

ZNACZENIE ZBIORNIKA RETENCYJNEGO DLA OCHRONY JEZIORA PRZED SPŁYWAMI FOSFORU ZE ZLEWNI ROLNICZEJ

Józef Koc, Marcin Duda, Stefan Tucholski

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Streszczenie. Badania nad rolą zbiornika retencyjnego w ochronie jeziora przed spływami ze zlewni rolniczej prowadzono w ciągu roku hydrologicznego 2006. Pomiary hydrologiczne na dopływającym do jeziora cieku, na którym zlokalizowano zbiornik, wykonywano raz w tygodniu, a próbki wody do analiz laboratoryjnych pobierano raz na dwa miesiące w miejscach pomiaru przepływów. Stwierdzono, że średnie stężenie fosforu ogólnego w wodach odpływających ze zlewni zależało od sposobu i intensywności użytkowania terenu i było wyższe w przypadku zlewni rolniczych odwadnianych siecią drenarską niż w przypadku zlewni leśnej. Niższe stężenia P_{og} notowano w okresie wegetacyjnym niż poza tym okresem. Ładunek fosforu odprowadzany z obszaru zlewni zależał od sposobu jej zagospodarowania: odpływ P_{og} z jednostki powierzchni był większy w drenowanej zlewni rolniczej ($0,18 \text{ kg } P_{og} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$), a mniejszy w zlewni leśnej ($0,12 \text{ kg } P_{og} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). Obciążenie powierzchni zbiornika retencyjnego ładunkiem fosforu dopływającym z obszaru zlewni ($0,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) prawie 4-krotnie przekracza obciążenie niebezpieczne i przyczynia się do dużego nasilenia procesów eutrofizacji i akumulacji. Zbiornik odgrywa rolę bariery przechwytyjącej związku fosforu spływające ze zlewni. W ciągu roku w misie zbiornika zostało zakumulowane $21,5 \text{ kg } P_{og}$ ($0,86 \text{ kg } P_{og} \cdot \text{ha}^{-1}$). Fosfor był zatrzymywany w zbiorniku retencyjnym głównie w okresie wegetacyjnym, w pozostałej części roku zbiornik nie zatrzymywał tego pierwiastka.

Słowa kluczowe: ochrona jezior, zbiornik retencyjny, biogeny, fosfor, zlewnia rolnicza

WSTĘP

Na terenach rolniczych za największe zagrożenie dla jakości wody uważa się spływy powierzchniowe i podziemne biogenów z pól uprawnych [Koc i Nowicki 1997]. Ilość wynoszonych ze zlewni pierwiastków biogennych zależy także od sposobu użytkowania zlewni, udziału pól w jej całkowitej powierzchni oraz od poziomu nawożenia pól [Koc

Adres do korespondencji – Corresponding author: prof. dr hab. Józef Koc, Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, plac Łódzki 2, 10-719 Olsztyn, e-mail: katemel@uwm.edu.pl

1998, Koc i Skwierawski 2004]. Stosowanie dużych ilości nawozów mineralnych i organicznych prowadzi do wzbogacenia gleb w składniki pokarmowe. Rośliny nie są w stanie tych składników w pełni wykorzystać, a ich nadmiar poprzez spływ powierzchniowy lub z wodami gruntowymi dostaje się do jezior. Pod wpływem nadmiaru dopływających biogenów w środowisku wodnym zachodzą niekorzystne zmiany powodujące znaczne przyspieszenie tempa degradacji zbiorników [Vollenweider 1968, Kajak 2001], a w przyszłości ich zanik. Postępująca eutrofizacja prowadzi do pogorszenia jakości wód jezior, a tym samym ogranicza ich przydatność gospodarczą [Niemirycz i in. 1993]. W wyniku spływów powierzchniowych i gruntowych do wód dostają się składniki pokarmowe, co wywołuje zaburzenia w ekosystemach wodnych, naruszając naturalny obieg składników w środowisku przyrodniczym [Sapek 1996, Koc 1998]. Dlatego obszary rolnicze są przedstawiane jako jedno z głównych źródeł eutrofizacji wód.

Substancje biogenne wnoszone do jezior są częściowo wykorzystywane przez rośliny do budowy ich biomasy (bioakumulacja), natomiast pozostała część wraz z wodami odpływającymi może być wynoszona poza obręb zbiornika. Ma to szczególne znaczenie zwłaszcza w okresach wiosennych przyborów wód, kiedy to w wyniku resuspensji oraz cyrkulacji wód część biogenów zakumulowana w osadach dennych przedostaje się do toni wodnej i wraz z wodami odpływów zostaje wyprowadzona poza ekosystem do innych wód. Z tego względu należy prawidłowo zagospodarowywać brzegi cieków i zbiorników wodnych oraz tworzyć strefy buforowe [Ryszkowski 1992, Haycock i in. 1996]. Jedną z takich metod jest tworzenie barier biogeochemicznych dla spływu zanieczyszczeń i biogenów, poprzez budowę zbiorników wykorzystywanych jako stawy. Zastosowanie tej metody może spowodować polepszenie jakości wody [Koc i in. 2004].

