INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 8/1/2010, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 93–104
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Leszek Książek, Alicja Michalik, Jarosław Nowak, Anna Połoska-Wróbel

OCENA ZMIAN WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH NA UREGULOWANYM ODCINKU POTOKU SMOLNIK

EVALUATION OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS CHANGES ON THE SMOLNIK STREAM

Streszczenie

Celem prezentowanej pracy jest ocena zmian warunków hydrodynamicznych na odcinku potoku Smolnik, jakie zaszły w okresie 3 lat po umocnieniu lewego brzegu narzutem kamiennym oraz gabionami prostopadłymi do koryta potoku. W latach 2008 i 2009 wykonano serie pomiarów, każda z nich zawierała pomiary profilu podłużnego, przekrojów poprzecznych koryta i składu granulometrycznego materiału dennego. Wyniki tych prac wykorzystano do obliczenia wielkości hydrodynamicznych, takich jak: średnia prędkość, moc strumienia, naprężenia styczne i intensywność transportu rumowiska wleczonego przy zastosowaniu równania Bagnolda. Można było stwierdzić, że prace regulacyjne spełniły swoje zadania i erozja boczna została zahamowana. Lokalnie wystąpiło nasilenie erozji wgłębnej. Analiza zmian w profilu podłużnym potoku oraz przebieg zmian składu granulometrycznego rumowiska wykazały, że po 2 latach od wykonania prac regulacyjnych pojawiła się tendencja na badanym odcinku do powrotu do wcześniejszych warunków hydrodynamicznych.

Słowa kluczowe: erozja boczna, warunki hydrodynamiczne, stabilność koryta

Summary

The aim of presented research was evaluation of hydrodynamic conditions changes on the regulated sector of the Smolnik stream. The measurements were carried out in 2008 and 2009. Each series of this study included measurements of the longitudinal profile, cross-sections of channel and the bed material granulation. Results of these works were used to calculate the hydrodynamic quantities as mean velocity, stream power, shear stresses and bedload transport (by the Bagnold equation). It was possible to ascertain that the control works came to expec-

tation and bank erosion was stopped. Locally an intensification of bed erosion had place. An analysis of the longitudinal profiles and course of grain-size composition of the bed material changes proved, that 2 years after control works realization tendency to return to early hydraulic conditions was appeared.

Key words: *bank erosion, hydrodynamic conditions, stability of channel*

WSTĘP

Stabilność koryta rzecznego jest warunkiem decydującym o tym, w jakim stopniu rzeka może odprowadzać nadmiar wód ze zlewni. Utrzymanie stabilności koryta cieku zależy jednak od wielu czynników naturalnych kształtujących jego dynamikę. Różnorodność tych czynników powoduje zróżnicowanie procesów korytowych. Pomimo ich złożoności można stwierdzić, że praca rzeki ma tendencje do zachowania równowagi dynamicznej gwarantującej stabilność koryta [Książek 2005]. Stabilność ta jest często naruszana przez procesy erozyjno-depozycyjne, zachodzące podczas określonych zdarzeń hydrologicznych. Często obserwowane cofanie się brzegu pod wpływem działania płynącej wody nazywane jest erozją boczną. Wielkość przemieszczenia brzegu oraz intensywność erozji bocznej są istotnymi parametrami dla projektowania umocnień brzegu [Teisseyre 1977; Odgaard 1987; Thorne 1992]. Szczególnie ważnym zagadnieniem jest utrwalanie zakoli meandrowych, z uwagi na przebieg procesu oraz na możliwość obniżenia dna odcinka w wyniku zwiększonego transportu rumowiska wleczonego. Intensywność erozji bocznej zależy od odporności materiału budującego brzegi koryta [Kaszowski 1965; Wolman, Bruch 1961], oraz od wielkości wezbrań i czasu ich trwania [Wolman 1959; Hooke 1979].

Przykładem cieku z intensywną erozję boczną i denną jest potok Smolnik, zaliczany do najbardziej erozyjnych cieków na terenie Beskidu Wyspowego. Jego koryto jest w znacznej części uregulowane, a mimo to obserwuje się jego lokalną degradację. Jeden z odcinków badanych w latach 1994–1996 [Tekielak 2007] został uregulowany, co umożliwiło badanie zmian warunków hydrodynamicznych.

