

PIOTR GIERSZEWSKI

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania  
Polska Akademia Nauk

## WARUNKI TRANSPORTU ZAWIESINY W ZBIORNIKU WŁOCLAWSKIM W ŚWIETLE ANALIZY JEJ SKŁADU I TEKSTURY

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono uwarunkowania przestrzennego zróżnicowania koncentracji zawiesiny w Zbiorniku Włocławskim. Scharakteryzowano główne składowe zawiesiny ogólnej, tj. mineralną i organiczną. Określono cechy uziarnienia zawiesiny mineralnej. Wyjaśniono mechanizm przebiegu zmącenia w powiązaniu z hydrodynamiką zbiornika i zróżnicowaniem źródeł dostawy materiału transportowanego w suspensji.

**Słowa kluczowe:** Zbiornik Włocławski, koncentracja zawiesiny, skład, uziarnienie

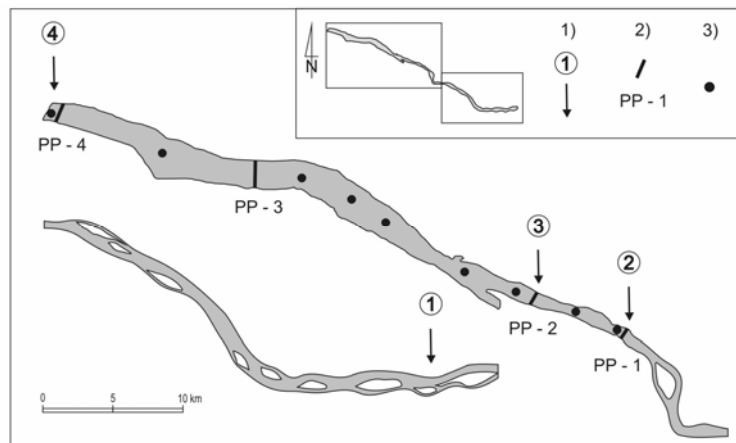
### Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych problemów eksploatacyjnych, ale także ekologicznych jest proces zamulania zbiorników zaporowych. Wielkość dostawy, zróżnicowanie koncentracji oraz warunki sedymentacji zawiesiny składającej się w różnej proporcji z różnofrakcyjnych cząstek mineralnych i organicznych decydują nie tylko o tempie zmniejszania pojemności zbiornika, ale również o jakości środowiska wodnego, w tym o jego eutrofizacji i transporcie zanieczyszczeń. Wzrost przezroczystości wody, będący wynikiem sedymentacji zawiesiny, wpływa na poprawę warunków rozwoju fitoplanktonu. Wielkość jego biomasy kontroluje z kolei poziom stężeń substancji biogennych (GIERSZEWSKI 2005). Środowiskowe znaczenie zawiesiny wyraża się również chemiczną reaktywnością minerałów ilastych będących jej ważnym składnikiem. Duża pojemność adsorpcyjna minerałów ilastych oraz unoszonych substancji humusowych wpływa na zmniejszenie stężeń wielu substancji transportowanych w roztworze (m.in. fosforu, metali ciężkich, zanieczyszczeń organicznych). Substancje te związane z adsorbentem, sedymentując, gromadzą się w osadach dennych (ONGLEY 1982). Ładunek, skumulowanych w osadach dennych, substancji biogennych i toksycznych to szczególnie nie-

bezpieczne źródło wtórnego zanieczyszczenia wód zbiornika. Analiza zmian koncentracji głównych składników zawiesiny oraz uziarnienia materiału klastycznego transportowanego w suspensji stwarza również możliwości oceny zróżnicowania środowiska zbiornika pod kątem jego hydrodynamiki, warunków depozycji osadów dennych i biologicznej produktywności. Z przytoczonych niektórych tylko przykładów roli zawiesiny w funkcjonowaniu geoekosystemu zbiornikowego wynika, że ważne są nie tylko najczęściej podejmowane badania zmierzające do określenia wielkości ładunku dopływającej do zbiornika zawiesiny, lecz również prace, których celem jest analiza przyczyn zróżnicowania i zmian koncentracji zawiesiny w zbiorniku zaporowym oraz rozpoznanie jej składu i uziarnienia. Wymienione zagadnienia są zasadniczym celem badań podjętych na Zbiorniku Włocławskim.

### Zakres i metody badań

Ogólne prawidłowości wieloletniego i sezonowego przebiegu zmacenia w Zbiorniku Włocławskim zostały scharakteryzowane na podstawie wyników oznaczeń zawiesiny ogólnej wykonanych przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska (WIOŚ) w Warszawie i Bydgoszczy, w czterech punktach kontrolnych. Łącznie wykorzystano ponad 1100 wyników z lat 1982-2002.



