

Wojciech P. Balcerzak, Stanisław M. Rybicki

## Ocena stopnia zagrożenia wody eutrofizacją na przykładzie zbiornika zaporowego w Świnnej Porębie

Rzeki podgórskie charakteryzują się znaczną nierównomiernością przepływu, co powoduje m.in. zagrożenie powodziowe oraz stwarza wiele trudności w racjonalnym wykorzystaniu zasobów wodnych. Aby to niekorzystne zjawisko ograniczyć buduje się zbiorniki zaporowe, co z kolei wpływa na zmianę jakości wody. Jeżeli woda ze zbiornika lub z rzeki poniżej zapory będzie ujmowana przez przedsiębiorstwo wodociągowe, wówczas należy oszacować, w jakim stopniu zmieni się jej jakość – a co za tym idzie – jak wpłynie budowa zbiornika zaporowego na sposób oczyszczania wody i jej jakość u odbiorców. W przypadku zbiorników zaporowych istotnym zagrożeniem są skutki eutrofizacji, powodujące trudności technologiczne w procesie oczyszczania wody.

### Charakterystyka obszaru badań

Przedmiotem badań była woda ze Skawy oraz jej dopływów powyżej będącego w końcowej fazie budowy zbiornika w Świnnej Porębie. Analizie poddano podstawowe grupy zanieczyszczeń (tzw. ogniska zanieczyszczeń), które – w świetle światowych [1] i krajowych [2, 3] doświadczeń – mogą mieć szczególnie (niekorzystny) wpływ na jakość wody po oddaniu zbiornika do eksploatacji. Po przeanalizowaniu danych z innych krajów [4–6], które rozwiązywały podobne problemy stwierdzono, że przy możliwym do osiągnięcia poziomie dokładności obliczeń, zasadne jest potraktowanie zanieczyszczeń o charakterze liniowym, jako niemających istotnego wpływu na jakość wody, a skoncentrowanie się na zanieczyszczeniach punktowych i obszarowych. Szacunkowa ilość fosforu odprowadzanego w ściekach wynosi ok. 100 tP/a, co stanowi ok. 25% ładunku fosforu powstającego w całej zlewni. Na obszarze objętym modelowaniem przeanalizowano oczyszczalnie ścieków o przepustowości powyżej 0,8 m<sup>3</sup>/d. Sumaryczna przepustowość nominalna 29 oczyszczalni wynosi ok. 5 tys.m<sup>3</sup>/d, przy czym największa ma przepustowość 954 m<sup>3</sup>/d, trzy po ok. 600 m<sup>3</sup>/d, cztery ponad 200 m<sup>3</sup>/d, a 20 obiektów to oczyszczalnie małe, o przepustowości od kilku do kilkunastu m<sup>3</sup>/d.

### Obliczenia modelowe

Podstawę do obliczeń modelowych stanowiła metoda Vollenweidera, która określa ilościową zależność między zewnętrznym obciążeniem zbiornika wodnego ładunkiem

związków biogenych a stanem trofii jego wód. Dopuszczalne i niebezpieczne obciążenie fosforem określa się z następujących zależności [7]:

$$L_b(P) = 25z^{0,6} \quad (1)$$

$$L_n(P) = 50z^{0,6} \quad (2)$$

w których:

$L_b(P)$  – dopuszczalne obciążenie fosforem, mgP/m<sup>2</sup>a

$L_n(P)$  – niebezpieczne obciążenie fosforem, mgP/m<sup>2</sup>a

$z$  – średnia głębokość zbiornika, m

25 – współczynnik granicznego obciążenia zbiorników oligomezotroficznych

50 – współczynnik granicznego obciążenia zbiorników mezoeutroficznych

W tabeli 1 podano wartości dopuszczalnego i niebezpiecznego zewnętrznego obciążenia zbiorników wodnych związkami fosforu wg Vollenweidera [8].

