

**Janusz KUBRAK, Sławomir BAJKOWSKI**  
**Zbigniew POPEK, Armand ŻBIKOWSKI**

Katedra Budownictwa Wodnego SGGW

## **Przepustowość koryt o przekrojach złożonych, porośniętych drzewami**

### **Wstęp**

Badania warunków hydraulicznych przepływu w korytach otwartych o przekrojach wielodzielnych są współcześnie prowadzone w wielu ośrodkach naukowych na świecie.

Skomplikowany obraz zjawiska przepływu w obszarze połączenia koryta głównego i terenów zalewowych upraszczamy w obliczeniach przez nieuwzględnianie wymiany pędu i masy strumienia między tymi częściami koryta powoduje, że wyniki obliczeń natężenia przepływu i wyniki pomiarów prowadzonych w naturze i na modelach istotnie się różnią.

Według licznych badaczy zasadnicza wada obliczania natężenia przepływu w korytach otwartych na podstawie równania Chezy-Manninga polega na tym, że wykorzystywany w tym równaniu współczynnik szorstkości nie jest bezwymiarowy i niewłaściwie ujmuje fizyczne procesy (Kubrak 1994). Z tego względu zaleca się stosowanie do obliczeń średniej prędkości przepływu w korycie równanie Darcy-Weisbacha:

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda} R J} \quad (1)$$

gdzie:

$v$  – średnia prędkość przepływu (m/s),

$\lambda$  – bezwymiarowy współczynnik oporów przepływu,

$g$  – przyspieszenie ziemskie ( $m/s^2$ ),

$J$  – spadek hydrauliczny (–),

$R$  – promień hydrauliczny (m).

Równanie (1) jest fizycznie lepiej uzasadnione od równania Manninga i wyprowadza się je bezpośrednio z równania ruchu. Wpływ szorstkości koryta w równaniu (1) uwzględnia bezwymiarowy współczynnik oporów  $\lambda$ .

Bretschneider i Schulz (1985) w celu uwzględnienia w obliczeniach przepustowości koryt wpływu występującej w korycie roślinności podzielili ją na niską, średnią i wysoką (rys. 1). Podstawę wspomnianego podziału roślinności stanowi przede wszystkim charakterystyka hydraulicznych warunków przepływu w przekroju, a nie wysokość roślin. Gdy głębokość przepływu jest dużo wyższa od wysokości roślin w przekroju, a rozkład prędkości w pionie jest zgodny z teorią warstwy granicznej, wtedy roślinność określa się jako niską. Roślinność wysoka i średnia zajmuje istotną część przekroju przepływu. Wzrost głębokości w przekroju zwiększa udział miejscowych strat energii wywołanych opływem roślinności, lecz już nie wpływa na wartość średniej prędkości przepływu. Dlatego też prędkość w pionie nie podlega logarytmiczne-

roślinność niska

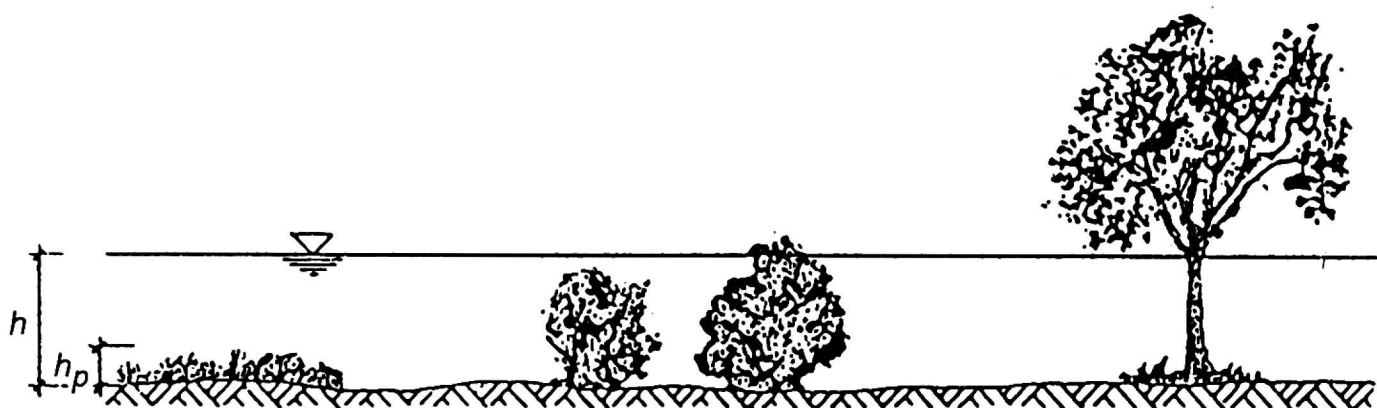
$$h_p \ll h$$

roślinność średnia

$$h_p \approx h$$

roślinność wysoka

$$h_p > h$$



RYSUNEK 1. Klasyfikacja roślinności wg Bretschneidera i Schulza (1985)

