

NATALIA WALCZAK<sup>1</sup>, BOGUSŁAW PRZEDWOJSKI<sup>1</sup>, ZBIGNIEW WALCZAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

<sup>2</sup>Katedra Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

## ROZKŁAD PRĘDKOŚCI WODY NA TERENACH ZALEWOWYCH POROŚNIĘTYCH ROŚLINNOŚCIĄ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metody obliczania rozkładu prędkości wody w rzekach i dolinach rzecznych z roślinnością. Model analityczny opisuje przepływ wody przez roślinność o różnej gęstości w kilku warstwach. Obliczone wartości prędkości z modelu analitycznego zostały zweryfikowane o dane z pomiarów terenowych. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość szerokiego wykorzystania przedstawionego modelu w praktyce inżynierskiej.

**Słowa kluczowe:** prędkość, roślinność, pomiary hydrometryczne

### Wstęp

Nieodłącznym elementem ekosystemu wodnego jest roślinność występująca na brzegach rzek i terenach zalewowych. Ma ona charakter okresowy i powtarzalny (BAJKIEWICZ-GRABOWSKA i IN. 1993). Badając środowisko rzeki i doliny, należy pamiętać, że rzeka jest tylko składową – choć bardzo istotną – większego ekosystemu, jaki stanowi dolina rzeczna łącznie z rzeką. Zależności biocenotyczne między ciekami a terenem zalewowym rozpatruje się jako całość ekosystemu doliny rzecznej. Ma to duże znaczenie dla funkcjonowania złożonej biocenozy. Oba elementy systemu są ze sobą ściśle związane, a przy badaniu funkcji, zmian i zagrożeń jednego z nich należy uwzględnić drugi.

Cechą charakterystyczną roślinności terenów zalewowych jest bardzo ważna odrębność fitosocjologiczna gatunków wchodzących w jej skład w stosunku do sąsiadujących z nimi zbiorowisk leśnych czy łąkowych. Na odrębność tej roślinności wpływ mają czynniki hydrologiczne, których efektem jest okresowa zmienność poziomów wody czy dostarczanie różnych substancji odżywczych i nasion nowych roślin przez wody płynące. Porost roślinny na brzegach rzek może wpłynąć na zmianę warunków przepływu

w korycie – zmniejsza się prędkość ruchu wody i czynna powierzchnia przekroju poprzecznego, zmieniają się wartości spadku podłużnego zwierciadła wody, a także wartość oporów ruchu (BAJKIEWICZ-GRABOWSKA i IN. 1993). Opór ruchu zależy od rodzaju, gęstości i wielkości roślinności, natomiast jej wpływ na przepustowość zależy przede wszystkim od wielkości rzeki (ŻELAZO 1991). Intensywność wegetacji roślinności wodnej jest cechą indywidualną każdej rzeki.

## Material i metody

### Model matematyczny

Na naturalnych terenach zalewowych obok drzew występują zwykle różne rodzaje roślin – trawy, turzyce, trzciny i krzewy. Prowadzi to do powstania dwóch lub trzech stref o różnej gęstości struktury roślinnej. Największa jej gęstość cechuje strefę dolną, o wysokości rzędu od 0,4 m do 0,5 m, gdzie równocześnie rosną trawy, trzciny i krzewy. Nieco mniejsza gęstość charakteryzuje strefę środkową, o wysokości rzędu od 0,50 m do 1,0 m, gdzie występują trzciny i krzewy. Najmniejsza gęstość jest typowa dla strefy górnej, powyżej wierzchołków trzin.

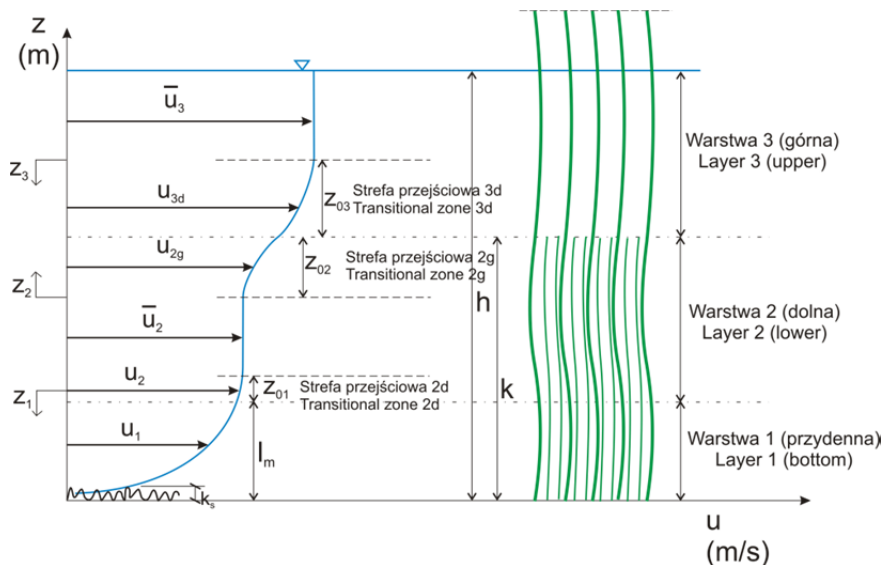
Opływanie elementów roślinnych powoduje, że powstają wiry i ogranicza zastosowanie znanych metod obliczania prędkości w korytach otwartych. Wiry przemieszczające się w kierunku poziomym powodują poziomą wymianę pędu. W warstwie 2 (rys. 1), przy dostatecznie dużych odległościach od dna koryta, generowanie wirów przez elementy roślinne jest procesem dominującym (KUBRAK i NACHLIK 2003).