Proces samooczyszczania zachodzący w zbiorniku retencyjnym polega na przekształcaniu związków organicznych w związki nieorganiczne, przy udziale bakterii, kosztem pobierania z wody tlenu [Stańczykowska 1997] oraz na zatrzymywaniu i przechwytywaniu zanieczyszczeń przez roślinność wodną [Chudyba i Kalwasiński 1998]. Zbiorniki takie umożliwiają wyeliminowanie przepływających ładunków fosforanów (jako składnika limitującego produkcję pierwotną [Koc i Skwierawski 2004, Bechmann i in. 2005]), przy czym intensywność eliminacji zależy głównie od pory roku, wielkości dopływającego ładunku i czasu retencji [Jarząbek 1998, za: Szymańska 1992]. Zbiorniki retencyjne odgrywają bardzo złożoną rolę w środowisku: obok pełnienia funkcji ochronnych i magazynowania wody w ramach tzw. małej retencji, mogą też być wykorzystywane do celów gospodarczych – rolniczych, rybackich, rekreacyjnych, przeciwpożarowych i in. [Czamara 2001].

Celem pracy było wykazanie znaczenia funkcjonowania zbiornika retencyjnego jako bariery przechwytywającej zanieczyszczenia pochodzenia antropogenicznego (związki fosforu), przenikające do wód powierzchniowych z obszaru zlewni rolniczej, oraz określenie roli tego zbiornika w ochronie pobliskiego jeziora.

MATERIAŁ I METODY

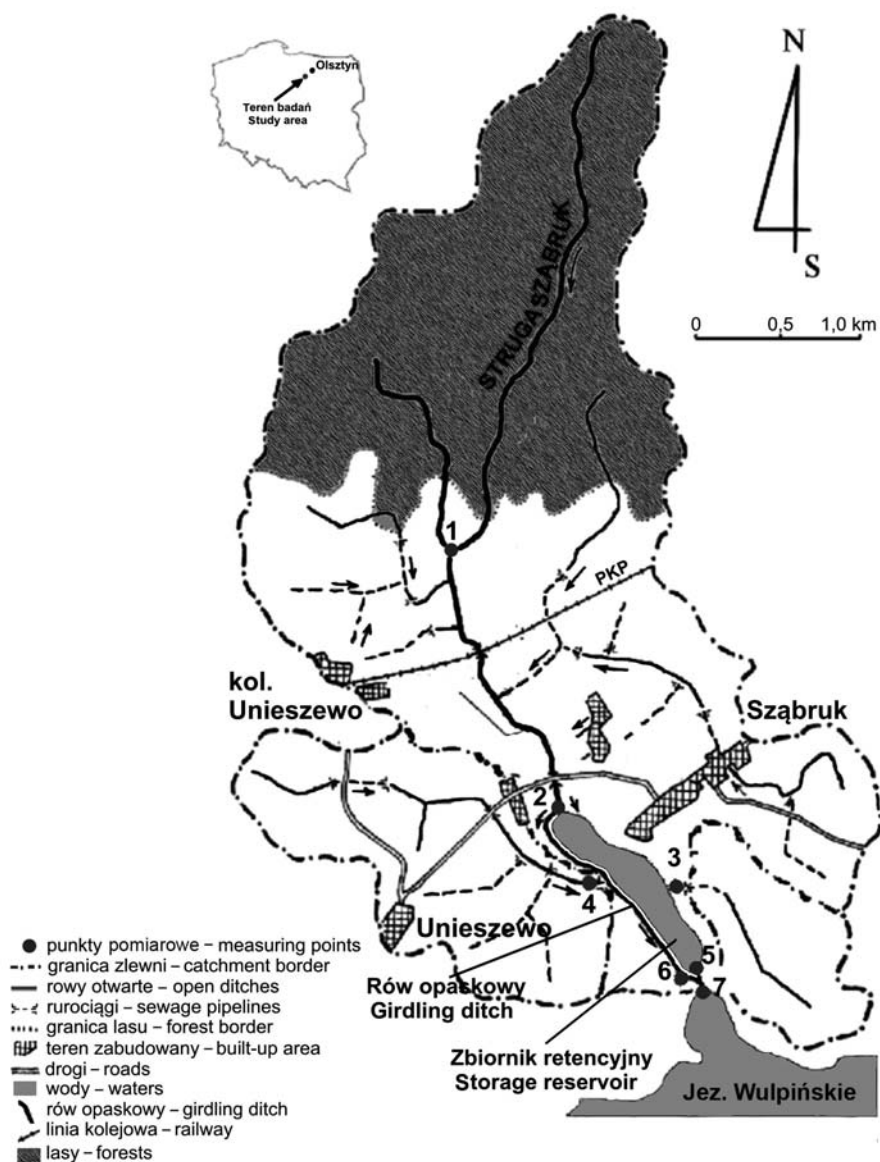
Badania nad znaczeniem zbiornika retencyjnego dla ochrony jeziora przed spływami ze zlewni rolniczej prowadzono w roku hydrologicznym 2006. Do badań szczegółowych wytypowano zbiornik retencyjny znajdujący się w dolinie końcowego biegu strugi Sząbruk położonej w północno-wschodniej Polsce w makroregionie Pojezierza Mazurskiego, mezoregionie Pojezierza Olsztyńskiego. Zlewnia strugi Sząbruk, o powierzchni 13,2 km², składa się z części leśnej i części rolniczej. Część zalesiona zajmuje 4,4 km², co stanowi 33% całkowitej powierzchni zlewni. Do czerwca 2005 r. do strugi były odprowadzane ścieki z dwóch oczyszczalni odbierających ścieki z pobliskich osiedli mieszkaniowych. W okresie badań do strugi nie doprowadzano ścieków. W dolnej części doliny strugi Sząbruk leży zbiornik retencyjny wykonany przed 25 laty, zamknięty groblą i mniczem, o powierzchni 24,80 ha i maksymalnej głębokości 1,51 m. Część wód strugi, w wyniku podziału, jest kierowana przez zbiornik retencyjny, pozostała część – przez rów opaskowy. Odpływy ze zbiornika i rowu opaskowego są kierowane końcowym odcinkiem strugi Sząbruk do Jeziora Wulpińskiego. Badaniami objęto wody strugi Sząbruk oraz wody dopływające do zbiornika retencyjnego i z niego odpływające (rys.).

