

## OCENA REŻIMU MORFOLOGICZNEGO I OPORÓW RUCHU PODCZAS WEZBRAŃ W ODRZE ŚRODKOWEJ

Robert Banasiak, Marcin Krzyżanowski

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział we Wrocławiu

**Streszczenie.** W pracy, opierając się na wynikach pomiarów terenowych, oceniono rozwój form dennych i oporów przepływu w rzece Odrze Środkowej. Obiektem badawczym jest czterokilometrowy odcinek rzeki zlokalizowany poniżej przekroju wodowskazowego w Ścinawie (km 332). Cechą charakterystyczną wybranego odcinka rzeki jest regulacja ostrogami i zmiana trasy koryta z krzywoliniowej na prostoliniową. Pomiarów wykonano w zakresie natężenia przepływu od 120 do 756 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> ( $SSQ = 180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), przy głębokościach wody w korycie osiagających 6 m. W wybranych przekrojach pobrano materiał denny (piaszczysty i żwirowy), mierzono prędkości przepływu, rzędne zwierciadła wody, a także dokonano sondowania dna wzdłuż cieku, co pozwoliło na ustalenie topografii dna, tj. rodzaju i rozmiaru form dennych. Warunki hydrauliczne przeanalizowano z podziałem koryta na strefy przepływu pomiędzy ostrogami (pas regulacyjny) i strefy ostróg. Wyznaczono współczynnik szorstkości wg Manninga dla koryta z uwzględnieniem wpływu trasy. Na odcinku prostoliniowym opory przepływu zmieniają się nieznacznie, natomiast na odcinku krzywoliniowym są wyższe i wzrastają wraz z przepływem. Formy denne rozwijają się w zakresie wydm, osiagając wysokość 1 m, i podczas wezbrań ekstremalnych może wystąpić reżim ich rozmywania (liczba Froude'a < 0,34), jednak bez znaczącego wpływu na redukcję oporów przepływu w części koryta. Ponadto wpływ tej zmienności na przepływ całkowity traci na znaczeniu ze względu na to, iż podczas wezbrań udział przepływu korytowego w całkowitym relatywnie spada. Określone współczynniki szorstkości stanowią wartości „bezpieczne” w ocenie zdolności przepustowej Odry Środkowej.

**Słowa kluczowe:** rzeka Odra, wezbranie, formy denne, opory przepływu, współczynnik Manninga

---

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Robert Banasiak, mgr inż. Marcin Krzyżanowski, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, Oddział we Wrocławiu, ul. Parkowa 30, 51-616 Wrocław, e-mail: [robert.banasiak@imgw.pl](mailto:robert.banasiak@imgw.pl).

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2015

## WSTĘP

Rzeka Odra jest ważną drogą żeglugi śródlądowej, uregulowaną serią stopni wodnych oraz zabudową ostrogową koryta głównego. Odrę cechują znaczne wahania natężenia przepływu. Jest to rzeka mało zasobna w wodę, charakteryzująca się częstymi niskimi przepływami [Parzonka i in. 2010], a jednocześnie posiada wysoką, jedną z najwyższych dla rzek europejskich powodziogenność [Dubicki 2012]. Potwierdzeniem tego są szczególnie dotkliwe powodzie w latach 1997 i 2010 [IMGW-PIB 2011]. Po tych wydarzeniach, a także w związku z wprowadzaniem w życie Ramowej Dyrektywy Wodnej UE, podjęto szereg działań w kierunku ochrony przeciwpowodziowej, prognozowania powodzi oraz tworzenia map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego. W ostatnim kontekście ważnym narzędziem ich wyznaczania jest numeryczne modelowanie hydrauliczne relacji przepływ–stan, szczególnie dla przepływów ekstremalnych. W tym celu wykorzystuje się modele jednowymiarowe (1D), a ostatnio w szerszym zakresie modele dwuwymiarowe (2D) [Banasiak 2012a, 2012b]. Niezależnie od typu modelowania jednym z podstawowych zagadnień, obok odpowiedniej reprezentacji geometrycznej koryta i doliny rzecznej, jest opis oporów przepływu i wyznaczenie współczynnika szorstkości dla koryta głównego i terenu zalewowego [Verhoeven i in. 2004, Wormleaton i in. 2005, Yang i Tan 2008, Ballesteros i in. 2011]. Szczególnie w przypadku hydraulicznie szerokiego koryta głównego, którego dno stanowią utwory aluwialne, ważne jest uwzględnienie procesu transportu rumowiska kształtującego dynamikę dna i oporów przepływu. Dla rzeki Odry podjęto wcześniej próby bezpośredniego powiązania parametrów hydraulicznych, w szczególności oporów przepływu i transportu rumowiska [Głowski i in. 1995, Czaban i Mokwa 1998, Parzonka 2008]. Jednak ze względu na brak dostatecznie kompletnych i szczegółowych danych pomiarowych, oceny te obciążone były znacznym błędem, dając szeroki zakres wyników, a wnioski miały charakter nader spekulatywny.

W związku z powyższym w niniejszej pracy spróbowano odpowiedzieć na następujące pytania:

- W jaki sposób rozwijają się formy denne w korycie rzeki Odry Środkowej wraz ze wzrostem natężenia przepływu, a szczególnie podczas wezbrań? Czy w trakcie wezbrań ekstremalnych występuje reżim przejściowy (rozmywanie form dennych)?
- Jak powyższe wpływa na opory przepływu dla dna?

