

## **BADANIA MORFOMETRYCZNE WYDM PIASZCZYSTYCH O PROSTEJ LINII SZCZYTU ZAOBSERWOWANYCH NA DNIE UJŚCIOWEGO ODCINKA RZEKI RABY**

Ewa Słowik-Opoka, Artur Radecki-Pawlik

Akademia Rolnicza w Krakowie

**Streszczenie.** Przedmiotem badań przeprowadzonych na ujściowym odcinku Raby były wydmy piaszczyste o prostej linii szczytu, kształtujące dno rzeki. Charakterystyka form obejmowała ich wysokość ( $H$ ) mierzoną w miejscu najwyższego wzniesienia szczytu, długość ( $L$ ) mierzoną równoległe do kierunku przepływu wody, szerokość ( $W$ ) mierzoną prostopadłe do długości oraz kąt nachylenia strony doprądowej i zaprądowej. W ramach badań terenowych zmierzono również napelnienie wodą koryta rzeki nad charakterystycznymi punktami wydm. Wyznaczono indeks kształtu pionowego ( $L:H$ ) i poziomego ( $W:L$ ) oraz wskaźnik stromości form ( $H:L$ ). Parametry geometryczne form, tj. długość i wysokość, zestawiono z głębokością wody ( $h$ ). Opierając się na wynikach badań, opracowano zależności funkcyjne między, odpowiednio, wysokością i stromością a długością wydm.

**Słowa kluczowe:** formy denne, ujściowy odcinek rzeki, głębokość wody w korycie

### **WSTĘP**

W określonych warunkach hydraulicznych transport rumowiska dennego w rzece płynącej po podłożu piaszczystym powoduje powstawanie różnorodnych formacji dennych [Allen 1968, Gładki 1976, Dąbkowski 1989]. W zależności od tworzącego je przepływu powstają formy dwu- lub trójwymiarowe, a ich kształt może się zmieniać nie tylko na długości koryta rzeki, lecz również na jego szerokości. Zagadnienia utworów dennych są nadal przedmiotem badań w kraju i za granicą. Najbardziej znane opracowania zagraniczne to prace Simonsa i Richardsona [1966], Allena [1968], Ashley [1990] oraz Carlinga i innych [2000]. Wymienieni badacze opisali formacje denne powstałe w utworach piaszczystych, tj. utworach o średnicy ziaren nie przekraczającej 2 mm. Stosunkowo niewiele opracowań porusza tematykę powsta-

wania form dennych w ciekach o dnie zbudowanym głównie z piasku i drobnego żwiru, a więc w rzekach rejonów podgórskich. Nadal słabo poznane są także procesy, w wyniku których takie formy denne powstają. Do ciekawszych prac ujmujących badania terenowe form żwirowo-piaszczystych występujących na dnie rzeki Severn (Wielka Brytania) należy opracowanie Carlinga i innych [2006]. Trzeba jednak zaznaczyć, że formy te są utworami powstałymi w wyniku oddziaływania przyływu i odpływu wód oceanicznych.

Pomiary morfometryczne wydmy rzecznych obejmują ustalenie ich wysokości, długości i szerokości. Wysokość ( $H$ ) to pionowa odległość od podstawy do linii szczytu wydmy, mierzona w miejscu najwyższego wzniesienia. Długość ( $L$ ) mierzy się równoległe do kierunku przepływu strumienia wody w cieku, a szerokość ( $W$ ) – prostopadłe do długości. Ponadto wykonuje się pomiar kąta nachylenia wydmy od strony dopływowej (w górę strumienia) i zapływowej (w dół cieku).

Powstawanie zmarszczek zależy w głównej mierze od takich parametrów, jak prędkość przepływu strumienia i średnica ziaren rumowiska dennego, a powstawanie wydmy – od głębokości wody w obrębie ich występowania [Carling 1999, za Yalinem 1964 i Allenem 1968]. Dlatego pomiarom kształtu wydmy towarzyszą pomiary napełnienia wodą koryta w tym rejonie. Badania terenowe trzeba przeprowadzać wyjątkowo sprawnie, gdyż w określonych warunkach przepływu formacje denne (zwłaszcza małe zmarszczki) niejednokrotnie szybko zanikają, by równie szybko pojawić się w innym miejscu, przeniesione na pewną odległość w stosunku do pierwotnego położenia [Pruszek 1998]. Formy denne o większych rozmiarach, w tym wydmy piaszczyste, są bardziej stabilne. Jak podaje Carling [1999], ulegają one częściowemu uszkodzeniu lub całkowitemu rozmyciu, gdy korytem płynie woda o znacznej prędkości ( $v > 0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). W przypadku tych form pomiary terenowe można wykonywać w dłuższym czasie, a tym samym z większą dokładnością.

Dane zebrane w terenie wykorzystuje się do wyznaczania takich charakterystyk geometrycznych, jak indeks kształtu pionowego ( $L:H$ ) i poziomego ( $W:L$ ) oraz wskaźnik stromości form ( $H:L$ ). Znając ich wartości, można przyporządkować badane utwory do poszczególnych grup form dennych, np. zmarszczek lub wydmy, bądź do innych utworów rzecznych.

