

Sławomir BAJKOWSKI

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU

Rozdział przepływu na przelewie gabionowym

Flow distribution on gabion weir

Słowa kluczowe: przelew przepuszczalny, przepływ powierzchniowy, przepływ wgłębny
Key words: rockfill weir, overflow, seepage flow

Wprowadzenie

W budownictwie wodnym gabiony wykonywane w formie skrzyń, materacy, walców lub koszy najczęściej stosuje się w robotach regulacyjnych i umocnieniowych. Spełniają one rolę okładzin, w których główny kierunek przepływu wody odbywa się od strony chronionego gruntu. W celu zabezpieczenia przed wypłukiwaniem gruntu z podłoża kładzie się je na ochronnych warstwach gruntowych lub na włókninach. Coraz częściej wykonuje się również niskie progi piętrzące z materiału kamiennego, w których forma przepływu powierzchniowego nad przelewem łączy się z wgłębny przepływem fluacyjnym. Do najczęściej stosowanych konstrukcji tego typu zalicza się bezprogowe stopnie pionowe lub kaskadowe oraz pochylnie (Isbash i Khaldre 1970, Fătima i in. 2004). Konstrukcja taka nie wyklucza stosowania

ścian szczelnych, spełniających rolę przesłon przeciwfiltracyjnych. Wtedy to oczepek ścianki szczelnej tworzy niski próg stabilizacyjny, a przepuszczalny korpus – kamienną konstrukcję przelewową. Spotykane są również konstrukcje, w których gabiony stosuje się jako obudowy ścian szczelnych, tworzących nieprzepuszczalny wysoki próg.

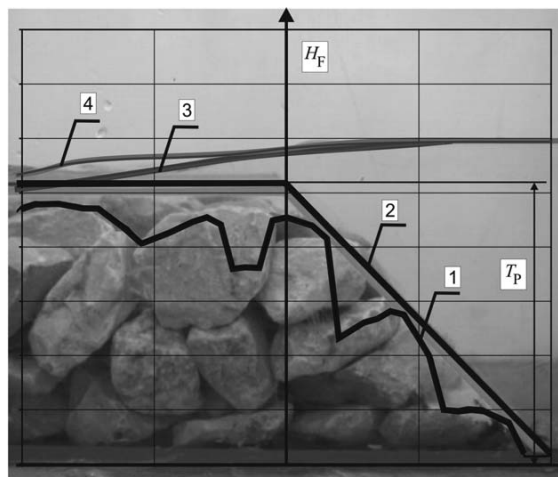
Zależnie od typu zastosowanej konstrukcji przepuszczalnego progu zróżnicowane są warunki przepływu. Gdy głównym elementem piętrzącym jest górna ścianka szczelna lub gdy gabiony stanowią obudowę dna w formie kaskad lub pochylni, wtedy woda do kamiennego korpusu dostaje się od góry, przez koronę przelewu lub stopnia (Schropp i Fontijn 1989). Dla progowych konstrukcji gabionowych, przy poziomach wody górnej nieprzekraczających wysokości progu, woda przepływa przez przepuszczalny korpus. Gdy poziom wody górnej przewyższa rzędną progu, wtedy strumień dzieli się na część fluacyjną i przelewową (Bajkowski 2001). Wydzielają się więc w przepływie dwa wzajemnie na siebie oddziałujące strumienie – powierzchniowy i wgłębny.

Model i prowadzenie badań

Badania laboratoryjne przeprowadzono w Laboratorium Hydraulicznym SGGW. Przelew gabionowy wykonano w korycie szerokości 0,203 m, wysokości 0,40 m i długości 4,0 m. Na rysunku 1 pokazano wlotowy odcinek przelewu oraz warunki przepływu dla pomiaru, w którym: całkowity przepływ $Q = 2,233$ l/s, przepływ nad przelewem $Q_P = 1,676$ l/s, a przepływ wgłębny $Q_F = 0,557$ l/s. W badaniach wykorzystano przelew wykonany ze swobodnie kładzionego narzutu kamiennego, bez dodatkowego zagęszczania. Elementy kamienne wbudowano tak, aby wypełniały przestrzeń ograniczoną trapezowym kształtem przelewu stałego (2 na rys. 1) o wysokości progu $T_P = 10,14$ cm. W osi koryta wykonano piezometry kontrolne na długości kamiennego narzutu oraz w stanowisku

górnym i dolnym. Kształt narzutu określono wzdłuż osi koryta co 0,5 cm (1 na rys. 1), a na szerokości wybranych przekrojów poprzecznych co 1,0 mm.

Stanowisko badawcze wyposażono w urządzenia pomiarowe podłączone do komputerowego systemu zbierania i przetwarzania danych oraz w mechaniczne urządzenia kontrolne. Całkowity wydatek określano elektromagnetycznym miernikiem przepływu, a objętość wody przepływającej nad koroną przelewu w przekroju wlotowym wyznaczano metodą hydrometryczną, wykorzystując sondę prędkości PEMS. Układ zwierciadła wody wzdłuż linii przekroju środkowego przelewu (4 na rys. 1) wyznaczano wodowskazem szpilkowym, a ciśnienie w korpusie przelewu (3 na rys. 1) za pomocą piezometrów. Zestawienie zakresów pomiarowych podstawowych wielkości zawiera tabela 1.



RYSUNEK 1. Przepuszczalny przelew badawczy: 1 – osiowy profil progu przepuszczalnego, 2 – profil progu nieprzepuszczalnego, 3 – linia ciśnień piezometrycznych, 4 – linia zwierciadła wody

FIGURE 1. Permeable block researched weir: 1 – permeable block central profile, 2 – impermeable block profile, 3 – piezometric pressure line, 4 – water surface line

TABELA 1. Zakresy parametrów pomiarowych
TABLE 1. Ranges of measurement parameters

Lp. No	Parametr Parameter	Q [l·s ⁻¹]	Q_P [l·s ⁻¹]	Q_F [l·s ⁻¹]	H_F [cm]	H_F/T_P [-]
1	Wartość minimalna Minimum value	0,241	1,431	0,557	3,99	0,39
2	Wartość maksymalna Maximum value	6,486	5,151	1,018	15,64	1,54
3	Liczba pomiarów Test number	39	12	12	39	39

Material kamienny

Przepuszczalny korpus wykonano z sortowanego materiału skalnego uzyskanego z rumoszu o wymiarach od 40 do 60 mm. Dla każdego ze 130 swobodnie położonych elementów próbki określono: długość (A), szerokość (B), wysokość (C), objętość (V_{si}) oraz masę (M_{si}). Badania prowadzono dla jednego materiału kamiennego. Użyty do badań rumosz skalny posiadał: gęstość właściwą $\rho_s = 2,64 \text{ g·cm}^{-3}$, porowatość $n = 0,450$, wskaźnik porowatości $e = 0,819$.

Charakterystyki geometryczne cząstek materiału kamiennego zestawiono w tabeli 2. Wymiar D_s obliczano jako średnią arytmetyczną trzech wymiarów głównych ABC , a zastępczą średnicę cząstek (D_z) jako średnicę kuli o objętości V_{si} i masie M_{si} . Współczynnik kształtu cząstek (Φ) wyznaczono z zależności:

$$F = \frac{B}{\sqrt{AC}} \quad (1)$$

Wartości wymiarów przeciętnych (średnich ważonych – D^P) dla szerokości B oraz średnic D_s i D_z ustalano z krzywych przesiewu, według następującego wzoru:

$$D^P = \frac{\sum D_i p_i}{100} \quad (2)$$

gdzie:

D_i – analizowany wymiar cząstki [mm],
 p_i – udział masy cząstki w próbce [%].

Wskaźnik jednorodności uziarnienia C_u oraz wskaźnik krzywizny C_c obliczono według normy PN-B-02481-1998, a cechę dominacji C_d ze wzoru:

$$C_d = \frac{d_{90} d_{10}}{d_{50}^2} \quad (3)$$

gdzie: d_{90} , d_{10} , d_{50} – charakterystyczne średnice cząstek wraz z mniejszymi.

Wartości wskaźnika jednorodności uziarnienia przedstawione w tabeli 2 są bardzo zbliżone do jedności, co wskazuje, że użyta próbka charakteryzuje się bardzo równomiernym uziarnieniem. Nie jest to jednak materiał podatny na zagęszczenie, stąd też stosunkowo duża porowatość objętościowa. Większa od jedności wartość cechy dominacji wskazuje, że w próbce dominują cząstki o średnicy większej od środkowej. W tabeli 2 widać również, że wymiary średnie są bardzo zbliżone do przeciętnych. Według diagramu Zingga, w badanym materiale było: 13 cząstek elipsoidalnych, 74 dyskoidalnych, 33 sferoidalnych i 10 wrzecionowatych.

TABELA 2. Parametry cząstek materiału wypełniającego
TABLE 2. Particles fill material parameters

Lp. No	Parametr Parameter	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D_s</i>	<i>D_z</i>	Φ wg (1)
1	Wartość minimalna Minimum value	44,00	40,00	13,00	33,67	26,17	0,82
2	Wartość średnia Mean value	57,74	43,10	25,48	42,11	36,31	1,16
3	Wartość maksymalna Maximum value	93,00	53,00	40,00	55,67	46,03	1,63
4	D^P wg (2)	–	43,34	–	42,66	37,29	–
5	C_u wg PN-B-02481	–	1,05	–	1,11	1,15	–
6	C_c wg PN-B-02481	–	1,00	–	1,00	1,00	–
7	C_d wg (3)	–	1,09	–	1,07	1,00	–

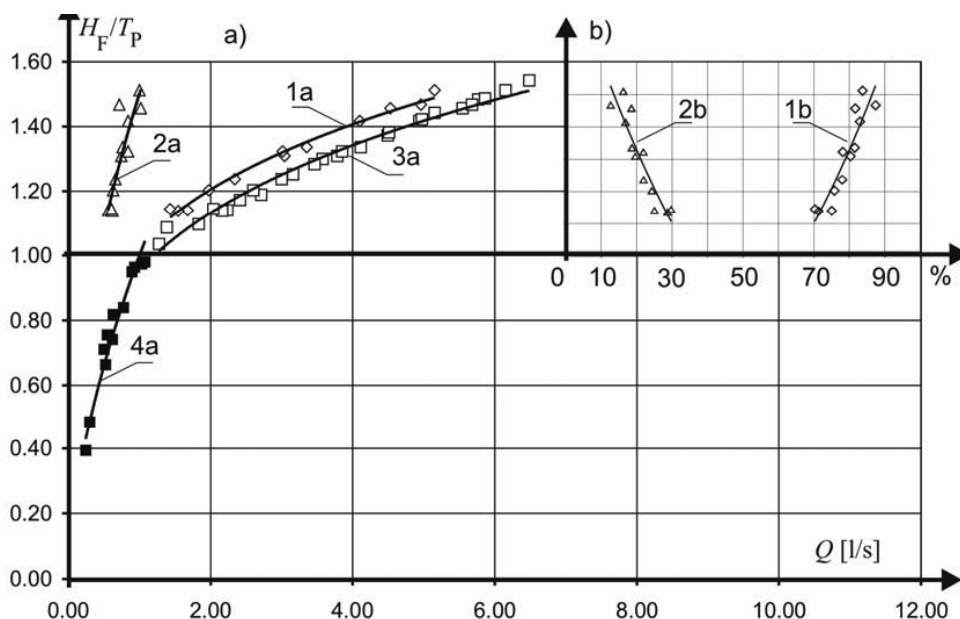
Analiza wyników

Na rozdział strumienia na przepuszczalnym przelewie mają wpływ zarówno czynniki kształtujące warunki przepływu powierzchniowego, jak i wgłębny, należą do nich:

- geometria gabionowego korpusu, wpływająca na wartość współczynnika wydatku przelewu oraz na długość drogi przepływu fluacyjnego,
- kształt i wymiary wlotowego przekroju poprzecznego, w którym następuje podział strumienia,
- parametry granulometryczne materiału kamiennego wyrażające: wymiary, kształt i stopień zaokrąglenia cząstek,
- wzajemny układ cząstek, wpływający na szorstkość powierzchni korony przelewu oraz na porowatość narzutu,
- parametry hydrauliczne strumienia: głębokości strumienia i prędkości przepływu, układ linii zwierciadła wody i ciśnienia piezometrycznego oraz spadek hydrauliczny na długości drogi przepływu.

Krzywe wydatku oraz zmienność współczynników rozdziału przepływu dla badanego przelewu przedstawiono na rysunku 2. Dla głębokości wody górnej, nieprzekraczających wysokości przelewu, wydatek przedstawiają punkty wokół krzywej 4a. Gdy głębokość wody górnej przekraczała wysokość przelewu ($H_F T_P > 1,0$), wtedy strumień dzielił się na część przelewającą się nad przelewem (1a na rys. 2) oraz filtrującą przez korpus (2a na rys. 2), a sumaryczny przepływ przedstawiają punkty pomiarowe 3a. W tych warunkach woda wpływała do przyzmy na początkowym odcinku korony przelewu lub przepływała swobodnie na całej długości progów. Przepływ w przyzmy był wtedy ciśnieniowy na długości wpływania wody przez koronę, na pozostałej części występowała bezciśnieniowa forma przepływu.

Współczynnik rozdziału całkowitego przepływu na filtracyjny obliczono jako stosunek przepływów Q_F i Q , a na przelewowy jako stosunek przepływów Q_P i Q . Wartość sumaryczna obu współczynników rozdziału jest równa jedności lub 100, gdy podajemy je w procentach.



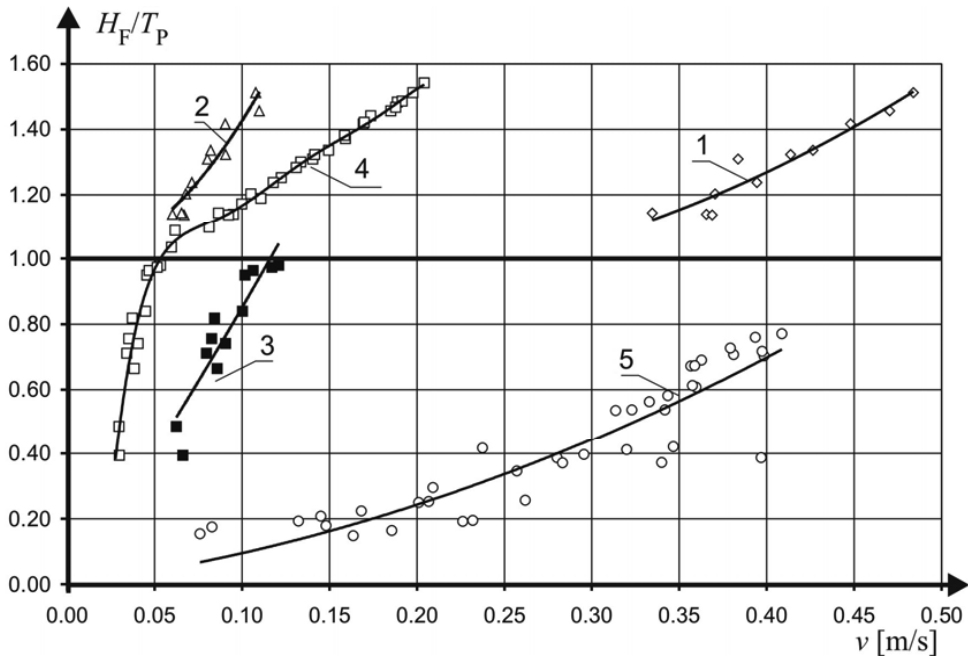
RYSUNEK 2. Krzywe charakterystyczne: a – krzywe wydatku, b – współczynniki rozdziału przepływu; 1a – przepływ nad przelewem, 2a – ciśnieniowy przepływ filtracyjny, 3a – przepływ całkowity, 4a – bezciśnieniowy przepływ filtracyjny, 1b – współczynnik rozdziału przepływu powierzchniowego, 2b – współczynnik rozdziału przepływu filtracyjnego

FIGURE 2. Characteristic curves: a – discharge curves, b – distribution discharge coefficients; 1a – overflow, 2a – pressure seepage flow, 3a – total discharge curve, 4a – free seepage flow, 1b – overflow distribution coefficient, 2b – throughflow distribution coefficient

Z rysunku 2b wynika, że przez korpus filtrowało od 10 do 30% całkowitego przepływu – przez przelew odpowiednio od 90 do 70%. Współczynniki rozdziału zależały od poziomu wody górnej (natężenia przepływu). Strumień przelewowy w początkowej fazie zainicjowania przepływu powierzchniowego znacznie ograniczał przepływ wgłębny, zmniejszając wydatek filtracyjny o wartość przepływu wynikającą z przesunięcia linii 4a i 2a. W miarę wzrostu głębokości wody nieznacznie zwiększał się przepływ filtracyjny, jednak duży przyrost przepływu powierzchniowego ograniczał jego procentowy udział w przepływie całkowitym.

Przepływ przez porowaty ośrodek korpusu oraz ponad chropowatym przelewem, utworzonym przez kamienny próg, oblicza się jako iloczyn pola i prędkości przepływu. Powierzchnia przekroju strumienia powierzchniowego powinna uwzględniać zróżnicowanie głębokości na szerokości przekroju wlotowego, a dla przyzmy należy ją określać jako powierzchnię przekroju porów. Wpływ warunków przepływu na rozdział strumienia na wgłębny i powierzchniowy przedstawiono na podstawie zmian prędkości przepływu (rys. 3).

W porach przepuszczalnego korpusu przelewu występuje przepływ fluacyjny podobny do występującego w szczeli-



RYSUNEK 3. Prędkości charakterystyczne: 1 – prędkość strumienia przelewowego, 2 – prędkość filtracji ciśnieniowej, 3 – prędkość filtracji swobodnej, 4 – prędkość wody dopływającej, 5 – prędkość w stanowisku dolnym

FIGURE 3. Characteristic velocity: 1 – overflow velocity, 2 – pressure seepage velocity, 3 – free seepage velocity, 4 – approach velocity, 5 – tail water velocity

nach skalnych, zwany też turbulentnym przepływem filtracyjnym. Rzeczywiste prędkości przepływu fluacyjnego były większe od wartości granicznej (v_{gr}), wyznaczającej obszar przepływu turbulentnego (Martins 1990, Solari i Parker 2000). Wartości tej prędkości obliczono według Kovácsa (1981) dla liczby Reynoldsa równej 200 oraz przeciętnego wymiaru cząstek B równego 43,34 mm.

Prędkość wody dopływającej w przekroju wlotowym strumienia przelewowego oraz w stanowisku dolnym liczono ze stosunku natężenia przepływu i powierzchni przekroju poprzecznego. Dla przepływu przez przepuszczalny korpus prędkości w wolnych przestrzeniach narzutu (v_p) liczono ze wzoru:

$$v_p = \frac{Q_F}{nF} \quad (4)$$

gdzie:

Q_F – natężenie przepływu filtracyjnego przez gabionowy próg,

F – pole przekroju poprzecznego koryta do wysokości wody w przekroju wlotowym H_k lub wysokości progu T_p , gdy poziom wody górnej znajdował się nad progiem,

n – porowatość kamiennego korpusu przelewu.

Gdy napełnienie w stanowisku górnym przewyższało wysokość progu, wtedy prędkość wody dopływającej znacznie wzrastała. Wynikało to z faktu zainicjowania przepływu powierzchni-

wego, którego prędkości (1 na rys. 3) sięgały 0,5 m/s. Do momentu gdy woda nie przelała się ponad krawędzią wlotową, w pryzmie panował bezciśnieniowy przepływ filtracyjny (4 na rys. 3). Początkowo po przekroczeniu rzędnej progów i zainicjowaniu przepływu powierzchniowego w pryzmie występowała przejściowa forma ruchu, aż do momentu gdy strumień przepływał nad przelewem na całej jego długości. Wtedy to w pryzmie rozpoczynał się ciśnieniowy przepływ filtracyjny. Prędkości przepływu strumienia powierzchniowego były znacznie większe od prędkości w przepuszczalnym korpusie (1 i 2 na rys. 3). W warunkach tych na badanym przelewie gabionowym wystąpiła dwufazowa forma przepływu: w porach narzutu przepływał strumień o niewielkiej prędkości, a nad nim z dużą prędkością przepływał strumień powierzchniowy.

Głębokości wody dolnej w trakcie badań nie przekraczały $0,8T_P$. Od momentu powstania przepływu dwustrefowego spadek na modelu nie zmieniał się, o czym świadczy zbliżony do równoległego przebieg krzywych 4 i 5 na rysunku 3.

Wnioski

Rozdział przepływu na przelewie gabionowych zależy od warunków hydraulicznych, geometrii przepuszczalnego korpusu przelewu oraz charakterystyk materiału użytego do jego budowy. Wykonane badania oraz analizy ich wyników wykazały, że:

- rozdział przepływu na przelewie gabionowym zależy od wzniesienia wody górnej nad koroną przelewu,

- strumień przelewający się nad koroną ograniczał przepływ filtracyjny,
- przy wzroście poziomu wody górnej przepływ filtracyjny maleje stosunkowo szybko – dla badanego przelewu wyniósł 10% całkowitego przepływu,
- na stopień rozdziału strumienia wpływa poziom wody dolnej,
- na przelewie gabionowym występuje przepływ dwustrefowy – strumień powierzchniowy przepływa znacznie szybciej od wglębnego,
- na styku faz występuje strefa przejściowa, w której prędkości zmieniają się od wartości w strumieniu powierzchniowym do prędkości w porach.

W celu dokładnego zbadania zjawiska rozdziału strumienia na przelewach przepuszczalnych planuje się przeprowadzić badania dla innych kształtów progów i różnych materiałów kamiennych oraz szerszego zakresu napełnień i przepływów.

Literatura

- BAJKOWSKIS. 2001: Współczynniki filtracji turbulentnej jazów przepuszczalnych. Materiały konferencji „Gabiony w kształtowaniu i ochronie środowiska”. Wyd. Inż. Śród. SGGW, Warszawa: 39–55.
- FĀTIMA SUOZA CURI M., TAMADA K., VICARI M., FRACASSI G. 2004: Hydraulic tests on gabion weirs to develop design criteria of dissipation basins. 12th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles. September 20–24. Prague. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu* 481: 229–236.
- ISBASH S.V., KHALDRE K.Y. 1970. Hydraulic of river channel closure. Butterworths, London.

- KOVÁCS G. 1981: Seepage hydraulics. Akadémiai Kiado, Budapest.
- MARTINS R. 1990: Turbulent seepage flow through rockfill structures. *Water Power and Dam Constructions* 3: 41–45.
- SCHROPP M., FONTIJN H.L. 1989: Flow profiles for steady spatially varied flow – an explorative analysis. *Journal of Hydraulic Research* 27, 1: 135–147.
- SOLARI L., PARKER G. 2000: The curious case of mobility reversal in sediment mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering* 3, 126: 185–197.

Summary

Flow distribution on gabion weir.

The water level on the hydraulic structures is maintained by means of permanent or gated weirs. Conventional permanent dams are made with impermeable sills. Gated weirs are installed in rivers with low sills; the head of water on these objects is kept by movable closures. The constant concrete weirs' role can be fulfilled also by the permeable rubble mound weirs. In the permeable stone weirs part of the water flows through the fill stone construction and the rest flows over the body. The analysis of the water

discharge division into the overflow and the seepage flow gives the possibility of the infiltration body and the shape of the weir profile. The geometry of the rubble sill, the grain size distribution of fill material and the localization of zones with velocity which can break stability stone elements of body, are important elements when determining the geometry of the gabion weir. Results of the laboratory on the gabion weir, including reconnaissance of the over and the trough-flow, are presented in the article. The discharge of the surface flow form was determined with the hydrometric method. The electromagnetic PEMS probe for measurement of velocity of water has been used. The degree of discharge distribution depends on hydraulic parameters of overflowing water stream.

Author's address:

Sławomir Bajkowski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland