

## Zbigniew POPEK

Katedra Budownictwa Wodnego SGGW

# Obliczanie zdolności przepustowej koryt wód wielkich

## Wprowadzenie

Doliny rzeczne są uznawane za obszary bardzo cenne pod względem gospodarczym i przyrodniczym. W przeszłości dążono do gospodarczego wykorzystania dolin, co było powodem działań mających na celu zmniejszenie zagrożenia powodziowego. Wraz z regulacją rzek i budową obwałowań czyszczono, wyrównywano i porządkowano tereny zalewowe – likwidowano nieregularności rzeźby terenu, starorzecza oraz zadrzewienia i zakrzewienia. Powodowało to duże zmiany ekologiczne i krajobrazowe dolin rzecznych i spotykało się ze sprzeciwem osób zajmujących się ochroną środowiska. Obecnie dąży się do zachowania koryta głównego i koryta wód wielkich w stanie naturalnym lub zbliżonym do naturalnego, co wymaga znajomości metod obliczania prędkości średnich i przepustowości koryta wód wielkich, uwzględniając naturalną różnorodność terenów zalewowych, a zwłaszcza wpływ zadrzewień i zakrzewień występujących w różnej formie czasowo-przestrzennej i gatunkowej.

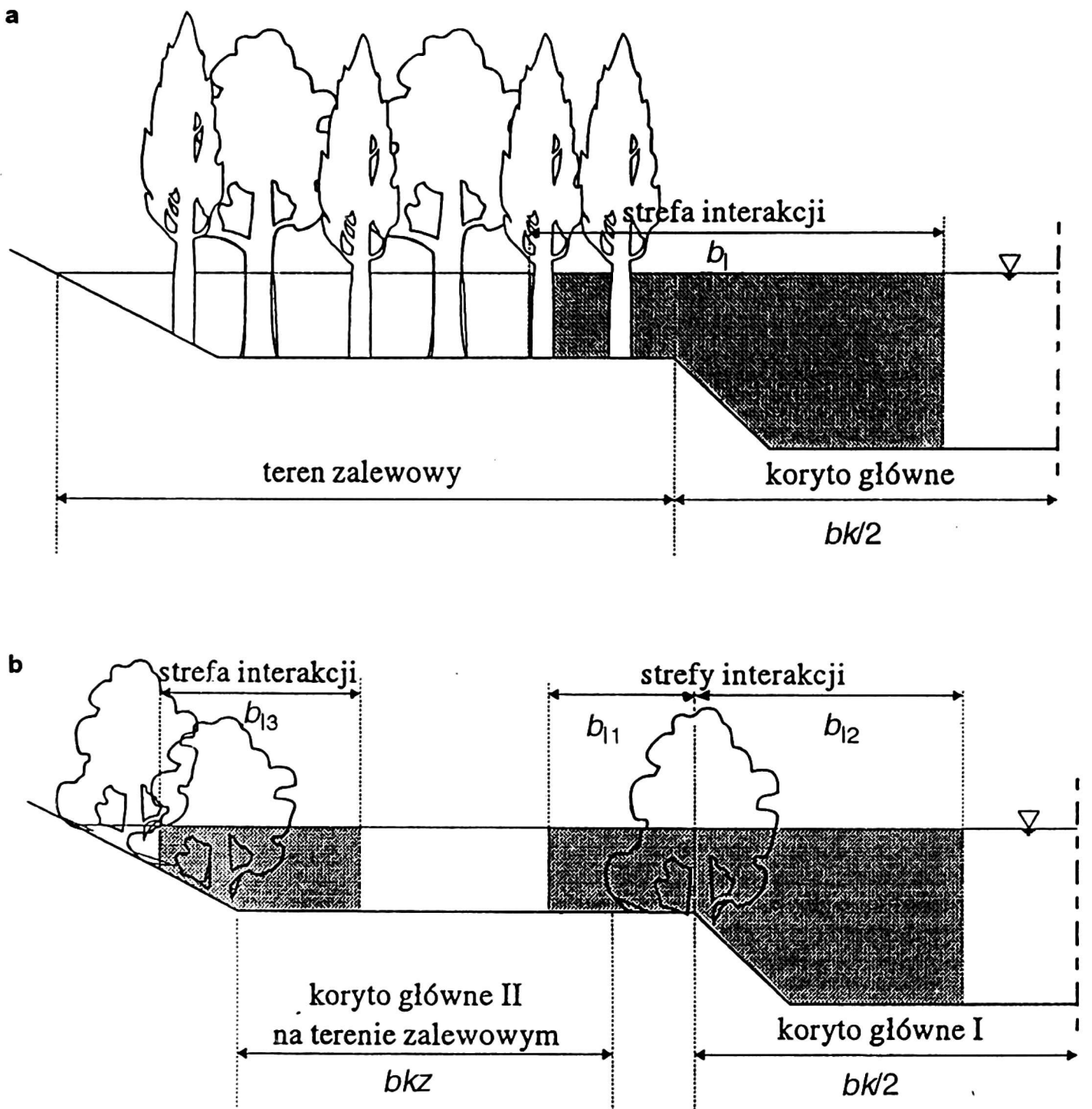
## Prędkość średnia w przekroju

Istnieje duża liczba wzorów do obliczania średniej prędkości przepływu w ruchu jednostajnym ustalonym w korytach o zwartych i nie zadrzewionych przekrojach poprzecznych. Najczęściej stosuje się dobrze znane wzory Chezy-Manninga, Stricklera i Darcy-Weisbacha.

Przekroje koryta wód wielkich większości rzek nizinnych są przekrojami dwudzielnymi, składającymi się z koryta głównego i terenów zalewowych, dla których wymienione wzory są w praktyce stosowane dla osobnych części przekroju (Kubrak i in. 1995). W przypadku występowania roślinności wysokiej (drzew i krzewów) przekrój dzieli się na części; liniami podziału są płaszczyzny rozdziału stref zarośniętych i wolnych od roślinności (rys. 1a i 1b). Niezależnie od podziału koryta wielkiej wody na części, istnieje także potrzeba uwzględnienia zróżnicowanej szorstkości w obrębie wydzielonych pól cząstkowych przez wprowadzenie zastępczych współczynników charakteryzujących opory ruchu (Żbikowski i in. 1992).