Rys. 1. Lokalizacja miejsc poboru prób zawiesiny: 1 – punkty pomiarowe WIOŚ, 2 – przekroje poprzeczne, 3 – punkty pomiarowe w osi zbiornika  
 Fig. 1. Location of suspension sampling sites: 1 – WIOŚ sampling points, 2 – cross sections, 3 – sampling points along the longitudinal axis in the reservoir

Lokalizacja punktów pomiarowych odzwierciedla zróżnicowanie warunków hydrologicznych w Zbiorniku Włocławskim (rys. 1). Punkt pomiarowy w Wyszogrodzie (1) charakteryzuje odcinek rzeki swobodnie płynącej, kolejny w Płocku (2) jest położony w górnej – rzecznej części zbiornika, przejściową strefę charakteryzuje punkt w Brwlinie

(3), a dolną – limniczną punkt pomiarowy zlokalizowany na zaporze (4). Do oceny składu zawiesiny ogólnej, wielkości koncentracji poszczególnych składowych oraz uziarnienia zawiesiny mineralnej wykorzystano wyniki badań własnych przeprowadzonych w 12 terminach (w latach 2003-2006) przy zakresie przepływów od 253 do 2319  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Próby wody o objętości 5  $\text{dm}^3$  do oznaczenia koncentracji zawiesiny pobierano batometrem z głębokości 1 m poniżej zwierciadła wody. Próby pobierano w czterech przekrojach poprzecznych zlokalizowanych w rzecznej, przejściowej i limnicznej części zbiornika (rys. 1). Z każdego przekroju pobrano trzy próby reprezentujące dawną część nurtową i korytową Wisły oraz zalewową zbiornika. Dodatkowo w czasie przechodzenia przez zbiornik fali wezbraniowej pobrano dziewięć prób wzdłuż osi zbiornika (rys. 1). Wielkości dopływu wody do zbiornika uzyskano z Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej (RZGW) we Włocławku.

Koncentrację zawiesiny oznaczono metodą wagową (BRAŃSKI 1968), używając sączków twardych. Zawartość substancji organicznej w zawieszynie określono przez straty prażenia w temperaturze 550°C. Skład granulometryczny części mineralnych w zawieszynie analizowano na laserowym mierniku wielkości cząstek Analysette 22. Frakcje główne i podstawowe określono zgodnie ze skalą Udden-Wenihwortha, a statystyczne wskaźniki uziarnienia wyliczono według wzorów FOLKA i WARDA (1957).

## Wyniki badań i dyskusja

### Przebieg zmaczenia w wieloleciu 1982-2002

Zmiany koncentracji zawiesiny ogólnej w kolejnych punktach pomiarowych odzwierciedlają naturalną tendencję do spadku jej wartości w kierunku zapory (tab. 1).

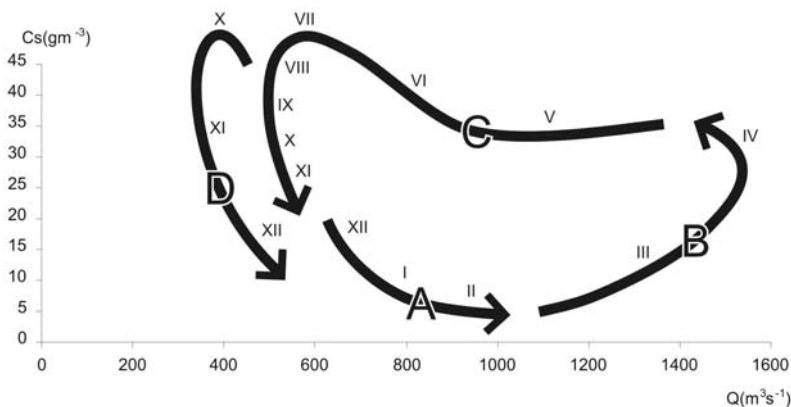
Tabela 1. Charakterystyki koncentracji zawiesiny w wieloleciu 1982-2002  
Table 1. Characteristics of the suspension concentration in the years 1982-2002

Punkt pomiarowy	Średnia	Minimalna	Maksymalna	Współczynnik zmienności	Współczynnik asymetrii
	g·m <sup>-3</sup>			%	
1	30,1	2	128	66,2	1,5
2	26,5	4	76	51,1	0,7
3	29,9	5	195	84,0	3,0
4	22,5	0	511	188,2	7,1

Różnica koncentracji zawiesiny między Wyszogrodem a zaporą we Włocławku, wyrażona średnią arytmetyczną z wielolecia, wynosi około 25%. Wysokie wartości współczynnika asymetrii w punktach charakteryzujących przejściową (3) i dolną (4) część Zbiornika Włocławskiego wskazują na dominację okresów o niskich wartościach zmaczenia oraz o znacznym zniekształceniu średniej arytmetycznej przez niezbyt częste przypadki ekstremalnie wysokich koncentracji zawiesiny. Skalę wpływu ekstremalnych

wartości koncentracji zawiesiny na średnią wielkość zmacenia ukazują wartości współczynnika zmienności. Wynika z nich, że największą zmiennością zmacenia (188%) charakteryzował się punkt zlokalizowany przy zaporze. Pojawiające się okresowo wysokie wartości koncentracji zawiesiny w dolnej – limnicznej części zbiornika, szczególnie w pierwszej połowie wielolecia, są wynikiem znacznej dostawy materiału klastycznego z brzegów zbiornika (GIERSZEWSKI i IN. 2005). Stwierdzone w tym czasie kulminacje zmacenia nawiązują do wyróżnionych przez BANACHA (1994) okresów zwiększonej aktywności ruchów masowych na wysokich brzegach zbiornika i intensywnej abrazji strefy brzegowej.

