

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 54, 2011: 311–320  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 54, 2011)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 54, 2011: 311–320  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 54, 2011)

**Leszek HEJDUK**

Katedra Inżynierii Wodnej SGGW w Warszawie  
Department of Hydraulic Engineering WULS – SGGW

## **Relacje między wybranymi formami fosforu a rumowiskiem unoszonym w rzece Zagożdżonka**

### **Relation between chosen phosphorus forms and suspended sediment in Zagożdżonka River**

**Słowa kluczowe:** fosfor, rumowisko unoszone, zlewnia rolnicza, rzeka Zagożdżonka  
**Key words:** phosphorus, suspended sediment, agricultural catchment, Zagożdżonka River

#### **Wprowadzenie**

W wodzie fosfor może występować w postaci związków mineralnych oraz organicznych. Nieorganiczne związki fosforowe można podzielić na ortofosforany oraz fosforany skondensowane (polifosforany, metafosforany). Mogą one występować w stanie rozpuszczonym w postaci zawiesin lub koloidów (Gajkowska-Stefańska i in. 1990). Powszechnie uznaje się, że związki fosforu migrują do wód powierzchniowych, głównie w wyniku erozji wodnej, wniesione do rzeki łącznie z zawiesinami (Frere i in. 1980, CLRSWC 1993, Dojlido 1995, Vant i in. 1996, Kajak 1998, Somorow-

ski i Witkowski 1998, Bowes i in. 2003, Ballantine i in. 2009). Zawartość ich jest znacznie większa w wyerodowanej glebie niż w wierzchniej warstwie pokrywającej zlewnie (Menzel 1980, Ng i in. 1993). Zjawisko to tłumaczone jest selektywnością procesu erozji wodnej pod względem wielkości cząstek. Najmniejsze cząstki mineralne oraz cząstki organiczne łatwiej poddają się procesowi erozji, a właśnie te cząstki adsorbują najwięcej fosforu. Wyerodowane cząstki transportowane są do cieków, by w postaci rumowiska zostać usunięte poza teren zlewni. Ze względu na ten proces bardzo istotne stają się wzajemne powiązania między rumowiskiem unoszonym a fosforem, a także jego rola w transporcie fosforu podczas wezbrań.

Baker (1985) porównuje te relacje na przykładzie zdarzenia opadowego na rzece Honey Creek dopływającej do jeziora Erie w Ontario USA. Stężenia

rumowiska unoszonego i fosforu związanego z tym rumowiskiem gwałtownie zwiększały się w początkowej fazie wezbrania, osiągając maksima przed największą wartością hydrografu. Podobieństwa sedimentogramu (obraz zmienności koncentracji lub transportu rumowiska unoszonego podczas wezbrania w funkcji czasu) i polutogramu (obraz zmienności koncentracji lub transportu formy fosforu podczas wezbrania w funkcji czasu) fosforu skłoniło do poszukiwania zależności między tymi wielkościami. Ng i inni (1993) na podstawie ośmiu wezbrań pomierzonych w małej zlewni rolniczej otrzymali zależności korelacyjne, wskazujące na zależność między stężeniem różnych form fosforu a stężeniem rumowiska unoszonego. Zależności te miały formę równań potęgowych w postaci:

$$P = a C^b \quad (1)$$

gdzie:

P – koncentracja różnych form fosforu (fosfor ogólny, fosforany rozpuszczone lub fosfor związany z cząstkami rumowiska) [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  lub  $\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$  masy osadu],

C – koncentracja rumowiska unoszonego (całkowitego, mineralnego lub organicznego) [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ],

a, b – parametry równania.