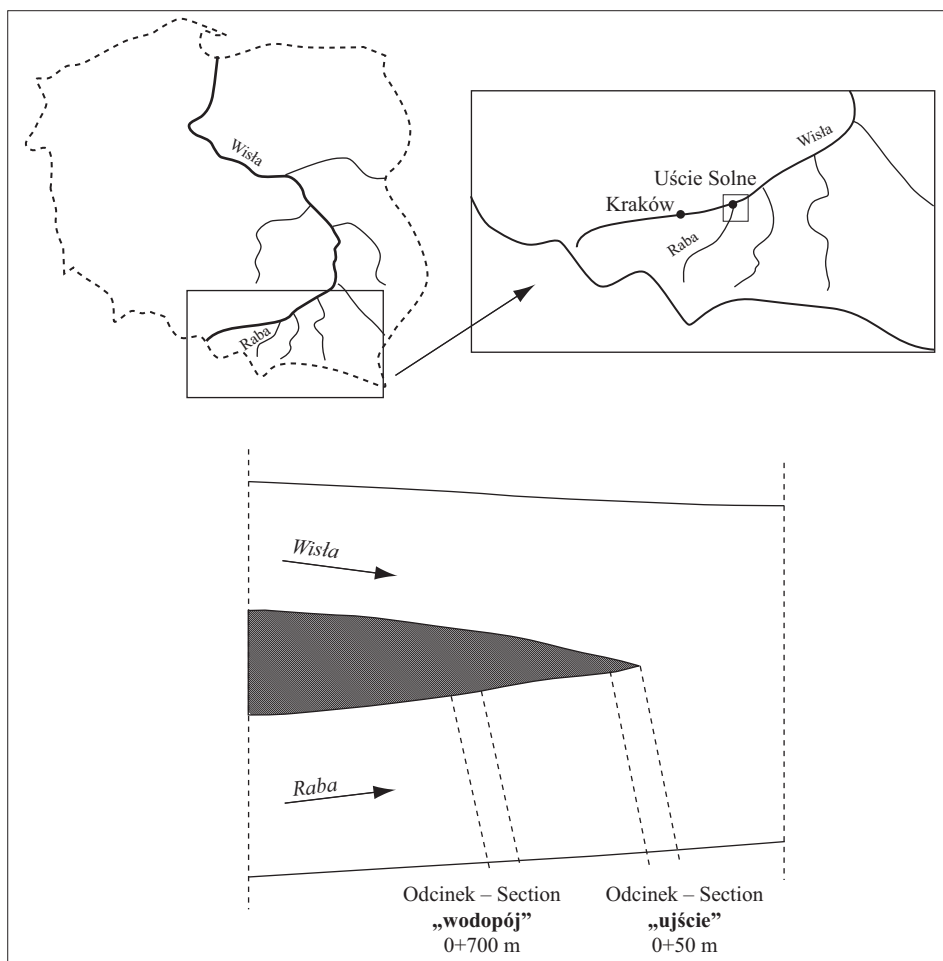
W literaturze przedmiotu obok prac zawierających podstawową charakterystykę utworów rzecznych typu zmarszczek istnieją również prace przedstawiające klasyczne związki empiryczne między poszczególnymi parametrami geometrycznymi form. Należy do nich praca Allena [1968], który korzystając z szeregu opracowań dotyczących wskaźnika stromości, wyraził stromość formy w zależności od jej długości. Dla rzek o dnie piaszczystym Flemming [1988] sformułował równanie opisujące tzw. górne ograniczenie wzrostu form. Zagadnieniem tym zajmowali się także Carling i inni [1993] oraz współautor niniejszego artykułu [Radecki-Pawlik 2002], którzy w swych opracowaniach zamieścili wspomniane równanie. W pracach wymienionych autorów [Carling 1999, Radecki-Pawlik 2002] znalazły się również zależności graficzne (opracowane przez Yalina [1964] i Allena [1968]) między wysokością ( $H$ ) i długością ( $L$ ) form dennych a głębokością wody ( $h$ ) oraz – określone na podstawie wyników własnych badań – górne i dolne ograniczenie stosunku  $H:h$  i  $L:h$  (granica górna:  $H:h=0,4$ ,  $L:h=16$ ; granica dolna:  $H:h=0,025$ ,  $L:h=0,1$ ).

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań morfometrycznych wydmy kształtujących dno ujściowego odcinka rzeki Raby oraz porównano je z wynikami badań uznanych w literaturze za klasyczne.

Badania terenowe wykonano w ramach grantu Komitetu Badań Naukowych nr 2P06S 07528.

## MATERIAŁ I METODY

Badania prowadzono na ujściowym odcinku rzeki Raby o długości 700 m, położonym w miejscowości Uście Solne (gmina Szczurowa, powiat brzeski, woj. małopolskie), gdzie Raba uchodzi prawostronnie do Wisły w 135 km jej biegu. Na odcinku tym, którego szerokość wynosi blisko 50 m, wyodrębniono dwa obszary objęte pomiarami: jeden w km 0+700 nazwany „wodopój”, drugi bliżej ujścia w km 0+050 nazwany „ujściem” (rys. 1). Zwierciadło wody na badanym odcinku rzeki ma spadek 0,0006.



Rys. 1. Obszar badań

Fig. 1. Research area

Raba bierze początek w pobliżu miejscowości Obidowa na wysokości 785 m n.p.m. i przepływa przez trzy główne regiony hydrograficzne: Karpaty Zewnętrzne – Beskidy, Pogórze Karpackie oraz Kotlinę Sandomierską. Jej zlewnia zajmuje 1537 km<sup>2</sup>. W strefie

karpackiej znajduje się 86% dorzecza Raby, co przesądza o podgórskim charakterze rzeki. Odcinek, na którym wykonano pomiary formacji dennych, leży na wysokości 180,0 m n.p.m. Raba ma kilka większych dopływów, z których największy to prawobrzeżna Poniczanka. W obrębie omawianego obszaru zlewnia jest wyjątkowo wąska, o średniej szerokości 3 km, a dopływów brak.

W budowie geologicznej obszaru badań przeważają utwory gruboklastyczne, głównie piaskowce karpackie, a drobniejsze żwiry składają się zarówno z kwarcu, jak i z piaskowców. Zróżnicowanie budowy geologicznej zlewni Raby znajduje odzwierciedlenie w rzeźbie terenu oraz w zmienności typów i gatunków gleb, które się tam wykształciły. W obrębie miejscowości Uście Solne występują żyzniejsze, ale i trudniej przepuszczalne aluwia. W większości przypadków są to tzw. stare mady o składzie mechanicznym utworów gliniasto-pyłowych, gliniasto-ilastych, rzadziej piaszczysto-gliniastych. Mniej zwięzłe płaty gleb gliniasto-pyłowych tworzą kompleksy gleb pszennych bardzo dobrych i dobrych, a bardziej zwięzłe odmiany – kompleksy gleb pszennych wadliwych [Dynowska 1991].