Analiza przebiegu średniorocznej zmienności koncentracji zawiesiny ogólnej pozwala na wyróżnienie trzech, a w wypadku limnicznej części zbiornika czterech charakterystycznych faz (rys. 2). Pierwsza (A) zimowa występuje w czasie, kiedy przepływy wzrastają, nie osiągając jednak wartości średnich, a dostawa zawiesiny jest kontrolowana przebiegiem zjawisk lodowych. Już w momencie pojawienia się lodu brzegowego zostaje ograniczona dostawa materiału z brzegów koryta, co wyraża się zmniejszeniem koncentracji zawiesiny. Faza marcowo-kwietniowa (B) jest związana z wiosennym wezbraniem roztopowym. W tym czasie koncentracja zawiesiny wzrasta, nie osiągając jednak wartości maksymalnych. Zasadniczym źródłem zawiesiny w tym okresie jest materiał dostarczany z brzegów koryta oraz zawiesina tranzytowa. Faza trzecia (C) nawiązuje do sezonowego cyklu rozwoju fitoplanktonu, którego maksimum przypada zwykle na okres od maja do czerwca/lipca. Wpływ letniego maksimum rozwoju fitoplanktonu pokrywa się w analizowanych punktach z wysokimi koncentracjami zawiesiny ogólnej występującymi w czerwcu i lipcu. Ostatnia faza (D) zaznacza się tylko w środkowej i dolnej części zbiornika. Wzrost zmacenia, przy mało zmiennych przepływach, jest wynikiem dostawy materiału z brzegów zbiornika w czasie jesiennych sztormów.



Rys. 2. Schemat zmian koncentracji zawiesiny ( $C_s$ ) na tle warunków przepływu ( $Q$ ) w uśrednionym roku hydrologicznym (1982-2002): A-D – fazy przebiegu zmacenia opisane w tekście

Fig. 2. Scheme of suspension concentration ( $C_s$ ) changes against the background of water discharge ( $Q$ ) in the average hydrological year (1982-2002): A-D – turbidity course cycles described in the paper

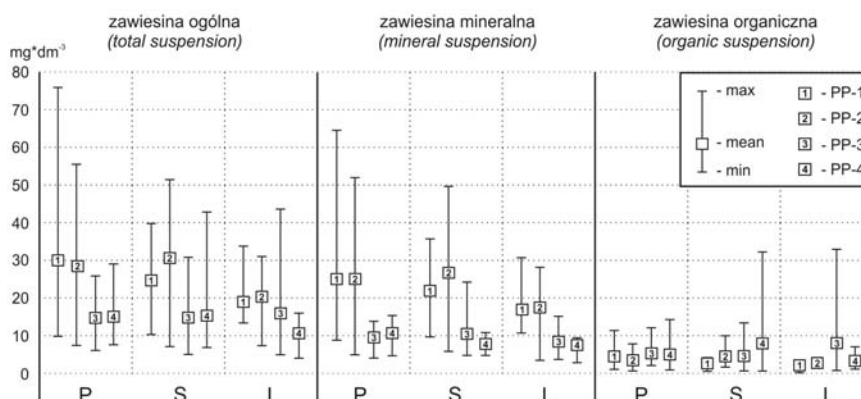
### Charakterystyka składu zawiesiny i jego zróżnicowanie

Charakterystyczną cechą transportowanej zawiesiny, zarówno w górnej, jak i w dolnej części zbiornika, jest dominacja w jej składzie cząstek mineralnych. W Płocku ich średni udział wynosił 85% i zmieniał się w niewielkim zakresie 65-96%. Przy zaporze udział tej formy zmaczenia wynosił 76% i wykazywał znacznie większą zmienność 25-95%.

Większe wartości koncentracji zawiesiny, zarówno ogólnej, jak i poszczególnych jej składowych, stwierdzano na ogół w górnej części zbiornika. W dwóch przypadkach większą koncentrację zawiesiny zanotowano przy zaporze. Jednak nie jest to sytuacja wyjątkowa. W latach 1982-2002 występowała ona aż w 29% serii pomiarowych. Wzrost zmaczenia w limnicznej części zbiornika jest wynikiem dodatkowej, okresowo wydajnej, dostawy materiału z podlegających abrazji brzegów zbiornika oraz z jego dna w czasie intensywnego falowania lub oddziaływania prądów gęstościowych. Wpływ wymienionych procesów na wzrost zmaczenia wody w Zbiorniku Turawskim odnotował TEISSEYRE (1983). Wpływ tej lokalnej dostawy materiału do zbiornika na przebieg zmaczenia wyjaśnia charakter związku korelacyjnego między przepływem wody a koncentracją zawiesiny mineralnej. W górnej części zbiornika zależność ta jest istotna statystycznie ( $r = 0,67$ ), co oznacza, że wielkość zmaczenia jest kontrolowana przez przepływ rzeczny. Brak wskazanej zależności w dolnej części zbiornika ( $r = -0,11$ ) jest dowodem, niezależnej od przepływu, dostawy materii allochtonicznej. Silny związek dostawy i transportu zawiesiny mineralnej z hydrologią rzeki w górnej części zbiornika wyraża także większa zmienność jej koncentracji ( $cv = 61\%$ ) w porównaniu z dolną ( $cv = 33\%$ ). Z kolei większa zmienność zawiesiny organicznej w limnicznej części zbiornika ( $cv = 212\%$ ) odzwierciedla wpływ okresowej resuspensji zalegającej na dnie materii organicznej oraz sezonowo zmieniającej się biomasy biosestonu, a szczególnie fitoplanktonu.

