

Lilianna BARTOSZEK  
Piotr KOSZELNIK  
Janusz A. TOMASZEK  
Politechnika Rzeszowska

## OBCIĄŻENIE ZEWNĘTRZNE I RETENCJA FOSFORU W ZBIORNIKACH ZAPOROWYCH SOLINA-MYCZKOWCE

Praca zawiera wyniki bilansu masowego fosforu przeprowadzonego dla zbiorników zaporowych Solina-Myczkowce. Celem pracy było wyznaczenie obciążenia i retencji fosforu w tych zbiornikach. Wyliczone ładunki fosforu obciążające powierzchnię zbiorników przewyższały wartości uznawane za dopuszczalne. Retencja fosforu zachodziła głównie w zbiorniku Solina (20-46% ładunku), podczas gdy zbiornik Myczkowce sporadycznie eksportował niewielkie ładunki tego pierwiastka.

### 1. Wprowadzenie

Jakość wody w zbiornikach wodnych, a także zawartość w niej związków fosforu, jest w znacznym stopniu determinowana przez dopływy zewnętrzne. Do zbiorników wodnych związki fosforu dostają się różnymi drogami: z dopływem rzeczny, rzadziej ze spływem obszarowym, głównie z punktowymi zrzutami zanieczyszczeń w ściekach, a także z atmosfery i innych źródeł [22]. Brigault i Ruban [4] wykazali, że pośród źródeł allochtonicznego fosforu w zbiorniku Bort-Les-Orgues we Francji ok. 30% pochodziło z domowych lub przemysłowych ścieków, 60% zaś z rolnictwa.

W Polsce udział zanieczyszczeń powierzchniowych i punktowych wynosi odpowiednio ok. 40 i 60% ogólnego ładunku fosforu wprowadzanego do wód powierzchniowych [7]. Zewnętrzne obciążenie zbiornika związkami fosforu jest więc uzależnione od: wielkości obszaru zlewni, występowania i rodzaju punktowych źródeł zanieczyszczeń, ukształtowania powierzchni i charakterystyki geologicznej zlewni, sposobu użytkowania gruntów w zlewni, zawartości fosforu w opadzie atmosferycznym, charakteru roku hydrologicznego. Do zbiornika wodnego fosfor dociera w postaci mineralnych i organicznych związków rozpuszczonych w wodzie lub pozostających w zawiesinie (seston). Rozdział pomiędzy fazą rozpuszczoną a sestonową, warunkujący jego dalszą drogę w zbior-

niku, zależy od warunków klimatycznych, podłoża geologicznego i sposobu zagospodarowania zlewni oraz od sposobu użytkowania zbiornika [9, 19].

Związki fosforu dopływające do zbiorników ulegają częściowo wycofaniu z obiegu biologicznego, głównie poprzez sedimentację i częściowo przez kumulację w organizmach wodnych (zwłaszcza w makrofitach). Powoduje to zmniejszenie w sposób naturalny ilości fosforu w wodzie i zbiornik wytrzymuje pewien ładunek tego biogenu, nie ulegając eutrofizacji [10]. W wyniku różnicy pomiędzy sumarycznym ładunkiem fosforu doprowadzanym do zbiornika i z niego odprowadzanym (bilans masowy) uzyskuje się wielkość retencji fosforu w zbiorniku, która informuje o wpływie zbiornika na ładunek, i jego stężenie [13].

Celem pracy było wyznaczenie obciążenia fosforem powierzchni zbiorników Solina i Myczkowce oraz oszacowanie ilości fosforu ulegającego retencji w obu zbiornikach w latach 2005-2006.

