

*Ewa Słowik-Opoka, Artur Radecki-Pawlik*

**WYBRANE PARAMETRY HYDRAULICZNE  
W OBREBIE WYDM ŻWIROWYCH  
JĘZYKO-KSZTAŁTNYCH ZNALEZIONYCH  
W UJŚCIOWYM ODCINKU RZEKI RABY**

**Streszczenie**

W ciekach naturalnych, w określonych warunkach hydraulicznych na dnie rzeki o budowie piaszczystej oraz piaszczysto-żwirowej mogą powstawać zgrupowania form dennych. W zależności od tworzącego je przepływu mogą być formami dwu- lub trójwymiarowymi o prostej, jak również o zakrzywionej linii szczytu (wydmy: barchanoidalne, sinusoidalne, półksiężycowe, języko-kształtne lub łańcuchowe). Formy na dnie rzek mogą występować zarówno pojedynczo (np. wydmy odizolowane), jednak najczęściej spotykane są w postaci całych zgrupowań, które mogą być ułożone równolegle, jak również prostopadle do linii nurtu. Zdarza się również, że są rozmieszczone „po ukosie” zarówno wzdłuż koryta, jak i na całej jego szerokości.

Tematyka występowania form dennych była i jest nadal przedmiotem badań naukowców zarówno w kraju, jak i za granicą. Większość prac ujmuje problematykę piaszczystych form dennych w postaci zmarszczek oraz wydmy kształtujących dno rzek nizinnych [np. praca Dąbkowskiego 1989] oraz formacji dennych znalezionych w morskiej strefie brzegowej [Pruszek 1998]. Zaznacza się jednak niedosyt opracowań obejmujących wyniki badań terenowych utworów dennych w postaci wydmy żwirowych, a więc zbudowanych z materiału o średnicy  $d_{50} > 2$  mm. Najnowsze doniesienia mówiące o tego typu formach dennych to prace Carlinga i in. [2000, 2005] oraz Radeckiego-Pawlika [2002]. Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań wydmy żwirowych o zakrzywionej linii szczytu znalezionych na odcinku rzeki Raby, powyżej ujścia do Wisły. Badania terenowe wykonano w ramach grantu 2PO6S07528.

Analiza uzyskanych wyników pozwoliła autorom niniejszej pracy uzyskać informacje na temat tego, przy zachowaniu jakich warunków hydraulicznych na piaszczysto-żwirowym dnie rzeki mogą powstawać formy denne w postaci wydm żwirowych, a tym samym poszerzyć dotychczasową wiedzę na temat powstawania żwirowych form dennych. Wsunięte na jej podstawie wnioski mogą zostać wykorzystane przez naukowców oraz w praktyce inżynierskiej.

**Słowa kluczowe:** rzeka podgórska, formy denne, prędkość dynamiczna, naprężenia styczne, granulometria

## WSTĘP

Na piaszczystym dnie koryta rzeki ruch rumowiska przyczynia się do powstawania określonych formacji dennych [Dąbkowski 1989]. Najbardziej znane opracowania dotyczące tematyki form dennych to prace Gładki [1976], Pruszką [1998], Dąbkowskiego [1989], a wśród opracowań zagranicznych na uwagę zasługują prace Simonsa i Richardsona [1966], Allena J.R. [1968], Ashley [1990], oraz Carlinga i in. [1999, 2000]. Tematyka form dennych była i jest nadal przedmiotem badań naukowców zarówno w kraju, jak i za granicą, jednak większość opracowań dotyczących zagadnienia powstawania form dennych dotyczy utworów rzecznych powstałych w utworach wybitnie piaszczystych, gdzie średnica ziaren materiału nie przekracza wielkości 2 mm. Zaznacza się więc niedosyt opracowań ujmujących tematykę żwirowych form dennych powstałych na dnie zbudowanym z mieszaniny piasku i żwiru, a procesy, w wyniku których powstają są nadal słabo poznane. Jednym z najnowszych opracowań ujmującym wyniki badań terenowych form piaszczysto-żwirowych jest praca Carlinga i in. [2005], ale utwory będące przedmiotem przytoczonego opracowania są formami dennymi występującymi na dnie rzeki Sewern (Wielka Brytania), powstałymi w wyniku oddziaływania przyptywu i odpływu wód oceanicznych.

W niniejszej pracy przedstawione zostały wyniki badań terenowych i obliczeń wybranych parametrów hydraulicznych w obrębie wydm języko-kształtnych, formujących dno ujściowego odcinka rzeki Raby. Cechą szczególną, świadczącą o wyjątkowym charakterze tych form jest to, że zbudowane zostały z materiału o średnicy ziaren większej od 2 mm, a więc z drobnego żwiru.