Tabela 1. Dopuszczalne i niebezpieczne zewnętrzne obciążenie zbiorników wodnych związkami fosforu  
Table 1. Admissible and hazardous external loads of phosphorus compounds

| Średnia głębokość zbiornika<br>m | Obciążenie fosforem, gP/m <sup>2</sup> a |               |
|----------------------------------|--|---------------|
|                                  | dopuszczalne                             | niebezpieczne |
| <5                               | 0,07                                     | 0,13          |
| 5+10                             | 0,10                                     | 0,20          |
| >10                              | 0,25                                     | 0,50          |

Ustalenie doświadczalnej zależności między zewnętrznym obciążeniem fosforem a jego zawartością w wodzie zbiornika oparto na następującym bilansie masy [9]:

$$P = (\dot{L} - B)/Q \quad (3)$$

w którym:

$P$  – zawartość fosforu w wodzie, gP/m<sup>3</sup>

$\dot{L}$  – ładunek fosforu docierający do zlewni, gP/a

$B$  – ładunek fosforu w osadach dennych, gP/a

$Q$  – natężenie odpływu wody ze zbiornika, m<sup>3</sup>/a

Przyjęto założenie przeprowadzenia obliczeń według modelu stanu ustalonego. Wybrano metodę obliczeniową Vollenweidera z modyfikacją podaną w pracy [7] oraz powszechnie przyjmowane wartości kryterialne [2]. Podział zlewni do obliczeń modelowych oparto na zasadzie wyznaczania obszarów cząstkowych o zbliżonej liczbie ludności i gospodarce typu rolnego. Po przeprowadzeniu obliczeń bilansowych stwierdzono, że ładunek fosforu wprowadzany

w poszczególnych obszarach wyjściowych różnił się zarówno co do wartości liczbowych, jak i proporcji udziału, jednak utrzymano taki podział, jako najlepiej opisujący rzeczywistą charakterystykę analizowanej zlewni. Wyniki pokazano na rysunku 1 – widać, że taki podział odzwierciedla różne pochodzenie związków fosforu wprowadzanych w poszczególnych obszarach zlewni.

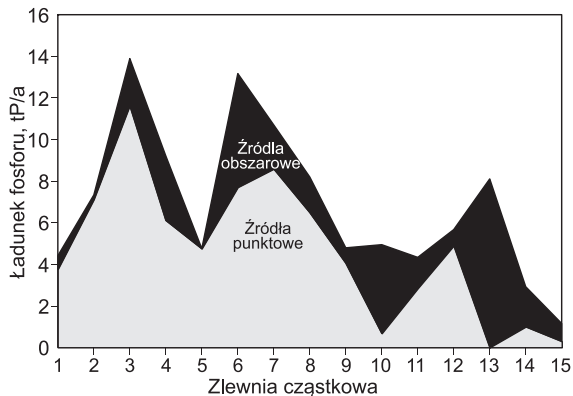


Fig. 1. Udział zlewni częściowych w całkowitym ładunku fosforu wprowadzanego do wód

Fig.1. Contribution of the subbasins to the total phosphorus load discharged into the reservoir water

Przeanalizowano dwa warianty piętrzenia zbiornika:

– wariant I: pierwotny w analizowanej inwestycji, który charakteryzował się większą pojemnością zbiornika, a zatem mniejszą częstością wymiany wody oraz większą głębokością piętrzenia,

– wariant II: skierowany do realizacji, który cechował się mniejszą pojemnością czynną o ok. 25% i mniejszą głębokością o ok. 15%.

Syntetyczne wyniki obliczeń dotyczących obu wariantów modelu zbiornika przedstawiono w tabeli 2. Obliczenia uwzględniające różne wartości rocznego dopływu wody do zbiornika wykazały, że przyjęcie wariantu II – mimo częstszych wymian wody – skutkować będzie większym ryzykiem wystąpienia zjawisk eutrofizacyjnych.

## Dyskusja wyników

Rezultaty obliczeń wykazały, że ryzyko eutrofizacji w analizowanym zbiorniku jest bardzo realne, niezależnie od przyjętego wariantu obliczeniowego. Obliczenia te wskazują także na kilka znaczących czynników:

– wariant II (realizowany) jest bardziej wrażliwy na eutrofizację niż wariant pierwotny,

– działania na rzecz skutecznego oczyszczania ścieków są najbardziej właściwe (z inżynierskiego punktu widzenia) w celu zmniejszenia zakresu eutrofizacji i skutków tego zjawiska,

– niezależnie od przyjętych metod działania nie można całkowicie uniknąć ryzyka eutrofizacji, lecz jedynie ograniczyć zasięg tego zjawiska,

– w tzw. latach suchych należy się liczyć ze zjawiskiem hipertrofii.

Obliczenia sprawdzające przeprowadzono w oparciu o metodę Johnesa [6], która została opracowana na podstawie szczegółowej analizy zlewni zbiornika o zbliżonej strukturze zagrożeń wynikających z dopływu fosforu od mieszkańców oraz z działalności rolniczej i hodowli.