mu prawu rozkładu. Zauważyć więc warto, że zgodnie z podanymi określeniami trawa może być traktowana jako roślinność niska, średnia lub wysoka, w zależności od głębokości przepływu w przekroju. Drzewa natomiast są traktowane jako roślinność wysoka.

Opory przepływu w korytach z roślinnością składają się z oporów wywołanych roślinnością, jak i nieporośniętej roślinnością pobocznicą koryta. Dla określenia sumarycznego współczynnika oporów zakłada się, zgodnie z koncepcją Einsteina i Banksa, że bezwymiarowe współczynniki oporów przepływu w korytach sumują się, tzn.:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_v \quad (2)$$

gdzie:

$\lambda$  – sumaryczny współczynnik oporów w przekroju koryta,

$\lambda_s$  – współczynnik oporów części koryta bez roślinności,

$\lambda_v$  – współczynnik oporów wywołany opływem roślinności.

Oznaczenia przyjęto jak w oryginalnych opracowaniach dotyczących omawianych zagadnień.

Współczynnik oporów koryta bez roślinności wyznacza się z zależności Colebroocka-White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,03 \log \left( \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{14,8 R} \right) \quad (3)$$

Jak wynika z prawa Colebroocka-White'a, opory przepływu zależą od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej  $k/R$ . Wpływ liczby Reynoldsa na  $\lambda$  zmniejsza się wraz ze wzrostem jej wartości i chropowatości względnej.

W korytach rzek względna chropowatość koryta jest tak duża, że wpływ liczby Reynoldsa można pominąć. Dlatego upraszcza się ostatnie równanie do postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,03 \log \left( \frac{k}{14,8 R} \right) \quad (4)$$

Znane są wyniki systematycznych badań bezwymiarowych współczynników oporu  $\lambda$  w przewodach zamkniętych w zależności od chropowatości względnej  $k/R$ . Niewiele takich badań przeprowadzono dla koryt otwartych.

Lindner (1982) i Pasche (1984) podali sposób obliczeń natężenia przepływu w

korytach otwartych porośniętych roślinnością wysoką, oparty na bezwymiarowych współczynnikach oporów dla drzew  $\lambda_v$  i dla pobocznic koryta  $\lambda_s$  bez roślinności. Podany sposób obliczeń Rickert (1988) nieco uprościł i przystosował do obliczeń inżynierskich.

### Obliczanie natężenia przepływu w porośniętej drzewami części koryta

Przekrój poprzeczny koryta zostaje podzielony pionowymi płaszczyznami na części z drzewami i bez drzew (rys. 2). Czynny opór drzew oblicza się uwzględniając pole przekroju zajęte przez drzewa:

$$\lambda_v = \frac{4h_p d_p}{a_x a_y} C_{WR} \cos \alpha \quad (5)$$

gdzie:

$h_p$  – wysokość zanurzonej części drzew [m],

$d_p$  – średnica drzew [m],

$a_x, a_y$  – odległości między drzewami w kierunku przepływu i kierunku poprzecznym do niego [m],

$\alpha$  – kąt nachylenia dna w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu,

$C_{WR}$  – bezwymiarowy współczynnik oporu dla opływu drzew.

Współczynnik oporów  $C_{WR}$  jest zależny od stosunku prędkości dopływającej  $V_i$

do średniej prędkości przepływu w obszarze zarośniętym  $V_v$ , jak i wielkości fal na powierzchni powstałych przy opływie drzew:

$$C_{WR} = \left( 1,1 + 2,3 \frac{d_p}{a_y} \right) \left( \frac{V_i}{V_v} \right)^2 + 2 \left( \frac{1}{1 - d_p/a_y} - 1 \right) \quad (6)$$

Pasche podał empiryczną zależność na względną prędkość wody dopływającej do drzewa  $V_i/V_v$ :

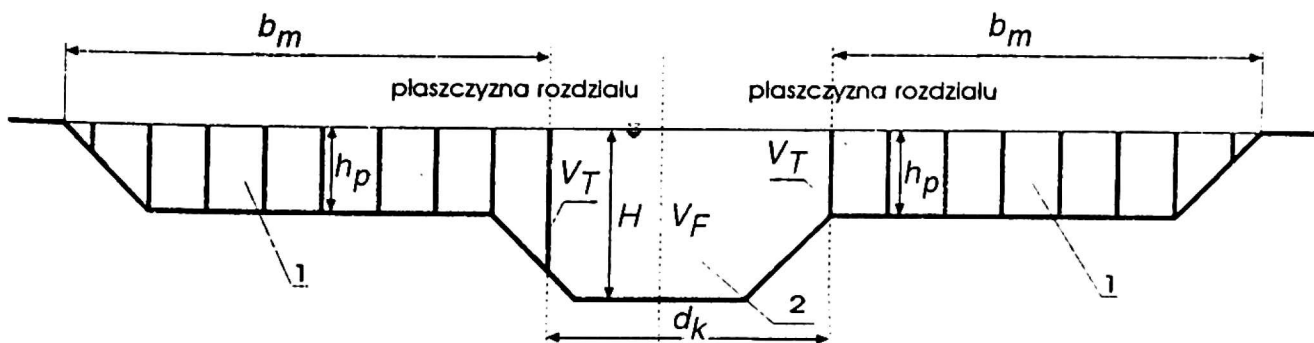
$$\left( \frac{V_i}{V_v} \right)^2 = 1,15 \left( \frac{a_{NL}}{a_x} \right)^{-0,48} + 0,5 \left( \frac{a_{NB}}{a_y} \right)^{1,1} \quad (7)$$

gdzie:

$$a_{NL} = 128,87 C_{W\infty} d_p \cdot$$

$$\cdot \left( 1 + \frac{g a_{NL} J_E}{V_T^2/2} \right)^{-2,143} \quad (8)$$

$$a_{NB} = 0,24 a_{NL}^{0,59} (C_{W\infty} d_p)^{0,41} \quad (9)$$



RYСУNEK 2. Podział porośniętego drzewami przekroju koryta wykorzystywany w obliczeniach: 1 – obszar z drzewami, 2 – obszar bez drzew

gdzie:

$a_{NL}$  i  $a_{NB}$  – długość i szerokość obszaru zakłóconego przez pojedyncze drzewo [m],

$J_E$  – spadek hydrauliczny [–],

$V_T$  – prędkość w płaszczyźnie rozdziału przekroju [ $m \cdot s^{-1}$ ].

Współczynnik oporu  $C_{W\infty}$  określa opór pojedynczego drzewa. Jego zmienność podał Lindner w postaci równań:

$$C_{W\infty} = 3,07 \operatorname{Re}_p^{-0,1680}$$

$$\text{dla } \operatorname{Re}_p = \frac{V_v d_p}{\nu} < 800 \quad (10)$$

$$C_{W\infty} = 1,0 \quad \text{dla } 800 \leq \operatorname{Re}_p \leq 8000 \quad (11)$$

$$C_{W\infty} = 1,2 \quad \text{dla } 8000 < \operatorname{Re}_p < 10^5 \quad (12)$$

gdzie  $\nu$  – współczynnik lepkości kinematycznej wody [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ].

Ze względu na wzajemne powiązanie przepływu w obszarze z drzewami z obszarem bez drzew (występowanie prędkości  $V_T$  we wzorze (8)), obliczenia rozpoczyna się od założenia wartości prędkości  $V_T$  w płaszczyźnie rozdziału obu obszarów i obliczenia zastępczej wysokości występów szorstkości w płaszczyźnie rozdziału ze wzoru:

$$k_T = 0,854 R_T \Omega \left( 1,7 \frac{2 b_m}{b_k} \right)^{1,07} \quad (13)$$

gdzie:

$R_T$  – promień hydrauliczny obszaru porośniętego drzewami ( $R_T = h_p$ ) [m],

$\Omega$  – bezwymiarowy współczynnik porośnięcia,

$b_m$  – szerokość strefy oddziaływania obszaru bez drzew na obszar z drzewami [m],

$b_k$  – szerokość obszaru koryta głównego bez drzew [m].

Szerokość strefy oddziaływania obszaru bez drzew oblicza się z równania:

$$b_m = \frac{h_p}{\lambda_v (0,068 e^{0,56 c_T} - 0,056)} \quad (14)$$

gdzie:

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego,

$c_T$  – bezwymiarowa prędkość w płaszczyźnie rozdziału obliczana ze wzoru:

$$c_T = -3,27 \lg \Omega + 2,85 \quad (15)$$

Współczynnik porośnięcia oblicza się ze wzoru:

$$\Omega = \left( 0,07 \frac{a_{NL}}{a_x} \right)^{3,29} + \left( \frac{a_{NB}}{a_y} \right)^{0,95} \quad (16)$$

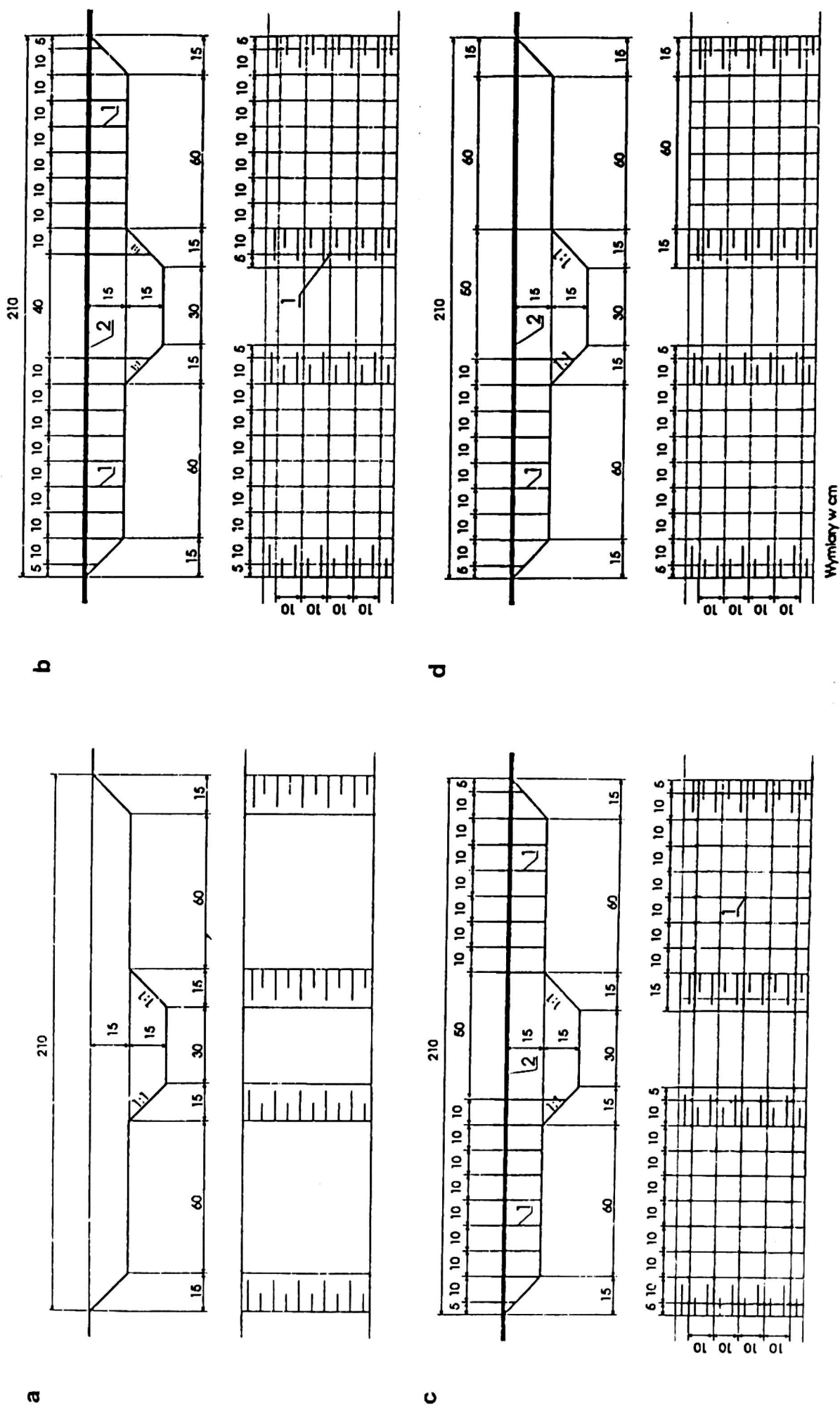
Prędkość występującą w płaszczyźnie rozdziału oblicza się ze wzoru:

$$V_T = \sqrt{\frac{\lambda_T}{8}} \cdot \sqrt{\frac{8 g R J_E}{\lambda}} \quad (17)$$