Badania terenowe obejmowały pomiary prędkości chwilowej nad charakterystycznymi punktami wydm oraz pobór prób materiału

tworzącego formy denne do analizy składu granulometrycznego. Na podstawie danych zebranych bezpośrednio w terenie obliczono wybrane parametry hydrauliczne: prędkość średnią ( $v$ ) i dynamiczną ( $v^*$ ), naprężenia styczne ( $\tau$ ) oraz naprężenia bezwymiarowe ( $\Theta$ ), a także współczynnik oporu przepływu ( $f$ ) oraz liczbę Froude'a ( $Fr$ ). Autorzy pracy są przekonani, że wysunięte na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań wnioski w przyszłości mogą zostać wykorzystane przez naukowców oraz w praktyce inżynierskiej, przykładowo przy ustalaniu wartości oporów ruchu.

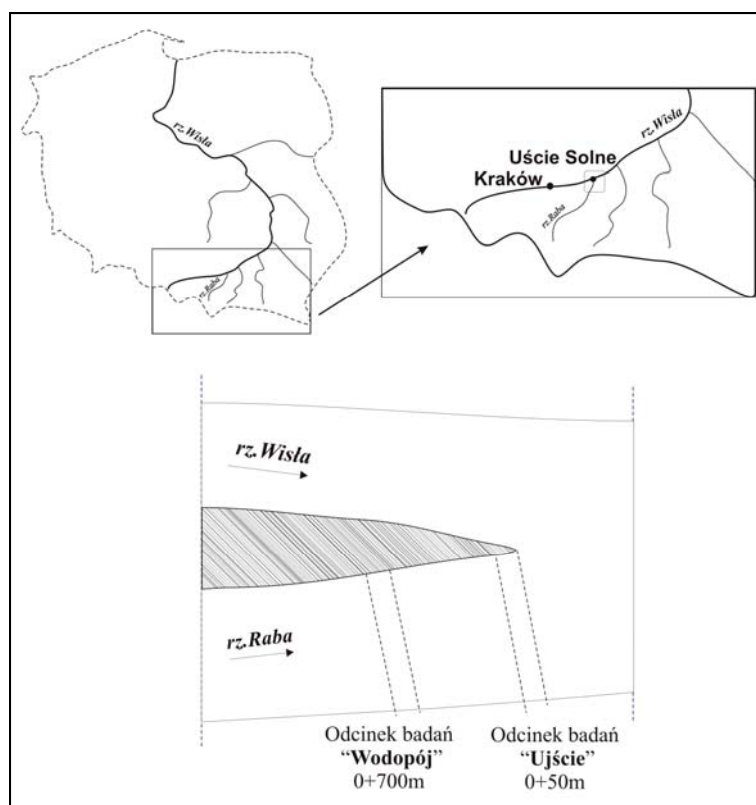
## MATERIAŁY I METODY

**Opis obiektu badań.** Rzeka Raba, prawobrzeżny dopływ Wisły długości 137 km, bierze swój początek w pobliżu miejscowości Obidowa, na wysokości 785 m n.p.m. Przepływa przez trzy główne regiony hydrograficzne, tj. Karpaty Zewnętrzne – Beskidy, Pogórze Karpackie oraz Kotlinę Sandomierską, a powierzchnia zlewni obejmuje 1537 km<sup>2</sup>. Odcinek źródłowy charakteryzuje się znaczną ilością dopływów posiadających spadki niejednokrotnie większe od 50‰, z których największy to prawobrzeżny potok Poniczanka. Średni spadek Raby wynosi 4,42‰. W strefie karpackiej znajduje się 86% powierzchni zlewni, co przesądza o charakterze podgórskim dorzecza. W budowie geologicznej obszaru badań przeważają utwory gruboklastyczne, o średnicy ziaren przekraczającej 1 cm, wśród których przeważają piaskowce karpackie, a drobniejsze żwiry składają się zarówno z kwarcu, jak i z piaskowców.

Opisane w pracy zgrupowania wydm żwirowych zaobserwowane zostały na dnie ujściowego odcinka rzeki Raby, na którym wyodrębniono pododcinki, nazwane: „ujście” (zbiór wydm Raba 3) oraz „wodopój” (zbiór wydm Raba 8 oraz Raba 12). Obszar badań położony jest w miejscowości Uście Solne (rys. 1), w obrębie dorzecza, które w tym miejscu jest wyjątkowo wąskie (o średniej szerokości nieprzekraczającej 3 km). Spadek zwierciadła wody na badanym odcinku rzeki jest niewielki, równy 0,0006, a szerokość przekroju poprzecznego wynosi 50 m. Omawiane formy denne zbudowane zostały z drobnego i grubego żwiru, o średnicy miarodajnej ( $d_{50}$ ) od 2,1–11 mm.

Charakterystyka hydrologiczna rejonu badań przedstawia się następująco. Przepływ średni niski  $SNQ$  obliczony wg formuły Stachy wynosi 2,71 (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>), natomiast  $SNQ$  (z wielolecia 2000÷2004) dla stacji Proszówki – 5,44 (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>). Przepływ średni roczny ( $SSQ$ ) jest

równy  $20,86 \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$  obliczony wg wzoru Krzanowskiego [Krzanowski 1972],  $19,28 \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$  wg wzoru Punzeta [Krzanowski 1972] oraz  $17,52 \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$  z obserwacji. Przepływ minimalny o zadanym prawdopodobieństwie pojawienia się obliczony wzorem Punzeta wynosi  $Q_{\min 50\%} = 1,39 \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ .



**Rysunek 1.** Lokalizacja obiektu badań  
**Figure 1.** Research region

### METODYKA BADAŃ I OBLICZEŃ

Metodyka badań obejmowała pomiary terenowe oraz prace studialne. Badania terenowe skoncentrowane były na poborze prób materiału dennego do analizy składu granulometrycznego, a także pomiarach głębokości wody i prędkości średniej w pionach w obrębie występujących form dennych. Próby pobierano z miejsc charaktery-

stycznych, tj.: 1) w odległości od kilku do kilkudziesięciu centymetrów przed stroną doprądową formy, 2) przy podstawie strony doprądowej, 3) w połowie długości strony doprądowej, 4) ze szczytu, 5) w połowie długości strony zaprądowej oraz 6) od kilku do kilkudziesięciu centymetrów za stroną zaprądową formy. Również pomiary prędkości chwilowych przeprowadzano nad charakterystycznymi punktami form, na różnej głębokości w zależności od wielkości napełnienia wodą w obszarze występowania utworów dennych. Najczęściej pomiary te przeprowadzano w warunkach napełnienia wodą w korycie nieprzekraczającego 0,8 m, podczas średnich i niskich przepływów wody.

W ramach prac kameralnych wykreślono krzywe przesiewu, a odczytane wielkości średnic użyto do obliczeń poszczególnych parametrów hydraulicznych, m.in. naprężeń stycznych ( $\tau$ ) i bezwymiarowych ( $\Theta$ ) oraz liczby  $Fr$ . W dalszej kolejności opracowano krzywe przesiewu oraz wykreślono tachoidy prędkości nad poszczególnymi punktami form, korzystając z równania Von Karmana-Prandtla (3), gdzie zależność prędkości od głębokości pomiaru przedstawiono w ten sposób, aby możliwe było ujęcie tej zależności w układzie linii regresji pomiędzy wartością prędkości pomierzonej ( $v$ ), a logarytmem naturalnym wartości odległości pomiaru nad dnem ( $\ln z$ ):

$$v = \left( \frac{v_*}{k} \right) \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

$$v_* = \left( \frac{\tau_{kr}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$v = \left( \frac{v_*}{k} \right) \ln \left( \frac{z}{z_0} \right), \quad (3)$$

gdzie:  $k$  – stała Von Karmana, równa 0,4.

Następnie, korzystając z formuł podanych przez Ashworth'a i Ferguson'a [1986] [Radecki-Pawlik 2002] obliczono wartość prędkości dynamicznej ( $v^*$ ), która posłużyła do wyznaczenia wartości naprężeń stycznych na dnie cieku ( $\tau$ ), po przekształceniu wzoru (4):

$$v_* = \left( \frac{\tau_{kr}}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

gdzie:

$v_*$  – prędkość dynamiczna ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),

$\tau_{kr}$  – naprężenie styczne ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),

$\rho$  – ciężar objętościowy wody ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

W pracy, obok naprężeń stycznych wyznaczono bezwymiarowe naprężenia ( $\Theta$ ), korzystając z poniższego wzoru [Allen 1968]:

$$f = \frac{8\tau}{\rho_w \cdot (v_{sr})^2} \quad (5)$$

$$\Theta = \frac{\rho_w g h S}{(\rho_r - \rho_w) g d_{50}} = \frac{\tau}{(\rho_r - \rho_w) g d_{50}} \quad (6)$$

gdzie:

$\rho_r$  – gęstość rumowiska ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),

$\rho_w$  – gęstość wody ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),

$g$  – przyspieszenie ziemskie ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),

$h$  – głębokość wody (m),

$S$  – spadek (-),

$d_{50}$  – średnica ziaren (m),

$\tau$  – naprężenie styczne ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Do wyznaczenia naprężeń bezwymiarowych  $\Theta$  (6) wykorzystano wartości naprężeń stycznych ( $\tau$ ) obliczonych na podstawie prędkości średniej (odczytanej z tachoid) oraz prędkość dynamiczną. Współczynnik oporu przepływu  $f_1$  obliczono, korzystając z metodyki podanej w pracach autorów: Ven Te Chow [1959], Gładki [1976], Allena J.R. [1968], Soboty [1994] [Radecki-Pawlik 2002]:

$$f_1 = 8 \left( \frac{v_*}{v_{sr}} \right)^2. \quad (7)$$

Obok współczynnika  $f_1$  obliczony został również współczynnik oporu przepływu  $f_2$ , korzystając z poniższego wzoru [Gładki 1976]:

$$f = \frac{8\tau}{\rho_w \cdot (v_{\text{sr}})^2} \quad (8)$$

gdzie:

$\tau$  – napężenie styczne ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),

$\rho_w$  – gęstość wody ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),

$v_{\text{sr}}$  – średnia prędkość przepływu wody w pionie ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Również współczynnik oporu  $f_3$  obliczony został na podstawie formuły (8) z tą różnicą, że we wzorze zastosowano prędkość średnią w przekroju zamiennie z prędkością średnią w pionie.

