

Edyta Kiedrzyńska, Adam Józwik

ANALIZA PROCESU TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO NA TLE DYNAMIKI PRZEPIŃWÓW RZEKI PILICY Z WYKORZYSTANIEM METOD STATYSTYCZNYCH

Streszczenie

Badania realizowane w zlewni rzeki Pilicy, w ramach projektów badawczych KBN i środków ONZ, przyczyniają się do rozpoznania dynamiki procesu zasilania i eutrofizacji Zbiornika Sulejowskiego, a także służą opracowaniu naukowych podstaw ekohydrologicznego podejścia do ochrony zasobów wodnych.

Artykuł przedstawia analizę procesu transportu rumowiska unoszonego na tle dynamiki przepływu rzeki Pilicy, pod kątem rozpoznania procesu zasilania Zbiornika Sulejowskiego materią mineralną i organiczną z wykorzystaniem metod analizy statystycznej. Metody te pozwalają na określenie powiązań i zależności pomiędzy wynikami opisującymi transport rumowiska unoszonego systemem rzeczonym a przepływami niskimi, średnimi oraz wezbraniowymi.

Słowa kluczowe: Pilica, transport rumowiska unoszonego, statystyczna analiza danych, zasilanie Zbiornika Sulejowskiego, eutrofizacja

WSTĘP

Eutrofizacja jest jednym z podstawowych zagrożeń dla jakości wód zbiorników zaporowych. Spowodowana jest dostającym się wraz z dopływami dużym ładunkiem pierwiastków biogennych, głównie fosforu i azotu, które transportowane są z rumowiskiem unoszonym. Postępujący proces eutrofizacji prowadzi najczęściej do występowania

wysokiej biomasy fitoplanktonu, w szczególności zaś zakwitów sinic, które odpowiedzialne są za uwalnianie związków toksycznych o często silniejszym działaniu kancerogennym niż niektóre pestycydy [Mankiewicz i in. 2000]. W Sulejowskim Zbiorniku Zaporowym, który stanowi zapasowe źródło wody pitnej dla aglomeracji łódzkiej oraz pełni ważną funkcję rekreacyjną w regionie, od kilkunastu lat zakwity sinic są regularnie obserwowane.

Polska jako państwo członkowskie Unii Europejskiej zobowiązana jest do wdrożenia Dyrektyw Unijnych (m.in. Dyrektywy 2000/60/EC), których celem jest osiągnięcie dobrego stanu ekologicznego środowiska, odpowiadającego normom państw unijnych.

Badania realizowane w zlewni rzeki Pilicy w ciągu ostatnich kilku lat, w ramach projektów badawczych KBN i środków ONZ, przyczyniają się do rozpoznania dynamiki procesu zasilania [Wagner, Zalewski 2000] i eutrofizacji Zbiornika Sulejowskiego [Tarczyńska i in. 2001; Jurczak i in. 2005] oraz opracowania naukowych podstaw ekohydrologicznego podejścia [Zalewski 2000] do ochrony zasobów wodnych z wykorzystaniem terasy zalewowej doliny rzecznej [Kiedrzyńska i in. 2004; Magnuszewski i in. 2005; Kiedrzyńska i in. w druku].

Artykuł ten przedstawia analizę procesu transportu rumowiska unoszonego na tle dynamiki przepływu rzeki Pilicy, pod kątem rozpoznania procesu zasilania Zbiornika Sulejowskiego materiałą mineralną i organiczną z wykorzystaniem metod analizy statystycznej. Metody te pozwalają na określenie zależności pomiędzy transportem rumowiska unoszonego a przepływem w okresach niżówek oraz wezbrań.

TEREN BADAŃ

Pilica jest średniej wielkości rzeką w Polsce centralnej i stanowi jeden z głównych dopływów nizinnego Zbiornika Sulejowskiego. Długość całej rzeki wynosi 342 km, a powierzchnia zlewni to 9258 km². Użytki rolne stanowią 60% powierzchni zlewni, wynikiem czego jest intensywny proces zasilania rzeki i zbiornika ładunkiem związków biogennych oraz zawiesiny. Stężenie fosforu całkowitego w rzece waha się od 100 µg dm⁻³ do 300 µg dm⁻³, ale podczas wezbrań może wynosić nawet 699 µg dm⁻³.

