

ANALIZA ROZMYCIA DNA CIEKU GÓRSKIEGO PONIŻEJ BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI NA RZECE RABIE W MIEJSCOWOŚCI RABKA-ZDRÓJ

Karol Plesiński¹, Artur Radecki-Pawlik^{1,2}, Agnieszka Kościsz¹

¹ Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: k.plesinski@ur.krakow.pl

² Katedra Statyki i Dynamiki Budowli, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

STRESZCZENIE

Praca dotyczy rozmycia nieumocnionego dna poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Rabie w Rabce-Zdroju. Obliczono głębokość rozmycia dna poniżej budowli, używając formuł empirycznych różnych autorów. Wyniki obliczeń zweryfikowano z rezultatami pomiarów terenowych, typując formuły, których uzyskane wyniki były o największej zgodności z obserwacjami terenowymi, jak i te o najgorszej. Wzory empiryczne służące do określenia maksymalnej głębokości rozmycia stosowane są w wąskim zakresie i określają największe rozmycia ustabilizowane, które jednak w warunkach naturalnych zazwyczaj nie powstają. Obliczone wielkości są o wiele wyższe niż występujące w warunkach naturalnych, dlatego wzory te stosowane są rzadko. Mogą być natomiast wykorzystywane do porównawczych ocen rozmyć poniżej budowli. Dają również możliwość poznania ogólnych prawidłowości związków głębokości rozmycia ze spadem, jednostkowym natężeniem przepływu, głębokością wody dolnej itp. Celem pracy jest weryfikacja formuł obliczeniowych głębokości rozmycia dna poniżej bystrza na podstawie wyników pomiarów terenowych.

Słowa kluczowe: erozja dna, rozmycie dna, wzory empiryczne, bystrze o zwiększonej szorstkości, rzeka Raba

GRAVEL BED RIVER SCOURING ANALYSIS DOWNSTREAM OF BLOCK RAMP: THE RABA RIVER IN RABKA-ZDRÓJ

ABSTRACT

The paper describes the scouring process of a river bed downstream of a block ramp hydraulic structure situated in Raba river in Rabka-Zdrój. The scour depth of river bed downstream of the block ramp was calculated using several different empirical formulae from the literature. The calculated results were verified with the measured results collected during the field measurements. The paper presents are the most appropriate formulae, for comparison of the scouring results with the obtained field measurements. We found that the calculated values of scouring are usually much higher than those observed in the field. In practice, formulae can be used for comparative evaluations of scours downstream of hydraulic structures, enabling to understand the relationships between the scour depth, a drop of a structure, unit discharge and downstream water depth. In that context, the main aim of this paper is the verification of the obtained empirical formulae for scouring, downstream of block ramps, based on the results of field measurements.

Keywords: bed erosion, bed scour, empirical formulae, block ramp, Raba river

WSTĘP

Lokalne wyboje powstające poniżej budowli wodnych w wyniku ruchu wody i rumowiska są jednym z najmniej poznanych zagadnień

w hydraulice koryt otwartych. Dotychczas brak dostatecznego matematycznego opisu tego zjawiska powoduje, że istniejące formuły empiryczne są bardzo niedokładne i nie zawsze powinny być stosowane do prognozowania rozmycia dna.

Z kolei brak takiej analizy, uniemożliwia ocenienie stopnia bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznej i jej stabilności.

Formuły empiryczne za pomocą których możemy obliczyć maksymalną głębokość rozmycia dna poniżej obiektu były najczęściej uzyskiwane w toku doświadczeń laboratoryjnych, stąd mogą być wykorzystywane w wąskim zakresie parametrów hydraulicznych i geometrycznych oraz dla warunków ustalonych, co w rzeczywistości podczas trwania wezbrania nie ma miejsca. Uzyskanie więc dokładnej wartości głębokości rozmycia dna jest niezwykle trudne, gdyż wyniki często są bardzo różniące się od wartości rzeczywistej rozmycia, a stosowanie kilkunastu formuł daje wyniki bardzo rozbieżne, co bardzo uniemożliwia prognozowanie tego typu zjawiska. Wykorzystywanie ich do prognozy rozmycia dna powinno być poprzedzone kalibracją, czyli sprawdzeniem każdej z formuł w warunkach naturalnych, aby wybrać najlepszą, dającą wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistej głębokości wyboju. Wtedy możemy wybrać formułę, którą można wykorzystywać w lokalnych warunkach. Jednakże takie rozwiązanie niesie za sobą bardzo poważną wadę, jaką jest oczekiwanie na wytworzenie się wspomnianego wyboju, dzięki któremu możemy wspomnianą analizę porównawczą wykonać.

