

**Adam WÓJTOWICZ, Elżbieta KUBRAK, Marcin KRUKOWSKI**

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW w Warszawie  
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Restoration WULS – SGGW

## **Rozkłady prędkości przepływu wody w korytach z roślinnością wodną**

### **Distributions of water velocities in open-channels with aquatic vegetation**

**Słowa kluczowe:** pomiary prędkości, roślinność wodna, przepustowość koryt  
**Key words:** velocity measurements, aquatic vegetation, open-channel capacity

#### **Wprowadzenie**

Roślinność wodna w korytach otwartych istotnie wpływa na hydrauliczne warunki przepływu wody, zwiększając opory przepływu i straty energii strumienia wody oraz zmieniając logarytmiczny rozkład prędkości i jej kierunek (Dąbkowski i Pachuta 1996, Hydrauliczne podstawy... 2003, Kubrak 2007). Z punktu widzenia gospodarki wodnej zarastanie cieków jest zjawiskiem niepożądanym, ponieważ powoduje znaczne ograniczenie przepustowości koryt. Zgodnie z obecnymi wymogami stawianymi gospodarce wodnej, działaniem korzystnym dla zapewnienia poprawy jakości wód oraz stanu ekosystemów wodnych jest pozostawienie roślinności wodnej w korycie. Badania nad wpływem ro-

ślinności wodnej na przepływ wody w korytach rzek prowadzone są także w celu wyznaczenia metodyki obliczania przepustowości koryt z uwzględnieniem zarastania roślinnością wodną. Coraz częściej prowadzone są badania modelowe, w których badane są hydrauliczne charakterystyki przepływu wody, przy zastosowaniu elementów symulujących występującą w korycie roślinność (Kubrak 2007). W pracy przedstawiono wyniki badań rozkładów prędkości w korycie z moczarką kanadyjską (*Elodea canadensis*), odwzorowaną plastikowymi, elastycznymi roślinami (rys. 1).

#### **Metodyka badań**

Badania rozkładów prędkości przepływu wody w korycie z roślinnością wodną wykonano w Laboratorium Hydraulicznym Katedry Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w uchylnym,

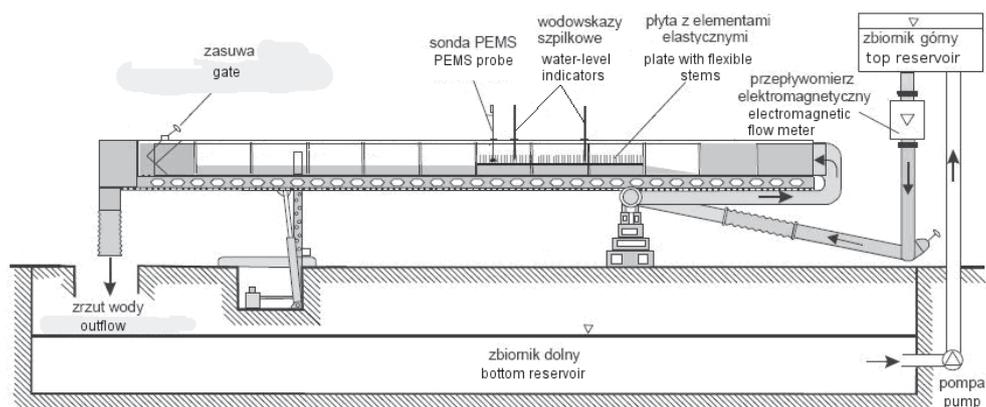


RYSUNEK 1. Moczarka kanadyjska (*Elodea canadensis*)  
FIGURE 1. Plant of *Elodea canadensis*

prostoliniowym korycie długości 16 m, szerokości 0,58 m oraz wysokości 0,60 m (rys. 2). Roślinność wodną w korycie stanowiły rośliny wykonane z elastycznego PCV, wysokości 0,11 m, geometrycznie odwzorowujące rośliny moczarki kanadyjskiej (rys. 3), które zamocowano do dna koryta w równych odstępach, w węzłach naniesionej kwadratowej siatki. Pomiaru poziomych składowych prędkości wykonywane były za pomocą elektrosondy PEMS z czujnikiem

w kształcie elipsoidy o wymiarach  $0,011 \times 0,033$  m, zainstalowaną na wózku, połączoną z komputerowym rejestratorem danych. Prędkości mierzono w trzech pionach hydrometrycznych umieszczonych w osi koryta oraz symetrycznie po obu stronach, w odległości 0,045 m od osi (rys. 4).

