

PARAMETRY HYDRAULICZNE BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI TYPU GRZEBIENIOWEGO: POTOK GRAJCAREK W SZCZAWNICY (KARPATY POLSKIE)

Karol Krystian Plesiński¹, Artur Radecki-Pawlik², Nadzieja Jurkowska²

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

² Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

ABSTRAKT

Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest analiza parametrów hydrodynamicznych w rejonie jednego z bystrzy znajdujących się na potoku Grajcarek.

Materiał i metody

Badania terenowe obejmowały pomiary geodezyjne, na podstawie których wykonano profil podłużny i przekroje poprzeczne koryta cieku oraz budowli. Wykonano także modelowanie numeryczne przepływów wezbraniowych w programie HEC-RAS i uzyskano dane hydrodynamiczne. Dane uzyskane z pomiarów terenowych oraz modelowania numerycznego posłużyły do obliczenia długości niecek wypadowych budowli i określenia rodzaju ruchu wody przy pomocy liczby Froude'a. Obliczenia przeprowadzono dla kilku wariantów. Rzeczywiste długości niecek porównano z długościami odskoków hydraulicznych, które się na nich tworzą.

Wyniki i wnioski

Uzyskane wyniki wskazują, że długości niecek wypadowych są za krótkie, gdyż odskoki hydrauliczne wychodzą poza nie. W związku z tym poniżej budowli tworzy się wybój, który w przypadku dalszego rozwoju może zagrażać stabilności budowli.

Słowa kluczowe: bystrze o zwiększonej szorstkości, przelew grzebieniowy, parametry hydrauliczne, niecka wypadowa, odskok hydrauliczny

WPROWADZENIE

Wołoszyn (1994) definiuje potoki górskie jako ciekły płynące wykształconymi dolinami z dużymi spadkami podłużnymi (lecz bardziej wyrównane niż na bystrotkach), reagujące na opady poprzez dynamiczne wezbrania powodujące duży transport rumowiska. Spowodowane opadem wezbrania powodują ruch rumowiska

oraz zwiększenie prędkości wody w cieku, przez co negatywnie wpływają na koryto cieku, jak i obszary przyległe. Jest więc konieczne podjęcie skutecznych działań w korycie cieku oraz w jego zlewni, mających na celu opóźnienie spływu wody opadowej na obszary niżej położone. Jednym ze sposobów służących osiągnięciu tego celu jest regulacja rzek i potoków (Lenar-Matyas i in., 2009). Regulacja rzek prowadzi do po-

✉ e-mail: karol.plesinski@urk.edu.pl

prawy warunków korzystania z wód oraz zwiększa ochronę przeciwpowodziową. Polega ona na kształtowaniu profilu podłużnego, przekroji poprzecznych oraz układu poziomego koryta rzeki w taki sposób, aby zagwarantować równowagę dynamiczną koryta ciekłu (Dz.U. 2017 poz. 1566). Najważniejszym zadaniem przy regulacji rzeki jest dostosowanie jej koryta do wymagań gospodarczych i ekonomicznych panujących w obrębie danego terenu. W związku z tym przez wiele lat najwięcej zmian i ingerencji wprowadzono na rzekach przepływających przez tereny zurbanizowane. Ze względu na zagrożenie powodziowe oraz ograniczone miejsce wykonywano tam regulację techniczną. Prowadziła ona do wyprostowania biegu rzeki oraz zmiany profili poprzecznych i podłużnych. Niestety często, cel regulacji nie został całkowicie osiągnięty. Skutkiem ujednoczenia morfologicznego koryta jest przyspieszenie odpływu, który powoduje zagrożenie w niżej położonych terenach oraz zwiększenie erozji dna ciekłu. Ciężka zabudowa koryt wpływa też negatywnie na warunki funkcjonowania flory i fauny rzecznej (Lenar-Matyas i in., 2009).

Polska jako kraj członkowski Unii Europejskiej została zobligowana do wdrażania Ramowej Dyrektywy Wodnej (2000/60/UE), która ma na celu poprawę stanu ekologicznego rzek. Oceniany jest on m.in. na podstawie warunków hydromorfologicznych ciekłu, do których zalicza się: reżim hydrologiczny (ilość i dynamika przepływów); ciągłość rzeki dla wędrówki organizmów wodnych; zmienność profilu podłużnego i poprzecznego; strukturę i skład podłoża; strukturę strefy nadbrzeżnej (Radecki-Pawlik, 2001, 2014; Wyżga i in., 2008).

W celu utrzymania koryt rzek i potoków górskich w stanie bliskim naturze należy stosować działania techniczne, które są przyjazne środowisku oraz podejmowane wspólnie z przyrodnikami. Każdą budowlę piętrzącą należy przystosować do migracji ryb oraz makrobentosu, budując przepławki. Jeżeli występuje konieczność zabezpieczenia brzegów koryta ciekłu, to należy stosować naturalne umocnienia w postaci koszy siatkowo-kamiennych, narzutów kamiennych, gabionów, budowli kaszycowych. W przypadku ochrony dna koryta rzecznoego najwłaściwszym rozwiązaniem wydaje się stosowanie bystrzy o zwiększonej szorstkości (Radecki-Pawlik, 2010; Plesiński, 2018; Radecki-Pawlik i in., 2017; Plesiński i in., 2018; Bylak i in., 2017).

Bystrzem o zwiększonej szorstkości nazywamy krótki odcinek potoku o spadku 1 : 10–1 : 30, na którym ułożono kamienie łamane o wymiarach ok. 1 m w taki sposób, aby były stabilne oraz maksymalnie zwiększały szorstkość. Działanie bystrzy polega na rozproszeniu energii przepływającej wody bezpośrednio na bystrzu, a nie jak to ma miejsce w przypadku stopni poniżej nich (Ślizowski i in., 2008; Plesiński i Radecki-Pawlik, 2018).

Celem pracy jest określenie parametrów hydrodynamicznych odpowiedzialnych za tworzenie odskoku hydraulicznego na nieckach wypadowych. Następnie porównano długości odskoków hydraulicznych z długościami niecek wypadowych, co pozwoliło stwierdzić prawidłowość wykonania analizowanej budowli. Wybój utworzony poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości może sugerować, że niecki wypadowe są za krótkie, przez co odskok wychodzi poza obiekt. Według Dąbkowskiego i in. (1982) odskokiem hydraulicznym nazywane jest zjawisko nieciągniętego przejścia strumienia z ruchu podkrytycznego w nadkrytyczny.

W naturalnych korytach rzek woda płynąca charakteryzuje się małą różnicą rzędnych zwierciadła wody na dłuższych odcinkach. Wielkości spadku wody w korytach naturalnych wynoszą od kilku do kilkunastu centymetrów, a spadki zwierciadła wody są niskie, wynoszą kilka promili. Inaczej jest w przypadku, gdy w korycie rzecznoym istnieje budowla hydrotechniczna. Wtedy spadek wody może sięgać nawet kilkunastu metrów, co powoduje powstawanie dużych prędkości przepływu. Woda przepływająca przez budowlę ze znaczną prędkością wymaga zastosowania specjalnych zabiegów ochronnych, które uniemożliwią niszczenia i rozmywania dna rzecznoego w rejonie obiektu hydrotechnicznego. Najbardziej newralgicznym miejscem jest odcinek, gdzie szybko płynący strumień wody przechodzi z betonowego do naturalnego koryta. Woda płynąca z dużą prędkością, często wyższą niż dopuszczalna, powoduje wyrywanie cząsteczek gruntu z dna rzecznoego oraz skarp brzegów, co prowadzi do rozmycia. Im bardziej stroma skarpa wyboju od strony budowli oraz im głębsze rozmycie, tym bardziej pogarszają się warunki stateczności danej budowli. Podstawowym zadaniem jest takie przeprowadzenie wody z górnego na dolne stanowisko, aby nie dopuścić do powstania wyboju, który by zagrażał sta-

teczności budowli. Najlepszym rozwiązaniem może być takie dobranie elementów systemu regulacji, by nie powstawały żadne rozmycia poniżej budowli. Jednakże takie rozwiązanie jest często nieekonomiczne, przez co stosuje się takie elementy, aby ograniczyć głębokość rozmycia lub odsunąć rozmycie jak najdalej od budowli. Znalezienie właściwego rozwiązania nie jest proste, gdyż zjawisko lokalnej erozji dna poniżej obiektów hydrotechnicznych nie jest jeszcze dostatecznie poznane i nadal w toku jest wiele badań naukowych. Dlatego sposobem ograniczenia rozmycia jest zmniejszenie prędkości przepływu wody tak, aby poniżej budowli nie występował ruch podkrytyczny ($Fr > 1$) (Hager, 1990, 1992; Hoffmans i Booi, 1993; Wu i Rajaratnam, 1996).