Następnie oblicza się współczynnik oporów przepływu  $\lambda_s$  w części przekroju wolnej od drzew i średni współczynnik oporów w całym korycie głównym:

$$\lambda = \frac{2 \lambda_v h_p + \lambda_s l_s}{2 h_p + l_s} \quad (18)$$

Końcowym krokiem obliczeń jest określenie średniej prędkości przepływu  $V_F$  w części przekroju wolnej od drzew i w płaszczyźnie rozdziału obu części przekroju  $V_T$ . Jeżeli obliczona prędkość  $V_T$  jest różna od przyjętej do obliczenia  $a_{NL}$  i  $a_{NB}$ , całość obliczeń należy powtórzyć, przyjmując wartość obliczoną  $V_T$  za jej kolejne przybliżenie.



Wymiary w cm

RYSUNEK 3. Schematy badanych wariantów modelu: a – wariant I, b – wariant II, c – wariant III, d – wariant IV: 1 – pręty imitujące drzewa, 2 – drewniane listwy utrzymujące pręty

## Wyniki badań zdolności przepustowej koryta

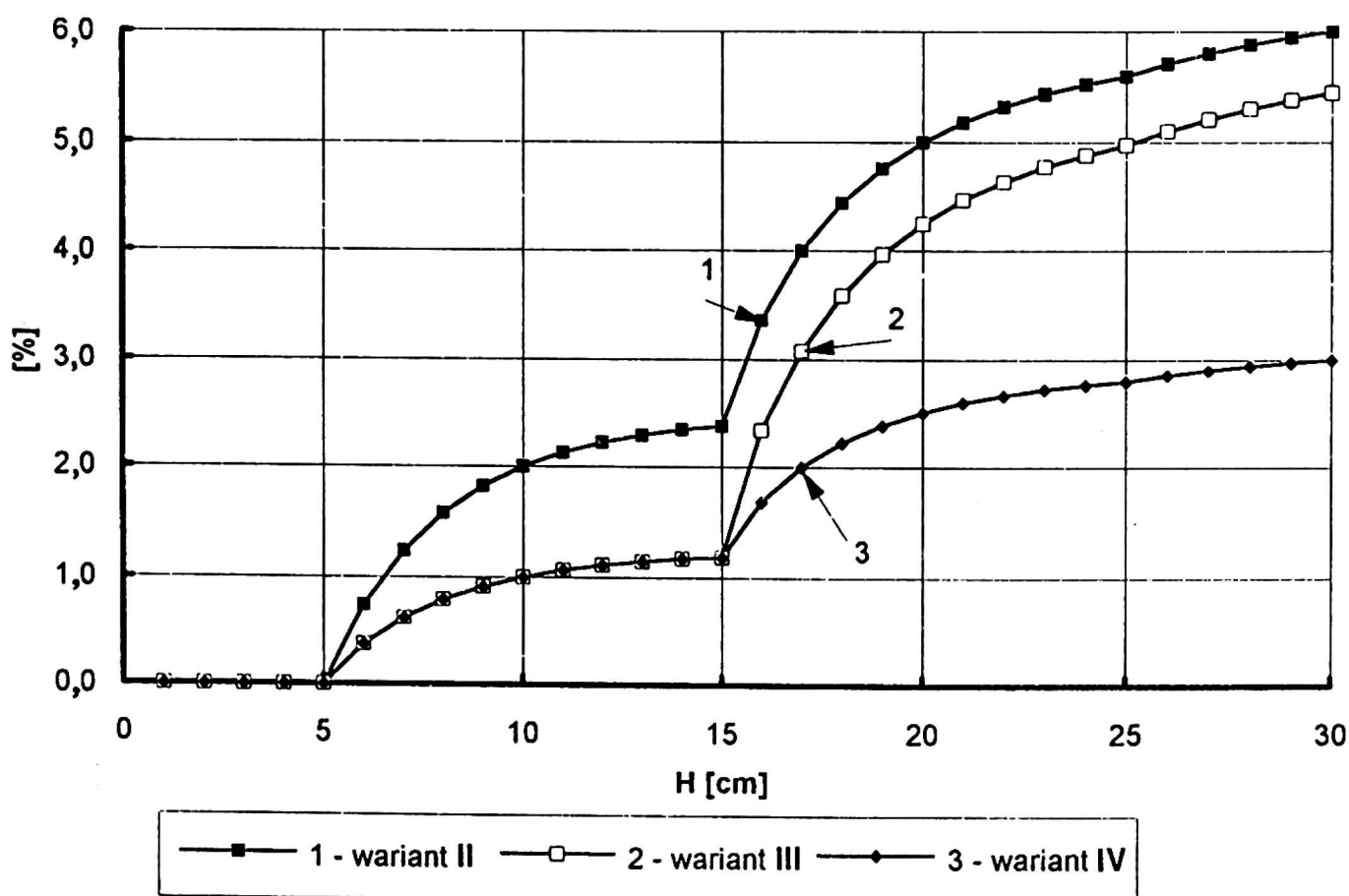
Stanowisko badawcze i metodykę badań opisano w artykule Bajkowskiego (1993). Przedmiotem badań było dwudzielne koryto trapezowe o spadku podłużnym dna i zalewów koryta 0,05%. Model koryta wykonano z betonu, a powierzchnie zagruntowano farbą emulsyjną. Pojedyncze drzewa modelowano sztywnymi metalowymi rurkami o średnicy 8 mm, mocowanymi na modelu za pomocą drewnianych belek umieszczonych ponad korytem prostopadle do jego osi. W trakcie badań zmieniano układy pionowych prętów dla różnych wariantów, zachowując jednakową zabudowę przekrojów poprzecznych na całej długości modelu koryta.