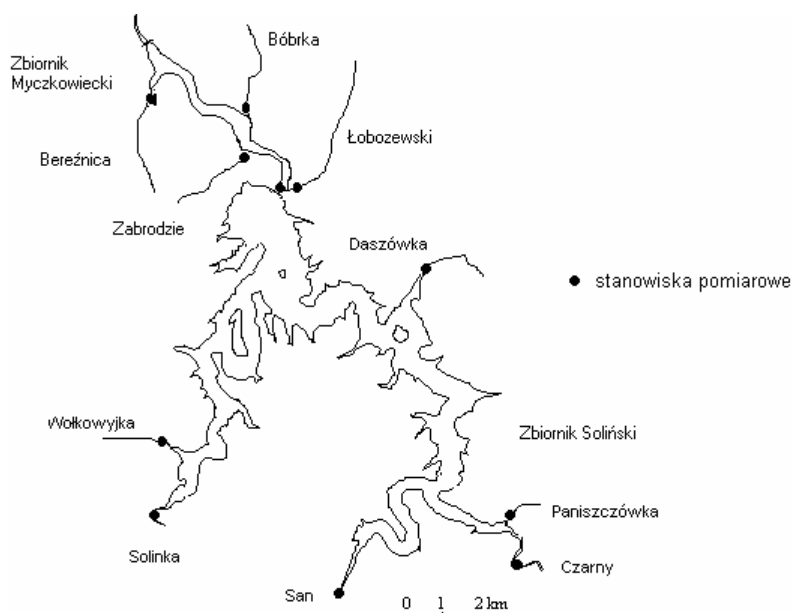
## 2. Teren i metodyka badań

Zbiornik Solina jest największym pod względem objętości, a także najgłębszym zbiornikiem zaporowym w Polsce. Wraz ze zbiornikiem Myczkowce stanowi kaskadę (rys. 1.), która jest elementem Zespołu Elektrowni Wodnych Solina–Myczkowce S.A. Kaskada zbiorników zaporowych Solina–Myczkowce to dwa bardzo różne zbiorniki pod względem parametrów morfometrycznych (tab. 1.). Głównym dopływem zbiornika Myczkowce są wody Sanu pochodzące z hypolimnionu zbiornika Solina (ponad 90%) [15, 23].

Tabela 1. Cechy morfometryczne kaskady zbiorników zaporowych Solina–Myczkowce

Parametr	Zbiornik Solina	Zbiornik Myczkowce
Powierzchnia [ha]	2200	200
Objętość maksymalna [mln m <sup>3</sup> ]	502	10
Głębokość średnia (maksymalna) [m]	22 (60)	5 (15)
Powierzchnia zlewni [km <sup>2</sup> ]	1174,5	1248
Czas zatrzymania wody [d]	155-273	2-6

Próbki wód pobierano w przyujściowych przekrojach rzek i potoków zasilających zbiorniki oraz z odpływów w okresie od stycznia 2005 do grudnia 2006 r. W przypadku trzech głównych dopływów (San, Solinka, Czarny) zbiornika Solina, przelewu pomiędzy zbiornikami oraz odpływu ze zbiornika Myczkowce pobrano 20 próbek wody z częstością co 4-6 tygodni. Ponadto 11-krotnie pobrano próbki wód z pięciu mniejszych dopływów obydwu zbiorników.



Rys. 1. Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych na dopływach zbiorników Solina i Myczkowce

W próbkach wody niesączonych oznaczano zawartość fosforu całkowitego ( $P_{\text{całk.}}$ ). W próbkach wody przesączonych przez sączki Whatmana GF/C oznaczano zawartość fosforu fosforanowego ( $P\text{-PO}_4^{3-}$ ). Analizę form fosforu w roztworach wodnych wykonano metodą kolorymetryczną, zgodnie z normą PN-EN 1189:2000. Do oznaczeń kolorymetrycznych wykorzystano spektrofotometry: PhotoLab S12 (WTW, Germany) oraz Aquamate (Thermo Spectronic, United Kingdom). Wartości dziennych przepływów ( $Q$ ) w analizowanych przekrojach, niezbędne do obliczenia ładunków dla trzech głównych dopływów oraz odpływów ze zbiorników, pozyskano z ZEW Solina–Myczkowce S.A. W przypadku mniejszych cieków  $Q$  obliczano w dniach pobranych próbek wody na podstawie wskazań zainstalowanych łat wodowskazowych. Ładunki poszczególnych pierwiastków obliczono dla każdego dnia okresu bilansowego dla Sanu, Solinki, Czarnego oraz odpływu z Soliny i Myczkowiec, przy znajomości wartości dziennego przepływu. Stężenia pomiędzy dniami pobrań obliczano, stosując metodę najmniejszych kwadratów [17]. W przypadku mniejszych dopływów ładunki kalkulowano w odniesieniu do dni pobrań. Wartości pomiędzy tymi punktami przybliżano metodą najmniejszych kwadratów [17].

