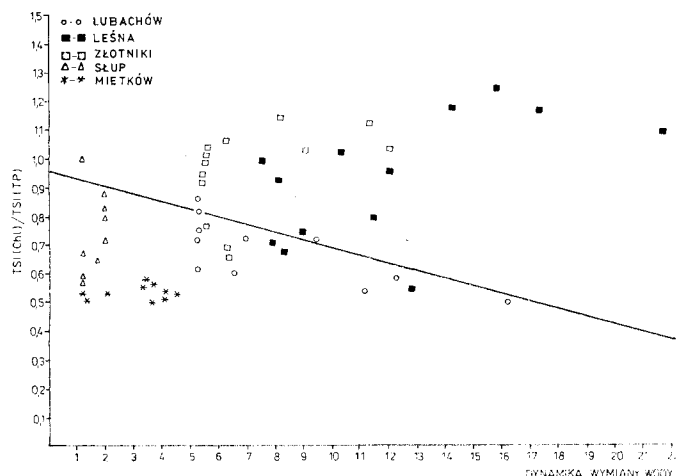


Rys. 2. Związek pomiędzy stężeniem fosforu całkowitego i chlorofilu a $TSI(TP)$ i $TSI(chl.)$ wg Carlsona

Tabela 1

Zestawienie parametrów hydrologicznych i średnich wartości wskaźników chemicznych i biologicznych badanych zbiorników

Zbiornik	Stężenie fosforu mg/m ³	Stężenie azotu mg/m ³	N : P	Stężenie chlorofilu mg/m ³	Dynamika wymiany wody	Objętość maks. mln m ³
Lubachów	289,3	2706	9,4	28,9	8,0	7,15
Leśna	60,8	2302	38,0	20,6	11,9	18,0
Złotniki	71,8	2432	34,0	27,4	7,1	12,4
Słup	106,9	2430	22,7	21,5	1,6	38,4
Mietków	601,9	6971	11,6	7,9	3,1	68,9



Rys. 3. Związek pomiędzy stosunkiem indeksów trofii a średnią dynamiką wymiany wód w badanych zbiornikach na tle ustalonej wstępnie zależności (linia ciągła)

stwierdzono wyraźnego związku stosunku obu indeksów z dynamiką wymiany wody (rys. 3).

Podsumowanie

W przypadku zbiornika Lubachów uzyskano potwierdzenie założonych na wstępie prawidłowości, co sugeruje kształtowanie rozwoju fitoplanktonu w głównej mierze przez dynamikę wymiany wody w zbiorniku oraz możliwość wpływu na zmianę jego wielkości. W pozostałych zbiornikach związek ten kształtował się w odmienny sposób, nie potwierdzając w pełni przyjętych na wstępie założeń. W Złotnikach i Leśnej, zbiornikach o dynamice wymiany wody zbliżonej do obserwowanej w zbiorniku Lubachów, jej wpływ był generalnie odwrotny i wraz ze wzrostem dynamiki wymiany wody stwierdzono wzrost wzajemnego stosunku indeksów trofii.

Układ ten wykazywał pewne zróżnicowanie w obydwu latach badań. W pierwszym roku przy większej dynamice wymiany wody obserwowano wysokie wartości stosunku indeksów trofii, natomiast w drugim przy jej obniżeniu, stwierdzono również zmniejszenie wartości tego stosunku. Przyczyn takiego stanu należy upatrywać w niewielkiej zasobności badanych zbiorników w związku fosforu, w głównej mierze odpowiedzialnych za rozwój fitoplanktonu. Intensywna wymiana wód zapewnia uzupełnienie deficytowych związków fosforu potrzebnych do roz-

woju glonów, natomiast jej obniżenie wiąże się z ograniczeniem dopływu fosforu i zużywaniem ładunku zawartego w zbiorniku, co prowadzi do ograniczenia rozwoju glonów. Wynika z tego, że w zależności od zasobności zbiornika w związku fosforu dynamika wymiany wody w odmienny sposób kształtuje rozwój fitoplanktonu.

W dużych zbiornikach o małej intensywności wymiany wody (w przypadku Mietkowa zasobnego w związku azotu i fosforu) nie stwierdzono związku stosunku indeksów trofii z dynamiką wód, natomiast w zbiorniku Słup, gdzie ze stosunku N : P można domniemywać, że fosfor pełnił rolę czynnika limitującego rozwój glonów, wraz ze wzrostem dynamiki wody zaznaczał się wzrost wzajemnego stosunku indeksów trofii, co może sugerować, że podobnie jak w przypadku Złotnik i Leśnej, niezbyt duży ładunek fosforu, bez uzupełnienia z zewnątrz jest szybko zużywany przez rozwijające się organizmy.

Z analizy danych wynika, że odmiennie wskazania indeksów troficznych wiążą się zarówno z limitującym działaniem fosforu jak i wpływem dynamiki wód na rozwój fitoplanktonu. O ile więc nie wydaje się możliwe skonstruowanie generalnej zależności mającej zastosowanie ogólne, to na bazie przeprowadzonej analizy można wnioskować, że w małych zbiornikach o optymalnym stosunku N : P zwiększenie dynamiki wymiany wody powoduje ograniczenie rozwoju fitoplanktonu, natomiast gdy fosfor jest czynnikiem limitującym — wzrost intensywności wymiany wód ma działanie przeciwnie. W dużych zbiornikach o małej wymianie wody rozwój fitoplanktonu w głównej mierze limitowany jest zasobnością w związku fosforu, a przy ich deficycie dopiero zaznacza się oddziaływanie dynamiki wody.

Obliczając indywidualnie dla każdego zbiornika typ zależności pomiędzy stosunkiem indeksów troficznych a dynamiką wymiany wody, można z przekształcenia równań TSI prognozować wielkość rozwoju fitoplanktonu oraz określić czynnik (obciążenie fosforem czy dynamika wymiany wody), którego sterowaniem można wpłynąć na zmiany jakości magazynowanej wody poprzez ograniczenie zakwitów glonów.

Praca została wykonana w ramach CPBP nr 03.09. „Metody analizy i użytkowania zasobów wodnych”.

LITERATURA

1. R. BUJOK, R. JANIKOWSKI: Wymiana wód w zbiornikach zaporowych na przykładzie Dzierżna Dużego i Tresnej. Arch. Ochr. Środowiska, 1980, 3—4. 89—93.
2. R. F. CARLSON: A trophic state index for lakes. Limnol. Oceanogr., 1977, 22, 2, 361—369.
3. S. GOŁOWIN: Influence of retention time on the Lubachów dam reservoir trophicity. Environment Protection Engng., 1986, No 2, 41—50.
4. S. GOŁOWIN, A. SZYKOWSKI: Wpływ sposobu retencji na symptomy eutrofizacji i jakości wód. Instytut Geofizyki PAN, Warszawa 1990 (nie publikowane).
5. W. WALKER: Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic index for lakes. Water Res., 1979, 6, 1463—1470.

EFFECT OF IMPOUNDMENT ON EUTROPHICATION SYMPTOMS AND WATER QUALITY

Investigated were five impoundment lakes of Lower Silesia, which differ in size and in the dynamics of water exchange (Lubachów, Mietków, Słup, Złotniki, Leśna). Factors inhibi-

ting the eutrophication process in those reservoirs were determined. The mathematical models derived make it possible to predict the rate of phytoplankton growth. They also enable determination of such a factor (e. g., phosphorus load or dynamics of water exchange) that — controlled adequately — provides water quality control by inhibition of algae bloom.