Na potrzeby prognozy eutrofizacji zaproponowano przyjęcie trzech scenariuszy usuwania związków fosforu ze ścieków:

– scenariusz optymistyczny: 95% mieszkańców zlewni jest podłączonych do kanalizacji, a zawartość związków fosforu w odpływie z oczyszczalni ścieków nie przekracza  $1 \text{ gP/m}^3$ ,

– scenariusz realistyczny: 90% mieszkańców zlewni jest podłączonych do kanalizacji, a zawartość związków fosforu od 50% mieszkańców w odpływie z oczyszczalni ścieków nie przekracza  $1 \text{ gP/m}^3$ , natomiast od pozostałych 40% nie przekracza  $2 \text{ gP/m}^3$ ,

– scenariusz minimalnych inwestycji: 80% mieszkańców zlewni jest podłączonych do kanalizacji, a zawartość związków fosforu od 40% mieszkańców w odpływie z oczyszczalni ścieków nie przekracza  $1 \text{ gP/m}^3$ , natomiast od pozostałych 40% nie przekracza  $5 \text{ gP/m}^3$ .

Tabela 2. Obliczony stopień zanieczyszczenia wód zbiornika związkami fosforu  
Table 2. Calculated reservoir water pollution with phosphorus compounds

| Dopływ do zbiornika<br>mln $\text{m}^3/\text{a}$ | Ładunek fosforu ogólnego, tP/a |             |         | Wariant I, $\text{mgP/m}^3$ |                   | Wariant II, $\text{mgP/m}^3$ |                   |
|--|--------------------------------|-------------|---------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
|  | ze ścieków                     | z rolnictwa | łącznie | obliczenia                  | model skorygowany | obliczenia                   | model skorygowany |
| 250  | 12,53                          | 8,4         | 20,93   | 48,2                        | 40,5              | 51,1                         | 42,9              |
| 250  | 12,53                          | 14          | 26,53   | 61,1                        | 51,3              | 64,8                         | 54,4              |
| 250  | 16,7                           | 8,4         | 25,1    | 57,8                        | 48,5              | 61,3                         | 51,5              |
| 250  | 16,7                           | 14          | 30,7    | 70,7                        | 59,4              | 75,0                         | 63,0              |
| 250  | 39,67                          | 8,4         | 48,07   | 110,7                       | 92,9              | 117,4                        | 98,6              |
| 250  | 39,67                          | 14          | 53,67   | 123,5                       | 103,8             | 131,1                        | 110,1             |
| 360  | 12,53                          | 8,4         | 20,93   | 36,0                        | 30,2              | 38,0                         | 31,9              |
| 360  | 12,53                          | 14          | 26,53   | 45,6                        | 38,3              | 48,1                         | 40,4              |
| 360  | 16,7                           | 8,4         | 25,1    | 43,2                        | 36,3              | 45,5                         | 38,2              |
| 360  | 16,7                           | 14          | 30,7    | 52,8                        | 44,4              | 55,7                         | 46,8              |
| 360  | 39,67                          | 8,4         | 48,07   | 82,7                        | 69,5              | 87,2                         | 73,2              |
| 360  | 39,67                          | 14          | 53,67   | 92,3                        | 77,6              | 97,3                         | 81,7              |
| 555  | 12,53                          | 8,4         | 20,93   | 25,2                        | 21,2              | 26,4                         | 22,2              |
| 555  | 12,53                          | 14          | 26,53   | 32,0                        | 26,9              | 33,5                         | 28,1              |
| 555  | 16,7                           | 8,4         | 25,1    | 30,3                        | 25,4              | 31,6                         | 26,6              |
| 555  | 16,7                           | 14          | 30,7    | 37,0                        | 31,1              | 38,7                         | 32,5              |
| 555  | 39,67                          | 8,4         | 48,07   | 57,9                        | 48,7              | 60,6                         | 50,9              |
| 555  | 39,67                          | 14          | 53,67   | 64,7                        | 54,3              | 67,7                         | 56,8              |

W przypadku poszczególnych scenariuszy obliczono ładunek fosforu odprowadzany w ściekach oczyszczonych:

- scenariusz optymistyczny: 12,5 tP/a,
- scenariusz realistyczny: 16,7 tP/a,
- scenariusz minimalnych inwestycji: 39,7 tP/a.

Obliczona na tej podstawie prognozowana zawartość fosforu w wodzie zgromadzonej w zbiorniku wyniosła:

- przy odpływie 250 mln m<sup>3</sup>/a (rok suchy): 131 mgP/m<sup>3</sup>,
- przy odpływie 360 mln m<sup>3</sup>/a (rok średni): 98 mgP/m<sup>3</sup>,
- przy odpływie 555 mln m<sup>3</sup>/a (rok mokry): 68 mgP/m<sup>3</sup>.