Ponadto:

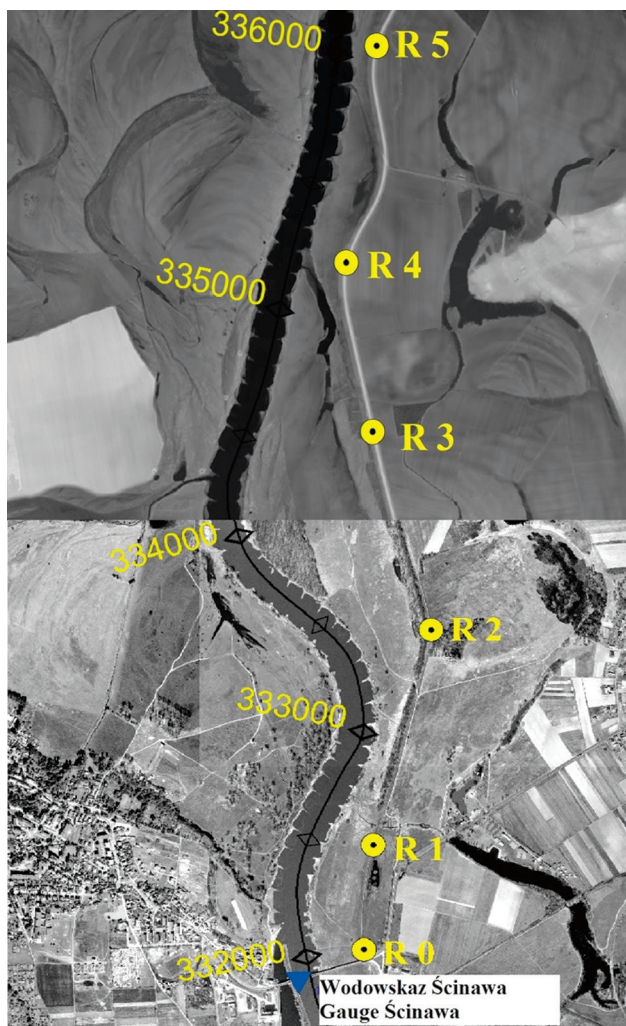
- Jaki jest wpływ trasy koryta (krzywoliniowość) na opory przepływu?
- Jaki jest wpływ zabudowy ostrogowej na opory przepływu?
- Jaki jest rozdział wód wezbraniowych na przepływ w korycie głównym i poza nim?

Do udzielenia odpowiedzi służą wyniki dedykowanych pomiarów hydrometrycznych przeprowadzonych podczas wezbrania w roku 2013 na odcinku rzeki poniżej Ścinawy. Ponadto wykorzystano pomiary historyczne, w szczególności pomiar wykonany techniką ADCP podczas powodzi w 2010 r.

## POMIARY TERENOWE

### Obiekt pomiarowy

Odcinek pomiarowy, przedstawiony na ryc. 1, zlokalizowano na Odrze Środkowej poniżej wodowskazu Ścinawa (km 332). Odcinek ten znajduje się 50 km poniżej jazu Brzeg Dolny, ostatniego stopnia piętrzącego na Odrze. Poniżej tego stopnia Odra płynie swobodnie w korycie uregulowanym zabudową ostrogową mającą na celu koncentrację przepływu i utrzymanie odpowiednich głębokości żeglugowych. Na odcinku tym zasn-

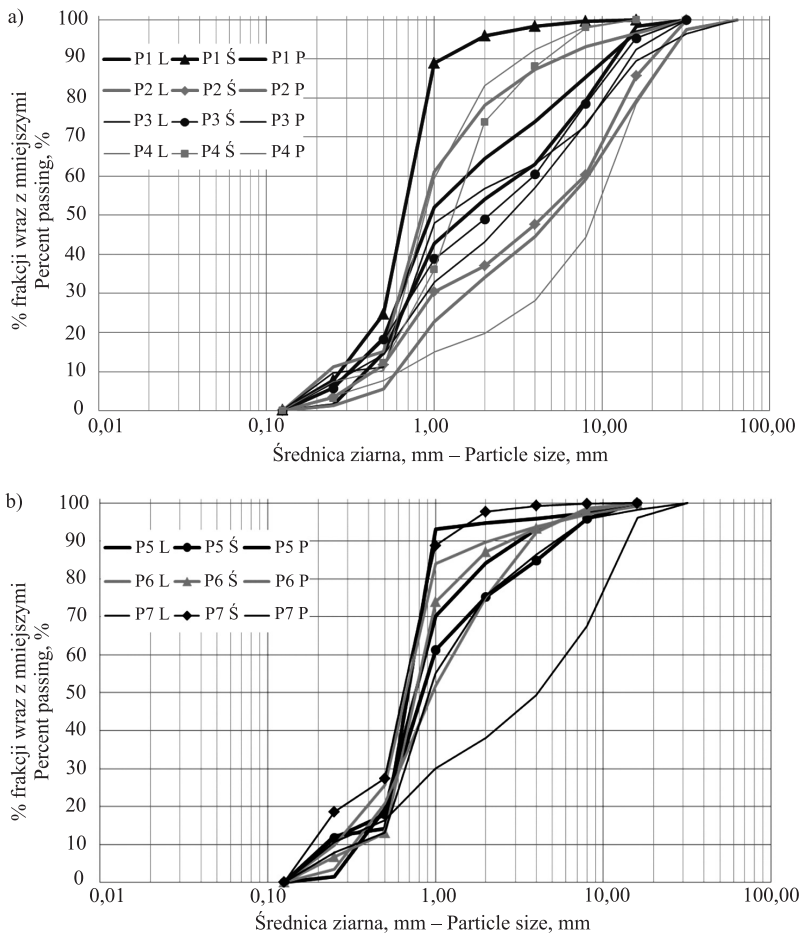


Ryc. 1. Odcinek pomiarowy poniżej wodowskazu Ścinawa, wraz z kilometrażem i reperami roboczymi (R0, R1,..., R5), na tle ortofotomapy i NMT

Fig. 1. Measuring site with indicated river chainage and record benchmarks (R0, R1, ..., R5), orthophotomaps and DEM as background

cza się postępująca erozja liniowa koryta w postaci gradacji materiału dennego i obniżenia się dna [Parzonka i in. 1997]. Odcinek badawczy o długości 4 km obejmuje początkowo trasę krzywoliniową, a następnie prostoliniową koryta. Od przekroju wodowskazowego zlokalizowanego tuż poniżej mostu drogowego dolina z obydwu stron rozszerza się. Rzeka jest tutaj obwałowana prawostronnie.