### 3. Wyniki badań i dyskusja

Prowadzone od wielu lat badania [2, 3, 14] wykazały, że zbiorniki zaporowe Solina–Myczkowce są obciążone dużymi ładunkami fosforu, znacznie przekra-

czającymi wartości uznawane za niebezpieczne. W okresie od stycznia do grudnia 2005 r. całkowity ładunek fosforu dopływający do zbiornika Solina oszacowano na  $72 \text{ t rok}^{-1}$ , a do zbiornika Myczkowce  $48 \text{ t rok}^{-1}$ . W kolejnym okresie badań, tj. od stycznia do grudnia 2006 r., dopływający ładunek fosforu był nieco wyższy w przypadku zbiornika Solina –  $84 \text{ t rok}^{-1}$  i ponad 1,5-krotnie wyższy dla zbiornika Myczkowce –  $74 \text{ t rok}^{-1}$ . Całkowity ładunek fosforu mineralnego zasilający zbiornik Solina był dla obu okresów o połowę niższy i stanowił ok. 46-49% fosforu całkowitego w analizowanym czasie (tab. 2.).

Nieco inaczej przedstawiała się sytuacja w zbiorniku Myczkowce. W jednym roku udział ładunku fosforu mineralnego w ładunku fosforu całkowitego zasilającym zbiornik stanowił ok. 44%, a w kolejnym już tylko ok. 34%. Znacznie wyższy ładunek fosforu organicznego i zawiesinowego, dopływający do zbiornika wyrównawczego, mógł być wynikiem wysokich temperatur podczas upalnego lata 2006 r., a w związku z tym wynikiem intensywniej przebiegającego okresu wegetacyjnego w zbiorniku głównym, w porównaniu z rokiem poprzednim.

Tabela 2. Bilans masowy form fosforu w przypadku zbiorników zaporowych Solina–Myczkowce w latach 2005-2006

SOLINA [ $\text{t rok}^{-1}$ ]					
Bilansowy wskaźnik	Rok	Dopływ	Odpływ	Retencja	Eksport
Fosfor całkowity	2005	72	43	29 (40)*	–
	2006	84	67	17 (20)	–
Fosfor fosforanowy	2005	35	19	16 (46)	–
	2006	39	22	17 (44)	–
MYCZKOWCE [ $\text{t rok}^{-1}$ ]					
Fosfor całkowity	2005	48	51	–	3
	2006	74	77	–	3
Fosfor fosforanowy	2005	21	35	–	14
	2006	25	24	1 (4)	–

\* w nawiasach przedstawiono udział ładunku ulegającego retencji [%]

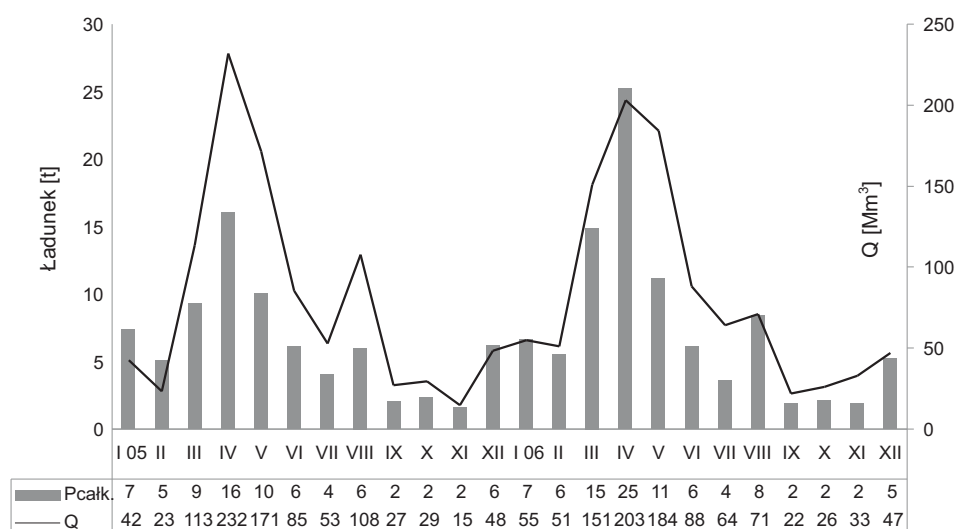
Średni ładunek hydrauliczny (tab. 3.) zasilający zbiornik Solina w tym czasie wynosił  $31,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  [15, 23]. Obserwowano charakterystyczną dla zbiorników strefy górskiej dużą rozpiętość wartości przepływów w rzekach zasilających zbiorniki. Pompowanie przez turbiny rewersyjne stanowiło zaledwie ok. 4,5% całkowitej ilości wód zasilających zbiornik Solina.