Garbrecht i Sharpley (1992), prowadząc badania w 14 zlewniach, uzyskali zależności odwrotnie proporcjonalne, tj. stężenie fosforu malało wraz ze zwiększaniem się stężenia rumowiska unoszonego. Zależności odwrotnie proporcjonalne uzyskano również w pracy Fostera i innych (1996). Istotnym elementem przy porównywaniu wyników

są jednostki, w jakich przedstawiane jest stężenie fosforu. Niektórzy autorzy (Ng i in. 1993) wyznaczają zależności w miligramach fosforu na litr, podczas gdy w pracach Garbrechta i Sharpleya (1992) oraz Fostera i innych (1996) ilość fosforu wyrażana jest w stosunku do masy rumowiska. Po przeliczeniach wszystkie wyniki opisują odwrotnie proporcjonalną zależność między fosforem związanym z rumowiskiem a stężeniem rumowiska.

Praca ta przedstawia wyniki badań nad zależnościami między stężeniem form fosforu i stężeniem rumowiska unoszonego w wezbraniach dla nizinnej rzeki rolniczej Zagożdżonki położonej w centralnej Polsce.

Artykuł powstał w ramach pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt międzynarodowy niewspółfinansowany w ramach akcji COST 869.

## **Materiały i metody**

### **Zlewnia rzeki Zagożdżonki**

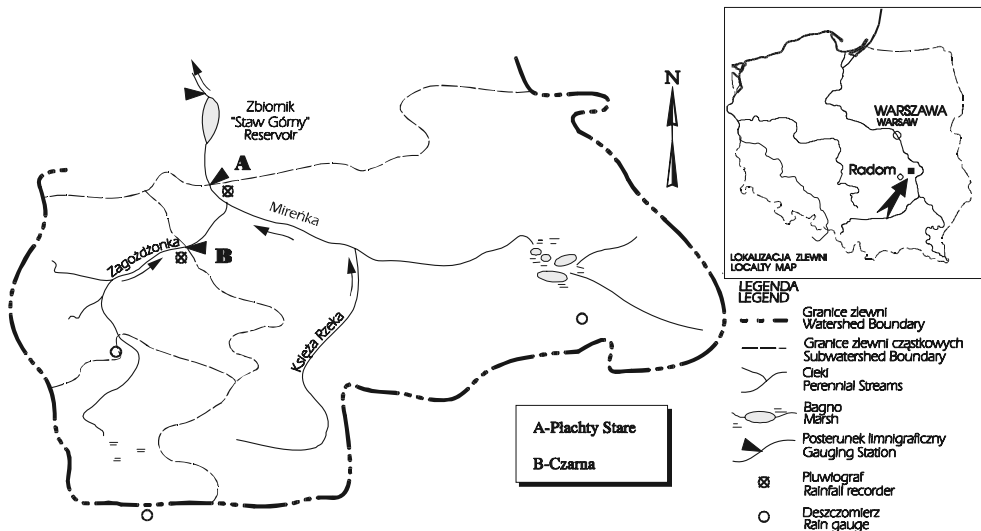
Zlewnia rzeki Zagożdżonki położona jest około 100 km na południe od Warszawy. Katedra Inżynierii Wodnej (Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW) prowadzi badania w zlewni rzeki Zagożdżonki od 1962 roku. Początkowo głównym celem badań było określenie przepływów charakterystycznych, bilansu wodnego oraz ilości transportowanego rumowiska dla budowanego zbiornika Staw Górny. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku rozpoczęto również badania stężeń oraz ładunków biogenów (różnych form fos-

foru i azotu) w dwóch wybranych przekrojach pomiarowych, tj. w miejscowości Płachty Stare oraz w miejscowości Czarna, ze względu na obserwowane zwiększone wartości stężeń tych wskaźników (Banasik i in. 1996). Przekrój pomiarowy w Czarnej zamyka zlewnie o powierzchni 23,4 km<sup>2</sup> i jest subzlewnią zlewni do przekroju pomiarowego w Płachtach Starych o powierzchni 82,4 km<sup>2</sup> (rys. 1). Wyniki przedstawione w niniejszym opracowaniu dotyczą tylko badań przeprowadzanych w profilu pomiarowym w Czarnej. W rozpatrywanej części zlewni rzeki Zagożdżonki dominują gleby piaszczyste. Większość terenu stanowią grunty orne zajmujące 70% obszaru hydrologicznie aktywnej zlewni (19,45 km<sup>2</sup>), lasy zajmują 20% powierzchni, a pastwiska – 9,4% (Hejduk i Banasik 2002). Dominującym gatunkiem gleb są piaski, w tym: piaski gliniaste lekkie, piaski luźne i piaski

