

*Tomasz Kaluża, Tomasz Tymiński*

## **ANALIZA SIŁY OPORU PRZEPIYU W STREFIE ROŚLINNOŚCI ELASTYCZNEJ**

---

### ***ANALYSIS OF THE FLOW RESISTANCE IN ZONES WITH FLEXIBLE VEGETATION***

#### **Streszczenie**

Roślinność o cechach sprężystych w odmienny sposób kształtuje warunki przepływu niż roślinność sztywna. Rozpoznanie charakterystyk hydraulicznych roślinności elastycznej stanowi istotny element oceny przepustowości terenów zalewowych. W pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w laboratorium wodnym Katedry Inżynierii Wodnej i Sanitarnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz Instytutu Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Przedmiotem badań wykonanych w korycie hydraulicznym była ocena oporów naturalnej roślinności odkształcającej się sprężysto pod wpływem przepływu wody. Do analizy tego zjawiska adaptowano model oporu przepływu dla roślinności wodnej, pozwalający wyznaczyć wypadkową siłę oporu roślinności, z uwzględnieniem przepływu przez strukturę roślinną i ponad nią. Odpowiadało to warunkom przepływu przez zarośla wierzbowe z udziałem liści.

**Słowa kluczowe:** rzeki, opory przepływu, roślinność sprężysta

#### ***Summary***

*This paper aims to improve the reliability of the determination of flow resistance and hydraulic effects of vegetation. For this reason, laboratory flume studies with living vegetation were employed. The most notable finding was that, when compared to leafless conditions, the presence of leaves increased the friction factor up. This was strongly dependent on the flow velocity. The work shows the results of studies conducted in water laboratory the Department of Hydraulic Engineering the Poznan University of Life Sciences and Institute of Environmental Engineering Wrocław University of Environmental and Life Sciences. Subject of research done on hydraulic was to assess the direct natural vegetation under the*

*influence of water flow. To analyze this phenomenon adopted the model of water resistance movement on vegetation. To designate determined resistance forces including vegetation structure and flow by above it.*

**Key words:** *rivers, flow resistance, flexible vegetation*

## WSTĘP

W obliczeniach hydraulicznych dla różnych grup roślin należy stosować odmienny model oddziaływania wody i elementów roślinnych. Przekłada się to naturalnie na odmienne metody oceny oporu przepływu. W przypadku drzew i niektórych wysokich krzewów chodzi o model sztywnego elementu roślinnego nieodkształcającego się pod wpływem przepływu wody. Z kolei roślinność niska i średnia pod wpływem wody może odkształcać się elastycznie. W przypadku roślinności elastycznej jej wpływ na warunki przepływu związany jest nie tylko z gęstością struktury roślinnej, ale i z jej właściwościami biomechanicznymi (moduł sprężystości). Uwzględnienie wpływu elastyczności roślinności stanowi podstawę wiarygodnej oceny warunków przepływu, w m. in. w strefie zakrzaczeń. Właściwości mechaniczne roślinności to ich zdolność do przeciwstawiania się odkształceniu oraz zdolność do sprężystego i plastycznego odkształcania się pod wpływem siły płynącej wody.

## CEL PRACY

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych w korycie hydraulicznym w laboratorium wodnym Katedry Inżynierii Wodnej i Sanitarnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz w laboratorium wodnym Instytutu Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Przedmiotem wykonanych badań była ocena oporów gałązek wikliny z udziałem liści odkształcających się sprężysto pod wpływem przepływu wody. Do analizy tego zjawiska adaptowano model oporu przepływu dla roślinności wodnej, pozwalający wyznaczyć wypadkową siłę oporu roślinności z uwzględnieniem przepływu przez strukturę roślinną i ponad nią. Odpowiadało to warunkom przepływu przez zarośla wierzbowe całkowicie zanurzone w wodzie. Wyniki badań pozwoliły zweryfikować przyjęty model wyznaczania siły oporu roślinności.

## MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

W przypadku małych ugięć, odkształcenie roślinności elastycznej pod wpływem działania wody uprościć można do rozwiązania dla łodygi w kształcie stożka ściętego obciążonej siłą skupioną [Tymiński i in. 2007]. W tym celu na-

leży znaleźć rozwiązanie opisujące linię ugięcia belki wspornikowej w zmiennym przekroju poprzecznym osiowo-symetrycznym (stożek ścięty). Schemat statyczny takiego modelu przedstawiono na rysunku 1. Zmiana promienia elementu roślinnego opisana jest funkcją liniową:

$$\rho_{(x)} = \frac{D-d}{2l}x + \frac{d}{2} \quad (1)$$

Wykorzystując równanie różniczkowe linii ugięcia obowiązujące w zakresie sprężystym w postaci:

$$EJ y'' = -M(x), \quad M(x) = -P \cdot x \quad (2)$$

uzyskano:

$$EJ_x y''(x) = +P \cdot x \quad (3)$$

przy czym moment bezwładności przekroju:

$$J_x = \frac{\pi \rho^4(x)}{4} \quad (4)$$

gdzie:

- E – moduł sprężystości elementu roślin [Pa],
- J – moment bezwładności przekroju poprzecznego elementu roślinnego [m<sup>4</sup>],
- d i D – skrajne średnice gałązki [m],
- P – obciążenie gałązki - siła skupiona [N].

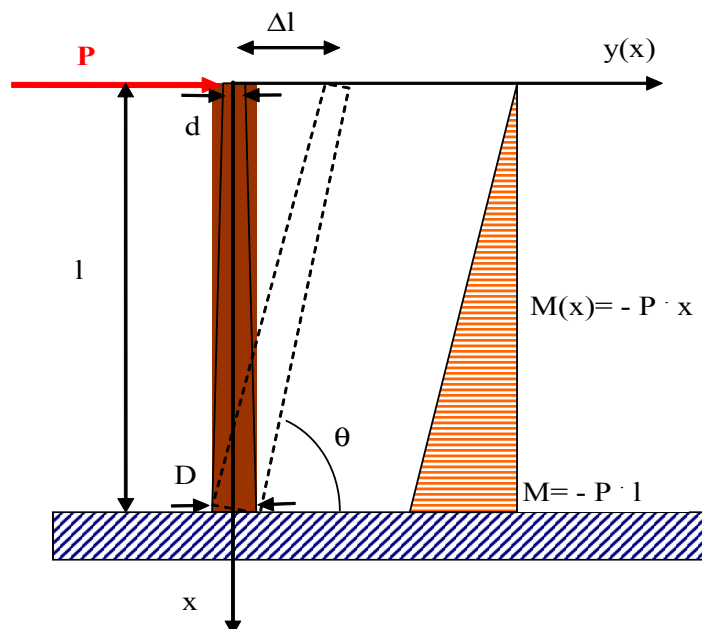
Z rozwiązania równania (3) wyznaczyć można strzałkę ugięcia  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \frac{Pl^3}{3EJ} \cdot \frac{D}{d} \quad (5)$$

gdzie:

$$J = \frac{\pi D^4}{64} \quad (6)$$

Wykorzystując rozwiązanie w postaci zależności (5) oraz znając strzałkę ugięcia  $\Delta l$  gałązki o skrajnych średnicach d i D przy obciążeniu P działającym na ramieniu l, wyznaczyć można wartość modułu sprężystości E.



**Rysunek. 1.** Schemat statyczny oraz przyjęte oznaczenia do wyznaczenia modułu sprężystości

**Figure 1.** Sketch for the used parameters and static schema to research the modulus of elasticity

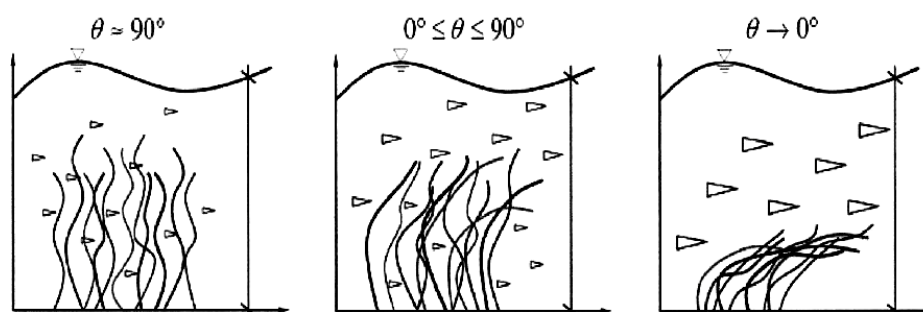
Obecność krzewów w obszarze przepływu wód wielkich stanowi istotny czynnik hydro- i morfodynamiczny, kształtujący opory przepływu. W ostatnich latach pojawiło się wiele metod przedstawiających ciekawe propozycje uwzględnienia szorstkości elementów roślinnych w obszarze przepływu. Uproszczonym podejściem do struktury roślinności krzewiastej było traktowanie jej jako zbioru sztywnych elementów cylindrycznych. Analizę wpływu takich elementów oporu na warunki ustalonego przepływu przedstawili Petryk i Bosmajian [1975]. Założyli oni podobnie jak Chézy czy też Manning, że spadek ciśnienia na odcinku koryta w warunkach założonego ruchu jednostajnego, ustalonego jest zrównoważony naprężeniami stycznymi na powierzchni dna, oraz roślinności niskiej. Wydzielili oni dodatkowo oprócz siły tarcia na ścianach i dnie koryta także siłę tarcia na powierzchni roślinnej  $F_{w,pi}$ , opisując ją za pomocą Newtonowskiego równania oporu:

$$F_{w,pi} = \frac{c_{w,i} \cdot \gamma \cdot u^2 \cdot A_{pi}}{2 \cdot g} \quad (7)$$

gdzie:

- $A_p$  – pole powierzchni rzutu roślin na płaszczyznę przekroju poprzecznego koryta [ $m^2$ ],
- $C_{w,i}$  – współczynnik oporu opływu pojedynczej rośliny [-],
- $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ],
- $u$  – średnia prędkość przepływu wody [ $m/s$ ],
- $\gamma$  – ciężar objętościowy wody [ $N/m^3$ ].

Wykorzystanie zależności (7) pozwoliło następnie Lindnerowi i Paschemu [Pasche 1984] wyprowadzić zależności opisujące wartości współczynnika oporu wywołanego roślinnością sztywną.



**Rysunek 2.** Odształcenie roślin w zależności od prędkości przepływu [Milbradt, Schonert 2006]

**Figure 2.** Deflection plants depending on the flow velocity [Milbradt, Schonert 2006]

W odniesieniu do roślinności terenów zalewowych, w praktyce często obserwowane jest jej odkształcenie (elastyczne bądź trwałe) pod wpływem przepływu wody (rys. 2). W takich przypadkach zachodzi konieczność uwzględnienia biomechanicznych właściwości roślin. Dotyczy to zarówno roślinności elastycznej, takiej jak trawy, ale również w wielu przypadkach także krzewów. Ciekawą propozycję oceny wartości siły oporu przepływu dla roślinności elastycznej przedstawili Pasche i Deussfeld [2003]. Badali oni wpływ oddziaływania trawy morskiej (rys. 3) na rozkłady prędkości oraz współczynniki oporu w płytkich obszarach zatok morskich. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych udowodnili, że w przypadku materiału elastycznego, całkowita siła oporu przepływu wynika nie tylko z oporu przepływu przez strukturę roślinną (siła  $F_D$ ), lecz również w znacznym stopniu z szorstkiego oddziaływania powierzchni liści rośliny (siła  $F_S$ ):

$$F = F_D + F_S \quad (8)$$

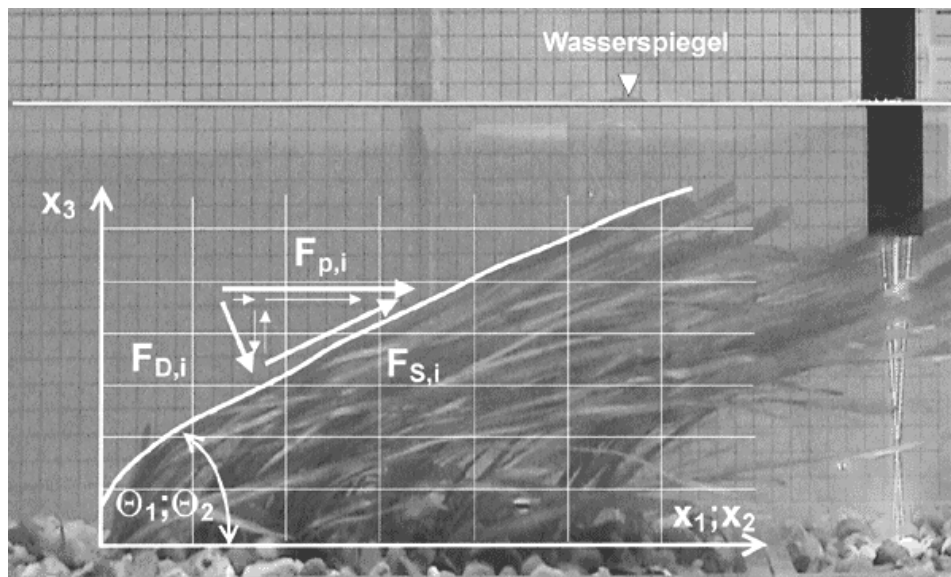
przy czym:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot C_D \cdot LAI \cdot l \cdot d \cdot \sin \theta \quad (9)$$