Na głębokości przepływu  $h$  wyróżnia się warstwy: 1 (przydenną), 2 (dolną) i 3 (górną). W miejscu styku warstw występują strefy przejściowe. Profil prędkości jest traktowany oddzielnie dla warstwy 2 (dolnej) – o większej gęstości elementów roślinnych, i warstwy 3 (górnej) – o mniejszej gęstości elementów roślinnych. W warstwie 1 (przydennej) uwzględnia się pionową wymianę pędu, spowodowaną tarcieniem wody o dno koryta. W celu wyznaczenia wartości prędkości dla poszczególnych stref opracowano analityczny model rozkładu prędkości i szorstkości hydraulicznej przy przepływie wody przez sztywne elementy roślinne (PRZEDWOJSKI 2008). Wyprowadzenia poniższych wzorów zostały zamieszczone w pracy PRZEDWOJSKIEGO (2008). W tym artykule podano wyłącznie równania opisujące poszczególne strefy.

Równanie zachowania pędu w warstwie 1 (przydennej), w zakresie głębokości  $k_s < z < l_m$  można zapisać następująco:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ z^2 \frac{\partial u_1(z)}{\partial z} \right] = \frac{C_w \cdot m_2 \cdot D_2 \cdot [u_1(z)]^2}{2 \cdot \kappa^2} - \frac{g \cdot I}{\kappa^2} \quad (1)$$

gdzie:  $k_s$  – nierówność powierzchni zalewowej,  $l_m$  – wysokość warstwy przydennej  $u_1(z)$  – prędkość w odległości  $z$  od dna w warstwie 1 (przydennej),  $C_w$  – współczynnik oporów,  $m_2$  – zagęszczenie elementów roślinnych w warstwie 2,  $D_2$  – średnica elementów roślinnych w warstwie 2,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $I$  – spadek hydrauliczny,  $\kappa$  – stała von Karmana.



Rys. 1. Pionowy rozkład prędkości przy przepływie z roślinnością częściowo zatopioną o różnym zagęszczeniu elementów roślinnych w dwóch warstwach

Fig. 1. Vertical velocity distribution in the flow with partially submerged vegetation of various densities of vegetation in two layers

W warstwie 2 (dolnej) występuje górna strefa przejściowa 2g w zakresie zmienności  $[(k - z_{02}) \leq z \leq k]$ , w której równanie zachowania pędu ma postać:

$$u_{2g}(z_2) \frac{\partial^2 u_{2g}(z_2)}{\partial z_2^2} + \left( \frac{\partial u_{2g}(z_2)}{\partial z_2} \right)^2 = \frac{C_w m_2 D_2 [u_{2g}(z_2)]^2}{2\alpha_2} - \frac{gI}{\alpha_2} \quad (2)$$

gdzie:  $k$  – wysokość zatopionej warstwy roślinnej (wysokość dolnej warstwy o większej gęstości elementów roślinnych),  $z_{02}$  – wysokość strefy przejściowej w górnej części warstwy 2,  $u_{2g}(z_2)$  – prędkość w odległości  $z$  od dna, w górnej strefie przejściowej, w warstwie 2 (dolnej),  $z_2$  – zmienna zastępcza,  $m_2$  – zagęszczenie elementów roślinnych w warstwie 2,  $D_2$  – średnica elementów roślinnych w warstwie 2,  $\alpha_2$  – charakterystyczna skala długości makro turbulencji w kierunku poziomym.