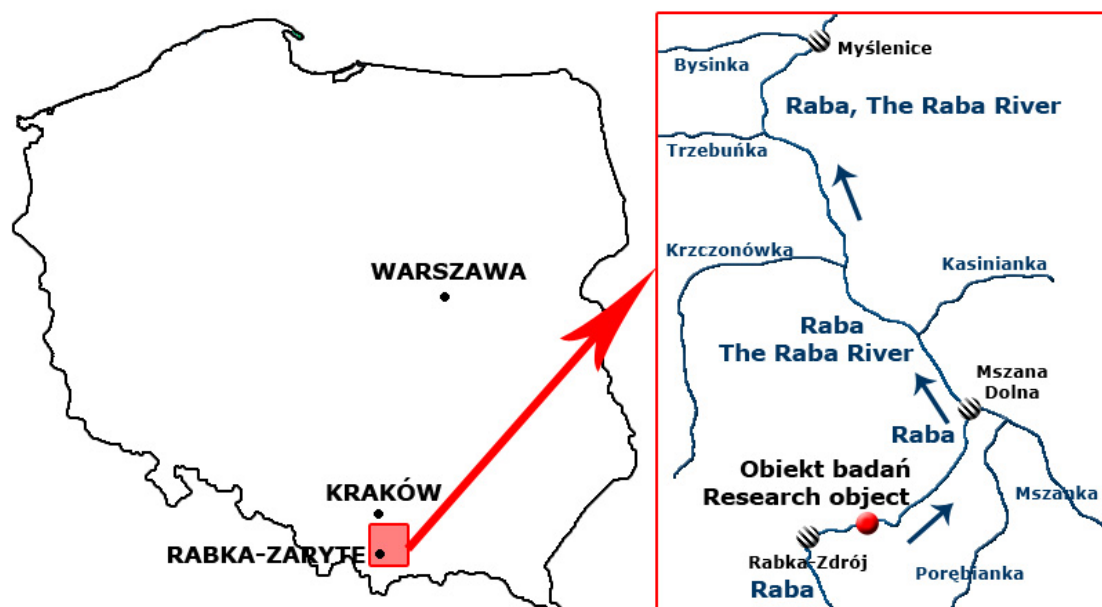
Celem pracy jest weryfikacja formuł obliczeniowych, dzięki którym możemy uzyskać głębokość rozmycia dna poniżej bystrza o zwiększo-

nej szorstkości znajdującego się na rzece Rabe. Weryfikacja przedstawionych w pracy wzorów została wykonana w oparciu o pomiary terenowe, które zostały wykonane po przejściu fali wezbraniowej, która pogłębiła wybój znajdujący się poniżej budowli.

OPIS ZLEWNI I OBIEKTU BADAŃ

Górny odcinek rzeki Raby przepływa przez Kotlinę Rabczańską, która rozciąga się między Beskidem Makowskim, Wyspowym, Obniżeniem Orawsko-Podhalańskim oraz Gorcami (Kondracki 2000). Utwory górskie w tych rejonach są zbudowane z piaskowców, mułowców, margli i wapieni, tworząc tzw. Karpaty fliszowe (Stupnicka 1997). Ze względu na podłoże skalne, a także warunki klimatyczno-roślinne, zlewnia rzeki jest pokryta glebami brunatnymi kwaśnymi, często słabo przepuszczalnymi.

Powierzchnia zlewni wynosi 1537,1 km², a długość cieków – 131,9 km. Średni spadek rzeki wynosi 4,42%. Raba swoje źródła ma na wysokości 785 m n.p.m. w okolicach Obidowej, uchodzi zaś do Wisły na wysokości 180 m n.p.m. w Uściu Solnym. Największymi dopływami Raby są: Krzczonówka, Trzebuńka (lewostronne) oraz Poniczanka, Mszanka, Stradomka i Krzyworzeka (prawostronne) (rys. 1). Rzeką prowadzi rumowisko aluwialne, tworząc terasy rzeczne.



Rys. 1. Położenie obiektu badań
Fig. 1. Location of the research region

Częstym procesem jest również akumulacja rumowiska, czego skutkiem jest tworzenie się łach i dalsze roztokowanie rzek, szczególnie w miejscach o małej antropopresji (Radecki-Pawlik 2014, Korpak i in. 2008, 2009).