$$F_S = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot \lambda_p \cdot LAI \cdot l \cdot d \cdot \cos \theta \quad (10)$$

gdzie:

- $\lambda_p$  – współczynnik oporu powierzchni liści [-],
- $C_D$  – współczynnik oporu opływu grupy roślin, [-],
- LAI – indeks ulistowienia [-],
- $\theta$  – kąt pochYLENIA elementów roślinnych [°],
- $\rho$  – gęstość wody [kg/m<sup>3</sup>].



**Rysunek 3.** Przepływ ponad roślinnością elastyczną [Pasche, Deussfeld 2003]

**Figure 3.** Flow over flexible vegetation [Pasche, Deussfeld 2003]

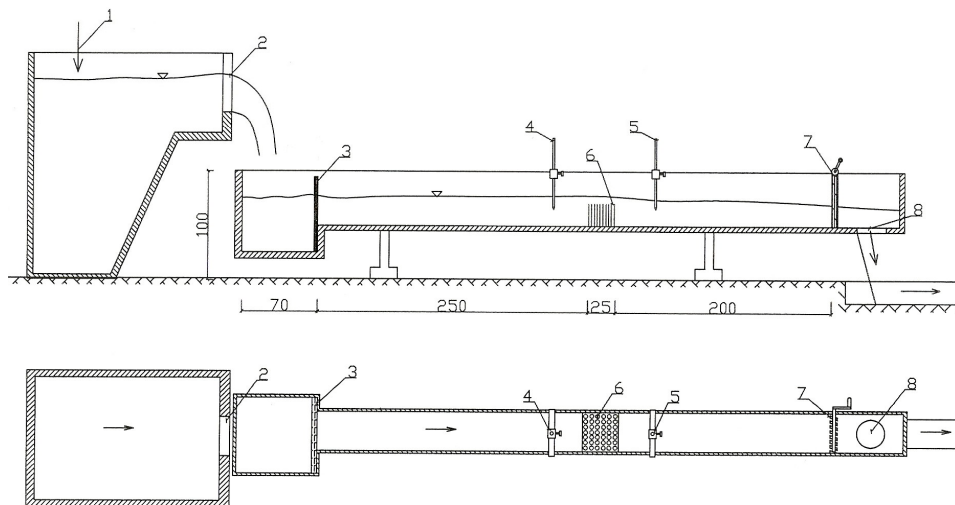
Wyznaczenie siły oporu przepływu na podstawie zależności (9 i 10) wymaga określenia indeksu powierzchni liściowej (Leaf Area Index – LAI). LAI jest jednym z podstawowych wskaźników w badaniach ekofizjologicznych roślinności. Wskaźnik ten definiuje się jako sumaryczny stosunek jednostronnej powierzchni wszystkich liści do powierzchni podłoża, nad którą się znajdują [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]. Długość  $l$  i szerokość  $d$  elementów roślinnych (liści, gałązek) przyj-

muje się jako wartości uśrednione. Kąt pochylenia elementów roślinnych  $\Theta$  zależy m.in. od gęstości materiału roślin  $\rho_r$ , długości elementów roślinnych  $l$ , sztywności  $EJ$ , gęstości struktury roślinnej  $LAI$ , prędkości przepływu  $u$  i liczby Reynoldsa  $Re$  [Pasche i Deußfeld 2003]:

$$\Theta = f\left(\frac{\rho - \rho_p}{\rho}, \frac{l_p}{h}, \frac{EJ}{\rho u^2 h^4}, LAI, Re\right) \quad (11)$$

### BADANIA LABORATORYJNE

W laboratorium wodnym Katedry Inżynierii Wodnej i Sanitarnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu przeprowadzone zostały wielowariantowe badania modelowe oddziaływania roślinności sprężystej na warunki hydrauliczne przepływu, które następnie były kontynuowane w laboratorium wodnym Instytutu Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Jednym z etapów tych badań były pomiary wykonane w stalowym korycie jednodzielnym, o przekroju prostokątnym o wymiarach (szer. x wys.) 0,50 x 0,70 m, całkowitej długości 6,00 m (rys. 4).