## Opory ruchu w korycie wód wielkich

Opory ruchu są kształtowane przez liczne czynniki, wśród których wyróżnia się roślinność stanowiącą w naturalnych dolinach rzecznych częsty czynnik dominujący. W praktyce projektowej najczęściej przyjmuje się dla terenów zalewowych wartości współczynników oporu z różnego rodzaju zestawień tabelarycznych. Wybór właściwych wartości współczynników zależy od tego, w jakim stopniu wybrany opis koryta w odpowiedniej pozycji tabeli odpowiada stanowi koryta w naturze. Taki sposób oceny oporów przepływu budzi zastrzeżenia z uwagi na jego dowolność i subiektywność wyboru. Dlatego też poszukuje się bardziej



RYSUNEK 1. Podział koryta dwudzielnego na części: a – teren zalewowy całkowicie zarośnięty, b – teren zalewowy częściowo zarośnięty

obiektywnych metod oceny oporów przepływu. Temple (1987) uzależnił zmiany wartości współczynnika szorstkości trawy od tzw. parametru przepływu (przepływu jednostkowego) będącego iloczynem średniej prędkości  $V$  (z uwzględnieniem wpływu roślinności) i promienia hydraulicznego  $R$  (w przekroju bez roślinności). Dobór współczynnika szorstkości następuje metodą prób. Dla przyjętej wstępnie wartości

$n$  obliczamy ze wzoru Manninga prędkość  $V$ , a następnie sprawdzamy, czy iloczyn  $VR$  odpowiada obranej uprzednio wartości  $n$ .

Równania Temple'a są następujące:

- dla  $VR > 3,3$   

$$n = \exp(0,126 C_I - 4,16) \quad (1)$$

- dla  $0,00023 C_I^{2,5} < VR < 3,3$   

$$n = \exp \{ C_I [0,0133 (\ln(VR))^2 - 0,0322 \ln(VR) + 0,145] - 4,16 \} \quad (2)$$

● dla  $VR < 0,00023 C_I$   
 $n = \exp\{C_I [0,0133 (\ln(0,00023 C_I^{2,5}))^2 - 0,0322 \ln(0,00023 C_I^{2,5}) + 0,145] - 4,16\}$  (3)

w których:

$$C_I = 2,5 (h \sqrt{D_r})^{1/3}$$

$h$  – reprezentatywna długość łodygi [m],  
 $D_r$  – średnia gęstość roślin – liczba sztuk na  $1 \text{ m}^2$  [ $1 \text{ m}^{-2}$ ].

Długość łodygi zależy od trawy i fazy jej wzrostu; są to w okresie wegetacyjnym zwykle wartości od 0,2 m do 1,0 m. Zarówno omawiane długości, jak i liczbę roślin na  $1 \text{ m}^2$  ustala się na podstawie wyników badań w terenie.

Równania (1)–(3) mogą być stosowane w korytach, w których szorstkość brzegów praktycznie nie wpływa na warunki przepływu. Taką sytuację mamy na szerokich odcinkach terenów zalewowych użytkowanych jako łąki lub pastwiska.

Obecnie w obliczeniach prędkości coraz częściej stosuje się równanie Darcy-Weibacha. W równaniu tym współczynnik oporu  $\lambda$  jest obliczany na podstawie uniwersalnego równania oporów przepływu Colebrook'a-White'a. Do obliczeń oporów ruchu w korytach naturalnych można stosować uproszczoną postać tego równania, ważną dla reżimu hydraulicznie szorstkiego, podaną przez Mertensa (1989):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,03 \log \left( \frac{12,27 R}{k_s} \right) \quad (4)$$

w którym  $k_s$  jest ekwiwalentną szorstkością bezwzględną wyrażoną w metrach.

W obszarach zarośniętych roślinnością wysoką całkowity współczynnik oporu  $\lambda$  jest równy sumie współczynników wyrażających opór podłoża (dna lub ściany)  $\lambda_o$  i roślinności  $\lambda_r$  ( $\lambda = \lambda_o + \lambda_r$ ). Według Paschego (1984) współczynnik oporu  $\lambda_r$  oblicza się ze wzoru:

$$\lambda_r = \frac{4 dp h}{a_x a_z} C_{wr} \quad (5)$$

gdzie:

$dp$  – przeciętna średnica pni drzew [m],  
 $C_{wr}$  – współczynnik oporu pni drzew przy opływie strug wody [–],  
 $h$  – głębokość wody w obszarze zarośniętym [m],  
 $a_x, a_z$  – średnie odległości pomiędzy drzewami odpowiednio w kierunku zgodnym i prostopadłym do kierunku przepływu.

Według Schrodera i Nudinga (Rouve 1987) współczynnik oporu roślinności  $\lambda_r$  może być obliczany ze wzoru:

$$\lambda_r = 4 C_{wr} \omega_r R_r \quad (6)$$

w którym  $R_r$  jest promieniem hydraulicznym w przekroju poprzecznym obszaru zarośniętego. Całkowity współczynnik oporu w obszarze zarośniętym autorzy zalecają obliczać ze wzoru:

$$\lambda = \frac{\lambda_o (1 - \varepsilon_r) + \lambda_r}{1 - \varepsilon_r} \quad (7)$$

w którym  $\varepsilon_r$  jest tzw. parametrem pokrycia roślinnego obliczanym ze wzoru:

$$\varepsilon_r = \frac{dp^2}{a_x a_z} \quad (8)$$

Autorzy wzoru (6) zalecają przyjmować stałą wartość współczynnika oporu  $C_{wr} = 1,4$ , natomiast parametry charakteryzujące obszar zarośnięty, jak  $dp, a_x, a_z$  – z pomiarów w terenie. Jeżeli nie dysponujemy odpowiednimi danymi, to parametry te można przyjmować według tabeli 1, w której zawarto dane z badań niemieckich (Rickert 1986; Rouve 1987). Ze względu na gęstość zarośnięcia obszary zakrzewione dzieli się na zwarte (np. wiklinowe) i porośnięte pojedynczymi krzewami. W tym

ostatnim przypadku jako średnicę charakterystyczną  $dp$  przyjmuje się średnią średnicę korony krzewu, a nie pojedynczych gałęzi.