Analiza serii prób zawiesiny pobranych 1 kwietnia 2005 roku ( $Q = 2319 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), osiem dni po kulminacji wezbrania ( $5249 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), wykazała wyraźny, około 80-procentowy, spadek koncentracji zawiesiny ogólnej w kierunku zapory. Duże zmaczenie z niewielkimi wahaniami ( $51\text{-}36 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) utrzymywało się na odcinku ponad 20 km górnej i środkowej części zbiornika. Wyraźny spadek koncentracji zawiesiny początkowo do poziomu  $23 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , a następnie do około  $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  został stwierdzony w odległości odpowiednio 16 i 9 km od zapory. Koncentracja zawiesiny na poziomie  $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  odpowiada przeciętnemu zmaczeniu w jeziornej części zbiornika. Koncentracje zawiesiny mineralnej, której średni udział wynosił 91%, a także organicznej zmniejszały się również w kierunku zapory. Uzyskane wyniki wskazują, że nawet w warunkach przepływów wezbraniowych w tym silnie przepływowym zbiorniku wyodrębnia się strefa jeziorna, co przeczy rozpowszechnionemu pogładowi o jego wybitnie reolimnicznym charakterze (GIZIŃSKI i FALKOWSKA 2003).

Mniejsze niż w osi zbiornika, ale również wyraźne zróżnicowanie koncentracji zawiesiny występowało w przekrojach poprzecznych zlokalizowanych w charakterystycznych odcinkach zbiornika (rys. 3). W przekroju (PP-1) zlokalizowanym na moście w Płocku średni udział zawiesiny mineralnej w poszczególnych punktach przekroju był podobny i wynosił od 83 do 87%. Większa koncentracja zawiesiny mineralnej i organicznej, a tym samym ogólne zmaczenie występowało prawie zawsze po prawej stronie przekroju, czyli w strefie nurtowej (punkt P) i malało sukcesywnie w kierunku lewego brzegu.



Rys. 3. Zmienność koncentracji zawiesiny w przekrojach poprzecznych: P, S, L – punkty pomiarowe odpowiednio w prawej, środkowej i lewej części profilu

Fig. 3. Suspension concentration variation in cross sections: P, S, L – sampling points respectively in the right, middle and left side of the profile

Odwrotną tendencję, czyli wzrost zmacenia w kierunku strefy pozanurtowej, zaobserwowano w czasie przepływów niżówkowych ( $Q - 690$  i  $294 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Średnie różnice koncentracji zawiesiny mineralnej i organicznej wynosiły w tym przekroju odpowiednio 36 i 53%. W strefie nurtowej zaznacza się również znacznie większa zmienność koncentracji obu form zawiesiny (91-83%) niż w strefie pozanurtowej (60-49%). Taki charakter zmacenia w górnej części zbiornika wyraźnie eksponuje rolę dawnego koryta Wisły jako drogi uprzywilejowanego przepływu i dostawy materiału klastycznego do zbiornika. Strefa pozakorytowa środowiska zbiornika już w jego górnej części wykazuje przynajmniej niektóre cechy typowe dla jego części dolnej – limnicznej. Świadczy o tym między innymi wielkość zmacenia podobna jak w części limnicznej. Mniejsza koncentracja zawiesiny w strefie pozakorytowej tego przekroju wynika nie tylko z wyraźnego ukierunkowania dostawy zawiesiny korytem Wisły, ale jest również skutkiem jej sedymentacji w warunkach mniejszych prędkości przepływu w strefie pozakorytowej. O zróżnicowanej dynamice wody w przekroju świadczy sposób wykształcenia osadów dennych. W strefie koryta Wisły są to głównie piaski drobno- i średnioziarniste, a w części pozakorytowej mułki piaszczyste i mułki będące zasadniczym typem osadów dennych Zbiornika Włocławskiego (72%; GIERSEWSKI i IN. 2006). Podobny charakter zróżnicowania zmacenia występował w przekroju poprzecznym (PP-2) zlokalizowanym w Brwilnie, około 10 km poniżej profilu PP-1 (rys. 3). Także tutaj, chociaż w mniejszym stopniu, o przebiegu zmacenia i składzie zawiesiny decyduje przepływ w dawnym korycie Wisły.

Odmienne obrazy zróżnicowania koncentracji zawiesiny stwierdzono w przekrojach PP-3 i PP-4, położonych w limnicznej części zbiornika, odpowiednio w odległości 13 i 0,2 km od zapory (rys. 3). Oprócz mniejszego zmacenia i udziału zawiesiny mineralnej (65-71%), różnica między przekrojami położonymi w górnej i dolnej części zbiornika wyraża się także mniejszym zróżnicowaniem koncentracji zawiesiny mineralnej (25%). Dla tych przekrojów charakterystyczne jest również występowanie większych koncen-

tracji zawiesiny organicznej, a także mineralnej w punktach pozanurtowych (przekrój PP-3 punkty L i S, przekrój PP-4 punkty P i S) oraz brak jakichkolwiek relacji między wielkością zmaczenia a przepływem. Mniejsza zmienność zawiesiny ogólnej i poszczególnych jej składowych w częściach nurtowych przekrojów wskazuje na większą dynamikę mas wodnych w zalewowych partiach zbiornika.