- W I wariacie badań przebadano zdolność przepustową koryta bez drzew (rys. 3a).
- W wariacie II regularnie rozmieszczono pręty imitujące drzewa rozstawione

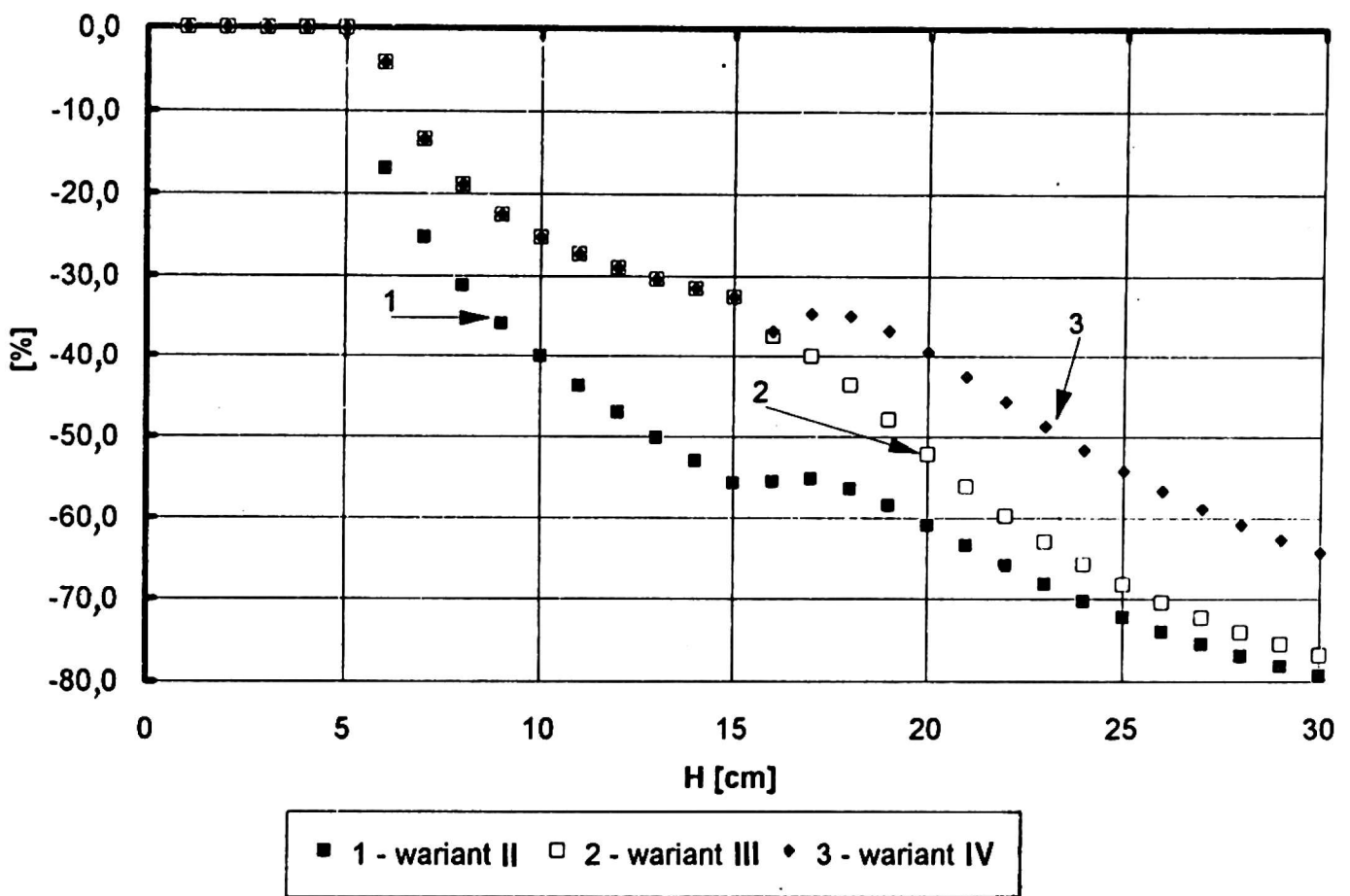
w oczkach siatki 10 x 10 cm, obejmującej tereny zalewowe i części koryta głównego (rys. 3b). Na całym modelu rozmieszczono w 161 przekrojach 2898 prętów.