Wśród polskich naukowców zjawiskiem rozmycia dna rzecznoego poniżej obiektu hydrotechnicznego przy użyciu różnych metod i narzędzi badawczych zajmowali się:

- Bajkowski i in. (2002), Dąbkowski i in. (2004; 2007), Kozioł i in. (2017), Siwicki (2006) i Urbański (2005a; 2005b; 2007; 2008; 2009), którzy na modelu fizycznym analizowali rozmycie dna rzecznoego poniżej jazu;
- Urbański i in. (2018) oraz Hämmerling i in. (2019) wykonywali analizy długości odskoku hydraulicznego oraz rozmycia dna rzecznoego poniżej budowli hydrotechnicznych zarówno na modelu fizycznym, jak i numerycznym;
- Plesiński (2017) oraz Plesiński i in. (2017a) wykonywali pomiary terenowe rozmycia dna rzecznoego poniżej bystrzy o zwiększonej szorstkości z klasyczną płytą spadową i przy braku jakiegokolwiek ubezpieczenia dna poniżej obiektów. Również we współpracy z zagranicznymi naukowcami (Pagliara i in., 2017) badali rozmycie dna poniżej kamiennych bystrzy o zwiększonej szorstkości w terenie oraz w korycie hydraulicznym;
- w terenie pomiary głębokości rozmycia dna rzecznoego poniżej jazu wykonywali Urbański i Hajduk (2014);
- z kolei Kiraga wraz z zespołem (Kiraga i in., 2020) analizowali rozmycie miejscowe w rejonie filara mostowego.

Wśród zagranicznych naukowców analizujących warunki powstawania odskoku hydraulicznego oraz rozmycia dna rzecznoego poniżej klasycznych płyt spa-

dowych bystrzy o zwiększonej szorstkości w warunkach laboratoryjnych należy wymienić prace Pagliary i in. (2008; 2009; 2012; 2015; 2016) oraz Pagliara i Palermo (2008a; 2008b; 2010a; 2010b; 2010c; 2011). Oni także analizowali rozmycie dna poniżej nowych, proekologicznych struktur hydraulicznych, jakimi są kamienne progi (Pagliara i in., 2015; Pagliara i Palermo, 2018).

OPIS BADANEGO OBIEKTU

Bystrze będące obiektem badań niniejszej pracy (rys. 1, 2) zlokalizowane jest na potoku Grajcarek, w miejscowości Szczawnica, w km 1+226. Badane bystrze składa się z przelewu grzebienioowego (Ślizowski, 2004), na którym pozostało tylko 8 szykan, zaś pozostałe 6 zostało wyrwanych i przetransportowanych w dół koryta podczas wezbrania. Długość jednej szykany wynosi 0,80 m, średnia wysokość 0,65 m, zaś odstępy między nimi wynoszą 0,70 m. Poniżej przelewu wykonano 3 krótkie i stosunkowo niegłębokie niecki wypadowe. Pierwsza z nich ma 0,71 m długości i 0,16 m głębokości. Druga jest długa na 0,62 m i głęboka na 0,17 m. Trzecia, największa z nich, ma 1,46 m długości i 0,52 m głębokości. Całkowita długość bystrza wynosi 6,75 m, zaś jego wysokość 0,86 m.

Grajcarek to typowy potok górski, w którym występują duże wahania stanów wody. Powstaje z połączenia potoków Białej i Czarnej Wody, a jego łączna długość wynosi 15,3 km. W km 152,4 jest prawobrzeżnym dopływem Dunajca – trzeciego rzędu. Pod względem administracyjnym Grajcarek położony jest w południowej części województwa małopolskiego, w powiecie nowotarskim. Jest on głównym ciekim przepływającym przez Szczawnicę, a jego zlewnia w całości znajduje się na obszarze gminy. Zlewnia potoku ma powierzchnię 85 km² i jest niesymetryczna. Bardziej rozwinięta jest jej prawostronna część odprowadzająca wody z południowych stoków pasma Radziejowej w Beskidzie Sądeckim, niż lewostronna, która odwadnia północne zbocza Małych Pienin (Kondracki 2005). Głównymi dopływami prawobrzeżnymi są potoki: Stary, Sielski, Sopotnicki, Szczawny, Bryjarka, Skotnicki oraz Ścigocki, natomiast lewobrzeżnymi: Homole, Czeszle, Krupianki, Klimontowski i Głęboki. Źródła Grajczarka położone są na wysoko-



Ryc. 1. Badane bystrze na Grajcareku (fot. K. Plesiński)
Fig. 1. The research structure at the Grajcarek stream (photo K. Plesiński)



Ryc. 2. Bystrze na Grajcareku w układzie kompleksowej regulacji ciek (fot. K. Plesiński)
Fig. 2. The block ramps in the Grajcarek stream (photo K. Plesiński)

ści 940 m n.p.m., a ujście na wysokości 425 m n.p.m. Średni spadek koryta ciekę wynosi 3,3%. W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę hydrologiczną potoku Grajcarek (Ziemońska, 1973; Urząd Miasta w Szczawnicy, 2004; Młyński i in., 2018; Fal i Cabala-Plucińska, 2012).

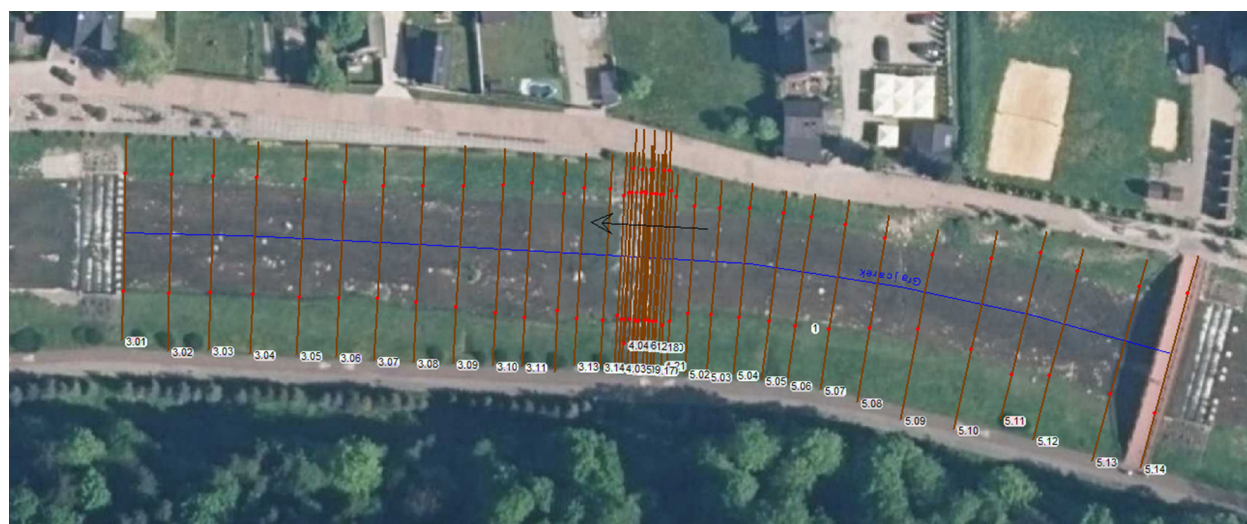
Tabela 1. Charakterystyka hydrologiczna potoku Grajcarek
Table 1. Hydrological characteristics of the Grajcarek stream

Parametr	Wartość
Najwyższy przepływ (1958 r.) o $p \approx 15\%$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	93
Przepływ $Q_{50\%}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	38,165
Przepływ $Q_{10\%}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	117,729
Przepływ $Q_{3\%}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	181.820
Przepływ $Q_{1\%}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	238,443
Najniższy przepływ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,09
Średni roczny przepływ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	1,33
Spływ jednostkowy w zlewni [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$]	16,8
Współczynnik odpływu [%]	≈ 30
Amplituda wahań stanów wody [m]	3