W warstwie 3 (górnej) występuje dolna strefa przejściowa 3d, w zakresie zmienności  $[k \leq z \leq (k + z_{03})]$ , a równanie zachowania pędu ma postać:

$$u_{3d}(z_3) \frac{\partial^2 u_{3d}(z_3)}{\partial z_3^2} + \left( \frac{\partial u_{3d}(z_3)}{\partial z_3} \right)^2 = \frac{gI}{\alpha_3} - \frac{C_w m_3 D_3 [u_{3d}(z_3)]^2}{2\alpha_3} \quad (3)$$

gdzie:  $k$  – wysokość zatopionej warstwy roślinnej (wysokość dolnej warstwy o większej gęstości elementów roślinnych),  $z_{03}$  – wysokość strefy przejściowej w górnej części warstwy 3,  $u_{3d}(z_3)$  – prędkość w odległości  $z$  w dolnej strefie przejściowej, w warstwie

3 (górną),  $z_3$  – zmienna zastępcza,  $z_{03}$  – wysokość dolnej strefy przejściowej, w warstwie 3 (górną), o mniejszej gęstości elementów roślinnych,  $\alpha_3 = \kappa \alpha_{x3}$  – skala długości makro turbulencji w warstwie 3 (górną),  $m_3$  – zagęszczenie elementów roślinnych w warstwie 3 (górną),  $D_3$  – średnica elementów roślinnych w warstwie 3 (górną)  $\alpha_{x3}$  – odległość między elementami roślinnymi w kierunku przepływu. W obliczeniach rozkładów prędkości przy przepływie przez sztywne elementy roślinne bez liści można przyjmować wartość współczynnika oporów  $C_w = 1.0$ , zgodnie z wynikami badań ARMANINIEGO i IN. (2005).

W warstwie 1 (przydennej) dla zmiennej głębokości ( $k_s \leq z \leq l_m$ ) prędkość opisuje równanie:

$$u_1(z) = \frac{1}{2} \left[ C_2 e^{2\sqrt{A_1}z} - \frac{M}{C_2 e^{2\sqrt{A_1}z}} \right] \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{C_w D m}{2\kappa^2} \quad (5)$$

$$M = \frac{C_1}{(1 + \kappa^2)_m A_1} - \frac{gI}{\kappa^2 A_1} \quad (6)$$

gdzie:  $A_1$  – stała opisana równaniem (5), która uwzględnia współczynnik oporów, średnicę i gęstość w warstwie przydennej oraz stała von Karmana,  $M$  – stała opisana równaniem (6). Równania opisujące stałe znajdują się w pracy PRZEDWOJSKIEGO (2008).

W dolnej części strefy przejściowej, pomiędzy warstwą przydenną a dolną dla głębokości [ $l_m \leq z \leq (l_m + z_{01})$ ], prędkość  $u_2$  opisuje się zależnością:

$$u_2 = \sqrt{\bar{u}_2^2 - \left[ C_3 e^{z_1 \sqrt{2A_2}} + C_4 e^{-z_1 \sqrt{2A_2}} \right]} \quad (7)$$

W warstwie 2 (dolnej) występuje górna strefa przejściowa  $2g$ , z  $A_2 = \frac{C_w D_2 m_2}{2\alpha_2}$ ,

w której równanie prędkości ma następujące rozwiązanie analityczne:

$$u_{2g} = \sqrt{\bar{u}_2^2 + \left[ C_5 e^{z_2 \sqrt{2A_2}} + C_6 e^{-z_2 \sqrt{2A_2}} \right]} \quad (8)$$

W warstwie 3 (górną) występuje dolna strefa przejściowa  $3d$  z  $A_3 = \frac{C_w m_3 D_3}{2\alpha_3}$  (rys. 3),

w której równanie prędkości ma następujące rozwiązanie analityczne:

$$u_{3d} = \sqrt{\bar{u}_3^2 - \left[ C_7 e^{z_3 \sqrt{2A_3}} + C_8 e^{-z_3 \sqrt{2A_3}} \right]} \quad (9)$$

We wszystkich tych równaniach występują stałe całkowania, które w zależności od miejsca występowania (górną czy dolna strefa) wyznacza się z warunków brzegowych.

Stałe  $C_2, C_4, C_6, C_8$  wyznacza się z warunku brzegowego, gdzie w miejscu styczności dwóch kolejnych warstw gradienty prędkości są sobie równe. Stałe  $C_3, C_5, C_7$ , wyznacza się z drugiego warunku brzegowego, gdzie na odpowiednich wysokościach prędkość równa jest prędkości średniej z najbliższej warstwy o jednakowym stopniu zagęszczenia elementów roślinnych. Wzory do obliczania stałych  $C$  oraz wielkości  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  podane są w pracy PRZEDWOJSKIEGO (2008).