Na badanym odcinku koryta brzegowe Odry osiąga szerokość do 150 m, a szerokość pasa regulacyjnego dna, tj. szerokość dna między podstawami ostróg, wynosi 50–60 m. Odległość w nurcie pomiędzy kolejnymi parami ostróg wynosi blisko 100 m. Pobrano próby materiału dennego w siedmiu przekrojach, po trzy próby w każdym: w środkowej, prawo- i lewostronnej części koryta. Analiza granulometryczna wykazała, co pokazuje ryc. 2, że średnica zastępcza ziarna  $d_{50}$  waha się w granicach od 0,7 do 10 mm. Grubszy, bardziej zróżnicowany materiał zalega na odcinku krzywoliniowym, drobniejszy na odcinku prostoliniowym.



Ryc. 2. Krzywe uziarnienia materiału dennego: a) odcinek krzywoliniowy, b) odcinek prostoliniowy  
Fig. 2. Grain size distribution of bed material: a) curve section, b) straight section

Przepływy charakterystyczne dla przekroju Ścinawa (dla lat 1951–2010) kształtują się następująco:

- $SNQ = 66,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $SSQ = 180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $SWQ = 700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Przepływ o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia to:

- $Q_{10\%} = 1152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $Q_{1\%} = 2047 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $Q_{0,2\%} = 2801 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

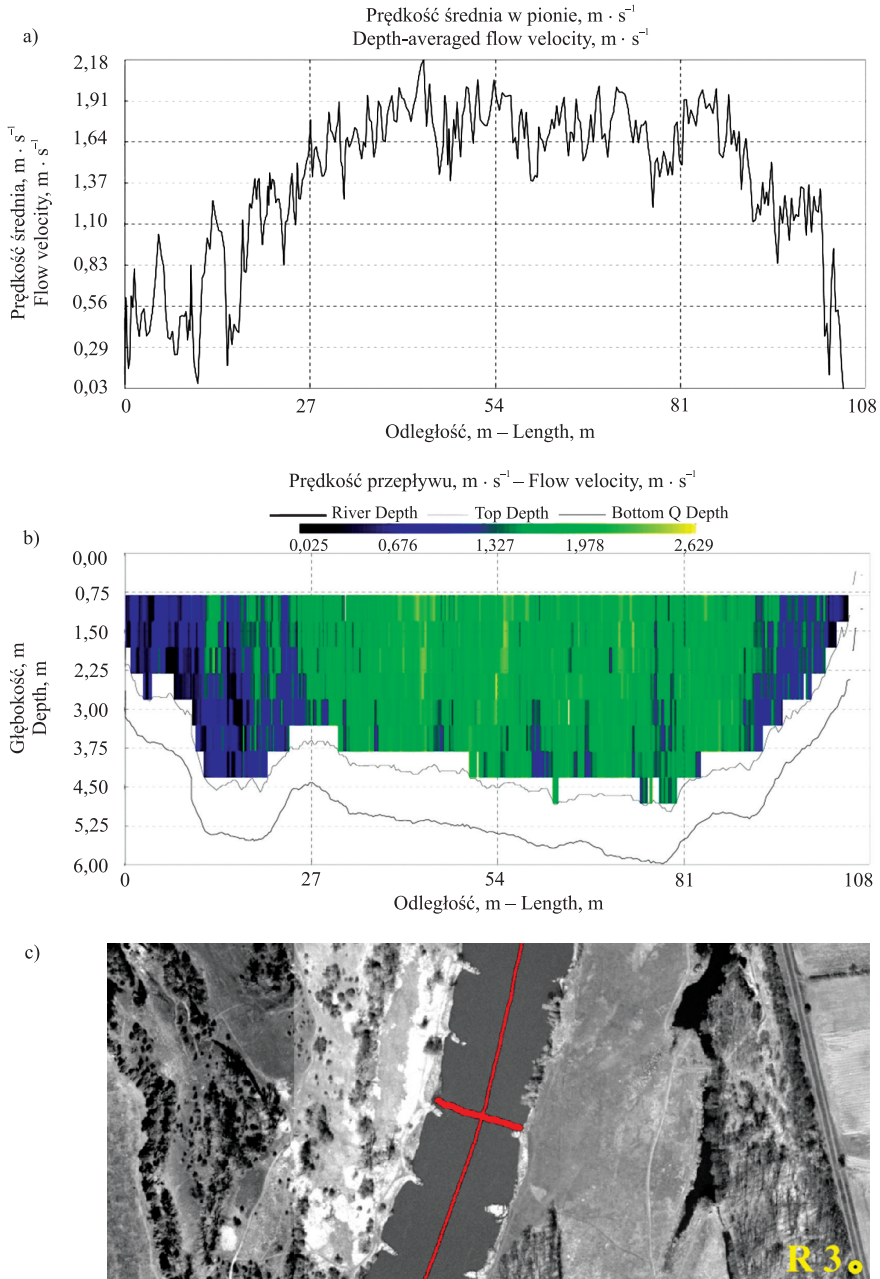
## Metodyka

Pomiary hydrometryczne zostały wykonane podczas wezbrania w czerwcu 2013 r., dla przepływów w zakresie od 118 do  $756 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Głębokość wody w korycie osiągała 6 m. Dla porównania podczas ekstremalnego wezbrania w roku 1997 (przepływ maksymalny około  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) głębokość ta wynosiła 8 m. Podczas wykonywania pomiaru przy najwyższym przepływie ostrogi były zatopione, woda wystąpiła z brzegów. Na terenach zalewowych nie wykonano jednak pomiaru natężenia przepływu ze względu na względnie małe głębokości wody (w zagłębieniach terenu maks. do 1 m) i stagnację wody wynikającą z obecności gęstej i wysokiej roślinności trawiastej oraz krzewów.

Na prawym wale zainstalowano 6 reperów roboczych (R0, R1, ..., R5) wykorzystywanych jako punkty odniesienia do pomiarów poziomu zwierciadła wody, z lokalizacją pokazaną na ryc. 1. Na wysokości reperów dokonywano także pomiarów hydrometrycznych w korycie.

