

Adam KOZIOL, Elżbieta KUBRAK, Krzysztof KUŚMIERCZUK

Katedra Budownictwa Wodnego SGGW

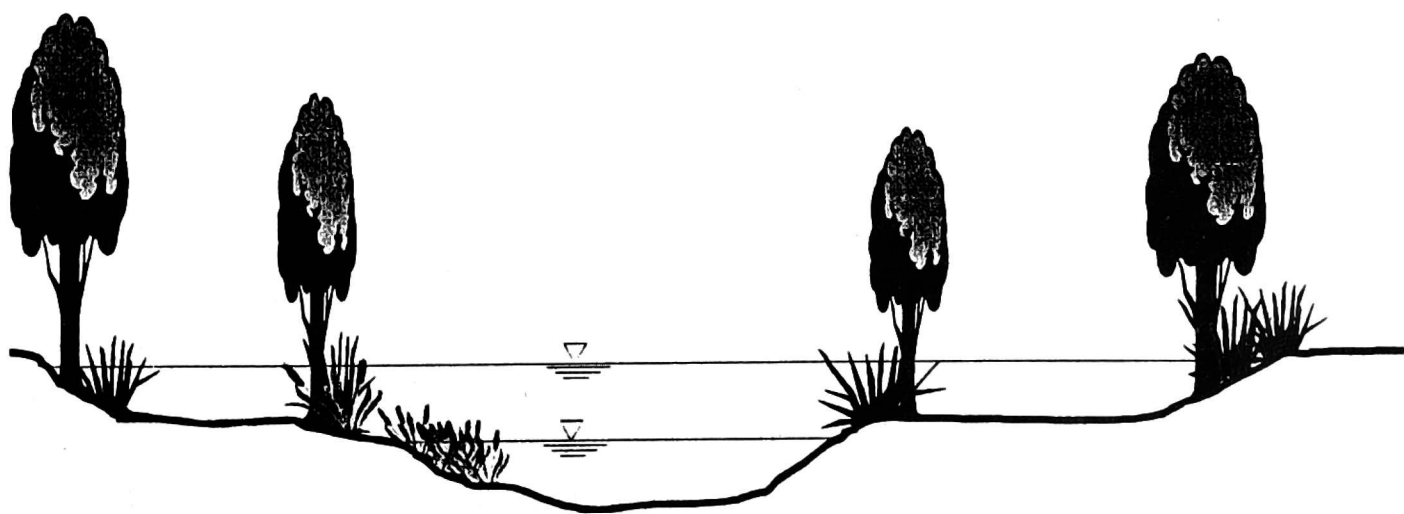
Uwagi o stanie badań warunków przepływu w korytach dwudzielnych z roślinnością wysoką

Wprowadzenie

Pojawiające się w połowie lat siedemdziesiątych tendencje do pozostawiania drzew i krzewów na skarpach i terenach zalewowych koryt w przedsięwzięciach związanych z regulacją, rewitalizacją i renaturyzacją są następstwem nowych wymagań ochrony środowiska (rys. 1). Dążenie do zachowania drzew i krzewów na skarpach koryt i międzywalu zostało dziś już w wielu krajach europejskich prawnie unormowane (Patt 1995). Oznacza to, że oddziaływanie ro-

ślin na warunki przepływu musi być uwzględniane we wszystkich nowo projektowanych przedsięwzięciach w korycie.

Według Bretschneidera i Schulza (1985), roślinność występująca w korytach naturalnych można podzielić na niską, średnio wysoką i wysoką. Do kategorii roślinności wysokiej zalicza się pojedyncze drzewa lub grupy drzew. Przy przepływie strumienia nad roślinnością niską, rozkład prędkości przepływu w pionie jest logarytmiczny i reaguje na występowanie roślinności tak jak na



RYSUNEK 1. Przykład złożonego przekroju koryta utrzymanego w stanie zbliżonym do naturalnego

chropowatość piaskową. Przy opływanu roślin wysokich (wysokość drzew i pojedynczych krzewów większa od głębokości przepływu) nie występuje logarytmiczny rozkład prędkości przepływu w pionie. Prekursorem badań w kraju nad przepustowością terenów zalewowych koryt porośniętych różnymi formami roślinności był Dębski (1963). Po raz pierwszy systematyczne badania wpływu wysokiej roślinności na warunki przepływu prowadził Felkel (1960). W połowie lat siedemdziesiątych, kontynuację tych prac podjęto w Instytucie Budownictwa Wodnego i Gospodarki Wodnej w Aachen oraz w Instytucie Hydrologii, Gospodarki Wodnej i Budownictwa Wodnomelioracyjnego w Hanowerze (Rickert 1986).

Już pierwsze uzyskane wyniki badań wskazywały na gwałtowne, bo o około 70% zmniejszenia przepustowości koryt o przekrojach złożonych z terenami zalewowymi porośniętymi roślinnością wysoką w stosunku do koryt bez roślinności (Rouvé 1987).

