

Łukasz Bąk

**ZMIANA WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH
WZDŁUŻ UREGULOWANEGO ODCINKA
POTOKU SŁOMKA**

***SOME CHANGES OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS
ALONG TRAINED PART OF THE SŁOMKA STREAM***

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ prac regulacyjnych, wykonanych na odcinku potoku Słomka, na zmiany warunków hydrodynamicznych. W latach 2004-2005 wykonano badania, które obejmowały: pomiary przekrojów poprzecznych koryta oraz pobór i określenie składu granulometrycznego materiału dennego. Wyniki pomiarów wykorzystano do obliczenia następujących wielkości hydrodynamicznych: naprężenia styczne, moc strumienia, jednostkowa moc strumienia, średnia prędkość przepływu oraz intensywność transportu rumowiska dennego według równania Bagnolda. Następnie wykonano porównanie i analizę obliczonych parametrów. W sekcjach A₁, A₃ i A₅ zaobserwowano wzrost wartości rozpatrywanych wielkości po regulacji oraz nasilenie procesów erozyjnych. W pozostałych sekcjach wartości parametrów hydrodynamicznych pozostały na porównywalnym poziomie (sekcja A₄) lub się zmniejszyły (sekcja A₂). W przekrojach 2 i 9 stwierdzono wzrost procentowej zawartości frakcji żwirowej w materiale dennym. Średnica charakterystyczna d₅₀, w tych przekrojach, zmniejszyła się odpowiednio o 1,8 cm i 2,8 cm.

Słowa kluczowe: warunki hydrodynamiczne, regulacja rzek, stabilność koryta

Summary

The paper presents the influence of river training works, carried out on the part of the Słomka stream, on hydrodynamic conditions. The measurements carried out in 2004 and 2005 included following parameters: surveys of cross-section of the

channel and the granulometric composition of bed material. Results of these work were used to calculate the hydrodynamic condition as shear stress, stream power, unit stream power, mean velocity and finally bedload intensity transport (by Bagnold's formula). Then the comparison and analysis calculated parameters were performed. In sections A₁, A₃ and A₅ the increase of considering parameters and intensity of lateral erosion after regulation were observed. In the other sections these values remained at a comparable level (section A₄) or decreased (section A₂). In cross-section no. 2 and no. 9 the percentage contents of fine grains increased in comparison with measurement results made before regulation. The characteristic diameter $d_{50\%}$ in these sections considerably decreased by 1.8 cm and 2.8 cm respectively.

Key words: hydrodynamic conditions, river training, channel stability

WSTĘP

Największe zmiany systemów korytowych rzek i potoków karpackich obserwowane są podczas krótkotrwałych i intensywnych wezbrań. Nadwyżka mocy, jaką dysponuje strumień płynącej wody, wydatkowana jest wówczas na erozyjne pogłębianie dna (w warunkach niedociążenia strumienia), lub erozyjne rozmywanie skarp koryta. Intensywność i przebieg tych procesów warunkowany jest wieloma czynnikami naturalnymi, jak również antropogenicznymi. Do pierwszych możemy zaliczyć: odporność materiału budującego brzegi i dno koryta na erozję [Kaszowski 1965; Wollman, Bruschi 1961], wielkość wezbrania i czas jego trwania [Hooke 1979]. Do antropogenicznych np.: niekontrolowany pobór rumowiska, zmiany użytkowania zlewni oraz budowle hydrotechniczne.

Intensywność erozji bocznej oraz siła unoszenia wody są jednymi z parametrów branych pod uwagę przy projektowaniu zabudowy technicznej koryta i doborze materiałów do umocnień brzegów [Teisseyre 1977]. Szczególnie ważnym zagadnieniem jest utrwalenie zewnętrznych brzegów meandrów najbardziej narażonych na rozmywanie oraz możliwość występowania w ich sąsiedztwie znacznych przegłębień. Po prawidłowo zaprojektowanej regulacji oczekuje się szybkiego ustalenia nowych warunków równowagi hydrodynamicznej i ustabilizowania koryta. Trzeba jednak pamiętać, że każda ingerencja w naturalny system korytowy, jest bezpośrednią przyczyną zmian przebiegu i natężenia procesów fluwialnych, zarówno na odcinku objętym zabudową jak i poniżej tegoż odcinka, a proces dostosowywania się rzeki do nowych warunków nie przebiega zgodnie z regułami podanymi przez Schumma [Wyżga 1993].