Prowadzone badania obejmowały pomiary hydrologiczne oraz analizy laboratoryjne. Pomiary przepływów w strudze Sząbruk wykonywano poniżej zlewni leśnej, następnie na odpływie ze zlewni rolniczej powyżej zbiornika retencyjnego (mierzone ilość wody, która w wyniku podziału dopływała do zbiornika retencyjnego oraz do rowu opaskowego), w dalszej kolejności mierzone przepływy na odpływie ze zbiornika, odpływie z rowu opaskowego oraz na dopływie do Jeziora Wulpińskiego. Mierzono również odpływy z dwóch zlewni drenowanych, zasilających swoimi wodami bezpośrednio zbiornik retencyjny i rów opaskowy. Pomiary wykonywano raz w tygodniu przy użyciu elektromagnetycznego miernika przepływu firmy Valeport, a przy niskim przepływie (poniżej 2 dm³ · s⁻¹) stosowano metodę wolumetryczną. Próbkę wód do analiz laboratoryjnych pobierano raz na dwa miesiące w miejscach pomiaru przepływów i oznaczano w nich P_{og} (po mineralizacji) oraz P-PO₄ kolorymetrycznie z molibdenianem amonu i chlorkiem cyny (II) jako reduktorem. Badania te wykonywano, stosując ogólnie przyjęte metody [Hermanowicz i in. 1999].

Ładunki biogenów odpływających ze zlewni, a także dopływających do zbiornika i zeń odpływających obliczono jako sumę iloczynów ich stężeń w wodach i odpowiadających im średnich miesięcznych przepływów.

WYNIKI

Na podstawie badań wykonanych w roku hydrologicznym 2006 stwierdzono, że stężenie fosforu ogólnego i fosforanowego w wodzie, analizowane na poszczególnych odcinkach strugi Sząbruk, na dopływach do zbiornika retencyjnego i rowu opaskowego i odpływie ze zbiornika i rowu oraz na dopływie do Jeziora Wulpińskiego było w dużym stopniu zróżnicowane i zależało od sposobu użytkowania i odwodnienia danej zlewni jednostkowej (tab. 1). Najniższe stężenie fosforu ogólnego występowało w strudze Sząbruk poniżej zlewni leśnej – wynosiło tam średnio 0,15 mg · dm⁻³. Dalej, po prze-



Rys. Mapa zlewni strugi Sząbruk; 1 – struga Sząbruk poniżej zlewni leśnej, 2 – struga Sząbruk powyżej zbiornika retencyjnego, 3 – dopływ ze zlewni drenowanej do zbiornika retencyjnego, 4 – dopływ ze zlewni drenowanej do rowu opaskowego, 5 – odpływ ze zbiornika retencyjnego, 6 – odpływ z rowu opaskowego, 7 – dopływ do Jeziora Wulpińskiego

Fig. Map showing the Sząbruk creek catchment; 1 – Sząbruk creek downstream of forest catchment, 2 – Sząbruk creek upstream of storage reservoir, 3 – inflow from drained catchment to storage reservoir, 4 – inflow from drained catchment to girdling ditch, 5 – outflow from storage reservoir, 6 – outflow from girdling ditch, 7 – inflow to Wulpińskie Lake