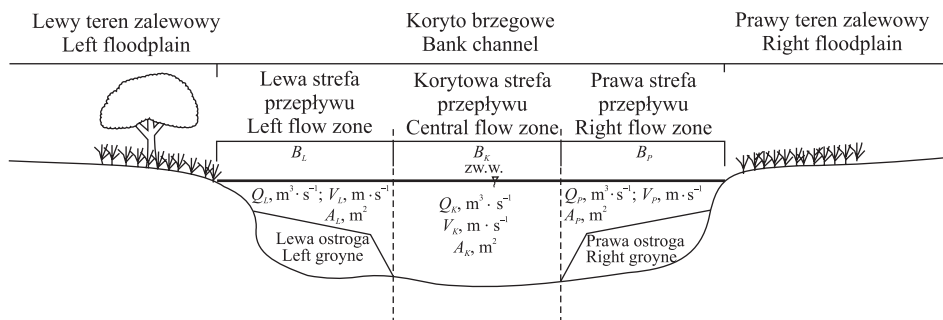
W każdej z pięciu przeprowadzonych serii pomiarowych dokonywano pomiaru prędkości (natężenia) przepływu i rzędnej zwierciadła wody w pięciu przekrojach. Wykonano również sondowanie dna w nurcie rzeki. Pomiary realizowano za pomocą sondy ADCP Rio Grande 600/1200 kHz z łodzi napędzanej motorem. Sonda ADCP wyposażona jest w moduł GPS, co daje dodatkowe możliwości w analizie uzyskanych wyników. Wykorzystując środowisko GIS, można powiązać wyniki pomiaru z ortofotomapą i numerycznym modelem terenu (NMT) i odnieść wyniki do lokalnych uwarunkowań batymetrycznych i topograficznych. Przykładowy rozkład prędkości wraz z trasą pomiaru pokazano na ryc. 3. Obrazowanie trasy przekroju względem ostróg jest tu istotne, gdyż w trakcie pomiaru dla przepływu wysokiego dokładne jego ustalenie nie było możliwe (ostrogi zatopione). Pomiar ten pokazuje także zredukowane prędkości przepływu w obszarze pól międzyostrogowych (a także wybór poniżej ostrogi po lewej stronie).

W analizie warunków przepływu przyjęto podział na strefy przepływu w korycie brzegowym i poza korytem. Strefę koryta brzegowego uregulowanego ostrogami podzielono na kolejne 3 strefy: prawą i lewą strefę przepływu obejmujące przepływ nad ostrogami i w polach międzyostrogowych oraz strefę koryta w pasie regulacyjnym pomiędzy ostrogami (ryc. 4). Dla poszczególnych stref wyznaczono szerokość zwierciadła wody  $B$ , powierzchnię przepływu  $A$ , średnią prędkość przepływu  $V$  i natężenie przepływu  $Q$ .



Ryc. 3. a) Średnie prędkości przepływu w pionach. b) Rozkład prędkości przepływu w przekroju. c) Lokalizacja przekroju pomiarowego P3 podczas przepływu wysokiego (i trasa sondowania dna)

Fig. 3. a) Depth-averaged flow velocity. b) Flow velocity distribution. c) Localization of velocity points for cross-section P3 during high water (the longitudinal bottom tracking included)



Ryc. 4. Schemat podziału koryta na strefy

Fig. 4. Scheme for flow analysis

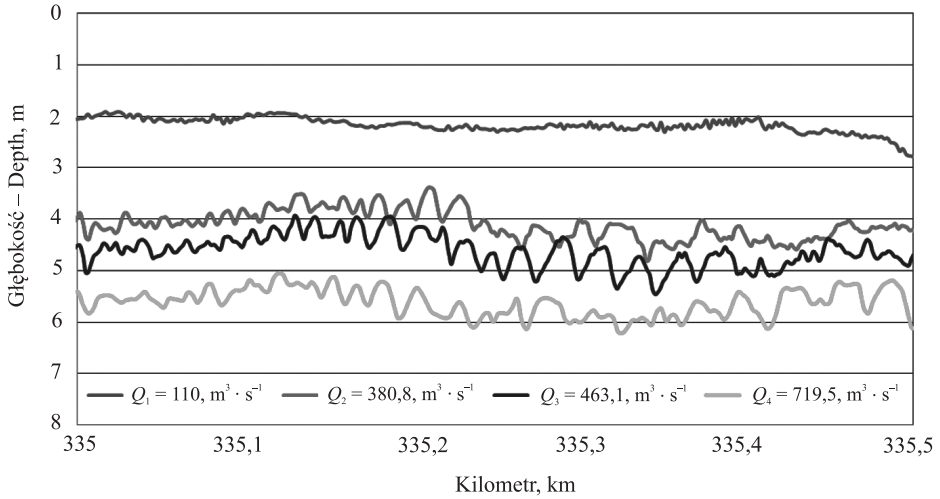
## ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

### Formy denne

Na ryc. 5 przedstawiono wyniki sondowania dna przy różnych przepływach na prostoliniowym odcinku rzeki. Na ryc. 6 rozmiary form dennych ujęto w relacji ich wysokości do długości; są to wartości uśrednione. Jak można zauważyć, przy niskich przepływach formy denne posiadają niewielkie rozmiary, od kilku do kilkunastu centymetrów wysokości. Natomiast dla przepływów średnich i wysokich rozmiary form dennych – wydm – uzyskują znacznie większe wartości i ich wysokość osiąga 1 m, długość 20–25 m. Wzrost rozmiarów wydm dla przepływów do około  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  jest jednoznaczny, dla wyższych przepływów przyrost ich wysokości wydaje się nieznaczny (ryc. 6). Należy dodać, że analizę i porównanie utrudnia to, iż trasa sondowania dna w poszczególnych pomiarach nie pokrywała się ze sobą, a przy najwyższym przepływie trudno było utrzymać kurs trasy w linii nurtu rzeki. Zauważono także, że odsunięcie się trasy sondowania dna od środka koryta skutkuje bardziej nieregularnymi i niższymi rozmiarami form dennych. Stąd można wnioskować, iż w pełni rozwinięte formy denne występują w dość wąskim środkowym pasie koryta, a lateralne zawirowania wskutek zabudowy ostrogowej modyfikują rozwój form dennych. Istotny jest również proporcjonalny wzrost wysokości i długości obserwowanych form dennych, co w przybliżeniu daje stałe nachylenie tych form. Zmienność tej cechy natomiast wiązana jest ze zmiennością współczynnika szorstkości wskutek form dennych [Vanoni 1975, Banasiak i Verhoeven 2008].