Celem niniejszej pracy jest wykazanie wpływu zabudowy hydrotechnicznej potoku na zmianę warunków hydrodynamicznych przepływu. Obliczenia wybranych parametrów hydrodynamicznych i intensywności wleczenia sporządzono na podstawie wyników geodezyjnych pomiarów przekrojów poprzecznych oraz uziarnienia materiału dennego, wykonanych przed i po regulacji, na wybranym odcinku koryta potoku o długości 925 m.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU OBJĘTEGO POMIARAMI

Potok Słomka jest lewobrzeżnym dopływem Dunajca o długości 25,2 km, odwadniającym obszar o powierzchni 69,90 km². Zlewnia potoku położona jest w przedziale wysokości 375-888 m n.p.m. Źródła Słomki znajdują się w południowo-zachodniej części zlewni na wysokości 880,0 m n.p.m. W górnym biegu potok płynie zwartym i wciętym korytem o szerokości dna do 2,0 m [Bąk i in. 2007]. Dorzecze w tym rejonie zbudowane jest z piaskowców, łupków oraz utworów zwietrzelinowych. Pozostała część koryta wycięta jest w utworach aluwialnych. Na odcinku poniżej km 7+00 koryto potoku zostało uregulowane. System zabudowy składa się z zapory przeciwrumowiskowej o wysokości 2,5 m oraz z 51 stopni korekcyjnych o wysokości od 1,0 m do 2,0 m [Bąk i in. 2011]. W miejscach, gdzie niszczone były wysokie brzegi, wykonano brzegoskłony.

Znaczne spadki koryta i zmienne przepływy sprawiają, że Słomka zaliczana jest do cieków górskich, powodujących częste szkody, niszczących brzegi i infrastrukturę hydrotechniczną. Na podstawie kartowania, wykonanego w 2005 roku, stwierdzono liczne uszkodzenia istniejących stopni korekcyjnych, jak również przemieszczenie linii nurtu w planie nawet o kilkadziesiąt metrów w stosunku do wytyczonej trasy regulacyjnej.

Pomiarami, wykonanymi w latach 2004-2005, objęto fragment koryta położony między 5,0-6,0 km biegu cieku. Charakteryzował się on intensywną migracją boczną. Potok stwarzał realne zagrożenie dla infrastruktury drogowej oraz zabudowy mieszkaniowej w jego sąsiedztwie. Na przełomie 2004 i 2005 roku koryto potoku zostało uregulowane. Prace polegały na odsunięciu głównego nurtu od silnie erodowanych brzegów (odpowiednie wyprofilowanie przekrojów poprzecznych) oraz wypełnieniu meandrów materiałem rodzimym pochodzącym z dna koryta.

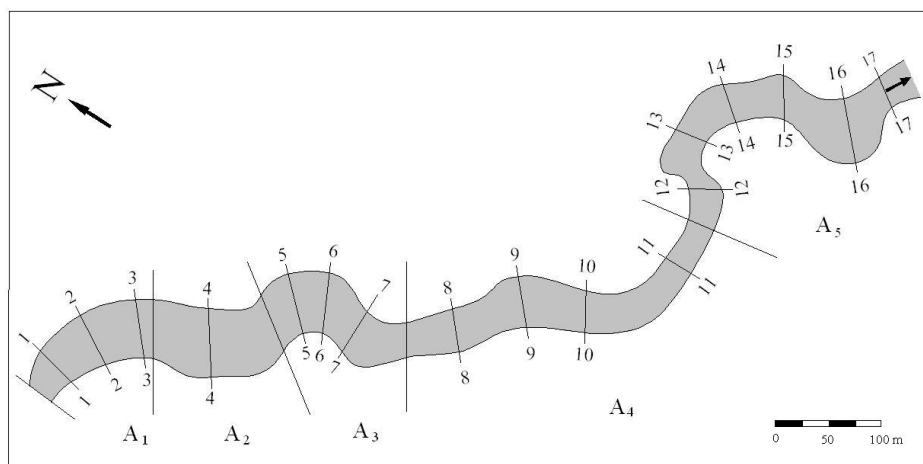
Odcinek badawczy podzielono na 5 sekcji pomiarowych, w których wykonano przekroje poprzeczne. Rozmieszczenie przekrojów przedstawiono na rysunku 1.