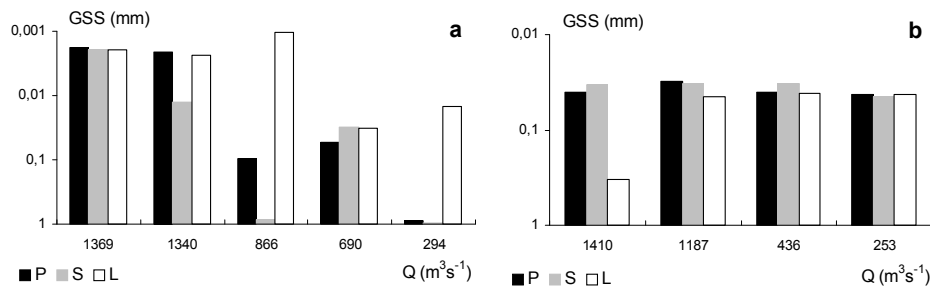
Przedstawione wyniki świadczą o dużym wpływie, niezależnej od przepływu rzecznego, wewnątrzbiornikowej cyrkulacji wody na przebieg zmaczenia w limnicznej części zbiornika.

### **Charakterystyka uziarnienia zawiesiny**

Wyniki analiz uziarnienia zawiesiny mineralnej wykazały, że składa się ona głównie z mułków – 71,6%. Średni udział pozostałych frakcji głównych kształtował się na poziomie 22,8% – piaski i 5,6% – ły. W poszczególnych próbach proporcje głównych frakcji zmieniały się w szerokim zakresie. Występowały przypadki, w których udział piasków i mułków wynosił aż 98,6%, a frakcji ilastej 31,7%.

Zróżnicowanie środowiska zbiornika, ze względu na warunki transportu zawiesiny w jego górnej (rzecznej) i dolnej (jeziornej) części, uwidaczniają już wartości podstawowych wskaźników uziarnienia. Wyliczone wartości średniej średnicy ziarna (GSS) świadczą o nieco większej średnicy przeciętnego ziarna w dolnej części zbiornika. Średnia wartość GSS dla próbek z górnej części zbiornika wynosi 0,024 mm, a w dolnej 0,033 mm, co odpowiada odpowiednio frakcjom mułków średnioziarnistych i gruboziarnistych. O bardziej drobnoziarnistym charakterze zawiesiny w górnej części zbiornika świadczy również fakt, że w 20% analizowanych prób wartości średniej średnicy ziarna odpowiadają frakcji ilastej, natomiast w odcinku limnicznym maksymalne wartości GSS wynosiły 0,005 mm, co odpowiada frakcji bardzo drobnoziarnistych mułków. Bardzo dodatnia skośność rozkładu uziarnienia (GSK 0,92) wskazuje na znaczne wzbogacenie zawiesiny w ziarna drobniejsze od przeciętnych. Słaby jest stopień wysortowania zawiesiny w całym zbiorniku. Wyższe wartości wskaźnika wysortowania (GSO) w górnej części zbiornika (1,35), w porównaniu z dolną (1,23), świadczą o nieznacznie gorszym wysortowaniu zawiesiny transportowanej w rzecznej części zbiornika.

Związek wielkości średniej średnicy ziarna z wielkością dopływu wody do zbiornika określony w przekrojach PP-1 i PP-3 położonych w rzecznej i limnicznej części zbiornika ukazuje ich wyraźną hydro- i litodynamiczną odmienność (rys. 4). Zmiany wartości GSS w profilu PP-1 stosunkowo dobrze wyrażają tendencję polegającą na wzroście średniej średnicy ziarna ze spadkiem wielkości przepływu (rys. 4 a). Jest to szczególnie widoczne w części korytowej zbiornika (prawa i środkowa część przekroju). Niskie wartości GSS w tej części przekroju świadczą o możliwości wprowadzania do zawiesiny w okresach niżówek nawet gruboziarnistych piasków facji korytowej. W czasie większych przepływów wielkość uziarnienia zawiesiny jest podobna w całym przekroju. W limnicznej części zbiornika uziarnienie zawiesiny niezależnie od wielkości dopływu jest bardzo podobne i wynosi ok. 0,038 mm (mułek gruboziarnisty; rys. 4 b). W warunkach silnego wiatrowego mieszania wód zbiornika w stan zawieszenia mogą być jednak wprowadzane nawet piaszczyste frakcje materiału dennego.