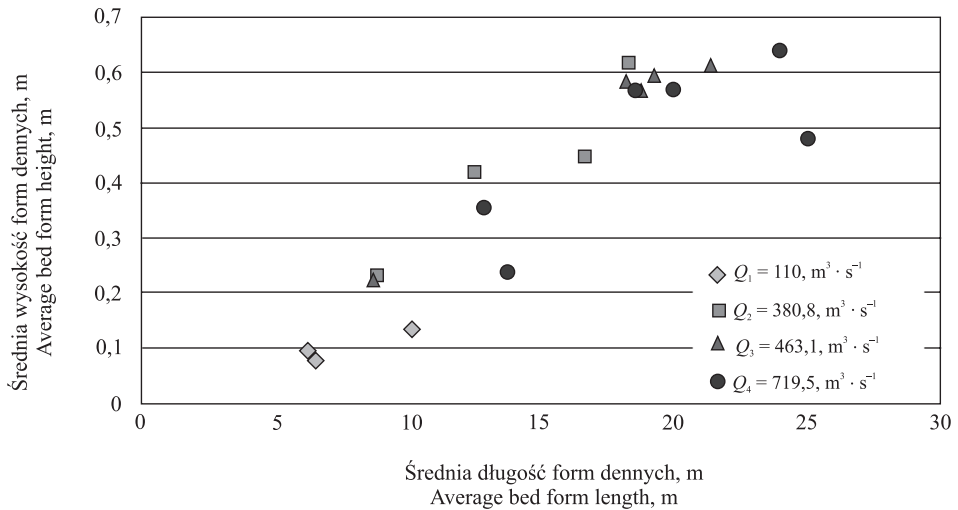
### Spadek zwierciadła wody

Spadek zwierciadła wody wyznaczono na podstawie pomiarów rzędnej zwierciadła wody w okolicy reperów. Jak widać na ryc. 7, na odcinku prostoliniowym wraz ze wzrostem przepływów spadek pozostaje niemal stały o wartości około 0,2‰. Natomiast na odcinku krzywoliniowym spadek jest znacząco wyższy i wzrasta wraz z przepływem od wartości 0,26‰ do 0,34‰. Wyższe spadki, oznaczające wyższe straty energii na tym odcinku, można przypisać obecności zabudowy ostrogowej i wymianie mas i pędu wód pomiędzy polami ostrogowymi a głównym nurtem [Pang 1998].



Ryc. 5. Sondowanie dna – głębokości wody dla różnych przepływów (odcinek prosty)

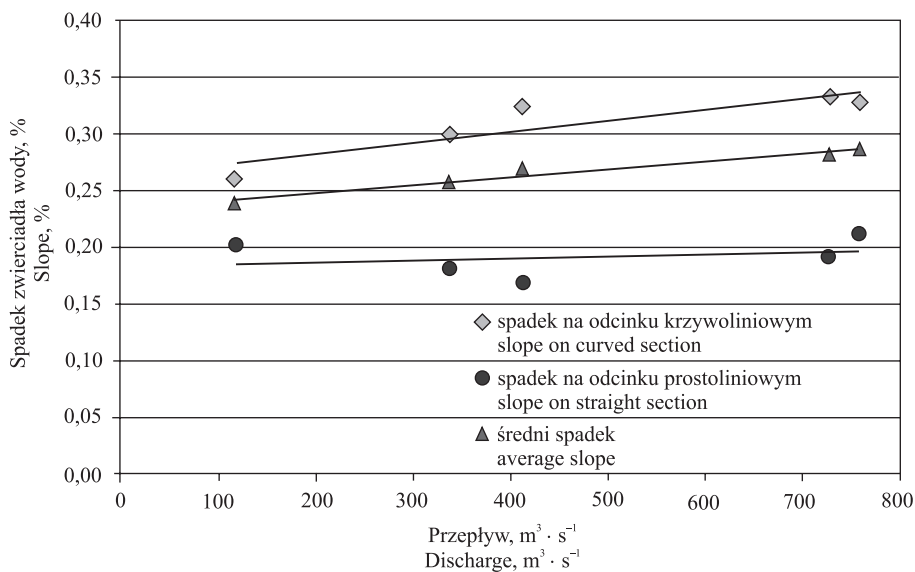
Fig. 5. Tracking of the bottom – depth for different discharges (straight section)



Ryc. 6. Długość i wysokość form dennych

Fig. 6. Dimensions of bed forms





Ryc. 7. Zależność spadku zwierciadła wody od przepływów

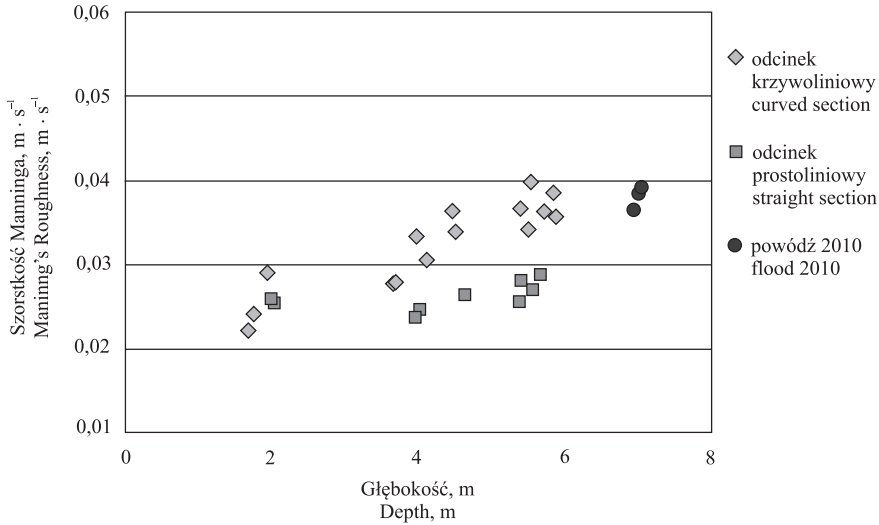
Fig. 7. Water level slope with discharge