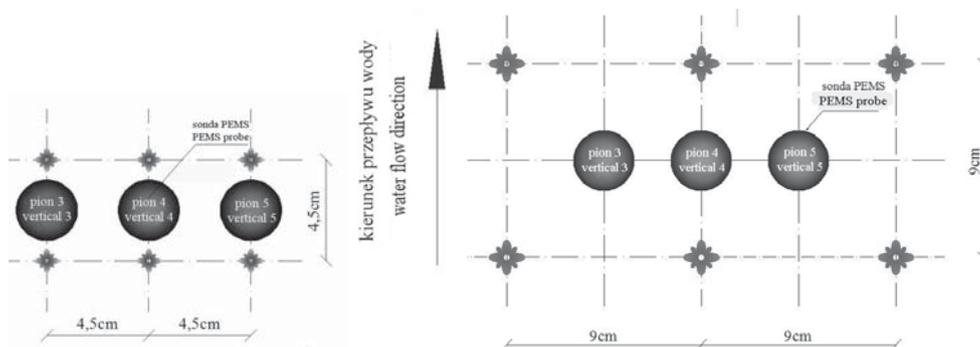
W każdym z pionów hydrometrycznych prędkości rejestrowano w punktach położonych od wysokości 0,0024 m nad dnem aż do wysokości położonej oko-



RYSUNEK 2. Schemat koryta laboratoryjnego (Kubrak 2007)  
FIGURE 2. The layout of the experimental flume (Kubrak 2007)



RYSUNEK 3. Roślinność wodna zastosowana w badaniach (fot. M. Krukowski)  
 FIGURE 3. Aquatic plants used in laboratory flume experiment (fot. M. Krukowski)



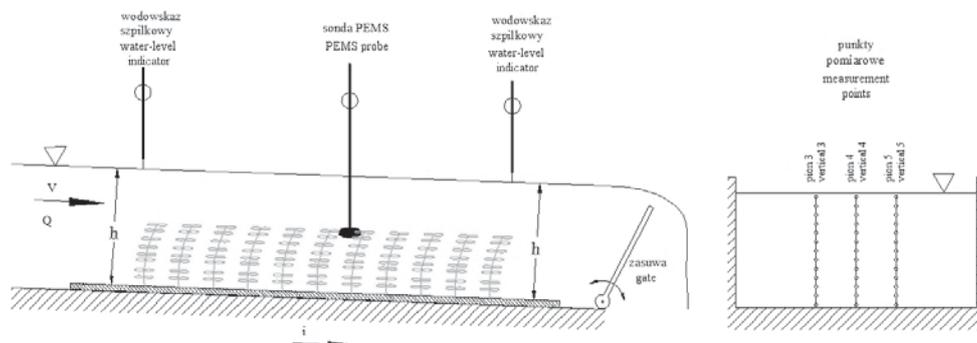
RYSUNEK 4. Położenie elektrosondy PEMS w planie koryta  
 FIGURE General view of the PEMS probe position

ło 0,005 m poniżej zwierciadła wody – co 0,01 m. Wartości dwóch poziomych składowych prędkości przepływu w punktach pomiarowych rejestrowano co 0,1 s, przez 20 s, w każdym punkcie pomiarowym. Pomiar prędkości przepływu wykonywano w warunkach ruchu ustalonego jednostajnego, w którym głębokości i natężenie przepływu wody są niezmiennie w czasie i na długości koryta. Sprawdzenia równoległego względem dna położenia zwierciadła wody dokonywano za pomocą dwóch wodowskazów szpilkowych z dokładnością 0,0001 m (rys. 5).