W poszczególnych dniach badań terenowych średnie napełnienie wodą koryta w obrębie form dennych wynosiło 0,5 m. Przepływ średni niski (SNQ) obliczony według formuły Stachy [Punzet 1981] wynosi  $2,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a SNQ z wielolecia 2000–2004, odczytany dla stacji Proszówki –  $5,44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Przepływ średni roczny (SSQ) obliczony ze wzoru Krzanowskiego [1972] jest równy  $20,86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ze wzoru Punzeta [1981] –  $19,28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a na podstawie obserwacji –  $17,52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Przepływ minimalny o zadanym prawdopodobieństwie pojawienia się ( $Q_{\text{min}50\%}$ ) obliczony według wzoru Punzeta wynosi  $1,39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pomiarami objęto wysokość, długość i szerokość wydm piaszczystych o prostej linii szczytu, a także głębokość wody w obrębie ich występowania. Równolegle pobierano materiał tworzący formy denne w celu przeprowadzenia analizy jego składu granulometrycznego. Próby do badań pobierano z miejsc charakterystycznych, tj. w połowie długości strony doprądowej, ze szczytu wydmy oraz w połowie długości strony zaprądowej.

Stosując liniową skalę wielkości, w której jednostką określającą średnicę ziaren jest 1 mm [Wołoszyn i in. 1994], wykreślono krzywe przesiewu, z których odczytano wartości średnicy zastępczej ( $d_{50}$ ). Wyniki pomiarów wysokości ( $H$ ), długości ( $L$ ) i szerokości ( $W$ ) wydm wykorzystano do obliczenia indeksu kształtu poziomego ( $W:L$ ) i pionowego ( $L:H$ ). Następnie przeanalizowano związek między stromością ( $H:L$ ) a długością wydm badanego odcinka rzeki. Oparto się na równaniu Allena [1968]:

$$H:L = 0,074 L^{-0,23}$$

Przy założeniu, że zmienne mają rozkład normalny, stwierdzono korelację prostą między zmienną zależną ( $H:L$ ) a zmienną niezależną ( $L$ ) (dla poziomu istotności  $\alpha=0,05$ ). Zależność tę opisano równaniem osi głównej zredukowanej. Wyznaczono współczynnik kierunkowy ( $a$ ) i współczynnik nachylenia prostej ( $v$ ) oraz określono przedziały ufności dla współczynników korelacji Pearsona ( $r$ ). Punkty odzwierciedlające stromość wydm w zależności od ich długości naniesiono na wykres klasyczny zaczerpnięty z pracy Allena [1968].

Na podstawie danych pomiarowych sformułowano także zależność funkcyjną między wysokością i długością wydm, a punkty odpowiadające wartościom  $H$  i  $L$  naniesiono na sporządzony przez Flemminga [1988] wykres prostej wyznaczającej górne ograniczenie wzrostu form, opisanej wzorem:

$$H=0,16 L^{0,84}$$

Wartości parametrów geometrycznych wydmy odniesione do głębokości wody ( $h$ ) w rejonie tych form naniesiono na wykresy związków wysokości i długości wydmy z głębokością wody, opracowane przez Yalina [1964] i Allena [1968], i porównano z danymi dla rzeki Ren [Radecki-Pawlik 2002].

## WYNIKI I DYSKUSJA

W tabeli przedstawiono wartości parametrów geometrycznych wydmy na odcinku „wodopój”. Dla ułatwienia dyskusji, poszczególne grupy wydmy nazwano „Raba 1”, „Raba 2” i „Raba 17”.

Wydmy należące do zbioru „Raba 1” miały wysokość równą 0,07 m, a długość 1,2 m. Wskaźnik stromości ( $H:L$ ) wynosił 0,06, a wartości indeksu poziomego i pionowego kształtu form były równe odpowiednio 0,83 i 17,14. Wydmy te są zbudowane z ziaren o średnicy zastępczej ( $d_{50}$ ) równej 0,0015 m. Wydmy ze zbioru „Raba 2” były formami o łagodniejszych stokach niż te ze zbioru „Raba 1”: ich wskaźnik stromości był równy 0,03. Indeks poziomego kształtu tych wydmy wynosił 0,43, a pionowego – 28,75, przy wysokości form 0,04 m i długości 1,15 m.

Zbiór „Raba 17” (punkty pomiarowe 68–115) stanowił najliczniejszą grupę form wybitnie piaszczystych, o prostej linii szczytu, zbudowanych z ziaren o jednolitej średnicy zastępczej ( $d_{50}$ ) równej 0,0007 m. Wydmy osiągały wysokość od 0,03 do 0,12 m, a ich długość mieściła się w przedziale od 0,60 do 1,80 m. Wskaźnik stromości form ( $H:L$ ) był dość znacznie zróżnicowany: wynosił od 0,03 do 0,07, a w kilku przypadkach 0,11. Wydmy ze zbioru „Raba 17” charakteryzowały się wyższymi wartościami obu indeksów kształtu niż formy ze zbiorów „Raba 1” i „Raba 2”:  $W:L=0,87\div 4,7$ ,  $L:H=6,33\div 35,20$ .

Wskaźnik stromości form ( $H:L$ ) większości badanych wydmy był mniejszy od 0,08, co zgadza się ze spostrzeżeniami Ashley [1990], która badając wydmy o różnym kształcie stwierdziła, że wskaźnik ten nie przekracza wymienionej wartości.

Wyniki pomiarów parametrów geometrycznych wydmy odniesiono do głębokości wody w strefie ich występowania. I tak, na dnie badanego odcinka rzeki występowały wydmy o prostej linii szczytu o wysokości od 0,03 do 0,12 m, przy głębokości wody od 0,13 do 0,53 m. Analizując położenie punktów odpowiadających zależności wysokości wydmy ( $H$ ) od głębokości wody ( $h$ ) (rys. 2) stwierdzono, że stosunek  $H:h$  przeważającej większości wydmy znajduje się w przedziale od 0,4 do 0,1. Oznacza to, że głębokość wody w obszarze występowania wydmy odpowiada od 2,5- do 10-krotności wysokości wydmy.