Tabela 1. Wartości średnie i zakresy stężeń form fosforu w wybranych punktach zlewni (rok hydrologiczny 2006)
 Table 1. Means and ranges of concentrations of phosphorus forms in chosen points of catchment (hydrological year 2006)

Punkt pomiarowy Measuring point	Nr No.	P _{org} , mg · dm ⁻³			P-PO ₄ , mg · dm ⁻³		
		rok hydrologiczny hydrological year	poza okresem wegetacyjnym outside vegetation period	okres wegetacyjny vegetation period	rok hydrologiczny hydrological year	poza okresem wegetacyjnym outside vegetation period	okres wegetacyjny vegetation period
Struga Sząbruk poniżej zlewni leśnej	1	0,15 (0,01÷0,44)	0,25 (0,15÷0,44)	0,06 (0,01÷0,12)	0,10 (0,01÷0,18)	0,13 (0,09÷0,13)	0,06 (0,01÷0,12)
Sząbruk creek downstream of forest catchment							
Struga Sząbruk powyżej zbiornika retencyjnego	2	0,25 (0,01÷0,45)	0,38 (0,31÷0,45)	0,11 (0,01÷0,32)	0,17 (0,01÷0,28)	0,23 (0,15÷0,24)	0,11 (0,01÷0,24)
Sząbruk creek upstream of storage reservoir							
Dopływ ze zlewni drenowanej do zbiornika retencyjnego	3	0,38 (0,01÷1,01)	0,53 (0,08÷0,52)	0,19 (0,01÷0,24)	0,05 (0,01÷0,11)	0,02 (0,01÷0,03)	0,08 (0,01÷0,11)
Inflow from drained catchment to storage reservoir							
Dopływ ze zlewni drenowanej do rowu opaskowego	4	0,52 (0,01÷1,97)	0,38 (0,15÷0,54)	0,66 (0,01÷1,97)	0,18 (0,01÷0,25)	0,16 (0,08÷0,25)	0,20 (0,01÷0,52)
Inflow from drained catchment to girdling ditch							
Odpyływ ze zbiornika retencyjnego	5	0,14 (0,01÷0,45)	0,28 (0,12÷0,52)	0,04 (0,01÷0,04)	0,06 (0,01÷0,10)	0,08 (0,03÷0,10)	0,04 (0,01÷0,06)
Outflow from storage reservoir							
Odpyływ z rowu opaskowego	6	0,41 (0,01÷1,17)	0,43 (0,31÷0,60)	0,39 (0,01÷1,17)	0,09 (0,01÷0,16)	0,08 (0,03÷0,10)	0,10 (0,01÷1,17)
Outflow from girdling ditch							
Dopływ do Jeziora Wulpińskiego	7	0,37 (0,01÷0,43)	0,42 (0,15÷0,71)	0,32 (0,01÷1,14)	0,08 (0,01÷0,07)	0,07 (0,03÷0,05)	0,09 (0,01÷0,07)
Inflow to Wulpińskie Lake							

płynięciu ciekłu przez zlewnię rolniczą, stężenie tego pierwiastka wzrastało średnio do $0,25 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Większe stężenie P_{og} w wodach odpływających z obszarów użytkowanych rolniczo może być związane ze stosowaniem nawozów mineralnych i organicznych, których nadmiar nie wykorzystany przez rośliny przemieszcza się w głąb gleby i przedostaje się do wód powierzchniowych [Smoroń 1998]. Znacznie wyższe stężenie P_{og} notowano w przypadku dwóch zlewni drenowanych, zasilających bezpośrednio swymi wodami z jednej strony zbiornik retencyjny, a z drugiej rów opaskowy, przy czym zdecydowanie wyższe wartości obserwowano na dopływie do rowu opaskowego (średnio $0,52 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) niż na dopływie do zbiornika ($0,38 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$).

Na odpływ fosforu ogólnego z poszczególnych zlewni drenowanych znaczący wpływ miał sposób użytkowania zlewni. Sieć drenarska od strony rowu opaskowego odprowadzała wody z terenów ornych oraz z plantacji leśnej powstającej na nieużytkach, z kolei do zbiornika retencyjnego dopływała woda poprzez sieć drenarską z użytków zielonych. Znaczne zmniejszenie średniego stężenia fosforu nastąpiło w wyniku przepływu wody przez zbiornik retencyjny – na odpływie ze zbiornika średnie stężenie tego pierwiastka było najniższe spośród wszystkich badanych punktów i wynosiło $0,14 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, przy czym znacznie większy stopień redukcji osiągnięto w sezonie wegetacyjnym, kiedy to stężenie P_{og} wynosiło średnio $0,04 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, niż w pozostałych okresach roku hydrologicznego. Dla porównania, woda ze strugi Sząbruk po przepłynięciu przez rów opaskowy niosła średnio $0,41 \text{ mg } P_{\text{og}}$ na 1 dm^3 , z czego w okresie wegetacyjnym $0,39 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, a poza tym okresem $0,43 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Wskutek wymieszania wód odpływających ze zbiornika retencyjnego i rowu opaskowego ostatecznie do Jeziora Wulpińskiego dopływało średnio $0,37 \text{ mg}$ fosforu ogólnego na 1 dm^3 wody.

Podobne prawidłowości wystąpiły w przypadku fosforu fosforanowego. Jego średnie stężenie w strudze Sząbruk również zależało od sposobu użytkowania zlewni. Woda w cieklu przed rozdzielaniem jej na zbiornik retencyjny i rów opaskowy zawierała średnio $0,17 \text{ mg } P\text{-}PO_4 \cdot \text{dm}^{-3}$, czyli 1,7-krotnie więcej niż na wypływie z lasu. Zarówno w odniesieniu do zbiornika retencyjnego, jak i rowu opaskowego można mówić o ich redukującym wpływie na średnie stężenie fosforu fosforanowego. Znaczące wydaje się też rolnicze użytkowanie poszczególnych zlewni odwadnianych siecią drenarską. W przypadku trwałego pokrycia szatą roślinną średnie stężenie fosforanów na wylocie drenarskim do zbiornika retencyjnego było ponad 3-krotnie mniejsze niż na analogicznym dopływie do rowu opaskowego z obszaru uprawianego ornie. Średnie stężenie fosforu fosforanowego było nawet nieco niższe niż w odpływie ze zlewni leśnej i wynosiło $0,08 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Na podstawie średnich stężeń fosforu ogólnego i fosforu fosforanowego oraz obliczonych średnich przepływów w poszczególnych punktach badawczych sporządzono bilans badanych form fosforu w przeliczeniu na rok na poszczególnych odcinkach zlewni strugi Sząbruk z uwzględnieniem rozdziału wód i niesionego przez nie ładunku fosforu na zbiornik i rów opaskowy (tab. 2). Stwierdzono, że wody strugi na odcinku od źródeł do punktu powyżej zbiornika retencyjnego niosły w ciągu roku $153,0 \text{ kg } P_{\text{og}}$ i $104 \text{ kg } P\text{-}PO_4$. Ze zlewni leśnej odpływało odpowiednio $51,6 \text{ kg } P_{\text{og}} \cdot \text{rok}^{-1}$ i $34,4 \text{ kg } P\text{-}PO_4 \cdot \text{rok}^{-1}$, natomiast ze zlewni rolniczej $102,4 \text{ kg } P_{\text{og}} \cdot \text{rok}^{-1}$ i $69,6 \text{ kg } P\text{-}PO_4 \cdot \text{rok}^{-1}$. Ładunek fosforu ogólnego odpływający ze zlewni leśnej był 2-krotnie większy w części roku poza okresem wegetacyjnym niż w tym okresie, natomiast ilość tego pierwiastka w strudze powy-

Tabela 2. Ładunek form fosforu w wybranych punktach zlewni (rok hydrologiczny 2006)
 Table 2. Load of phosphorus forms in chosen points of catchment (hydrological year 2006)

Punkt pomiarowy Measuring point	Nr No.	Ładunek całkowity, kg · rok ⁻¹ Total load, kg · year ⁻¹				Ładunek jednostkowy, kg · ha ⁻¹ · rok ⁻¹ Unit load, kg · ha ⁻¹ · year ⁻¹			
		P _{og} poza okresem wegeta- cyjnym outside vegetation period	rok hydrolo- giczny hydrolo- gical year	okres wegeta- cyjny vegeta- tion period	rok hydrolo- giczny hydrolo- gical year	P-PO ₄ poza okresem wegeta- cyjnym outside vegetation period	okres wegeta- cyjny vegeta- tion period	rok hydrolo- giczny hydrolo- gical year	P-PO ₄ rok hydrolo- giczny hydrolo- gical year
Struga Sząbruk poniżej zlewni leśnej Sząbruk creek downstream of forest catchment	1	34,4	51,6	17,2	34,4	16,5	0,12	0,08	
Struga Sząbruk powyżej zbiornika retencyjnego Sząbruk creek upstream of storage reservoir	2	93,0	153,0	60,0	104,0	47,7	0,16	0,11	
Dopływ ze strugi Sząbruk do zbiornika retencyjnego* Inflow from Sząbruk creek to storage reservoir*		62,2	102,4	40,2	69,7	32,0	-	-	
Dopływ ze strugi Sząbruk do rowu opaskowego* Inflow from Sząbruk creek to girdling ditch*		30,8	50,6	19,8	34,3	15,7	-	-	
Dopływ ze zlewni drenowanej do zbiornika retencyjnego (zlewnia rolnicza) Inflow from drained catchment to storage reservoir (agricultural catchment)	3	5,1	9,2	4,1	1,8	1,2	0,12	0,02	

Tabela 2 cd. – Table 2 cont.

Punkt pomiarowy Measuring point	Nr No.	Ładunek całkowity, kg · rok ⁻¹ Total load, kg · year ⁻¹				Ładunek jednostkowy, kg · ha ⁻¹ · rok ⁻¹ Unit load, kg · ha ⁻¹ · year ⁻¹			
		P _{og} poza okresem wegeta- cyjnym	rok hydrolo- giczny	okres wegeta- cyjny	rok hydrolo- giczny	P-PO ₄ poza okresem wegeta- cyjnym	okres wegeta- cyjny	rok hydrolo- giczny	P _{og} rok hydrolo- giczny
Dopływ ze zlewni drenowanej do rowu opaskowego (zlewnia rolnicza) Inflow from drained catchment to girdling ditch (agricultural catchment)	4	24,9	7,2	17,6	16,7	8,4	8,3	0,18	0,13
Odptyw ze zbiornika retencyjnego Outflow from storage reservoir	5	75,5	60,4	15,1	29,6	15,8	13,8	–	–
Odptyw z rowu opaskowego Outflow from girdling Ditch	6	90,1	42,7	47,4	22,8	10,9	11,9	–	–
Dopływ do Jeziora Wulpińskiego Inflow to Wulpińskie Lake	7	165,6	103,1	62,5	52,4	26,7	25,7	0,13	0,04

* W wyniku podziału wód strugi Sząbruk na dwa ciekі ładunek fosforu dopływał do zbiornika retencyjnego i do rowu opaskowego.
* As a result of dividing waters of Sząbruk creek into two streams, phosphorus load flowed into storage reservoir and into girdling ditch.

zej zbiornika retencyjnego była ok. 3-krotnie większa niż na odpływie ze zlewni leśnej, zarówno w okresie wegetacyjnym, jak i poza nim.

W przypadku obu badanych form fosforu znaczne wyższy (ok. 1,7-krotnie) był roczny odpływ jednostkowy ze zlewni rolniczej w przeliczeniu na hektar; odpowiednie wartości wynosiły $0,12 \text{ kg P}_{\text{og}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ i $0,08 \text{ kg P-PO}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ dla zlewni leśnej oraz $0,20 \text{ kg P}_{\text{og}} \cdot \text{rok}^{-1}$ i $0,14 \text{ kg P-PO}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$ dla zlewni rolniczej. Do zbiornika retencyjnego bezpośrednio ze strugi Sząbruk wpływało rocznie $102,4 \text{ kg P}_{\text{og}}$ i $69,7 \text{ kg P-PO}_4$, a z wylotu drenarskiego zamykającego sieć drenarską dodatkowo $9,2 \text{ kg P}_{\text{og}}$ i $1,8 \text{ kg P-PO}_4$. Dało to obciążenie $0,5 \text{ g P}_{\text{og}}$ na 1 m^2 lustra wody. Roczne obciążenie jednostki powierzchni zbiornika o średniej głębokości do 5 m fosforem w ilości poniżej $0,07 \text{ g}$ uznaje się za dopuszczalne, czyli nie powodujące niebezpieczeństwa degradacji zbiornika, natomiast ładunek w wysokości powyżej $0,13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ jest uznawany za niebezpieczny, tj. taki, po przekroczeniu, którego następuje uruchomienie niekorzystnych zmian w ekosystemie wodnym [Vollenweider 1968]. Według tego kryterium, zbiornik retencyjny jest w znacznym stopniu narażony na degradację.

Całkowity ładunek poszczególnych form fosforu na odpływie ze zbiornika retencyjnego wynosił $75,5 \text{ kg P}_{\text{og}} \cdot \text{rok}^{-1}$ i $29,6 \text{ kg P-PO}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$. Z zestawień bilansowych wynika, że w zbiorniku akumulowało się rocznie $36,1 \text{ kg P}_{\text{og}}$, w tym $35,8 \text{ kg P-PO}_4$, czyli $1,46 \text{ kg P}_{\text{og}}$, w tym $1,44 \text{ kg P-PO}_4$, na 1 ha jego powierzchni. O redukcji ładunku fosforu ogólnego można mówić jedynie w przypadku okresu wegetacyjnego, kiedy to do zbiornika dopływało z wodami $40,2$ oraz $4,1 \text{ kg P}_{\text{og}}$, a przez mnich spustowy odpływało $15,1 \text{ kg P}_{\text{og}}$ na rok. Do rowu opaskowego ze strugi zostało dostarczone $50,6 \text{ kg P}_{\text{og}} \cdot \text{rok}^{-1}$, w tym $34,3 \text{ kg P-PO}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$, a z sieci drenarskiej dopłynęło kolejne $24,9 \text{ kg P}_{\text{og}} \cdot \text{rok}^{-1}$, w tym $16,7 \text{ kg P-PO}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$. Ponieważ odpływ z rowu opaskowego wynosił $90,1 \text{ kg P}_{\text{og}} \cdot \text{rok}^{-1}$, w tym $22,8 \text{ kg P-PO}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$, należy stwierdzić, że na odcinku rowu opaskowego wzrosła ilość wynoszonego fosforu ogólnego o $15,6 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$, a malała ilość wynoszonego fosforu fosforanowego o $23,8 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$.

W wyniku funkcjonowania układu rów opaskowy–zbiornik retencyjny, w ciągu roku hydrologicznego 2006 do Jeziora Wulpińskiego ostatecznie trafiło $165,6 \text{ kg P}_{\text{og}}$, w tym $52,4 \text{ kg P-PO}_4$. Ładunek jednostkowy fosforu ogólnego wyniesiony z całej zlewni strugi Sząbruk sięgał $0,13 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, a ładunek fosforu fosforanowego – $0,04 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Wartości te są porównywalne do wartości ładunków jednostkowych odpływających z leśnej części zlewni strugi, a nawet od nich niższe. Porównując przepływ ładunków fosforu ogólnego w zlewni strugi Sząbruk z ich dopływem do Jeziora Wulpińskiego, można zauważyć, że dopływ P_{og} ze wszystkich źródeł byłby większy o $21,5$ w roku hydrologicznym, z czego o $19,3 \text{ kg}$ w okresie wegetacyjnym i o $2,2 \text{ kg}$ poza tym okresem, gdyby na cieku nie został zlokalizowany zbiornik retencyjny (tab. 3). Zestawienia bilansowe wskazują znaczenie zbiornika retencyjnego jako bariery przechwytyjącej znaczne ilości fosforu odprowadzonego ze zlewni rolniczej, głównie w okresie wegetacyjnym.

Tabela 3. Bilans składników dopływających do Jeziora Wulpińskiego ze zlewni strugi Sząbruk
 Table 3. Balans of components flowing into Wulpińskie Lake from Sząbruk creek

Wyszczególnienie – Item	Ładunek P_{og} , $kg \cdot rok^{-1} - P_{og}$ load, $kg \cdot year^{-1}$				% redukcji ładunku dopływającego % reduction of inflowing load
	struga creek	sieci drenarskie drainage networks	dopływ do Jeziora Wulpińskiego inflow to Wulpińskie Lake	różnica (redukcja w zbiorniku) difference (due to reservoir)	
Rok hydrologiczny Hydrological year					
bez uwzględnienia zbiornika without reservoir taken into account	153,0	34,1	187,1		
ze zbiornikiem with reservoir	153,0	34,1	165,6	21,5	11,5
Poza okresem wegetacyjnym Outside vegetation period					
bez uwzględnienia zbiornika without reservoir taken into account	93,0	12,3	105,3		
ze zbiornikiem with reservoir	93,0	12,3	103,1	2,2	2,1
W okresie wegetacyjnym In vegetation period					
bez uwzględnienia zbiornika without reservoir taken into account	60,0	21,8	81,8		
ze zbiornikiem with reservoir	60,0	21,8	62,5	19,3	23,6

PODSUMOWANIE

Średnie stężenie P_{og} w wodach odpływających ze zlewni zależało od sposobu i intensywności jej użytkowania. Stężenia P_{og} były większe w przypadku zlewni rolniczych odwadnianych siecią drenarską niż w przypadku zlewni leśnej, przy czym mniejsze wartości notowano w okresie wegetacyjnym niż poza tym okresem.

W wyniku przepływu wody przez zbiornik retencyjny następował spadek stężenia fosforu ogólnego w stosunku do dopływów, natomiast w rezultacie przepływu wody przez rów opaskowy stężenie tego składnika wzrastało.

Ładunek fosforu odprowadzany z obszaru zlewni zależał od sposobu jej zagospodarowania. Największy odpływ fosforu ogólnego z jednostki powierzchni stwierdzono w zlewni rolniczej drenowanej ($0,18 \text{ kg } P_{og} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$), najmniejszy zaś w zlewni leśnej ($0,12 \text{ kg } P_{og} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$).

Obciążenie powierzchni zbiornika retencyjnego ($0,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) ładunkiem fosforu dopływającym z obszaru zlewni niemal 4-krotnie przekracza obciążenie niebezpieczne. Taka sytuacja powoduje gwałtowne przyspieszenie procesu eutrofizacji zbiornika i akumulacji w nim fosforu.

Zbiornik retencyjny pełnił rolę bariery przechwytyjącej związki fosforu spływające ze zlewni. W ciągu roku w misie zbiornika zostało zakumulowane $23,5 \text{ kg } P_{og}$, czyli $0,86 \text{ kg } P_{og}$ na 1 ha jego powierzchni.

Znaczna redukcja ilości fosforu ogólnego (o 11,5%) wskutek przechwytywania go w zbiorniku retencyjnym następowała głównie w okresie wegetacyjnym (23,6%), w pozostałej części roku zbiornik praktycznie nie zatrzymywał tego pierwiastka (redukcja o 2,1%).

PIŚMIENNICTWO

- Bechmann M.E., Berge D., Eggestad H.O., Vandsemb S.M., 2005. Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes – two long-term integrated studies from Norway. *J. Hydrol.* 304, 238–250.
- Chudyba H., Kalwasiński K., 1998. Samooczyszczanie wód. *Rolnicze ABC. Poradnik ODR i AR-T w Olsztynie* nr 3, 48.
- Czamara W., 2001. Zastosowanie zbiorników wstępnych do ochrony zbiorników retencyjnych. *Zesz. Nauk. AR Wroc., Inż. Środ.* 12, 257–265.
- Haycock N.E., Pinay G., Burt T.P., Goulding K.-W.T., 1996. Buffer zones: Current concerns and future directions. [W:] *Buffer zones: Their processes and potential in water protection*. Hertfordshire, UK, 305–312.
- Hermanowicz W., Dojlido J., Dożańska W., Koziorowski B., Zerbe J., 1999. Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków. *Arkady Warszawa*.
- Jarząbek A., 1998. Zmiany ładunku fosforanów przy przepływie przez małe zbiorniki. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 458, 389–396.
- Kajak Z., 2001. *Hydrologia – limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych*. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
- Koc J., 1998. Wpływ intensywności użytkowania terenu na wielkość odpływu biogenów z obszarów rolniczych. *Rocz. AR Poznań, Rolnictwo* 52, 101–106.
- Koc J., Nowicki Z., 1997. Czynniki kształtujące chemizm wód oczek w środowisku rolniczym. *II Ogólnopol. Konf. Nauk. „Przyrodnicze i Techniczne Problemy Ochrony i Kształtowania Środowiska Rolniczego”*, 4–5.09.1997, Poznań, 91–97.

- Koc J., Skwierawski A., 2004. Fosfor w wodach obszarów rolniczych. Zesz. Nauk. AE Wroc., Chemia 1017, 165–182.
- Koc J., Tucholski S., Skonieczek P., 2004. Znaczenie zbiornika wstępnego w ochronie jeziora przed splywem zanieczyszczeń ze zlewni rolniczo-leśnej. Cz. I. Ogólne wskaźniki zanieczyszczeń. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 499, 135–142.
- Niemirycz E., Taylor R., Makowski Z., 1993. Zagrożenia substancjami biogennymi wód powierzchniowych. Bibl. Monitor. Środ., PIOŚ Warszawa.
- Ryszkowski L., 1992. Rolnictwo a zanieczyszczenia obszarowe środowiska. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 4, 3–14.
- Sapek A., 1996. Udział rolnictwa w zanieczyszczeniu wody składnikami nawozowymi. Zesz. Eduk. 1, IMUZ Falenty, 9–33.
- Smoroń S., 1998. Przenikanie substancji biogennych ze źródeł rolniczych do środowiska – czynnik eutrofizacji wód powierzchniowych. Zesz. Eduk. 5, IMUZ Falenty, 57–70.
- Stańczykowska A., 1997. Ekologia naszych wód. WSiP Warszawa.
- Szymańska H., 1992. Ochrona wód przed rolniczymi zanieczyszczeniami przestrzennymi. [W:] Problemy zanieczyszczenia i ochrony wód powierzchniowych – dziś i jutro. Wyd. UAM, ser. Biologia 49, 317–331.
- Vollenweider R.A., 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters. OECD Paris.

ROLE OF STORAGE RESERVOIR IN PROTECTING LAKE AGAINST PHOSPHORUS INFLOW FROM AGRICULTURAL CATCHMENT

Abstract. Studies carried out in the hydrological year 2006 aimed at investigating the impact that a storage reservoir, built on a watercourse flowing into a lake, makes on the phosphorus inflow from an agricultural catchment to the lake. Hydrological measurements were made once a week on the watercourse, and water samples for laboratory analyses were collected at two-month intervals at the sites of flow measurement. It was found that the mean concentrations of total phosphorus in the outflow from the catchment depended on the pattern and intensity of land use, and were higher in a drained agricultural catchment than in an afforested catchment. The total phosphorus concentrations were lower in the growing period than outside of this season. The phosphorus load carried away from the unit area of catchment depended on the land use pattern, being higher in the drained agricultural catchment ($0.18 \text{ kg P}_{\text{tot}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$) and lower in the afforested catchment ($0.12 \text{ kg P}_{\text{tot}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$). The load of phosphorus delivered from the catchment per unit area of the reservoir surface ($0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) is almost 4 times heavier than the maximum allowable value, which results in accelerated eutrophication and accumulation processes. The reservoir forms a barrier that traps the phosphorus compounds running off from the catchment. The amount of P_{tot} accumulated during the year 2006 in the reservoir basin was 21.5 kg (i.e. $0.86 \text{ kg P}_{\text{tot}} \cdot \text{ha}^{-1}$), with most of it being retained in the growing period.

Key words: lake protection, storage reservoir, nutrients, phosphorus, agricultural catchment

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 3.09.2008