### Szorstkość

Na ryc. 8 przedstawiono współczynnik szorstkości obliczony według formuły Manninga dla korytovej strefy przepływu (na podstawie  $Q_k$  i  $A_k$ ). Wartość współczynnika szorstkości na odcinku prostoliniowym, analogicznie do spadków, wykazuje relatywnie małą zmienność i waha się od 0,025 do 0,029. Natomiast dla odcinka krzywoliniowego wzrasta wyraźnie od wartości 0,026 (średnia wartość dla niskiego przepływu) do 0,04, a wzrost wykazuje trend liniowy. Na wykresie tym dodatkowo ujęto wartości współczynnika z obliczeń dla danych ADCP z pomiaru podczas powodzi w 2010 r. [Banasiak i in. 2014]. Pomiar ten zlokalizowany był poniżej wodowskazu, na odcinku zakrzywionym, a obliczone wartości szorstkości są zgodne z obecnymi danymi. Uwidacznia się zatem ponownie wpływ krzywizny trasy i oddziaływania ostróg na wartości współczynnika szorstkości jednowymiarowej formuły na przepływ korytovej. Należy także zaznaczyć, iż przedstawione wyniki odnoszą się do znacznego zakresu napełnienia wody. Podczas katastrofalnej powodzi w 1997 r. (historyczne maksimum) głębokości wody były tylko o 0,6 m wyższe od powodzi w 2010 r. i osiągały na tym odcinku rzeki, jak wspomniano, około 8 m. Można więc przyjąć, iż ekstrapolacja uzyskanych wyników do warunków powodzi ekstremalnej nie będzie obarczona istotnym błędem.

### Ocena morfologiczna dna podczas wezbrań

W odniesieniu do potencjalnego kształtowania się form dennych dokonano dalszej oceny warunków hydraulicznych i morfologicznych w kontekście powodzi ekstremalnych, a w szczególności odpowiedzi na pytanie, czy podczas takich powodzi w Odrze osiągnięte mogą być warunki rozmywania dna.



Ryc. 8. Współczynnik szorstkości Manninga dla korytowej strefy przepływu  
Fig. 8. Manning's roughness coefficient for central channel section

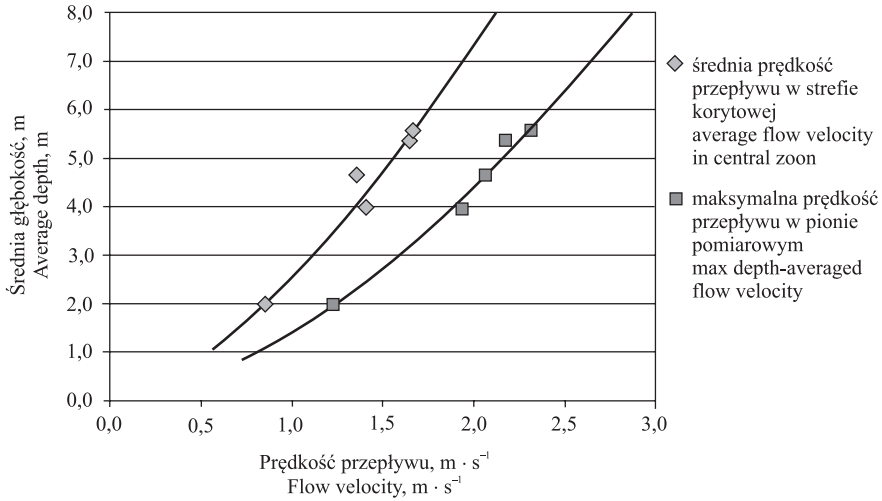
Kształtowanie się form dennych wiąże się z rodzajem materiału dennego i, przy pominięciu wpływu brzegów, z napelnieniem i prędkością przepływu strumienia. Warunki te można przedstawić za pomocą liczby Froude'a  $F = V/(gH)^{0.5}$ , gdzie  $V$  – średnia prędkość przepływu,  $m \cdot s^{-1}$ ,  $H$  – głębokość wody,  $m$ ,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m \cdot s^{-2}$ . Początek reżimu przejściowego dla form dennych (tzn. ich rozmywanie) zachodzi, gdy liczba Froude'a osiąga wartość graniczną  $F_t$  [Karim 1995]:

$$F_t = 2,716 \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{-0.25} \quad (1)$$

Wartość  $F_t$  dla badanego odcinka Odry znajduje się w przedziale 0.28–0.3.

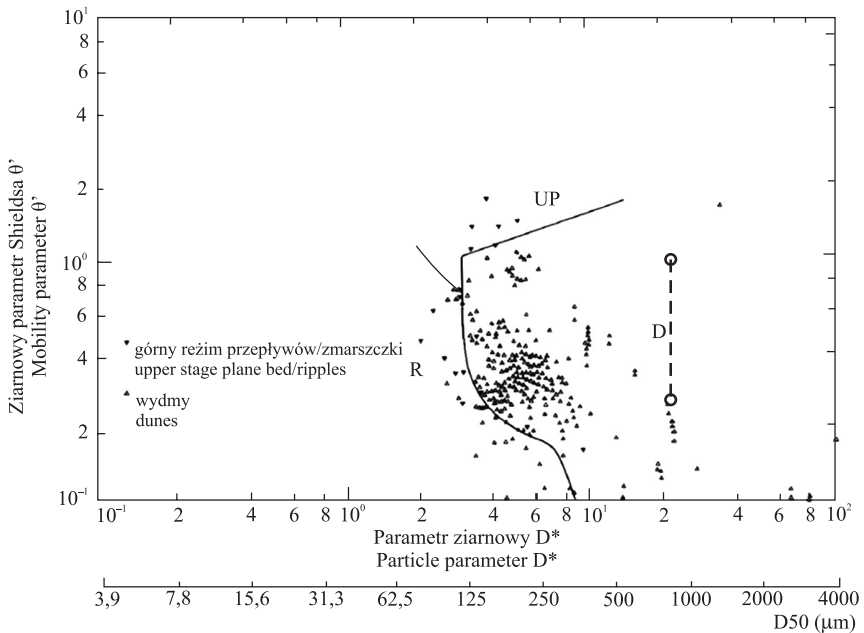
Następnie należy ocenić prędkości przepływu podczas wezbrań. Na ryc. 9 przedstawiono wartości pomierzonych prędkości przepływu, które dają wyraźne potęgowe trendy i pozwalają na ekstrapolację prędkości dla wyższych głębokości w korycie. Średnia prędkość w korycie regulacyjnym w przekroju na odcinku prostoliniowym dla głębokości 6 i 8 m wynosi odpowiednio 1,7 i 2,1  $m \cdot s^{-1}$ , co daje liczbę Froude'a odpowiednio 0,22 i 0,24. Można rozpatrywać także prędkości lokalne – uśrednione w pionie w nurcie rzeki, znacząco wyższe od tych dla całego przekroju – dla tych samych głębokości wynoszą one odpowiednio 2,4 i 2,85  $m \cdot s^{-1}$ , a  $F$  osiąga wartość 0,31 i 0,34. Te ostatnie wartości wskazują na zaistnienie warunków reżimu przejściowego.

Podobny wynik daje ocena reżimu morfologicznego na podstawie diagramu Van den Berga i Van Geldera [1993] (ryc. 10). Bezwymiarowy parametr Shieldsa, tzw. ziarnowy ( $\theta'$ ), dla dokonanych pomiarów uzyskuje wartości w przedziale od 0,22 do 0,67, zaś dla lokalnych (w nurcie) prędkości przepływu podczas wezbrania ekstremalnego może osiągnąć wartość 1,3. Ten zakres wartości lokalizuje formy denne Odry w obszarze wydmy, jednak dla wartości najwyższych zmierzają w kierunku rozmywanego dna (górnego reżimu).



Ryc. 9. Średnia prędkość przepływu w strefie korytowej oraz maksymalna uśredniona w pionie prędkość przepływu w funkcji głębokości wody

Fig. 9. Central zone mean and maximum depth-averaged flow velocity as a function of water depth



Ryc. 10. Zależność form dennych (D – wydmy) od wielkości ziarna i bezwymiarowych naprężeń ścinających ziarnowych dla rzek o głębokości strumienia ponad 1 m [Van den Berg i Van Gelder 1993]; pionowy znacznik – warunki Odry Środkowej

Fig. 10. Bedform in relation to grain mobility and grain size parameter: river flow with water depths larger than 1 m [Van den Berg i Van Gelder 1993]; vertical bar – the Odra conditions

### Aspekt praktyczny wyników

W niniejszej ocenie należy również wskazać na praktyczną implikację wyników, mianowicie na potencjalny wpływ tej zmienności morfologicznej i związanej szorstkości na przepływ całkowity, inaczej – na zdolność przepustową rzeki. Z wcześniejszej analizy autorów wynika, że procentowy udział przepływu korytowego (w pasie regulacyjnym) w przepływie całkowitym maleje wraz z przepływem i np. dla przepływu całkowitego  $Q = 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $Q_k$  wynosi około 40% [Banasiak i in. 2014]. Stąd też wpływ ruchu rumowiska w korycie rzeki na przepływ całkowity maleje wraz ze wzrostem natężenia przepływu. W takim przypadku możliwy, przyjmijmy 10% błąd oszacowania szorstkości dna przełoży się jedynie na kilkucentymetrowy błąd wyznaczenia poziomu zwierciadła wielkiej wody. Czynniki, które silniej mogą oddziaływać na przepustowość rzeki Odry i prognozowanie relacji przepływ–stan, to opory przepływu wynikające ze zmienności trasy koryta właściwego, zabudowa ostrogowa oraz roślinność na brzegach i terenach zalewowych. Ponadto uzyskane współczynniki szorstkości koryta należy traktować jako „bezpieczne”, tzn. iż są to wartości najwyższe dla występujących w Odrze Środkowej form dennych.

### PODSUMOWANIE

Procesom fluwialnym przejawiającym się dynamizmem dna i zmiennością oporów przepływu przypisuje się znaczący udział w kształtowaniu przepustowości kanałów i rzek. Wpływ ten, szczególnie istotny podczas wezbrań, uzależniony jest jednak od charakterystyki geometrycznej koryta i doliny, relatywnego udziału przepływu pod wpływem ruchu rumowiska oraz reżimu hydraulicznego.

Uzyskane wyniki badań są istotne w tym zakresie dla Odry. Stwierdzono, iż formy denne w korycie właściwym rozwijają się wraz z napełnieniem wody, są wydmami osiągniętymi wysokość 1 m. Jednak nawet podczas wezbrań ekstremalnych występujące napełnienie i prędkość przepływu w korycie nie stwarzają warunków do rozmycia form dennych (liczba Froude'a w zakresie do 0,35), w związku z czym do wyraźnej w redukcji oporu przepływu w korycie. Ustalono, że wartości współczynnika szorstkości Manninga dla koryta na odcinku prostoliniowym zmieniają się w granicach 0,025–0,029, natomiast pod wpływem krzywoliniowej trasy i ostróg wzrastają wraz z przepływem do wartości 0,04. Istotne jest również to, że współczynniki szorstkości wyznaczone dla w pełni rozwiniętych wydm stanowią najwyższe wartości w całym możliwym zakresie reżimu morfologicznego dna – są zatem wartościami „bezpiecznymi” w kontekście modelowania hydraulicznego zagrożenia powodziowego. Wpływ zmienności form dennych na przepływ powodziowy jest również ograniczony tym, iż dotyczą one tylko środkowej części koryta. Większy wpływ na zmienność warunków przepływu mają (zatopione) ostrogi i krzywoliniowa trasa rzeki, gdyż zjawiska wymiany mas i pędu wód pomiędzy strefami ostróg a korytem środkowym oraz pomiędzy korytem a terenami zalewowymi się wzmagają. Wpływ roślinności na przepływ ponadbrzegowy również zyskuje na znaczeniu. Aspekty te wymagają dalszych badań.