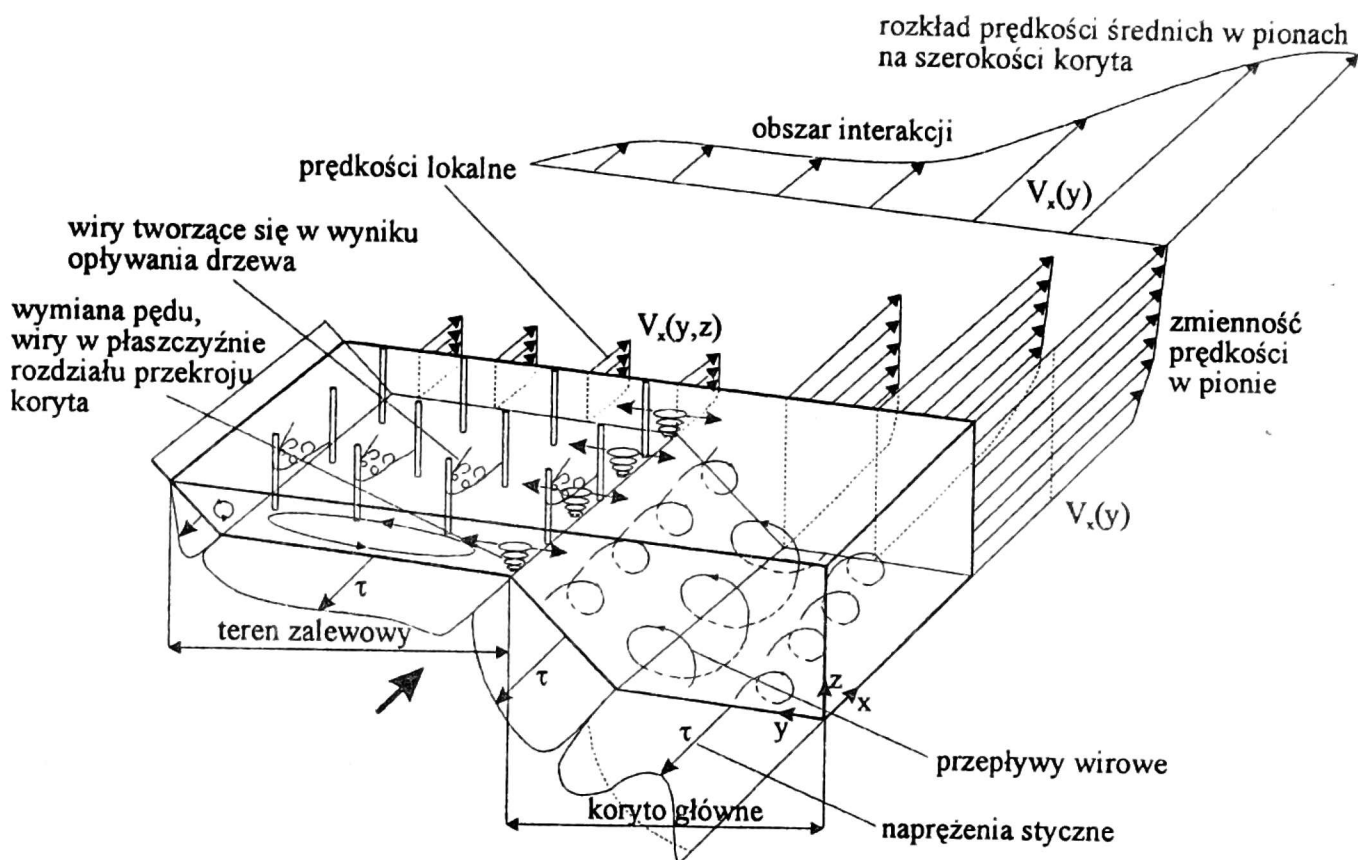
Warunki przepływu w korytach porośniętych roślinnością wysoką

Strumień w korycie o przekroju wielodzielnym ze zróżnicowaną szorstkością i głębokością na szerokości przekroju charakteryzuje się wyraźną nierównomiernością rozkładu prędkości średniej (rys. 2). Wywołuje to ruch turbulentny poprzeczny do głównego kierunku przepływu z intensywną wymianą masy i pę-

du pomiędzy wolno płynącymi strumieniami po terenie zalewowym i szybciej płynącym strumieniem w korycie głównym (Sellin 1964). Istnienie różnych form ruchu strumienia komplikuje jego opis teoretyczny i utrudnia badania modelowe.

Skomplikowany trójwymiarowy obraz przepływu w obrębie interakcji pomiędzy zadrzewioną i wolną od drzew częścią przekroju bada się w laboratoriach już od dawna. Badania modelowe Knight i Shiono (1990), Tominaga i Nezu (1991), Shiono i Knight (1991) potwierdziły występowanie sfotografowanych już przez Sellina (1964) wielkowymiarowych wirów o osi pionowej, tworzących się nad górną krawędzią skarpy koryta głównego względnie na skrajach zadrzewionych części przekroju. Powstaniu wirów towarzyszą prądy wirowe i przepływy wirowe w kierunku poprzecznym do osi koryta.

Opory przepływu w części przekroju z roślinnością wysoką są znacznie większe niż w nieporośniętej części przekroju. W teoretycznych analizach warunków ustalonego przepływu, przyjęcie założenia o hydrostatycznym rozkładzie ciśnień w strumieniu prowadzi do poziomego układu zwierciadła wody i wyraźnego gradientu energii w przekroju poprzecznym koryta (Kaiser 1984). Wyrównanie wysokości energii w przekroju jest możliwe tylko przez okresowe zróżnicowanie układu zwierciadła wody w obszarze z i bez roślinności. Zróżnicowanie wysokości energii w różnych częściach przekroju poprzecznego wg Kaisera (1984) wymusza przepływ w kierunku „y” poprzecznym do osi koryta z prędko-