Celem prezentowanej pracy była ocena zmian warunków hydrodynamicznych na odcinku potoku Smolnik, jakie zaszły w okresie 3 lat po umocnieniu lewego brzegu badanego odcinka potoku narzutem kamiennym oraz poprzecznymi gabionami. Na fotografii 1 przedstawiono stan koryta przed regulacją, a na fotografii 2 stan lewego brzegu po umocnieniu. Wykonane prace regulacyjne spowodowały zwiększenie prędkości wody w okolicach lewego brzegu oraz skutecznie „zmusiły" potok do trzymania się narzuconego kształtu koryta.

Podstawę tej oceny stanowią wyniki pomiarów geodezyjnych profilu podłużnego i przekrojów poprzecznych koryta na badanym odcinku oraz skład granulometryczny rumowiska.

Fotografia 1. Widok koryta potoku przed regulacją od strony górnej (fot. Nowak)
Photo 1. View of stream channel before regulation from upper side (photo Nowak)

Fotografia 2. Widok lewego brzegu potoku po regulacji (fot. Nowak)
Photo 2. View of the left channel bank after regulation (photo Nowak)

OPIS BADANEGO OBIEKTU

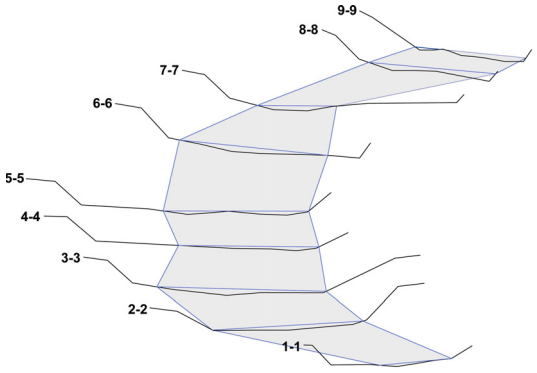
Potok Smolnik jest lewobrzeżnym dopływem rzeki Dunajec. Zlewnia potoku znajduje się na terenie Beskidu Wyspowego, który jest częścią Beskidów Zachodnich. Powierzchnia zlewni potoku Smolnik wynosi ok. 64,9 km^2, a jego długość ma ok. 15,45 km. Potok znajduje swe ujście w cofce Zbiornika Rożnowskiego. Ze względu na jego dynamikę zaliczany jest do najbardziej szutrujących cieków.

Średni opad z wielolecia 1994–2003 w zlewni wynosi 811 mm [Tekielak i in. 2007]. Został on obliczony za pomocą metody wielokątów równego zadeszczowania [Godzic 2005]. Przepływy o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia zostały obliczone przy użyciu wzoru karpackiego Punzeta. Przykładowo: $Q_{50\%}$ = 14,85 m^3·s^{-1}, $Q_{1\%}$ = 102,42 m^3·s^{-1}.

Poddany analizie odcinek potoku znajduje się w miejscowości Chomranice. Początek zlokalizowany jest w 5,25 km od ujścia potoku do rzeki Dunajec.

WYNIKI POMIARÓW

Pomiary terenowe były każdorazowo prowadzone przy niskich stanach wody. Pierwszy cykl badań obejmował odcinek o długości 165 m, na którym pomierzono 9 przekrojów poprzecznych (rys. 1). Średnia szerokość przekrojów wynosiła 21,58 m, maksymalna 27,24 m, a minimalna 15,35 m. Średnia odległość między przekrojami wynosiła 20,57 m.