MATERIAŁY I METODY

Analiza przepływów. Analiza przebiegu zjawisk hydrologicznych dla Pilicy prowadzona była na podstawie danych z posterunku wodowskazowego IMGW w Sulejowie-Kopalni na 161,3 km biegu rzeki. Okres badań obejmował lata hydrologiczne 2002–2004.

Analiza rumowiska unoszonego. Próby wody z Pilicy w celu określenia koncentracji rumowiska unoszonego pobierane były (jednopunktowo) batometrem PIHM, o powolnym napełnianiu. Koncentracja rumowiska unoszonego w każdej próbie była określana poprzez filtrowanie wody o znanej objętości (v) przez sącdek Whatman GF/C o masie M_0 . Następnie ważono sącdek wraz z rumowiskiem po uprzednim wysuszeniu w cieplarni laboratoryjnej w temperaturze 105°C (M_1) oraz po spaleniu w piecu muflowym w temperaturze 550°C (M_2). Koncentracje [mg dm^{-3}] rumowiska całkowitego ($U\text{-cał.}$) oraz frakcji mineralnej ($U\text{-min.}$) i organicznej ($U\text{-org.}$) określano według wzorów:

$$U\text{-cał.} = (M_1 - M_0) / v; \quad U\text{-min.} = (M_2 - M_0) / v; \quad U\text{-org.} = U\text{-cał.} - U\text{-min.}$$

Analiza statystyczna danych. Analizowane zależności dotyczą par zmiennych, z których bądź to obie mają charakter ilościowy, bądź par zmiennych, w których jedna ze zmiennych ma charakter jakościowy (oznacza grupę), a druga jest zmienną ilościową. Do analizy ww. zależności zastosowane zostały metody nieparametryczne statystyczne, odpowiednio korelacja rang Spearmana oraz test Kruskala-Wallisa, gdyż dane ilościowe nie miały rozkładu normalnego, co jest jednym z głównych warunków stosowania testów parametrycznych.

WYNIKI

Analiza częstości i częstotliwości przepływów. Dla Pilicy (profil Sulejów-Kopalnia) w latach 2002–2004 przepływy główne drugiego stopnia kształtowały się następująco: NNQ $14,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, SSQ $37,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, WWQ $106,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Przepływy wezbraniowe ($Q \Rightarrow 40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), kiedy przekroczony był stan ostrzegawczy wynoszący 180 cm, utrzymywały się średnio przez 138 dni w roku (38% czasu), a łącznie podczas trzech lat badań trwały przez 413 dni. Przepływy średnie oraz niskie poniżej przyjętej wartości granicznej, wystąpiły średnio przez 228 dni w roku (62% czasu), a łącznie w ciągu trzech lat przez 683 dni (62%).

Koncentracje rumowiska unoszonego. Koncentracje rumowiska unoszonego kształtowały się w przedziale od min. 0,60 mg dm⁻³ (luty 2004) do max. 63,30 mg dm⁻³ (listopad 2003). Dla średniej wartości przepływu w tym okresie, która wynosiła 37,07 m³s⁻¹, średnia wartość koncentracji rumowiska unoszonego (U-cał.) w Pilicy wynosiła 9,07 mg dm⁻³. Koncentracja frakcji mineralnej (U-min.) stanowiła średnio 4,78 mg dm⁻³ (53%), a frakcji organicznej (U-org.) 4,29 mg dm⁻³ (47%).

CHARAKTERYSTYKA TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO - ANALIZY STATYSTYCZNE

Zależność koncentracji rumowiska od przepływu. Analiza dużej liczby danych (N = 104) z okresu 2002–2004 nie wykazała statystycznie istotnej zależności pomiędzy koncentracją rumowiska unoszonego a przepływem (tab. 1).

Tabela 1. Analiza zależności pomiędzy koncentracją rumowiska unoszonego (U-min., U-org., U-cał.) a przepływami (Q) Pilicy (2002–2004).