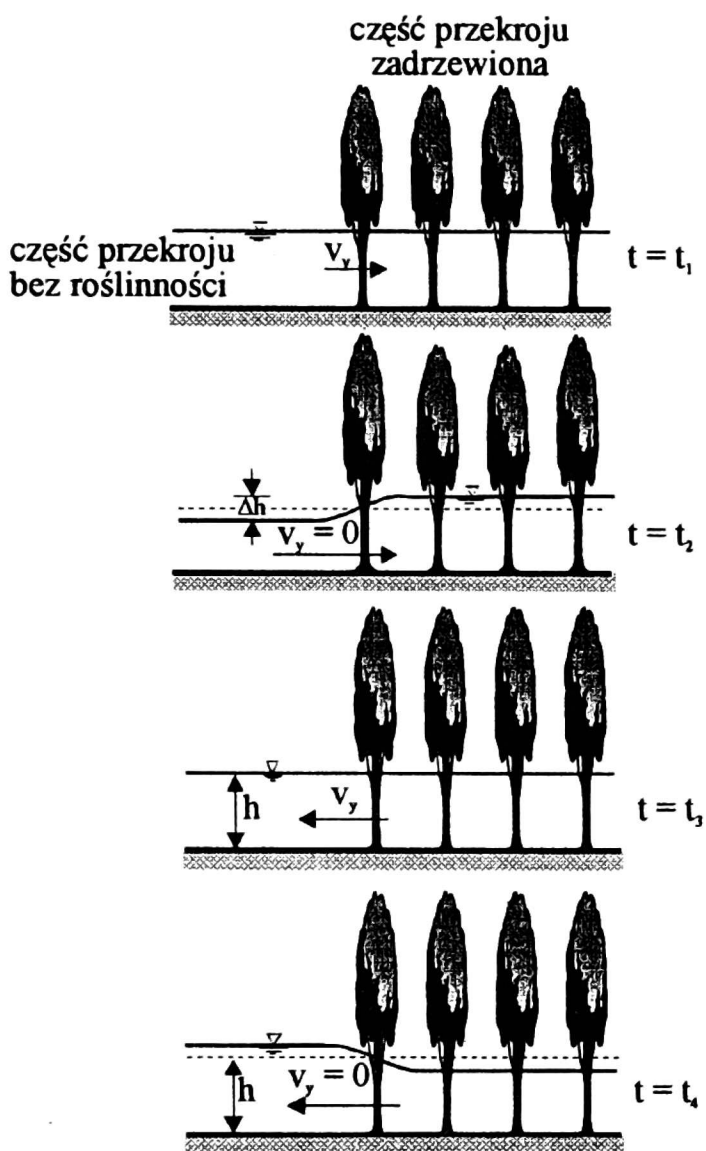


RYSUNEK 2. Struktura strumienia w korycie o złożonym przekroju poprzecznym z roślinnością wysoką wg Shiono/Knight (1991)

ścią V_y , tzn. w kierunku zadrzewionej części przekroju ($t = t_1$ na rys. 3), co z kolei prowadzi do podniesienia się zwierciadła wody i wzrostu ciśnienia hydrostatycznego w tej części przekroju. Po chwilowym podniesieniu się zwierciadła wody w zadrzewionej części przekroju ($t = t_2$) następuje moment ponownego wyrównania się ciśnienia zwierciadła wody w przekroju ($t = t_3$), a następnie obniżenie zwierciadła wody w zadrzewionej części przekroju ($t = t_4$). W płaszczyźnie rozdziału złożonego przekroju koryta tworzą się wstęgi wirów i następuje widoczne sfałowanie powierzchni zwierciadła wody. Wskutek nakładania się fal odbitych od pobocznic koryta powstają bardzo złożone trójwymiarowe, niestacjonarne i nierównomierne zjawiska przepływu. Dysypację energii

w przekroju jest trudno opisać teoretycznie wobec zjawisk makroturbulencji, tarcia o pobocznice koryta i opływu drzew.

Intensywne cykliczne zmiany pędu w kierunku poprzecznym do głównego kierunku przepływu wywołują wysokie naprężenia turbulentne. Zwiększają się one dodatkowo wskutek odrywania się strug od drzew i tworzenia się wstęgi wirów. Naprężenia turbulentne osiągają wartość maksymalną w płaszczyźnie rozdziału złożonego przekroju poprzecznego (rys. 4). W zadrzewionej części przekroju występuje wąska strefa, w której następuje wzrost prędkości średniej w porośniętej drzewami części przekroju. Zjawisko oddziaływania przepływu w części koryta bez roślinności na przepływ w części zarośniętej nazwano interakcją.



RYSUNEK 3. Schematyczne przedstawienie wahań zwierciadła wody w przekroju poprzecznym koryta wywołane przez interakcję pomiędzy częścią wolną od drzew i z drzewami wg Kaisera (1984)

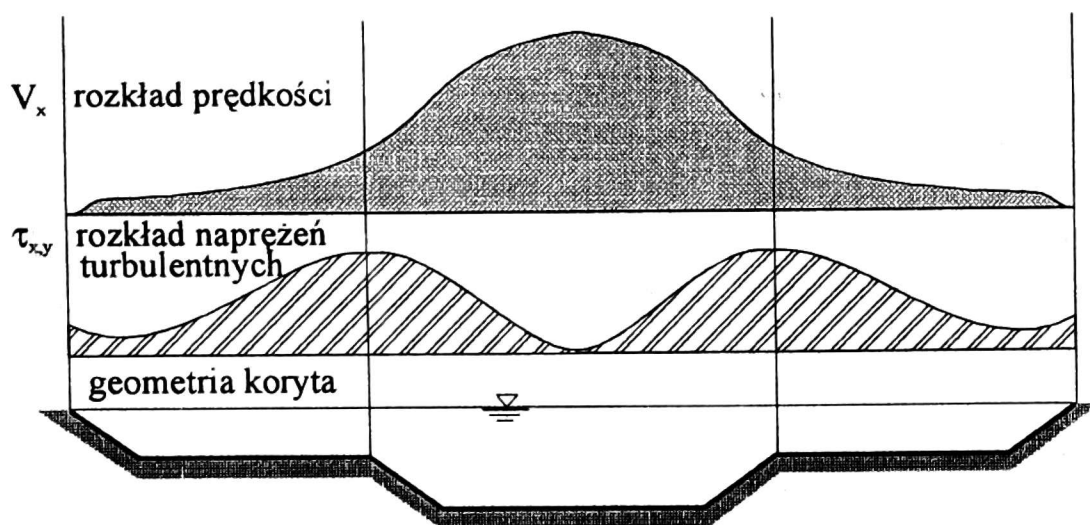
Wpływ interakcji na przepustowość prostoliniowego koryta w badaniach modelowych zilustrował Evers i Pasche (1983) przez wprowadzenie sztywnej, nieprzepuszczalnej ścianki w płaszczyźnie rozdziału zadrzewionej i wolnej od drzew przekroju koryta (rys. 5), wskutek czego nastąpił wzrost przepustowości całego przekroju koryta.