Z opracowanej prognozy eutrofizacji wynika, że ryzyko wystąpienia tego procesu, pogarszającego w istotny sposób jakość wody zgromadzonej w zbiorniku zaporowym w Świnnej Porębie, jest realne, nawet przy założeniu wdrożenia programów racjonalizacji oczyszczania ścieków.

## Wnioski

◆ Prognoza zawartości związków fosforu w wodzie zbiornika zaporowego w Świnnej Porębie, w oparciu o model stanu ustalonego, wykazała duże ryzyko zagrożenia tego zbiornika eutrofizacją, a w przypadku tzw. lat suchych należy nawet liczyć się z wystąpieniem zjawiska hipertrofii.

◆ Doświadczenia uzyskane podczas eksploatacji zbiorników o podobnych, jak w przypadku zbiornika w Świnnej Porębie, problemach odprowadzania ścieków oczyszczonych w ilościach zagrażających jakości wody zgromadzonej w zbiorniku wykazują, że najbardziej bezpiecznym rozwiązaniem jest odprowadzanie ścieków poniżej zbiornika zaporowego, jednak w omawianym przypadku nie było ono rozważane.

## LITERATURA

1. S. BRIGAULT, V. RUBAN: External phosphorus loads estimates and P-budget for the hydroelectric reservoir of Bort-les-Orgues, France. *Water Air and Soil Pollution* 2000, Vol. 119, pp. 91–103.
2. S.M. RYBICKI: Analiza wpływu zabudowy hydrotechnicznej na możliwość wykorzystania jezior zaporowych do zaopatrzenia w wodę. Mat sem. projektantów wodociągów, PZITS, Szczyrk 1987, ss. 147–164.
3. J. PAWEŁEK, M. SPYTEK: Substancje biogenne w dopływach do Zbiornika Dobczyckiego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 2005, nr 4, ss. 99–113.
4. L. HAKANSON: On the principles and factors determining the predictive success of ecosystem models, with a focus on lake eutrophication models. *Ecological Modelling* 1999, Vol. 121, pp. 139–160.
5. S. SCHAEFER, M. ALBER: Temporal and spatial trends in nitrogen and phosphorus inputs to the watershed of the Altamaha River, Georgia USA. *Biogeochemistry* 2007, Vol. 86, pp. 231–249.
6. J. VUORENMAA, S. REKOLAINEN, A. LEPISTÖ, K. KENTTÄMIES, P. KAUPPILA: Losses of nitrogen and phosphorus from agricultural and forest areas in Finland during the 1980s and 1990s. *Environmental Monitoring and Assessment* 2002, Vol. 76, No. 2, pp. 213–248.
7. M. GIERCUSZKIEWICZ-BAJTLIK: Prognoza zmian jakości wód stojących. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa 1990.
8. Z. KAJAK: Hydrobiologia–Limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
9. P.J. JOHNES: Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modeling approach. *Journal of Hydrology* 1996, Vol. 183, pp. 323–349.

**Balcerzak, W.P., Rybicki, S.M. Assessment of Water Eutrophication Risk Exemplified by the Swinna Poreba Dam Reservoir. *Ochrona Środowiska* 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 67–69,**

**Abstract:** A major risk inherent in dam reservoirs is eutrophication, which raises technological problems during treatment of the water taken in from the reservoir or drawn from the river downstream from the reservoir. Based on the data obtained for the basin of the dam reservoir under construction in Swinna Poreba, model computations were carried out to determine the content of phosphorus compounds for the water of the intended artificial lake. The calculated value of the predicted phosphorus content of the water stored

in the reservoir averaged 131 mgP/m<sup>3</sup>, 98 mgP/m<sup>3</sup> and 68 mgP/m<sup>3</sup> in a dry year, average year and wet year, respectively. The results of those computations make it clear that the eutrophication risk for the water stored in the reservoir is high, and that, furthermore, the occurrence of hypertrophy has to be expected during dry years. Experience gained during operation of artificial reservoirs of a similar structure, which face the problem of discharging treated wastewater in amounts endangering the quality of the water stored in the reservoir, demonstrate that the safest solution to the problem is discharge of the wastewater downstream from the dam.

**Keywords:** Water quality control, phosphorus content, eutrophication, water quality modeling.