Analizowane bystrze o zwiększonej szorstkości znajduje się w miejscowości Rabka-Zaryte (gmina Rabka-Zdrój, powiat nowotarski, województwo małopolskie), na rzece Raba w 24+790 km (rys. 2). Głównym elementem budowli jest betonowa płyta spadowa o długości 16,5 m, szerokości 22 m, spadzie wody 1,5 m i nachyleniu 1:n = 1:11. Dodatkowo w płycie zagnieżdżone są naturalne szykany w postaci kamieni łamanych, ułożonych najczęściej dłuższym bokiem wzdłuż lub w poprzek koryta. Analizowana budowla charakteryzuje się brakiem niecki wypadowej, przez co w korycie

rzeki poniżej obiektu występuje erozja dna tworząc wybój (Plesiński i in. 2014)

METODYKA

W roku 2013 oraz 2014 wykonano przekroje poprzeczne (5 na stanowisku dolnym i 5 na stanowisku górnym), dzięki którym wykreślono profil podłużny analizowanego odcinka. Miejsca pomiarowe zlokalizowane były w pewnych odległościach od płyty spadowej bystrza (tab. 1).

Dla każdej z serii odczytano rzeczywistą głębokość dołu rozmycia. Dla serii 1 z roku 2013 wartość $h_{\max 1}$ wynosi 0,86 m. Dla serii 2 z roku 2014 wartość $h_{\max 1-2}$ równa się 1,73 m. Widoczne jest znaczne obniżenie dna po przejściu fali powodziowej z maja 2014 roku. Dno obniżyło



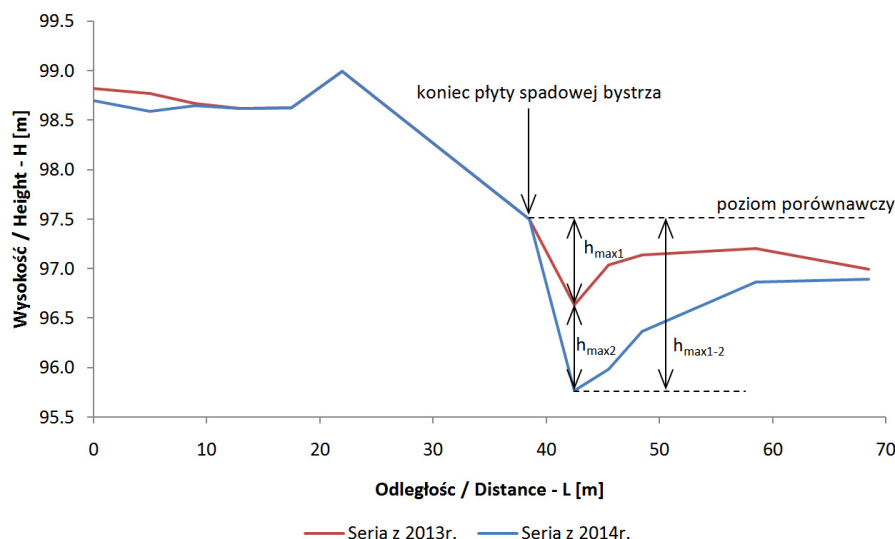
Rys. 2. Bystrze o zwiększonej szorstkości na rzece Rabie (fot. K. Plesiński)

Fig. 2. Block ramp on the Raba River (photo by K. Plesiński)

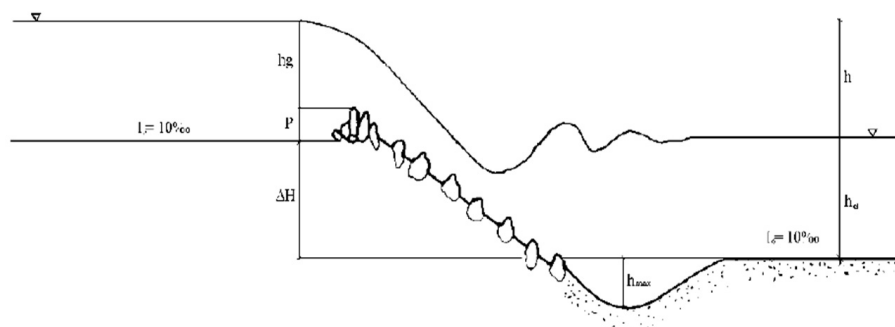
Tabela 1. Lokalizacja przekrojów poprzecznych

Table 1. Localization of cross-sections

Miejsca pomiarowe na stanowisku górnym		Miejsca pomiarowe na stanowisku dolnym	
Przekroje pomiarowe	Odległość od górnej krawędzi płyty bystrza [m]	Przekroje pomiarowe	Odległość od dolnej krawędzi płyty bystrza [m]
G1	4,5	D1	4,0
G2	9,0	D2	7,0
G3	13,0	D3	10,0
G3	17,0	D4	20,0
G4	22,0	D5	30,0



Rys. 3. Profil podłużny dla serii 1 i 2 (2013r. i 2014 r.)
Fig. 3. The 1st and 2nd longitudinal profile (from 2013 and 2014)



Rys. 4. Schemat bystrza o zwiększonej szorstkości oraz rozmycia dna [Ślizowski, Radecki-Pawlik 2003]
Fig. 4. Scheme of block ramp and bed scour

się wtedy o $h_{max2} = 0,87$ m w stosunku do serii 1 (rys. 3). Lokalizacja najgłębszego rozmycia dna w obydwu przypadkach była taka sama, wynosząc $L_{max} = 4,0$ m.

Przy wykorzystaniu wzorów empirycznych, zostały wyliczone teoretyczne maksymalne głębokości rozmycia będą obliczone dla konkretnych warunków hydrodynamicznych występujących na rzece, odpowiadających fali powodziowej, która przeszła w maju 2014 roku, a także dla określonej granulometrii (rys. 4).

Teoretyczne maksymalne głębokości rozmycia będą obliczone dla konkretnych warunków hydrodynamicznych występujących na rzece, odpowiadających fali powodziowej, która przeszła w maju 2014 roku, a także dla określonej granulometrii (rys. 4).

Do analizy zostały wykorzystane następujące formuły: Eggenbergera, Jaeger'a, Lacey'a, Chividini'ego, Masona, Martinsa, Veronese'a, Chan Min Wu, Whittaker'a i Jäggi'ego, Paglia-

ry oraz Volkarta, a także Ślizowskiego (Attari i in. 2002, Chividini 1983, Dąbkowski i in. 1982, Leopardo i in. 2002, Novak 1955, Novak i in. 1997, Pagliara 2007, Pagliara i Palermo 2008, Pagliara i in. 2017, Sindelar 2011, Singh 1983, Ślizowski 1993, 2004, Ślizowski i Radecki-Pawlik 1999, 2003, Vincent 1968, Volkart 1972, Whittaker i Jäggi 1986, Yang 1996, Zástěra 1984).

- Formuła Eggenbergera (Vincent 1968):

$$h_{max} = w \cdot \frac{h^{0,5} q^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} - h_a$$

gdzie:

- h_{max} – maksymalna głębokość rozmycia [m],
- h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],
- q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],

h_d – głębokość wody dolnej [m],
 d_{90} – średnica charakterystyczna rumowiska [m].

w – współczynnik, wg Zástěry (1984) jego wartość powinna wynosić 0,45, lecz wg Vicenta (1968) można go obliczyć z następującego równania:

$$w = \frac{(h'_{max} + h_d) \cdot d_{90}^{0,4}}{h^{0,5} \cdot q^{0,6}}$$

- Formuła Jaeger'a (Yang 1996):

$$h_{max} = 0,55 \left[6 \cdot h^{0,25} \cdot q^{0,25} \cdot \left(\left(\frac{h_d}{d_{90}} \right)^{1/3} - h_d \right) \right]$$

gdzie:

h_{max} – maksymalna głębokość rozmycia [m],
 h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],
 q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 h_d – głębokość wody dolnej [m],
 d_{90} – średnica charakterystyczna rumowiska [m].

- Formuła Lacey'a, wykorzystująca równanie przepływu (Novak 1955, Singh 1983, Novak i in. 1997):

$$h_{max} = 0,475 \cdot \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3}$$

gdzie:

$$f = 1,75 \cdot d_{90}^{0,5}$$

Q – przepływ obliczeniowy [$m^3 \cdot s^{-1}$],

- Formuła Chividini'ego, w której na początku obliczona zostaje liczba spadu Z , a następnie wielkość rozmycia (Chividini 1983, Leopardo i in. 2002):

$$h_{max} = k \cdot Z^{0,5} \cdot h$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],
 k – współczynnik bezpieczeństwa,
 h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],
 Z – liczba spadu liczona ze wzoru:

$$Z = \frac{q}{(g \cdot h^3)^{0,5}}$$

q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],

- Formuła Masona (Attari i in. 2002):

$$h_{max} = 3,27 \cdot q^{0,6} \cdot h^{0,15} \cdot h_d^{0,05} \cdot g^{-0,3} \cdot d^{-0,1}$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],
 q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],
 h_d – głębokość wody dolnej [m],
 g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],
 d – średnica charakterystyczna rumowiska [m].