Rys. 4. Średnia średnica ziarna w przekroju poprzecznym PP-1 (a) i PP-3 (b): P, S, L – punkty pomiarowe odpowiednio w prawej, środkowej i lewej części profilu

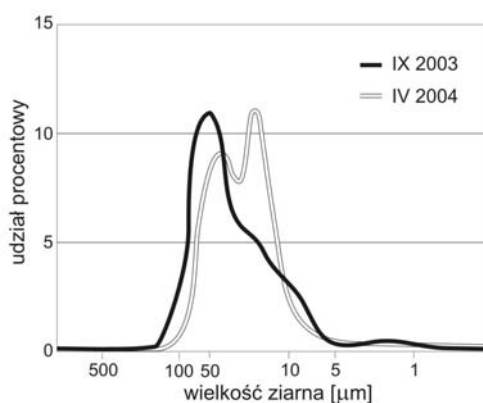
Fig. 4. Mean grain size in the cross section PP-1 (a) and PP-3 (b): P, S, L – sampling points respectively in the right, middle and left side of the profile

Analiza prób pobranych 1 kwietnia 2005 roku przy  $Q = 2319 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  wykazała, że w czasie przepływów wezbraniowych uziarnienie zawiesiny jest stosunkowo jednorodne na całej długości zbiornika. Nieregularne zmiany średniej średnicy ziarna są niewielkie (0,019-0,005 mm) i mieszczą się w zakresie frakcji odpowiadającej mułkom średnioziarnistym i bardzo drobnociarnistym. Zawiesina charakteryzowała się słabym wysortowaniem oraz bardzo dodatnio skośnym rozkładem uziarnienia, co wskazuje na znaczną domieszkę ziaren drobniejszych od przeciętnych. W górnej (rzecznej i przejściowej) części zbiornika rozkład uziarnienia analizowanych próbek zawiesiny miał charakter unimodalny, a w limnicznej bimodalny. Wartość drugiej mody (0,0034-0,003 mm) odpowiada ziarnom frakcji ilastej. Wyraźna przewaga frakcji drobnomułkowych i jednocześnie względnie duża jednorodność składu granulometrycznego zawiesiny w czasie przepływów wezbraniowych wynika z charakteru uziarnienia materiału źródłowego. W okresie wezbrań jest nim przede wszystkim odsłaniająca się w brzegach Wisły tzw. „mąda ilasta”, będąca dolnym segmentem osadów powodziowych budujących równinę zalewową. Pojawienie się większej domieszki frakcji ilastych w dolnej części zbiornika należy wiązać z lokalną dostawą materiału, szczególnie z prawego brzegu zbiornika, w którym w wielu miejscach odsłaniają się ilaste i pylaste osady mioceńskie oraz plioceńskie. Uruchomieniu tego źródła dostawy, szczególnie przy silnym falowaniu, sprzyja wysoki stan wody w zbiorniku w czasie wezbrań. W związku ze wzrostem energii środowiska prądowego możliwe jest również uruchamianie drobnociarnistych kohezyjnych frakcji z osadów dennych zbiornika. Należy więc podkreślić, że w warunkach przepływu rzecznoego podlega agregacji pewna część transportowanych w suspensji najdrobniejszych cząstek mineralnych (WALLING i KANE 1984). Zdyspergowanie tych agregatów w aparaturze pomiarowej sprawia, że zmierzona wielkość części cząstek jest mniejsza od rzeczywistej. Faktem tym można tłumaczyć znaczny spadek koncentracji zawiesiny w kierunku zapory, mimo charakteru uziarnienia zawiesiny podobnego w całej osi zbiornika.

Różnice uziarnienia zawiesiny w warunkach przepływów wezbraniowych i niżowkowych dobrze ilustrują przykłady uśrednionych krzywych frekwencji ziarn dla próbek pobranych w środkowej i dolnej części zbiornika. Rozkłady uziarnienia są unimodalne w próbach zawiesiny pobranych w czasie niżówki ( $Q = 253 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 3 września 2003



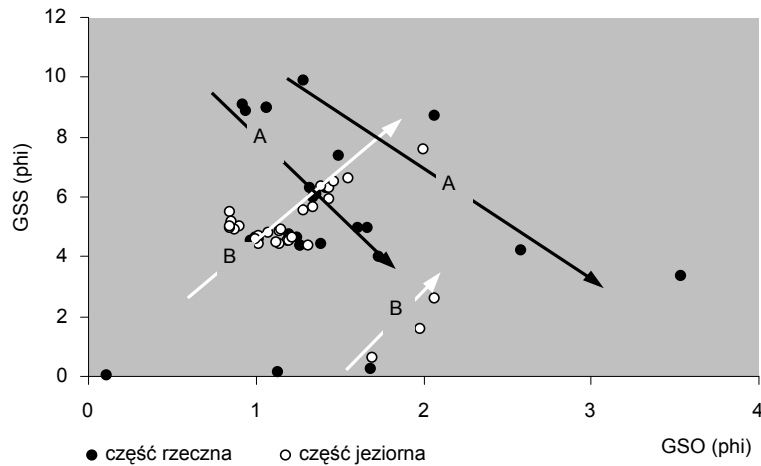
roku (rys. 5). Choć dominuje frakcja mułkowa (średnio 58,3%) znaczny udział ma także frakcja piaszczysta (średnio 39,4%). Odmienne charakter ma uziarnienie zawiesiny w próbkach pobranych w czasie niewielkiego wezbrania ( $Q = 1187 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 22 kwietnia 2004 roku. Rozkłady uziarnienia są bimodalne (rys. 5). Pierwsza moda występuje w zakresie frakcji grubomułkowej o przeciętnej frekwencji 9%. Druga, o większej częstotliwości, w zakresie frakcji drobnomułkowej i przeciętnej frekwencji 11%. W próbkach pobranych w czasie wezbrań zwiększa się udział frakcji mułkowej (średnio 76,2%), a spada piaszczystej (średnio do 22%). Porównanie rozkładu uziarnienia zawiesiny i osadów dennych wykazało, że w zawieszynie ziarna frakcji grubomułkowej są frakcjami podstawowymi, natomiast w osadach dennych zaznacza się ich niedobór. Jest więc prawdopodobne, że ważnym źródłem frakcji grubomułkowej w zawieszynie są produkty erozji dna zbiornika. Pochodzenie frakcji drobnomułkowej w próbkach zawiesiny jest związane z erozją brzegów lub wzrostem erozji osadów dennych w czasie wysokoenergetycznych przepływów. Wraz ze wzrostem energii prądów wodnych podczas wezbrań z erodowanego dna zbiornika do zawiesiny przechodzą także ziarna frakcji drobnomułkowej, będącej głównym składnikiem osadów zbiornika (GIERSZEWSKI i SZMAŃDA 2005).



Rys. 5. Krzywe uśrednionej frekwencji uziarnienia zawiesiny

Fig. 5. Average frequency curves of suspension grain size

Hydrodynamiczną odmienną warunków środowiska transportacyjnego, rzecznej i jeziornej części zbiornika, wyjaśnia zależność średniej średnicy ziarna (GSS) od wysortowania (GSO). Przeważnie w rzecznej części zbiornika wraz ze wzrostem średniej średnicy ziarna zmniejsza się stopień wysortowania osadu, natomiast sytuacja przeciwna jest bardziej typowa dla części jeziornej zbiornika (rys. 6). Na podstawie zaobserwowanych zależności jest możliwe scharakteryzowanie ogólnych hydrodynamicznych warunków transportu zawiesiny oraz określenie pochodzenia materiału źródłowego transportowanego w suspensji. Typ zależności „A” stwierdzony w górnej części zbiornika wskazuje jeszcze na warunki zróżnicowanej dynamiki erozji i transportu materiału



Rys. 6. Rozkład prób zawiesiny mineralnej na diagramie zależności średnicy średnicy ziarna (GSS) i wysortowania (GSO): A, B – typy zależności opisane w tekście

Fig. 6. Mineral suspension samples distribution on the scatter diagram of mean grain size (GSS) and standard deviation (GSO): A, B – types of dependencies described in the paper

klastycznego w korycie Wisły. Grubszy, słabiej wysortowany materiał typowy dla osadów korytowych jest uruchamiany w warunkach mniejszej dynamiki ruchu wody. Prędkości przepływu wody w górnej części zbiornika, nawet w okresach głębokich niżówek ( $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), są większe ( $25\text{-}30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) od prędkości krytycznej potrzebnej do poderwania z dna i przeniesienia w zawieszynie frakcji piaszczystych (GIERSZEWSKI 2006 a). Transport materiału drobniejszego przeważa w okresach większych przepływów Wisły. Wysokie stany wody, a w związku z tym intensywna erozja boczna koryta sprzyja dostawie nieco lepiej wysortowanego materiału budującego równinę zalewową. W wypadku zależności „B” stwierdzonej w limnicznej części zbiornika, wraz ze zmniejszaniem się średnicy ziarna pogarsza się wysortowanie zawiesiny. W czasie przepływów niżówkowych i średnich zawiesina składa się z nieco lepiej wysortowanego materiału, w którym dominuje frakcja mułków głównie gruboziarnistych. W takich warunkach z zawiesiny wypada frakcja piaszczysta oraz zagregowane cząstki ilaste. Źródłem dostawy umiarkowanie wysortowanych mułków grubo- i średnioziarnistych są w tym czasie osady dennego zbiornika. Sprzyja temu intensywne mieszanie wód zbiornika powodujące resuspensję materiału dennego i jego przeniesienie przez prądy cyrkulacyjne. O dużej skali procesów resuspensji, zachodzących w Zbiorniku Włocławskim, świadczy przewaga litodynamicznych środowisk redepozycyjnych i transportowych zapisana w osadach dennych zbiornika (GIERSZEWSKI i SZMAŃDA 2007). Gorzej wysortowane, bardziej drobnociarniste cząstki pojawiają się w zawieszynie w większych ilościach w okresach przepływów wezbraniowych.

## Konkluzja

Zbiornik Włocławski jest uznawany z akwen charakteryzujący się bardzo szybką wymianą wody (średni wieloletni teoretyczny czas poziomej wymiany wody wynosi 5,2 doby). Z faktem tym związane jest występowanie w zbiorniku wybitnie rzecznych cech środowiska. Zdaniem autora powoływanie się na tak obliczone tempo wymiany wody, które nie uwzględnia procesów wymiany wewnętrznej, może prowadzić do błędnych interpretacji zjawisk zachodzących w zbiorniku (GIERSZEWSKI 2006 b). Scharakteryzowane cechy i warunki transportu zawiesiny w górnej i dolnej części zbiornika wskazują na obecność w tym „przepływowym” zbiorniku odcinka o cechach rzecznych i jeziornych. O ile o przebiegu zmaczenia w górnej – rzecznej części zbiornika decydują warunki dostawy zawiesiny rzecznej, o tyle w dolnej – jeziornej części zbiornika za wielkość zmaczenia i charakter zawiesiny odpowiadają w dużym stopniu procesy hydrodynamiczne i sedymentacyjne zachodzące w masie wodnej zbiornika, nawet w czasie mniejszych wezbrań.