Na płaszczyźnie rozdziału pomiędzy obszarem zarośniętym i wolnym od roślinności powstają zaburzenia prędkości przepływu, które mogą być wyrażone współczynnikiem oporu  $\lambda_p$ . Wartość tego współczynnika, zgodnie z równaniem (4), można wyznaczyć ze wzoru:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_p}} = 2,03 \log \left( \frac{12,27 R_p}{k_{sp}} \right) \quad (9)$$

gdzie:

$R_p$  – promień hydrauliczny odnoszący się do płaszczyzny rozdziału,

$k_{sp}$  – ekwiwalentna szorstkość bezwzględna na płaszczyźnie rozdziału.

Wartość promienia hydraulicznego  $R_p$  dobieramy iteracyjnie tak, aby w kolejnym kroku  $i = n$  obliczony promień  $R_p$  był równy założonemu w kroku  $i = n - 1$ ; promień hydrauliczny  $R_p$  obliczamy z zależności:

$$R_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} R_s \quad (10)$$

w której  $\lambda_s$  i  $R_s$  są odpowiednio wartościami współczynnika oporu i promienia hydraulicznego dla całej, wolnej od roślinności wysokiej części koryta głównego lub terenu zalewowego.

Wartość  $k_{sp}$  w równaniu (9) można wyznaczyć z następującej zależności (Pasche 1984):

$$k_{sp} = 0,854 R_p W_z \left( 1,7 \frac{b_I}{b_k/2} \right)^{1,07} \quad (11)$$

gdzie:

$W_z$  – współczynnik zarośnięcia [–],

$b_I$  – szerokość strefy interakcji [m],

$b_k$  – szerokość koryta głównego lub części wolnej od roślinności wysokiej na terenie zalewowym [m],

$k_{sp}, R_p$  – jak w równaniu (9).

Wartość współczynnika zarośnięcia  $W_z$  i szerokość strefy interakcji  $b_I$  są obliczane z równań, które ze względu na brak miejsca nie są podane; można je znaleźć w pracy Paschego (1984) lub w publikacjach Bajkowskiego i in. (1994) oraz Kubraka (1995).

Współczynnik oporu na płaszczyźnie rozdziału według Schrodera i Nudinga (Rouvé 1987) jest równy:

$$\lambda_p = \lambda_{op} + \lambda_I \quad (12)$$

gdzie:

$\lambda_{op} = 0,06 - 0,10$  – stała wartość współczynnika oporu,

$\lambda_I$  – dodatkowy współczynnik oporu wywołany interakcją;

maksymalna wartość tego współczynnika jest równa:

$$\lambda_{I,max} = 0,18 \log \left( 0,0135 \frac{V_{ok}^2}{V_r^2 h_p} \right) \quad (13)$$

w którym  $V_{ok}$  jest prędkością średnią w korycie głównym, bez uwzględniania wpływu płaszczyzny (lub płaszczyzn) rozdziału na warunki przepływu.

W obliczeniach przyjmuje się  $\lambda_I = \lambda_{I,max}$  wtedy gdy szerokość strefy zarastania  $b_r$  jest większa od maksymalnej szerokości strefy interakcji  $b_I$  obliczanej ze wzoru:

$$b_{I,max} = 17,5 \frac{V_r^2 \lambda_{I,max}}{g J} \quad (14)$$

Jeżeli  $b_r < b_{I,max}$  wtedy

$$\lambda_I = a_I \lambda_{I,max} \quad (15)$$

gdzie:

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m \cdot s^{-2}$ ],

$J$  – spadek hydrauliczny [–],

$\alpha_I$  – współczynnik obliczany ze wzoru:

$$\alpha_I = 1 - \left( 1 - \frac{b_r}{b_{I,\max}} \right)^{2,5} \quad (16)$$

Nuding w swojej późniejszej pracy (Nunding 1991) podaje prostszy wzór do obliczania współczynnika oporu w płaszczyźnie rozdziału:

$$\lambda_p = 4 \left( \log \frac{V_{ok}}{V_r} \right)^2 \frac{R_r b_I}{h_p b_{wz}} \quad (17)$$

w którym  $b_{wz}$  jest względną szerokością strefy zarastania roślinności wysokiej, zdefiniowana jako stosunek powierzchni obszaru zarośniętego  $A_z$  do głębokości w płaszczyźnie rozdziału  $h_p$ . Po podstawieniu w mianowniku ostatniego członu wzoru (17) otrzymamy:  $h_p \cdot A_z / h_p = A_z$ .

### Przykład obliczania przepustowości

**Charakterystyka odcinka badawczego.** Do badań terenowych wybrano odcinek rzeki Głuskówki – dopływu rzeki Jeziorki, położony około 20 km na południe od Warszawy. Odcinek badawczy ma długość 1,4 km, powierzchnia zlewni wynosi: na początku odcinka  $A = 35,4 \text{ km}^2$ , na końcu  $A = 33,1 \text{ km}^2$ ; przyrost powierzchni zlewni wynosi więc  $2,3 \text{ km}^2$  to jest 6,9%. Wybrany odcinek rzeki położony jest w stosunkowo wąskiej dolinie szerokości 50–100 m, w której znajdują się zbiorowiska łąkowe (30%), szuwarowe (10%) oraz leśne i zaroślowe (60%).

Zbiorowiska leśne i zaroślowe zajmujące siedliska powyżej średnich stanów wody, na mokrych glebach torfowych, gdzie-niegdzie wkraczają w podtopione partie doliny lub wchodzą bezpośrednio w koryto rzeczne. Wśród nich największą powierzchnię zajmują lasy i zarośla wierzbowo-olszowe. Przeważają drzewa 10–25-letnie wraz z podrostem olszowym. Spotyka się

też pojedyncze okazy 30–40-letnie i starsze. Występują tu często olchy o formach krzewiastych, które wraz z olchami o pokroju drzewiastym tworzą mozaikowy układ przestrzenny. W układzie tym, pomiędzy grupami drzew (krzewów), tworzonymi przez skupienie 3–5 okazów, odległymi od siebie o 10–20 m, występują samotne starsze drzewa. Razem z pozostałymi gatunkami drzew i towarzyszącym podrostem: brzozy omszonej, wierzby uszatej, kruchej i pięciopęcikowej, olcha tworzy trwałe zbiorowiska naturalne lasu o charakterze bagiennym. W dnie lasu spotyka się najczęściej mniej lub bardziej zwarte łąny pokrzywy zwyczajnej, pokrywające na ogół powierzchnię w zbiorowiskach wysokich bylin ciągnących się wzdłuż brzegów oraz od lustra wody do 15–20 m w przekrojach poprzecznych koryta. Zagęszczenie pędów pokrzywy wraz z gatunkami towarzyszącymi waha się od 500 do 1500 sztuk na  $\text{m}^2$ . Razem z olchą pokrzywa jest zdecydowanie najczęściej występującym gatunkiem powyżej strefy średnich stanów wody do górnej granicy stanów wysokich.