Test Spearmana

Table 1. Analysis of correlations between concentration of suspended sediment load and discharges (Q) of the Pilica River (2002–2004 yrs).

Spearman's Test

| YEARS 2002-2004 | N | R | p-level |
|--------------------|-----|-------|---------|
| Q vs U-min. | 104 | -0,16 | 0,0959 |
| Q vs U-org. | 104 | 0,14 | 0,1521 |
| Q vs U-cał. | 104 | -0,09 | 0,3629 |

Zależność koncentracji rumowiska od przepływu w okresie nízówek oraz wezbrań. Wykonano również analizy zależności pomiędzy koncentracją rumowiska unoszonego a przepływem zależnie od sytuacji hydrologicznej. Podczas stabilnych warunków hydrologicznych (średnich i niskich przepływów) istniała słaba (R = 0,32) jednak istotna statystycznie (p = 0,0058) korelacja pomiędzy przepływem i koncentracją frakcji organicznej rumowiska unoszonego (tab. 2). Natomiast w okresie wezbrań wystąpiła ujemna korelacja pomiędzy przepływem i koncentracją całkowitego rumowiska unoszonego (R = -0,37; p = 0,0367). Uszczegóławiając analizy, okres wezbraniowy podzielono na fazę wznoszenia oraz fazę recesji wezbrania. Wyniki pokazały, iż jedynie w okresach wznoszenia wezbrania istniały silne

ujemne korelacje pomiędzy przepływem a koncentracją frakcji mineralnej i całkowitej rumowiska unoszonego. Wyrażone były one odpowiednio współczynnikiem $R = -0,60$ i $R = -0,59$, a ich poziom istotności nie przekraczał odpowiednio $p = 0,0221$ i $p = 0,0274$ (tab. 2). Dla fazy recesji wezbrań nie ustalono żadnych istotnych statystycznie zależności.

Tabela 2. Analiza zależności pomiędzy koncentracją rumowiska unoszonego (U-min., U-org., U-cał.) a przepływami (Q) Pilicy w okresach przepływów niskich i średnich oraz wezbraniowych, a także podczas wznoszenia i recesji fali wezbraniowej (2002–2004). Test Spearmana

Table 2. Analysis of correlations between concentration of suspended sediment load (U-min., U-org., U-tot.) and discharges (Q) of the Pilica River (2002–2004 yrs) during low, mean and high discharges and also during rise and recession of the flooding. Spearman's Test

| YEARS 2002-2004 | N | R | p-level |
|---------------------------------------|----|-------|---------|
| - for low and mean discharges | | | |
| Q vs U-min. | 72 | -0,04 | 0,7563 |
| Q vs U-org. | 72 | 0,32 | 0,0058 |
| Q vs U-cał. | 72 | 0,11 | 0,3592 |
| - for flood discharges | | | |
| Q vs U-min. | 32 | -0,34 | 0,0579 |
| Q vs U-org. | 32 | -0,28 | 0,1214 |
| Q vs U-cał. | 32 | -0,37 | 0,0367 |
| - for rise stage of the flooding | | | |
| Q vs U-min. | 14 | -0,60 | 0,0221 |
| Q vs U-org. | 14 | -0,34 | 0,2398 |
| Q vs U-cał. | 14 | -0,59 | 0,0274 |
| - for recession stage of the flooding | | | |
| Q vs U-min. | 18 | -0,28 | 0,2675 |
| Q vs U-org. | 18 | -0,30 | 0,2215 |
| Q vs U-cał. | 18 | -0,33 | 0,1859 |

Zależność koncentracji rumowiska od pór roku. Analizy zależności koncentracji poszczególnych frakcji rumowiska unoszonego od pór roku wykazały statystycznie istotne sezonowe różnice w koncentracji frakcji organicznej (U-org., $p = 0,0123$) i frakcji całkowitej rumowiska (U-cał., $p = 0,0243$). Natomiast sezonowe różnice koncentracji frakcji mineralnej rumowiska nie były statystycznie istotne (tab. 3).

Tabela 3. Analiza zależności koncentracji rumowiska unoszonego (U-min., U-org., U-cał.) w wodach Pilicy od pór roku (na podstawie średnich miesięcznych z lat 2002–2004). Test Kruskala-Wallisa ($p < 0.05$)

Table 3. Analysis of correlations between the concentration of suspended sediment load (U-min., U-org., U-tot.) in the Pilica River and various seasons (period 2002–2004). Kruskal-Wallis'es Test ($p < 0.05$)

| YEARS 2002–2004 | | U-min. | | U-org. | | U-cał. | |
|--------------------|---|--------------------|--------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
| SEASONS | N | Sum of ranks | Mean concentrations [mg dm ⁻³] | Sum of ranks g | Mean concentrations [mg dm ⁻³] | Sum of ranks | Mean concentrations [mg dm ⁻³] |
| Autumn | 9 | 111 | 4,4 | 79 | 2,6 | 86 | 7,0 |
| Winter | 9 | 164 | 4,4 | 217 | 5,6 | 195 | 10,3 |
| Spring | 9 | 188 | 4,9 | 184 | 4,9 | 173 | 9,8 |
| Summer | 9 | 203 | 5,3 | 186 | 5,8 | 212 | 11,1 |
| | | p=0.1804 | 4,8 | P = 0.0123 | 4,7 | P = 0.0243 | 9,6 |

DYSKUSJA

Wielkość ładunku pierwiastków biogennych oraz materii mineralnej i organicznej dopływających do ekosystemów wodnych zależy od geomorfologii i sposobu zagospodarowania zlewni oraz od charakterystyki klimatycznej regionu i parametrów hydrologicznych rzek. Spodziewać się można, iż nasilające się obecnie procesy degradacji krajobrazu oraz przewidywane zmiany klimatu wywrą znaczący wpływ na jakość zasobów wodnych [Wagner-Łotkowska 2002].

Sytuacja ta wymaga stworzenia solidnych naukowych podstaw zarządzania i ochrony wód śródlądowych, poprzedzonych szczegółowym monitoringiem parametrów fizycznych i chemicznych. Ze względu na to, iż rumowisko unoszone jest jednym z głównych źródeł fosforu, monitoring jego transportu winien być prowadzony ciągle, natomiast analiza wyników i wnioskowanie powinno być oparte na statystycznej analizie danych.

Koncentracje i ładunki rumowiska transportowanego przez rzekę są zmienne w czasie. W zlewniach o dużym udziale obszarów użytkowanych rolniczo, wezbrania rzek o umiarkowanym natężeniu niosą największe koncentracje rumowiska w pierwszej fazie wezbrania [Wagner-Łotkowska 2002]. Jak pokazują powyższe wyniki, taką sytuację obserwowano w Pilicy w okresie badań 2002–2004. Podczas fazy recesji wezbrania następuje spadek koncentracji, a zależność od przepływu przestaje być istotna statystycznie.

Jednym ze sposobów ograniczenia zasilania zbiorników ładunkiem rumowiska unoszonego, a wraz z nim ładunkiem związków biogennych jest ich retencja na terasach zalewowych dolin rzecznych podczas wezbrań. Wówczas ma miejsce stagnacja mas wody na równinie zalewowej, a wraz z nią sedymentacja osadu [Kiedrzyńska i in. 2004; Magnuszewski i in. 2005]. Efektywne wykorzystanie tego procesu do oczyszczania wód wezbraniowych na terasie zalewowej wymaga jednak dalszych badań, w celu rozpoznania dynamiki transportu rumowiska w zależności od zmieniających się warunków hydrologicznych i meteorologicznych.

WNIOSKI

1. Podczas niskich przepływów istnieje statystyczna zależność pomiędzy przepływem i koncentracją frakcji organicznej rumowiska unoszonego.

2. W okresie wezbrań wystąpiła ujemna korelacja pomiędzy przepływem i całkowitym stężeniem rumowiska unoszonego.

3. Podczas wezbrań, w fazie wznoszenia fali istniała silna ujemna zależność pomiędzy przepływem a koncentracją frakcji mineralnej oraz całkowitej rumowiska unoszonego, co oznacza, że wraz ze wzrostem przepływu koncentracja tych frakcji rumowiska maleje. Natomiast, podczas wezbrań w fazie recesji fali nie wystąpiły żadne istotne statystycznie zależności.