## Wyniki badań i ich analiza

Pomiary prędkości przepływu w korycie z udziałem roślinności wodnej przeprowadzono przy zmiennych głębokościach przepływu w trzech wariantach (Wójtowicz 2009):

- wariant 1.1 – rośliny moczarki kanadyjskiej rozmieszczone na dnie koryta w węzłach kwadratowej siatki o wymiarach  $0,045 \times 0,045$  m, przy spadku dna koryta  $i = 0,0087$ ,
- wariant 1.2 – rośliny moczarki kanadyjskiej rozmieszczone na dnie koryta, podobnie jak w wariacie



RYSUNEK 5. Schemat stanowiska badawczego  
 FIGURE 5. Sheme of the laboratory setup

1.1, lecz przy spadku dna koryta  $i = 0,0174$ ,

- wariant 2.1 – rośliny moczarki kanadyjskiej rozmieszczone na dnie koryta w węzłach kwadratowej siatki o wymiarach  $0,090 \times 0,090$  m, przy spadku dna koryta  $i = 0,0087$ .

Zestawienie doświadczeń przeprowadzonych w poszczególnych wariantach zamieszczono w tabeli 1. W wariantach 1.1 i 1.2 umieszczono na dnie prostokątnego koryta łącznie 884 roślin moczarki kanadyjskiej (507 elementów na  $1 \text{ m}^2$ ), a w wariantcie 2.1 – 238 roślin (140 elementów na  $1 \text{ m}^2$ ).

Dla pomierzonych za pomocą elektrosondy PEMS chwilowych wartości składowych prędkości przepływu wody obliczono średnie wartości prędkości w każdym punkcie pomiarowym. Na ich podstawie sporządzono rozkłady prędkości przepływu wody w funkcji głębokości w każdym z pionów hydrometrycznych pokazane na rysunkach 6, 7 i 8. Sporządzono także krzywe przepustowości koryta dla każdego z wariantów badań (rys. 9).

Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że w wariantcie 1.1 badań rozkład prędkości na głębokości prze-

pływu w korycie z moczarką kanadyjską posiada wyraźny podział na strefę stałych wartości prędkości w obszarze zajmowanym przez roślinność oraz strefę prędkości ponad roślinnością (rys. 6). Obszar stałych prędkości sięga do głębokości  $H = 0,05$  m w pionach 3 i 5 (rys. 6a) oraz  $H = 0,06$  m w pionie 4 (rys. 6b). W obszarze tym prędkość przepływu wody jest zbliżona do wartości  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nad obszarem z roślinnością występuje rozkład prędkości zbliżony do logarymicznego. Największe prędkości wody występują przy maksymalnych napełnieniach w korycie ( $H \approx 0,15$  m) i sięgają wartości  $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jak wynika z rysunku 6, rozkłady prędkości na głębokości w pionach 3, 4 i 5 są bardzo zbliżone do siebie.

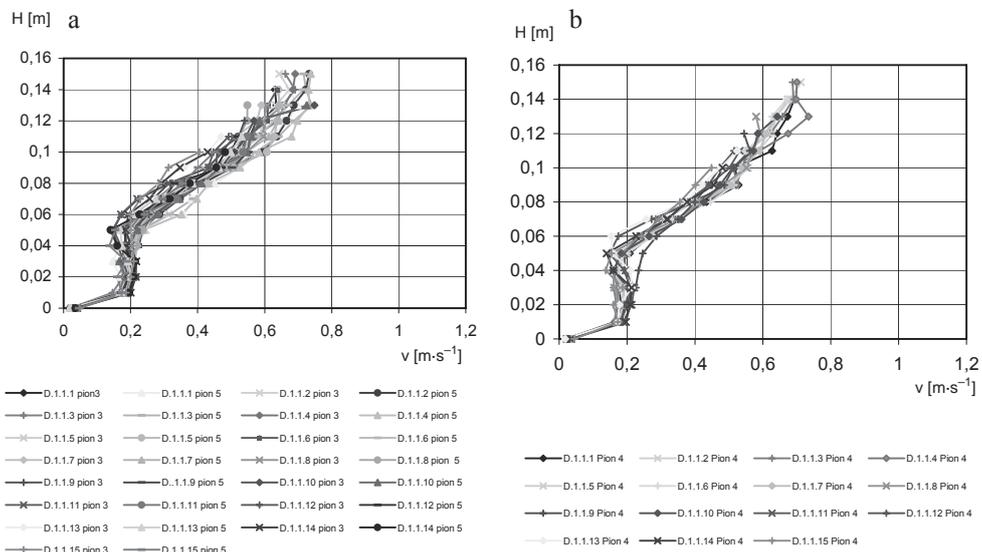
Wzrost podłużnego spadku dna koryta od wartości 0,0087 (wariant 1.1) do wartości 0,0174 (wariant 1.2) spowodował wyraźny wzrost prędkości przepływu wody w każdej z wyróżnionych stref (rys. 7). Istotnie różnią się rozkłady prędkości w pionach 3 i 5 względem pionu 4, co wynika z położenia pionów hydrometrycznych względem roślin. Obszar zbliżonych do stałych prędkości w pionach 3 i 5 sięga głębokości  $H = 0,05$  m