W warstwach o jednakowym zagęszczeniu prędkości równe są:

dla warstwy 2 (dolnej):

$$\bar{u}_2 = \sqrt{\frac{2gI}{C_w m_2 D_2}} \quad (10)$$

dla warstwy 3 (górnej):

$$\bar{u}_3 = \sqrt{\frac{2gI}{C_w m_3 D_3}} \quad (11)$$

Wysokości poszczególnych stref przejściowych są funkcją zagęszczenia struktury roślinnej. Prędkość średnią wody w pionie wyznaczono jako ważoną przez pola cząstkowe. Prędkość ta przy przepływie przez roślinność częściowo zatopioną ( $k$ ), o różnym zagęszczeniu elementów roślinnych w dwóch warstwach (rys. 3), wyrażona jest następująco (PRZEDWOJSKI 2008):

$$U = \frac{1}{h} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{C_2}{4} [k_s E_0 + (l_m - k_s)(E_0 + E)] + \left[ k - l_m - \frac{1}{2}(z_{01} + z_{02}) \right] \bar{u}_2 + \right. \\ & \left. \frac{z_{01}}{2} \sqrt{\bar{u}_2^2 - C_3 E_2} + \frac{z_{02}}{2} \sqrt{\bar{u}_2^2 + C_5 E_4} + \right. \\ & \left. \frac{z_{03}}{2} \sqrt{\bar{u}_3^2 - C_7 E_6} + \left( h - k - \frac{1}{2} z_{03} \right) \bar{u}_3 \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Wzory do stałych  $E$  występujące we wzorze (12) podane są w pracy PRZEDWOJSKIEGO (2008). Dla znanej wartości prędkości średniej w pionie strumienia można wyznaczyć wartość współczynnika prędkości z wzoru Chèzy'ego lub współczynnika szorstkości według wzoru Manninga.

### Badania terenowe

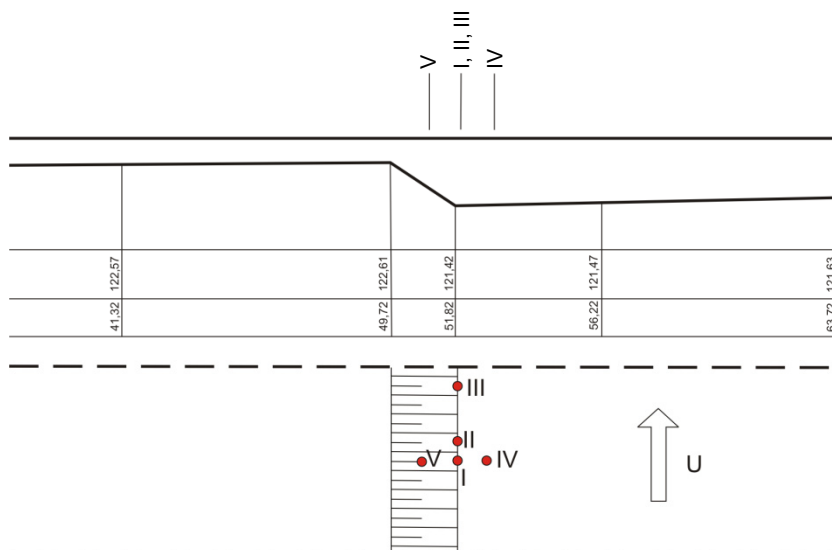
Do weryfikacji opisanej metodyki obliczeń wykorzystano wyniki z pomiarów terenowych przeprowadzonych na terenie zalewowym rzeki Warty, powyżej zbiornika Jeziorsko, na odcinku od kilometra 503+650 (most w miejscowości Warta) do kilometra 520+850 (wodowskaz w Sieradzu). Badania obejmowały inwentaryzację roślinności krzewiastej na terenie zalewowym (tab. 1), morfologię koryta rzeki w wybranych przekrojach między wałami i w dolinie oraz pomiary prędkości w wyznaczonym przekroju w okresie wezbrania wiosennego.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów terenowych z dnia 20.04.2006 r.  
 Table 1. Summary of results of field measurements on 4/20/2006

Opis Description	Symbol	Jednostka Unit	Numer pionu hydrometrycznego Number hydrometric vertical				
			I	II	III	IV	V
Głębokość – Depth	H	m	1,75	1,75	1,75	1,75	1,35
Wysokość krzewów w warstwie 2 Height bushes in layer 2	k	m	0,95	0,9	0,5	0,8	0,46
Wysokość krzewów w warstwie 3 Height bushes in layer 3	k <sub>r</sub>	m	–	1,46	1,37	–	1,05
Zagęszczenie krzewów w warstwie 2 Density bushes in layer 2	m <sub>2</sub>	szt./m <sup>2</sup>	78,6	183,6	144,6	79,1	182,0
Zagęszczenie krzewów w warstwie 3 Density bushes in layer 3	m <sub>3</sub>	szt./m <sup>2</sup>	12,9	19,7	64,3	36,4	66,0
Zagęszczenie krzewów w warstwie 4 Density bushes in layer 4	m <sub>4</sub>	szt./m <sup>2</sup>	–	12,9	13,8	–	14,7
Średnica gałęzi krzewów w warstwie 2 Diametre bushes in layer 2	D <sub>2</sub>	m	0,0032	0,002	0,0022	0,005	0,0019
Średnica gałęzi krzewów w warstwie 3 Diametre bushes in layer 3	D <sub>3</sub>	m	0,0094	0,0085	0,0033	0,0094	0,0032
Średnica gałęzi krzewów w warstwie 4 Diametre bushes in layer 4	D <sub>4</sub>	m	–	0,0094	0,0100	–	0,0094
Odległość gałęzi krzewów w kierunku przepływu w warstwie 2 Distance between bushes in flow direction in layer 2	a <sub>x2</sub>	m	0,113	0,074	0,083	0,112	0,074
Odległość gałęzi krzewów w kierunku przepływu w warstwie 3 Distance between bushes in flow direction in layer 3	a <sub>x3</sub>	m	0,278	0,224	0,125	0,166	0,123
Odległość gałęzi krzewów w kierunku przepływu w warstwie 4 Distance between bushes in flow direction in layer 4	a <sub>x4</sub>	m	–	0,279	0,269	–	0,261