Koryto sekcji A₁, o długości wynoszącej 110 m, charakteryzowała się stromo nachylonymi brzegami o wysokości 1,5-5,0 m i szerokością dna 20,0-25,0 m. W wyniku przeprowadzonych prac nadano mu profil trapezowy o szerokości w dnie 14,0-15,0 m. Przy skarpie wklęsłej, na całej długości sekcji, zdeponowano rumosz skalny tworząc „stopę skarpy” o wysokości 0,5-0,8 m i szerokości dochodzącej do 5,0 m. Materiał, z którego uformowano stopę skarpy, pochodził z dna i brzegów sekcji A₁ i A₂.

Koryto sekcji A₂, w wyniku przeprowadzonych prac, zostało poszerzone o około 5,0 m i wyprostowane na całej długości tj. na odcinku 90 m.

W sekcji A₃, której długość była równa 130,0 m, przy lewej skarpie złożono rumosz denny. Przed regulacją, szerokość dna koryta tej sekcji wahała się od 18,0 do 20,0 m. Po regulacji wynosiła 10,0-12,0 m. Materiał zdeponowany przy

lewej skarpie pochodził z dna sekcji A₄, której długość wynosiła 300 m. Charakteryzowała się ona łagodnie nachyloną lewą skarpą o wysokości do 2,0 m i stromym przeciwległym brzegiem, często pionowym, o wysokości do 8,0 m. Szerokość dna koryta na tym odcinku nie uległa większym zmianom (B=25,0 m), lokalnie zostały zmienione jedynie spadki dna.



Rysunek 1. Rozmieszczenie przekrojów poprzecznych
Figure 1. Location of the Cross-sections

W górnej części sekcji A₅, o długości równej 285,0 m, zakola meandrowe wypełniono rumoszem dennym, odsuwając główny nurt od intensywnie podcinanych brzegów od 8,0 do 20,0 m.

METODYKA POMIARÓW I OBLICZEŃ

Pomiary geodezyjne przekrojów poprzecznych i spadku dna wykonano za pomocą niwelatora Topcon ET-G7. W trakcie pierwszej serii pomiarów przeprowadzonej przed regulacją i podczas pomiarów kontrolnych wykonywanych po regulacji do analizy pobrano próby rumowiska dennego w przekrojach 2, 9 i 16. Rumowisko pobrano z wierzchniej warstwy dna metodą standardową w celu wyznaczenia składu uziarnienia.

Obliczenia wybranych parametrów hydrodynamicznych, takich jak: naprężenia styczne τ , moc strumienia ω , jednostkowa moc strumienia ω_b , prędkość średnia w przekroju v oraz intensywność transportu materiału wleczonego i_b , wykonano dla przepływu o natężeniu $35,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Był to maksymalny przepływ, jaki zaobserwowano podczas wykonywanych badań i obserwacji, którego praw-

dopodobieństwo przewyższenie wynosi około 10% [Zabudowa potoku Słomka... 1964].

Moc strumienia obliczono metoda Briggsa i Middeltona [Radecki-Pawlik i in. 2007] za pomocą równania:

$$\omega = \gamma \cdot Q \cdot E_t \text{ [N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

- γ - ciężar objętościowy wody [$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$], $E_t = \alpha \cdot v^2 \cdot (2g)^{-1} + h$ [m],
- Q - natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- v - prędkość średnia w przekroju [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- g - przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
- h - średnie napelnienie w przekroju [m].

Prędkość średnia w przekroju obliczono stosując formułę Chézy'ego-Manninga,

$$v = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

gdzie:

- n - współczynnik szorstkości [$\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$],
- R_h - promień hydrauliczny [m],
- I - spadek zwierciadła wody [-],

a naprężenia styczne ze wzoru:

$$\tau = \gamma \cdot R_h \cdot I \text{ [N} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

gdzie:

- γ - ciężar właściwy wody [$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$],
- pozostałe oznaczenia jak we wzorze 2.

Jednostkowe natężenie wleczenia obliczono zgonie z równaniem Bagnolda [1986], którego ogólna postać wyraża się wzorem:

$$i_b = (\omega - \omega_0)^{3/2} \cdot h^{-2/3} \cdot d^{-1/2} \quad (4)$$

gdzie:

- ω_0 - graniczna wartość jednostkowej mocy strumienia,
- h - głębokość wody [m],
- d - średnica ziaren rumowiska [m].

Na podstawie wyników badań, terenowych oraz laboratoryjnych, uzyskanych przez innych autorów Bagnold zaproponował bezwymiarową funkcję wlezenia w postaci [Michalik 2000]:

$$\frac{i_b}{i_b^*} = \left(\frac{\omega - \omega_0}{(\omega - \omega_0)^*} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{h}{h^*} \right)^{-2/3} \cdot \left(\frac{d}{d^*} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

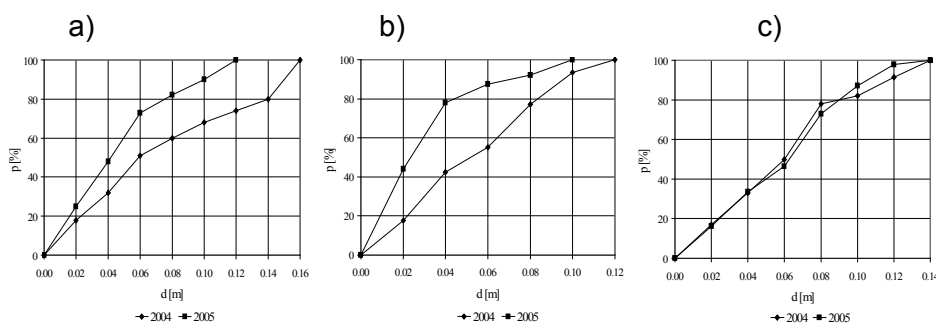
gdzie:

wielkości oznaczone gwiazdkami są wartościami stałymi równymi:
 $i_b^* = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $(\omega - \omega_0)^* = 0,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $h^* = 0,1 \text{ m}$, $d^* = 0,0011 \text{ m}$.

WYNIKI POMIARÓW I DISKUSJA

Skład uziarnienia rumowiska potoku Słomka

Krzywe granulometryczne materiału dennego przedstawiono na rysunku 2, a jego cechy charakterystyczne zestawiono w tabeli 1. Analizując przedstawione krzywe uziarnienia można zauważyć, że materiał denny w przekroju 2 i 9 charakteryzował się znacznie większą zawartością frakcji kamienistych przed regulacją. Udział frakcji żwirowej, w omawianych przekrojach, nie przekraczał 43%. Po regulacji w przekroju 2 wynosił 48%, a w przekroju 9 był równy 78%. Tak znaczące zmiany w uziarnieniu można tłumaczyć poborem materiału dennego z wierzchniej warstwy rumoszu, zawierającej grube frakcje, zalegającego w dnie potoku i wykorzystaniem pozyskanego w ten sposób materiału do ochrony naturalnych skarp koryta. W przekroju 16 nie odnotowano znaczących zmian w uziarnieniu materiału wyścielającego dno koryta. Przekrój ten położony był w części zamykającej odcinek pomiarowy, w której nie wykonywano prac regulacyjnych.



Rysunek 2. Krzywe uziarnienia: a - próba z przekroju nr 2, b - próba z przekroju nr 9, c - próba z przekroju nr 16

Figure 2. Grain size composition curves: a - sample from cross-section 2, b - sample from cross-section 9, c - sample from cross-section 16

Materiał denny we wszystkich analizowanych przypadkach był słabo wysortowany i różnoziarnisty (tab. 1). Świadczą o tym wartości wskaźników: różnoziarnistości $\varepsilon > 5$, wysortowania $\mu > 5$ oraz jednostajności C_d , którego wartość dla materiału odznaczającego się dobrym wysortowaniem i małą różnoziarnistością wynosi $C_d \cong 1$.

Tabela 1. Cechy charakterystyczne rumowiska
Table 1. Characteristic features of the bed material

	Próba 1, przekrój 2 Sample 1, cross-section 2		Próba 2, przekrój 9 Sample 2, cross-section 9		Próba 3, przekrój 16 Sample 3, cross-section 16	
	2004	2005	2004	2005	2004	2005
d_5 [m]	0,005	0,004	0,006	0,002	0,005	0,005
d_{10} [m]	0,012	0,008	0,012	0,004	0,012	0,012
d_{50} [m]	0,060	0,042	0,052	0,024	0,060	0,062
d_{60} [m]	0,080	0,050	0,064	0,030	0,067	0,070
d_{90} [m]	0,150	0,100	0,096	0,070	0,118	0,106
d_{95} [m]	0,156	0,110	0,104	0,088	0,128	0,115
$\varepsilon = \frac{d_{95}}{d_5}$	31,2	27,5	17,3	44,0	25,6	23,0
$\mu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	6,67	6,25	5,33	7,50	5,58	5,80
$C_d = \frac{d_{90} \cdot d_{10}}{d_{50}^2}$	0,50	0,45	0,43	0,49	0,39	0,33

Analiza warunków hydrodynamicznych

Dla wybranych charakterystycznych przekrojów poprzecznych, reprezentujących każdą z wydzielonych sekcji, wykonano analizę warunków hydrodynamicznych. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2. Dla zilustrowania zmian w sposób graficzny, na rysunku 3, pokazano rozkład naprężeń stycznych i prędkości średnich w analizowanych przekrojach.

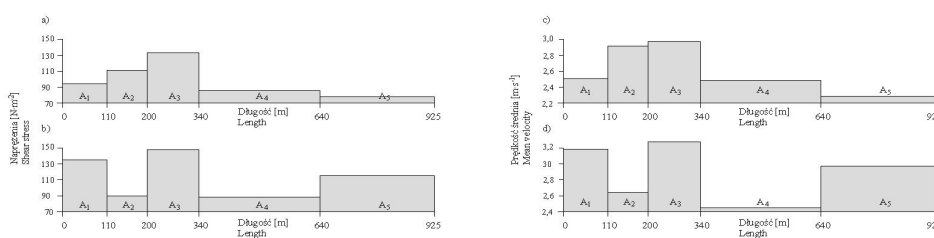
Z wykresu rozkładu naprężeń stycznych w poszczególnych przekrojach poprzecznych, wykonanych przed regulacją wynika, że ich wielkości są bardzo zróżnicowane i zawierają się w przedziale od $76,07 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ (przekrój 14) do $133,95 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ (przekrój 6). Wartość naprężeń stopniowo rośnie osiągając maksimum w sekcji A_3 , a następnie maleje do wartości minimalnej w sekcji A_5 (rys. 3a). Wzrost naprężeń w sekcji A_2 spowodowany jest przewężeniem koryta, którego szerokość dna na tym odcinku nie przekraczała 15 m. W przypadku sekcji A_3 wynika z lokalnej zmiany spadku, który na tym odcinku wynosił 2,7%. W przekrojach 9 i 14 wartości naprężeń były porównywalne. Wartości mocy strumienia i mocy jednostkowej wahały się w granicach od 293474 do 435633 W

i od 18848 do 35710 $W \cdot m^{-2}$. Największe wartości występowały w przekroju 4. Ma to związek ze średnią głębokością i prędkością przepływu, a w konsekwencji z największą wartością wysokości energii w porównaniu z pozostałymi przekrojami. Najmniejszą wartość moc strumienia osiągała w przekroju 14 (tab. 2).

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów hydrodynamicznych
Table 2. Results of hydrodynamic parameters calculation

Przekrój Cross-section	Odcinek Sector	τ [$N \cdot m^{-2}$]	ω [W]	ω_0 [$W \cdot m^{-2}$]	v [$m \cdot s^{-1}$]	I [-]	Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	B [m]	i_b [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]	
2004r.	2	A ₁	94,84	296027	20930	2,51	0,019	35,5	26,74	1,26
	4	A ₂	111,59	435633	35710	2,91	0,015	35,5	14,89	2,55
	6	A ₃	133,95	342919	28786	2,98	0,027	35,5	22,39	4,98
	9	A ₄	87,26	311345	21663	2,47	0,015	35,5	24,65	2,21
	14	A ₅	76,07	293474	18848	2,28	0,014	35,5	26,95	2,03
2006r.	2	A ₁	135,88	379373	34090	3,19	0,019	35,5	19,50	2,73
	4	A ₂	90,68	373885	27699	2,63	0,012	35,5	18,72	1,27
	6	A ₃	149,28	446375	41368	3,29	0,023	35,5	14,78	6,95
	9	A ₄	88,40	312655	21489	2,44	0,017	35,5	24,48	2,20
	14	A ₅	115,75	439951	36559	2,92	0,016	35,5	14,68	4,15

Po wykonaniu prac regulacyjnych zauważyć można, że w wyniku przewężenia koryta sekcji A₁, A₃ i górnego odcinka sekcji A₅ wartości naprężeń stycznych, mocy strumienia i mocy jednostkowej wzrosły w porównaniu z wartościami sprzed regulacji. Największy przyrost naprężeń obserwowano w przekroju 2 o 41,04 $N \cdot m^{-2}$. W przekroju 4 wartość naprężeń zmalała o około 21 $N \cdot m^{-2}$, co wynikało ze zwiększenia szerokości koryta na tym odcinku. W przekroju 9 wartości analizowanych parametrów nie uległy znaczącym zmianą (tab. 2).



Rysunek 3. Rozkład wartości naprężeń stycznych: a - przed regulacją, b - po regulacji; i średniej prędkości: c - przed regulacją, d - po regulacji
Figure 3. The distribution of shear stress value: a - before regulation, b - after regulation; and mean velocity: c - before regulation, d - after regulation

Przeprowadzone prace miały duży wpływ na zmianę morfologii badanego fragmentu koryta. W sekcjach A₁, A₃ i A₅ spowodowały wzrost naprężeń stycznych, prędkości średniej oraz potencjalnej intensywności wleczenia (tab. 2). Z badań przeprowadzonych przez Bąka i in. [2011] wynika, że materiał złożony u podstawy skarp, jak również użyty do wypełnienia meandrów, był rozmywany znacznie intensywniej niż naturalne brzegi. Zwiększona dostawa rumoszu do koryta w znacznym stopniu ograniczyła rozmiary erozji dennej, a w sekcjach A₂ i A₄ obserwowano agradację dna (proces odwrotny do występującego przed regulacją). Zmianie uległo również rozmieszczenie form erozji bocznej. Po regulacji rozmywane były brzegi wcześniej stabilne, w obrębie których nie obserwowano podcięć erozyjnych jak również form erozji dennej (kotły, rynny erozyjne).

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza warunków hydrodynamicznych na odcinku potoku Słomak wykazała istotny wpływ regulacji na warunki przepływu i skłania do następujących wniosków:

- regulacja potoku ma istotny wpływ na zmianę reżimu przepływu,
- przewężenie koryta w sekcjach A₁, A₃ i A₅ spowodowało wzrost prędkości średniej, naprężeń stycznych, mocy strumienia oraz zdolności transportowej potoku,
- analiza zmian składu granulometrycznego rumoszu dennego potwierdza istotny wpływ regulacji na zmianę warunków przepływu wód wezbraniowych oraz intensywną dostawę materiału skalnego z rozmywanych „umocnień”,
- regulacja potoku nie zniwelowała dużych różnic naprężeń stycznych, mocy strumienia w poszczególnych przekrojach wręcz przeciwnie pogłębiła te różnice,
- zapewnienie stabilności poziomej koryta wymaga zastosowania innych, bardziej odpornych na rozmywanie, rozwiązań konstrukcyjnych np. umocnienie brzegów koszami siatkowo kamiennymi.

BIBLIOGRAFIA

- Bagnold R.A. *Transport of solids by natural water flow: evidence for world-wide correlation*. Proceedings of the Royal Society of London A, 405, 1986, s. 369–374.
- Bąk L., Michalik A., Tekielak T. *Analiza procesów erozji na potoku Słomka*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 4 (1), 2007, s. 187-197.
- Bąk L., Michalik A., Tekielak T. *Procesy erozji, transportu i sedymentacji w zlewniach potoków Kasinka i Słomka*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Seria monografie Nr 2011/ 09.
- Hooke J.M. *An Analysis of the processes of river bank erosion*. J. Hydrol. 42, 1979, s. 39–62.
- Kaszowski L. *Współczesne procesy erozji, transportu i sedymentacji rzecznej w zlewni potoku Tenczyńskiego*. Prace Geogr. UJ 12, 1965, s. 43–70.

- Michalik A. *Bedload transport In mountain river measurements and results*, X international conference on transport & sedimentation of solid particles, Wrocław 2000, s. 41-55.
- Radecki-Pawlik A., Madeyski M., Król K. *Zmiana warunków hydraulicznych wzdłuż uregulowanego odcinka potoku Cedron w Beskidzie Średnim*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 4 (1), 2007, s. 141-151.
- Teisseyre A.K. *Współczesne procesy rzeczne w dorzeczu górnego Bobru i Strzegomki (Sudety Środkowe)*. Geol. Sudetica, 12 (2), 1977, s. 93-109.
- Wollman M.G., Bruschi L.M. *Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse noncohesive sands*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 282-G 1, 1961, s. 183-210.
- Wyżga B., *River response to channel regulation: Case study of the Raba river, Carpathians, Poland*. Earth Surface Processes and Landforms, 18, 1993, s. 541-556.
- Zabudowa potoku Słomka dopływ Dunajca km 0+00 – km 18+200*. Hydroprojekt, materiały archiwalne RZGW w Krakowie, 1964.

Dr inż. Łukasz Bąk
Politechnika Świętokrzyska, Kielce
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce
Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej
l.bak@tu.kielce.pl, tel. 696 472 545