TABELA 1. Zbiornice zestawienie przeprowadzonych doświadczeń  
 TABLE 1. Summary setting – up of the experiments

Lp. No	Wariant Case	Doświadczenie Experiment	Natężenie przepływu Discharge $Q$ [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	Temperatura wody Water tem $t$ [°C]	Głębokość wody Water depth $H$ [m]	Spadek dna koryta Bottom slope $i$ [-]	Rozmieszczenie elementów Stems spacing [m]	Zagęszczenie roślin Plants density [el. $\cdot m^{-2}$ ]	Bezwzględna chropowatość dna koryta Absolute roughness of the bottom $k_s$ [m]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.1	D.1.1.1	0,0365	20,4	0,1514	0,0087	0,045	507	0,0001
2		D.1.1.2	0,0385	20,4	0,1557				
3		D.1.1.3	0,0405	20,4	0,1604				
4		D.1.1.4	0,0425	20,1	0,1618				
5		D.1.1.5	0,033	20,3	0,1481				
6		D.1.1.6	0,031	20,4	0,1432				
7		D.1.1.7	0,0294	19,8	0,1400				
8		D.1.1.8	0,0274	20,0	0,1371				
9		D.1.1.9	0,0234	20,2	0,1291				
10		D.1.1.10	0,0254	20,2	0,1330				
11		D.1.1.11	0,021	20,1	0,1207				
12		D.1.1.12	0,0191	20,1	0,1198				
13		D.1.1.13	0,0171	20,1	0,1146				
14		D.1.1.14	0,0152	20,2	0,1080				
15		D.1.1.15	0,0132	20,2	0,1053				

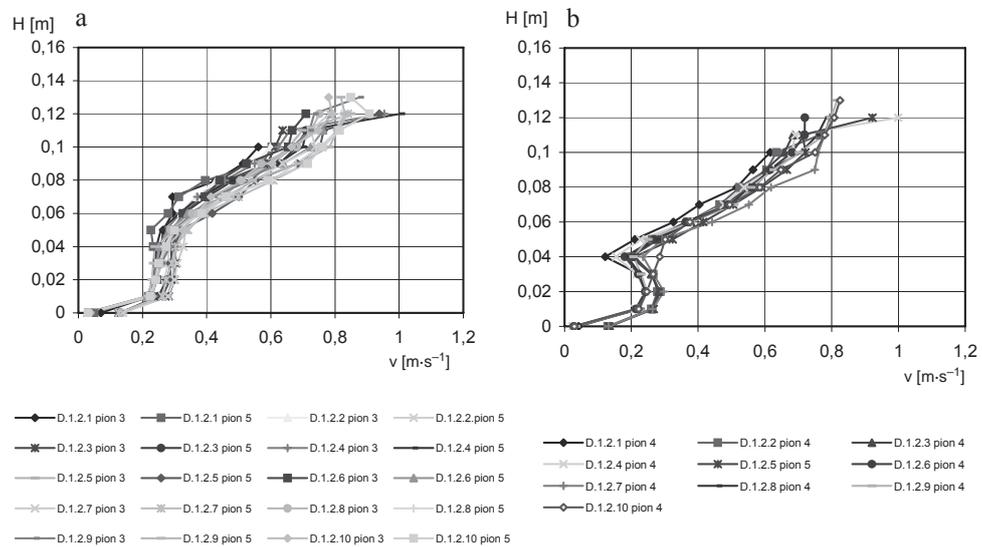
cd. tabeli 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	1.2	D.1.2.1	0,0202	19,7	0,1093	0,0174	0,045	507	0,0001
17		D.1.2.2	0,0221	20,1	0,1131				
18		D.1.2.3	0,0241	20,1	0,1166				
19		D.1.2.4	0,0262	19,7	0,1198				
20		D.1.2.5	0,0281	20,2	0,1224				
21		D.1.2.6	0,0303	19,8	0,1256				
22		D.1.2.7	0,032	20,1	0,1281				
23		D.1.2.8	0,0342	19,9	0,1301				
24		D.1.2.9	0,0362	19,9	0,1331				
25		D.1.2.10	0,0383	20,0	0,1355				
26	2.1	D.2.1.1	0,0204	19,3	0,0860	0,0087	0,090	140	0,0001
27		D.2.1.2	0,022	19,5	0,0900				
28		D.2.1.3	0,0241	19,5	0,0938				
29		D.2.1.4	0,0263	19,0	0,0967				
30		D.2.1.5	0,0284	19,3	0,0987				
31		D.2.1.6	0,0305	19,3	0,1019				
32		D.2.1.7	0,0324	19,4	0,1040				
33		D.2.1.8	0,0344	19,4	0,1070				
34		D.2.1.9	0,0365	19,4	0,1100				
35		D.2.1.10	0,0385	19,4	0,1139				
36	D.2.1.11	0,0405	19,5	0,1165					