Prędkość średnia w przekroju poprzecznym rzeki obliczona została na podstawie klasycznej formuły Chézy, w której promień hydrauliczny ( $R_h$ ) zastąpiono wielkością średniej głębokości wody w korycie, a współczynnik prędkości ( $c$ ) obliczono wg zależności Manninga:

$$c = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}}, \quad (9)$$

gdzie:  $n$  – współczynnik szorstkości odczytany z tabeli opracowanej przez Ven Te Chow [1959].

Z uwagi na to, że rodzaj przepływu odgrywa ważną rolę w procesie kształtowania się formacji dennych [Dąbkowski 1989] w pracy obliczono parametr opisujący charakter przepływu – liczbę Froude'a ( $Fr$ ).

## WYNIKI BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ

Jako pierwsze przedstawiono wyniki badań utworów dennych nazwane „Raba 3” (wydmy R-5 oraz R-6), nawiązując do ich nomenklatury archiwalnej. Są to odizolowane wydmy języko-kształtne posiadające kształt barchana, o linii szczytu ułożonej zgodnie z kierunkiem przepływu. Ich charakterystyka geometryczna przedstawia się następująco: długość form wynosi 0,90 m, wysokość jest równa od 0,05÷0,10 m, a szerokość nie przekracza 0,28 m. Wydmy zbioru „Raba 3” zostały znalezione na odcinku badań „ujście”, przy przepływie  $Q = 4,21$  ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) oraz głębokości wody (zmierzonej nad szczytem wydym) równej od 0,09÷0,15 m.

Wyniki obliczeń parametrów hydraulicznych zamieszczono w tabeli 1. Jak można zaobserwować, wydmy R-5 powstały przy prędkości średniej z zakresu od 0,39 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) do 0,47 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), przy czym wartość

**Tabela 1.** Zestawienie wyników obliczeń parametrów hydraulicznych  
**Table 1.** Results of the hydraulic parameters calculations

| Nazwa zbioru | Obszar pomiaru | Punkt pomiarowy | Prędkość średnia $v_{sr}$ [m·s <sup>-1</sup> ] | Prędkość dynamiczna $v^*$ [m·s <sup>-1</sup> ] | Napięcie styczne $\tau_t$ [N·m <sup>-2</sup> ] | Bezwymiarowe napięcie styczne $\Theta_t$ | Współczynnik oporu |           |           | Liczba Froude'a Fr |
|--------------|----------------|-----------------|--|--|--|--|--------------------|-----------|-----------|--------------------|
|              |                |                 |  |  |  |  | $f_1$ [-]          | $f_2$ [-] | $f_3$ [-] |                    |
| Raba 3       | R-5            | P1              | 0.47   | 0.02   | 0.566  | 0.0125                                   | 0.02050            | 0.00044   | 0.00049   | 0.43               |
|              |                | P2              | 0.44   | 0.02   | 0.566  | 0.0125                                   | 0.02501            | 0.00044   | 0.00049   | 0.47               |
|              |                | P3              | 0.39   | 0.02   | 0.565  | 0.0125                                   | 0.02972            | 0.00044   | 0.00049   | 0.36               |
|              |                | P4              | 0.39   | 0.04   | 1.334  | 0.0294                                   | 0.06517            | 0.00105   | 0.00116   | 0.39               |
|              |                | P5              | 0.40   | 0.03   | 1.092  | 0.0241                                   | 0.05445            | 0.00086   | 0.00095   | 0.39               |
| Raba 8       | R-6            | P1              | 0.41   | 0.02   | 0.327  | 0.0096                                   | 0.01557            | 0.00026   | 0.00029   | 0.38               |
|              |                | P2              | 0.40   | 0.01   | 0.151  | 0.0044                                   | 0.00756            | 0.00012   | 0.00013   | 0.34               |
|              |                | P3              | 0.42   | 0.02   | 0.302  | 0.0089                                   | 0.01403            | 0.00024   | 0.00026   | 0.34               |
|              |                | P4              | 0.36   | 0.02   | 0.573  | 0.0168                                   | 0.03535            | 0.00045   | 0.00050   | 0.32               |
|              |                | P5              | 0.36   | 0.03   | 0.799  | 0.0235                                   | 0.04933            | 0.00063   | 0.00070   | 0.33               |
| Raba 12      | Wydma 1 (W1)   | 5               | 0.19   | 0.01   | 0.115  | 0.0018                                   | 0.02537            | 0.00015   | 0.00006   | 0.16               |
|              |                | 4               | 0.32   | 0.02   | 0.448  | 0.0062                                   | 0.03257            | 0.00058   | 0.00024   | 0.22               |
|              |                | 3               | 0.47   | 0.03   | 0.717  | 0.0076                                   | 0.02582            | 0.00093   | 0.00039   | 0.75               |
|              |                | 2               | 0.34   | 0.01   | 0.132  | 0.0012                                   | 0.00863            | 0.00017   | 0.00007   | 0.30               |
|              |                | 1               | 0.38   | 0.02   | 0.421  | 0.0037                                   | 0.02391            | 0.00054   | 0.00023   | 0.27               |
| Raba 12      | Wydma 2 (W2)   | 4               | 0.61   | 0.02   | 0.427  | 0.0038                                   | 0.00918            | 0.00132   | 0.00131   | 0.37               |
|              |                | 3               | 0.52   | 0.02   | 0.413  | 0.0036                                   | 0.01223            | 0.00128   | 0.00127   | 0.33               |
|              |                | 2               | 0.56   | 0.02   | 0.377  | 0.0033                                   | 0.00963            | 0.00117   | 0.00116   | 0.41               |
|              |                | 1               | 0.40   | 0.02   | 0.521  | 0.0046                                   | 0.02605            | 0.00162   | 0.00160   | 0.26               |
|              |                | 1               | 0.34   | 0.04   | 1.592  | 0.0089                                   | 0.11015            | 0.00494   | 0.00489   | 0.25               |
| Raba 12      | Wydma 3 (W3)   | 2               | 0.81   | 0.02   | 0.607  | 0.0034                                   | 0.00740            | 0.00188   | 0.00187   | 0.67               |
|              |                | 3               | 0.66   | 0.01   | 0.194  | 0.0011                                   | 0.00357            | 0.00060   | 0.00060   | 0.44               |
|              |                | 4               | 0.50   | 0.02   | 0.432  | 0.0024                                   | 0.01383            | 0.00134   | 0.00133   | 0.24               |
|              |                | 1               | 0.42   | 0.04   | 1.335  | 0.0118                                   | 0.06053            | 0.00414   | 0.00410   | 0.27               |
|              |                | 2               | 0.79   | 0.02   | 0.552  | 0.0049                                   | 0.00707            | 0.00171   | 0.00170   | 0.63               |
|              |                | 3               | 0.72   | 0.01   | 0.207  | 0.0018                                   | 0.00320            | 0.00064   | 0.00064   | 0.49               |
|              |                | 4               | 0.52   | 0.03   | 0.870  | 0.0077                                   | 0.02575            | 0.00270   | 0.00268   | 0.29               |



prędkości średniej nad szczytem wynosi  $v_{sr} = 0,39$  ( $m \cdot s^{-1}$ ). Największą prędkość dynamiczną zlokalizowano nad doprądowną stroną wydmy, równą  $0,04$  ( $m \cdot s^{-1}$ ). Największe  $\tau = 1,334$  ( $N \cdot m^{-2}$ ) otrzymano nad stroną doprądowną, natomiast nad samym szczytem wydmy naprężenie  $\tau$  jest o połowę mniejsze ( $\tau = 0,565$   $N \cdot m^{-2}$ ). Z kolei największe naprężenia bezwymiarowe  $\Theta = 0,0294$  uzyskano nad doprądowną stroną wydmy, a nad jej szczytem –  $\Theta = 0,0125$ . Wielkość naprężeń  $\Theta$ , jak sugeruje Carling wskazuje na to, że wydmy w chwili prowadzenia badań znajdowały się w fazie spłaszczenia. Natomiast wyniki obliczeń naprężeń stycznych  $\tau$  niejako potwierdzają spostrzeżenia Radeckiego-Pawlika [2002], który podał, że powstawanie wydm uzależnione jest od występowania znacznych naprężeń stycznych oraz, że przy  $\tau < 0,29$  ( $N \cdot m^{-2}$ ) nie obserwuje się powstawania wydm.

Z zestawienia wyników obliczeń w tabeli 1 można również odczytać, że w przypadku wydm R-5 zbioru Raba 3 zarówno współczynnik oporu  $f_1 = 0,06517$ ,  $f_2 = 0,00105$ , jak i  $f_3 = 0,00116$  wartości największe przyjmuje nad doprądowną stroną formy, a najmniejsze nad zaprądownym stokiem. Nad szczytem wydm współczynnik oporu  $f_1$  wynosi  $0,02972$ ,  $f_2 = 0,00044$ , a  $f_3$  jest równy  $0,00049$ .

Wydmy barchanoidalne R-5 zbudowane zostały z drobnego żwiru (o średnicy  $d_{50} = 0,0028$  m), które powstały w warunkach przepływu podkrytycznego, przy liczbie  $Fr = 0,36$  (nad szczytem)  $\div$   $0,47$  (nad zaprądownym stokiem). Carling [1999] podaje, że wydmy zbudowane z materiału o takiej właśnie średnicy i występujące przy takiej wielkości liczby  $Fr$  to wydmy dwuwymiarowe (2D). Autor ten sugeruje jednak, by w przypadku, gdy dodatkowo wydma posiada kształt barchana, przypisać ją do grupy wydm trójwymiarowych (3D). Tak więc można przyjąć, że wydmy R-5 zbioru Raba 3 są wydmami trójwymiarowymi.

Obok wydm R-5 w zbiorze Raba 3 znalazły się także językokształtne wydmy R-6, zbudowane z drobnego żwiru ( $d_{50} = 0,0021$  m). Wydmy tego zgrupowania charakteryzują się tym, że największą prędkość średnią w pionie, równą  $0,42$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) zaobserwowano nad punktem szczytu formy, z kolei maksymalną prędkość dynamiczną ( $v^* = 0,03$   $m \cdot s^{-1}$ ), jak również największe naprężenia styczne ( $\tau = 0,799$   $N \cdot m^{-2}$ ) oraz bezwymiarowe ( $\Theta = 0,0235$ ) otrzymano nad doprądowną stroną wydm. Naprężenia  $\tau$  nad punktem szczytu jest mniejsze, równe  $0,302$  ( $N \cdot m^{-2}$ ). Z obliczeń współczynnika oporu wynika, że wartości największe przyjmuje nad doprądowną stroną wydm, natomiast

najmniejsze nad zaprawowym stokiem. Liczba  $Fr$  w obrębie wydm wynosi od 0,33 do 0,38, a nad szczytem  $Fr = 0,34$ . Głębokość wody w obrębie wydm grupy R-6 (mierzona nad punktem szczytu) nie przekraczała 0,15 m.

W dalszej kolejności omówiono wydmy należącą do zbioru „Raba 8”, znaną na odcinku badań „wodopój”. Forma ta jest strukturą żwirową, posiadającą kształt barchana, o linii szczytu skierowanej w kierunku „w dół strumienia”. Wysokość wydmy wynosi 0,16 m, długość 1,80 m, a szerokość nie przekracza 2,50 m. Podczas prowadzenia pomiarów głębokość wody w obrębie wydmy nie przekraczała 0,20 m, a przepływ  $Q$  wynosił 3,90 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ). Największą prędkość średnią ( $0,47 m \cdot s^{-1}$ ), prędkość dynamiczną ( $0,03 m \cdot s^{-1}$ ) oraz naprężenia  $\tau$  ( $0,717 N \cdot m^{-2}$ ) zlokalizowano nad szczytem wydmy (P3), a najmniejsze – po stronie zaprawowej (tab. 1). Naprężenia bezwymiarowe nad szczytem wydmy wynosiły  $\Theta = 0,0076$ , oraz  $\Theta = 0,0012$  po stronie zaprawowej. Współczynnik oporu przepływu kształtował się w granicach od  $f_1 = 0,00862 \div 0,03257$  do  $f_2 = f_3 = 0,00015 \div 0,00093$ . Wielkości tych współczynników są zbliżone do  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$  wydm R-5 i R-6 (Raba 3) oraz wykazują zadowalającą zgodność z wynikami obliczeń współczynnika  $f$  podanymi w pracy Gładki [1976], otrzymanymi na podstawie badania oporów ruchu na dnie rzeki Raby. Ponadto, zgodnie z uwagami Pasierbiewicza [1976] wielkości współczynnika odpowiadają współczynnikom oporu w obrębie wydm wstecznych, powstałych w górnym reżimie przepływu.

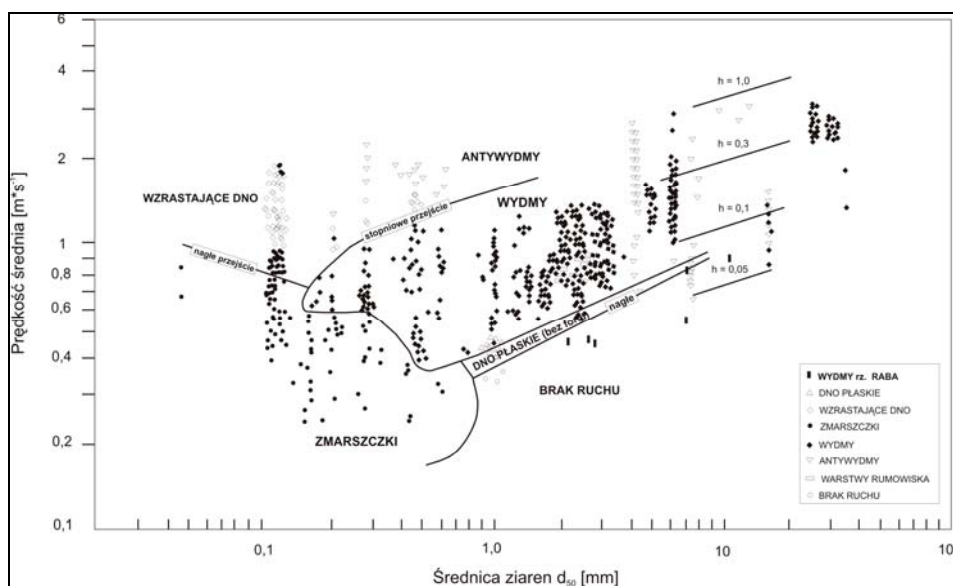
Ostatnią dyskusowaną grupę wydm reprezentują formy żwirowe 1, 2 oraz 3 (zbiór „Raba 12”), o średnicy ziaren  $d_{50}$  w zakresie od  $0,007 \div 0,011$  m. Wydma 1 to forma o wysokości 0,09 m, długości 1,6 m i szerokości 6,5 m. Wydma 2 jest trzykrotnie wyższa i dłuższa w porównaniu z wydumą 1. Trzecia z form to wydma o wysokości 0,08 m, długości 2,20 m i szerokości 6,5 m. Są to wydmy języko-kształtne, a linia szczytu wydm odgięta w kierunku przepływu przyjmuje kształt „dzioba”.

