

ZRÓŻNICOWANIE PARAMETRÓW HYDRODYNAMICZNYCH CIEKU W MIEJSCU ZDEPONOWANIA GRUBEGO RUMOSZU DRZEWNEGO

Artur Radecki-Pawlik, Monika Wieczorek, Karol Plesiński
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy opisano badania nad zróżnicowaniem parametrów hydrodynamicznych w rejonie występowania grubego rumoszu drzewnego oraz dwóch łach korytowych utworzonych przed i za tym rumoszem. Przedstawiono kolejno wartości zmierzonych prędkości płynącej wody na różnych wysokościach w pionach tachimetrycznych, z których to następnie obliczono naprężenia styczne oraz pozostałe parametry hydrodynamiczne, charakterystyczne dla otoczenia tworzących się form korytowych. Uzyskane wyniki pokazują, że zalegający w korycie rumosz drzewny znacząco wpływa na parametry przepływu w rzece oraz jest przyczyną powstawania obydwu łach.

Słowa kluczowe: rumosz drzewny, łacha korytowa, parametry hydrodynamiczne, naprężenia styczne, prędkość dynamiczna

WSTĘP

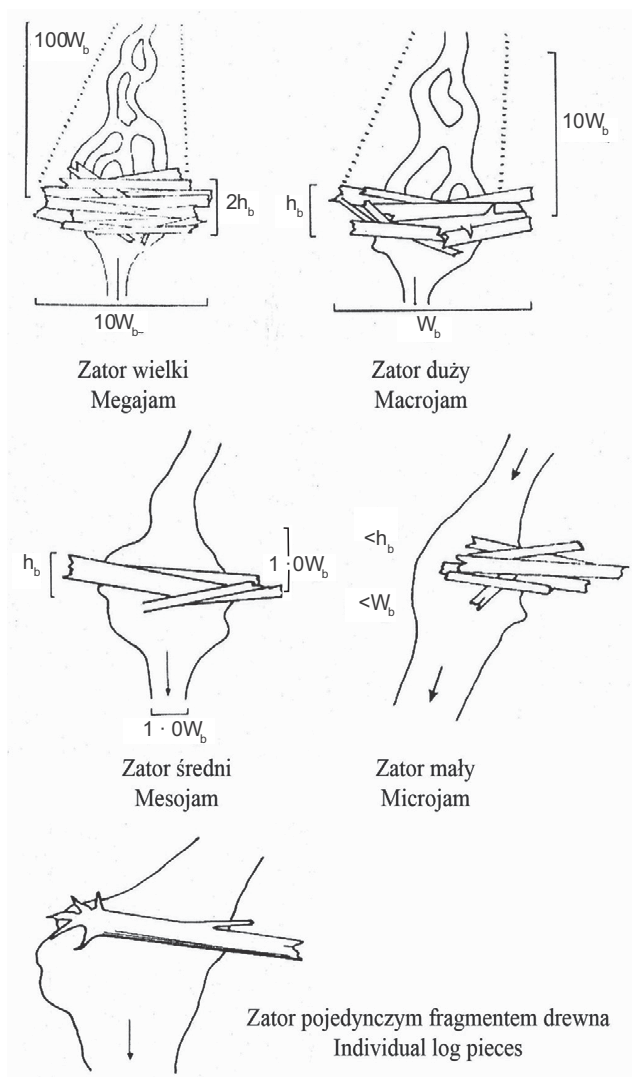
Powalone drzewa zalegające w korycie rzeki stanowią integralny składnik systemów rzecznych. Rumosz drzewny wywiera istotny wpływ na kształtowanie się fizycznych cech cieków górskich. Obecność rumoszu sprzyja zwiększeniu morfologicznego zróżnicowania tych cieków. Mimo pozytywnego znaczenia powalonych drzew dla funkcjonowania ekosystemów rzecznych, ich dokładna rola była do niedawna słabo rozpoznana. Wynikało to z wycinania nadbrzeżnych lasów w dolinach rzek oraz usuwania powalonych kłód z koryta cieków. Takie działania miały zapobiec zmniejszeniu przepustowości koryta w trakcie przejścia fali wezbraniowej oraz pomóc w uniknięciu uszkodzeń budowli hydrotechnicznych i w pozyskaniu drewna opałowego [Wyźga i in. 2003].