Według danych ZEW Solina–Myczkowce w okresach suszy źródło to może stanowić nawet 20% całkowitego zasilania [23]. Zmienność ładunku fosforu całkowitego dopływającego do zbiorników wraz z natężeniem przepływu (rys. 2.) potwierdza, że mimo większej czystości duże dopływy, takie jak San i Solinka, z uwagi na znacznie większe natężenie przepływu, mają decydujący

wpływ na poziom zanieczyszczenia wód w zbiornikach. Niewielkie potoki m.in. Bukowiecki, Wołkowyjka, Daszówka, choć zawierały analizowane związki fosforu w najwyższych stężeniach, dostarczały znacznie mniejszy ładunek, negatywnie wpływając na zanieczyszczenie tylko przyujściowych stref [2].

Tabela 3. Średnie wartości ładunków hydraulicznych [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \pm \text{SD}$ ] dopływających i odpływających ze zbiorników Solina i Myczkowce w latach 2005-2006

Dopływ naturalny do zbiornika Solina	Dopływ pompowy do zbiornika Solina	Odpływ turbinowy ze zbiornika Solina	Odpływ jałowy ze zbiornika Solina	Odpływ turbinowy ze zbiornika Myczkowce	Odpływ jałowy ze zbiornika Myczkowce
$31,4 \pm 42,0$	$1,5 \pm 3,9$	$31,2 \pm 35,1$	$0,0 \pm 0,0$	$24,7 \pm 17,3$	$6,7 \pm 30,0$



Rys. 2. Zmienność ładunku fosforu całkowitego dopływającego do zespołu zbiorników Solina–Myczkowce [t] wraz z natężeniem przepływu Q [ $\text{Mm}^3$ ] w latach 2005-2006

W latach 2005 i 2006 najwyższe ładunki fosforu całkowitego wprowadzane były do zbiorników Solina–Myczkowce wiosną (w kwietniu), równocześnie z maksymalnym miesięcznym ładunkiem hydraulicznym związanym z roztopami, a najniższe jesienią. Wiosna jest okresem o szczególnie dużej emisji fosforu rolniczego – pochodzenia obszarowego [16]. Do zbiornika czorszyńskiego największe ładunki fosforu były wprowadzane podczas śródzimowych roztopów (w lutym), natomiast najniższe podczas sezonu wegetacyjnego [18].

Zewnętrzne obciążenie zbiornika związkami biogennymi na jednostkę powierzchni stanowi ważną wskazówkę określającą jego trofię. Przy tak dużym ładunku fosforu dopływającym do akwenów obciążenie  $1 \text{m}^2$  powierzchni

zbiorników fosforem całkowitym wynosiło w pierwszym roku średnio  $9,13 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$  dla Soliny i  $66,10 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$  dla Myczkowiec, w kolejnym zaś roku  $10,65$  i  $101,40 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$ . Obciążenie takie było więc kilkakrotnie wyższe (zwłaszcza w przypadku zbiornika Myczkowce (tab. 4.)) od uznawanego według kryterium Vollenweidera za niebezpieczne [1].

Tabela 4. Obciążenie fosforem całkowitym zbiorników zaporowych Solina–Myczkowce i obciążenie niebezpieczne według modelu hydraulicznego Vollenweidera

Zbiornik	Rok	Obciążenie $P_{\text{całk}}$ [ $\text{mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ]	Obciążenie niebezpieczne wg Vollenweidera [ $\text{mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ]
Solina (średnia głębokość – 22 m)	2005	9,13	2,94
	2006	10,65	
Myczkowce (średnia głębokość – 5 m)	2005	66,10	18,56
	2006	101,40	