W dniu pomiarów głębokość wody  $h$  w obrębie wydm nie przekraczała 0,45 m. Największą prędkość średnią, równą  $0,56 (m \cdot s^{-1})$  (W1),  $0,79 (m \cdot s^{-1})$  (W2) oraz  $0,81 (m \cdot s^{-1})$  (W3) zlokalizowano nad punktem szczytu form.

Największe naprężenia  $\tau$  (podobnie jak bezwymiarowe naprężenia  $\Theta$ ) otrzymano nad zaprawową stroną form. Jeśli chodzi o współczynnik oporu, zarówno  $f_1$ , jak i  $f_2$  największe wartości, odpowiednio 0,11015 i 0,00494 przyjmuje nad zaprawową stroną formy (W2).

Z wyników obliczeń parametrów hydraulicznych można zauważyć, że największe wartości liczby  $Fr = 0,44 \div 0,63$  odnotowano nad punktem szczytu form.

Poniżej, na wykresie zaproponowanym przez Southarda [Carling i in. 2000] przedstawiający występowanie poszczególnych utworów dennych w zależności od wielkości prędkości średniej i średnicy miarodajnej form (rys. 2) naniesione zostały dane z rzeki Raby. Można zauważyć, że omawiane wydmy znajdują się w obszarze występowania form dennych powstałych w wyniku nagłego przejścia od wydm, poprzez płaskie dno, do początku braku ruchu form. Widać zatem, że możliwe jest występowanie wydm zbudowanych z ziaren o średnicy  $d_{50} > 0,007$  m przy prędkości średniej mniejszej od  $0,6$  ( $m \cdot s^{-1}$ ). Ponadto takie ułożenie punktów wskazuje, że omawiane wydmy w chwili prowadzenia badań były formami nieruchomymi, w pełni wykształconymi.



**Rysunek 2.** Tworzenie się form dennych przy średniej głębokości przepływu 0,25–0,40 m i temp. wody 10°C, dla piasku średnioziarnistego [Carling i in. 2000]

**Figure 2.** Formation of the bed forms at average water depth (0,25–0,4 m) and temperature of water 10°C, for sand [Carling I in. 2000]

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Przy napełnieniu wodą w korycie nieprzekraczającym 0,80 m, na dnie ujściowego odcinka rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym możliwe jest tworzenie się żwirowych wydmy języko-kształtnej o linii szczytu ułożonej zgodnie z kierunkiem przepływu.

2. Największa prędkość średnia, w zakresie od  $v_{sr} = 0,39$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) do  $v_{sr} = 0,81$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) występuje nad punktem szczytu badanych wydmy.

3. Omawiane wydmy znalezione zostały przy przepływie wody od  $Q = 3,9$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) do  $7,6$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), w warunkach średniego i niskiego przepływu wody. Głębokość wody, zmierzona nad punktem szczytu wydmy wynosiła od 0,04 m do 0,45 m. Podczas przepływów większych wydmy te są rozmywane, podczas mniejszych – nie tworzą się.

4. Naprężenia styczne w obrębie wydmy języko-kształtnej form wynoszą od  $\tau = 0,115$  ( $N \cdot m^{-2}$ ) do  $\tau = 1,59$  ( $N \cdot m^{-2}$ ), natomiast naprężenia bezwymiarowe  $\Theta$  – od  $0,0044 \div 0,0294$ .

5. Możliwe jest występowanie wydmy zbudowanej z ziaren o średnicy  $d_{50} > 0,002$  m przy naprężeniach bezwymiarowych mniejszych od 0,025 ( $\Theta < 0,025$ ).

6. Wielkość współczynnika oporu przepływu:  $f_1 = 0,00707 \div 0,02900$ ,  $f_2 = 0,00024 \div 0,00188$  oraz  $f_3 = 0,00026 \div 0,00187$  (nad punktem szczytu wydmy) odpowiada wielkości współczynnika oporu  $f$ , występującemu w obszarze wydmy klasycznych ( $0,042 < f < 0,16$ ).

## BIBLIOGRAFIA

- Allen J.R. *Current ripples. Their relation to patterns of water and sediment motion.* North- Holland Publ. Co., Amsterdam 1968.
- Ashley G. *Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at the old problem.* J. Sedim. Petrol., 1990, 60, s. 160–172.
- Ashworth P., Fergusson R. *Interrelationship of channel process, changes and sediments in a proglacial braided river.* Geogap. Ann., 1986, 68 A, s. 361–371.
- Bartnik W. *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wlezonego.* Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 1992, ser. Rozpr. Hab., 171.
- Carling P. A. *Subaqueous gravel dunes.* J. of Sed. Res., vol. 69, no 3, 1999, s. 534–545, SEPM.
- Carling P. A., Gölz E., Orr H. G., Radecki-Pawlik A. *The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine near Mainz, Germany.* I. Sedimentology and morphology. Sedimentology, 2000, 47, s. 227–252.

- Carling, P. A., Radecki-Pawlik, A., Williams, J. J., Rumble, B., Meshkova, L., Bell, P., Breakspear R. *The morphodynamics and internal structure of intertidal fine-gravel dunes: Hill Flats, Severn Estuary, UK*. Sedimentary Geology, Elsevier, 2005, s. 21.
- Chow V. T. *Open channel hydraulics*. McGraw Hill. New York, London 1959.
- Dąbkowski L. *Analiza oporów ruchu i kształtowania się średnich głębokości strumieni w korytach rzek o dnie piaszczystym*. Ser. Rozpr. Nauk. i Monogr., nr 97, Wydaw. SGGW-AR, Warszawa 1989.
- Gładki H. *Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie Karpackich dopływów Wisły*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 1976, ser. Rozpr. Hab., 118.
- Krzanowski S. *Przestrzenna zmienność odpływu średniego (spływu jednostkowego) na obszarze Karpat polskich*. Praca doktorska, 1972, maszynopis.
- Michalik A. *Badania intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach karpackich*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 1990, ser. Rozpr. Hab., 138.
- Pasierbiewicz K. *Prądowe formy depozycyjne występujące na dnie koryt aluwialnych w świetle badań laboratoryjnych*. Postępy Nauk Geol. 7, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1976.
- Pruszek Z. *Dynamika brzegu i dna morskiego*, Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, Gdańsk 1998.
- Radecki-Pawlik A. *Wybrane zagadnienia kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej*. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie, 2002, Ser. Rozpr. Hab., 281, s. 142.
- Simons D. B., and Richardson E.V. *Resistance to flow in alluvial channels*. U.S. Geol. Surv. Profess. Papers, 1966, 422-J, s. 1–61.

Dr inż. Ewa Słowik-Opoka  
 Katedra Inżynierii Wodnej, Akademia Rolnicza w Krakowie  
 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 24/28, Polska  
 Tel. +48 (12) 662 41 05  
 opoka@ar.krakow.pl

Dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik  
 Katedra Inżynierii Wodnej, Akademia Rolnicza w Krakowie  
 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 24/28, Polska  
 Tel. +48 (12) 633 53 42; +48 (12) 662 41 05  
 rmradeck@cyf-kr.edu.pl

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Ratomski

*Ewa Słowik-Opoka, Artur Radecki-Pawlik*

**SOME HYDRAULICS PARAMETERS  
WITHIN FINE GRAVEL LINGUOID DUNES FOUND  
ON THE ESTUARY SECTION OF THE RABA RIVER**

**SUMMARY**

In natural rivers, bed forms built of sandy and gravel-sandy fractions may be formed on the river bed at some determined hydraulic conditions. Depending on the type of the flow they can be two- or three-dimensional forms (2D, 3D) and they can have straight or curved crestlines (dunes: barkanous, sinusous, lunate, linguoid or catenary). Any bed form can exist individually (for example isolated dunes), but mostly they occur as accumulated single forms. These forms are placed parallel or transverse to the flow. Moreover, they can be arrangement across the flow. The subject the bed forms arising was involving and still is many scientists from abroad and from Poland and the main topic of investigations. Most of the paper covers the issue of sandy bed forms (in the form of ripples and dunes) which one shaping bottom of the lowland rivers [Młynarczyk (1998), Dąbkowski (1989)] and bed forms which observed on the submarine bottom [Pruszek 1998]. So far, there have been only a few publication in the world concerning existing sandy-gravel and typical gravel dunes [Carling at al. 2000, 2005]. This paper presents results of the hydraulic parameters calculations above gravel curved crestline dunes along the estuary part of the Raba River. The field investigations were conducted thanks to the project 2P06S07528 of KBN.

The analysis of the obtained results enabled Authors to get informations about how gravel-sandy bed forms are built and are formed in the river at certain determined hydraulic conditions. The results might be use in practice both by scientists and engineers.

**Key words:** river, bed forms, dynamic velocity, shear stresses, granulometry