Pomiary rozkładów prędkości wykonano w pięciu pionach, usytuowanych wewnątrz dużego zbiorowiska roślinności krzewiastej i trzcinowo-turzycowej. Zbiorowisko o wymiarach od 240 m do 360 m w kierunku poprzecznym i 508 m w kierunku podłużnym występuje na lewobrzeżnych terenach zalewowych rzeki Warty, między wałem lewobrzeżnym i korytem rzeki, w odległości około 3 km powyżej zbiornika Jeziorsko. Początek zbiorowiska od strony wody górnej występuje w km 505+720 biegu rzeki i kończy się w km 505+000. Przekrój hydrometryczny, mierzony od lewobrzeżnego wału przeciwpowodziowego w głąb terenów zalewowych, był zlokalizowany w km 505+570. W dniu pomiarów (5 kwietnia 2006 r.), przy przepływie wiosennej fali wezbrania

o natężeniu  $Q = 185 \text{ m}^3/\text{s}$ , głębokość wody w pionach pomiarowych I-IV wynosiła 1,75 m, a w pionie V – 1,35 m. Wysokość krzewów wynosiła 3-5 m, a wysokość trzciny 0,85-1 m. Pomiary prędkości wykonano młynkiem hydrometrycznym OTT z wirnikiem o średnicy 100 mm. W czasie wykonywania pomiarów prędkości zmierzono też układ zwierciadła wody wzdłuż lewobrzeżnego wału przeciwpowodziowego, na odcinku od km 503+660 do km 511+400. Pomiary układu zwierciadła wody wykonano odbiornikiem GPS RTK firmy TopCon. Spadek podłużny zwierciadła wody mierzony na długości zbiorowiska przylegającego do skarpy odwodnej wału wynosił  $I = 1,36\%$ . Po przejściu wezbrania, w dniu 20.04.2006 r., wykonano pomiary struktury roślinności bezpośrednio powyżej pionów hydrometrycznych, w których przeprowadzono punktowe pomiary prędkości w dniu 5.04.2006 r. Wykonano pomiary średnic i gęstości elementów roślinnych na trzech poziomach oraz pomiary wysokości występów szorstkości na dnie koryta (tab. 1). Odległość między pionem I i II wynosiła 1,0 m, a między pionem II i III – 3,0 m. Były one umiejscowione zgodnie z kierunkiem przepływu wody. Odległość między pionem IV i V równa była 2,0 m, a umiejscowione były poprzecznie do kierunku przepływu wody (rys. 2).