- W wariacie III z ogólnej liczby 18 prętów w przekroju poprzecznym usunięto po jednym pręcie z prawej skarpy koryta głównego (rys. 3c).
- W wariacie IV usunięto wszystkie pręty z prawej strony modelu (rys. 3d).

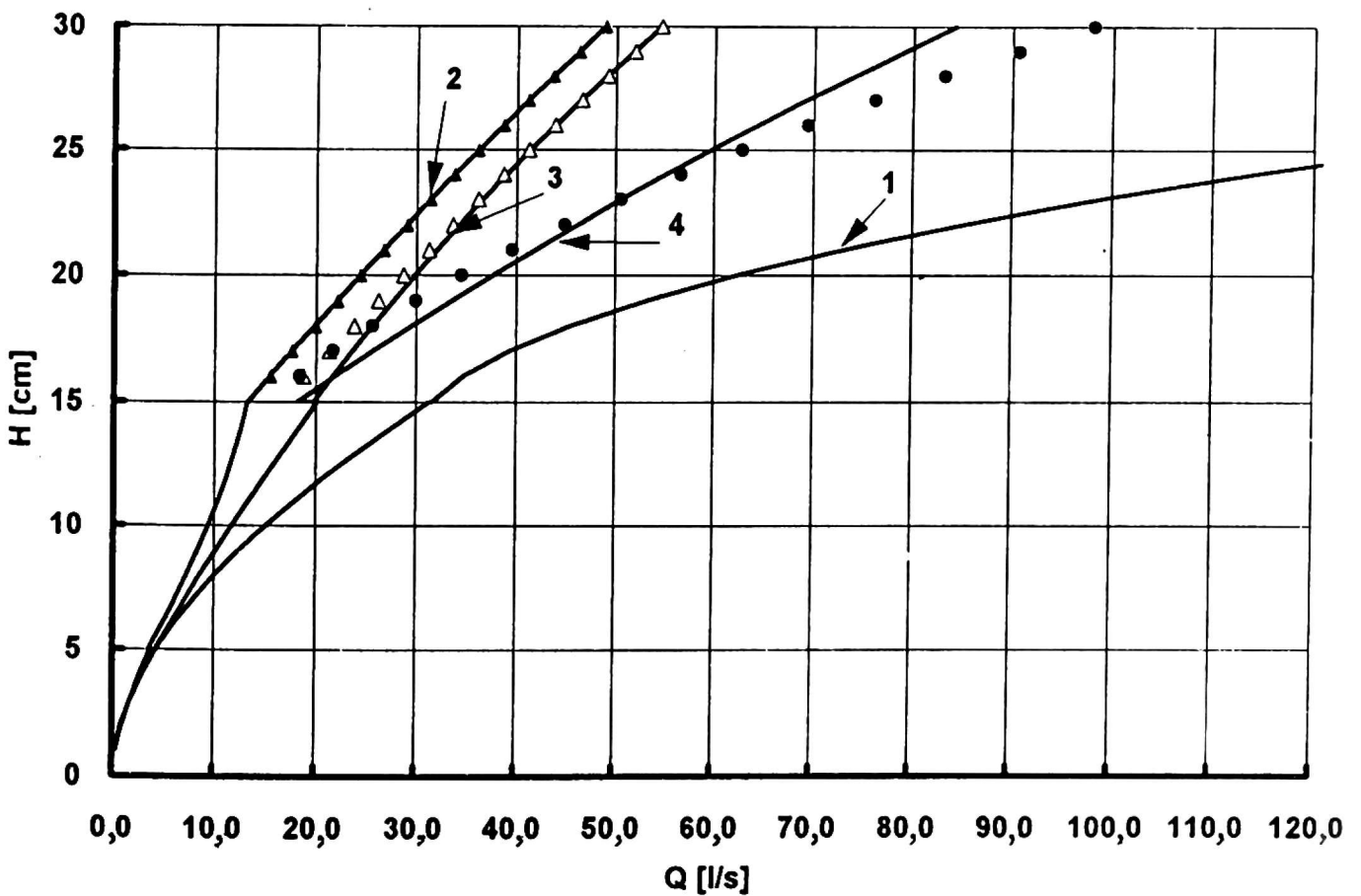
Zmianę stopnia przysłonięcia przekroju poprzecznego koryta drzewami, obliczane jako stosunek powierzchni przekroju zajętej przez drzewa do powierzchni całego przekroju dla wariantu II, III i IV pokazano na rysunku 4. Na rysunku 5 pokazano procentowe zmniejszenie pomierzonych natężeń przepływu w wariacie II, III i IV, w stosunku do wyników pomiaru w wariacie 1. Wyniki badań i obliczeń zdolności przepustowej koryta dla wspomnianych wariantów przedstawiono na rysunku 6.