ślaboglinaste (Jadczyżyn i in. 2010). W depresjach występują również gleby torfowo-mułowe i torfy niskie. Zlewnia Zagożdżonki po profil Czarna położona jest około 170 m n.p.m., przy czym deniwelacja terenu wynosi 16,5 m, więc może być klasyfikowana jako zlewnia nizinna (Banasik 1994). Średnia roczna suma opadów wyznaczona z wielolecia 2000–2010 wynosiła 604,7 mm, przepływ zaś 0,069 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>.

### Pobór prób i metodyka analiz

Stacja w Czarnej wyposażona jest w chłodzone urządzenie do poboru prób wody z zadaną częstotliwością oraz w zależności od stanów wody (Hejduk i in. 2010). Pobór prób wody wykonywany był z częstotliwością 2 godzin po przekroczeniu stanu wody odpowiadającego 0,13 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, co odpowiada podwójnemu średniemu przepływowi (Hejduk i Banasik 2010). Ilość rumowiska unoszonego



RYSUNEK 1. Lokalizacja zlewni rzeki Zagożdżonki  
 FIGURE 1. Locality map of the Zagożdżonka watershed

określana była na podstawie analizy wagowej, tj. sączenia próbki przez sączek i wyznaczania masy unosin z różnicy wag sączka pustego i z rumowiskiem. Uzyskana masa odnoszona była do objętości próbki i ostatecznie wyrażana jako stężenie w miligramach na litr. Procedura ta jest tożsama z określaniem zawartości zawiesiny ogólnej (Gajkowska-Stefańska i in. 1990).

W celu wyznaczenia zawartości fosforu związanego z rumowiskiem wykonano pomiar zawartości fosforanów ogólnych rozpuszczonych i fosforu ogólnego z zastosowaniem mineralizacji mieszaniną kwasu azotowego i siarkowego (Gajkowska-Stefańska 1990). Fosforany ogólne rozpuszczone określano z próbki przefiltrowanej (filtr 0,45  $\mu\text{m}$ ), a całkowity fosfor ogólny – z próbki nieprzefiltrowanej. Do wyznaczenia fosforanów w przygotowanych próbach zastosowano metodę kolorymetryczną z molibdenianem amonu. Zawartość fosforu związanego z rumowiskiem unoszonym określono z różnicy między zawartością fosforu ogólnego i fosforanów ogólnych rozpuszczonych. Ten sposób wykonywania analizy zawartości fosforu związanego z cząstkami rumowiska jest jednym z częściej stosowanych (Ng i in. 1993, Foster i in. 1996). Ostatecznie zawartość fosforu związanego z rumowiskiem, po uwzględnieniu ilości rumowiska, wyrażana jest w miligramach fosforu w kilogramie suchej masy rumowiska. Fosforany rozpuszczone (ortofosforany) oznaczano w próbkach przesączonych bez mineralizacji metodą kolorymetryczną z molibdenianem amonu.

## Wyniki i dyskusja

Do analiz wykorzystano 14 pomierzonych zjawisk opad – odpływ – rumowisko unoszone, pomierzonych na przestrzeni kilku lat. Przy czym pierwsze osiem zdarzeń pomierzono w latach 1999–2000, a pozostałe sześć zdarzeń w latach 2008–2010. W tabeli 1 zestawiono wybrane charakterystyki poszczególnych zdarzeń opadowych, tj. przepływ średni, przepływ kulminacyjny, stężenie średnie i maksymalne rumowiska unoszonego, uzyskane na podstawie pomiarów wykonywanych z 2-godzinnym krokiem czasowym. W większości zdarzeń przepływ średni w wezbraniach jedynie w niewielkim stopniu przekraczał wartości przepływu uruchamiającego urządzenia do poboru prób. Wyjątkiem jest tu wezbranie 14, podczas którego wartość średnia przepływu była 15 razy większa niż przepływ uruchamiający urządzenia. Jednocześnie w wezbraniu tym zaobserwowano najmniejsze stężenia rumowiska unoszonego.

Stężenia fosforanów rozpuszczonych oraz fosforu ogólnego wykazują dużą zmienność podczas wezbrań. W niektórych przypadkach różnica między największą i najmniejszą pomierzoną wartością stężenia wynosiła ponad 1 mg  $\text{PO}_4\text{-dm}^{-3}$  (wezbrania nr 4 i 14) w przypadku fosforanów rozpuszczonych i 1 mg  $\text{P-dm}^{-3}$  w przypadku fosforu ogólnego (wezbranie 4). Wartości maksymalne stężenia fosforanów rozpuszczonych występowały zwykle podczas kulminacji przepływu, ale zdarzały się również wezbrania bez wyraźnych kulminacji stężeń. Podobne zależności występują dla fosforu ogólnego,

TABELA 1. Przepływ średni i maksymalny, stężenie średnie i maksymalne rumowiska unoszonego  
 TABLE 1. Mean and maximum discharge, mean and maximum suspended sediment concentration

Numer wezbrania Event number	Przepływ średni [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ] Mean discharge	Przepływ maksymalny [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ] Maximum discharge	Stężenie średnie rumowiska unoszonego [mg·dm <sup>-3</sup> ] Mean suspended sediment concentration	Stężenie maksymalne rumowiska unoszonego [mg·dm <sup>-3</sup> ] Maximum suspended sediment concentration
1	0,18	0,27	24,4	59,2
2	0,19	0,33	25,1	34,8
3	0,19	0,26	18,7	24,0
4	0,16	0,23	23,9	32,8
5	0,50	1,46	28,1	56,0
6	0,22	0,34	42,2	56,4
7	0,35	0,68	26,6	44,0
8	0,16	0,35	28,1	56,2
9	0,18	0,19	69,5	101,5
10	0,22	0,29	51,4	82,6
11	0,21	0,22	46,8	81,5
12	0,27	0,34	37,2	52,7
13	0,33	0,48	38,8	70,5
14	1,94	3,49	148,6	562,0

jednakże w niektórych przypadkach kulminacje występują na gałęzi opadającej wezbrania. Zmienność zawartości fosforu związanego z rumowiskiem była znacznie większa i wyniosła w skrajnym przypadku nawet 29 mg P·kg<sup>-1</sup> podczas jednego wezbrania (tab. 2).

Analiza transportu form fosforu powinna być rozpatrywana w nawiązaniu zarówno do sytuacji hydrometeorologicznej przed i w czasie wystąpienia zdarzenia, jak i w zależności od pory roku. Wagner i Zalewski (2000), analizując transport form fosforu w Pilicy i Luciąży, stwierdzili większą zależność między stężeniem fosforu ogólnego a relacją przepływu w dniu poprzedzającym pobór próbki do przepływu w dniu poboru niż relacji między stężeniem fosforu ogólnego a przepływem w dniu

poboru. Istotne znaczenie ma również okres wystąpienia wezbrania. W przypadku rzeki Zagożdżonki zaobserwowano, że największe średnie miesięczne stężenia fosforanów rozpuszczonych notowane są w okresach letnio-jesiennych, najmniej zaś w okresach zimowych. W przypadku fosforu ogólnego największe średnie miesięczne stężenia notowane są w okresach zimowych, najmniejsze zaś wczesną wiosną i w środku lata (Hejduk i Banasik 2008). Tak więc okres wystąpienia wezbrania może mieć również wpływ na transport fosforu związanego z rumowiskiem.

Spośród analizowanych wezbrań dwa zdarzenia wystąpiły w okresach zimowych (grudzień – styczeń) i były wezbrańiami opadowo-roztopowymi. Pozostałe wezbrania występowały w letnim półro-

TABELA 2. Stężenia średnie, maksymalne i minimalne fosforanów rozpuszczonych, fosforu ogólnego oraz fosforu związanego z rumowiskiem podczas analizowanych wezbrań

TABLE 2. Mean, maximum and minimum concentration of dissolved phosphates, total phosphorus and total particle phosphorus during considered events

Numer wezbrania Event number	Fosforany rozpuszczone [mg PO <sub>4</sub> ·dm <sup>-3</sup> ] Dissolved phosphates			Fosfor ogólny [mg P·dm <sup>-3</sup> ] Total phosphorus			Fosfor związany z rumowiskiem [g P·kg <sup>-1</sup> ] Total particle phosphorus		
	maks. max	średnia mean	min. min	maks. max	średnia mean	min. min	maks. max	średnia mean	min. min
1	0,40	0,23	0,25	0,54	0,31	0,12	9,5	4,5	1,2
2	0,76	0,64	0,53	1,05	0,53	0,31	19,8	9,3	4,1
3	0,91	0,70	0,46	1,18	0,65	0,18	39,1	20,5	2,0
4	1,60	0,70	0,39	0,98	0,52	0,22	17,1	7,9	1,2
5	0,65	0,36	0,22	0,48	0,33	0,20	16,5	7,7	2,2
6	0,44	0,37	0,31	0,82	0,25	0,13	17,5	7,1	3,6
7	0,82	0,73	0,59	0,64	0,44	0,24	11,2	5,4	1,0
8	0,35	0,19	0,11	0,67	0,48	0,31	28,6	16,0	4,7
9	0,29	0,24	0,11	0,61	0,49	0,32	3,3	1,4	0,7
10	1,22	0,56	0,28	0,46	0,27	0,20	13,2	4,1	1,4
11	0,49	0,40	0,33	0,32	0,27	0,24	3,5	1,5	0,2
12	1,21	0,69	0,35	0,35	0,24	0,12	34,6	15,7	5,6
13	0,93	0,70	0,28	0,31	0,26	0,22	25,0	17,9	10,3
14	2,15	1,06	0,51	0,53	0,30	0,16	9,72	1,94	0,10

czu, przy czym cztery wezbrania zdarzyły się w marcu, a pozostałe w innych miesiącach. Wezbrania zimowe (3 i 4) transportowały małą ilość fosforu ogólnego, lecz stosunkowo dużą ilość fosforanów rozpuszczonych. Zamarznięta ziemia jest mniej podatna na erozję (erozyjność spływów roztopowych szacuje się jako 1/10 sumy opadów z okresu od 1 grudnia do 31 marca – Banasik 1995), więc fosfor transportowany jest głównie w formie rozpuszczonych fosforanów. Wezbrania 1, 2, 10 i 13 transportowały stosunkowo niewielką ilość fosforu ogólnego, w porównaniu z pozostałymi wiosennymi i letnimi wezbraniem. Zdarzenia te nastąpiły po okresach dużych wiosennych wezbrań, co zwiększa

prawdopodobieństwo, że większość fosforu została odprowadzona ze zlewni we wcześniejszych wezbraniach. Wezbrania 5 i 6 były pierwszymi dużymi deszczowymi wezbraniem wiosennymi po okresie zimy. Czas między wezbraniem był krótki (około dwudziestu dni) więc większość fosforu odprowadzona została wraz z wezbraniem 5. Wezbrania 7, 8 i 12 wystąpiły po długim (powyżej miesiąca) okresie bezdeszczowym, co spowodowało duże stężenia rumowiska unoszonego oraz konsekwentnie większe koncentracje fosforu ogólnego oraz ilości fosforu. Wezbranie 9 oraz 11 były również wezbraniem występującymi po długich okresach (powyżej miesiąca) bezdeszczowych, lecz były to wezbra-

nia o niewielkich przepływach nieuruchamiających transportu rumowiska. Wezbranie 14 było wyjątkowo dużym wezbraniem, podczas którego zanotowano zarówno bardzo duże przepływy, jak i największe zanotowane stężenia rumowiska unoszonego.

Zebrane dane pozwoliły na zbadanie zależności między poszczególnymi formami fosforu a stężeniem rumowiska unoszonego. Nie stwierdzono istotnych statystycznie zależności między stężeniem fosforu ogólnego lub fosforanów rozpuszczonych a stężeniem rumowiska unoszonego. Jedyną statystycznie istotną zależność wystąpiła między zawartością fosforu transportowanego z rumowiskiem a stężeniem rumowiska unoszonego (rys. 2).

Uzyskana zależność opisywana jest równaniem:

$$P_{\text{rum}} = 244,9 \cdot C^{-1,12} \quad (2)$$

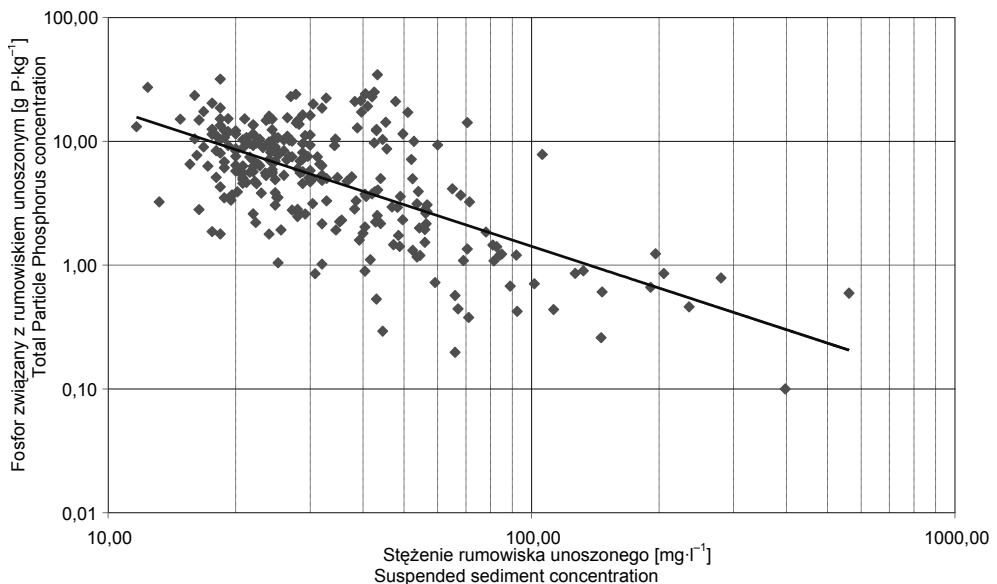
gdzie :

$P_{\text{rum}}$  – ilość fosforu związanego z rumowiskiem [g P·kg<sup>-1</sup> s.m. rumowiska],

$C$  – stężenie rumowiska unoszonego [mg·dm<sup>-3</sup>],

244,9, -1,12 – współczynniki równania.

Współczynnik korelacji ( $r$ ) wyniósł -0,64, co umożliwia sklasyfikowanie tej zależności między słabą a silną (Byczkowski 1999), przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  korelacja ta jest istotna. Postać tej zależności potwierdza związki między fosforem związanym z rumowiskiem a stężeniem rumowiska unoszonego.



RYSUNEK 2. Zależność między ilością fosforu związanego z rumowiskiem a stężeniem rumowiska unoszonego

FIGURE 2. Relation between total particle phosphorus concentration and suspended sediment concentration

## Wnioski

1. Analiza pomierzonych wartości wykazała dużą zmienność stężeń fosforanów rozpuszczonych i fosforu ogólnego podczas obserwowanych wezbrań. W skrajnym przypadku różnica między najmniejszym i największym stężeniem fosforanów rozpuszczonych w wezbraniu wyniosła  $1,64 \text{ mg PO}_4 \cdot \text{dm}^{-3}$ , w przypadku zaś fosforu ogólnego –  $1 \text{ mg P} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