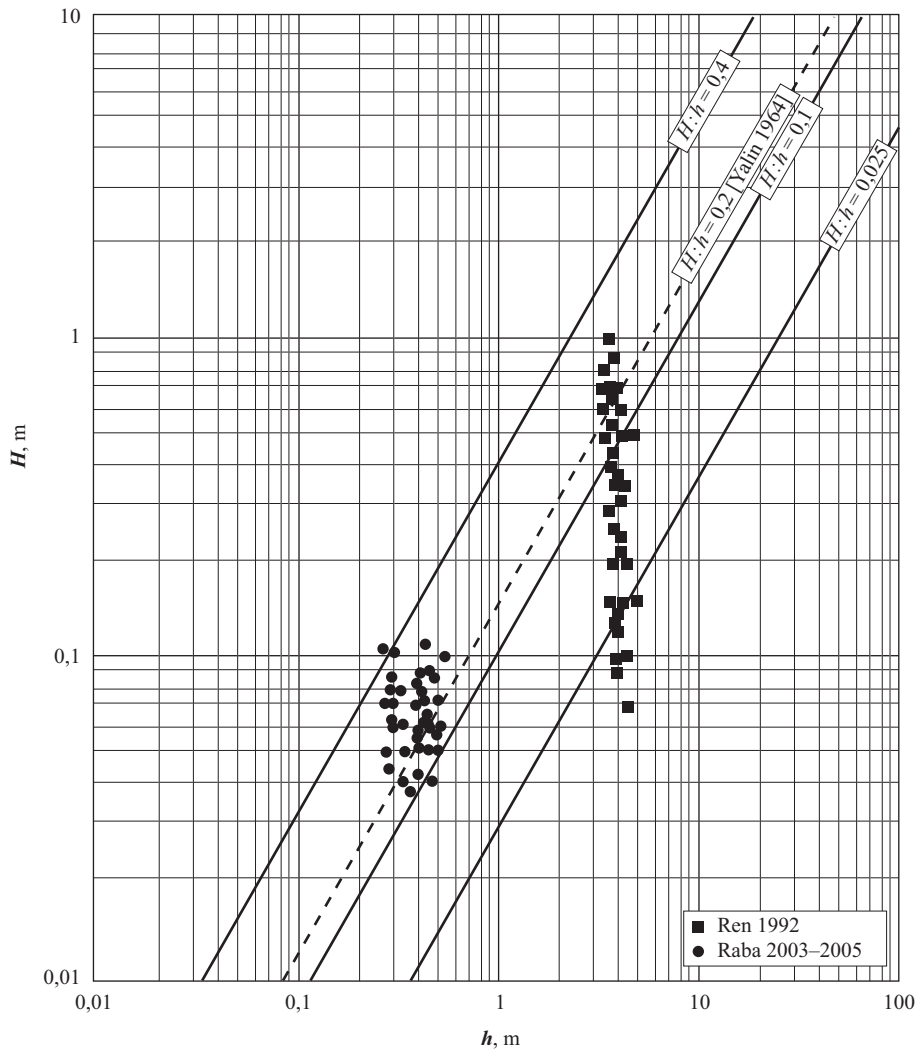
Na rysunku 3 zilustrowano zależność długości wydmy ( $L$ ) od głębokości wody ( $h$ ). Wydmy będące przedmiotem badań miały długość od 0,6 do 1,8 m, a stosunek  $L:h$  większości form mieścił się w przedziale od 1 do 5.

Na podstawie zebranych danych opracowano zależność funkcyjną między wysokością wydmy ( $H$ ) a ich długością ( $L$ ), opisaną równaniem:  $H=1,072L - 2,95$  ( $r=0,55$ ;  $0,28 < r < 0,73$ ;  $\alpha=0,05$ ;  $n=38$ ;  $F_{\text{kryt.0,05;1;38}}=4,11 < F_{\text{obl}}=15,62$ ). Wynika z niego, że wraz ze wzrostem długości wydmy zwiększa się jej wysokość (rys. 4).

Rozmieszczenie punktów odzwierciedlających wysokość i długość form na odcinku Raby porównano z wykresem prostej wyznaczającej górne ograniczenie wzrostu form,

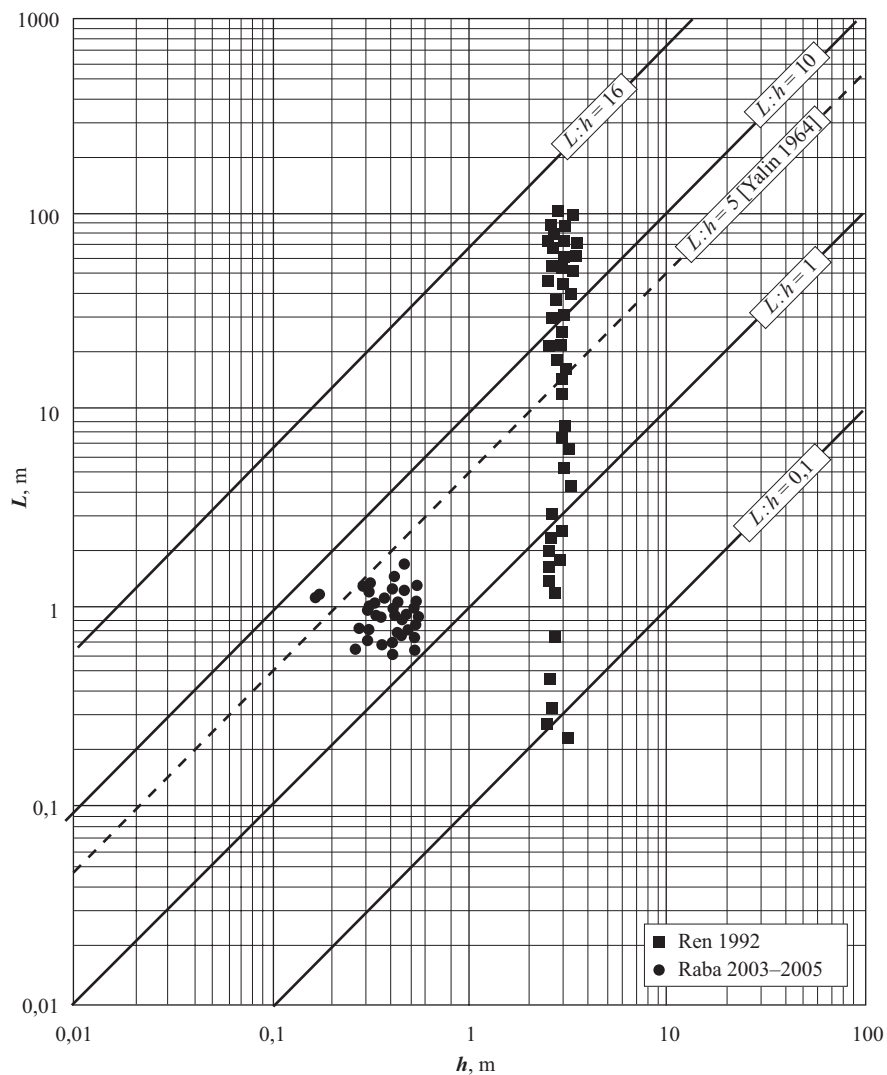
Tabela. Parametry geometryczne badanych wydym o prostej linii szczytu (Raba 2003–2005)  
 Table. Geometrical parameters of straight dunes under study (Raba river 2003–2005)