METODYKA

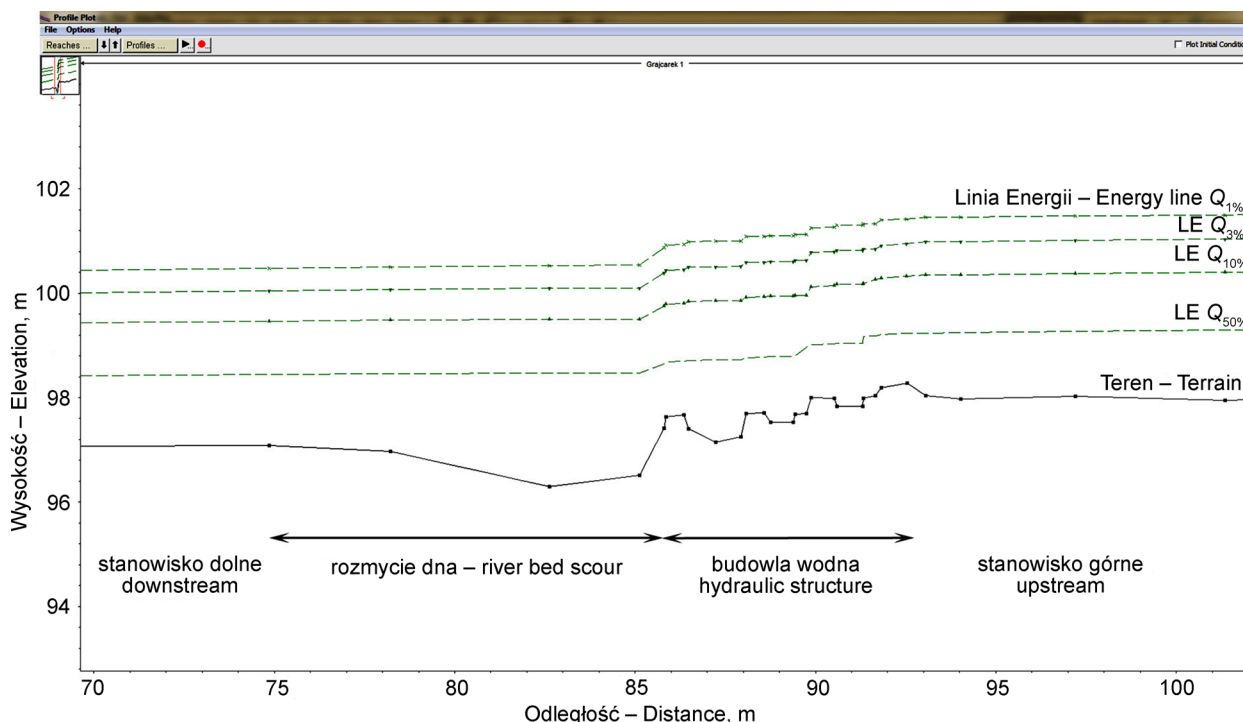
Wykonane badania terenowe obejmowały pomiar geodezyjny przy użyciu tachimetru TOPCON GTS-226. Na podstawie punktów pomiarowych wykonanych w 2014 roku wyznaczono przekroje poprzeczne koryta ciekę powyżej i poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości oraz przez obiekt hydrotechniczny (ryc. 3), profil podłużny koryta potoku oraz budowli (ryc. 4). Dane uzyskane z pomiarów geodezyjnych posłużyły również jako dane wejściowe dla programu HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), w którym wykonano modelowanie parametrów hydrodynamicznych dla przepływów wezbraniowych $Q_{50\%}$, $Q_{10\%}$, $Q_{3\%}$ i $Q_{1\%}$ (ryc. 4).

Model HEC-RAS został opracowany przez US Army Corps of Engineers. Jest szeroko stosowany na świecie, w związku z czym może być wykorzystywany do symulowania warunków przepływu wody przez złożone budowle hydrotechniczne (mosty, przepusty, jazy i inne) oraz w korytach rzecznych w zasięgu ich oddziaływania (Książek i in., 2010; Ardięłoğlu i Kuriqi, 2019; Bekhira i in., 2019; Plesiński i in., 2017b).



Ryc. 3. Widok z góry wraz z zaznaczonymi przekrojami poprzecznymi (opracowanie własne na podstawie serwisu geoportal.gov.pl)

Fig. 3. Top view with marked cross sections (own study based on geoportal.gov.pl)



Ryc. 4. Profil podłużny sekcji pomiarowej potoku Grajcarek w rejonie budowli wodnej wraz z zaznaczonymi liniami energii
Fig. 4. The longitudinal profile of the research section of the Grajcarek stream with hydraulic structures with the marked water energy lines

W celu obliczenia głębokości sprzężonych w nieckach wypadowych bystrza oraz długości niecek wykorzystano następujące wzory:

- wzniesienie linii energii na górnym stanowisku nad dnem wypadu (nr 1):

$$E_{01} = d + h_z + h_0 \text{ [m]}$$

gdzie:

d – głębokość niecki [m];

h_z – wysokość bystrza [m];

$h_0 = h_{sp} + \frac{\alpha V_d^2}{2g}$ – wzniesienie linii energii wody dopływającej

h_{sp} – wysokość nadpiętrzenia [m];

V_d – prędkość wody dopływającej [m · s⁻¹].

- wzniesienie linii energii na górnym stanowisku nad dnem wypadu (nr 2):

$$E_{02} = h_1 + \frac{\alpha q_1^2}{2g\varphi^2 h_1^2} \text{ [m]}$$

gdzie:

h_1 – pierwsza głębokość sprzężona [m];

α – współczynnik Coriolisa [-];

g – przyspieszenie ziemskie [m · s⁻²];

φ – współczynnik prędkości [-];

q – jednostkowe natężenie przepływu równy [m² · s⁻¹]:

$$q = \frac{Q}{b} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

gdzie:

Q – przepływ miarodajny [m³ · s⁻¹];

b – szerokość bystrza [m].

- liczbę Froude’a:

$$Fr = \frac{q^2}{gh_1^3} \text{ [-]}$$

- drugą głębokość sprzężoną:

$$h_2 = 0,5 \cdot h_1 \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr} - 1 \right) \text{ [m]}$$

- długość od przelewu do pierwszej głębokości sprzężonej:

$$L_s = 1,33 \sqrt{H_0 (p + 0,3 \cdot H_0)} \text{ [m]}$$

gdzie:

$$H_0 = h_{sp} + \frac{\alpha V_d^2}{2g} \text{ [m]}$$

$$p = h_z + d$$

- długość od pierwszej głębokości sprzężonej do końca odskoku:

$$L_0 = (4 + 4,5) (h_2 - h_1) \text{ [m]}$$

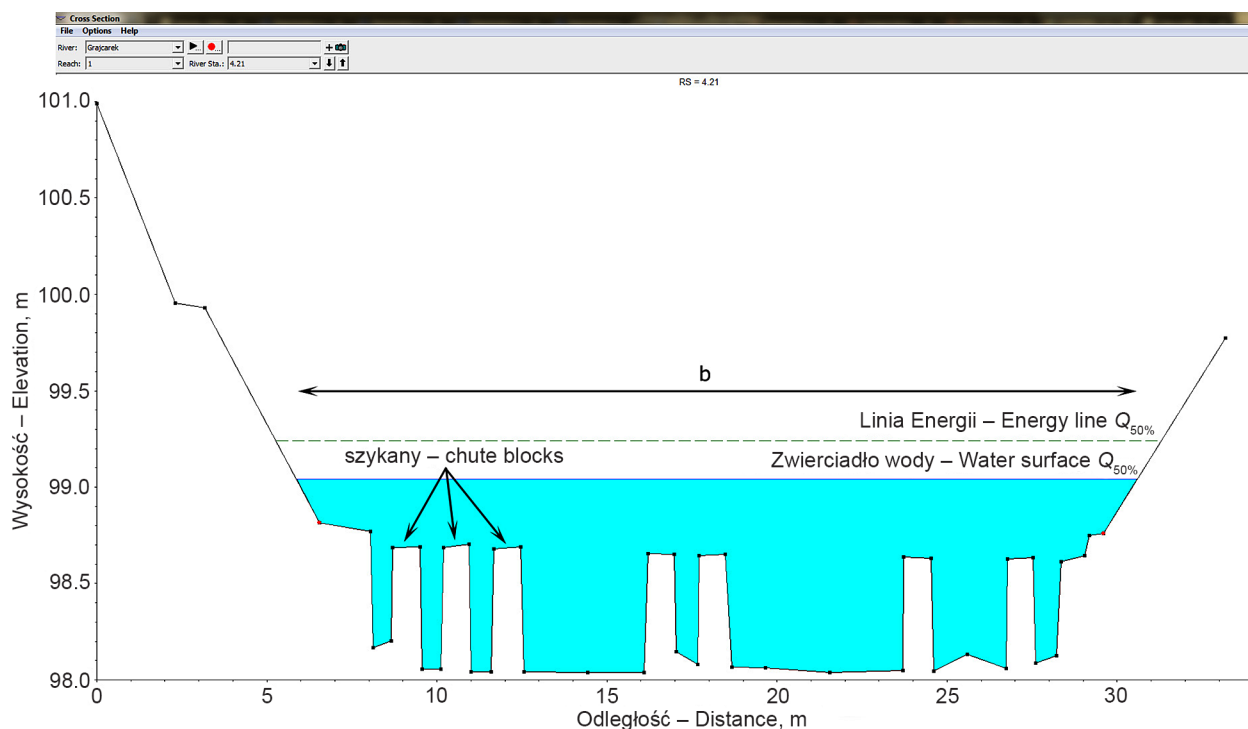
- całkowita długość odskoku:

$$L = L_s + L_0 \text{ [m]}$$

Obliczenia przeprowadzono dla sześciu wariantów:

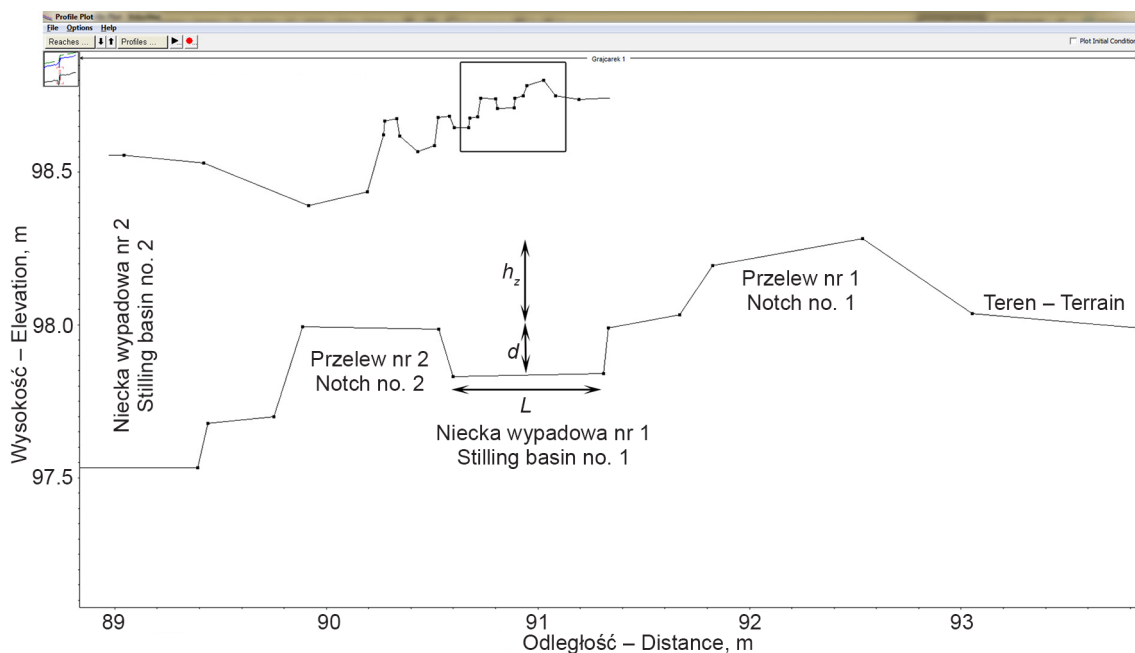
- Dla pierwszej niecki wypadowej bystrza (ryc. 6).
- Dla drugiej niecki wypadowej bystrza (ryc. 7).
- Dla trzeciej niecki wypadowej bystrza (ryc. 7).
- Dla zsumowanych długości odskoków powstających na nieckach wypadowych nr 1, 2 i 3, przy założeniu, że odskoki nie nakładają się na siebie.
- Dla całej budowli, przy uwzględnieniu jednej niecki wypadowej i pozostawionych bez zmian lokalizacji progu i przelewu budowli oraz rzędnych progu, przelewu oraz niecki wypadowej (ryc. 8 – zmiany zaznaczone czerwoną linią).
- Dla wyboju znajdującego się poniżej budowli (ryc. 8).

Na rycinach od 5 do 8 przedstawiono przyjęte schematy do obliczeń.

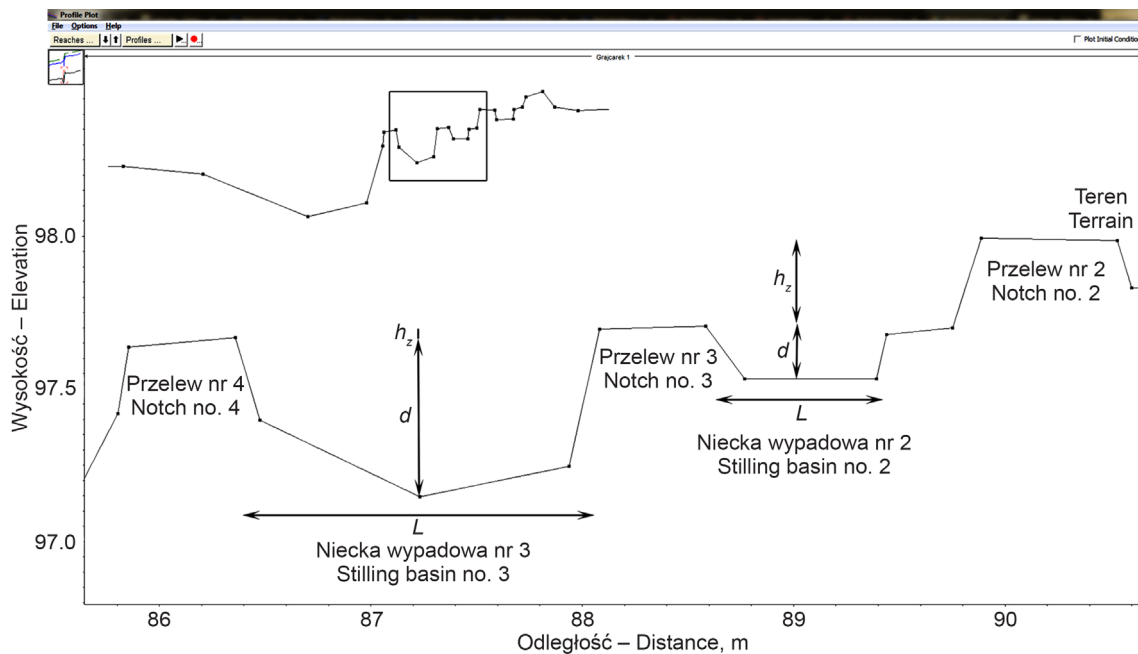


Ryc. 5. Przekrój poprzeczny przez koronę przelewu bystrza

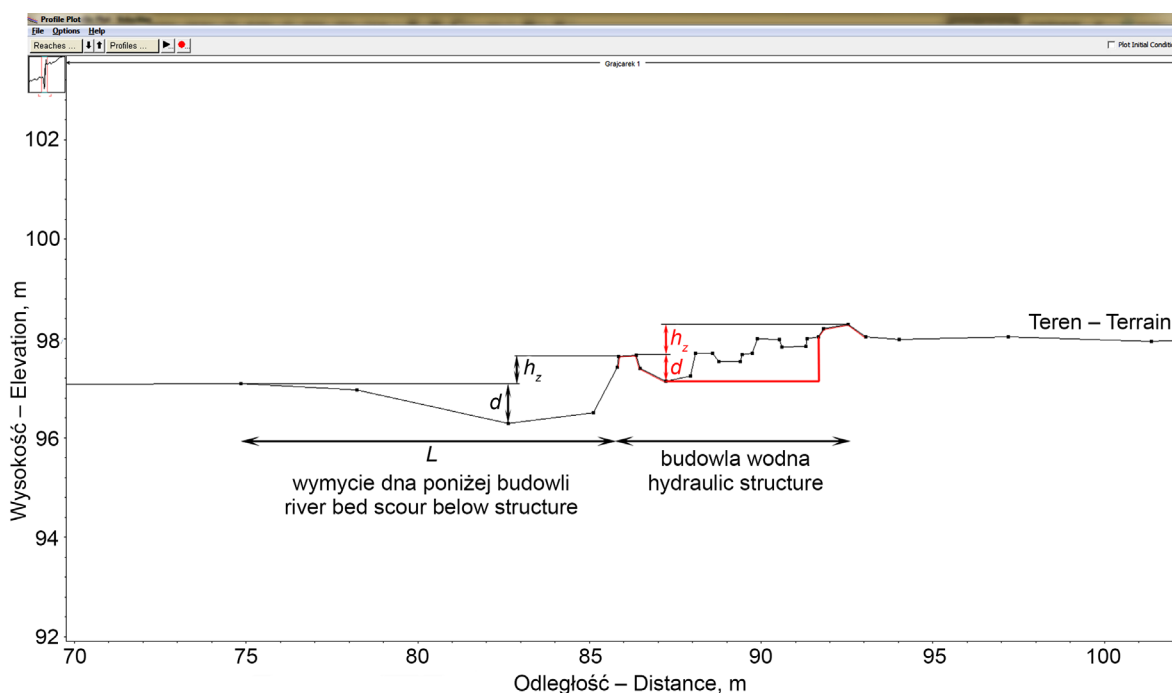
Fig. 5. The cross-section of the notch of the block ramp



Ryc. 6. Profil podłużny niecki nr 1 bystrza
Fig. 6. The longitudinal profile of the stilling basin no 1 of the block ramp



Ryc. 7. Profil podłużny niecki nr 2 i 3 bystrza
Fig. 7. The longitudinal profile of the stilling basin no 2 and 3 of the block ramp



Ryc. 8. Profil wyboju poniżej budowli oraz całego bystrza

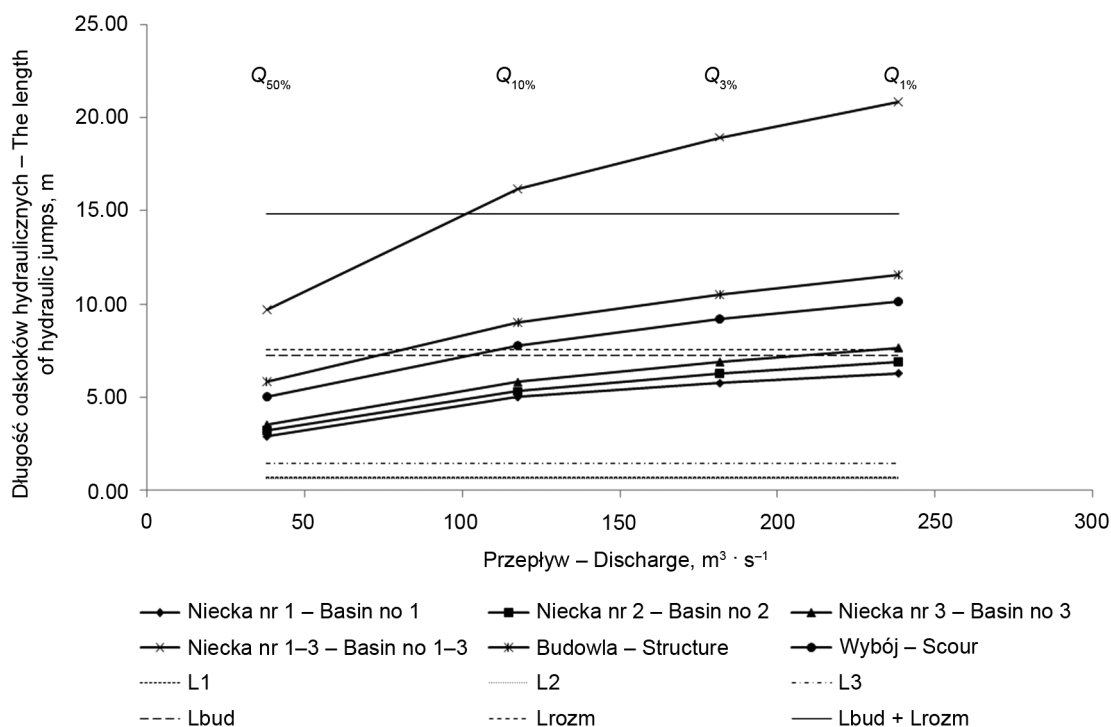
Ryc. 8. The longitudinal profile of the river bed scour downstream of the hydraulic structure and the block ramp itself

WYNIKI BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ

Do obliczeń zostały wykorzystane dane uzyskane z przekroju i profilu bystrza oraz dane uzyskane z modelowania numerycznego dla przepływów wezbraniowych $Q_{50\%}$, $Q_{10\%}$, $Q_{3\%}$ i $Q_{1\%}$. Wartości prędkości wody dopływającej, wysokości nadpiętrzenia oraz poziomu linii energii (ryc. 4) zostały przyjęte z modelowania numerycznego. Współczynnik Coriolisa został przyjęty na postawie publikacji Dąbkowskiego i in. (1982). Współczynnik prędkości ustalono jak dla przelewu o kształcie praktycznym z prostokątnym lub trapezowym profilem korony (Dąbkowski i in., 1982). Pierwszą głębokość sprzężoną dobierano dla każdego wariantu obliczeń w taki sposób, aby spełniony został warunek $E_{01} = E_{02}$. Na rycinach 9, 10, 11 i 12 przedstawiono wyniki obliczeń dla wszystkich analizowanych wariantów.

Na wykresie (ryc. 9) zestawiono obliczone długości odskoków hydraulicznych dla poszczególnych wariantów (linie ciągłe z znacznikami) oraz rzeczywiste długości poszczególnych niecek wypadowych, całego bystrza oraz rozmycia dna rzecznoego poniżej budowli

(linie przerywane). Analizując każdą nieckę wypadową (nr 1, 2 i 3) osobno, możemy stwierdzić, że każda z nich jest za krótka. Obliczone długości odskoków hydraulicznych są większe niż długości niecek wypadowych, co powoduje odsunięcie odskoku poza nieckę. Sytuacja taka występuje również przy wszystkich przepływach. Na niecce nr 1 długość odskoku wynosi od 2,91 m (dla $Q_{50\%}$) do 6,29 m (dla $Q_{1\%}$) przy długości niecki wynoszącej 0,71 m. Zatem dla najniższego analizowanego przepływu długość odskoku jest ponad 4 razy większa niż długość niecki. Podobna sytuacja występuje na niecce nr 2. Długość odskoku (3,21 m) znów jest dużo większa (6 razy) niż długość niecki wypadowej (0,62 m) przy najniższym przepływie obliczeniowym ($Q_{50\%}$). Niecka nr 3 jest dłuższa (1,46 m) i głębsza (0,52 m) od pozostałych wypadów (długości: 0,71 m i 0,62 m; głębokości: 0,16 m i 0,18 m odpowiednio dla wypadu nr 1 i 2). Pomimo największych rozmiarów niecki, sytuacja jest podobna jak we wcześniejszych przypadkach. Odskok hydrauliczny o długości 3,55 m dla $Q_{50\%}$ także jest dłuższy ponad 2 razy niż długość tej niecki (1,46 m).



gdzie / where:

- $Q_{50\%}$, $Q_{10\%}$, $Q_{3\%}$, $Q_{1\%}$ – przepływy wezbraniowe / floods [$m^3 \cdot s^{-1}$];
- Niecka nr 1, 2 i 3 – wyniki obliczeń dla odskoków hydraulicznych w nieckach wypadowych nr 1, 2 i 3 – wariant 1, 2 i 3 / calculation results for hydraulic jumps within the stilling basin no 1, 2 and 3 – variant no 1, 2 and 3;
- Niecka nr 1–3 – zsumowane wyniki obliczeń dla odskoków hydraulicznych w nieckach wypadowych nr 1, 2 i 3 – wariant 4 / summed calculation results for hydraulic jumps within the stilling basin no 1, 2 and 3 – variant no 4;
- Budowla – wyniki obliczeń odskoku hydraulicznego dla całej budowli – wariant 5 / calculation results of hydraulic jump for the whole structure – variant 5;
- Wybój – wyniki obliczeń odskoku hydraulicznego dla wyboju poniżej budowli – wariant 6 / calculation results of hydraulic jump for the scour below the structure – variant 6;
- L1, L2, L3 – rzeczywiste długości poszczególnych niecek wypadowych / real lengths of the individual stilling basin;
- Lbud – rzeczywista długość budowli / the real length hydraulic structure;
- Lroz – rzeczywista długość wyboju, rozmycia dna poniżej budowli / the real length bed scour below the hydraulic structure;
- Lbud+Lroz – zsumowana długość budowli i wyboju / the summed length hydraulic structure and river bed scour

Ryc. 9. Długości odskoków hydraulicznych

Fig. 9. The length of the hydraulic jumps

Ciekawie przedstawia się rycina 10, która pokazuje miejsce tworzenia się (zaczynania się) odskoku w danej lokalizacji budowli. Należy zauważyć, że odskoki mające powstawać odpowiednio w niecce nr 1 i nr 2 powstają za niecką. Świadczy to o tym, że te 2 wypady są skrajnie zbyt krótkie.

Kolejnym wariantem (4) obliczeniowym było zsumowanie długości odskoków hydraulicznych uzyskanych dla poszczególnych niecek wypadowych i przy-