Charakterystyka dotychczasowych badań

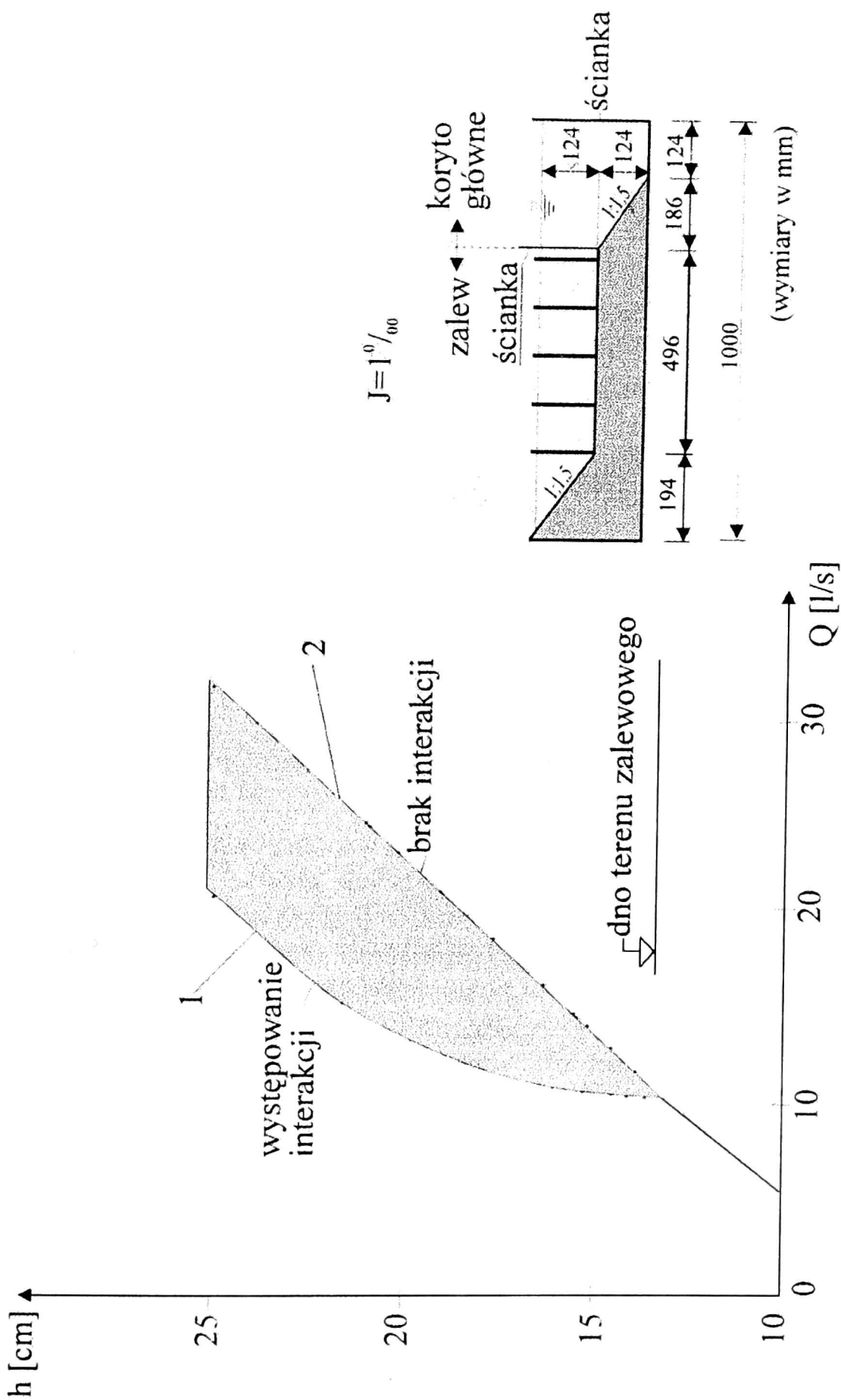
Przeprowadzone w ostatnim dwudziestoleciu badania warunków przepływu w korytach porośniętych roślinnością wysoką podzielić można na dwie grupy:

- w korytach o całkowitym porośnięciu przekroju poprzecznego drzewami,
- w korytach o częściowym porośnięciu przekroju poprzecznego drzewami i uwzględniające interakcję pomiędzy częścią koryta porośniętą i nieporośniętą.

Przegląd wyników badań należących do pierwszej grupy dokonał Kanemann (1987). Wspomniane badania prowadzono



RYSUNEK 4. Schemat rozkładu prędkości i naprężeń turbulentnych w złożonym przekroju poprzecznym koryta wg Paschego (1984)



RYSUNEK 5. Krzywe przepływu koryta w badaniach wg Eversa i Paschego (1983): 1 – krzywa przepływu przy występowaniu interakcji, 2 – krzywa przepływu przy braku interakcji

na modelach koryt o przekrojach prostokątnych i trapezowych w różnych skalach. Wyznaczano w nich współczynniki szorstkości koryta porośniętego drzewami do wzoru Manninga (Petryk, Bosmajin 1975), Chezy (Komora 1981) lub Darcy-Weisbacha (Kaiser 1984, Vincent, 1984, Lindner 1982).

Zależności charakteryzujące opory przepływu w porośniętym drzewami korycie można wyrazić w postaci bezwymiarowego współczynnika oporów spełniającego równanie Darcy-Weisbacha.

$$v = \sqrt{\frac{8gRJ}{\lambda}} \quad (1)$$

gdzie:

v – średnia prędkość przepływu [$m \cdot s^{-1}$]

R – promień hydrauliczny przekroju [m],

J – spadek linii energii [–],

λ – współczynnik oporów Darcy-Weisbacha [–].

Związek między współczynnikami charakteryzującymi opory przepływu w korycie występującymi we wzorach Chezy i Manninga a współczynnikiem λ jest następujący:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (2)$$

gdzie:

C – współczynnik prędkości Chezy [$m^{1/2} \cdot s$],

n – współczynnik szorstkości Manninga $m^{-1/3} \cdot s$.

Warunki przepływu kształtowane są pod wpływem szorstkości ścian i dna koryta oraz roślinności wysokiej (rys. 6).

Współczynnik oporów λ w obszarze z roślinnością jest sumą współczynnika oporów dna i ścian koryta λ_s oraz współczynnika wyznaczonego dla roślinności wysokiej λ_v :

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_v \quad (3)$$

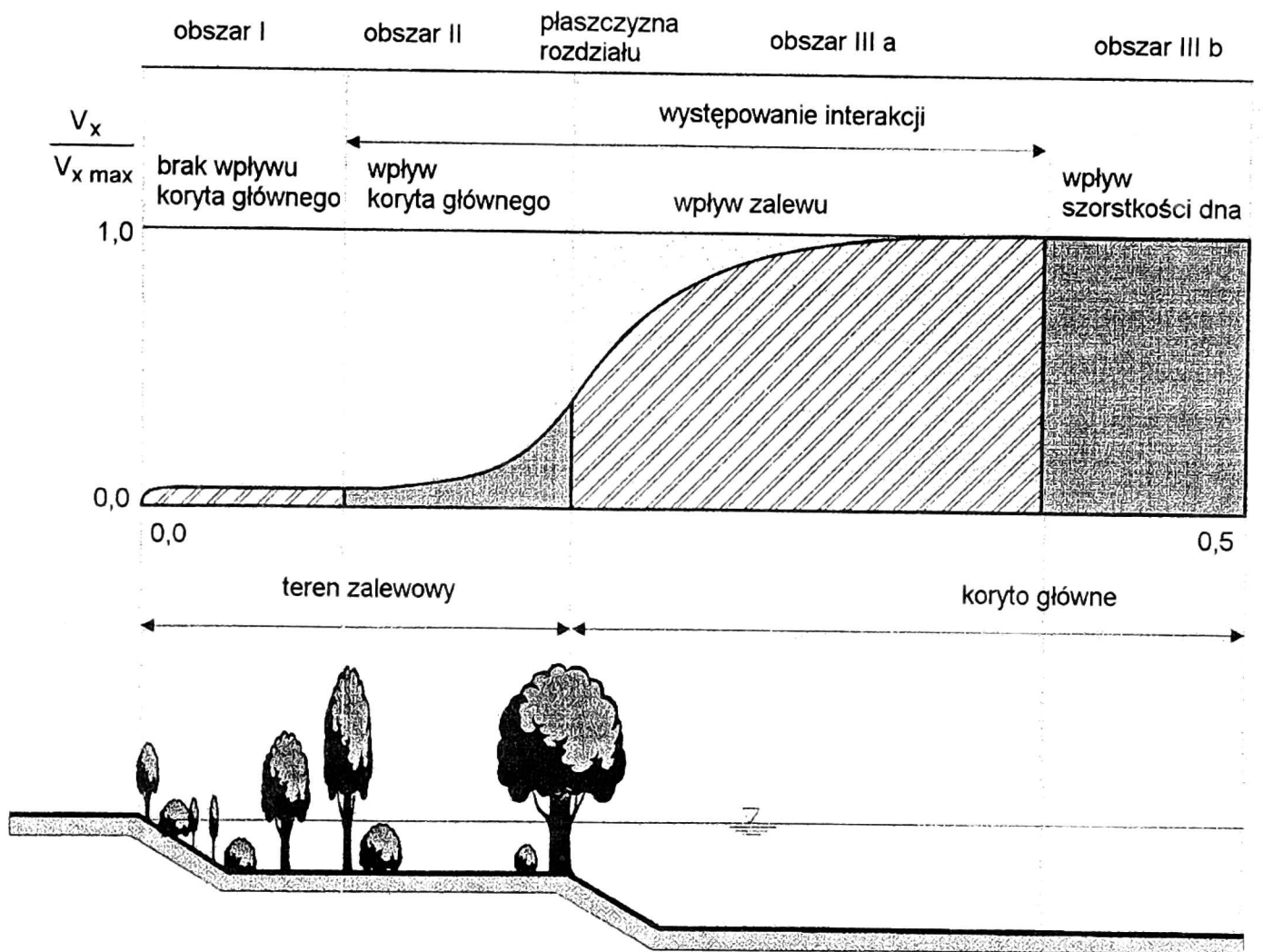
Zestawienie otrzymanych przy różnych założeniach współczynników oporu drzew w korytach o całkowitym porośnięciu przekroju poprzecznego drzewami pokazano w tabeli 1.

Pokazane w tabeli 1 zależności do wyznaczania różnych współczynników opisujących opory przepływu w korycie porośniętym roślinnością wysoką i wykorzystujące różne charakterystyki rozmieszczenia roślinności w korycie Kanemann (1987) sprowadził do równania:

$$\lambda_v = 4C_{WR}\omega_v R \quad (4)$$

Cechą wspólną tych badań było to, że dotyczyły one prostych odcinków koryt gładkich o przekrojach jednodzielnym z równomiernie rozmieszczoną w korycie żywą roślinnością wysoką lub jej imitacją.

Obszerne badania modelowe warunków przepływu, uwzględniające interakcję pomiędzy częściami złożonego przekroju z drzewami i bez drzew prowadzono w latach osiemdziesiątych w uczelniach niemieckich (Rouvé 1987). Tematykę i cel przeprowadzonych badań ilustruje zaczerpnięta z pracy Rouvé (1987) tabela 2. Jak z niej wynika, większość przeprowadzanych w Niemczech badań była prowadzona w warunkach



RYSUNEK 6. Obszary przepływu w porośniętym przekroju koryta wg Rouvé (1987) i rozkład prędkości średnich w pionach na szerokości koryta

laboratoryjnych, a uzyskane na tej podstawie wyniki posłużyły do opracowania metodyki obliczeń przepustowości koryt z roślinnością wysoką. Rozpoznanie procesu interakcji w korycie o złożonym przekroju na podstawie badań modelowych potwierdziło słuszność podziału przekroju pionowymi płaszczyznami złożonego przekroju koryta w miejscu wyraźnych zmian prędkości średniej (dużych gradientów prędkości) przy obliczaniu zdolności przepustowej takich koryt pokazanych na rysunku 4.

Porównanie różnych sposobów obliczeń przepustowości koryt przedstawiono w tabeli 3. Zestawiono w niej różne

metody obliczeń przepustowości koryt. Różnią się one przede wszystkim sposobem określenia współczynnika oporów w płaszczyźnie rozdziału koryta λ_T .

Cechą wspólną przeprowadzonych na różnych modelach koryt badań było to, że opierały się one na tych samych założeniach, tzn. wyznaczono bezwymiarowe współczynniki oporów dna koryta – λ_s , drzew – λ_v i płaszczyzn rozdziału – λ_T złożonego przekroju poprzecznego koryta do wzoru Darcy-Weisbacha (1).

Występujące w płaszczyznach rozdziału naprężenia styczne wiąże się

TABELA 1. Zależności do obliczania oporów wywołanych drzewami

Autor badań	Sposób opisu przepływu w porośniętym drzewami korycie	Parametry charakteryzujące rozmieszczenie drzew w korycie	Ustalona w badaniach zależność uwzględniająca opory przepływu w korycie
Kaiser (1984)	Jednowymiarowe równanie ustalonego przepływu wg Darcy-Weisbacha	Objętościowy parametr ε_v definiowany jako iloraz objętości zanurzonych części drzew do objętości koryta porośniętego drzewami: $\varepsilon_v = \sum V_{pi} / (A_v l_v)$ Wskaźnik zarastania przekroju drzewami:	$\lambda_v = 4CWR\omega_v R$
Petryk/Bosmajin (1975)	Jednowymiarowe równanie ustalonego przepływu wg Manninga	Hydrauliczna gęstość pokrycia koryta drzewami $D_v = \frac{\sum C_{wi} A_{pi}}{l_v l_{u,v}}$	$n_v = R^{2/3} \left(\frac{\sum C_{wi} \sum A_{pi}}{2g A l_{u,v}} \right)$
Komora (1981)	Jednowymiarowe równanie ustalonego przepływu wg Chezy	Objętościowy parametr ε_v i parametry charakteryzujące rozmieszczenie roślin w planie a_x/d_p i a_z/d_p	$C_v = 35 \left[\frac{d_p}{h \left(\frac{\sum A_{opi}}{A_{ov}} - 100 \right)} \right]^{1/2}$
Vincent (1984)	Jednowymiarowe równanie ustalonego przepływu wg Manninga	Parametry charakteryzujące rozmieszczenie roślin w planie ($a_x = a_z$) i a_x/d_p	$n_v = \frac{\sqrt{g}}{h^{1/6}} \left[A \frac{a_x}{d_p} + B \left(\frac{a_x}{d_p} \right)^2 - C \left(\frac{a_x}{d_p} \right)^3 \right] \left(\frac{a_x h}{4 \pi d_p^2} \right)^{-0,46}$ gdzie: $A = 1,782$ $B = 0,23$ $C = 0,00305$
Lindner (1982)	Dwuwymiarowe równanie ustalonego przepływu	Parametry ω_v , ε_v	$\lambda_v = 4CWR \omega_v R$

Przyjęte w tabeli 1 oznaczenia:

A – pole przekroju poprzecznego koryta [m^2],

A_{opi} – pole poziomego przekroju pnia drzewa [m^2],

A_{pi} – pole poziomego rzutu zanurzonego pnia drzewa na płaszczyznę przekroju poprzecznego koryta [m^2],

$A_{u,v} = l_v l_{u,v}$ – powierzchnia porośniętej drzewami poboczniczy koryta [m^2],

A_v – pole przekroju poprzecznego porośniętej drzewami części koryta [m^2],

C_{WR} – bezwymiarowy współczynnik oporów grupy drzew [-],

C_v – współczynnik prędkości dla drzew do wzoru Chezy [$m^{1/2}s^{-1}$],

C_{wi} – bezwymiarowy współczynnik oporów pojedynczego drzewa zależny od prędkości dopływającego strumienia v_i i średniej prędkości przepływu w przekroju v [-],

$$D_v = \frac{\sum C_{wi} A_{pi}}{l_v l_{u,v}} - \text{hydrauliczna gęstość pokrycia koryta drzewami [-],}$$

V_{pi} – objętość zanurzonego pnia drzewa [m^3],

a_x – odległość między drzewami w kierunku osi koryta [m],

a_z – odległość między drzewami w kierunku poprzecznym do osi koryta [m],

d_p – średnica drzew [m],

h – głębokość w korycie [m],

l_v – podwójna odległość między rzędami drzew w kierunku osi koryta [m],

$l_{u,v}$ – obwód zwilżony przekroju porośniętego roślinnością wysoką [m],

n_v – współczynnik szorstkości dla drzew do wzoru Manninga [$m^{-1/3} \cdot s$],

$\varepsilon_v = \sum V_{pi} / (A_v l_v)$ – objętościowy parametr charakteryzujący występowanie drzew w korycie [-],

$$\omega_v = \frac{\sum A_{pi}}{A_v l_v} - \text{wskaźnik porośnięcia przekroju drzewami [l/m].}$$

z prędkością przepływu w korycie głównym v_F empirycznym równaniem:

$$\frac{\lambda_T}{8} = \left(\frac{v_{*T}}{v_F} \right)^2 \quad (5)$$

gdzie:

v_{*T} – prędkość dynamiczna w płaszczyźnie rozdziału [m/s],

v_F – prędkość średnia w korycie głównym [m/s].

Weryfikację uznanej za najlepszą z opracowanych metodyk obliczeń przeprowadził na podstawie pomiarów w naturze Rickert (1986), a na podstawie wielkoskalowych badań laboratoryjnych – Schumacher (1995).

TABELA 2. Charakterystyka badań koryt z roślinnością wysoką prowadzonych w Niemczech

Ośrodek	TH Aachen	TU Braunschweig	TH Darmstadt
Temat	U Hannover Wpływ biologicznej zabudowy koryta na opory przepływu i geometrię przekroju koryta (pomiar w naturze)	Wpływ renaturyzacji na warunki przepływu (pomiar laboratoryjny)	Wpływ rozmieszczenia roślinności w przekroju na warunki przepływu (pomiar laboratoryjny)
Przekrój poprzeczny koryta (wymiar w mm)			
Parametry zmieniane w badaniach	Spadki, rodzaj roślinności, teren zalewowy	Spadki, odpływ, rozmieszczenie roślinności	Spadki, odpływ, rozmieszczenie roślinności
Określone wielkości	Prędkości, głębokości, spadek, zwierciadła wody, charakterystyki roślinności	Prędkości, głębokości	Prędkości, naprężenia styczne i ich rozkład, głębokości
Temat badań	Opory przepływu z roślinnością w korytach o przekrojach złożonych z zwartych	Zmniejszenie przepustowości zalewu porośniętego drzewami, interakcja koryta głównego i zalewu	Opory przepływu, interakcja
Cel badań	Weryfikacja metod obliczeń przepustowości opracowanych na podstawie badań laboratoryjnych	Jedno i dwuwymiarowe modele obliczeń przepływu w korytach o przekrojach złożonych porośniętych roślinnością wysoką	Opracowanie hydraulicznych i morfologicznych podstaw wymiarowania biologicznych umocnień brzegów

Kierunki dalszych badań

Z analizy obecnego stanu badań koryt porośniętych roślinnością wysoką można sądzić, że przyszłe badania będą dotyczyły zdolności przepustowej, oporów przepływu oraz naprężeń stycznych i turbulentnych, przy różnych schematach rozmieszczenia drzew w planie, lecz prowadzonych na modelach koryt meandrujących i przede wszystkim badań prowadzonych w naturze.

Przeprowadzona przez Schmumachera (1995) analiza porównawcza różnych wyników obliczeń zestawionych w tabeli 3 metod z wynikami badań modelowych wykazała dużą zgodność wyników obliczeń z pomiarami w przypadku metodyki opracowanej przez Pasche, Rouvé i Arnolda. Obliczenia wykonane pozostałymi metodami potwierdziły ograniczoną przydatność tych metod.

Celem badań warunków przepływu w korytach meandrujących z drzewami będzie powiązanie charakterystyk przepływu strumienia z układem poziomym koryta w taki sposób, by móc fakt ten uwzględnić w obliczeniach przepustowości tych koryt.

Dotychczas opublikowane prace Elliot i Sellin (1990) oraz Ervine i in. (1992) potwierdzają, że zdolność przepustowa koryt meandrujących wskutek nierównoległości strug bywa bardzo różna i może zmniejszyć się nawet do 50% w stosunku do koryt o zwartym przekroju, lecz prostoliniowych w planie. Niemal wszyscy badacze podkreślają potrzebę prowadzenia badań terenowych, które niestety są bardzo kosztowne. Jednakże bez uzyskania danych z takich pomiarów w naturze

trudno się spodziewać szybkiego zwerifikowania metod obliczeń przepustowości koryt z roślinnością wysoką – drzewami oraz stosowanych dwuwymiarowych modeli przepływu strumienia opartych na równaniach różniczkowych Naviera-Stokesa.

Literatura

- BERTRAM H.U. 1985: *Über den Abfluß in Trapezgerinnen mit extremer Böschungsrauhheit*. Mitt. Leichtweiss. Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 86.
- BRETSCHNEIDER H., SCHULZ A. 1985: *Anwendung von Fließformeln bei naturnahen Gewässerausbau*. DVWK – Schriften, Heft 72.
- DEBSKI K. 1963: *Hydrologia i hydraulika*. Warszawa, PWSZ.
- ELLIOT S.C.A., SELLIN R.H. 1990: *SERC flood channel facility: skewed flow experiments*. Journal of Hydraulic Research, vol. 28, no 2, s. 197–214.
- EVERS P., PASCHE E. 1983: *Untersuchungen zur Problematik der hydraulischen Berechnung natürlicher Fließgewässer*. Wasser und Boden 3 (8), s. 135–138.
- ERVINE D.A., WILLETS B.B., SELLIN R.H., LORENZ M. 1992: *Factors affecting conveyance in meandering compound flows*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 119, no 12, s. 1383–1399.
- FELKEL K. 1960: *Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe.
- HORTON R.E. 1933: *Separate roughness coefficients for channel bottom and sides*. Engineering News-Record, Nr 22.
- INDLEKOFER H. 1981: *Überlagerung von Rauigkeitseinflüssen beim Abfluß in offenen Gerinnen*. Mitt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 37.
- KAISER W. 1984: *Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergehölzzone*. Wasserbau – Mitteilungen, Nr 23 des

TABELA 3. Wyniki badań koryt z roślinnością wysoką prowadzonych w Niemczech

Uwzględnienie interakcji poprzez współczynnik oporów λ_T	Pozorna szorstkość w płaszczyznach rozdziału koryta głównego od porośniętych drzewami terenów zalewowych (Pasche, Rouve, Arnold)
Kształt przekroju	

Zależność dla współczynnika oporów

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2,03 \cdot \log \left[0,072 \left(\frac{b_m}{b_F/2} \right)^{1,07} \cdot \Omega \right]$$

Uwzględnienie wpływu roślinności na warunki przepływu

$$\Omega = \left[0,071 \cdot \frac{a_{NL}}{a_x} \right]^{3,29} + \left[\frac{a_{NB}}{a_z} \right]^{0,95}$$

$$a_{NL} = 128,87 \cdot c_{wi} \cdot d_p \cdot \left[1 + \frac{g \cdot a_{NL} \cdot J}{v_T^2/2} \right]^{-2,14}$$

$$a_{NB} = 0,24 \cdot a_{NL}^{0,59} \cdot (c_{wi} \cdot d_p)^{0,41}$$

Uwzględnienie interakcji

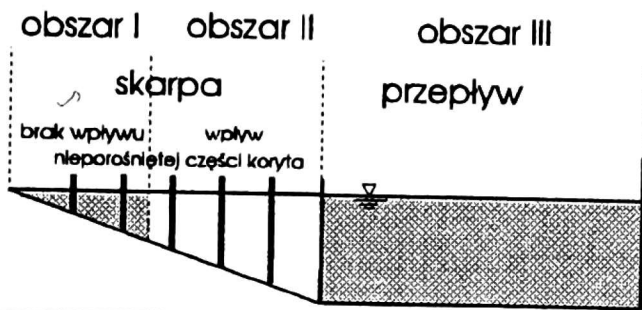
$$\frac{b_m}{h_v} = \frac{1}{\lambda_v} \cdot (0,068 e^{(0,56c_T)} - 0,056)$$

$$c_T = v_{*T}/v_F = -3,27 \log \Omega + 2,85$$

Oznaczenia przyjęte w tabeli 3:

- A_{II} – pole przekroju poprzecznego pod wpływem nieporośniętej drzewami części koryta (obszar II) [m²],
- C_{wi} – współczynnik oporów drzewa [–],
- R_T – promień hydrauliczny odnoszący się do oporu stawianego przez płaszczyznę rozdziału [m],
- a_{NL}, a_{NB} – długość i szerokość obszaru zajmowanego przez pojedyncze drzewa [–],

Pozorna szorstkość w płaszczyznach rozdziału porośniętej drzewami skarpy od koryta głównego (Bertram, Garbrecht)

