

Karol Plesiński*

ANALIZA ROZMYCIA DNA CIEKU PONIŻEJ BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI (PRZYKŁAD Z POTOKU PONICZANKA W MIEJSCOWOŚCI PONICE)

Streszczenie

Praca dotyczy rozmycia nieumocnionego dna cieków poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości na potoku Poniczanka w miejscowości Ponice. Obliczono głębokość rozmycia dna poniżej budowli wykorzystując formuły empiryczne 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. Celem pracy jest weryfikacja formuł obliczeniowych głębokości rozmycia dna poniżej bystrza na podstawie wyników badań terenowych. Stwierdzono, że zależności empiryczne służące do obliczenia głębokości rozmycia dna poniżej bystrza są niedokładne, ale mogą służyć do analizy porównawczej.

Słowa kluczowe: rozmycie dna, wzory empiryczne, bystrze o zwiększonej szorstkości, potok Poniczanka

WSTĘP

Bystrza o zwiększonej szorstkości są budowlami tzw. "bliskimi naturze", które mają za zadanie zastępować pionowe, betonowe stopnie i progi wodne. Ich przewaga nad klasycznymi obiektami wynika przede wszystkim z ekologicznych funkcji, jakie one posiadają, a jakich często brakuje stopniom i progom wodnym. Bystrza powinny być tak wykonywane, aby były drożne dla migrujących ryb i makrobentosu oraz nie stanowiły przeszkody, która uniemożliwiłaby wędrówkę organizmom wodnym. Zdarzało się, że przy klasycznych budowlach wodnych tego problemu nie zauważano, a jeżeli już, to rozwiązywano go poprzez budowę

* Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki

przepławek dla ryb, które często jednak były niedrożne. W przypadku bystrzy, takich dodatkowych elementów nie trzeba budować, a ryby powinny móc przepłynąć po płycie spadowej budowli [Radecki-Pawlik 2009, Plesiński i in. 2014].

Dodatkowym atutem bystrzy jest ich estetyczne współgranie z krajobrazem, gdyż są w niewielkim stopniu wykonane z elementów sztucznych. Wykorzystany do budowy materiał powinien być pochodzenia lokalnego, co także znacznie może ograniczyć koszty budowy w stosunku do klasycznych budowli hydrotechnicznych [Ślizowski 1990, Radecki-Pawlik 2010].

Głównym elementem bystrza o zwiększonej szorstkości jest jego płyta spadowa ułożona pod pewnym nachyleniem. Zbudowana powinna być z kamienia łamanego, którego zadaniem jest zwiększenie szorstkości. Energia kinetyczna przepływającej wody powinna być rozproszona na płycie spadowej obiektu, stąd często w tego typu obiektach, nie wykonuje się poniżej niecki wypadowej. Stwarza to zagrożenie niedostatecznego rozproszenia energii na płycie spadowej i przeniesienie nadwyżki energii poniżej budowli. To z kolei może prowadzić, szczególnie przy wezbraniach, do rozmywania dna stanowiska dolnego, co w konsekwencji może doprowadzić do utraty stabilności całej budowli [Radecki-Pawlik 2009, Ślizowski 1993, 1995, 2004].

Określenie prognozy rozmycia dna rzecznego jest zagadnieniem niezwykle trudnym do wykonania. Najbardziej wiarygodne metody opierają się na symulacji projektowanej budowli na modelu fizycznym w laboratorium. Jednakże, badania takie są czasochłonne i pracochłonne, a dane uzyskane z laboratorium mogą różnić się od danych zastanych w terenie. Inną metodą określenia wielkości rozmycia dna rzecznego jest wynik oparty na wyliczeniach szeregiem formuł empirycznych. Dane takie, wyliczane różnymi wzorami dają bardzo zróżnicowane wyniki, co może prowadzić do pewnych błędów w prognozowaniu rozmycia [Dąbkowski i in. 2007, Urbański 2007].

W pracy obliczono wielkość rozmycia dna rzecznego w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości kilkoma formułami empirycznymi. Wyniki uzyskane w ten sposób porównano z rzeczywistą głębokością rozmycia, która wystąpiła po przejściu fali wezbraniowej w 2014r. Następnie na podstawie analizy porównawczej warunków rzeczywistych i danych empirycznych wybrano formuły, które najdokładniej odzwierciedlają sytuację rzeczywistą.