W latach 50. i 60. XX wieku podjęto kroki mające na celu usuwanie powalonych drzew z koryt rzek i potoków spływających z Gór Kaskadowych i Gór Nadbrzeżnych w USA. Miało to na celu ułatwienie migracji ryb lososiowatych na tarło. Podjęte działania

Adres do korespondencji – Corresponding authors: prof. dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik, mgr inż. Monika Wieczorek, mgr inż. Karol Plesiński, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 24/28, mradeck@cyf-kr.edu.pl, k.plesinski@ur.krakow.pl.

przyniosły jednak odwrotny skutek, a populacja ryb drastycznie zmalała. Ta niefortunna akcja dała impuls do zapoczątkowania badań nad rumoszem drzewnym zdeponowanym w korytach rzecznych [Wyźga i in. 2003, Wyźga 2007].

Podział rumoszu drzewnego podany przez Churcha [1996] jest następujący (przez zator należy rozumieć nagromadzony w korycie ciekę rumoszu drzewny): zator wielki rumoszu drzewnego, zator duży rumoszu drzewnego, zator średni rumoszu drzewnego, zator mały rumoszu drzewnego, zator pojedynczym fragmentem drewna (rys. 1).



Rys. 1. Zatory z rumoszu drzewnego [Radecki-Pawlik 2011]

Fig. 1. Woody debris examples [Radecki-Pawlik 2011]

h_b – głębokość koryta przy przepływie wody brzegowej – depth of channel during bankfull discharge

W_b – szerokość zwierciadła wody przy przepływie odpowiadającym stanowi wody brzegowej – width of water surface during bankfull discharge

- Formy występowania rumoszu drzewnego przedstawili z kolei Wyźga i in. [2003]:
- kłody będące pojedynczymi pniami lub fragmentami pni, konarów i korzeni o długości większej od 1 m i średnicy mierzonej w połowie długości większej od 10 cm;
 - krzewy i drzewa stanowiące zdeponowane w ciekach krzewy oraz drzewa z zachowaną koroną często także wiązką korzeni, cechujące się strukturą przestrzenną;
 - zwały będące różnorodnymi mieszaninami pni, konarów, gałęzi, korzeni wraz z materiałem mineralnym i drobniejszym materiałem organicznym.

Celem niniejszego artykułu jest charakterystyka zmian parametrów hydrodynamicznych w miejscu zdeponowania rumoszu drzewnego w ujściowym odcinku rzeki Raby oraz jego oddziaływanie na morfologię koryta cieków.

OPIS BADANEJ ZLEWNI

Raba jest prawobrzeżnym dopływem górnej Wisły. Przepływa przez trzy regiony fizjograficzne: Beskidy, Pogórze Karpackie i Kotlinę Sandomierską. Jej bieg dzieli się na 3 zasadnicze części:

- bieg górny w obrębie Beskidów o długości 60 km i średnim spadku 8,5‰,
- bieg środkowy w obrębie Pogórza o długości 34 km i średnim spadku 2,3‰,
- bieg dolny w obrębie Kotliny Sandomierskiej o długości 43 km i średnim spadku 0,6‰.

Obszar źródłowy Raby znajduje się w Gorcach na wysokości 780 m n.p.m. na zachodnim stoku Obidowej. Wypływa ona w okolicach Sieniawy koło Rabki, a uchodzi do Wisły w 134,7 km jej biegu, na wysokości 180 m n.p.m., w pobliżu Uścia Solnego. Powierzchnia zlewni wynosi 1537,1 km², z czego 86% znajduje się w strefie karpackiej. Najwyższym punktem zlewni jest Turbacz (1310 m n.p.m.) w masywie Gorców.

Zlewnia Raby ma urozmaiconą budowę geologiczną. Zdecydowana większość jej obszaru leży w obrębie masywu fliszowych Karpat zewnętrznych. Jedynie mała północna część zlewni położona jest na obszarze zapadliska przedkarpackiego. Na terenie Karpat fliszowych w obrębie zlewni Raby występują cztery płaszczowiny: magurska, dukielsko-grybowska, śląska i podśląska.

Na obszarze teras zalewowych rzeki Raby i jej dopływów zalegają głównie mady rzeczne o składzie mechanicznym gliniasto-pyłowym, gliniasto-iłowym oraz rzadziej piaszczysto-gliniastym, które są zaliczane do typów i podtypów gleb mezotroficzno-eutroficznych pochodzenia aluwialnego. Obszar Pogórza Karpackiego, gdzie przeprowadzono badania, pokrywają gleby gliniasto-szkieletowe. Są to głównie szkieletowe gleby kwaśne i wylugowane, brunatne bielcowane oraz gleby skryto bielcowe i bielcowe, często z przebarwieniami gliniasto-ilastymi lub kamienisto-rumoszowymi. Wyjątek stanowią bardziej płogie odcinki stoków zbudowane z warstw podmagurskich z okrywą gleb gliniasto-ilastych słabo lub średnio szkieletowych [Gładki 1976].