PODZIĘKOWANIA

Badania były finansowane w ramach projektu MNiI - 2 PO4F 053 28 oraz Projektu Demonstracyjnego „Application of Ecohydrology and Phytotechnologies for Water Resources Management and Sustainable Development”, realizowanego pod auspicjami UNESCO i UNEP.

BIBLIOGRAFIA

- Jurczak T., Tarczyńska M., Izydorczyk K., Mankiewicz J., Zalewski M., Meriluoto J. *Elimination of microcystins by water treatment process-examples from Sulejow Reservoir*. Poland. 2005. *Water Research* 39, s. 2394–2406.
- Kiedrzyńska E., Wagner-Łotkowska I., Zalewski M. *Quantification of phosphorus retention efficiency by floodplain vegetation and management strategy for an eutrophic reservoir restoration*. (w druku) *Wetlands*.

- Kiedrzyńska E., Wagner-Łotkowska I., Zalewski M. *Ecohydrology and Phytotechnology concepts as a starting point for the research on the use the Pilica River floodplain as biofilter for flood waters*. Scientific Survey of the Faculty of Engineering and Environmental Science Warsaw Agricultural University. 2004, s. 294–308.
- Magnuszewski A., Kiedrzyńska E., Wagner-Łotkowska I., Zalewski M. Immobilising of Sediments in a Lowland River Floodplain. In: Altınakar M. S., Czernuszenko W., Rowiński P. M., Wang S. S. Y. (Eds.). *Computational Modeling for the Development of Sustainable Water-Resources Systems in Poland. US-Poland Technology Transfer Program*. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. Monographic Volume E-5 (387). 2005, s. 239–260.
- Mankiewicz J., Walter Z., Tarczyńska M., Zalewski M., Fladmark K.E., Doskeland S. O. *Apoptotic effect of cyanobacterial blooms collected from Polish water reservoirs*. Int. J. Occup. Med. Environ. Health. 2000. vol. 13, no. 4, s. 335–344.
- Tarczyńska, M., Romanowska-Duda Z., Jurczak T., Zalewski M. *Toxic cyanobacterial blooms in a drinking water reservoir-causes, consequences and management strategy*. Water Science and Technology: Water Supply 2001. 1(2), s. 237-246.
- Wagner I., Zalewski M. *Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in lowland reservoir – consequences for restoration*. Special Issue. *Ecological Engineering* 16, 2000. s. 79–90.
- Wagner-Łotkowska I. *Raport o stanie środowiska w woj. łódzkim w 2001 roku*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 2002.
- Zalewski M. *Ecohydrology – the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources*. Guest Editorial, *Ecological Engineering* 2000, 16. s. 1–8.

Mgr Edyta Kiedrzyńska

1) Europejskie Regionalne Centrum Ekohydrologii
pod auspicjami UNESCO w Łodzi

2) Katedra Ekologii Stosowanej, Uniwersytet Łódzki,
e-mail: edytkied@biol.uni.lodz.pl

Dr hab. inż. Adam Józwiak

Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka

Edyta Kiedrzyńska, Adam Józwił

**APPLICATION OF STATISTICAL METHODS TO ANALYSING
OF THE PILICA RIVER SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT
DEPENDING ON DISCHARGE-CHARACTERISTIC
OF A RESERVOIR SUPPLY**

SUMMARY

Poland, as a member state of European Union, is obliged to implement Union Directives, aimed at achieving good ecological state of the environment. Which conforms to standards of EU member states.

Sulejow Reservoir is a source of drinking water for Lodz Agglomeration in which severe symptoms of eutrophication have been observed. High catchment surface to reservoir surface ratio and agricultural use of catchment (64% of surface) result in high loads of sediments and nutrients (phosphorus among others) reaching the reservoir through the Pilica River. The aim of this paper is better understanding of processes of the suspended sediment transport by the Pilica River during low and high discharges. For an analysis methods offered by statistical pattern recognition theory has been used.

Key words: Pilica River, suspended sediment transport, statistical analysis, reservoir eutrophication