- Formuła Martinsa (Attari i in. 2002):

$$h_{max} = a \cdot q^b \cdot h^c$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],
 q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],
 $a = 1,5$,
 $b = 0,6$,
 $c = 0,1$.

- Formuła Veronese'a (Attari i in. 2002):

$$h_{max} = a \cdot q^b \cdot h^c$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],
 q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],
 $a = 1,9$,
 $b = 0,54$,
 $c = 0,225$.

- Formuła Chian Min Wu (Attari i in. 2002):

$$h_{max} = a \cdot q^b \cdot h^c$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],
 q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],
 $a = 1,18$,
 $b = 0,51$,
 $c = 0,235$.

- Formuła Whittaker'a i Jäggi'ego (1986)

$$h_{max} = 1,31 \cdot q^{0,5} \cdot v^{0,5} - 7,125 \cdot d_{90}$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],

q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 v – średnia prędkość zmierzona bezpośrednio przed rozmyciem poniżej bystrza [$m \cdot s^{-1}$],
 d_{90} – średnica charakterystyczna rumowiska [m].

- Formuła Pagliari (2007, 2008):

$$h_{sr} = 0,58 \cdot U_{84}^{0,55} \cdot I^{0,75} \cdot Fr_{d90}$$

$$h_{max} = (1 + 0,55 \cdot Fr_{d90}^{-0,75}) \cdot h_{sr}$$

gdzie:

h_{max} – maksymalna głębokość rozmycia [m],
 h_{sr} – średnia głębokość rozmycia [m],
 U_{84} – współczynnik jednorodności sedimentu, liczony ze wzoru:

$$U_{84} = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$$

d_{84} , d_{16} – średnice charakterystyczne rumowiska [m],

I – spadek płyty spadowej bystrza [-],

Fr_{d90} – densymetryczna liczba Froude'a, obliczana ze wzoru:

$$Fr_{d90} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d_{90}}}$$

v – średnia prędkość zmierzona bezpośrednio przed rozmyciem poniżej bystrza [$m \cdot s^{-1}$],

g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],

d_{90} – średnica charakterystyczna rumowiska [m].

- Formuła Volkarta (1972):

$$h_{max} = 1,25 \cdot \frac{q^{\frac{1}{2}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{2}{3}}}{d_{90}^{\frac{5}{12}}} \cdot \frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g^{\frac{1}{4}}}$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],

q – przepływ jednostkowy [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 I – spadek płyty spadowej bystrza [-],
 L – długość płyty spadowej bystrza [m],
 d_{90} – średnica charakterystyczna rumowiska [m],
 ρ_s – gęstość materiału dennego [$kg \cdot m^{-3}$],
 ρ_w – gęstość wody [$kg \cdot m^{-3}$],
 g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$].

- Formuła Ślizowskiego (1993):

$$h_{max} = (a_0 + a_1 Q + a_2 I + a_3 \Delta H) / 100$$

gdzie:

h_{max} – głębokość rozmycia [m],
 Q – przepływ obliczeniowy [$m^3 \cdot s^{-1}$],
 I – spadek płyty spadowej bystrza [-],
 ΔH – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],

Współczynniki:

$$a_0 = -0,0005 \mp 0,0006$$

$$a_1 = 1,6010 \mp 0,0740$$

$$a_2 = 0,1552 \mp 0,0120$$

$$a_3 = 0,0389 \mp 0,0300$$

Teoretyczne maksymalne głębokości rozmycia przy użyciu powyższych formuł będą obliczone dla warunków hydrodynamicznych występujących na rzece i granulometrii, zestawionych w tabeli 2.

WYNIKI WRAZ Z Dyskusją

Obliczenie teoretycznej głębokości rozmycia za pomocą powyższych formuł przy uwzględnieniu danych warunków hydrodynamicznych i granulometrii dało szereg różnych wyników z zakresu od 0,87 m do 7,61 m, co stanowi zakres odchylenia od wartości rzeczywistej od 0,0 m do +6,74 m (tab. 3).