RYSUNEK 6. Pomierzone wartości prędkości dla doświadczeń z wariantu 1.1: a – w pionach 3 i 5, b – w pionie 4

FIGURE 6. Measured velocity profiles for flume experiments in case 1.1: a – vertical 3 and 5, b – vertical 4



RYSUNEK 7. Pomierzone wartości prędkości dla doświadczeń z wariantu 1.2: a – w pionach 3 i 5, b – w pionie 4

FIGURE 7. Measured velocity profiles for flume experiments in case 1.2: a – vertical 3 and 5, b – vertical 4

(rys. 7a). W pionie 4 nie występuje obszar stałej prędkości w strefie zajmowanej przez roślinność. Prędkości w tym obszarze sięgają  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nad roślinnością następuje wzrost prędkości przepływu nawet do wartości  $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , przy głębokości  $H \approx 0,12 \text{ m}$ . Bardzo charakterystyczny rozkład prędkości występuje w obszarze z roślinnością w pionie 4 (rys. 7b). Nie występuje tu obszar stałej prędkości, a prędkości początkowo rosną, po czym maleją przy zbliżaniu się do głębokości  $H = 0,04 \text{ m}$ . Rozkłady prędkości w pionach 3 i 5 są bardzo zbliżone do siebie.

Zmniejszenie liczby roślin moczar-ki na dnie koryta w wariantcie 2.1 o 646 elementów spowodowało zwiększenie prędkości przepływu wody zarówno w strefie z roślinami, jak i ponad nimi (rys. 8). Jednocześnie zniknął podział obszaru prędkości na strefę ze stałą prędkością w obszarze z roślinnością i ponad nią. Wzrost prędkości przepływu spowodował większe ugięcie roślinności i zmniejszenie wysokości obszaru z roślinnością. Występuje natomiast zbliżony do liniowego stały wzrost prędkości przepływu wody wraz z głębokością. Wzrost głębokości przepływu w korycie powoduje wzrost prędkości przepływu wody w każdym punkcie obszaru. Rozkłady prędkości zarówno w pionach 3, 5, jak i 4 kształtują się podobnie, co ilustruje rysunek 8.

Na rysunku 9 pokazano wpływ zmiany spadku podłużnego dna koryta oraz gęstości roślin moczar-ki kanadyjskiej na przepustowość koryta. Jak wynika z rysunku, zwiększenie spadku podłużnego koryta od wartości 0,0087 (wariant 1.1) do wartości 0,0174 (wariant 1.2) przy stałym zagęszczeniu roślin równym