## Literatura

- BANACH M., 1994. Morfodynamika strefy brzegowej zbiornika Włocławek. Pr. Geogr. IGiPZ PAN 161.
- BRAŃSKI J., 1968. Oznaczanie ilości unosin metodą wagową bezpośrednią przy użyciu sączków. Pr. PIHM 95: 45-67.
- FOLK R.L., WARD W.C., 1957. Brazos River bar, a study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.* 27: 3-26.
- GIERSZEWSKI P., 2005. Zróżnicowanie troficzne Zbiornika Włocławskiego w półroczu letnim na tle warunków przepływu wody. W: Jeziora i sztuczne zbiorniki wodne – procesy przyrodnicze oraz znaczenie społeczno-gospodarcze. Red. A.T. Jankowski, M. Rzętała. Wyd. Wyd. Nauk Ziemi Uniw. Śląs., Sosnowiec: 59-72.
- GIERSZEWSKI P., 2006 a. Warunki przepływu wód Wisły przez zbiornik Włocławski. W: Drogami wędrówek i badań Profesora Rajmunda Galona w 100-ną rocznicę urodzin (1906-2006), przewodnik sesji terenowych. Wyd. Turpress, Toruń: 250-254.
- GIERSZEWSKI P., 2006 b. Intensywność wymiany wody w zbiorniku włocławskim. *Dok. Geogr.* 32: 64-69.
- GIERSZEWSKI P., GLAZIK R., KUCIŃSKI J., 2005. Multi-annual variability of the concentration of suspended matter in the Włocławek reservoir. *Limnol. Rev.* 5: 81-91.
- GIERSZEWSKI P., SZMAŃDA J.B., 2005. Ocena wpływu Zbiornika Włocławskiego na transport zawiesiny Wisłą. W: Współczesna ewolucja rzeźby Polski. VII Zjazd Geomorfologów Polskich, Kraków, 19-22 września 2005. Red. A. Kotarba, K. Krzemień, J. Świąchowicz. Wyd. Inst. Geogr. Gosp. Przestrz. UJ, Kraków: 139-145.
- GIERSZEWSKI P., SZMAŃDA J.B., LUC M., 2006. Distribution of the bottom deposits and accumulation dynamics in the Włocławek Reservoir (central Poland). *WSEAS Trans. Environ. Develop.* 5, 2: 543-249.
- GIERSZEWSKI P., SZMAŃDA J.B., 2007. Grain size composition and sedimentological environments in the Włocławek Reservoir bottom deposits (Vistula River, Central Poland). *IAHS Publ.* (w druku).
- GIZIŃSKI A., FALKOWSKA E., 2003. Hydrobiologia stosowana: ochrona wód powierzchniowych. WSH-E, Włocławek.

- ONGLEY E., 1982. Influence of season, source and distance on physical and chemical properties of suspended sediment. *IAHS Publ.* 137: 371-383.
- TEISSEYRE A.K., 1983. Osady denne Jeziora Turawskiego w świetle badań geologicznych. *Geol. Sud.* 18, 1: 21-60.
- WALLING D.E., KANE P., 1984. Suspended sediment properties and their geomorphological significance. W: *Catchment experiments in fluvial geomorphology*. Red. T.P. Burt, D.E. Walling. Geo Books, Norwich: 311-334.

#### CONDITIONS OF SUSPENDED SOLIDS TRANSPORT IN THE WŁOCŁAWEK RESERVOIR BASED ON ITS COMPOSITION AND TEXTURE ANALYSIS

**Summary.** The main aim of the paper is the analysis of reasons for spatial variations in suspension concentration, composition and grain distribution in the highly discharged Włocławek dam reservoir. The research results show that in the upper-river part of the reservoir requirements of the river suspension supplies are decisive in the turbidity course. In the low-water discharge conditions this is the sandy and coarse grained silt fraction suspension with the source in the riverbed bottom deposits. In the periods of a higher discharges is observed a transport of the fine grained silt suspension delivered from the eroded banks of the river channel. In the lower-lacustrine part, the size and features of the suspension concentration depend mainly on the intensification of hydrodynamic and sedimentological processes taking part in the reservoir water mass. The suspension mainly consists of the coarse grained silts. Under a slow stream flow circumstances the sandy fraction and aggregated clay particles are deposited. Additional source of fine- and coarse grained silt in a time of intensive reservoir water mixing are the bottom sediments. Periodically higher concentrations of suspension taking place in the lacustrine versus the river part of the reservoir are a big scale consequences of the deposits turbidity and resuspension processes in the Włocławek Reservoir.

**Key words:** Włocławek Reservoir, concentration of suspension, composition, grain-size

*Adres do korespondencji – Corresponding address:*

*Piotr Gierszewski, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stefana Leszczyńskiego, Polska Akademia Nauk, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa, Poland, e-mail: piotr.gierszewski@geopan.torun.pl*

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 10.05.2007*

*Do cytowania – For citation: Gierszewski P., 2007. Warunki transportu zawiesiny w Zbiorniku Włocławskim w świetle analizy jej składu i tekstury. *Nauka Przyr. Technol.* 1, 2, #18.*