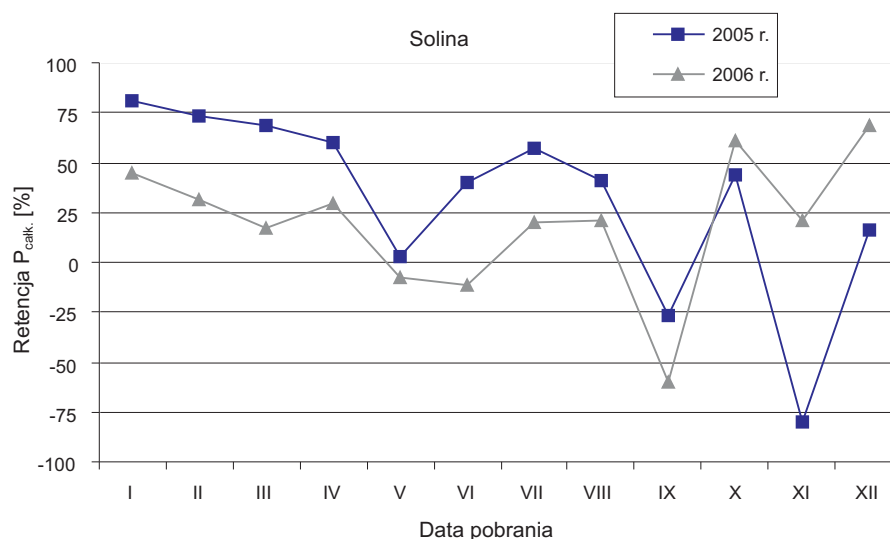
Źródło: opracowano na podstawie pracy [1].

Obciążenie fosforem przekraczające wielkości ocenione jako ładunek niebezpieczny występuje w przypadku większości zbiorników Polski, zwłaszcza zbiorników nizinnych [21]. Zewnętrzne obciążenie zbiornika sulejowskiego (średnia głębokość 3,4 m) fosforem całkowitym oceniono na  $86,48 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$  (1981 r.) i  $23,85 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$  (1984 r.). Niebezpieczne, określone przez Vollenweidera obciążenie zbiornika sulejowskiego zostało wielokrotnie przekroczone [5]. W latach 1995–1996 obciążenie zbiornika Sulejów oceniono na ok.  $30,47 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , a zbiornika Jeziorsko (średnia głębokość 4,8 m) na ok.  $27,29 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$ . W przypadku zbiorników o średniej głębokości nieprzekraczającej 5 m niebezpieczne obciążenie fosforem nie powinno przekraczać  $0,36 \text{ mgP m}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Zbiorniki Sulejów i Jeziorsko, podobnie jak inne polskie zbiorniki zaporowe, cechuje wysoki stopień trofii ze względu na znacznie większe ładunki biogenów ze zlewni, m.in. przez wysoki stosunek powierzchni zlewni do powierzchni zbiornika [6]. Coroczny dopływ biogenów ze zlewni zbiornika doboczyckiego, której powierzchnia jest 80-krotnie większa od powierzchni zbiornika, powodował silne obciążenie tego obiektu fosforem (wielokrotnie wyższe od tego uznawanego za niebezpieczne przez Vollenweidera) [20]. Goczałkowice zwykle przedstawia się jako przykład niezwykle szybkiej eutrofizacji. Od wielu lat jego wysoka trofia powoduje coroczne zakwity sinic, choć w początkowym okresie istnienia był to czysty zbiornik [9, 11].

Wypadkowa wszystkich czynników sprzyjających eutrofizacji ma dla każdego zbiornika wodnego inną wartość. Szybkość procesu eutrofizacji może być różna, jednak ładunek fosforu większy niż przyjęty za niebezpieczny nie gwarantuje utrzymania trofii na stałym poziomie i świadczy o dużym prawdopodobieństwie postępu eutrofizacji wód analizowanych zbiorników [1].

W zbiorniku solińskim ujemną retencję (eksport) notowano głównie jesienią (rys. 3.), pod koniec okresu wegetacyjnego, związaną prawdopodobnie ze wzbogaceniem wody fosforem pochodzącym z rozkładu organizmów wodnych. Odprowadzanie wodami hypolimnionu sedymentującej materii organicznej i produktów jej mineralizacji prowadzi do sukcesywnego i stałego wzbogacenia w substancje biogenne zbiornika wyrównawczego. Ponadto jesienią woda magazynowana od wiosny w górnym zbiorniku zasilala turbiny elektrowni wodnej.