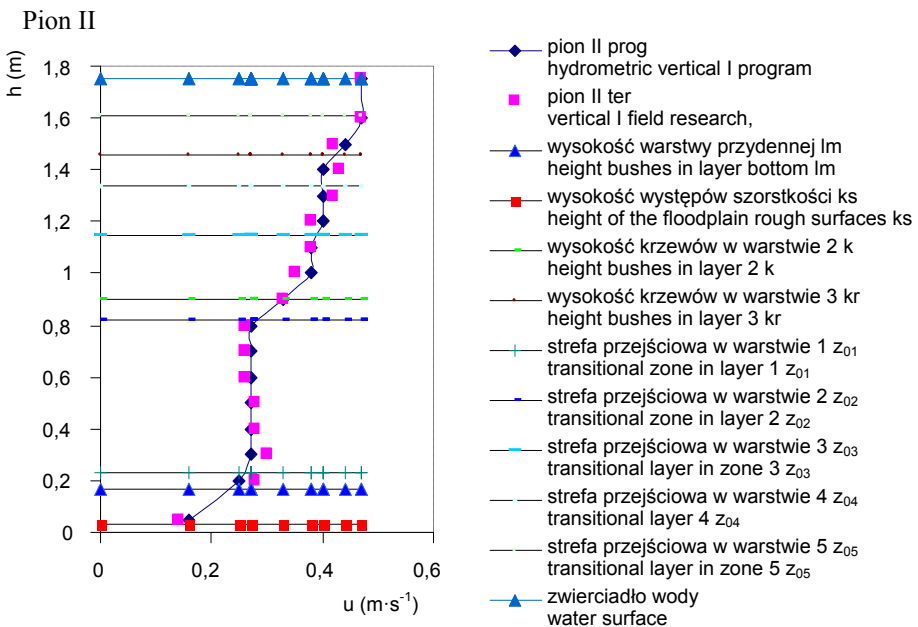
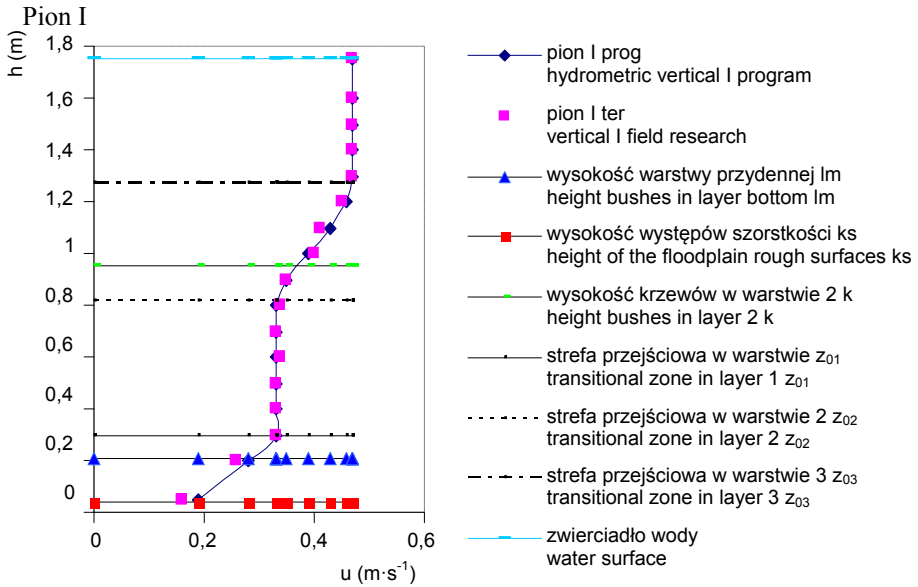


Rys. 2. Przekrój hydrometryczny (5.04.2006 r.) rzeki Warty w km 505+570 oraz widok z góry, z zaznaczonymi pionami hydrometrycznymi

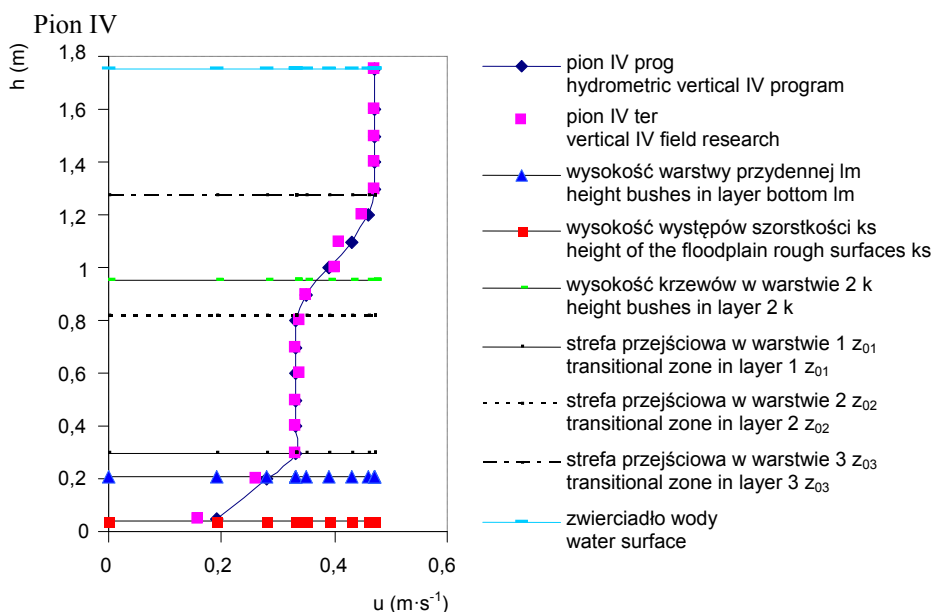
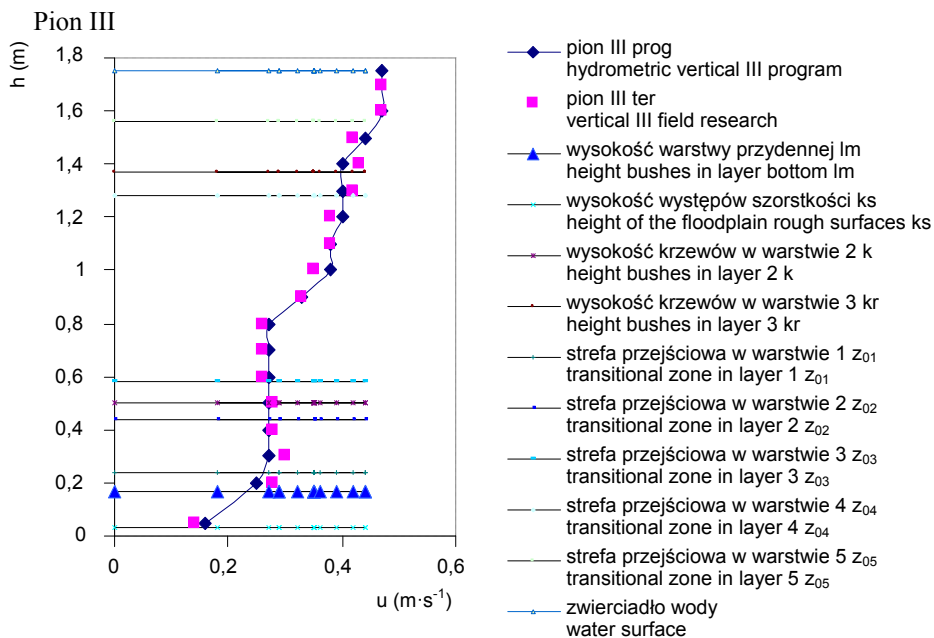
Fig. 2. Hydrometric cross-section (5 April 2006) of the Warta river at km 505+570 and the view from above with hydrometric verticals marked

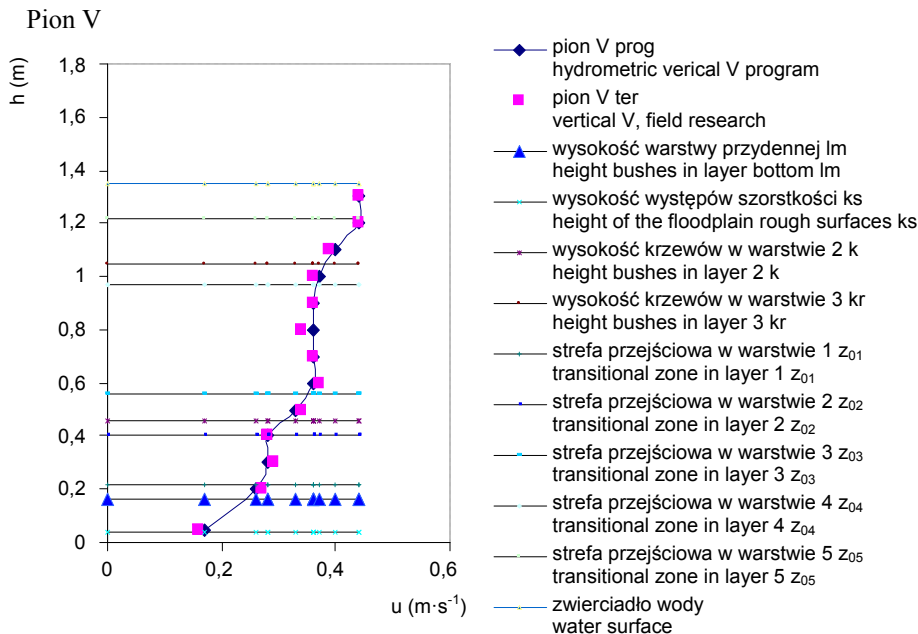
Bezpośrednie zastosowanie modelu analitycznego jest utrudnione ze względu na konieczność iteracyjnego poszukiwania rozwiązania. W związku z tym opracowano program komputerowy, oparty na analitycznym modelu rozkładu prędkości i szorstkości hydraulicznej przy przepływie wody przez sztywne elementy roślinne (WALCZAK 2009). Program komputerowy umożliwia graficzną prezentację danych uzyskanych

z obliczeń i danych pomiarów terenowych. Poniżej przedstawiono dla wszystkich pionów hydrometrycznych prędkości obliczone z modelu analitycznego (rys. 3). Dodatkowo zaznaczono na nim prędkości pomierzone w czasie wezbrania wiosennego z 5.04. 2006 r. oraz strefy przejściowe i wysokości roślinności w poszczególnych warstwach.