METODYKA

Badania zostały przeprowadzone w pobliżu ujścia rzeki Raby do Wisły w miejscowości Uście Solne. Przedmiotem badań była drewniana kłoda sklasyfikowana jako zator pojedynczym fragmentem drewna, znajdująca się w korycie rzeki i jej wpływ na procesy zachodzące w badanym odcinku koryta. Zarówno przed, jak i za przeszkodą utworzyły się łachy korytowe.



Rys. 2. Rumosz drzewny zdeponowany w rzece Rabe (fot. A. Radecki-Pawlik)

Fig. 2. Woody debris located in Raba River (photo A. Radecki-Pawlik)

W celu zrozumienia przebiegu procesów fluwialnych oraz zmian morfologicznych, a także określenia parametrów hydrodynamicznych w korycie cieką pod wpływem badanego zatoru drzewnego konieczne było zmierzenie rozkładu prędkości wody nad dnem cieką w rejonie oddziaływania zatoru. Pomiarą wykonano za pomocą urządzenia NAUTILUS-2000 firmy OTT-Hell Electronic, którego zakres pomiarowy wynosi 0,001–10 m · s⁻¹ zgodnie z zaleceniami Jarretta [1991]. Lokalizację punktów pomiarowych w okolicach rumoszu drzewnego przedstawiono na rys. 3.

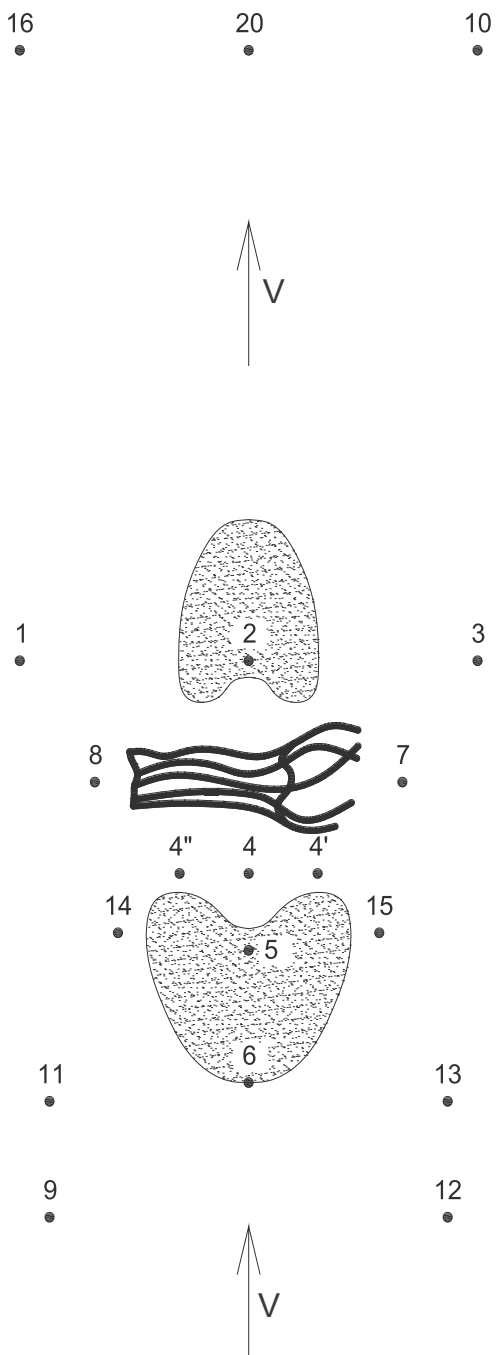
Pomiary prędkości chwilowej umożliwiły wyznaczenie następujących wielkości hydraulicznych: prędkości średniej, prędkości dynamicznej, naprężeń stycznych, liczby Froude'a oraz liczby Reynoldsa (w pionie i tzw. ziarnowej).

Obliczenia naprężeń stycznych wykonano na podstawie wykresów rozkładów prędkości nad dnem cieką w układzie półlogarytmicznym. Z profilu prędkości można znaleźć wartość prędkości dynamicznej, z równania [Gordon i in. 1992]:

$$V_* = \frac{a}{5,75} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

gdzie:

- a – współczynnik nachylenia prostej $v = f(h)$ przyjmującej postać równania $y = ax + b$ (gdzie: x – wysokość nad dnem na której wykonano pomiar prędkości;
- b – wyraz wolny równania).



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych
Fig. 3. Arrangement of measuring points

Obliczona wartość prędkości dynamicznej posłużyła do wyznaczenia sił działających na dno ciekłu, czyli naprężeń stycznych, wg wzoru:

$$\tau = \rho \cdot (V_*)^2 \text{ [N} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

gdzie:

$$\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 - \text{gęstość wody.}$$

Następnie wyznaczono liczbę Froude'a przy głębokości średniej oraz maksymalnej, a także liczby Reynoldsa (odpowiednio dla głębokości w pionie pomiarowym oraz dla wysokości ziarnowej):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} [-]$$

gdzie:

- v – prędkość wody, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- h – napelnienie w korycie, m ,
- g – przyspieszenie ziemskie, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} [-]$$

gdzie:

- v – prędkość wody, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- d – promień hydrauliczny koryta ciekłu, lub wielkość cząstek przy dnie, m ,
- ν – kinetyczny współczynnik lepkości, $\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

W celu ułatwienia dyskusji wyniki badań przedstawiono w postaci tabel, prezentując w nich wartości parametrów hydrodynamicznych.

Tabela 1 przedstawia pomierzone i obliczone parametry hydrauliczne w trzech pionach pomiarowych. Omawiane punkty znajdują się w odległości 35 m poniżej przeszkody, poza tworzącą się łachą. Punkty 16 i 10 znajdują się w odległości 10 m od brzegów ciekłu, natomiast punkt 20 znajduje się w głównym nurcie rzeki.

W punkcie 16 prędkość dynamiczna wynosi $V_* = 0,028 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a naprężenia styczne są równe $\tau_0 = 0,765 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, co może powodować ruch drobnego materiału dennego. Na podstawie liczby Froude'a $Fr = 0,232$ możemy stwierdzić, że woda porusza się ruchem nadkrytycznym. Liczba Reynoldsa $Re = 61\,582$ informuje, że w pionie pomiarowym występuje ruch turbulentny. W punkcie 20 wartości prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych nie uległy znacznej zmianie i wynoszą odpowiednio: $V_* = 0,023 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $\tau_0 = 0,550 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Również wartości liczby Froude'a i Reynoldsa są bardzo zbliżone do wartości występujących w poprzednio omawianym punkcie pomiarowym. W pionie 10 nastąpił spadek prędkości dynamicznej do wartości $V_* = 0,015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz naprężenia stycznego do $\tau_0 = 0,221 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Liczba Froude'a ma podobną wartość jak w przypadku pozostałych punktów pomiarowych w tym przekroju. Gwałtownie wzrosła (w przybliżeniu trzykrotnie) liczba Reynoldsa $Re = 187\,404$, na co wpływ ma zwiększona głębokość wody. Występuje więc w tym miejscu większa turbulencja.

Tabela 1. Parametry hydrodynamiczne występujące w pionach pomiarowych numer 16, 20 i 10
 Table 1. Hydrodynamic parameters in measuring point no. 16, 20 and 10

Nr No.	H cm	h cm	V m · s ⁻¹			V _{sr}	V _{max}	V _*	τ N · m ⁻²	Re _{denna}	Re _{max}	Fr _{sr}	Fr _{max}
16	22	1	0,145	0,165	0,159	0,340	0,369	0,028	0,765	1187	61 582	0,232	0,251
		2	0,258	0,300	0,340								
		3	0,323	0,320	0,340								
20	20	1	0,226	0,213	0,270	0,326	0,375	0,023	0,550	1794	56 895	0,233	0,267
		2	0,267	0,254	0,275								
		3	0,281	0,272	0,290								
10	42	1	0,311	0,523	0,269	0,480	0,588	0,015	0,222	2108	187 404	0,237	0,290
		2	0,356	0,353	0,360								
		3	0,371	0,365	0,368								

Nr – numer punktu pomiarowego – number of measurement point,

H – głębokość wody – water depth, cm,

h – pomierzona głębokość – measurement depth, cm,

V – prędkość wody na różnych głębokościach – velocity water in deifference depth, m · s⁻¹,

V_{sr} – prędkość średnia – mean velocity, m · s⁻¹,

V_{max} – prędkość maksymalna – maximum velocity, m · s⁻¹

V_{*} – prędkość dynamiczna – dynamic velocity, m · s⁻¹,

τ – naprężenia styczne – shear stress, N · m²,

Re_{denna} – liczba Reynoldsa denna – Reynolds number, –,

Re_{max} – liczba Reynoldsa maksymalna – maximum Reynolds number, –,

Fr_{sr} – liczba Froude'a średnia – mean Froude number, –,

Fr_{max} – liczba Froude'a maksymalna – maximum Froude number, –.