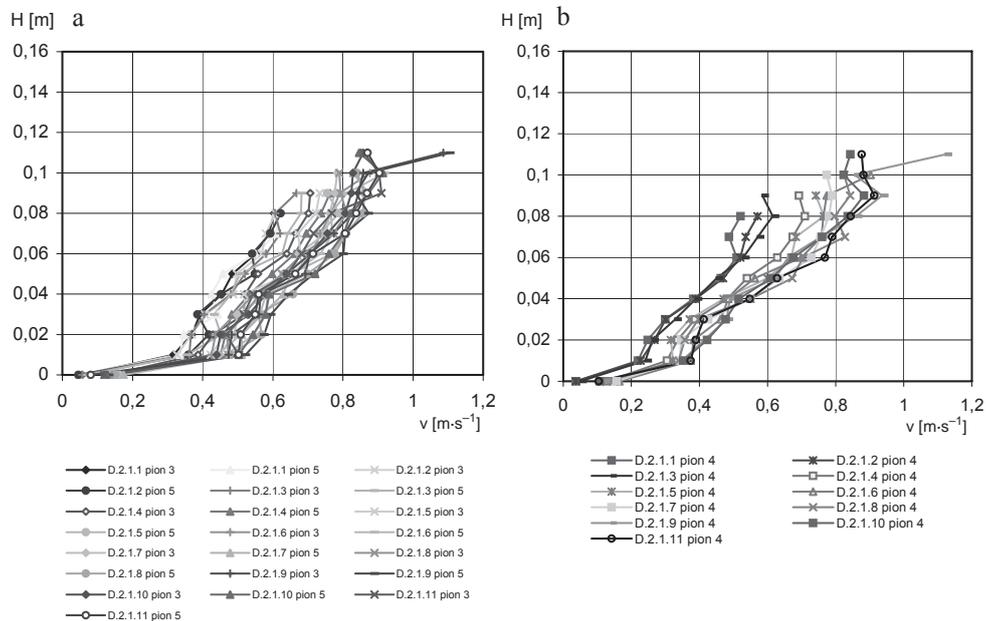
$507 \text{ el}\cdot\text{m}^{-2}$  spowodowało stosunkowo niewielkie zwiększenie przepustowości koryta. Różnice natężeń przepływu w doświadczeniach z obu wariantów rosną wraz ze wzrostem głębokości (rys. 9). Przykładowo, przy napełnieniu równym 0,113 m i spadku podłużnym koryta wynoszącym 0,0087 w korycie występuje przepływ o wartości  $0,0171 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , natomiast zwiększenie spadku do wartości 0,0174 spowoduje wystąpienie przepływu równego  $0,0210 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (wzrost o 2%).

Znaczny wzrost przepustowości koryta w wariantcie 2.1 w stosunku do wariantu 1.1 wywołało zmniejszenie zagęszczenia roślin z  $507 \text{ el}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $140 \text{ el}\cdot\text{m}^{-2}$  (rys. 9). Przykładowo, przy napełnieniu równym 0,113 m oraz zagęszczeniu roślinności równym  $507 \text{ el}\cdot\text{m}^{-2}$  w korycie występuje przepływ o wartości  $0,0171 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , natomiast zmniejszenie zagęszczenia roślin do liczby  $140 \text{ el}\cdot\text{m}^{-2}$  spowoduje przy danym napełnieniu koryta wystąpienie przepływu o wartości  $0,0405 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (wzrost o 137%).

## Podsumowanie

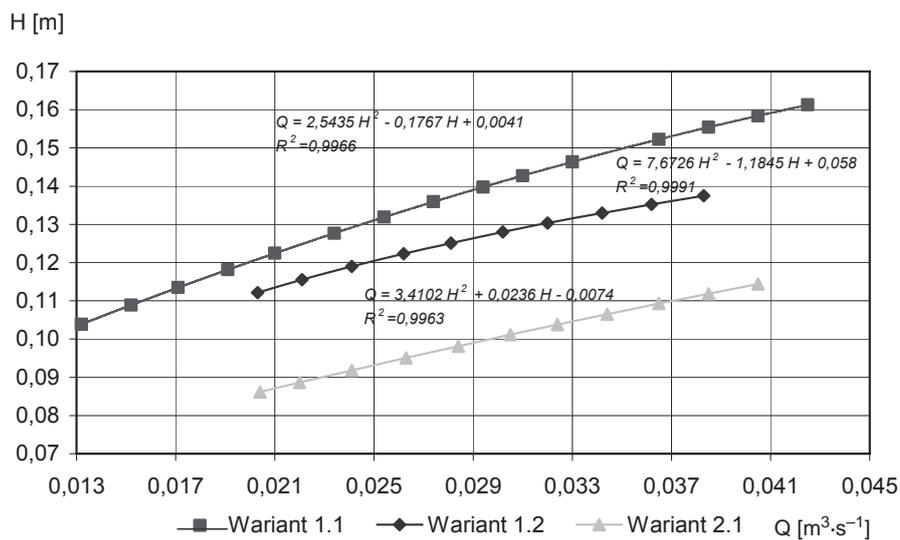
Roślinność wodna w korycie wyraźnie oddziałuje na rozkłady prędkości przepływu wody i wpływ ten rośnie wraz ze wzrostem gęstości roślin i stopniem przysłonięcia przekroju przez roślinność. Analiza pomierzonych rozkładów prędkości przy różnym zagęszczeniu roślin, spadku podłużnym dna oraz napełnieniach pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Pomierzone rozkłady prędkości przy zagęszczeniu roślinności  $507 \text{ el}\cdot\text{m}^{-2}$  charakteryzowały się występowaniem strefy stałych wartości