Rys. 3. Porównanie prędkości obliczonych z modelu analitycznego z prędkościami uzyskanymi z pomiarów terenowych dla wszystkich pionów

Fig. 3. Comparison of velocities calculated from the analytical model with the velocities obtained from field measurements for all hydrometric vertical

## Wnioski

1. W naturalnym zbiorowisku z roślinnością niejednorodną prędkości w każdej warstwie mają stałe wartości. Wartość charakterystycznej, stałej prędkości w warstwie dolnej, o większej gęstości struktury roślinnej, jest mniejsza od wartości tej prędkości w warstwie górnej, w której gęstość struktury roślinnej jest mniejsza. Między tymi warstwami występują strefy przejściowe, w których wartości gradientów prędkości są większe od zera.

2. Wysokości stref przejściowych między warstwami zależą od gęstości i średnicy elementów roślinnych w obu warstwach oraz od odległości między elementami roślinnymi w kierunku podłużnym i poprzecznym.

3. Rozkład prędkości w warstwie przydennej zależy od pionowej i poziomej wymiany pędu, wywołanej tarciem o powierzchnię dna i opływem elementów roślinnych. Wysokość warstwy przydennej jest zatem funkcją wysokości występów szorstkości, gęstości i średnicy elementów roślinnych oraz współczynnika oporów spowodowanego opływem tych elementów.

4. Bezpośrednio ponad warstwą przydenną występuje strefa przejściowa, w której następuje zanikanie pionowej wymiany pędu. Wysokość tej strefy jest funkcją wysokości strefy przydennej i stałej von Karmana.

## Literatura

- ARMANINI A., RIGHETTI M., GRISENTI P., 2005. Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale. *J. Hydraul. Res.* 43, 5: 481-487.
- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MAGNUSZEWSKI A., MIKULSKI Z., 1993. *Hydrometria*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- BLĄZEJEWSKI R., 1999. *Wstęp do badań empirycznych*. Wyd. AR, Poznań.
- KUBRAK J., NACHLIK E., 2003. *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*. Wyd. SGGW, Warszawa.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., 1994. *Hydrologia stosowana*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- PRZEDWOJSKI B., 2008. Model analityczny rozkładu prędkości i szorstkości hydraulicznej przy przepływach w korytach i dolinach rzecznych porośniętych roślinnością. W: *Analiza wpływu czynników morfodynamicznych i wegetacyjnych na kształtowanie warunków hydraulicznych w cofkowej części zbiorników wodnych*. Wyd. UP, Poznań.
- WALCZAK N., 2009. *Rozkład prędkości i opory ruchu przy przepływie wody w naturalnych korytach rzecznych*. Maszynopis. Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej UP, Poznań.
- ŻELAZO J., 1991. *Badania oporów przepływu w rzekach naturalnych*. W: *XI Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki. Materiały szkoły*. Red. W. Majewski. 39-46.

## WATER VELOCITY DISTRIBUTION ON THE FLOODPLAIN WITH VEGETATION COVER

**Summary.** The article presents a methodology of calculating water velocity distribution, in rivers and river valleys with vegetation. The analytical model of water flow through vegetation of different density in several layers is described. The calculated values of velocity from the analytical model were verified with the use of data obtained from field measurements. Considerable agreement of these results shows the potential possibility of wide use of the presented model in the engineering practice. In natural conditions of flood planes, different types of plants (grass, sedge, reed, bushes and trees) are grouped together along the river banks and floodplains. Existence of different types of plants, with different height, in the same place generates two or even tree layers of vegetation with different density of vegetative structure along the depth of the flow. Observations and field measurements on flood planes of the Warta river indicate the existence of multi-layer vegetative structure with flow over rough bottom. The height of bushes on the Warta river flood planes exceed the depth of flow even at large flood flows. Field observations indicate that branches of bushes do not fall into deformation and can be treated as rigid elements. The new analytical model for the vertical velocity profile and the hydraulic roughness at the flow due to rigid elements of vegetation is described in the following three cases: 1) at flow with non submerged, homogeneous vegetation over flow depth, 2) at flow with non submerged, heterogeneous vegetation with different plant density in two layers over flow depth, 3) at flow with submerged, homogeneous vegetation over flow depth. Vertical velocity profiles calculated with the model correspond very well with results from field measurements on the Warta river flood planes and from field experiments.

**Key words:** velocity, vegetation, hydrometric measurements

Walczak N., Przedwojski B., Walczak Z., 2011. Rozkład prędkości wody na terenach zalewowych porośniętych roślinnością. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 5, #98.

---

*Adres do korespondencji – Corresponding address:*

*Natalia Walczak, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94 A, 60-649 Poznań, Poland, e-mail: natwal@wp.pl*

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print:*

*13.06.2011*

*Do cytowania – For citation:*

*Walczak N., Przedwojski B., Walczak Z., 2011. Rozkład prędkości wody na terenach zalewowych porośniętych roślinnością. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 5, #98.*