Tabela 2. Parametry hydrodynamiczne występujące w pionach pomiarowych numer 1, 2 i 3

Table 2. Hydrodynamic parameters in measuring point no. 1, 2 and 3

Nr No.	H cm	h cm	V m · s ⁻¹			V _{sr}	V _{max}	V _*	τ N · m ⁻²	Re _{denna}	Re _{max}	Fr _{sr}	Fr _{max}
1	27	1	0,142	0,209	0,154	0,343	0,367	0,023	0,548	1278	75 168	0,211	0,225
		2	0,211	0,267	0,290								
		3	0,328	0,290	0,334								
2	21	1	0,139	0,135	0,150	0,190	0,245	0,007	0,051	1073	39 065	0,133	0,171
		2	0,155	0,173	0,185								
		3	0,187	0,192	0,160								
3	49	1	–	–	–	0,556	0,586	0,008	0,069	3303	218 018	0,254	0,267
		2	0,440	0,430	0,435								
		3	0,452	0,441	0,470								

Objaśnienia zob. tabela 1 – See Table 1 for explanation

Tabela 2 przedstawia pomierzone i obliczone parametry hydrauliczne w trzech pionach pomiarowych, które znajdują się w odległości 10 m poniżej zatoru roślinnego. Punkty 1 i 3 są oddalone o 5 m od łachy.

W pionie 1 prędkość dynamiczna wynosi $V_* = 0,023 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a naprężenia styczne $\tau_0 = 0,548 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Ruch wody jest nadkrytyczny $Fr = 0,233$, oraz turbulentny $Re = 56 895$. W punkcie 2 zanotowano spadek prędkości dynamicznej do $V_* = 0,007 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

oraz naprężeń stycznych do $\tau_0 = 0,0,51 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Również liczby Froude'a i Reynoldsa osiągnęły niższą wartość niż w poprzednim punkcie, wynosząc odpowiednio $Fr = 0,133$ i $Re = 39\,065$. Parametry te świadczą o występowaniu bardzo spokojnego ruchu turbulentnego. W punkcie 3 wartości prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych są zbliżone do wartości występujących w punkcie 2. Wynoszą one odpowiednio $V_* = 0,008 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $\tau_0 = 0,069 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Znacznemu wzrostowi uległa liczba Reynoldsa do wartości $Re = 218\,018$, a nieznacznie – liczba Froude'a, $Fr = 0,254$. W pionie nastąpił wzrost prędkości wody $V_{\text{sr}} = 0,556 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wzrosły również prędkości chwilowe i maksymalne. Naprężenia styczne występujące w trzech wymienionych pionach mają wpływ na akumulację materiału dennego oraz powstawanie łachy korytowej. Należy tu zwrócić uwagę szczególnie na spadek wartości τ w punktach 2 i 3.

Tabela 3. Parametry hydrodynamiczne występujące w pionach pomiarowych numer 7 i 8
Table 3. Hydrodynamic parameters in measuring point no. 7 and 8

Nr No.	H cm	h cm	V m · s ⁻¹	V _{sr}	V _{max}	V _*	τ N · m ⁻²	Re _{denna}	Re _{max}	Fr _{sr}	Fr _{max}		
7	57	1	0,142	0,160	0,122	0,202	0,202	0,004	0,017	1073	149 311	0,085	0,146
		2	0,155	0,163	0,160								
		3	0,164	–	0,170								
8	55	1	0,166	0,170	0,183	0,230	0,452	0,007	0,048	1314	188 895	0,099	0,195
		2	0,201	0,182	0,195								
		3	0,193	–	0,242								

Objaśnienia zob. tabela 1 – See Table 1 for explanation

Tabela 3 przedstawia pomierzone i obliczone parametry hydrauliczne w dwóch pionach pomiarowych, które zlokalizowane są przy zatorze roślinnym w odległości 80 cm od jego boków.

Odnotowano tu stosunkowo duże głębokości wody, które wynoszą ponad 0,5 m. W pionie 7 prędkość dynamiczna wynosi $V_* = 0,004 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a naprężenia styczne $\tau_0 = 0,017 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Liczba Froude'a to $Fr = 0,085$, natomiast liczba Reynoldsa $Re = 149\,311$ świadczy o występowaniu ruchu turbulentnego. W pionie 8 wartość prędkości dynamicznej i naprężenia stycznego wynosi odpowiednio $V_* = 0,007 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $\tau_0 = 0,048 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Wielkości liczby Froude'a i Reynoldsa są zbliżone do wartości z punktu 7, wynosząc odpowiednio $Fr = 0,099$ i $Re = 188\,895$. Na ich podstawie możemy określić ruch wody jako nadkrytyczny i turbulentny. Niskie wartości prędkości dynamicznej oraz naprężeń stycznych świadczą o braku ruchu materiału dennego.

W pobliżu łachy przed zatorem roślinnym, w jej cieniu zlokalizowano pion 4, 4' i 4". W punkcie 4 występuje wsteczny przepływ wody, o czym świadczą ujemne wartości prędkości chwilowej. Prędkość dynamiczna wynosi $V_* = 0,0005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a naprężenia styczne osiągają w tym punkcie najniższą wartość $\tau_0 = 0,0002 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Taka wartość naprężeń nie powoduje ruchu cząsteczek materiału dennego. Również liczba Froude'a oraz Reynoldsa osiągają niskie wartości, wynosząc odpowiednio $Fr = 0,002$ i $Re = 3189$. W punkcie 4' umieszczonym po lewej stronie łachy nastąpił wzrost prędkości dynamicznej do wartości $V_* = 0,005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz naprężeń stycznych do wartości $\tau_0 = 0,026 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Identyczne wartości obydwu parametrów uzyskano w punkcie 4" zlokalizowanym po przeciwnej, prawej stronie łachy. W obu punktach stwierdzono również

Tabela 4. Parametry hydrodynamiczne występujące w pionach pomiarowych numer 4, 4', 4'', 14, 15, 5, 6

Table 4. Hydrodynamic parameters appear in measuring point no. 4, 4', 4'', 14, 15, 5, 6

Nr No.	H cm	h cm	V m · s ⁻¹			V _{sr}	V _{max} m · s ⁻¹	V _*	τ N · m ⁻²	Re _{denna}	Re _{max}	Fr _{sr}	Fr _{max}
4	60	1	-0,002	-0,002	-0,007	0,005	0,007	0,0005	0,0002	28	3189	0,002	0,003
		2	-0,005	-0,005	0,007								
		-	-	-	-								
4'	58	1	0,001	0,010	0,008	0,328	0,520	0,005	0,026	48	228 997	0,138	0,218
		2	0,008	0,010	0,023								
		3	0,035	0,025	0,028								
		4	0,045	0,040	0,052								
4''	59	1	0,001	0,002	-0,003	0,354	0,494	0,005	0,026	15	221 149	0,147	0,205
		2	0,005	0,008	0,009								
		3	0,020	0,011	0,031								
		4	0,035	0,058	0,040								
14	28	1	0,245	0,279	0,250	0,417	0,462	0,015	0,240	1959	98 149	0,251	0,279
		2	0,283	0,285	0,273								
		3	0,354	0,376	0,360								
15	30	1	0,303	0,311	0,320	0,546	0,590	0,020	0,418	2364	134 467	0,318	0,344
		2	0,382	0,437	0,418								
		3	0,433	0,440	0,437								
5	22	1	0,105	0,127	0,137	0,505	0,570	0,049	2,447	934	95 269	0,344	0,388
		2	0,327	0,314	0,327								
		3	0,424	0,456	0,428								
6	28	1	0,321	0,253	0,267	0,435	0,496	0,022	0,472	2128	105 377	0,262	0,299
		2	0,370	0,352	0,367								
		3	0,446	0,440	0,369								

Objaśnienia zob. tabela 1 – See Table 1 for explanation

wzrost liczby Reynoldsa do wartości $Re = 228\ 997$ w punkcie 4' i $Re = 221\ 149$ w punkcie 4'', co świadczy o wystąpieniu ruchu turbulentnego. Liczba Froude'a w punkcie 4' wynosi $Fr = 0,138$, natomiast w punkcie 4'' $Fr = 0,147$. Bezpośrednio przed zatorem roślinnym stwierdzono największe głębokości wody wynoszące $H = 60$ cm dla punktu 4, $H = 58$ cm dla 4' oraz $H = 59$ cm dla 4''. Dodatkowo w tych pionach pomierzono najniższą prędkość wody, która zawierała się w przedziale od 0,007 do 0,058 m · s⁻¹.

Na szczycie łachy znajduje się punkt 5. Następuje w tym miejscu wyraźne wypłylenie koryta do 22 cm. Prędkość dynamiczna wynosi $V_* = 0,049$ m · s⁻¹. Naprężenia styczne osiągnęły wartość $\tau_0 = 2,447$ N · m⁻², co umożliwia poruszenie cząsteczek o średnicy większej niż 2 mm, a więc drobnego żwiru. Liczba Froude'a wynosi $Fr = 0,344$, wskazując na ruch nadkrytyczny. Liczba Reynoldsa $Re = 95\ 269$ świadczy o występowaniu ruchu turbulentnego.

Na krańcu łachy znajduje się punkt 6, gdzie w porównaniu w punktem 5 następuje obniżenie wartości prędkości dynamicznej do $V_* = 0,022$ m · s⁻¹ oraz naprężeń stycznych do $\tau_0 = 0,470$ N · m⁻². Ruch wody nie zmienił się znacząco, ponieważ liczba Froude'a i Reynoldsa wynoszące odpowiednio $Fr = 0,262$ i $Re = 105\ 337$ są podobne jak w punkcie 5.