2. W przypadku fosforanów rozpuszczonych największe zmienności wystąpiły w wezbraniu o największym przepływie maksymalnym, jednocześnie w wezbraniach o dużo mniejszych przepływach maksymalnych skrajności były równie duże. Przy jednoczesnym braku statystycznie istotnych zależności między przepływem a stężeniem fosforanów i fosforu ogólnego wydaje się, że wielkość wezbrania charakteryzowana przez wartość przepływu maksymalnego nie wpływa znacząco na zmienność stężenia fosforanów i fosforu ogólnego w rzece Zagożdżonca.

3. Uzyskano odwrotnie proporcjonalną zależność między ilością fosforu związanego z rumowiskiem unoszonym a stężeniem rumowiska unoszonego podczas wezbrań. Zależność ta miała współczynnik korelacji równy  $-0,64$  i była istotna statystycznie przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

## Literatura

BAKER D.B. 1985: Regional water quality impacts of intensive row-crop agriculture: A Lake Erie Basin case study. *Journal of soil and Water Conservation* 40, 1: 127.  
BALLANTINE D., WALLING D.E., LEEKS G.J.L. 2009: Mobilisation and Transport of Sediment-Associated Phosphorus by Sur-

face Runoff. *Water Air Soil Pollution* 196: 311–320.

BANASIK K. 1994: Model sedimentogramu wezbrania opadowego w małej zlewni rolniczej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

BANASIK K., WALLING D.E. 1996: Predicting sedimentographs for a small agricultural catchment. *Nordic Hydrology* 27 (4): 275–294.

BANASIK K., SKIBIŃSKI J., GÓRSKI D. 1995: Metody oceny erozji powierzchniowej i akumulacji rumowiska w zbiornikach. W: metodyka zagospodarowania zasobów wodnych w małych zlewniach rzecznych. Red. A. Ciepiewski. Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 63–76.

BANASIK K., RUDZKA E., ŚMIETANKA A. 1996: Eutroficzne wskaźniki zanieczyszczeń w odpływie rzeczny z małej zlewni rolniczej. *Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska* 11: 23–29.

BOWES M.J., HOUSE W.A., HODGKINSON R.A. 2003: Phosphorus dynamics along a river continuum. *The Science of the Total Environment* 313: 199–212.

BYCZKOWSKI A. 1999: Hydrologia. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

CLRSWC – Committee on Long-Range Soil and Water Conservation 1993. Soil and Water Quality. National Academy Press, Washington DC.

DOJLIDO J.R. 1995: Chemia wód powierzchniowych. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok.

FOSTER I.D.L., BABAN S.M.J., WADE S.D., CHARLESWORTH S.M., BUCKLAND P.J., WAGSTAFF K. 1996: Sediment – associated phosphorus transport in the Warwickshire River Avon, UK. Erosion and Sedimentation Yield: Global and Regional Perspectives, *IAHS Publication* 236: 303–312.

FRERE M.H., ROSS J.D., LANE L.J. 1980: The nutrient submodel. In: CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Ed. W.G. Knisel. Conservation Research Report 26, U.S. Department of Agriculture.

GAJKOWSKA-STEFAŃSKA L., GUBERSKI S., GUTOWSKI W., MAMAK Z., SZPERLIŃSKI Z. 1990: Laboratoryjne badania