Na badanym obszarze spotyka się rozrzucone nieregularnie naturalne zbiorowiska ziół i pnączy. Występują tu: kielisznik, kaniańka, a także przymiotno. Kaniańka opanowała przeważającą część powierzchni porośniętych pokrzywą. Jej splecione, silne, sznurowate pędy tworzą wraz z łodygami pokrzyw zwarte i sprężyste płyty o dużych oporach przepływu.

Wśród zbiorowisk szuwarowych przeważa szuwar właściwy, budowany przede wszystkim przez trzcinę z domieszką szczyawiu, marka, kosaćca i pałki wąskolistnej. Zagęszczenie źdźbeł waha się tu od ok. 5000 do 14 000 sztuk na  $\text{m}^2$ . Miejscami występują niewielkie powierzchnie mozgi trzcinowatej i wysokich turzyc brzegowych.

Zbiorowiska łąkowe ciągnące się za zaroślami olszowymi w lewostronnej części doliny, miejscami podchodzące do rzeki, położone są zazwyczaj powyżej średnich

stanów wody, choć niektóre z nich zajmują stanowiska stałe, nadmiernie wilgotne. Występują tu w miejscach wyższych: wiechlina łąkowa, wiechlina zwyczajna, kłosówka wełnista, kostrzewa łąkowa i kupkówka pospolita, a z dwuliściennych reprezentowane są rodziny motylkowatych i baldaszkowatych. W obniżeniach doliny stale wilgotnych występują: wiechlina błotna, ostrożeń warzywny, wiązówka błotna oraz niezapominajka błotna. Na stanowiskach z wysiękami wody występują ponadto sit rozpięchły i sitowie leśne. Zagęszczenie źdźbeł traw i pędów dwuliściennych jest dość zróżnicowane i w kompleksie zbiorowisk łąkowych wynosi od 3000 do 10 000 sztuk na  $m^2$ .

Koryto główne rzeki o głębokości 0,6–1,0 m, szerokości 3–5 m i spadkach 1,5–2,0‰ jest zwarte, miejscami o dużym stopniu zakrzywienia trasy. Kształt przekrojów poprzecznych jest zbliżony do trapezowego, często o stromych skarpach utrzymujących się dzięki systemowi korzeniowemu drzew i krzewów. Odległość od zwierciadła wód średnich do poziomu terenów zalewowych wynosi 0,3–0,5 m.

Dla badań wykonano mapę w skali 1:1000 odcinka doliny Głuskówki, na której naniesiono zwarte obszary leśne i zaroślowe, szuwarowe oraz pojedyncze drzewa i krzewy występujące w pobliżu koryta głównego. Na rysunku 2 pokazany jest fragment mapy doliny Głuskówki. Ponadto wykonano niwelację przekrojów dolinowych (co 50–150 m) i pięciokrotne pomiary hydrometryczne z niwelacją zwierciadła wody przy różnych jej stanach. W przekrojach dolinowych wykonano dodatkowe pomiary niezbędne do oceny oporów ruchu wywołanych roślinnością. Badania te obejmowały: ocenę gęstości i wysokości traw w zbiorowiskach łąkowych oraz innych roślin w podszyciu leśno-zaroślowym i szuwarowym; określenie przeciętnej rozstawy drzew, krzewów, trzcin i pokrzyw; ocenę średnic przeciętnych pni drzew (łodyg trzciny lub pokrzywy) lub korony krzewów.