RYSUNEK 4. Zmiana stopnia przysłonięcia przekroju poprzecznego koryta drzewami



RYSUNEK 5. Stopień zmniejszenia natężenia przepływu w korycie przy sztucznej zabudowie przekroju drzewami w stosunku do wariantu 1 bez drzew: 1 – wariant II, 2 – wariant III, 3 – wariant IV



RYSUNEK 6. Zestawienie pomierzonej i obliczonej zdolności przepustowej koryta: 1 – krzywa z badań wariantu I, 2 – krzywa z badań wariantu II, 3 – krzywa z badań wariantu III, 4 – krzywa z badań wariantu IV (punktami naniesiono wartości z obliczeń)

## Podsumowanie

Wyniki obliczeń zdolności przepustowej porośniętego koryta pokazane na rysunku 6 dla wariantu II i III są zgodne z wynikami pomiarów. Największe rozbieżności wyników obliczeń i pomiarów występują w wariancie 4. Obliczane tu natężenia przepływu różnią się w stosunku do pomierzonych w analizowanym zakresie zmian głębokości w korycie do 15%. Różnice między obliczanymi i mierzonymi wartościami natężenia przepływu w poszczególnych wariantach rosną wraz ze zmniejszaniem się powierzchni wielodzielnego przekroju koryta pokrytej drzewami. Oznacza to potrzebę dalszego doskonalenia istniejących metod obliczania natężenia przepływu w korytach wielodzielnych bez roślinności.

## Literatura

- BAJKOWSKI S., KUBRAK J. 1993: *Badania modelowe warunków przepływu w korytach wielkich wód*. Materiały XIII Ogólnopolskiej Szkoły Hydrologiki, Gdańsk.
- BAJKOWSKI S., KUBRAK J., POPEK Z. 1994: *Flow velocity and discharge in channel with compound cross section*. Problems of Hydroengineering, 5-th Conference Wrocław.
- BRETSCHNEIDER H., SCHULZ A. 1985: *Anwendung von Fließformeln bei naturnahem Gewässerbaus*. DVWK-Schriften 72, Paul Parey, Hamburg-Berlin.
- KUBRAK J. 1994: *Przykłady obliczania natężenia przepływu w korytach gładkich o złożonych przekrojach poprzecznych*. Gospodarka Wodna nr 6.
- LINDER K. 1982: *Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen*. Mitteilungen aus dem Leichtweiss – Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 75.
- PASCHE E. 1984: *Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeit ihrer mathematischen Erfassung*. Dysertacja RWTH, Aachen.
- RICKERT K. 1988: *Hydraulische Berechnung naturnaher Gewässer mit Bewuchs*. DVWK-Fortbildung, H. 13.

## Summary

**Assessment of discharges in channels with compound cross-section overgrown by trees.** The results of laboratory investigations and calculated discharges in a channel with compound cross section either overgrown by tall vegetation are presented. The comparison showed considerable convergence with measured values.

### Author's address:

J. Kubrak, S. Bajkowski, Z. Popek, A. Żbikowski  
Warsaw Agricultural University – SGGW  
ul. Nowoursynowska 166  
02-787 Warszawa  
Poland