| Grupa wydym<br>Group of dunes | Punkt pomiarowy<br>Measuring point | Głębokość wody<br>Water depth<br><i>h</i> , m | Wysokość wydymy<br>Dune height<br><i>H</i> , m | Długość wydymy<br>Dune length<br><i>L</i> , m | Szerokość wydymy<br>Dune width<br><i>W</i> , m | <i>H</i> : <i>L</i> | <i>W</i> : <i>L</i> | <i>L</i> : <i>H</i> | Zastępcza średnica ziaren<br>Sedimentation diameter of grains<br><i>d</i> <sub>50</sub> , m |
|-------------------------------|------------------------------------|---|--|---|--|---------------------|---------------------|---------------------|---|
| Raba 1                        | P1                                 | 0,18  | 0,07   | 1,20  | 1,00   | 0,06                | 0,83                | 17,14               | 0,0015  |
|                               | P2                                 | 0,20  |  |   |  |                     |                     |                     |   |
|                               | P3                                 | 0,13  |  |   |  |                     |                     |                     |   |
|                               | P4                                 | 0,14  |  |   |  |                     |                     |                     |   |
| Raba 2                        | 1-1                                | 0,19  | 0,04   | 1,15  | 0,50   | 0,03                | 0,43                | 28,75               | –   |
|                               | 2-2                                | 0,21  |  |   |  |                     |                     |                     |   |
|                               | 3-3                                | 0,17  |  |   |  |                     |                     |                     |   |
|                               | 4-4                                | 0,20  |  |   |  |                     |                     |                     |   |
| Raba 17                       | 68                                 | 0,32  | 0,06   | 1,10  | 2,15   | 0,05                | 1,95                | 18,33               | 0,0007  |
|                               | 69                                 | 0,30  | 0,05   | 1,05  | 1,60   | 0,05                | 1,52                | 21,00               | 0,0007  |
|                               | 70                                 | 0,28  | 0,07   | 1,40  | 2,10   | 0,05                | 1,50                | 20,00               | 0,0007  |
|                               | 71                                 | 0,26  | 0,11   | 0,68  | 3,10   | 0,15                | 4,56                | 6,48                | 0,0007  |
|                               | 72                                 | 0,27  | 0,05   | 0,67  | 1,40   | 0,07                | 2,09                | 13,40               | 0,0007  |
|                               | 73                                 | 0,31  | 0,06   | 1,08  | 1,15   | 0,06                | 1,06                | 18,00               | 0,0007  |
|                               | 74                                 | 0,32  | 0,08   | 0,96  | 2,00   | 0,08                | 2,08                | 12,00               | 0,0007  |
|                               | 75                                 | 0,35  | 0,04   | 1,05  | 2,30   | 0,04                | 2,19                | 26,25               | 0,0007  |
|                               | 76                                 | 0,29  | 0,11   | 0,83  | 1,40   | 0,13                | 1,69                | 7,55                | 0,0007  |
|                               | 77                                 | 0,30  | 0,08   | 1,25  | 2,40   | 0,06                | 1,92                | 15,63               | 0,0007  |
|                               | 78                                 | 0,30  | 0,07   | 1,42  | 1,70   | 0,05                | 1,20                | 20,29               | 0,0007  |
|                               | 79                                 | 0,31  | 0,08   | 0,85  | 2,60   | 0,09                | 3,06                | 10,63               | 0,0007  |
|                               | 80                                 | 0,30  | 0,06   | 1,00  | 3,48   | 0,06                | 3,48                | 18,18               | 0,0007  |
|                               | 81                                 | 0,31  | 0,06   | 0,73  | 3,43   | 0,08                | 4,70                | 12,17               | 0,0007  |
|                               | 82                                 | 0,34  | 0,04   | 0,97  | 2,55   | 0,04                | 2,63                | 27,71               | 0,0007  |
|                               | 83                                 | 0,35  | 0,06   | 0,97  | 2,47   | 0,06                | 2,55                | 17,64               | 0,0007  |
|                               | 84                                 | 0,40  | 0,07   | 1,38  | 2,70   | 0,05                | 1,96                | 19,71               | 0,0007  |
|                               | 85                                 | 0,43  | 0,07   | 1,45  | 1,50   | 0,05                | 1,03                | 20,71               | 0,0007  |
|                               | 86                                 | 0,45  | 0,09   | 1,33  | 2,25   | 0,06                | 1,69                | 15,65               | 0,0007  |
|                               | 87                                 | 0,46  | 0,12   | 0,76  | 1,37   | 0,16                | 1,80                | 6,33                | 0,0007  |
|                               | 88                                 | 0,42  | 0,07   | 1,32  | 2,15   | 0,05                | 1,63                | 20,31               | 0,0007  |
|                               | 89                                 | 0,47  | 0,07   | 1,80  | 1,76   | 0,04                | 0,98                | 25,71               | 0,0007  |
|                               | 90                                 | 0,45  | 0,06   | 0,97  | 2,60   | 0,06                | 2,68                | 17,64               | 0,0007  |
|                               | 91                                 | 0,46  | 0,09   | 0,83  | 2,57   | 0,11                | 3,10                | 9,22                | 0,0007  |
|                               | 92                                 | 0,44  | 0,04   | 0,70  | 1,24   | 0,06                | 1,77                | 17,50               | 0,0007  |
|                               | 93                                 | 0,51  | 0,06   | 1,46  | 1,27   | 0,04                | 0,87                | 26,55               | 0,0007  |
|                               | 94                                 | 0,40  | 0,07   | 0,94  | 1,26   | 0,07                | 1,34                | 14,46               | 0,0007  |
|                               | 95                                 | 0,37  | 0,03   | 0,83  | 3,20   | 0,04                | 3,86                | 27,67               | 0,0007  |
|                               | 96                                 | 0,40  | 0,08   | 1,15  | 3,30   | 0,07                | 2,87                | 14,38               | 0,0007  |
|                               | 97                                 | 0,38  | 0,08   | 0,73  | 2,20   | 0,11                | 3,01                | 9,13                | 0,0007  |
|                               | 98                                 | 0,35  | 0,04   | 0,64  | 1,30   | 0,06                | 2,03                | 16,00               | 0,0007  |
| 99                            | 0,35                               | 0,04  | 0,65   | 1,40  | 0,06   | 2,15                | 16,25               | 0,0007              |   |
| 100                           | 0,43                               | 0,05  | 0,93   | 2,00  | 0,05   | 2,15                | 18,60               | 0,0007              |   |
| 101                           | 0,46                               | 0,08  | 0,61   | 2,10  | 0,13   | 3,44                | 7,63                | 0,0007              |   |
| 102                           | 0,51                               | 0,05  | 0,94   | 1,15  | 0,05   | 1,22                | 20,89               | 0,0007              |   |
| 103                           | 0,49                               | 0,05  | 1,19   | 1,35  | 0,04   | 1,13                | 23,80               | 0,0007              |   |
| 104                           | 0,52                               | 0,10  | 0,95   | 2,00  | 0,11   | 2,11                | 9,50                | 0,0007              |   |
| 105                           | 0,48                               | 0,06  | 0,63   | 2,47  | 0,09   | 3,92                | 11,45               | 0,0007              |   |
| 106                           | 0,52                               | 0,04  | 0,90   | 1,68  | 0,04   | 1,87                | 22,50               | 0,0007              |   |
| 107                           | 0,50                               | 0,06  | 0,60   | 1,90  | 0,09   | 3,17                | 10,91               | 0,0007              |   |
| 108                           | 0,53                               | 0,07  | 0,68   | 1,38  | 0,10   | 2,03                | 10,46               | 0,0007              |   |
| 109                           | 0,49                               | 0,04  | 0,74   | 2,60  | 0,05   | 3,51                | 18,50               | 0,0007              |   |
| 110                           | 0,50                               | 0,03  | 0,88   | 1,89  | 0,03   | 2,15                | 35,20               | 0,0007              |   |
| 111                           | 0,46                               | 0,04  | 0,77   | 1,39  | 0,05   | 1,81                | 22,00               | 0,0007              |   |
| 112                           | 0,39                               | 0,07  | 1,10   | 1,83  | 0,06   | 1,66                | 15,71               | 0,0007              |   |
| 113                           | 0,43                               | 0,04  | 1,06   | 2,24  | 0,04   | 2,11                | 26,50               | 0,0007              |   |
| 114                           | 0,43                               | 0,05  | 1,02   | 2,26  | 0,05   | 2,22                | 20,40               | 0,0007              |   |
| 115                           | 0,43                               | 0,06  | 1,02   | 1,89  | 0,06   | 1,85                | 17,00               | 0,0007              |   |



Rys. 2. Zależność wysokości wydmy ( $H$ ) od głębokości wody ( $h$ ) w Rabcie (2003–2005) i w Renie (wg Carlinga i in. [1993])

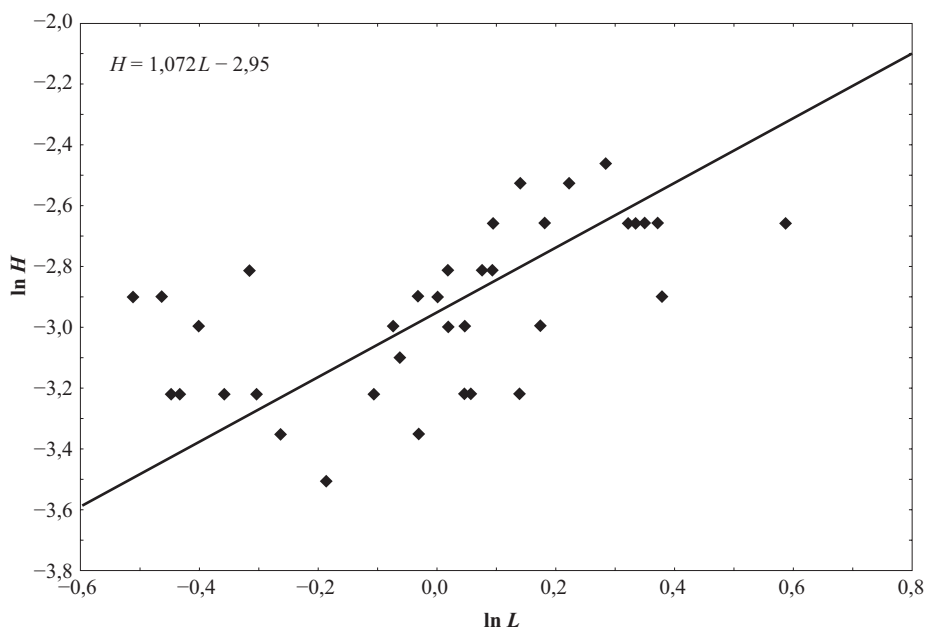
Fig. 2. Height ( $H$ ) of dune versus water depth ( $h$ ) in Raba river (2003–2005) and in Rhine river (acc. to Carling et al. [1993])



Rys. 3. Zależność długości wydmy ( $L$ ) od głębokości wody ( $h$ ) w Rabcie (2003–2005) i w Renie (wg. Carlinga i in. [1993])

Fig. 3. Length ( $L$ ) of dune versus water depth ( $h$ ) in Raba river (2003–2005) and in Rhine river (acc. to Carling et al. [1993])