OPIS ZLEWNI I OBIEKTU BADAŃ

Potok Poniczanka jest prawobrzeżnym dopływem rzeki Raby. Jego źródła znajdują się na wysokości ok. 900 m n.p.m. na stokach Starych Wierchów w Gorchach. Najwyższym szczytem zlewni jest Jaworzyna o wysokości 995 m n.p.m. Koryto biegnie z południa na północ, w odcinku ujściowym lekko skręca na wschód. Po drodze potok przyjmuje wody Rdzawki, który jest jego największym

dopływem. Ujście potoku Poniczanki znajduje się na wysokości 470 m n.p.m. w Kotlinie Rabczańskiej, w miejscowości Rabka-Zdrój. Długość potoku wynosi 10,2 km, a powierzchnia zlewni 32,3 km² [Dobjija 1985, Langer 1985].

W ujściowym odcinku potoku wykonano regulację koryta rzecznego za pomocą 10-ciu bystrzy o zwiększonej szorstkości. Wybrane do analizy bystrze o zwiększonej szorstkości znajduje się w 3+469 km rzeki (rys. 1). Głównym elementem jest płyta spadowa zbudowana z kamienia łamanego o długości 24 m i spadzie 2 m, stąd jej nachylenie wynosi 1:12. Szerokość budowli wynosi 10 m [Darczuk 2013]. W wyniku przejścia w 2014 roku fali wezbraniowej, doszło do obniżenia dna stanowiska dolnego o $h_{\max} = 0,75$ m.

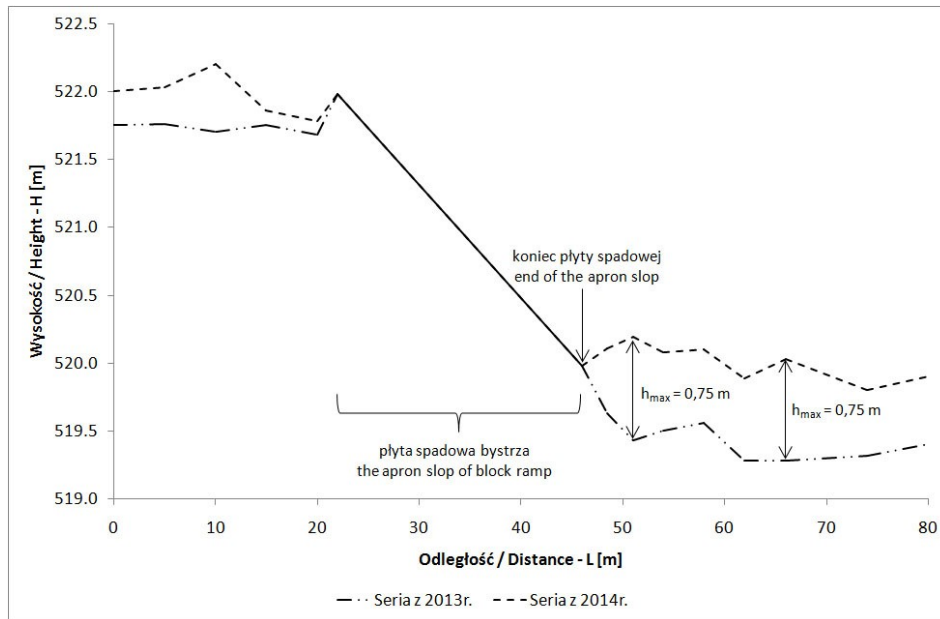


Rys. 1. Bystrze o zwiększonej szorstkości na potoku Poniczanka
Fig. 1. Block ramp on the Poniczanka Stream

METODYKA

W roku 2013 oraz 2014 wykonano tachimetrem TOPCON GTS-226 przekroje poprzeczne, dzięki którym wykreślono profil podłużny analizowanego odcinka.

Pomiędzy seriami odczytano rzeczywistą głębokość rozmycia, która wyniosła $h_{\max} = 0,75$ m. Była to największa odległość pomiędzy niweletą dna przed i po wezbraniu, która wystąpiła w dwóch miejscach stanowiska dolnego, w odległości $L = 5$ m i $L = 20$ m od końca płyty spadowej. W innych miejscach, obniżenie dna było mniejsze (rys. 2).



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

Przy wykorzystaniu wzorów empirycznych, zostały wyliczone teoretyczne maksymalne głębokości rozmycia, które następnie porównano z wielkością rzeczywistą. Dzięki temu ustalono, które formuły obliczeniowe dają wyniki najbliższe rzeczywistym.

Teoretyczne maksymalne głębokości rozmycia były obliczone dla konkretnych warunków hydrodynamicznych występujących w korycie rzecznej, odpowiadających fali powodziowej, która przeszła w maju 2014 roku, a także dla określonej granulometrii (tab. 1).

Tab.1. Zestawienie warunków hydrodynamicznych i granulometrii
 Tab. 1. The hydrodynamic and granulometric conditions

Parametr / Parameter	Symbol	Wartość / Value
przepływ wezbraniowy / flood discharge	Q	33,5 m ³ ·s ⁻¹
szerokość budowli / block ramp width	B	10 m
przepływ jednostkowy / unit discharge	q	3,35 m ² ·s ⁻¹
średnia prędkość poniżej bystrza uzyskana przed rozmyciem / average velocity before scour	v	3,11 m·s ⁻¹
głębokość wody dolnej / downstream water depth	h_d	0,666 m

różnica poziomów wody górnej i dolnej / difference water level between upstream and downstream	h, ΔH	2,0 m
średnica charakterystyczna rumowiska / diameter of bed sediment	d₉₀	0,053 m
średnica charakterystyczna rumowiska / diameter of bed sediment	d₅₀	0,035 m

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, Pagliari 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]:

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

- Formuła Jaeger'a [Yang 1996]:

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

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

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

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

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

- Formuła Masona [Attari i in. 2002]:

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

- Formuła Martinsa [Attari i in. 2002]:

$$h_{max} = 1,5 \cdot q^{0,6} \cdot h^{0,1}$$

- Formuła Veronese'a [Attari i in. 2002]:

$$h_{max} = 1,9 \cdot q^{0,54} \cdot h^{0,225}$$

- Formuła Chian Min Wu [Attari i in. 2002]:

$$h_{max} = 1,18 \cdot q^{0,51} \cdot h^{0,235}$$

- Formuła Whittaker'a i Jäggi'ego [1986]

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

- Formuła Pagliary [2007, 2008]:

$$h_{sr} = 0,58 \cdot U_{84}^{-0,55} \cdot I^{0,75} \cdot Fr_{d50}$$

$$h_{max} = (1 + 1,75 \cdot Fr_{d50}^{-1,75}) \cdot h_{sr}$$

- Formuła Volkarta [1972]:

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

- Formuła Ślizowskiego [1993]:

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

gdzie:

h_{max} – maksymalna głębokość rozmycia [m],

h_{sr} – średnia głębokość rozmycia [m],

$h, \Delta H$ – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej ($h_g - h_d$) [m],

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

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

h_d – głębokość wody dolnej [m],

$d, d_{16}, d_{50}, d_{84}, d_{90}$ – średnice charakterystyczne rumowiska [m].

w – współczynnik, wg Zástěry (1984) jego wartość powinna wynosić 0,45, lecz

wg Vicenta (1968) można go obliczyć z następującego równania:

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

I – spadek płyty spadowej bystrza [-],

k – współczynnik bezpieczeństwa,

U_{84} – współczynnik jednorodności sedymentu: $U_{84} = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$

Fr_{d50} – densymetryczna liczba Froude'a: $Fr_{d50} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d_{50}}}$

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

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

L – długość płyty spadowej bystrza [m],

ρ_s – gęstość materiału dennego [$kg \cdot m^{-3}$],

ρ_w – gęstość wody [$kg \cdot m^{-3}$],

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

Z – liczba spadu liczona ze wzoru: $Z = \frac{q}{(g \cdot h^3)^{0,5}}$

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

a_0 – współczynnik przyjmujący wartość: $a_0 = -0,0005 \pm 0,0006$

a_1 – współczynnik przyjmujący wartość: $a_1 = 1,6010 \pm 0,0740$

a_2 – współczynnik przyjmujący wartość: $a_2 = 0,1552 \pm 0,0120$

a_3 – współczynnik przyjmujący wartość: $a_3 = 0,0389 \pm 0,0300$

WYNIKI WRAZ Z DYSKUSJĄ

Zastosowane formuły na obliczenie rozmycia dna poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Poniczance dają bardzo zróżnicowane wartości, granica błędu dochodzi do 8,06 m (wzór Jaeger'a). Taka rozbieżność głębokości maksymalnej rozmycia w porównaniu do warunków rzeczywistych na stanowisku dolnym bystrza sprawia, że nie możemy posłużyć się jedynie wyliczeniami matematycznymi do oceny stanu budowli i do prognozowania tego zjawiska. Najbardziej wiarygodne są dane zmierzone w terenie, a dane formuły mogą posłużyć do próby analizy przystosowania konstrukcji do zachodzących zjawisk (tab. 2).

Tab. 2. Zestawienie obliczonych teoretycznych maksymalnych głębokości rozmycia h_{max}
 Tab. 2. Calculation values of maximum depth scour h_{max}

Formuły obliczeniowe / Empirical formulas	h_{max} [m] - maksymalna obliczeniowa głębokość rozmycia / maximum scour depth calculation	Odchylenie od wartości rzeczywistej / Deviation from field value[m]
Eggenbergera	3,59	+ 2,84
Jaeger'a	8,81	+ 8,06
Lacey'a	2,07	+ 1,32
Chividini'ego dla:		
$k = 1$	1,23	+ 0,48
$k = 2$	2,46	+ 1,71
$k = 3$	3,69	+ 2,94
Martinsa	3,32	+ 2,57
Veronese'a	4,26	+ 3,52
Chian Min Wu	2,57	+ 1,82
Masona dla:		
$d_{50} = 0,035 m$	4,97	+ 4,21
$d_{90} = 0,053 m$	5,17	+ 4,43
Whittakera i Jäggi'ego	3,85	+ 3,10
Pagliary	1,03	+ 0,28
Volkarta	6,40	+ 5,65
Ślizowskiego	0,54	- 0,21

Najbliższe wyniki rzeczywistym warunkom rozmycia dała formuła Ślizowskiego, Pagliary i Chividini'ego (dla współczynnika bezpieczeństwa $k = 1$).

Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo budowli oraz działania ograniczające jej zawalenie, najbardziej racjonalnym będzie używanie wzoru Pagliary, który pokazuje bardziej niekorzystne warunki niż wzór Ślizowskiego. Przewidzenie skali rozmycia z granicą bezpieczeństwa jaką w tym przypadku daje obliczenie większego rozmycia o 0,28 m umożliwi racjonalne zabezpieczenie konstrukcji, bez

nadmiernych nakładów finansowych. W przypadku formuły Ślizowskiego, odchylenie obliczonej wartości rozmycia dna od rozmycia rzeczywistego także jest niewielka, wynosząc tylko - 0,21 m, ale wielkość ta jest niedoszacowana.

Rozmycie powstałe poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Poniczance uzyskało głębokość maksymalną 0,75 m. Jest to wielkość, która nie zagraża stabilności konstrukcji. Wpływa ona negatywnie na warunki środowiskowe potrzebne do życia rydom. Rozmycie dna powoduje jego obniżenie, co w konsekwencji dla wędrujących ryb może okazać się, że nie będą w stanie lub będą miały znacznie utrudnione wpłynięcie na płytę spadową bystrza.

Bystrze o zwiększonej szorstkości, pomimo powstania rozmycia dna poniżej płyty spadkowej po przejściu fali wezbraniowej, jest najbardziej optymalnym rozwiązaniem poprzecznej regulacji koryt rzek. Dzięki swojej konstrukcji i założeniom, pozwala w sposób zrównoważony pogodzić priorytety ważne z punktu widzenia człowieka i środowiska naturalnego.

WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Formułami do obliczania rozmycia dna rzecznoego, które dają najlepsze wyniki jest wzór Ślizowskiego (0,54 m, odchylenie od wartości rzeczywistej: - 0,21 m), Pagliary (1,03 m, odchylenie: + 0,28 m) i Chividini'ego dla $k = 1$ (1,23 m, odchylenie: + 0,48 m). Pozostałe formuły nie powinny być używane dla obliczania wielkości rozmycia dna rzecznoego, gdyż dają wyniki bardzo zawyżone, niekiedy nawet bardzo nierealne.
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 porównanych różnych rozwiązań konstrukcyjnych bystrzy o zwiększonej szorstkości.
3. Najgorsze wyniki na głębokość rozmycia dna uzyskano ze wzorów: Jeager'a, Voklarta i Mansona (odchylenie od wartości rzeczywistej powyżej ≥ 4 m), Veronese'a, Whittakera i Jäggi'ego (≥ 3 m), Eggenbergera, Chividini'ego (dla $k = 3$) oraz Martinsa (≥ 2 m). Tych wzorów należy kategorycznie unikać w celu obliczania głębokości rozmycia.
4. Wyniki mają charakter lokalny. Dla bystrzy usytuowanych na innych rzekach lub nawet dla innych rodzajów budowli hydrotechnicznych, zgodność wyników obliczonych wzorami empirycznymi z warunkami rzeczywistymi może być całkowicie odmienna niż w przypadku bystrza na potoku Poniczanka.

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 S.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982. *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa Darczuk K. 1996 *Regulacja potoku Poniczanka w km 1+890 – 4+080 w miejscowości Ponice – aktualizacja*. Kraków
4. DĄBKOWSKI S.L., SIWICKI P., URBĄŃSKI J. 2007. *Rozmycia na modelu jazu przepuszczającego wodę pod i nad zasuwą*. Acta Scientiarum Polonorum: Architectura, 6(3), 3-14
5. DOBIJA A. 1985 *Charakterystyka hydromorfologiczna górnej części zlewni Poniczanki* [w:] Bandoła-Ciołczyk E. *Badania fizjograficzne i ekologiczne na obszarze zlewni Poniczanki w Gorcach*. Studia Naturae, Seria A – Wydawnictwa Naukowe, PWN – PAN, Warszawa – Kraków, 29, 15-23
6. KONDRACKI J. 2000. *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
7. LANGER M. 1985 *Hydrografia górnej części doliny Poniczanki* [w:] Bandoła-Ciołczyk E. *Badania fizjograficzne i ekologiczne na obszarze zlewni Poniczanki w Gorcach*. Studia Naturae, Seria A – Wydawnictwa Naukowe, PWN – PAN, Warszawa – Kraków, 29, 85-97
8. 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.
9. NOVAK P. 1955. *Study of silting basins with special regard to their end sills*. [in:] 6th Congress of the IAHR, Hague, paper C15.
10. NOVAK P., MOFFAT A. I. B., NALLURI C. NARAYMANN R. 1997. *Hydraulics Structures*. Spon. Chapman and Hali, London.
11. PAGLIARA S. 2007. *Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps*. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 133, 1241-1248
12. 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 Rabie w Karpatach*. Nauka Przyroda Technologie, 8, 4, #57, 1-16
15. RADECKI-PAWLIK A. 2009 *Bystrza jako bliskie naturze rozwiązania utrzymania koryt rzek i potoków górskich*. Nauka Przyroda Technologie, Dział Melioracje i Inżynieria Środowiska, 3(3), 1-8
16. RADECKI-PAWLIK A. 2010b *O niektórych bliskich naturze rozwiązaniach utrzymania koryt rzek i potoków górskich*. Gospodarka Wodna, 2, 78-85
17. SINDELAR C. 2011. *Design of a Meandering Ramp*, Ph.D. Thesis, Technische Universität Graz.
18. SINGH K. Y. H. 1983. *Fundamentals of Irrigation Engineering*. Nemchand, Roorkee.
19. ŚLIZOWSKI R. 1990 *Bystrza w świetle badań czechosłowackich*. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie, 240, 14, 19-35
20. ŚLIZOWSKI R. 1993 *Bystrza o zwiększonej szorstkości jako element zabudowy potoków górskich*. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Seria Rozprawy Habilitacyjne, 181, Kraków
21. ŚLIZOWSKI R. 1995 *Ekologiczne formy regulacji potoków górskich*. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie, 298(45), 225-233
22. ŚLIZOWSKI R. 2004 *Increased roughness Rapids as an element used for stabilization of mountains streams*. Prace Komisji Geodezji i Inżynierii Środowiska. PAN. Kraków
23. 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
24. URBAŃSKI J. 2007 *Rozmycia dna na modelu jazu ze zmienną długością umocnień w dolnym stanowisku*. Acta Scientiarum Polonorum: Architectura, 6(2), 27-36
25. VINCENT J. 1968. *Vysukum zdrasnych sklozov na tokach s pevnym dnom*. YUYH, Bratislava.
26. VOLKART P. 1972. *Die Stabilisierung von Flusslaufen mittels einer Folge von Querswellen*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, Glaziologie, ETH Zurich, 6.
27. WHITTAKER J. G., JÄGGI M. 1986. *Blockschwellen*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, Glaziologie, ETH Zurich, 91
28. YANG T. C. 1996. *Sediment Transport-theory and practise*. McGraw-Hill, New York.
29. ZÁSTĚRA Z. 1984. *Balvanite Skluzy*. Hydroprojekt O.Z., Rezortni Ukol R-4, Brno

GRAVEL BED RIVER SCOURING ANALYSIS DOWNSTREAM OF BLOCK RAMP (EXAMPLE FROM THE PONICZANKA STREAM IN PONICE VILLAGE)

S u m m a r y

The work describes the scouring process downstream of boulder block ramps on Poniczanka Stream in Ponice village. The depth of the downstream scouring rate was calculated using empirical formulae due to different authors. The results of the calculations were verified basing on the field measurements. Finally only those formulae which results were most consistent with field observations and those with were the worst consistent with field observations are presented along a paper. Thus the aim of the study was to verify the existing formulae of the scouring depth calculation downstream of block ramp hydraulic structure on the basis of the results of field research. It was found that the empirical relationships for calculating the scouring depth in observed case are not satisfied enough, however they can be used for comparative analysis for designers.

Key words: scouring depth, empirical formulas, block ramp, Poniczanka stream