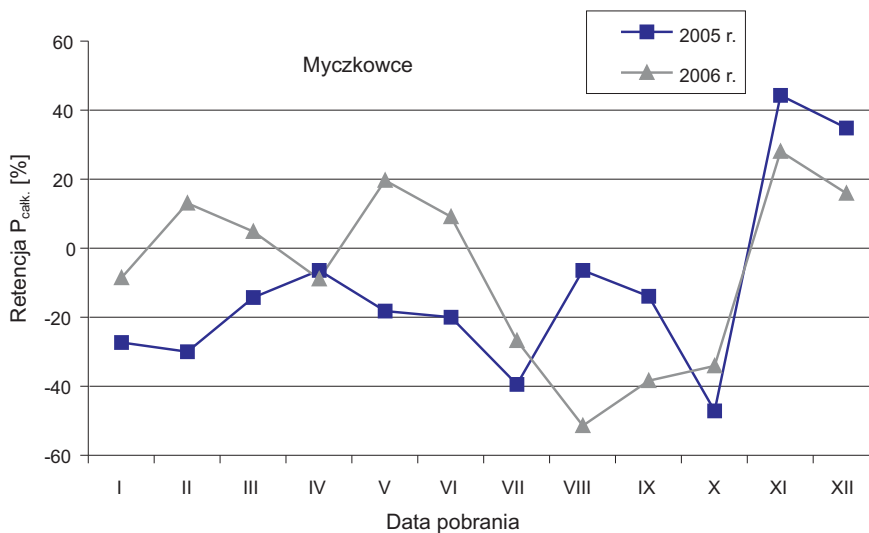


Rys. 3. Zmiany retencji fosforu całkowitego w zbiorniku solińskim w latach 2005-2006

Ujemna retencja w zbiorniku myczkowieckim sugeruje, że ze względu na brak stratyfikacji zasilanie wewnętrzne fosforem mineralnym z osadów dennych może mieć przez cały okres znaczny udział w ładunku odpływającym ze zbiornika (rys. 4.). W zbiorniku wyrównawczym ujemna retencja mogła być jednak przypuszczalnie spowodowana nie tylko zasilaniem wewnętrznym, ale głównie czynnikami hydrologicznymi związanymi z funkcjonowaniem elektrowni wodnych. Ponadto niska biologiczna aktywność prawdopodobnie powoduje, że strumień ładunków jest wyprowadzany bezpośrednio ze zbiorników jesienią i zimą. Retencja związków biogenych w badanych kilku polskich zbiornikach wynosiła najczęściej około 20-30% (jest bardzo zmienna w różnych latach). Zwykle bywa wyższa w zbiornikach o dłuższym czasie retencji wody [9]. Retencja fosforu mineralnego w zbiorniku dobczyckim mieściła się w granicach od 25 (1999 r.) do 82% (1995 r.) dopływającego ładunku fosforu [20]. W przypadku zbiorników francuskich Marne, Aube i Seine retencja fosforu całkowitego w latach 1993-1995 wahała się od 33 do 78% [8].

W zespołach zbiorników, poprzez kumulację części ładunku substancji w zbiorniku położonym wyżej, woda dopływająca do zbiornika położonego

niżej powinna być mniej zanieczyszczona związkami biogennymi. Ponieważ retencja fosforu całkowitego w zbiorniku solińskim była na ogół dodatnia w obu okresach badawczych (2005-2006), to wyznaczono na podstawie bilansu masowego wielkość sedymentacji tego pierwiastka w zbiorniku głównym (tab. 5.).



Rys. 4. Zmiany retencji fosforu całkowitego w zbiorniku myczkowieckim w latach 2005-2006

Tabela 5. Wielkość sedymentacji fosforu całkowitego do osadów dennych w zbiorniku solińskim w latach 2005-2006

Rok		P <sub>całk.</sub> [t rok <sup>-1</sup> ]	Rok		P <sub>całk.</sub> [t rok <sup>-1</sup> ]
2005	Retencja w zbiorniku	29	2006	Retencja w zbiorniku	17
	Retencja w toni wodnej	-74		Retencja w toni wodnej	-57
	Depozycja w osadach	103		Depozycja w osadach	74

Ilość fosforu całkowitego zdeponowanego do osadów w 2005 r. wyniosła 103 t, a w 2006 – 74 t. Celem porównania kumulacja fosforu w osadach jeziora Gościąż (powierzchnia 42 ha i głębokość maksymalna 24 m, głębokość średnia ok. 5 m) w latach 1992-1993 i 1993-1994 wynosiła odpowiednio 0,8 i 0,3 t [12], podczas gdy w przypadku zbiornika Bort-Les-Orgues we Francji (powierzchnia 858 ha i głębokość maksymalna 95 m, głębokość średnia 33 m) wyznaczono retencję fosforu w zbiorniku i w toni wodnej na poziomie (odpowiednio) 63 i 4 t. Depozycji do osadów dennych w tym zbiorniku uległo 59 t ładunku fosforu całkowitego [4]. W porównaniu ze zbiornikiem Solina sedymentacja fosforu całkowitego w obrębie zbiornika Myczkowce nie występowała (ujemna retencja). Wpływ na to miał bardzo krótki czas retencji wody w tym zbiorniku



(ok. sześć dób w analizowanym czasie) [15]. Przyrastanie samych osadów, jak również fosforu organicznego w depozytach zbiornika Myczkowce prawdopodobnie wiąże się z produkcją i obumieraniem makrofitów. Fosfor mineralny, jak i inne składniki osadów dennych przypuszczalnie mogą być pobierane głównie z wody naddennej, w strefie bezpośredniego kontaktu z osadami. Przerzuty wód podczas pracy elektrowni szczytowo-pompowej powodują znaczne i częste wahania poziomu wody, a także jej mętność (resuspensję osadów dennych).

Stopień oddziaływania zlewni na badane zbiorniki zaporowe jako dostawcy fosforu można określić na podstawie cech charakteryzujących zlewnię całkowitą i bezpośrednią. Jednak podobne oddziaływanie zlewni, wyrażone wielkością obciążenia ładunkiem fosforu powierzchni zbiornika, powoduje inne skutki w przypadku gdy naturalna odporność ekosystemu wodnego na degradację jest duża, inne zaś, gdy ekosystem jest podatny na wpływy z zewnątrz [1].

#### 4. Podsumowanie

Zbiorniki zaporowe Solina i Myczkowce w analizowanym okresie badań obciążone były nadmiernymi ładunkami fosforu, znacznie przekraczającymi wartości uznawane za niebezpieczne, co świadczy o dużym prawdopodobieństwie postępu eutrofizacji wód obu akwenów. W zbiorniku głównym odnotowano dość znaczną dodatnią retencję fosforu przez większą część analizowanego okresu, a co się z tym wiąże dość intensywne deponowanie fosforu całkowitego do osadów dennych. W zbiorniku wyrównawczym, z uwagi na dużą częstotliwość wymiany wody, zatrzymywanie fosforu zachodziło prawdopodobnie głównie w osadach dennych w strefie bezpośredniego kontaktu z wodą naddenną, zwłaszcza podczas resuspensji depozytów.

Według systemu oceny tempa naturalnej eutrofizacji niekorzystne warunki zlewniowe, wynikające ze stosunkowo dużej możliwości dostarczenia materii do zbiornika (wysoki współczynnik Ohlego, czyli iloraz całkowitej powierzchni zlewni i zbiornika oraz duże spadki powierzchni), mogą być w tym przypadku równoważone przez dużą odporność samego zbiornika. Odporność zbiornika Solina na wpływy z zewnątrz zapewnia głównie jego głębokość i w związku z tym duża pojemność przy stosunkowo niewielkiej powierzchni. Zbiornik Myczkowce charakteryzuje się znaczną intensywnością wymiany wód. W efekcie szybkość eutrofizacji w obu zbiornikach wydaje się być na dzień dzisiejszy umiarkowana.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2004-2007 jako projekt badawczy nr 2 P04G 084 27.*