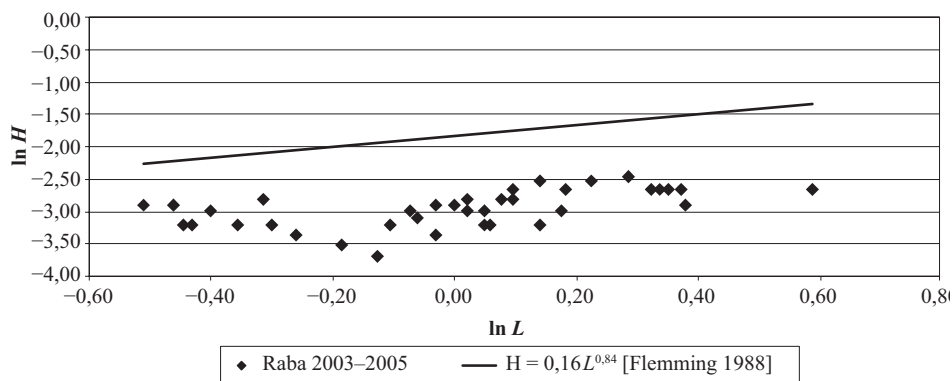


Rys. 4. Zależność wysokości wydmy ( $H$ ) od jej długości ( $L$ ); Raba 2003–2005Fig. 4. Height ( $H$ ) versus length ( $L$ ) of dune; Raba river 2003–2005

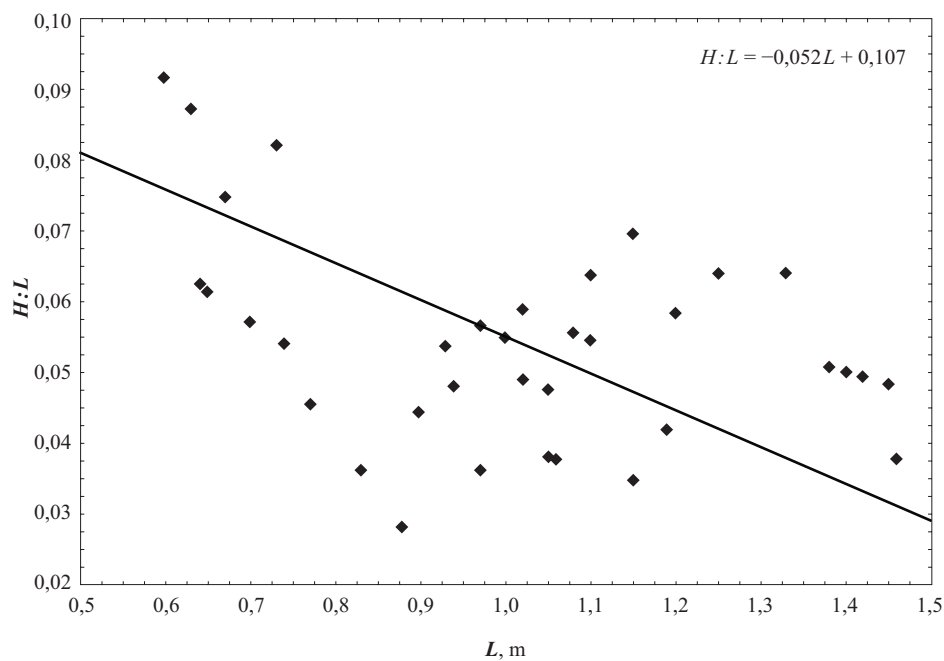
zaproponowane przez Flemminga [1988] (rys. 5). Punkty leżą poniżej tej prostej, co oznacza, że omawiane wydmy są krótsze i niższe od wydmy opisanych przez wymienionego autora. Jak zauważyła Ashley [1990], w literaturze przedmiotu brak było informacji na temat wydmy krótkich i niskich. Wyniki badań prowadzonych na ujściowym odcinku Raby uzupełniają tę lukę, dostarczając danych na temat wydmy mniejszych, o długości nie przekraczającej 1,0 m.

Związek między wskaźnikiem stromości ( $H:L$ ) a długością wydmy ( $L$ ), przedstawiony na rysunku 6, opisuje równanie:  $H:L = -0,052L + 0,107$  ( $r = -0,42$ ;  $-0,31 < r < 0,32$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 38$ ;  $F_{kryt.0,05;1;38} = 4,11 < F_{obl} = 7,30$ ).

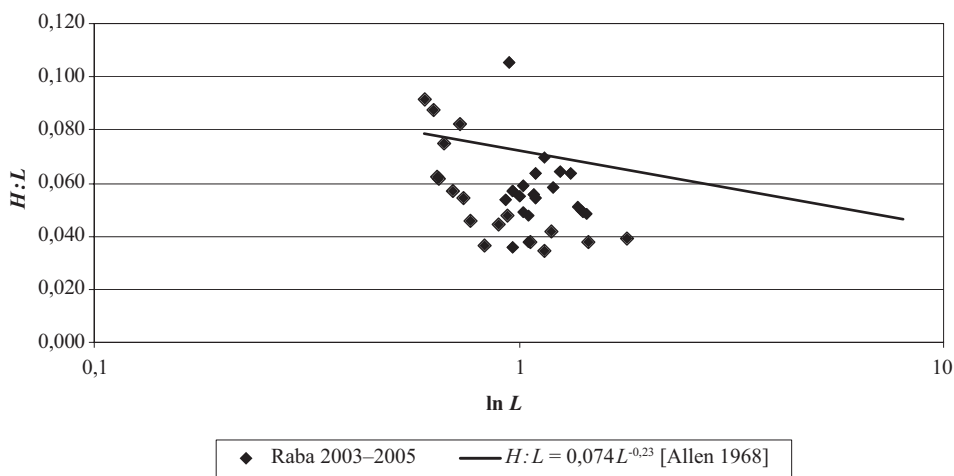
Porównując otrzymane wyniki z klasycznym wykresem zależności  $H:L$  od  $L$  [Allen 1968] (rys. 7) stwierdzono, że większość punktów ilustrujących tę zależność znajduje się poniżej prostej o równaniu  $H:L = 0,074L^{-0,23}$ , sformułowanym przez Allena [1968] na podstawie wyników badań terenowych. Oznacza to, że wydmy piaszczyste o prostej linii szczytu, występujące w Rabie, są niższe i dłuższe, a przez to mniej strome, niż formy badane przez tego autora.