- wody, ścieków i osadów ściekowych. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- GARBRECHT J., SHARPLEY N.A. 1992: Sediment-Phosphorus Relationships in Watersheds. 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe: 601–610.
- HEJDUK L., BANASIK K. 2002: Badania zmienności uziarnienia rumowiska unoszonego w małej zlewni rolniczej. *Przegląd Naukowy Inżynierii i Kształtowania Środowiska* XI, 2 (25): 46–53.
- HEJDUK L., BANASIK K. 2008: Zmienność stężenia fosforu w górnej części zlewni rzeki Zagożdżonki. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* XVII, 4 (42): 57–64.
- HEJDUK L., BANASIK K. 2010: Variations in suspended sediment grain sizes in flood events of a small lowland river. *IAHS Publ.* 337: 189–196.
- HEJDUK L., HEJDUK A., BANASIK K. 2006: Suspended sediment transport during rainfall and snowmelt-rainfall floods in a small lowland catchment, central Poland in Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchments: Measurement, Modeling and Management. Ed. P.N. Owens, A.J. Collins. CABI, Wallingford.
- HEJDUK L., BANASIK K., HEJDUK A. 2010: Monitoring ilości i jakości wody w małej zlewni. Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej, T. 1. Red. B. Więzik. Komitet Inżynierii Środowiska PAN 68: 401–409.
- JADCZYSZYN T., IGRAS J., NOWOCIEŃ E., PODOLSKI B., WAWER R. 2010: Wartość rolnicza gleb w górnej części zlewni rzeki Zagożdżonki. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 3 (49): 30–37.
- KAJAK Z. 1998: Hydrobiologia. Limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- MENZEL R.G. 1980: Enrichment ratios for water quality modeling. Conservation Research report 26: 486–492.
- NG H.Y.F., MAYER T., MARSALEK J. 1993: Phosphorus transport in runoff from a small agricultural watershed. *Water Sciences & Technology* 28, 3–5: 451–460.
- PIONKIE H.B., KUNISHI H.M. 1992: Phosphorus status and content of suspended sediment in a Pennsylvania watershed. *Soil Science* 153, 6: 452–462.
- Rocznik Statystyczny 1999. GUS, Warszawa.
- SOMOROWSKI C., WITKOWSKI D. 1998: Wybrane aspekty jakości wód powierzchniowych w zlewni rzecznej. Wodno-bilansowe kryteria kształtowania siedlisk w krajobrazie rolniczym. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- VANT A., BAKKEN L.R., AZZAROLI B.M., BOTTERWEG P., LUNDEBY H., ROMSTAD E., RORSTAD P.K., VOLD A. 1996: Policies for Reduced Nutrient Losses and Erosion from Norwegian Agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Science*, Supplement 23.
- VERHOFF H.V., MELFI D.A., YAKSICH S.M. 1979: Strom Travel distance Calculation from Total Phosphorus and suspended materials in rivers. *Water Resources Research* 15, 6: 1354–1360.
- WAGNER I., ZALEWSKI M. 2000: Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir – consequences for restoration. *Ecological Engineering* 16, 1: 79–90.
- WANIELISTA M., KERSTEN R., EAGLIN R. 1997: Hydrology: Water Quantity and Quality control. John Wiley & Sons, New York.

## Summary

**Relation between chosen phosphorus forms and suspended sediment in Zagożdżonka River.** Suspended sediment (SS), soluble phosphorus (SP), total phosphorus (TP) and total particle phosphorus (TPP) data from 14 storm events has been examined. The investigation has been carried on a small 23.4 km<sup>2</sup>, lowland, agricultural Zagożdżonka watershed located near Radom. The peaks of suspended sediment concentration varied from 562.7 mg·dm<sup>-3</sup> to 16.3 mg·dm<sup>-3</sup> depend on flood event and in most of cases priori the runoff peak. The SP and TP shows different concentration pattern depend on event

and reach values from  $0.18 \text{ mg PO}_4 \cdot \text{dm}^{-3}$  to  $2.15 \text{ mg PO}_4 \cdot \text{dm}^{-3}$  for SP and  $0.12 \text{ mg P} \cdot \text{dm}^{-3}$  to  $1.18 \text{ mg P} \cdot \text{dm}^{-3}$  for TP. The concentration of TPP varied from  $0.1 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$  sediment to  $39.1 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$  sediment. The inverse statistical significant relationship between TPP and SS has been found with correlation coefficient equal  $-0.64$ .

**Author's address:**

Leszek Hejduk  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail:Leszek\_hejduk@sggw.pl