## PIŚMIENNICTWO

- Ballesteros, J.A., Bodoque, J.M., Diez-Herrero, A., Sanchez-Silva, M., Stoffel, M. (2011). Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *J. Hydrol.*, 403, 103–115.
- Banasiak, R. (2012a). Wykorzystanie technik GIS i numerycznych modeli hydrodynamicznych do oceny zagrożenia powodziowego. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 3/III, 123–134.
- Banasiak, R. (2012b). Modele hydrodynamiczne i tworzenie map zagrożenia powodziowego, [http://www.isok.gov.pl/dane/web\\_articles\\_files/189/06-1-r-banasiak-modele-hydrodynamiczne-i-tworzenie-map-zagrozenia-powodziowego.pdf](http://www.isok.gov.pl/dane/web_articles_files/189/06-1-r-banasiak-modele-hydrodynamiczne-i-tworzenie-map-zagrozenia-powodziowego.pdf).
- Banasiak, R., Verhoeven, R. (2008). Transport of sand and partly cohesive sediments in a circular pipe run partially full. *J. Hydr. Engin.*, 134(2), 216–224.
- Banasiak, R., Krzyżanowski, M., Gierczak, J., Wdowikowski, M. (2014). Ocena lokalnych parametrów hydraulicznych przepływów maksymalnych podczas wezbrania w 2010 r. na rzece Odrze. II Krajowy Kongres Hydrologiczny. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, XX, t. I, 379–388.
- Czaban, S., Mokwa, M. (1998). Charakterystyka hydrauliczna kanału powodziowego Wrocławskiego Węzła Wodnego. *Zesz. Nauk. AR*, 339, Konferencja, 21, Kudowa Zdrój.
- Dubicki, A. (2012). Minutowy przebieg powodzi – stany i opady. [W:] 15 lat po powodzi na Dolnym Śląsku. Red. J. Sobota. Wyd. Inżynierii, Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego, Wrocław.
- Głowski, R., Kasperek, R., Parzonka, W. (1995). Wstępna ocena zmienności oporów ruchu w korycie Środkowej Odry w przekrojach wodowskazowych Malczyce i Ścinawa. *Zesz. Nauk. AR*, 270, Konferencja X(2), Wrocław–Wojnowice, 37–42.
- IMGW-PIB (2011). Dorzecze Odry – Monografia powodzi 2010. Red. M. Maciejewski, M.S. Ostojski, T. Tokarczyk. IMGW, Warszawa, ss. 164.
- Karim, F. (1995). Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial channel flows. *J. Hydr. Engin.* 121(1), 15–25.
- Pang, B. (1998). River flood flow and its energy loss. *J. Hydr. Engin.*, 124(2), 228–230.
- Parzonka, W. (2008). Ocena wpływu rumowiska wleczonego na opory ruchu w korycie rzeki Odry. [W:] *Meteorologia, hydrologia, ochrona środowiska – kierunki badań i problemy*. Red. A. Dubicki. IMGW, Warszawa, 175–180.
- Parzonka, W., Mokwa, M., Banasiak, R., Kasperek, R. (1997). Sediment transport in Middle Odra below the channelized river section. 9<sup>th</sup> Intern. Conference on Transport & Sedimentation of Solid Particles, Kraków, 451–461.
- Parzonka, W., Kasperek, R., Głowski, R. (2010). Ocena degradacji koryta właściwego Odry Środkowej i program działań naprawczych. PAN, Kraków, 59–68.
- Van den Berg, J.H., Van Gelder, A. (1993). A new bedform stability diagram, with emphasis on the transition of ripples to plane bed in flows over fine sand and silt. *Alluvial Sedimentation*, Spec. Publ. Int. Ass. Sedimentology, 17, 1–21.
- Vanoni, V.A (red.) (1975). *Sedimentation engineering*. ASCE Manual and Reports on Engineering Practice, 54. ASCE, New York.
- Verhoeven, R., Banasiak, R., Okruszko, T., Swiatek, D., Chormański, J., Nowakowski, P. (2004). Numerical Modelling of river flow – data collection and problem solving. Key note lecture. Conference on Advances in Fluid Mechanics, 22–24 March 2004, Lisbon.
- Wormleaton, P.R., Hey, E.D., Sellin, R.H.J., Bryant, T., Loveless, J., Catmur, S.E. (2005). Behaviour of meandering overbank channels with graded sand beds. *J. Hydr. Engin.*, 131(8), 665–681.
- Yang, S.-Q., Tan, S.-K. (2008). Flow resistance over mobile bed in an open-channel flow. *J. Hydr. Engin.*, 134(7), 937–947.

## ASSESSMENT OF THE MORPHOLOGIC REGIME AND FLOW RESISTANCE DURING FLOODS IN THE MIDDLE ODRA RIVER

**Abstract.** This paper presents results of a field study to determine the flow characteristics and channel bathymetric patterns in a 4 km-long reach of the Middle Odra river with a special emphasis on the flood conditions. Characteristic features of this section are groynes and consecutively curved and straight river course. A series of measurements of flows, bottom tracking and water level has been carried out at varied discharges up to  $756 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (mean flow equals to  $180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) with water depths up to 6 m. River bottom consisted of sand and gravel, bed forms – dunes – reached a height of 1 m. The flow analysis divides river cross-section into channel zone between the groynes, zone of groynes and flood plains. The variation of Manning's roughness coefficient with discharge and depth is determined taking into account the influence of the channel curvature. On the straight section the Manning's coefficient moderately varies, once on the curved section significantly rises with discharge. The morphologic regime assessment, according to the Froude number locally up to 0,34, indicates possible transition, i.e. washing-out of dunes, however without a pronounced effect on the reduction of the flow resistance. From practical point of view, the effect/importance of sediment transport diminishes with flow, as the flow in main, regulated channel relatively diminishes when related to the total flow. Further, the determined roughness coefficients are at the upper, 'save' limit for the river channel conveyance analysis.

**Key words:** the Odra river, flood, bed forms, flow resistance, Manning coefficient

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 11.06.2015*

XXXIII OGÓLNOPOLSKA SZKOŁA HYDRAULIKI – Zakopane 2014

Zorganizowana pod patronatem

Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk

przez

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Dofinansowanie:

Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie

Wydanie publikacji zostało dofinansowane przez MGGP S.A.



Do cytowań – For citation: Banasiak, R., Krzyżanowski, M. (2015). Ocena reżimu morfologicznego i oporów ruchu podczas wezbrań w Odrze Środkowej. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiecetus*, 14(2), 25–38.