Rys. 5. Zależność wysokości wydmy ( $H$ ) od jej długości ( $L$ ); Raba 2003–2005  
 Fig. 5. Height ( $H$ ) versus length ( $L$ ) of dune; Raba river 2003–2005



Rys. 6. Zależność wskaźnika stromości wydmy ( $H:L$ ) od jej długości ( $L$ ); Raba 2003–2005  
 Fig. 6. Steepness ( $H:L$ ) versus length ( $L$ ) of dune; Raba river 2003–2005



Rys. 7. Zależność wskaźnika stromości wydmy ( $H:L$ ) od jej długości ( $L$ ); Raba 2003–2005  
 Fig. 7. Steepness ( $H:L$ ) versus length ( $L$ ) of dune; Raba river 2003–2005

## PODSUMOWANIE

Wydmy piaszczyste o prostej linii szczytu, występujące na dnie ujściowego odcinka Raby, miały wysokość ( $H$ ) od 0,03 do 0,12 m, przy głębokości wody ( $h$ ) od 0,13 do 0,53 m. Stosunek  $H:h$  mieścił się w granicach od 1:2,5 do 1:10.

Długość wydmy ( $L$ ) wynosiła od 0,6 do 1,8 m. Mogła ona odpowiadać głębokości wody ( $h$ ) w obrębie form, ale też osiągać 5-krotność tej głębokości.

Związek między wysokością wydmy a ich długością opisuje równanie:  $H = 1,072L - 2,95$  ( $r = 0,55$ ;  $0,28 < r < 0,73$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 38$ ;  $F_{\text{kryt},0,05;1;38} = 4,11 < F_{\text{obl}} = 15,62$ ). Badane wydmy są krótsze i niższe od wydmy dotychczas opisywanych w literaturze przedmiotu.

Zależność stromości wydmy ( $H:L$ ) od ich długości aproksymuje równanie:  $H:L = -0,052L + 0,107$  ( $r = -0,42$ ;  $-0,31 < r < 0,32$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 38$ ;  $F_{\text{kryt},0,05;1;38} = 4,11 < F_{\text{obl}} = 7,30$ ). Zdecydowana większość punktów odpowiadających zależności  $H:L$  od  $L$  znajduje się poniżej prostej o równaniu:  $H:L = 0,074L^{-0,23}$ , sformułowanym przez Allena. Oznacza to, że badane wydmy piaszczyste o prostej linii szczytu są niższe i dłuższe, a więc i mniej strome, od wydmy opisanych przez tego autora.

## PIŚMIENNICTWO

- Allen J.R., 1968. Current ripples: their relation to patterns of water and sediment motion. North Holland Publ. Amsterdam.
- Ashley G., 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: A new look at the old problem. J. Sedim. Petrol. 60, 160–172.
- Carling P.A., 1999. Subaqueous gravel dunes. J. Sedim. Res. 69, 534–545.

- Carling P.A., Gözl E., Glaister M., Radecki-Pawlik A., Rosenzweig S., 1993. Study and numerical modelling of subaquatic dunes in the River Rhine near Niderwalluf. BFG Ambleside, Koblenz Institute of Freshwater Ecology, Koblenz, BIG nr 0774, 1–31.
- Carling P.A., Gözl E., Orr H.G., Radecki-Pawlik A., 2000. The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. *Sedimentology* 47, 227–252.
- Carling P.A., Radecki-Pawlik A., Williams J.J., Rumble B., Meshkova L., Bell P., Breakspear R., 2006. The morphodynamics and internal structure of intertidal fine-gravel dunes: Hill Flats, Severn Estuary, UK. *Sedim. Geol.* 183, 159–179.
- Dąbkowski L., 1989. Analiza oporów ruchu i kształtowania się średnich głębokości strumieni w korytach rzek o dnie piaszczystym. *Rozpr. Nauk. Monogr.* 97, Wyd. SGGW-AR Warszawa.
- Dynowska I., Maciejewski M., 1991. Dorzecze górnej Wisły. PWN Warszawa.
- Flemming B.W., 1988. Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. *Boch. Geol. U. Geotechn. Arb.* 29, Hannover.
- Gładki H., 1976. Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie karpaccich dopływów Wisły. *Zesz. Nauk. AR Krak., Rozpr. Hab.* 118.
- Krzanowski S., 1972. Przestrzenna zmienność odpływu średniego (spływu jednostkowego) na obszarze Karpat polskich. Praca doktorska. Zakład Hydrologii, Akademia Rolnicza w Krakowie (maszynopis).
- Pruszek Z., 1998. Dynamika brzegu i dna morskiego. *Inst. Bud. Wod. PAN Gdańsk.*
- Punzet J., 1981. Empiryczny system ocen charakterystycznych przepływów rzek i potoków w karpacciej części dorzecza Wisły. *Wiad. IMGW VII (XXVII)*, 1–2, 31–40.
- Radecki-Pawlik A., 2002. Wybrane zagadnienia kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej. *Zesz. Nauk. AR Krak., Rozprawy* 281.
- Simons D.B., Richardson E.V., 1966. Resistance to flow in alluvial channels. *U.S. Geol. Surv. Profess. Papers* 422-J, 1–61.
- Wołoszyn J., Czamara W., Eliasiewicz R., Krężel J., 1994. Regulacja rzek i potoków górskich. *Wyd. AR we Wrocławiu.*
- Yalin M., 1964. Geometrical properties of sand waves. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng., Report* 90.

## MORPHOMETRIC STUDIES OF STRAIGHT-CREST SAND DUNES OBSERVED ON BOTTOM OF ESTUARY PART OF RABA RIVER

**Abstract.** The investigations carried out in the estuary part of the Raba river focused on straight sand dunes shaping the river bottom. The following characteristics of the dunes were considered: height ( $H$ ) measured at the highest rise of the crest, length ( $L$ ) measured parallel to the flow, width ( $W$ ) measured perpendicular to the length, and angle of the lee-side and stoss-side slopes. Field studies included also the measurement of the depth of water ( $h$ ) above the characteristic points of the bed forms. Using the data obtained, indexes characterising the shape ( $L:H$ ,  $W:L$ ) and the steepness ( $H:L$ ) of dunes were calculated, and formulae describing the functional dependence of height and steepness, respectively, on length were developed. The geometrical parameters, i.e. length and height, of the forms were also related to the water depth.

**Key words:** bed forms, estuary part of river, water depth in river channel

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 11.12.2006*