RYSUNEK 8. Pomierzone wartości prędkości dla doświadczeń z wariantu 2.1: a – w pionach 3 i 5, b – w pionie 4

FIGURE 8. Measured velocity profiles for flume experiments in case 2.1: a – vertical 3 and 5, b – vertical 4



RYSUNEK 9. Krzywe natężenia przepływu dla doświadczeń z wariantów 1.1, 1.2 oraz 2.1

FIGURE 9. Discharge curves in experiments in case 1.1, 1.2 and 2.1

- prędkości w obszarze z roślinnością oraz strefą rosnących prędkości wraz z głębokością ponad roślinnością.
2. Dwukrotne zwiększenie spadku podłużnego dna koryta spowodowało zwiększenie wartości prędkości zarówno w strefie z roślinnością, jak i w strefie ponad roślinami.
  3. Dwukrotne zmniejszenie ilości roślin moczarnej kanadyjskiej na dnie koryta wpłynęło istotnie na rozkład prędkości w obszarze z roślinami. Nie wystąpiła strefa stałych prędkości, ponadto prędkości rosły w przybliżeniu liniowo wraz z głębokością przepływu.
  4. Roślinność wodna przy większym zagęszczeniu powodowała zmniejszenie różnic prędkości przy różnych wartościach napełnienia koryta, w stosunku do koryta bez roślinności.
- Obecność roślin moczarnej kanadyjskiej w przekroju koryta wpływa ponadto na ograniczenie przepustowości koryta. Analizując zmiany przepustowości koryta w poszczególnych wariantach badań, stwierdzono, że:
- różnice natężeń przepływu w korycie z roślinnością i bez roślinności rosną wraz z głębokością przepływu wody,
  - zmniejszenie o 50% ilości roślin w przekroju koryta powoduje zwiększenie przepustowości większe niż wskutek dwukrotnego zwiększenia spadku hydraulicznego.

## Literatura

- DĄBKOWSKI Sz.L. PACHUTA K. 1996: Roślinność i hydraulika koryt zarośniętych. Biblioteczka Wiadomości IMUZ. Wydawnictwo IMUZ, Falenty.

Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych, 2003. Red. J. Kubrak, E. Nachlik. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

KUBRAK E. 2007: Rozkłady prędkości wody w korytach otwartych z elementami symulującymi roślinność. Rozprawa doktorska. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.

WÓJTOWICZ A. 2009: Rozkłady prędkości przepływu wody w korytach z roślinnością wodną. Praca magisterska. Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW, Warszawa.

## Summary

### **Distributions of water velocities in open-channels with aquatic vegetation.**

A laboratory flume experiment was carried out with use of the selected species of aquatic plants, namely elodea canadensis. The measurements were carried out taking into account the changing depths, slope and vegetation density and their influence on the velocity distributions and the channel flow capacity was analyzed.

#### **Authors' address:**

Adam Wójtowicz, Elżbieta Kubrak, Marcin Krukowski  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
Poland  
e-mail: adam\_wojtowicz@sggw.pl  
elzbieta\_kubrak@sggw.pl  
marcin\_krukowski@sggw.pl