Tabela 2. Zestawienie warunków hydrodynamicznych i granulometrii

Table 2. The hydrodynamic and granulometric conditions

Parametr	Symbol	Wartość
Przepływ wezbraniowy	Q	54,4 $m^3 \cdot s^{-1}$
Szerokość budowli	B	22 m
Przepływ jednostkowy	q	2,47 $m^2 \cdot s^{-1}$
Średnia prędkość poniżej bystrza uzyskana przed rozmyciem	v	3,4 $m \cdot s^{-1}$
Głębokość wody dolnej	h_d	0,6 m
Różnica poziomów wody górnej i dolnej	h, ΔH	1,5 m
Średnica charakterystyczna rumowiska	d_{90}	0,052 m
Średnica charakterystyczna rumowiska	d_{50}	0,033 m

Tabela 3. Zestawienie obliczonych teoretycznych maksymalnych głębokości rozmycia h_{\max}
Table 3. Calculation values of maximum depth scour h_{\max}

Formuły obliczeniowe	h_{\max} [m]	Odchylenie od wartości rzeczywistej [m]
Eggenbergera	2,50	+ 1,63
Jaeger'a	7,61	+ 6,74
Lacey'a	2,44	+ 1,57
Chividini'ego dla:		
$k = 1$	0,98	+ 0,11
$k = 2$	1,97	+ 1,10
$k = 3$	2,95	+ 2,08
Martinsa	2,69	+ 1,82
Veronese'a	3,39	+ 2,52
Chian Min Wu	2,06	+ 1,19
Masona dla:		
$d_{50} = 0,033 \text{ m}$	4,13	+ 3,26
$d_{90} = 0,052 \text{ m}$	3,95	+ 3,08
Whittakera i Jäggi'ego	3,43	+ 2,56
Pagliary	1,10	+ 0,23
Volkarta	4,51	+ 3,64
Ślizowskiego	0,87	0,0

Wzór Eggenbergera, który jest polecany przez Zasterę (1984) w wytycznych projektowych Hydroprojektu z Brna do stosowania przy projektowaniu narzutowych bystrzy o zwiększonej szorstkości, zaleca podstawianie pod współczynnik w wartość 0,45. Wartość obliczona tym wzorem z uwzględnieniem zaleceń Zastery, wyniosła 2,50 m, co było wartością większą od rzeczywistej o 1,63 m (tab. 3).

Formuła Jaegera uwzględniająca różnicę poziomów wody górnej i dolnej, przepływ jednostkowy, głębokość wody dolnej i średnicę charakterystyczną rumowiska dała wynik $h_{\max} = 7,61$ m. Wartość ta jest bardzo duża, większa aż o 6,74 m od rzeczywistej głębokości rozmycia, licząc od poziomu dna zastanego przy 1-wszej serii pomiarowej (tab. 3).

Według formuły Lacey'a uwzględniającej przepływ i średnicę charakterystyczną rumowiska, maksymalna głębokość rozmycia wyniosła $h_{\max} = 2,44$ m. Wartość ta jest większa od rzeczywistej o 1,57 m (tab. 3).

W formule Chividini'ego najpierw obliczona została liczba spadu Z , gdzie wykorzystany został przepływ jednostkowy, przyspieszenie ziemskie i różnica poziomów wody górnej i dolnej. Liczba spadu wyniosła $Z = 0,43$. Głębokość rozmycia h_{\max} została obliczona dla trzech różnych współczynników bezpieczeństwa k . Można zaobserwować zależność, że im większa wartość współczynnika k zostanie przyjęta, tym teoretyczna maksymalna głębokość rozmycia będzie większa

(tab. 4). Najbliższa rzeczywistej jest teoretyczna głębokość rozmycia obliczona dla współczynnika bezpieczeństwa $k=1$, dla którego $h_{\max} = 0,98$ m. Wartość ta większa jest od rzeczywistego rozmycia o 0,11 m. Przy współczynniku $k = 2$ wartość h_{\max} równa się 1,97 m i jest większa od rzeczywistej o 1,10 m, natomiast dla współczynnika $k = 3$ wartość h_{\max} wynosi 2,95 m i większa jest od rzeczywistej o 2,08 m (tab. 4).

Formuły Martinsa, Veronese'a i Chian Min Wu wykorzystują przepływ jednostkowy i różnicę poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej, a także trzy współczynniki a , b , c , które są charakterystyczne dla każdej z formuł. Najbliższa rzeczywistej głębokości rozmycia jest wartość $h_{\max} = 2,06$ m, wyliczona z formuły Chian Min Wu, większa od rzeczywistej o 1,19 m (tab. 3).

Do obliczenia h_{\max} według formuły Masona wykorzystana zostaje różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej, przepływ jednostkowy, głębokość wody dolnej, przyspieszenie ziemskie oraz średnica charakterystyczne rumowiska. Maksymalna głębokość rozmycia obliczona została dla dwóch średnic charakterystycznych: d_{50} oraz d_{90} . Dla d_{50} głębokość rozmycia wyniosła $h_{\max} = 4,13$ m, natomiast dla d_{90} równała się $h_{\max} = 3,95$ m. Wartości te są większe od głębokości rzeczywistej odpowiednio o 3,26 i 3,08 m (tab. 3).

Formuła Whittakera i Jäggi zakłada uwzględnienie przepływu jednostkowego, średniej prędkości zmierzonej bezpośrednio przed rozmyciem poniżej bystrza oraz średnicy charaktery-

stycznej rumowiska. Wykonane obliczenia dały wynik $h_{\max} = 3,43$ m, większy od rzeczywistej wartości o 2,56 m (tab. 3).

Według formuły Pagliary, głębokość rozmycia zależna jest współczynnika jednorodności sedymentu, który wyniósł $U_{84} = 1,54$, spadku oraz liczby Froude'a. Spadek na analizowanym bystrzu wynosi $I = 0,09$, a liczba Froude'a obliczona dla średnicy charakterystycznej d_{90} wynosi $Fr = 4,76$. Średnia głębokość rozmycia wyliczona ze wzoru Pagliary wyniosła $h_{sr} = 0,58$ m z kolei maksymalna głębokość rozmycia wyniosła $h_{\max} = 1,10$ m i jest większa od rzeczywistej o 0,23 m (tab. 3).

Kolejnym wykorzystanym wzorem była formuła Volkarta, uwzględniająca przepływ jednostkowy, spadek, długość bystrza, średnicę charakterystyczną rumowiska, gęstość wody i materiału dennego oraz przyspieszenie ziemskie. Formuła Volkarta dała wynik $h_{\max} = 4,51$ m. Wartość ta jest większa od rzeczywistej o 3,64 m (tab. 3).

Ostatnią wykorzystaną formułą jest wzór Ślizowskiego. Ze wszystkich analizowanych wzorów, uzyskana dzięki tej formule wartość maksymalnego rozmycia jest najbliższa głębokości rzeczywistej, gdzie jej zgodność wyniosła 0 m. Stąd wynik maksymalnej głębokości rozmycia uzyskany wzorem Ślizowskiego wynoszący 0,87 m, idealnie współgra z rzeczywistą głębokością wyboju.

WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Porównując wielkości rzeczywistych głębokości rozmycia z wielkościami obliczonymi za pomocą wzorów empirycznych można stwierdzić, że wyniki stosunkowo najbardziej zbliżone do wartości z pomiarów można otrzymać z formuły Ślizowskiego, Chividiniego (dla współczynnika bezpieczeństwa $k = 1$) i Pagliary.
2. Przy użyciu formuł empirycznych na teoretyczną maksymalną głębokość rozmycia otrzymuje się wyniki niedokładne, częściowo tylko zbliżone do wielkości rzeczywistych. Wartości te mogą służyć do analiz porównawczych różnych rozwiązań konstrukcyjnych bystrzy o zwiększonej szorstkości.
3. Najbardziej odbiegające od rzeczywistych wyniki daje formuła Jaegera, o wiele większe

niż rzeczywiste głębokości rozmycia (różnica +6,75 m), stąd formuła ta nie może być przydatna. Mocno zawyżone wartości otrzymuje się również ze wzorów Masona, Volkarta oraz Whittakera i Jäggi'ego (+3,65 m ÷ + 2,56 m).

4. Najbliższe wartości rzeczywistej głębokości rozmycia dna dają formuły Ślizowskiego, Chividiniego dla współczynnika $k = 1$ oraz Pagliary. Wynik z formuły Ślizowskiego jest zgodny z warunkami rzeczywistymi, obserwowanymi w terenie. Wynik uzyskany ze wzoru Chividiniego daje wartość tylko o 0,11 m większą, niż obserwowana w terenie głębokość rozmycia. Z kolei w przypadku formuły Pagliary wielkość maksymalnej głębokości rozmycia uzyskanej przy użyciu wzoru jest o 0,23 m większa niż w rzeczywistości. Wszystkie trzy formuły dają wynik najbardziej odpowiadający rzeczywistości, stąd dla tego typu bystrza, mogą być używane.

LITERATURA

1. Attari J., Afcri F., Golzari F. 2002. A review of physical models of scour holes below large dams in Iran. Rock Scour due to Falling High-Velocity Jets, Schleiss and Bollaert eds., Swets and Zeitlinger, Lisse, Szwajcaria, 73.80.
2. Chividini M. F. 1983. Evaluation of maximum scour downstream ski-jump spillways. Proceedings of the XI Water National Congress, Cordoba, Argentina, 6, 187.210.
3. Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
4. Kondracki J. 2000. Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
5. Korpak J., Krzemień K., Radecki-Pawlik A. 2008. Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpaccich. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Tech. Inf. Wsi, PAN Oddz. w Krakowie, 4
6. Korpak J., Krzemień K., Radecki-Pawlik A. 2009. Wpływ budowli regulacyjnych i poboru rumowiska na koryta rzek i potoków górskich – wybrane przykłady z rzek karpaccich. Gospodarka Wodna, Warszawa, Sigma-Not, 7, 274–281
7. Leopardo R. A., Leopardo M. C., Casado J. M. 2002. Local rock scour downstream large dams. Rock Scour due to Falling High-Velocity Jets, Schleiss and Bollaert eds., Swets and Zeitlinger,

- Lisse, Szwajcaria, 55–61.
8. Novak P. 1955. Study of silting basins with special regard to their end sills. [in:] 6th Congress of the IAHR, Hague, paper C15.
 9. Novak P., Moffat A. I. B., Nalluri C. Narayann R. 1997. *Hydraulics Structures*. Spon. Chapman and Hali, London.
 10. Pagliara S. 2007. Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 133, 1241–1248
 11. Pagliara S., Palermo M. 2008. Scour control and surface sediment distribution downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Research*, 46(3), 334–343
 13. Pagliara S., Radecki-Pawlik A., Palermo M., Plesiński K. 2017. Block ramps in curved rivers: morphology analysis and prototype data support of design criteria for mild bed slopes. *River Research and Applications*, 33(3), 427–437
 14. Plesiński K., Jadach A., Laszek W., Radecki-Pawlik A. 2014. Zmiany warunków hydrodynamicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Rabe w Karpatach. *Nauka Przyroda Technologie*, 8, 4, #57, 1–16
 15. Radecki-Pawlik A. 2014. *Hydromorfologia rzek i potoków górskich – działy wybrane*. Wyd. UR, Kraków.
 16. Sindelar C. 2011. *Design of a Meandering Ramp*, Ph.D. Thesis, Technische Universität Graz.
 17. Singh K. Y. H. 1983. *Fundamentals of Irrigation Engineering*. Nemchand, Roorkee.
 18. Stupnicka E. 1997. *Geologia regionalna Polski*. Wydawnictwo UW, Warszawa.
 19. Ślizowski R. 1993. Bystrza o zwiększonej szorstkości jako element zabudowy potoków górskich. *Zesz. Nauk. AR, Kraków, Rozpr. Hab*, 181.
 20. Ślizowski R. 2004. Increased roughness rapids as an element used for stabilization of mountain streams. PAN, Kraków
 21. Ślizowski R., Radecki-Pawlik A. 1999. Rozmycie nieumocnionego dna poniżej bystrzy o zwiększonej szorstkości. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie*, 355(19), 115–123
 22. Ślizowski R., Radecki-Pawlik A. 2003. Weryfikacja formuł do obliczania rozmycia nieumocnionego dna poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości na podstawie pomiarów laboratoryjnych. *Acta Scientiarum Polonorum: Formatio Circumiectus*, 2(2), 25–34
 23. Vincent J. 1968. *Vysukum zdrasnych sklozov na tokach s pevnym dnom*. YUYH, Bratislava.
 24. Volkart P. 1972. Die Stabilisierung von Flusslaufen mittels einer Folge von Querswellen. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, Glaziologie, ETH Zurich*, 6.
 25. Whittaker J. G., Jäggi M. 1986. *Blockschwellen*. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, Glaziologie, ETH Zurich*, 91
 26. Yang T. C. 1996. *Sediment Transport-theory and practise*. McGraw-Hill, New York.
 27. Zástěra Z. 1984. *Balvanite Skluzy*. Hydroprojekt O.Z., Rezortni Ukol R-4, Brno