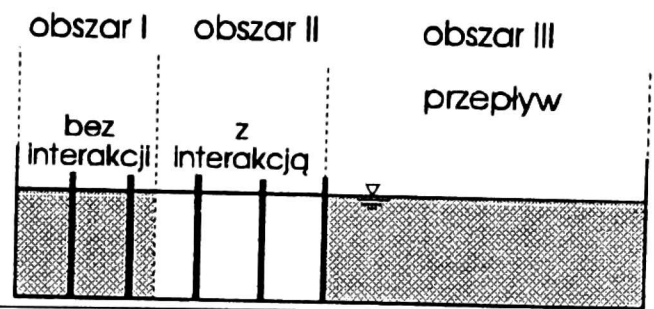


$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = 2,035 \cdot \log \frac{4 \cdot 3,046 \cdot R_T}{k_T}$$

$$k_T = k_{T,V} + k_{T,I}$$

$$k_{T,V} = 1,2 \div 1,5 \cdot d_p$$

Pozorna szorstkość w płaszczyznach rozdziału obszaru koryta porośniętego i bez roślinności (Kaiser)



$$\lambda_T = \lambda_{T,0} + \lambda_I$$

$$\lambda_T = f \left(\frac{v_{0,F}^2}{v_{0,v}^2} \right)$$

$$\lambda_{T,0} = 0,06 - 0,10$$

$$v_{0,v}^2 = \frac{2 \cdot g \cdot J \cdot (1 - \varepsilon_v)}{c_{WR} \cdot \omega_v}$$

$$k_{T,I,1} = \sqrt{\frac{V_{I,2}}{V_{I,1}}} \cdot k_{T,I,2}$$

$$k_{T,I,2} = 0,77 \cdot b_m = 0,77 \cdot A_I / h_T$$

$$\lambda_I = \alpha_I \cdot \lambda_{I, \max}; \quad \alpha_I < 1,0$$

$$\lambda_{I, \max} = 0,18 \cdot \log \left[0,0135 \frac{v_{0,F}^2 \cdot l_m}{v_{0,v}^2 \cdot l_{u,T}} \right]$$

$$\alpha_I = 1 - \left[1 - \frac{b_v}{b_{m, \max}} \right]^{3,5}$$

$$b_{m, \max} = 17,5 \cdot \frac{v_{0,v}^2 \cdot \lambda_{I, \max}}{g \cdot J}$$

b_F – szerokość koryta głównego [m],
 b_m – szerokość sfery oddziaływania obszaru zarośniętego na obszar bez roślinności [m],

c_T – bezwymiarowa prędkość w płaszczyźnie rozdziału [–],

h_v – głębokość wody w terenie zalewowym [m],

k_T – zastępcza wysokość występów szorstkości w płaszczyźnie rozdziału [m],

$k_{T,V}$ – zastępcza wysokość występów szorstkości dla drzew [m],

- $k_{T,I}$ – zastępcza wysokość występów szorstkości odpowiadająca interakcji [m],
 $l_{u,T}$ – długość ścianki rozdziału [m],
 $v_{0,F}$ – obliczona średnia prędkość przepływu w obszarze wolnym od drzew bez uwzględniania interakcji [m/s],
 $v_{0,V}$ – obliczona średnia prędkość przepływu w obszarze porośniętym drzewami bez uwzględniania interakcji [m/s],
 $v_{v,l}$ – średnia prędkość przepływu w porośniętym drzewami przekroju koryta [m/s],
 $v_{v,2}$ – średnia prędkość w nieporośniętym drzewami przekroju koryta [m/s],
 Ω – bezwymiarowy współczynnik porośnięcia drzewami [–],
 α_I – współczynnik zmniejszający [–],
 λ_I – współczynnik oporów wywołany interakcją [–],
 λ_T – współczynnik oporów w płaszczyźnie rozdziału koryta głównego i terenu zalewowego [–],
 $\lambda_{T,0}$ – współczynnik oporów skraju obszaru porośniętego drzewami [–],
 λ_v – współczynnik oporów terenu zalewowego nieporośniętego drzewami [–].

- Institutes für Wasserbau, Konstruktiver Wasserbau und Wasserwirtschaft, Darmstadt.
 KANEMANN J. 1987: *Neuere Erkenntnisse über das hydraulische Widerstandsverhalten von durchströmter starrer Vegetation*. Wasserwirtschaft – Wassertechnik, 8 s. 187–190.
 KNIGHT D.W., SHIONO K. 1990: *Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel*. Journal of Hydraulic Research, vol. 28, No 2, s. 175–196.
 KOMORA J. 1981: *Vplyv stromových porastov na odvádzanie povodni v inundovaných územiach riek*. Vodohospodarsky Časopis, 29, 5.
 KÖNEMANN N. 1980: *Der wechselseitige Einfluß von Vorland und Flußbett auf das Widerstandsverhalten offener Gerinne mit gegliederten Querschnitten*. Rozprawa doktorska, Darmstadt.
 KUBRAK J., ŻBIKOWSKI A. 1995: *Uwagi o stanie badań warunków przepływu w korytach dwudzielnych*. Gospodarka Wodna, 3, s. 53–56.
 LINDNER K. 1982: *Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen*. Mitteilungen aus dem Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig.
 PASCHE E. 1984: *Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeit ihrer mathematischen Erfassung*. Rozprawa doktorska RWTH Aachen.
 PATT H. 1995: *Der naturnahe Gewässerausbau*. Rozprawa habilitacyjna, Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr, Monachium.
 PETRYK S., BOSMAJIN G. 1975: *Analysis of flow through vegetation*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY7.
 RAJARATNAM N., ACHMADI R.M. 1979: *Interaction between main channel and flood/plain flows*. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 105, No HY5, s. 573–589.
 RICKERT K. 1986: *Der Einfluss von Gehölzen auf das Abflussverhalten in Fließgewässern*. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover.
 ROUVÉ G., DFG DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1987: *Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau Ergebnisse aus Schwerpunktprogramm „Antropogene Einflüsse auf hydrologische Prozesse“*, Band 2.
 SCHUMACHER F. 1995: *Zur Durchfußberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer*. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Mitteilung 127, Technische Universität Berlin.

- SELLIN R.J.H. 1964: *A laboratory investigation into the interaction between flow in the channel of a river and that of its flood plain*. La Houille Blanche 7; 793–801.
- SHIONO K., KNIGHT D.W. 1991: *Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel*. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 222, s. 617–646.
- TOMINAGA A., NEZU I. 1991: *Turbulent structure in compound open channel flow*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117; 21–41.
- VINCENT J. 1984: *Vplyv porastov na rýchlost vody pri úpravách tokov a bystrin*. Vodni hospodárstvi, 4.

Summary

Remarks concerning the state of investigations into condition of the flow in channels with compound cross-section overgrown by trees. The impact of trees into flow condition in channel is discussed. The results of laboratory in investigations and recommendations for farther investigations have been described.

Authors' address:

A. Koziół, E. Kubrak, K. Kuśmierczuk
Warsaw Agricultural University – SGGW
02–787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166
Poland