#### Literatura

1. Bajkiewicz-Grabowska E.: Obieg materii w systemach rzeczno-jeziornych. Wydaw. UW, Warszawa 2002.

2. Bartoszek L., Koszelnik P., Tomaszek J.: Dynamika zmian fosforu w dopływach zbiornika Solina. I Kongres Inżynierii Środowiska. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2002, 11, 233-249.
3. Bartoszek L., Gruca-Rokosz R., Koszelnik P., Tomaszek J.: Phosphorus in the Solina reservoir ecosystem. *Environment Protection Engineering*, 2004, 30(4), 13-21.
4. Brigault S., Ruban V.: External phosphorus load estimates and P-budget for the hydroelectric reservoir of Bort-Les-Orgues (France). *Water, Air and Soil Pollution*, 2000, 119, 91-103.
5. Galicka W., Drożdżyk A., Korczyńska A.: Bilans nutrientów zbiorników zaporowych i jezior. Zintegrowana strategia ochrony i zagospodarowania ekosystemów wodnych. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1994, 125-135.
6. Galicka W., Penczak T., Drożdżyk A., Dembiński Z.: Obciążenie biogenami nizinnych zbiorników zaporowych: Sulejów i Jeziorsko. Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce, t. II. Wydaw. UŁ, Łódź 2002, 153-162.
7. Ilnicki P.: Przyczyny, źródła i przebieg eutrofizacji wód powierzchniowych. *Przegląd Komunalny*, 2002, 2(125), 35-49.
8. Jossette G., Leporcq B., Sanchez N., Sanchez P.: Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France). *Biogeochemistry*, 1999, 47, 119-146.
9. Kajak Z.: Eutrofizacja nizinnych zbiorników zaporowych. Procesy biologiczne w ochronie i rekultywacji nizinnych zbiorników zaporowych. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1995, 33-41.
10. Kajak Z.: Hydrobiologia–limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych. PWN, Warszawa 1998.
11. Kasza H.: Symptomy eutrofizacji a sukcesja ekologiczna w goczałkowickim zbiorniku zaporowym, [w:] M. Zalewski, Procesy biologiczne w ochronie i rekultywacji nizinnych zbiorników zaporowych. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1995, 143-153.
12. Kentzer A.: Fosfor i jego biologicznie dostępne frakcje w osadach jezior różnej trofii. Wydaw. UMK, Toruń 2001.
13. Kentzer A., Giziński A.: Bilans i dynamika nutrientów w zbiorniku włocławskim. Procesy biologiczne w ochronie i rekultywacji nizinnych zbiorników zaporowych. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1995, 85-90.
14. Koszelnik P.: Wpływ wybranych czynników na retencję azotu w zbiornikach zaporowych, Rzeszów 2002.
15. Koszelnik P.: Źródła i dystrybucja pierwiastków biogenych na przykładzie Zespołu Zbiorników Zaporowych Solina–Myczkowce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
16. Miernik W.: Wstępne wyniki badań nad przemianą związków organicznych i biogenych w małym zbiorniku wodnym. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2007, 4(1), 131-140.
17. Mukhopadhyay B., Smith E.H.: Comparison of statistical methods for estimation of nutrient load to surface reservoirs for sparse data set: application with modified model for phosphorus availability. *Water Research*, 2000, 34(12), 3258-3268.

18. Raczak J.: Obciążenie zbiornika czorszyńskiego substancjami biogennymi. *Gospodarka Wodna*, 2002, 10, 428-431.
19. Schauser I., Lewandowski J., Hupfer M.: Decision support for the selection of an appropriate in-lake measure to influence the phosphorus retention in sediments. *Water Research*, 2003, 37, 801-812.
20. Starmach J., Mazurkiewicz-Boroń G.: *Zbiornik Dobczycki. Ekologia–Eutrofizacja–Ochrona*. PAN, Kraków 2000.
21. Wiśniewski R.J.: Fosfor w zbiornikach zaporowych – zasilanie, kumulacja, wymiana między osadami dennymi i wodą, [w:] M. Zalewski, *Zintegrowana strategia ochrony i zagospodarowania ekosystemów wodnych*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1994, 49-60.
22. Wiśniewski R.J.: Rola zasilania wewnętrznego w eutrofizacji zbiorników zaporowych, [w:] M. Zalewski, *Procesy biologiczne w ochronie i rekultywacji nizinnych zbiorników zaporowych*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1995, 61-70.
23. ZEW Solina–Myczkowce. *Gospodarka wodna*. Zespół Elektrowni Wodnych Solina–Myczkowce S.A., 2005, <http://www.solina.pl/> (6 kwietnia 2009 r.).

## **PHOSPHORUS LOADINGS AND RETENTION IN THE SOLINA–MYCZKOWCE COMPLEX OF RESERVOIRS**

### **Abstract**

The paper presents the results of phosphorus mass balance for the Solina and Myczkowce reservoirs ecosystem. The aim of the research was to evaluate the phosphorus loadings and retention in the reservoirs. Loadings of the phosphorus were considerably exceeding the level of tolerable values. Phosphorus retention was higher in the Solina reservoir (20-46% of supply) than Myczkowce, where export was noted sporadically.

*Wpłynęło do Oficyny Wydawniczej w marcu 2009 r.*