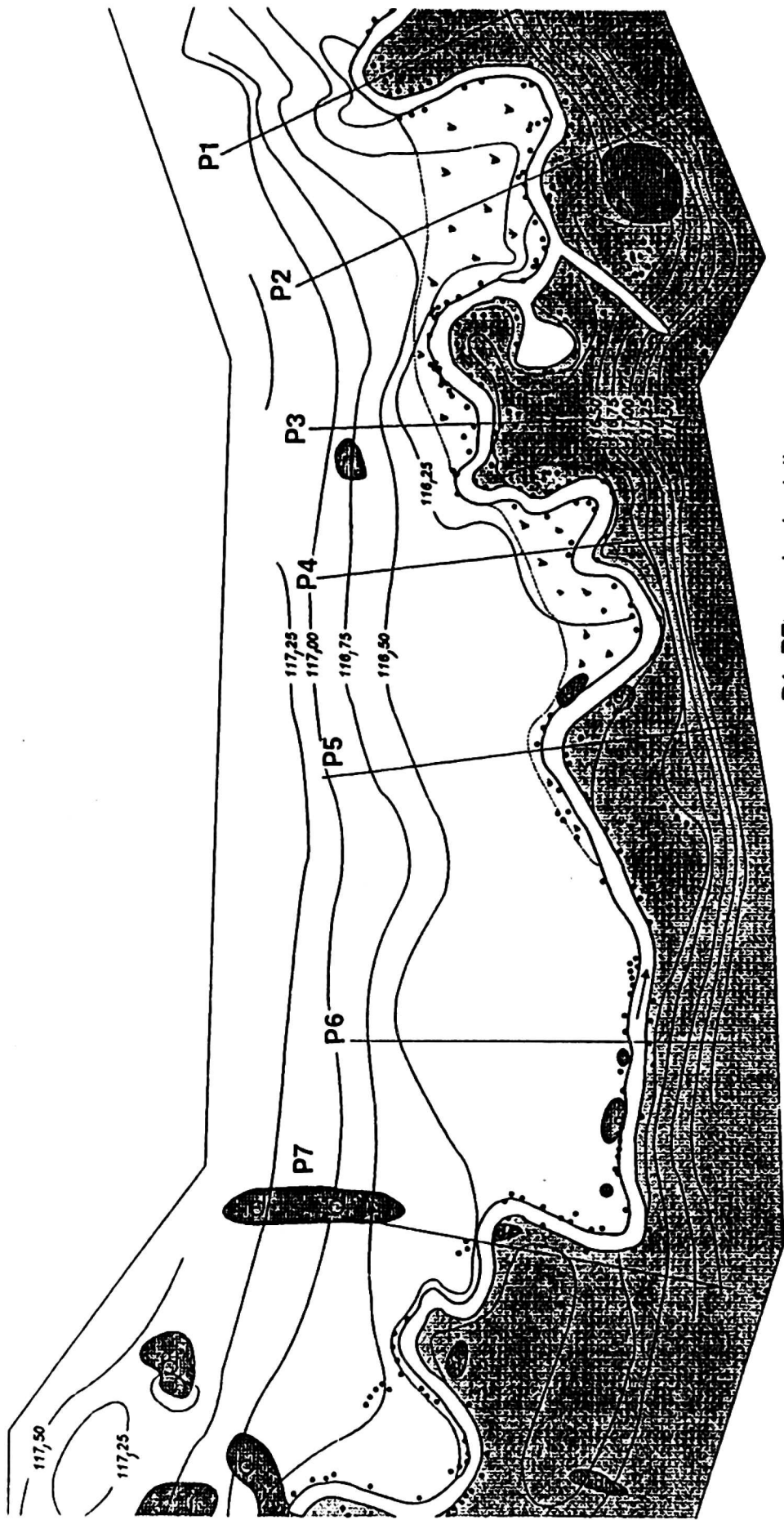
**Wyniki obliczeń porównawczych.** W okresie prowadzenia badań tylko raz wystąpiło znaczniejsze wezbranie przy przepływie pomierzonym  $Q_{pom} = 2,19 m^3/s$  – zbliżonym do  $Q_{20\%}$ . Wraz z pomiarem przepływu wykonano niwelację układu zwierciadła wody. Uzyskane rzędne wielkiej wody w poszczególnych przekrojach dolinowych pozwoliły na określenie następujących parametrów zestawionych w tabeli 2: powierzchni przekroju koryta  $F_k$ , zalewu  $F_z$  i całkowitej  $F_c$ , głębokości wody  $h_{pl}$  i  $h_{pp}$  w lewej i prawej płaszczyźnie rozdziału pomiędzy strefą zarośniętą i wolną od roślinności w korycie głównym oraz średnie na odcinkach spadki zwierciadła wody  $J$ . Wielkości chropowatości bezwzględnej  $k_s$  zostały przyjęte na podstawie pomiaru przepływu wykonanego wcześniej, gdzie brano pod uwagę poziom wody zbliżony do poziomu wody brzegowej. Należy zaznaczyć, że ze względów technicznych nie wykonano pomiarów w poszczególnych przekrojach poprzecznych. Wykonano tylko jeden pomiar przepływu w przekroju leżącym 50 m poniżej przekroju początkowego badanego odcinka.

Na podstawie danych z pomiarów terenowych przeprowadzono obliczenia porównawcze według trzech metod, omawianych uprzednio:

- Pasche-Rickerta (dalej określaną jako P–R, omówioną w pracy Kubraka 1995),
- Schrödera-Nudinga (S–N),
- Nudinga (N).

We wszystkich trzech metodach współczynnik oporu podłoża na terenie zalewowym był określany w odmienny sposób niż to podają autorzy powyższych metod. Zastosowano tu równania Temple'a (1)–(3), które pozwalają wyznaczyć współczynnik szorstkości Manninga  $n$  dla traw.

W obliczeniach przepustowości, prowadzonych oddzielnie dla koryta głównego i terenów zalewowych, uwzględniano wpływ interakcji na płaszczyźnie rozdziału pomiędzy strefą zarośniętą i wolną od ro-



P1-P7 przekroje dolinowe

- drzewo
- pojedynczy krzew
- ◐ zwarte zakrzewienia
- łąki
- ▾ obszar trzcin
- ▨ obszar nieużytków

skala 1:1000

RYSUNEK 2. Mapa fragmentu doliny rz. Głuskówki

TABELA 1. Parametry roślinności wysokiej na podstawie danych niemieckich (Rickert 1986; Rouvé 1987)

Rodzaj roślinności	Wiek roślin	Średnica $dp$ [m]	Rozstawa [m] $a_x = a_z$
Trzcina	—	0,003–0,01	0,05–0,2
Zwarte zakrzewienia (np. wiklinowe)	jednoroczne	0,02–0,04	0,1–0,2
	wieloletnie	0,03–0,10	0,2–0,4
Pojedyncze krzewy	jednoroczne	2,0–3,5	3,0–10,0
	wieloletnie	> 3,5	3,0–10,0
Olcha	dwuletnia	0,02–0,04	0,75–3,0
	pięcioletnia	0,04–0,10	1,0–5,0
	starsza niż 5 lat	0,15–0,50	3,0–10,0
Drzewa innych gatunków	ponad 20 lat	0,50–1,0	5,0–20,0

TABELA 2. Charakterystyka przekrojów wielkiej wody rz. Głuskówki

Nr	$F_k$	$U_k$	$h_{pl}$	$h_{pp}$	$F_z$	$F_c$	$k_s^*$	$J$
	$m^2$	m	m	m	$m^2$	$m^2$	m	%
1	2,46	3,33	0,54	0,54	6,15	8,61	0,35	1,46
2	3,59	4,50	0,51	0,25	5,88	9,47	1,54	1,46
3	3,33	5,09	0,24	0,24	4,90	8,23	0,36	1,46
4	2,93	3,65	0,12	0,29	6,88	8,81	0,44	1,46
5	3,43	5,39	0,23	0,23	6,87	10,30	0,62	1,46
6	3,13	4,21	0,11	0,21	11,98	15,11	1,21	2,40
7	2,21	3,51	0,22	0,35	9,04	11,25	0,43	1,73
8	3,51	5,01	0,47	0,18	8,16	11,67	0,80	1,84
9	3,35	4,17	0,63	0,29	10,68	14,03	0,91	1,60
10	2,55	3,57	0,48	0,26	13,98	16,53	0,58	1,60
11	3,25	5,49	0,28	0,21	8,56	11,81	1,80	4,68
12	2,64	3,92	0,27	0,32	8,29	10,93	0,39	1,60
13	3,00	4,06	0,56	0,44	17,48	20,48	0,78	1,60
14	2,25	3,23	0,45	0,40	9,04	11,29	0,38	1,50

\* Wartości przyjęte dla koryta głównego na podstawie pomiarów przy przepływie zbliżonym do wody brzegowej.