**Rysunek 4.** Schemat stanowiska pomiarowego (1 – zasilenie, 2 – kołowy przelew pomiarowy, 3 – siatka uspokajająca, 4,5 – wodowskazy szpilkowe, 6 – roślinność, 7 – żaluzje, 8 – odpływ)

**Figure 4.** Scheme of measurement stand (1 – supply pipeline, 2 – circular measuring weir, 3 – flow stabilizer, 4,5 – gauge, 6 – vegetation, 7 – weir, 8 – to sewers)

Do pomiaru natężenia przepływu wykorzystano przelew kołowy ( $D = 275$  mm) o dokładności  $\pm 0,5 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ , zainstalowany na zasilaniu koryta. Rozkłady prędkości miejscowych mierzono sondą elektromagnetyczną typu PEMS z dokładnością  $\pm 0,001 \text{ ms}^{-1}$ , a położenie zwierciadła wody i pozostałe wielkości liniowe (np. spiętrzenie  $\Delta h$ ) mierzono za pomocą dwóch wodowskazów szpilkowych o dokładności  $\pm 0,1$  mm.

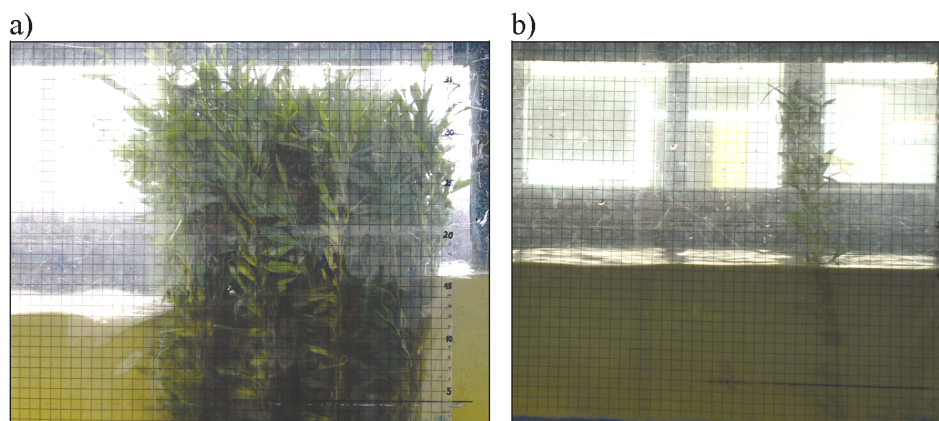
W korycie laboratoryjnym, do specjalnej konstrukcji w dnie, mocowane były modele zbiorowisk roślinnych o różnej geometrii przestrzennej, gęstości obsadzenia, średnicach i rozstawie łodyg. W tym celu wykorzystano naturalne gałązki wierzby. Przeszkody roślinne ze świeżych gałązek krzewów konstruowano przed każdą nową serią pomiarową, zachowując warunki zbliżone do naturalnych.

Na oszklonej pionowej ścianie koryta, na długości odcinka badawczego, zamontowana została przezroczysta folia z naniesioną siatką i podziałką centymetrową (fot. 1). Odczytywano na niej wstępną wartość strzałki ugięcia badanych roślin, którą następnie domierzano precyzyjnie z dokładnością  $\pm 0,1$  mm.

Oprócz rozbudowanych przestrzennie zbiorowisk roślinnych (fot. 1a), w korycie hydraulicznym badano również pojedyncze gałązki roślinności giętkiej w aspekcie oceny ich reakcji na parcie dynamiczne strumienia wody (fot. 1b).

Badania hydrauliczne naturalnej roślinności odkształcającej się sprężystie pod wpływem przepływu wody wykonano w następującym zakresie pomiarowym:

- zmienne natężenie przepływu w kanale w granicach  $5,0 \div 30,0 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ ,
- zmienne napełnienie koryta badawczego w przedziale  $14,7 \div 165,7$  mm, stały dla wybranej serii pomiarowej podłużny spadek dna koryta równy  $0,002$ .

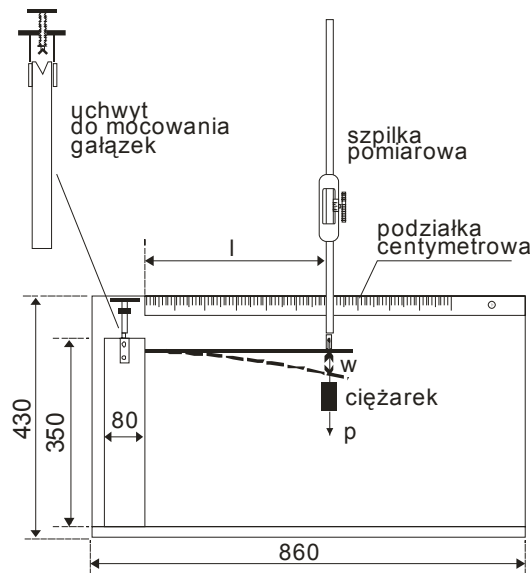


**Fotografia 1.** a) Badane zbiorowisko roślin, b) Badana pojedyncza gałązka wikliny  
**Photo 1.** a) Vegetative complex under investigation, b) Research of one simple branch of willow



## WYNIKI I ICH ANALIZA

Istotnym elementem przeprowadzonych badań roślinności giętkiej było określenie jej parametrów wytrzymałościowych. Uwzględniając kształt, wielkość i zmienność średnicy gałązek na długości, w Katedrze Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego UP w Poznaniu opracowano model i metodykę pozwalające na wyznaczenie modułu sprężystości elementów roślinnych [Tymiński i in. 2007]. Moduł sprężystości elementów roślinnych wyznaczono na podstawie analizy linii ugięcia belki wspornikowej przy zginaniu statycznym w zmiennym przekroju poprzecznym osiowo- symetrycznym (5). Idea pomiarów modułu sprężystości roślin pokazana została na rysunku 5. Szczegółowe informacje dotyczące metodyki i wyników badań znaleźć można w publikacjach autorów [Kałuża, Tyimiński 2006; Tyimiński i in. 2007].



**Rysunek 5.** Stanowisko badawcze do pomiaru modułu sprężystości  
(1 – uchwyt do mocowania gałązek, 2 – szpilka pomiarowa, 3 – podziałka centymetrowa,  
4 – strzałka ugięcia, 5 – ciężarek)

**Figure 5.** Research stand for measuring the modulus of elasticity  
(1 – fixture for twigs clamping, 2 – measurements needle, 3 – centimeters graduation,  
4 – deviation, 5 – weight)

Badania polegały na pomiarze strzałki ugięcia sztywno zamocowanych elementów roślinnych. W pierwszej serii przebadano 36 gałązek. Gałązki poddawane były narastającym obciążeniom poprzez zawieszanie w końcowej części

rośliny ciężarków. Z reguły wykonywano 4–5 pomiarów, dostosowując obciążenia do sztywności gałązki. Pomiar odkształcenia wykonywano za pomocą specjalnie przerobionej szpilki pomiarowej z dokładnością 0,1 mm. Pomiar długości ramienia siły wykonywano z dokładnością do 1 mm, a pomiar obciążenia z dokładnością do 0,001 g. Pomiar średnic gałązki w kształcie stożka ściętego: dolnej  $D$  (w punkcie zamocowania gałązki),  $d$  (w punkcie przyłożenia siły) wykonywano suwmiarką z dokładnością 0,1 mm ( $D_2 < d < D_1$ ). Badania wykonano dla gałązek świeżych (z liśćmi) i suchych (po 30 dniach suszenia). W ramach badań wyznaczono również ich wilgotność względną  $W_w$ . Uśrednione wyniki pomiarów (średnic, wilgotności i modułu sprężystości) przedstawiono w tabeli 1. Wyniki rozpatrywano jako próby losowe, dla których określano wartości średnie  $\bar{X}$ , odchylenie standardowe  $\sigma$ , współczynnik zmienności  $C_v$  oraz wartości maksymalne i minimalne z próby. Wilgotność względną  $W_w$  próbek świeżych wynosiła 59,09 %, a po przesuszeniu spadła do 8,23 %. Współczynnik zmienności z próby  $C_v$ , definiowany jako iloraz odchylenia standardowego i wartości średniej, w przypadku wilgotności względnej wynosił 0,086 zarówno dla próbek świeżych, jak i suchych. Wyliczony na podstawie równania (5) moduł sprężystości dla poszczególnych gatunków roślin był wartością średnią z próby dla wszystkich gałązek. Przy czym wartość dla każdej gałązki była średnią z pięciu prób przy różnym obciążeniu. Badania wykonano zarówno dla gałązek świeżych, jak i suchych. Moduł sprężystości wynosił dla wikliny w stanie naturalnym 3816 MPa. Po wysuszeniu wartość średniego modułu wzrosła i wynosiła dla 8682 MPa. Wartości te są nieco wyższe niż podawane w literaturze [Kokociński 2004] dla suchych próbek wierzby białej – 7200 MPa. Współczynnik zmienności próbek świeżych był dość duży i dla serii I wynosił 0,33. Po wysuszeniu wartości współczynnika zmienności zmniejszyły się do 0,21.

**Tabela 1.** Parametry geometryczne i moduły sprężystości badanych próbek roślin  
**Table 1.** Diameter and modulus elasticity of investigation twig plant

	D		d		W <sub>w</sub>		E	
	Świeże Fresh [cm]	Suche Dry [cm]	Świeże Fresh [cm]	Suche Dry [cm]	Świeże Fresh [%]	Suche Dry [%]	Świeże Fresh [MPa]	Suche Dry [MPa]
$\bar{X}$	5,49	4,74	3,85	3,12	59,09	8,23	3816	8682
$\sigma$	0,64	0,55	0,62	0,53	5,08	0,71	1259	1829
$C_v$	0,12	0,12	0,16	0,17	0,09	0,09	0,33	0,21
max.	7,10	6,35	5,21	4,30	69,52	9,45	9716	14181
min	4,17	3,77	2,64	2,05	48,08	6,07	2164	5592

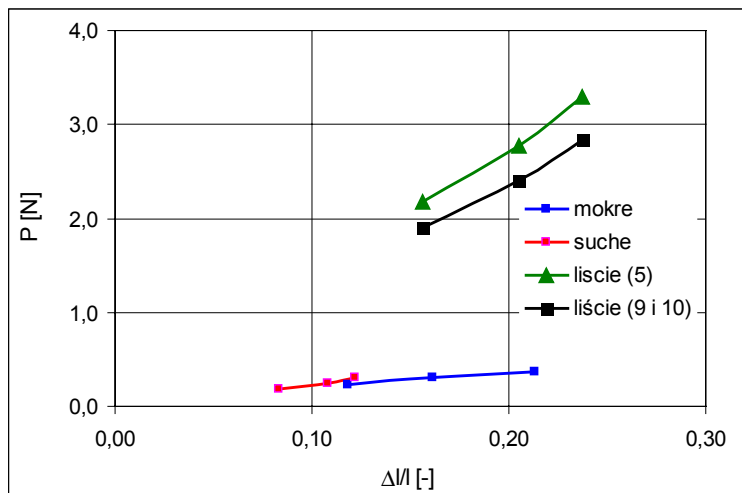
Gałązki, dla których wyznaczono moduł sprężystości badane były następnie w korycie hydraulicznym. Wykonano badania dla gałązek świeżych z liśćmi, świeżych bez liści i suchych. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych (odkształcenia pod wpływem naporu wody) z zależności (5) wyznaczano wartości siły oporu przepływu.

Dodatkowo w badaniach uwzględniono ilość i pole powierzchni liści dla każdej gałązki. Pozwoliło to na określenie wskaźnika LAI. Na podstawie odkształcenia pod wpływem przepływu wody określono również wartości kąta  $\Theta$  oraz tzw. odkształcenia względnego  $\Delta l/l$ . Znając wartości średniej prędkości przepływu i wykorzystując zależności (9 i 10), wyliczono wartość całkowitej siły oporu. W założeniach przyjęto współczynnik oporu przepływu dla powierzchni liści równy  $\lambda = 0,001$ . Natomiast iloczyn  $l$  i  $d$  we wzorach (9 i 10) zastąpiono sumaryczną powierzchnią roślin. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Siły oporu przepływu dla próbek roślin  
**Table 2.** Flow resistance forces of investigation twig plant

	Bez liści / leafless		Z liśćmi / leaf		
	P Siła wg (5) Świeże/ Fresh [N]	P Siła wg (5) Suche / Dry [N]	LAI [-]	Siła wg (5) [N]	Siła wg (9 i 10) [N]
$\bar{X}$	0,28	0,23	0,52	3,70	3,82
$\sigma$	0,06	0,05	0,15	1,39	2,00
$C_v$	0,22	0,23	0,28	0,38	0,52
max.	0,44	0,38	0,81	9,18	10,19
min	0,16	0,13	0,30	1,60	1,08

W przypadku gałązek pozbawionych liści różnice wartości siły oporu wyznaczone na podstawie zależności (5) są bardzo małe (0,28 N dla świeżych i 0,23 dla suchych). Natomiast istotny okazał się wpływ ulistnienia. Średnia wartość LAI badanych gałęzi wynosiła 0,52. Wartości siły oporu przepływu dla gałązek ulistnionych były o rząd wielkości większe. Siły wyznaczone na podstawie przekształcenia równania (5) oraz policzone wg zależności (9 i 10) były podobne i wynosiły odpowiednio 3,70 N i 3,82 N. Przy czym wartości współczynnika zmienności dla metody Pasche i Deussfelda [2003] były nieco większe – 0,52 w stosunku do wartości wyliczonych na podstawie modułu sprężystości i odkształcenia – 0,38. Na rysunku 6 przedstawiono przykładową zależność siły oporu przepływu od odkształcenia względnego dla gałązki nr 2.



**Rysunek 6.** Zależność siły oporu od odkształcenia względnego gałązki nr 2  
**Figure 6.** Relationship between  $\Delta/l$  and Flow resistance forces of investigation twig plant 2

#### PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Brak jest w literaturze szczegółowych wyników badań nad parametrami fizycznymi i mechanicznymi naturalnej elastycznej roślinności terenów zalewowych. Pewne uogólnione dane dotyczą traw i roślin zielnych. Przedstawione wyniki doświadczeń związanych z badaniem podstawowych własności fizycznych i mechanicznych gałązek wikliny wskazują na dużą naturalną zmienność parametrów próbek pobranych w ramach tej samej rośliny. Próby generalnego potraktowania parametrów wytrzymałościowych naturalnej roślinności terenów zalewowych mogą prowadzić do znacznych błędów. Istotny jest wpływ wilgotności na zmianę własności fizycznych i mechanicznych roślin, w tym szczególnie na elastyczność. Na wielkość oporów przepływu znacząco wpływa obecność liści, które powodują wzrost siły oporu. Elastyczne odkształcenie roślin wymaga dodatkowego uwzględniania siły tarcia na powierzchni liści. Zaproponowana w pracy metoda oceny siły oporu przepływu, uwzględniająca gęstość ulistnienia (LAI) oraz kąt odkształcenia elementu roślinnego, stanowi może propozycję rozwoju metodyki badań nad wpływem roślinności elastycznej na warunki przepływu.

---

**BIBLIOGRAFIA**

- Kałuża T., Tyimiński T. *Określenie parametrów wytrzymałościowych naturalnej roślinności krzewiastej*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, seria Inżynieria Środowiska XV, nr 534, Wydawnictwo AR Wrocław, 2006, s. 301–312.
- Kokociński W. *Drewno pomiary własności fizycznych I mechanicznych*, Wydawnictwo Prodrug, Poznań 2004.
- Milbradt P., Schonert T. *Ökologische Modellkomponenten in hydrodynamischen Simulationen*, Wasserbaukolloquium 2006. Strömungssimulation im Wasserbau, Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen Heft 32, 2006, s. 179–192.
- Pasche E. *Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung*. Mitt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 52, Aachen 1984.
- Pasche E., Deussfeld N. *Hydro- und Morphodynamik in Seegrasswiesen*. HANSA International Maritime Journal 5, 2003, p. 67–73.
- Petryk S., Bosmajian G. *Analysis of flow through vegetation*, Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE vol.101, no. HY7. 1975.
- Tyimiński T./red./, Kałuża T., Rembeza L. *Analiza wpływu roślinności sprężystej na warunki hydrauliczne przepływu w korytach zarośniętych. Tom 1: Właściwości mechaniczne roślin giętkich*. Monografia. Wydawn. Uniw. Przyrodn. we Wrocławiu, Wrocław 2007, s.82.
- Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, grant nr NN 523 5676 38

Tomasz Kałuża  
Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Tomasz Tyimiński  
Instytut Inżynierii Środowiska  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Recenzent: *Prof. dr hab. Laura Radczuk*