W bliskiej odległości punktu 4'' znajduje się punkt 14, a symetrycznie po przeciwnej stronie łachy zlokalizowano punkt 15 w bliskiej odległości punktu 4'. W porównaniu z punktem 4'' nastąpiło w punkcie 14 zwiększenie prędkości dynamicznej do wartości

$V_* = 0,015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Naprężenia styczne także uległy wzrostowi, wynosząc w tym punkcie $\tau_0 = 0,240 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, są jednak mniejsze niż w punktach 5 i 6. Również w punkcie 15 nastąpił wzrost prędkości dynamicznej w porównaniu z punktem 4' do wartości $V_* = 0,020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz naprężenia stycznego do $\tau_0 = 0,418 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Liczby Froude'a i Reynoldsa w punktach 14 i 15 przyjmują zbliżone wartości i wynoszą odpowiednio $Fr = 0,251$, $Re = 98\ 149$ oraz $Fr = 0,318$, $Re = 134\ 467$. Zmniejszeniu ulegają także głębokości napełnienia, wynosząc w punkcie 14 $H = 28 \text{ cm}$, a w punkcie 15 $H = 30 \text{ cm}$.

Tabela 5. Parametry hydrodynamiczne występujące w pionach pomiarowych numer 11 i 13
Tabela 5. Hydrodynamic parameters appear in measuring point no. 11 and 13

Nr No.	H cm	h cm	V $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	V_{sr}	V_{max}	V_*	τ	Re_{dena}	Re_{max}	Fr_{sr}	Fr_{max}		
11	25	1	0,308	0,314	0,336	0,378	0,411	0,011	0,127	2425	78 079	0,241	0,263
		2	0,355	0,352	0,357								
		3	0,360	0,417	0,400								
13	45	1	0,352	0,299	0,000	0,520	0,587	0,037	1,351	1648	200 562	0,247	0,279
		2	0,362	0,298	0,390								
		3	0,455	0,447	0,452								

Objaśnienia zob. tabela 1 – See Table 1 for explanation

Punkty 11 i 13 zlokalizowano na skraju łachy przed zatorem roślinnym. W punkcie 11 nastąpił wzrost prędkości średnich oraz maksymalnych w porównaniu z punktem 6. Obniżyły się natomiast wartości prędkości dynamicznej do $V_* = 0,011 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz naprężeń stycznych do $\tau_0 = 0,127 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ względem punktu 6. Liczba Froude'a wynosi $Fr = 0,241$, a liczba Reynoldsa $Re = 78\ 079$. W punkcie 13 nastąpił znaczny wzrost naprężeń stycznych do wartości $\tau_0 = 1,351 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Pojawienie się naprężeń o takich wartościach może powodować ruch cząsteczek większych niż 1 mm i dostarczanie ich na tworzoną łachę. Wzrosła także wartość prędkości dynamicznej do $V_* = 0,036 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w porównaniu z poprzednio opisywanym punktem. Liczba Froude'a jest zbliżona do wartości z punktu 11 wynosząc $Fr = 0,247$, natomiast liczba Reynoldsa zwiększyła się ponad dwukrotnie – $Re = 200\ 562$, powodując ruch silnie turbulentny

Tabela 6. Parametry hydrodynamiczne występujące w pionach pomiarowych numer 9 i 12
Table 6. Hydrodynamic parameters appear in measuring point no. 9 and 12

Nr No.	H cm	h cm	V $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	V_{sr}	V_{max}	V_*	τ	Re_{dena}	Re_{max}	Fr_{sr}	Fr_{max}		
9	22	1	0,175	0,235	0,191	0,311	0,348	0,013	0,159	1521	58 186	0,212	0,237
		2	0,248	0,246	0,216								
		3	0,290	0,288	0,270								
12	47	1	0,185	0,195	0,298	0,564	0,618	0,026	0,686	1716	220 539	0,263	0,288
		2	0,308	0,310	0,317								
		3	0,465	0,354	0,366								

Objaśnienia zob. tabela 1 – See Table 1 for explanation

Punkty 9 i 12 oddalone są od łachy o 4,5 m w górę cieku. W miejscu tym nie tworzą się żadne formy denne, a dno jest płaskie. W pionie 11 wartości prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych są zbliżone do występujących w punkcie 11, wynosząc odpowied-

nio $V_* = 0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $\tau_0 = 0,127 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. W punkcie 12, znajdującym się na jednej linii z punktem 9, zaobserwowano wzrost prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych do wartości $V_* = 0,026 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $\tau_0 = 0,686 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Są one jednak niższe niż w punkcie 13. W obu pionach pomiarowych wartości liczby Froude'a są zbliżone i wynoszą $Fr = 0,212$ i $Fr = 0,263$ odpowiednio dla punktu 9 i 12. Liczba Reynoldsa w punkcie 9 wynosi $Re = 58\ 186$, natomiast w punkcie 12 nastąpił jej wzrost do wartości $Re = 220\ 539$.

We wszystkich pionach pomiarowych obliczono także liczbę Reynoldsa dla głębokości 1 cm, określaną jako denna. Na jej podstawie w większości pionów stwierdzono przepływ wody jako hydraulicznie szorstki. Jedynie w punktach 4, 4' i 4'' stwierdzono występowanie warunków przejściowych pomiędzy przepływem hydraulicznie szorstkim a hydraulicznie gładkim [Allen 2000].

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

1. Zator rośliny w postaci pojedynczej kłody powoduje zmiany warunków hydrodynamicznych i jest przyczyną akumulacji rumowiska rzecznoego oraz powstawania łach przed i za przeszkodą.
2. Przed zatorem utworzyła się łacha o kształcie barchanowym. Jej szczyt obsypany jest luźnym żwirem. Za zatorem również powstała łacha, ale o kształcie parabolicznym. Jest ona zbudowana z materiału drobniejszego niż łacha powstała przed zatorem. Szerokość obydwu łach jest zdeterminowana wielkością zatoru.
3. Największe naprężenia styczne zaobserwowano na szczycie łachy. Wynoszą one $\tau_0 = 2,447 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Natomiast najmniejsze wartości naprężeń stycznych zaobserwowano w punkcie zlokalizowanym w cieniu łachy przed przeszkodą, gdzie wynoszą one $\tau_0 = 0,0002 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.
4. Rumosz drzewny ma wpływ na warunki przepływu wody. Przed przeszkodą (punkt 4) zaobserwowano ujemne prędkości, co świadczy o przeciwpądowym przepływie wody. Dodatkowo w punktach zlokalizowanych bezpośrednio przed rumoszem (4, 4' i 4'') zaobserwowano znaczny spadek prędkości wody oraz stosunkowo duże przegłębienia spowodowane obecnością zatoru.
5. W cieniu łachy, przed zatorem roślinnym następuje wyraźne zmniejszenie wartości prawie wszystkich parametrów hydrodynamicznych. W punkcie 4 najniższe wartości osiągają: prędkość dynamiczną $V_* = 0,0005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, liczba Reynoldsa $Re = 3189$, naprężenia styczne $\tau_0 = 0,0002 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ oraz liczba Froude'a $Fr = 0,002$. W punkcie 4' najniższą wartość osiąga liczba Reynoldsa denna $Re_{\text{denna}} = 15$.

BIBLIOGRAFIA

- Allen P.A., 2000. Procesy kształtujące powierzchnię Ziemi. PWN Kraków.
- Church M., 1996. Channel morphology and typology. [W:] River flows and channel forms. Red. G. Petts, P. Carlow. Blackwell Science Oxford.
- Gładki H., 1976. Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie karpackich dopływów Wisły. Zesz. Nauk. AR Krak., ser. Rozpr. Habilit. 118.
- Gordon D.N., McMahon T.A., Finlayson B.L., 1992. Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists. Wiley and Sons London.

- Jarrett R., 1991. Wading measurements of velocity profiles. *Geomorphology* 4, 243–247
- Radecki-Pawlik A., 2011. *Hydrmorfologia rzek i potoków górskich. Działy wybrane*. Wyd. Uniwersytetu Rolniczego Kraków.
- Wyźga B., 2007. *Gruby rumosz drzewny: Depozycja w rzece górskiej, postrzeżanie i wykorzystanie do rewitalizacji cieków górskich*. IOP PAN Kraków.
- Wyźga B., Zawiejska J., Kaczka R., 2003. Znaczenie rumoszu drzewnego w ciekach górskich. *Aura* 11, 18–20

DIVERSIFICATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN CLOSE BY WOODY DEBRIS

Abstract. Along the paper, we described research on chosen hydrodynamic parameters in near woody debris and downstream and upstream of obstruction river bars, which were formed within the area of the debris. Values of velocities measured in the field served to calculate shear stresses and other hydrodynamic parameters, which are characteristic for the process of the river bars formation. The study was carried out in the Raba River in the South Poland.

The results show that the woody debris present on the river bed strongly influenced process of the formation of two channel bars and change the hydrodynamic parameters within the research reach.

Key words: woody debris, downstream and upstream of obstruction bar, hydrodynamic parameters, shear stress, dynamic velocity

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 16.02.2011