ślinności wysokiej. Jak wykazały wyniki obliczeń, na terenie zalewowym przy małych głębokościach wody i stosunkowo dużych współczynnikach oporu, wpływ interakcji można praktycznie pominąć. W warunkach rz. Głuskówki średnie głębokości wody na zalewie wynosiły 0,1–0,3 m, a współczynniki szorstkości powierzchni porośniętej trawą wynosiły 0,06–0,26  $m^{-1/3}$  s.

W przypadku obliczeń dla koryta głównego wpływ roślinności wysokiej jest wyraźny, przy czym, zależnie od metody obliczeniowej i warunków hydraulicznych w przekroju nie zawsze opory na płaszczyźnie rozdziału powodują zmniejszenie przepustowości koryta głównego. W tabeli 3 porównano wyniki obliczeń wykonanych trzema metodami dla przekrojów



TABELA 3. Wpływ chropowatości bezwzględnej  $k_s$  koryta głównego na przepływ obliczony różnymi metodami w wybranych przekrojach rz. Głuskówki

$k_s$	$Q_{ko}$	Metoda obliczeń					
		Pasche-Rickerta		Schrödera-Nudinga		Nudinga	
		$Q_k$	$\Delta Q_k$	$Q_k$	$\Delta Q_k$	$Q_k$	$\Delta Q_k$
[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]
<b>Przekrój nr 3</b>							
0,05	4,02	3,04	-24,4	2,58	-35,8	3,90	-3,0
0,10	3,47	2,83	-18,4	2,49	-28,2	3,39	-2,3
0,20	2,92	2,54	-13,0	2,33	-20,2	2,88	-1,4
0,30	2,60	2,34	-10,0	2,19	-15,8	2,56	-1,5
0,40	2,37	2,18	-8,0	2,07	-12,7	2,34	-1,3
0,50	2,19	2,04	-6,8	1,97	-10,0	2,18	-0,5
0,60	2,05	1,93	-5,9	1,88	-8,3	2,04	-0,5
<b>Przekrój nr 14</b>							
0,05	2,87	1,65	-42,5	1,49	-49,5	2,70	-5,9
0,10	2,49	1,60	-35,7	1,49	-40,2	2,51	0,8
0,20	2,10	1,52	-27,6	1,48	-29,0	2,23	6,2
0,30	1,87	1,44	-23,0	1,46	-21,9	2,04	9,1
0,40	1,71	1,37	-19,9	1,42	-17,0	1,87	9,4
0,50	1,59	1,32	-17,0	1,38	-13,2	1,76	10,7
0,60	1,48	1,26	-14,9	1,34	-9,5	1,65	11,5

$Q_{ko}$  – przepływ w korycie głównym przy pominięciu wpływu płaszczyzn rozdziału ( $\lambda_p = 0$ ).

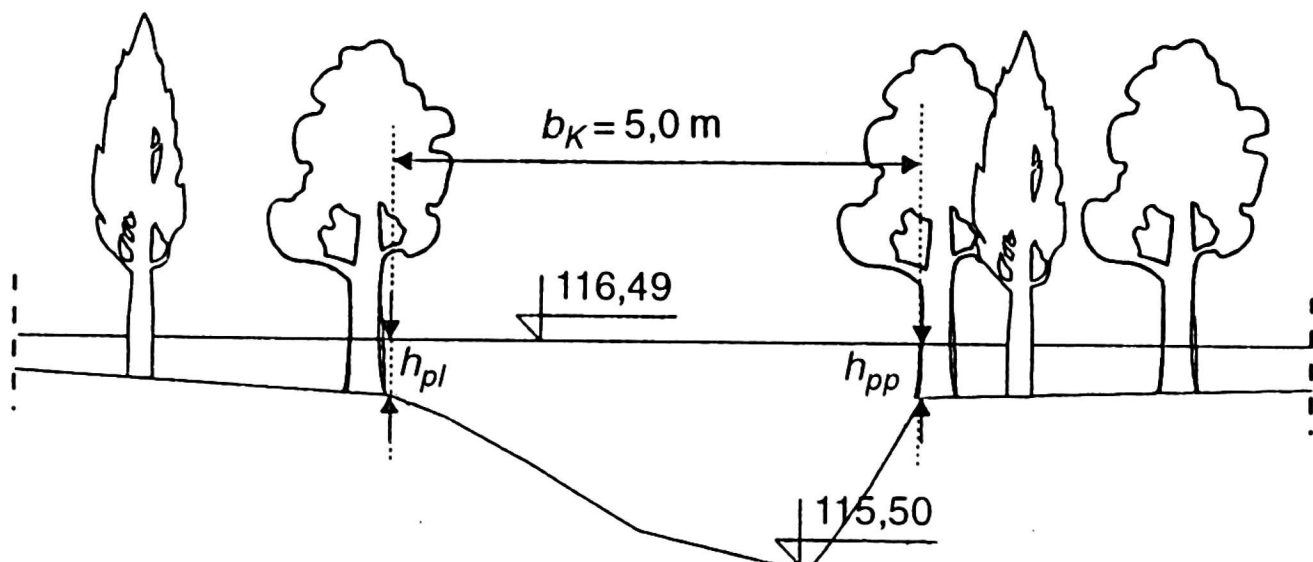
$Q_k$  – przepływ w korycie głównym.

pokazanych na rysunku 3. Ponieważ wartości  $k_s$  dla koryta głównego zostały przyjęte do obliczeń (tab. 1) na podstawie wcześniej wykonanych pomiarów, sprawdzono również wpływ  $k_s$  na wyniki obliczeń. W tabeli 3 przez  $Q_{ko}$  oznaczono wielkość przepływu w korycie głównym, przy całkowitym pominięciu wpływu płaszczyzny rozdziału ( $\lambda_p = 0$ ),  $Q_k$  jest przepływem przy uwzględnieniu oporów na płaszczyźnie rozdziału,  $\Delta Q_k$  – zmianą przepustowości wyrażoną w procentach. Jak widać, według metody P–R i S–N opory na płaszczyźnie rozdziału zmniejszają przepustowość koryta głównego w obu przekrojach, przy czym w przekroju 14 to oddziaływanie jest większe niż w przekroju 3. Przyczyną tego są różnice w powierzchniach i obwodach zwilżonych płaszczyzn rozdziału. Przekrój 14 ma po-

wierzchnię o około 50% mniejszą od powierzchni przekroju 3; obwody zwilżone płaszczyzn rozdziału w stosunku do całkowitego obwodu zwilżonego koryta głównego stanowią odpowiednio: – w przekroju 3–9%, a w przekroju 14–26% całkowitego obwodu zwilżonego koryta. Występują również różnice w szorstkościach podłoża obszarów zarośniętych oraz w gęstości i rodzaju roślinności (rys. 3). Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że według metody S–N opory na płaszczyźnie rozdziału są nieco większe niż w metodzie P–R; wraz ze wzrostem wielkości  $k_s$  zmniejsza się wpływ płaszczyzn rozdziału na przepływ w korycie głównym.

Nieco odmienne od omówionych wyżej są wyniki obliczeń uzyskanych metodą N. W przekroju 3, praktycznie niezależnie od

### Przekrój nr 3

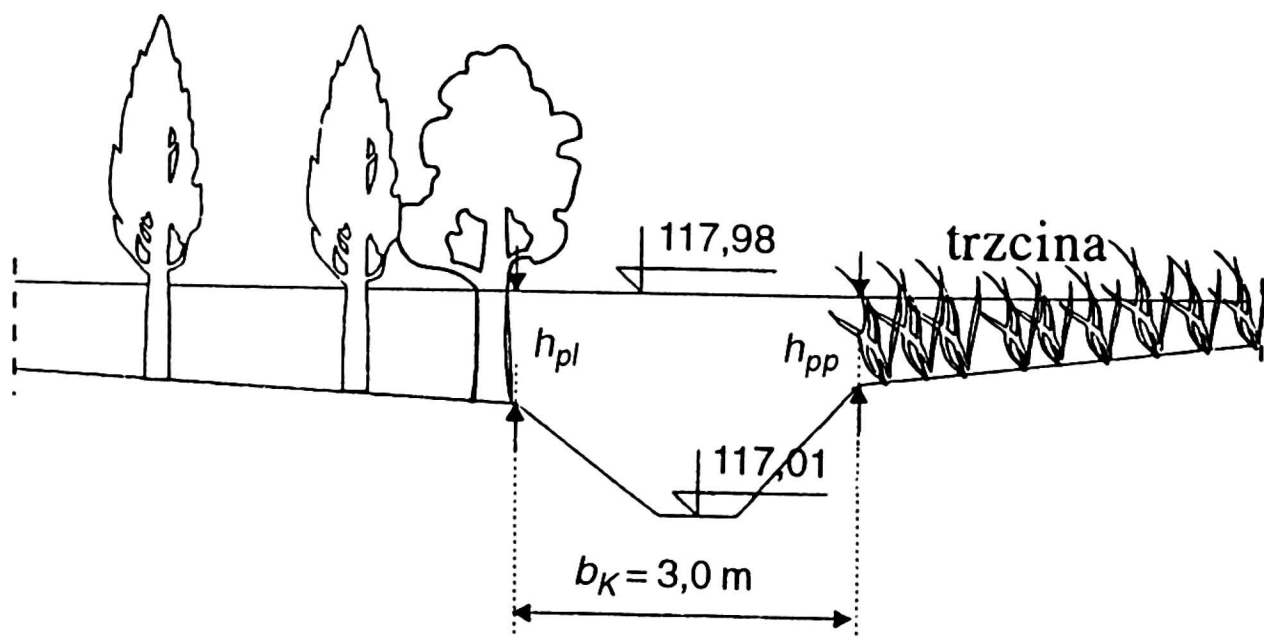


**zalew:**  
 $n = 0,218 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$   
 $d_p = 0,4 \text{ m}$   
 $a_x = 3 \text{ m}, a_z = 2 \text{ m}$   
 $b_z = 4,5 \text{ m}$   
 $A_z = 1,23 \text{ m}^2$

**koryto główne:**  
 $A = 3,33 \text{ m}^2$   
 $U = 5,09 \text{ m}$   
 $k_s = 0,36 \text{ m}$

**zalew:**  
 $n = 0,147 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$   
 $d_p = 0,4 \text{ m}$   
 $a_x = 4 \text{ m}, a_z = 2 \text{ m}$   
 $b_z = 6 \text{ m}$   
 $A_z = 0,85 \text{ m}^2$

### Przekrój nr 14



**zalew:**  
 $n = 0,088 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$   
 $d_p = 0,3 \text{ m}$   
 $a_x = 3 \text{ m}, a_z = 2 \text{ m}$   
 $b_z = 6 \text{ m}$   
 $A_z = 2,36 \text{ m}^2$

**koryto główne:**  
 $A = 2,25 \text{ m}^2$   
 $U = 3,23 \text{ m}$   
 $k_s = 0,38 \text{ m}$

**zalew:**  
 $n = 0,22 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$   
 $d_p = 0,005 \text{ m}$   
 $a_x = 0,1 \text{ m}, a_z = 0,1 \text{ m}$   
 $b_z = 35 \text{ m}$   
 $A_z = 4,48 \text{ m}^2$

RYСУNEK 3. Wybrane przekroje poprzeczne koryta głównego rz. Głuskówki

wartości  $k_s$ , redukcja przepływu w korycie głównym jest nieznaczna, natomiast w przekroju 14 wzrost  $k_s$  powoduje zwiększenie się przepustowości koryta. Jednoznaczna odpowiedź na pytanie: *która z metod jest właściwsza?* – jest trudne, szczególnie gdy nie posiadamy wyników pomiarów przepływu w analizowanych przekrojach. Z literatury (Chow Ven Te 1959; Rickert 1986) wynika, że po przekroczeniu wody brzegowej całkowity współczynnik szorstkości (oporu) koryta głównego w niektórych rzekach (przekrojach) maleje, a w innych wzrasta.

W tabeli 4 zestawiono wyniki obliczeń przepustowości koryta wielkiej wody w poszczególnych przekrojach rz. Głuskówki. Jak widać, wszystkie zastosowane metody obliczeniowe dają przepływ całkowity  $Q_c$  większy (z wyjątkiem jednego przypadku) od przepływu pomierzonego  $Q_{pom}$ . Spośród analizowanych metod najlepsze wyniki daje metoda S–N, według której średni błąd  $\Delta Q_c = 16,2\%$ . Przepływy całkowite

obliczone pozostałymi metodami dają następujące średnie błędy: metoda P–R – 21,1%, metoda N – 25,8%. Błędy obliczeń mogą wynikać zarówno z niedoszacowania parametrów wpływających na opory przepływu (np. gęstość zadarnienia, rozstawa drzew i krzewów oraz ich średnice) a także z zaniżonych oporów obliczanych analizowanymi metodami. Warto zwrócić uwagę na to, że największą część przepływu całkowitego stanowi przepływ w korycie głównym; średnio w poszczególnych metodach stanowił on: w metodzie P–R – 69%, metodzie S–N – 72%, a w metodzie N – 73% całkowitego przepływu obliczonego  $Q_c$ .

### Wnioski

Z przeprowadzonych badań i analiz można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Konieczne jest prowadzenie dalszych badań wpływu obszarów zarośniętych na opory przepływu.

TABELA 4. Przepływy obliczone różnymi metodami w przekrojach dolinowych rz. Głuskówki

Nr	Pasche-Rickerta				Schrödera-Nundinga				Nudinga			
	$Q_k$	$Q_z$	$Q_c$	$\Delta Q_c$	$Q_k$	$Q_z$	$Q_c$	$\Delta Q_c$	$Q_k$	$Q_z$	$Q_c$	$\Delta Q_c$
	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]
1	1,54	0,93	2,47	12,5	1,94	0,75	2,69	22,7	1,98	0,81	2,79	27,4
2	1,67	0,71	2,38	9,0	1,84	0,68	2,52	14,7	1,83	0,72	2,55	16,3
3	2,24	0,30	2,54	15,9	2,12	0,28	2,40	9,6	2,42	0,28	2,70	23,6
4	2,25	0,39	2,64	20,5	1,87	0,38	2,25	3,0	2,29	0,38	2,67	21,9
5	1,95	0,51	2,46	12,6	1,86	0,51	2,37	8,3	1,95	0,51	2,46	12,5
6	1,97	0,78	2,75	25,9	1,92	0,77	2,69	22,5	2,03	0,77	2,80	27,6
7	1,50	1,15	2,65	21,3	1,38	0,89	2,27	3,7	1,62	1,03	2,65	20,9
8	2,19	0,68	2,87	31,2	2,17	0,56	2,73	24,7	2,27	0,57	2,85	30,0
9	1,89	1,02	2,91	33,1	2,22	0,81	3,03	38,1	2,05	0,83	2,88	31,1
10	1,56	1,02	2,58	17,8	1,57	1,01	2,58	17,5	1,75	1,01	2,76	25,9
11	1,81	1,15	2,96	34,8	1,86	0,95	2,81	28,2	1,90	0,96	2,86	30,3
12	1,79	0,66	2,45	12,1	1,75	0,58	2,33	6,1	2,17	0,58	2,75	25,6
13	1,82	0,20	3,02	37,6	1,75	1,06	2,81	28,3	2,09	1,07	3,16	44,0
14	1,39	1,05	2,44	11,5	1,43	0,77	2,19	0,0	1,91	0,81	2,72	24,1

$Q_k$  – przepływ w korycie głównym;  $Q_z$  – przepływ po terenie zalewowym;  $Q_c$  – przepływ całkowity;  $\Delta Q_c = (Q_c - Q_{pom}) 100\% / Q_{pom}$ ;  $Q_{pom} = 2,19 \text{ m}^3/\text{s}$  – przepływ pomierzony.

2. Analizowane metody mogą być stosowane do obliczeń przepływu wód wielkich w korytach naturalnych, należy jednak się liczyć z pewnym zawyżeniem przepustowości. W warunkach rz. Głuskówki przepływy obliczone trzema metodami były większe od przepływu pomierzonego średnio o 16% do 26%:
- najmniejsze błędy uzyskano stosując metodę Schrödera-Nudinga a największe – Nudinga;
  - stosunkowo najłatwiejsza, w zastosowaniu jest metoda Nudinga, najbardziej zaś skomplikowana – metoda Pasche-Rickerta;
  - stosowanie analizowanych metod obliczeniowych wymaga dobrego rozpoznania warunków przepływu;
  - przepływy obliczone dla koryta głównego rz. Głuskówki stanowiły około 70%, a przepływy przez teren zalewowy – około 30% przepływu całkowitego.

## Literatura

- BAJKOWSKI S., KUBRAK J., POPEK Z. 1994: *Flow velocity and discharge in channel with compound cross section*. 5-th Conference "Problems of Hydroengineering". Prace Nauk. Inst. Geotechniki i Hydrotechniki Polit. Wroc. nr 67, seria Konferencje nr 34.
- CHOW VEN TE 1959: *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book, New York.
- KUBRAK J., BAJKOWSKI S., POPEK Z., ŻBIKOWSKI A. 1995: *Zdolność przepustowa koryt o przekrojach złożonych, porośniętych roślinnością wysoką*. Przeg. Nauk. Wydz. Mel. i Inż. Środ. SGGW z. 7.

- MERTENS M. 1989: *Zur Frage hydraulischer Berechnungen naturnahen Fliessgewasser*. Wasserwirtschaft 79; z. 4.
- PASCHE E. 1984: *Turbolenzmechanism in naturnahem Fliessgewassern und die möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung*. Mitteilungen Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinische-Westfälische Technische Hochschule Aachen nr 52.
- RICKERT K. 1986: *Der Einfluss von Geholz auf die Lichtverhältnisse und das Abflussverhalten in Fliessgewassern*. Mitteilungen Inst. für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaft, Wasserbau der Uni Hannover, Dissertation z. 61.
- ROUVE G. 1987: *Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewasserbau*. Forschungsberichte, VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- TEMPLE D. M., ROBINSON K. M., DAVIS A. G. 1987: *Stability design of grasslined open channels*. US Dept. of Agriculture, Agriculture Handbook, nr 667.
- ŻBIKOWSKI A., SMOLUCHOWSKA A., ŻELAZO J. 1992: *Naturalna regulacja rzek – materiały pomocnicze do projektowania*. IMUZ, Mat. Instruktażowe 102, Falenty.

## Summary

Different calculations methods of flow resistance caused by tall vegetation are presented. Those methods are used for discharge calculation in channel with flood plain overgrown by vegetation. The results of calculation by different methods are compared with measured discharge in small lowland's river.

### Author's address:

Z. Popek  
Warsaw Agricultural University – SGGW  
ul. Nowoursynowska 166  
02-787 Warszawa  
Poland