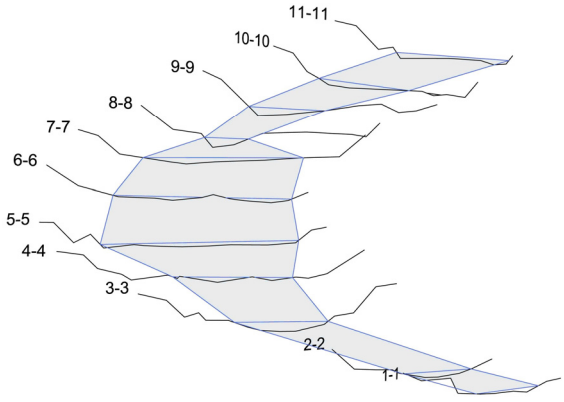
Rysunek 1. Przestrzenny obraz badanego odcinka – I seria
Figure 1. Spatial picture of the studied sector – I series

Skład uziarnienia materiału dennego na badanym odcinku wyznaczono metodą konwencjonalną dla 3 prób pobranych: I – ze strumienia, miejsce pobrania próby znajdowało się między przekrojami 3-3 i 4-4, II – miejsce pobierania

próby 2 znajdowało się pomiędzy przekrojami 6-6 i 7-7, III – trzecia próba została pobrana z bystrza, miejsce oddalone od 1 przekroju o 118 m.

Drugi cykl pomiarowy został przeprowadzony w maju 2009 r. Wykonano pomiary na odcinku o długości 188 m, wyznaczając 11 przekroi poprzecznych charakteryzujących odcinek potoku (rys. 2).

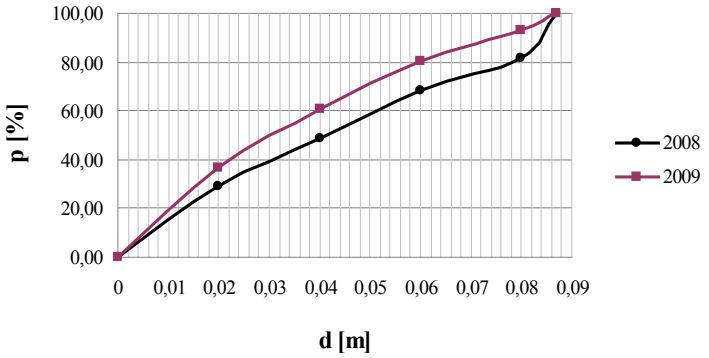
W porównaniu z poprzednimi badaniami, miejsca pobrania próby oddalone były od siebie o 31,87 m. Drugą próbę pobrano z łachy. Miejsce pobierania próby 2 znajdowało się pomiędzy przekrojami 8–8 i 9–9, w odległości 0,80 m od przekroju 8–8. Odległość od pierwszego przekroju wynosiła 142,98 m. Miejsce poboru próby 2 podczas poprzednich badań różniło się o 2,88 m. Trzecia próba została pobrana z bystrza, miejsce poboru oddalone było od pierwszego przekroju o 130,20 m. Próbę 3 pobrano z miejsca leżącego pomiędzy przekrojami 7–7 i 8–8 w odległości 4 m od przekroju 7–7. Różnica pomiędzy poprzednim miejscem poboru próby wynosiła 8 m.



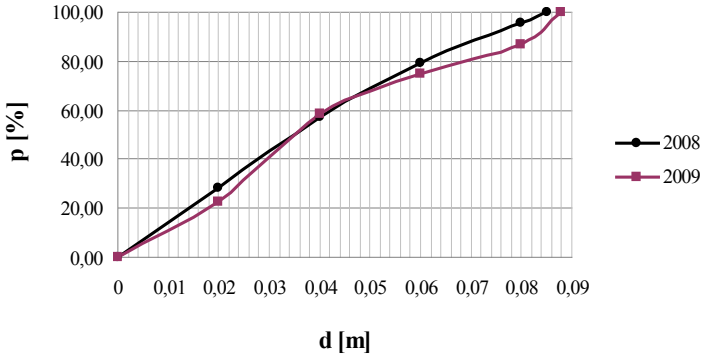
Rysunek 2. Przestrzenny obraz badanego odcinka – II seria
Figure 2. Spatial picture of the studied sector – II series

SKŁAD UZIARNIENIA RUMOWISKA POTOKU SMOLNIK

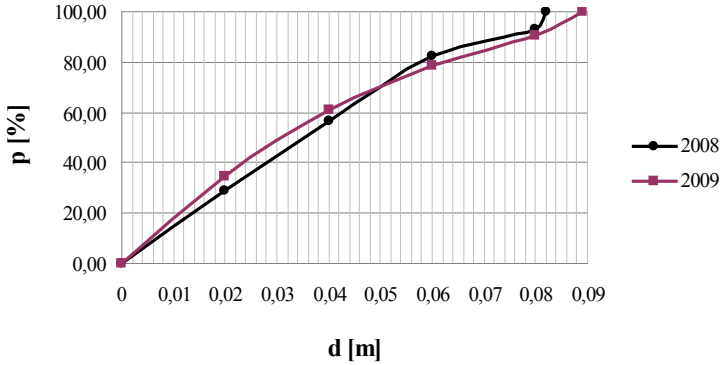
W celu określenia zmian składu granulometrycznego wykonano zestawienie krzywych przesiewu (kolor czerwony 2009 r., kolor czarny 2008 r.), które zamieszczono na rysunkach 3, 4 i 5 oraz obliczono cechy charakterystyczne zbadanego materiału zestawione w tabeli 1.



Rysunek 3. Krzywe uziarnienia – próby ze nurtu
Figure 3. Grain-size composition curves – samples from active current



Rysunek 4. Krzywe uziarnienia – próby z łachy
Figure 4. Grain-size composition curves – samples of bar



Rysunek 5. Krzywe uziarnienia – próby z bystrza
Figure 5. Grain-size composition curves – samples from the rapid

Analizując przedstawione krzywe uziarnienia, można stwierdzić, że materiał denny nie wykazał większych zmian. Otrzymano podobny kształt krzywych uziarnienia dla prób pobranych z bystrza i łachy. Odległości miejsc pobierania prób z bystrza (nr 3) i łachy (nr 2) w obu cyklach pomiarowych wynosiły 2-5 m. Dla prób pobranych ze strumienia (1) odległość między miejscami pobierania prób wynosiła ok. 35 m, co mogło być przyczyną zmiany kształtu krzywej uziarnienia. W tabeli 1 zestawiono dane dotyczące składu granulometrycznego. Materiał jest dobrze wysortowany i mało różnoziarnisty, jeżeli $\upsilon < 5$, $\varepsilon \leq 4–5$, $C_d \cong 1$. Z przeprowadzonej analizy składu granulometrycznego wynika, że dla żadna z prób nie spełnia tego warunku.

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

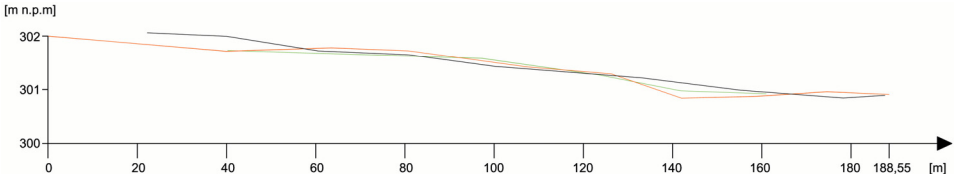
	Próba 1 Sample 1		Próba 2 Sample 2		Próba 3 Sample 3	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
$d_{5\%}$ [m]	0,003	0,003	0,003	0,005	0,003	0,003
$d_{10\%}$ [m]	0,007	0,005	0,007	0,009	0,007	0,006
$d_{16\%}$ [m]	0,011	0,008	0,011	0,015	0,011	0,009
$d_{50\%}$ [m]	0,041	0,030	0,035	0,035	0,035	0,031
$d_{60\%}$ [m]	0,051	0,039	0,042	0,041	0,043	0,039
$d_{84\%}$ [m]	0,082	0,065	0,065	0,076	0,065	0,068
$d_{90\%}$ [m]	0,084	0,076	0,073	0,083	0,073	0,080
$d_{95\%}$ [m]	0,086	0,082	0,080	0,085	0,081	0,085
d_m [m]	0,052	0,045	0,047	0,050	0,047	0,046
$\varepsilon = \frac{d_{95}}{d_5}$	28,67	27,33	26,67	17,00	27,00	28,33
$\mu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	7,29	7,80	6,00	4,56	6,14	6,50
$C_d = \frac{d_{90}d_{10}}{d_{50}^2}$	0,35	0,42	0,42	0,61	0,42	0,50
$\delta = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$	2,73	2,85	2,43	2,25	2,43	2,75

ZMIANY PROFILU PODŁUŻNEGO

Zmianę profilu podłużnego, jaka zaszła w ciągu 11 miesięcy oddzielających 2 cykle pomiarowe, przedstawiono na rysunku 6. Spadek dna wynosił w 2008 r. 9,42‰, z jedną lokalną zmianą spadku w kierunku przeciwnym o wartości 6,42‰. W 2009 r. lokalnie występowały spadki w granicach 4,29 do 14,39‰. Porównując profile podłużne, wybrano 4 charakterystyczne przekroje, w których zaszły największe zmiany konfiguracji dna i otrzymano następujące

pary przekrojów: 2–2 (2008 r.) z 3–3 (2009 r.), 4–4 (2008 r.) z 5–5 (2009 r.), 6–6 (2008 r.) z 8–8 (2009 r.) oraz 8–8 (2008 r.) z 10–10 (2009 r). W lipcu 2008 r. przez potok Smolnik przeszła fala wezbraniowa, co znacznie wpłynęło na zmianę profilu podłużnego badanego odcinka. Zmiany te najwyraźniej widać w odcinkach między przekrojami: 1–3 (2008 r.) i 2–4 (2009 r.), 6–9 (2008 r.) i 7–11 (2009 r.). O braku stabilności dna świadczą zmiany spadków oraz dostrzegalne miejsca intensywnego transportu i akumulacji materiału dennego.

W celu uwidocznienia zmian profilu podłużnego, zestawiono je na rysunku 6. Wyniki badań przeprowadzonych w 2006 r. pokazano kolorem zielonym. Zostały one wykonane tuż przed pracami regulacyjnymi na lewym brzegu koryta. Badania w 2008 r. przeprowadzono 2 lata po wykonaniu robót i widać, że nie nastąpiły większe zmiany konfiguracji koryta, a spadek dna był wyrównany (kolor czarny). Wyraźne zmiany wystąpiły dopiero w 2009 r., koryto powróciło do stanu sprzed regulacji (kolor czerwony).



Rysunek 6. Porównanie profili podłużnych z lat 2006, 2008, 2009
Figure 6. Comparison of the longitudinal profiles of 2006, 2008, 2009

ANALIZA WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH

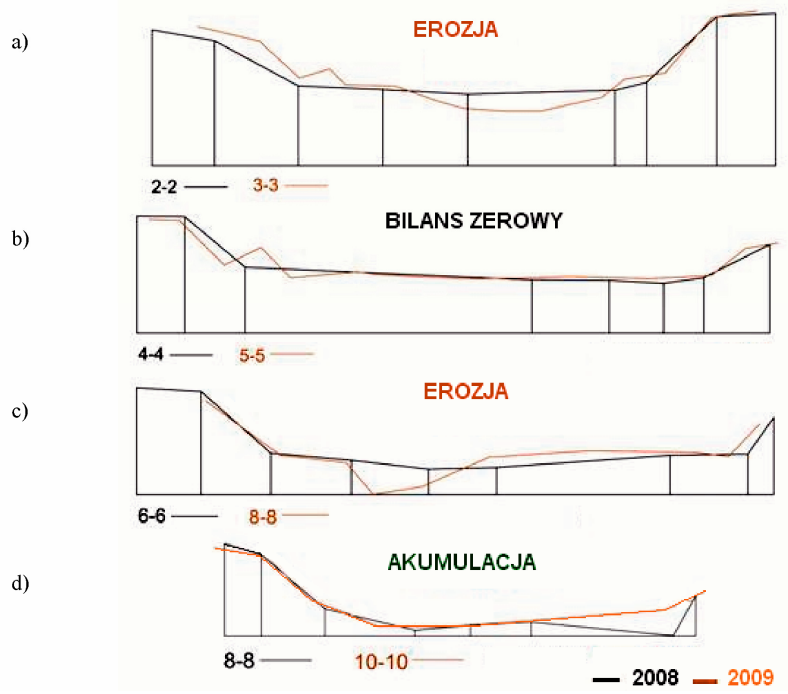
Dla wybranych czterech przekrojów charakterystycznych przeprowadzono analizę warunków hydrodynamicznych. Polegała ona na określeniu mocy strumienia. Obliczenia wykonano w wybranych przekrojach poprzecznych za pomocą wzoru Bagnolda $\omega = \tau \cdot v$ [$Nm^{-1}s^{-1}$]. Wyznaczono również naprężenia styczne $\tau = \gamma\ h\ I$ ($\gamma = 9810\ Nm^{-3}$). W najgłębszych miejscach przekroi wyznaczono również prędkość przepływu. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 2.