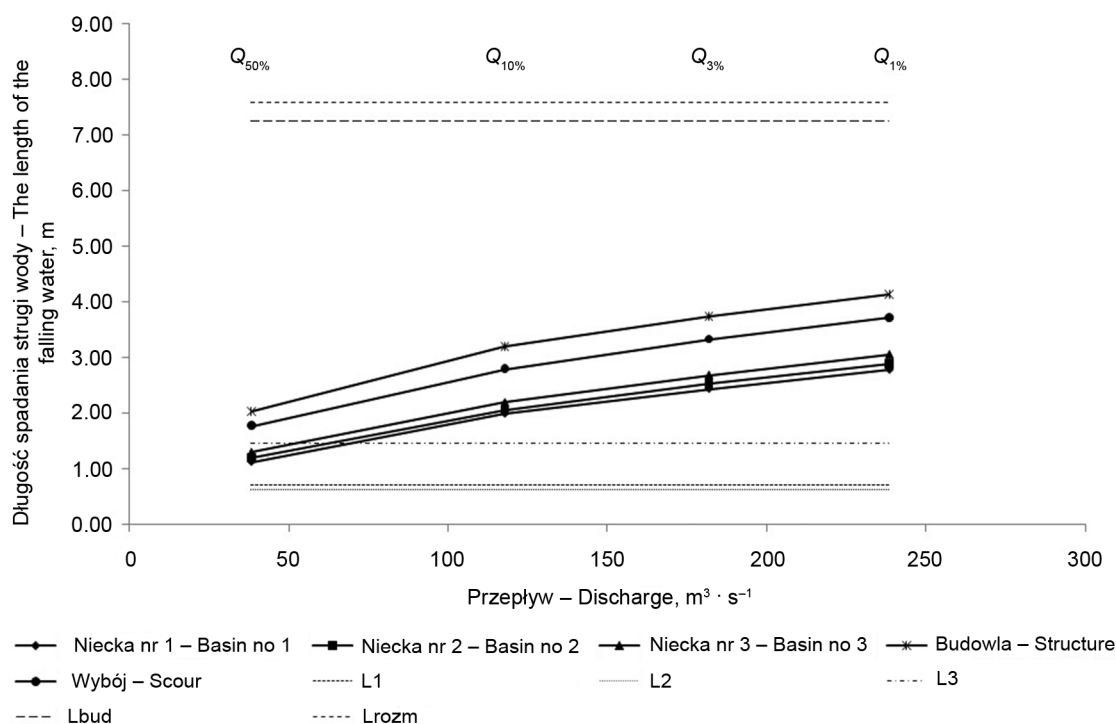
równanie jej do rzeczywistej długości budowli (czyli wszystkich 3 wypadów i przelewów), która wyniosła 7,25 m. Zsumowanie długości poszczególnych odskoków hydraulicznych występujących na każdej z trzech niecek wypadowych, także wysuwałoby się poza obiekt. Aby zrealizować cel ochrony dna rzeczno-go przed rozmyciem analizowana budowla powinna mieć długość 14,83 m, na którą składa się długość obecnej budowli i rozmycia, a więc jest to sytuacja,

w której chroni się całkowicie dno koryta rzecznego. Wtedy wszystkie zsumowane odskoki tworzące się na 3 nieckach wypadowych mieściłyby się w budowli i nie dochodziłoby do rozmycia dna rzecznego do przepływu ok. $102 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co stanowi $Q_{13\%}$.

Następnym analizowanym wariantem (5) było sprawdzenie, jak zachowywałyby się odskok hydrauliczny, gdyby istniała jedna klasyczna niecka wypadowa przy zachowaniu lokalizacji przelewu i progów budowli i ich rzędnych oraz przy zachowaniu rzędnej trzeciego wypadu. W tym przypadku odskok hydrauliczny wychodzi poza nieckę przy przepływie $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co stanowi $Q_{20\%}$. Jeśliby jednak wydłużyć obiekt o długość wyboju (7,58 m) do 14,83 m, wtedy cały odskok zmieściłby się w nowej, dłuższej budowli.

W wariantcie 6 wykonano obliczenia długości odskoku hydraulicznego tworzącego się poniżej budowli, w rozmytym dole. Odskok tylko dla przepływu $Q_{50\%}$

mieści się w istniejącym rozmyciu. Jest to oczywiście sytuacja teoretyczna, która zakłada, że odskok tworzący się powyżej na niecce nr 3 nie wysuwa się poza nią i nie wpływa na odskok tworzący się w rozmyciu (z obliczeń dla wariantu 3 wynika, że taka sytuacja nie ma miejsca). Dla większych przepływów ($Q_{10\%}$, $Q_{3\%}$, $Q_{1\%}$) odskok wysuwa się poza dół wyboju. Za powstanie wyboju głównie odpowiedzialne są przepływy do $110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co można odczytać z ryciny 9 (prosta „Lroz” przecina się z krzywą „Wybój” w tej wartości). Potwierdzają to także obserwacje hydrologiczne (tab. 1), maksymalny obserwowany przepływ wynosi $93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co stanowi $Q_{15\%}$. Możemy zatem wnioskować z pewną dozą dokładności (w tym przypadku 18%), że dzięki obliczeniu długości odskoku hydraulicznego powstającego w dole rozmycia dna poniżej budowli dla różnych przepływów możemy określić maksymalny przepływ, jaki wystąpił w korycie rzecznym.



gdzie / where:
– patrz ryc. 9 / see fig. 9

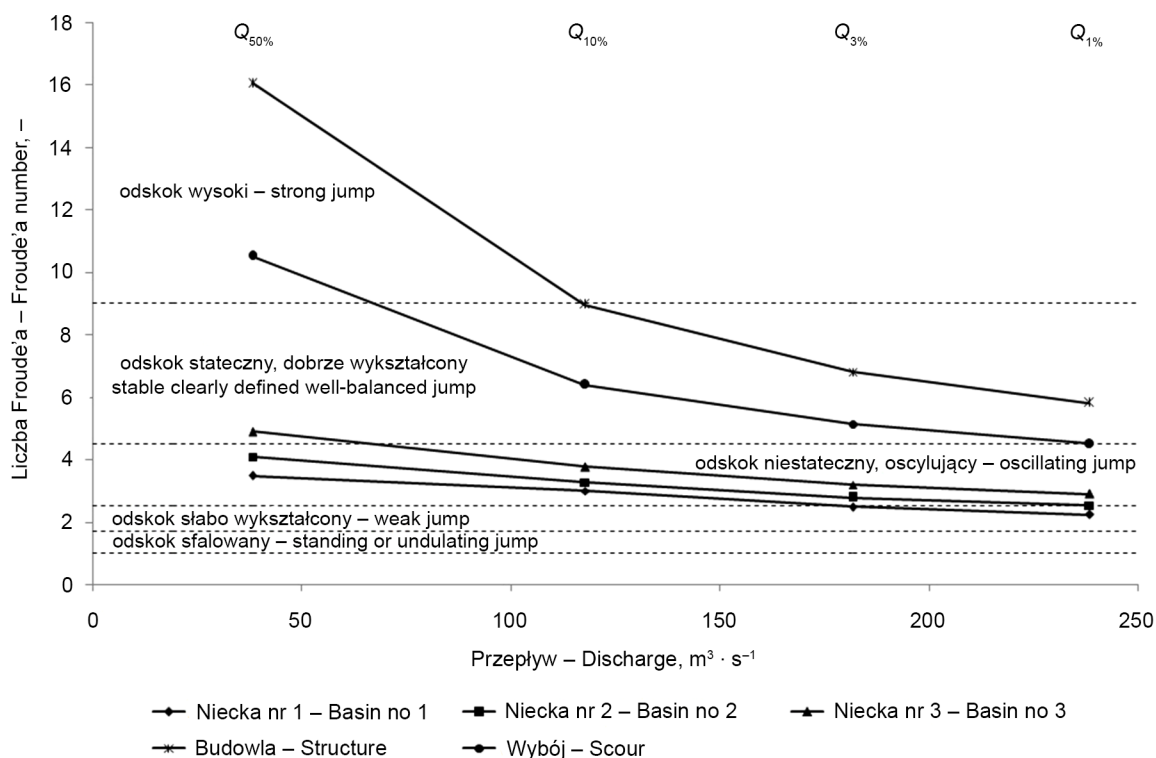
Ryc. 10. Długość spadania strugi wody do niecki wypadowej
Fig. 10. The length of the falling water stream

W każdym z analizowanych przypadków (ryc. 11), przy każdym przepływie występuje ruch podkrytyczny ($Fr > 1$). Im niższy jest przepływ, tym większa wartość liczby Froude'a. W przypadku obliczeń dla wariantu 5 i 6 podczas przepływu $Q_{50\%}$, wartość liczby Froude'a wynosi $Fr > 9,0$, co świadczy o występowaniu odskoku wysokiego. Ten rodzaj odskoku charakteryzuje się wysokim rozpraszaniem energii, mogącym sięgać aż 85%. Duże drugie głębokości sprzężone (ryc. 12) wymagają głębokich niecek wypadowych. Powierzchnia walca jest nierówna, a zwierciadło wody za przekrojem wylotowym wyraźnie sfalowane (Dąbkowski i in. 1982).

Odskok stateczny (lub inaczej: dobrze wykształcony) występuje podczas przepływów $Q_{10\%}$ i wyższych dla wariantu obliczeniowego 5 i 6 oraz podczas przepływu $Q_{50\%}$ dla wariantu 3. Powstaje on wtedy, gdy liczba Froude'a waha się od 4,5 do 9,0. Odskok ten

charakteryzuje się dużą skutecznością, gdyż rozprasa 45–70% energii dopływającego strumienia wody (Dąbkowski i in. 1982).

Najczęściej występującym rodzajem odskoku hydraulicznego w wykonanej analizie jest jego postać niestateczna. Powstaje on, gdy liczba Froude'a waha się w zakresie od 2,5 do 4,5. Zgodnie z obliczeniami odskok ten występuje przede wszystkim dla pierwszego, drugiego i trzeciego wariantu obliczeniowego, dla większości przepływów. Jest to forma uważana za niebezpieczną i niestateczną. W tej formie odskoku struga wody zmienia swoje położenie w nieregularnych okresach, kierując się na zmianę ku zwierciadłu wody lub ku dnu koryta. Powoduje to powstawanie w nieregularnych odstępach czasu fal o dużej amplitudzie. Dąbkowski i in. (1982) zalecają, aby w korytach rzek z zabudową hydrotechniczną unikać tego rodzaju odskoku.

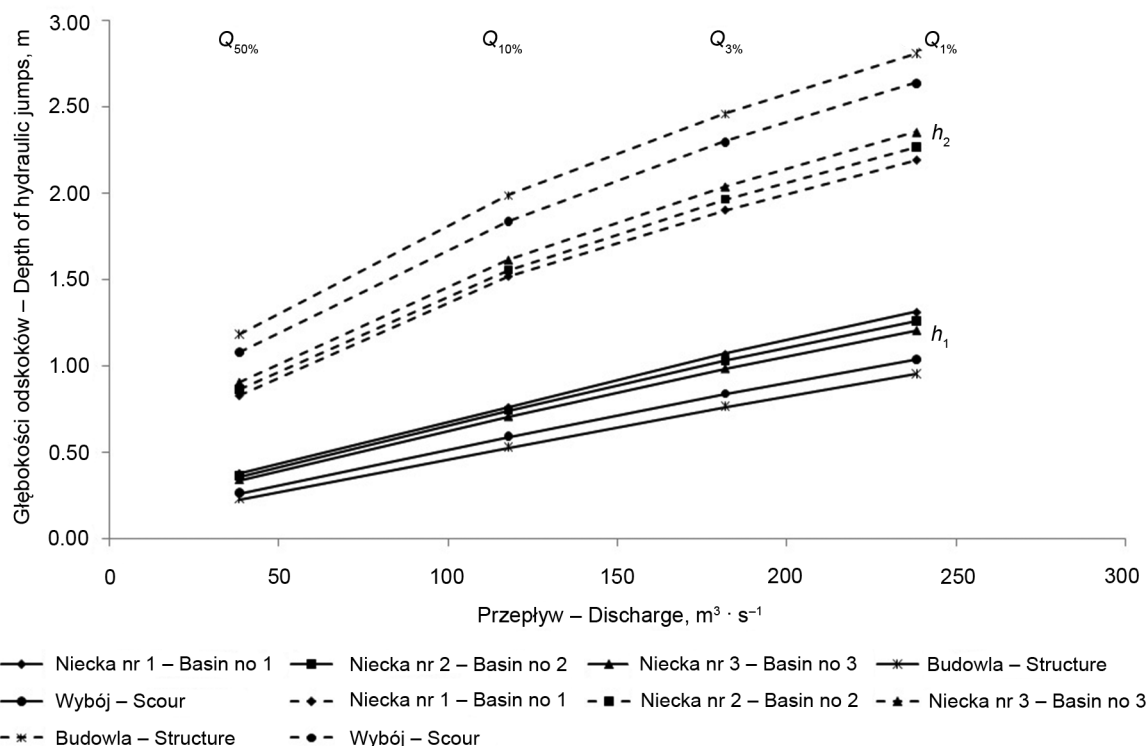


gdzie / where:

– patrz ryc. 9 / see fig. 9

Ryc. 11. Wartości liczby Froude'a

Fig. 11. The values of the Froude's number



Ryc. 12. Wartości pierwszej i drugiej głębokości sprzężonej
Fig. 12. The values of the first and the second conjugate depths

W toku obliczeń dla wariantu pierwszego (dla $Q_{3\%}$ i $Q_{1\%}$) stwierdzono także występowanie odskoku słabo wykształconego ($Fr = 1,7-2,5$). Wtedy na powierzchni zwierciadła wody tworzą się nieduże zaburzenia i małe walce o osi poziomej. Nie jest to forma odskoku szczególnie niebezpieczna i zazwyczaj nie wymaga specjalnych urządzeń zabezpieczających (Dąbkowski i in. 1982).

Ostatnim typem odskoku hydraulicznego jest odskok sfalowany. Jego nazwa jest związana z występowaniem na zwierciadle wody silnie sfalowanych powierzchni. Powstaje on wtedy, gdy liczba Froude'a waha się od wartości 1,0 do 1,7. Ten rodzaj odskoku nie stwarza poważnego zagrożenia rozmycia dna rzecznego i stateczności brzegów, stąd zazwyczaj nie ma potrzeby instalowania elementów służących do

rozpraszania energii wody (Dąbkowski i in. 1985). W analizowanej budowlu ta forma odskoku nie występuje dla żadnego wariantu obliczeniowego.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania terenowe i ich opracowanie pozwala wysunąć następujące wnioski:

1. Długości niecek na bystrzu o zwiększonej szorstkości dla wszystkich analizowanych przepływów są zbyt krótkie, co dowodzi, że energia wody nie jest prawidłowo rozpraszana i poniżej budowli powstaje wybój.
2. Najbardziej ekonomicznym i efektywnym rozwiązaniem jest wykonanie poszuru w postaci betonowych płyt ułożonych na dnie. Wybój

powinien być wcześniej zasypyany materiałem miejscowym, zaś poziom dna wyrównany do poziomu elewacji przelewu nr 4, który jest także progiem kończącym nieckę wypadową nr 4. Innym rozwiązaniem może być utworzenie szykan na przelewach nr 2, 3 i 4, które będą wzmacniać rozproszenie energii kinetycznej przepływającej strugi.

3. W obrębie niecek badanego bystrza występuje ruch rwący.
4. Obliczenie długości odskoku hydraulicznego powstającego w wyboju na skutek rozmycia dna poniżej budowli może posłużyć do obliczenia maksymalnego przepływu występującego w korycie rzeczonym.

LITERATURA

- Ardıçlıoğlu, M., Kuriqi, A. (2019). Calibration of channel roughness in intermittent rivers using HEC-RAS model: case of Sarimsakli creek, Turkey. *SN Applied Sciences*, 1, 1080.
- Bajkowski, S., Siwicki, P., Urbański, J. 2002. Wykorzystanie badań laboratoryjnych rozmyć poniżej budowli wodnych do oceny ich bezpieczeństwa. *Architectura (Budownictwo)*, 1(1–2), 41–51.
- Bekhira, A., Habi, M., Morsli, B. (2019). Management of hazard of flooding in arid region urban agglomeration using HEC-RAS and GIS software: The case of the Bechar's city. *Journal of Water and Land Development*, 42(VII–IX), 21–32.
- Bylak, A., Kukuła, K., Plesiński, K., Radecki-Pawlik, A. (2017). Effect of a baffled chute on stream habitat conditions and biological communities. *Ecological Engineering*, 106, 263–272.
- Dąbkowski, L., Siwicki, P., Urbański, J. (2004). Wpływ skali modelu jazu na rozmycie miejscowe. *Architectura (Budownictwo)*, 3(1), 55–66.
- Dąbkowski, L., Siwicki, P., Urbański, J. (2007). Rozmycia na modelu jazu przepuszczającego wodę pod i nad zasuwą. *Architectura (Budownictwo)*, 6(3), 3–14.
- Dąbkowski, L., Skibiński, J., Żbikowski, A. (1982). *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. Warszawa: PWRiL.
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej.
- Fal, B., Cabala-Plucińska, B. (2012). Wykorzystanie wzorów empirycznych do szacowania maksymalnych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia na przykładzie obliczeń w dorzeczu Sanu. *Gospodarka Wodna*, 1, 19–25.
- Hager, W.H., Bremen, R., Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research* 28(5), 591–60.
- Hämmerling, M., Walczak, N., Nowak, A., Mazur, R., Chmista, J. (2019). Modelling velocity distributions and River Bed changes Using computer code SSIIM below sills stabilizing the riverbed. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(3), 1165–1179.
- Hoffmans, G., Booij, R. (1993). The influence of upstream turbulence on local scour holes. *Proc. 25th IAHR Congr.*, 471–478.
- Kiraga, M., Urbański, J., Bajkowski, S. (2020). Adaptation of selected formulas for local scour maximum depth AT bridge piers region in laboratory conditions. *Water*, 12(10), 2663, 1–19.
- Kondracki, J. (2005). *Geografia Regionalna Polski*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kozioł, A., Urbański, J., Kiczko, A., Krukowski, P., Kaleń, M. (2017). Turbulence intensity and spatial scales of turbulence after hydraulic jump over scour hole in rectangular channel. *Journal of Hydrology and Hydro-mechanics*, 64(4), 385–394.
- Książek, L., Wyrębek, M., Strutyński, M., Strużyński, A., Florek, J., Bartnik, W. (2010). Zastosowanie modeli jednowymiarowych (HEC-RAS, MIKE11) do wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego w rzece Lubczy w zlewni Wisłoka. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 8(1). PAN Kraków, 29–37.
- Lenar-Matyas, A., Lafon, M., Łapuszek, M., Poulard, C. (2009). Możliwości łagodzenia skutków regulacji technicznej rzek i potoków górskich na terenach zurbanizowanych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. 9. PAN Kraków, 241–251.
- Młyński, D., Wałęga, A., Petroselli, A. (2018). Verification of empirical formulas for calculating annual peak flows with specific return period in the upper Vistula basin. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 17(2), 145–154.
- Pagliara, S., Lotti, I., Palermo, M. (2008). Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2, 29–38.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2008a). Plane plunge pool scour with protection structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2, 182–191.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2008b). Scour control downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic engineering*, 134, 1376–1382.

- Pagliara, S., Palermo, M. (2010a). Influence of tailwater depth and pile position on scour downstream of block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136, 120–130.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2010b). Scour and hydraulic jump downstream of block ramps in expanding stilling basin. *Journal of Hydraulic Research*, 47(4), 503–511.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2010c). Scour control and surface sediment distribution downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Research*, 43(3), 334–343.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2011). Effect of stilling basin geometry on clear water scour morphology downstream of a block ramp. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137, 593–601.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2018). Equilibrium scour morphology downstream of rock sills under unsteady flow conditions. *E3S Web of Conferences, River Flow 2018*, 40, 03004.
- Pagliara, S., Palermo, M., Carnacina, I. (2012). Live-bed scour downstream of block ramps for low densimetric Froude numbers. *International Journal of Sediment Research*, 27(3), 337–350.
- Pagliara, S., Palermo, M., Das, R. (2016). Eco-friendly countermeasures for enlarged basins erosion. *River Research and Application*, 32, 441–451.
- Pagliara, S., Palermo, M., Kurdistani, S.M., Hassanabadi, L.S. (2015). Erosive and hydrodynamic processes downstream of low-head control structures. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 3, 122–131.
- Pagliara, S., Palermo, M., Lotti, I. (2009). Sediment transport on block ramps: filling and energy recovery. *Journal of Civil Engineering*, 13(2), 129,136.
- 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.
- Plesiński, K. (2017). Analiza rozmycia dna cieku poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości (przykład z potoku Poniczanka w miejscowości Ponice). *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego, seria Inżynieria Środowiska*, 167(47), 77–87.
- Plesiński, K. 2018. Variability of the river bed system and morphology in the region of the block ramp impact (the case of the Porębianka river). *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 17(1), 79–93.
- Plesiński, K., Bylak, A., Radecki-Pawlik, A., Mikołajczyk, T., Kukuła, K. (2018). Possibilities of fish passage through the block ramp: Model-based estimation of permeability. *Science of the Total Environment*, 631–632, 1201–1211.
- Plesiński, K., Radecki-Pawlik, A. (2018). Bystrza o zwiększonej szorstkości. Rodzaje, przykłady z praktyki, hydraulika, projektowanie i problemy eksploatacyjne. Kraków: Wydawnictwo UR.
- Plesiński, K., Radecki-Pawlik, A., Kościsz, A. (2017a). Analiza rozmycia dna cieku górskiego poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Rabie w miejscowości Rabka-Zdrój. *Inżynieria Ekologiczna*, 18(4), 133–141.
- Plesiński, K., Radecki-Pawlik, A., Michalik, P. (2017b). Prognozowanie zmian korytotwórczych w uregulowanym korycie rzeki Czarny Dunajec z wykorzystaniem modelu jednowymiarowego. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 77(26), 346–360.
- Prawo Wodne z dnia 20 lipca 2017 r. (Dz. U. 2017 poz. 1566).
- Radecki-Pawlik, A. (2001). Formy korytowe rzeki górskiej. *Czas. Gospodarka Wodna*, 5, 210–212.
- Radecki-Pawlik, A. (2010). O niektórych bliskich naturze rozwiązaniach utrzymania koryt rzek i potoków górskich. *Gospodarka Wodna*, 2, 78–85.
- Radecki-Pawlik, A., Świdarska, K., Plesiński, K. (2010). Zróżnicowanie parametrów hydraulicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1. PAN Kraków, 25–38.
- Radecki-Pawlik, A. (2014). Hydromorfologia rzek i potoków górskich. *Działy wybrane*. Wydawnictwo UR w Krakowie.
- Radecki-Pawlik, A. Jasek, R. Plesiński, K. (2011). Zróżnicowanie parametrów hydrodynamicznych w rzece roztokowej na przykładzie odcinka Ochotnicy w Gorcach. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2. Kraków: PAN, 41–53.
- Radecki-Pawlik, B., Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K., Kukuła, K., Bylak, A. (2017). Wybrane problemy eksploatacyjne bystrzy o zwiększonej szorstkości (stopni-ramp) w aspekcie ich projektowania i funkcjonalności biologicznej. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 16(1), 127–147.
- Siwicki, P. (2006). Wpływ warunków przepływu w stanowisku dolnym jazu na głębokość rozmyć. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 5(2), 125–133.
- Ślizowski, R. (2004). Increased roughness rapids as an element used for stabilization of mountains streams. PAN. Kraków, monografia.
- Ślizowski, R. Radecki-Pawlik, A., Huta, K. (2008). Analiza wybranych parametrów hydrodynamicznych na bystrzu o zwiększonej szorstkości na potoku Sanoczek. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2. PAN Kraków, 47–58.

- Urbański, J. (2005a). Związek charakterystyk turbulencji strumienia z głębokością rozmycia za jazem. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 506, 507–513.
- Urbański, J. (2005b). Rozwój miejscowego rozmycia w czasie na modelu jazu w dwóch skalach. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, annals XIV, issue 1(31), 67–75.
- Urbański, J. (2007). Rozmycia dna na modelu jazu ze zmienną długością umocnień w dolnym stanowisku. *Architectura (Budownictwo)*, 6(2), 27–36.
- Urbański, J. (2008). Wpływ turbulencji strumienia na rozmiary lokalnego rozmycia na modelu jazu. *Architectura (Budownictwo)*, 7(2), 3–12.
- Urbański, J. (2009). Wpływ hydraulicznych warunków przepływu na modelu jazu na głębokość rozmycia lokalnego. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 18, 2(44), 21–29.
- Urbański, J., Hejduk, L. (2014). Analiza rozmiarów lokalnego rozmycia powstałego po wystąpieniu wezbrania. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, XX, 1, 389–400.
- Urbański, J., Siwicki, P., Kiczko, A., Kozioł, A., Krukowski, M. (2018). The length of the hydraulic jump on the basin of physical and numerical modeling. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation*, 50(1), 33–42.
- Urząd Miasta w Szczawnicy. (2004). *Program Ochrony Środowiska Miasta Szczawnica*. Kraków.
- Wołoszyn, J., Czamara, W., Eliasiewicz, R., Krężel, J. (1994). *Regulacja rzek i potoków*. Wrocław: Wydawnictwo AR.
- Wu, S., Rajaratnam, N. (1996). Transition from hydraulic jump to open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, 9, 526–528.
- Wyżga, B., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., Amirowicz, A. (2008). Ocena hydromorfologicznej jakości rzeki górskiej na przykładzie Czarnego Dunajca [w:] Wyżga B. (red.) *Stan środowiska rzek południowej Polski i możliwości jego poprawy – wybrane aspekty*. IOP PAN, Kraków, monografia.
- Ziemońska, Z. (1973). *Stosunki wodne w Polskich Karpatach Zachodnich*. *Prace Geograficzne nr 103*. PAN IG, Warszawa.
- www.geoportal.gov.pl

HYDRAULIC PARAMETERS OF THE BLOCK RAMP WITH RIDGE TYPE NOTCH: THE GRAJCAREK IN SZCZAWNICA, POLISH CARPATHIANS

ABSTRACT

Aim of the study

The aim of this study is to analyze the hydrodynamic parameters in the area of one of the block ramp in the analyzed stream.

Material and methods

The field research included geodetic measurements on the basis of which the longitudinal profile and cross-sections of the watercourse bed and structures were made. Numerical modelling of flood flows was also performed in the HEC-RAS program, from which hydrodynamic data were obtained. The data obtained from field measurements and numerical modelling were used to calculate the length of the energy dissipation basins of the structure and to determine the type of water movement using the Froude number. The calculations were performed for several variants. The real lengths of the energy dissipation basin were compared with the lengths of hydraulic jumps that are formed on them.

Results and conclusions

The obtained results indicate that the length of the energy dissipation basin is too short because the hydraulic jumps go beyond them. As a result, a scour is formed below the structure, which in the event of further development may threaten the stability of the structure.

Keywords: block ramp, ridge type notch, hydraulic parameters, energy dissipation basin, hydraulic jump