W wybranych przekrojach obliczono moc strumienia, która pozwoliła na określenie zachodzącego procesu korytowego (tab. 3), co jest pokazane na rysunkach przekrojów poprzecznych (rys. 7).

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów hydrodynamicznych

Table 2. Results of hydrodynamical parameters calculation

Przekrój Section		ω [N·m^{-1}·s^{-1}]	τ [N·m^{-2}]	h [m]	v [m·s^{-1}]	I [-]	Q [m^3·s^{-1}]	b [m]
2008 r.	2-2	42,03	40,03	0,46	1,05	0,00942	5,72	15,18
	4-4	38,03	40,03	0,46	0,95	0,00943	5,72	16,61
	6-6	41,78	42,63	0,49	0,98	0,00944	5,72	17,91
	8-8	56,47	51,34	0,59	1,10	0,00945	5,72	13,4
2009 r.	3-3	64,49	56,57	0,68	1,14	0,00851	5,72	11,95
	5-5	51,39	46,71	0,33	1,10	0,01439	5,72	17,68
	8-8	144,50	124,57	0,88	1,16	0,01439	5,72	16,76
	10-10	20,99	26,57	0,61	0,79	0,00430	5,72	16,73

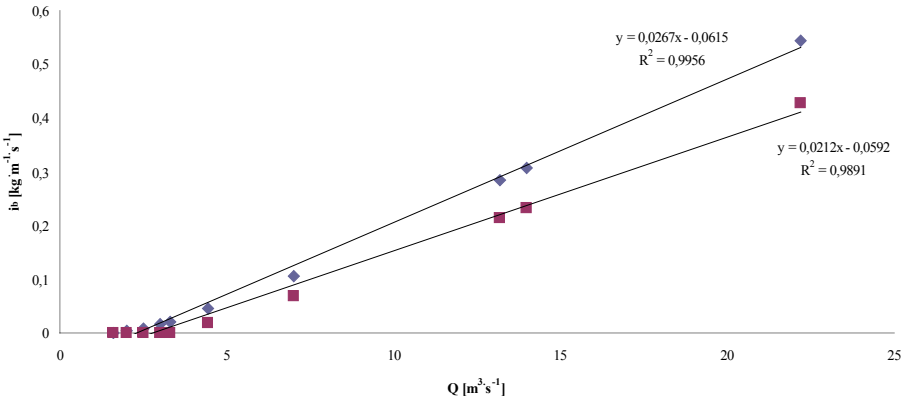


Rysunek 7. Zmiany morfologiczne w analizowanych przekrojach poprzecznych: a) erozja, b) bilans zerowy, c) erozja, d) akumulacja
Figure 7. Morphological changes in analysed corss-sections: a) erosion, b) balance, c) erosion, d) accumulation

Tabela 3. Moc strumienia w porównywalnych przekrojach poprzecznych
Table 3. Stream power in comparable cross-sections

Przekrój Section		ω [N·m^{-1}·s^{-1}]		Δω [N·m^{-1}·s^{-1}]	Proces Processes
2008 r.	2009 r.	2008 r.	2009 r.		
2-2	3-3	44,63	64,72	20,09	EROZJA
4-4	5-5	40,43	51,24	10,81	ZEROWY BILANS
6-6	8-8	44,47	144,1	99,63	EROZJA
8-8	10-10	60,17	20,33	-39,84	AKUMULACJA

Ze względu na korelację prowadzonych badań, jak i otrzymanych wyników z badaniami i wynikami z roku 2006, wartość transportu rumowiska na badanym odcinku została oszacowana na podstawie wykresu zależności intensywności transportu rumowiska od wielkości przepływu Q (rys. 8) [Tekielak 2007, rys. 154]. Przy założonym Q = 5,72 m^3·s^{-1} wartości intensywności transportu rumowiska i_b mieszczą się w przedziale od 0,06 kg·m^{-1}·s^{-1} do 0,09 kg·m^{-1}·s^{-1}.



Rysunek 8. Zależność intensywności transportu rumowiska i_b od wielkości przepływu Q na odcinku potoku Smolnik
Figure 8. Relation between bedload transport intensity i_b and discharge Q in the Smolnik sector

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza warunków hydrodynamicznych i zmian zachodzących na uregulowanym odcinku potoku Smolnik wykazała istotny wpływ regulacji cieku na zmianę jego warunków hydrodynamicznych. Nasuwają się następujące wnioski:

– umocnienia narzutem kamiennym oraz gabionami spełniły swoje projektowe założenia zatrzymując w stopniu wystarczającym erozję brzegową lewego brzegu koryta,

– zabudowa techniczna koryta przyczyniła się do zawężenia szerokości koryta, co doprowadziło do wzrostu napełnienia i przełożyło się na wzrost mocy strumienia, która odegrała znaczącą rolę w procesie erozji. Spowodowała ona degradację dna poprzez uruchomienie transportu materiału dennego,

– na podstawie pomierzonych profili podłużnych można stwierdzić, że w 2008 r. zachowany był profil, jaki pojawił się wraz z umocnieniem lewego brzegu, natomiast profil z 2009 r. pokazuje tendencję potoku do powrotu do warunków hydraulicznych, jakie panowały przed umocnieniem,

– przebieg zmian składu granulometrycznego materiału dennego na badanym odcinku potwierdza również tendencję potoku do powrotu do warunków hydrodynamicznych wcześniej panujących.

BIBLIOGRAFIA

Godzic R. *Ocena intensywności erozji na wybranym odcinku potoku Smolnik*. Manuskrypt Katedry Inżynierii Wodnej, Akademia Rolnicza, Kraków 2005.

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.

Książek L. *Degradacja koryt rzecznych jako skutek działalności człowieka*. Mat. konf. „Typologia i warunki referencyjne wód powierzchniowych" IMGW Kraków, Kraków 2005.

Michalik A. *Badania intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach karpackich*. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej w Krakowie. Rozprawa habilitacyjna Nr 138. Kraków 1990.

Nowak J. *Ocena zmian hydrodynamicznych na uregulowanym odcinku potoku Smolnik*. Uniwersytet Rolniczy, Kraków 2009.

Odgaard A.J. *Stream bank erosion along two rivers in Iowa*. Water Resources Res. 23(7), 1987, s. 1225–1236.

Teisseyre A.K. *Współczesne procesy rzeczne w dorzeczu górnego Bobru i Strzegomki (Sudety Środkowe)*. Geol. Sudetica, 12 (2), 1977, s. 93–109.

Tekielak T., Michalik A., Bąk Ł., Książek L. *Wpływ wezbrań na intensywność procesów fluwailnych na przykładzie koryta potoku Smolnik*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, PAN Kraków 2007, s. 167–178.

Tekielak T. *Ocena intensywności procesów erozji bocznej i dennej na wybranych ciekach górskich (potoki Kasinka i Smolnik, odcinek rzeki Łososiny)*. Rozprawa doktorska, AR Kraków 2007.

Thorne C.R. *Bend Scour and Bank Erosion on the Meandering Red River, Louisiana* [w:] *Lowland Floodplaing Rivers: Geomorphological Perspectives*, red.: Carling P.A., Petts G.E, 1992, s. 95-115, John Willey and Soons Ltd.

Wollman M.G. *Factors influencing erosion of a cohesive river bank*. Am. J. Sci. 257, 1959, s. 204–216.

Wollman M.G., Brusch L.M. *Factors controlling the size and shape of stream channels in course noncohesive sands*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 282-G 1, 1961, s. 183–210.

Prof. dr hab. inż. Alicja Michalik,
Dr inż. Leszek Książek,
Mgr inż. Jarosław Nowak
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e-mail. rmmichal@cyf-kr.edu.pl

Mgr inż. Anna Połoska-Wróbel
Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie
ul. J. Piłsudskiego 22, 31-109 Kraków

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka*