

WSPÓLCZYNNIK ZATOPIENIA PROGU PRZEPUSZCZALNEGO

Sławomir Bajkowski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania prowadzone w celu rozpoznania warunków zatopienia prostokątnego progę przepuszczalnego. Realizowano je jako badania laboratoryjne oraz analizy mające na celu określenie zależności opisujących zmienność współczynnika zatopienia (k_z). Współczynnik ten obliczano ze stosunku natężeń przepływu zatopionego do swobodnego. Przedstawione analizy zawierają zdefiniowanie parametrów wpływających na wartości współczynnika zatopienia oraz opracowanie formuły obliczeniowej. Współczynnik zatopienia zależy od stosunku głębokości wody dolnej do napelnienia w stanowisku górnym (h_d/H_g). Zatopienie strumienia progę przepuszczalnego rozpoczyna się, gdy stosunek h_d/H_g przekroczy wartość 0,60. W początkowej fazie zatopienia wartości współczynnika zbliżone są do wartości podanych dla progów przepuszczalnych. Kończącą fazę zatopienia cechują współczynniki zbliżone do wartości dla progów stałych.

Słowa kluczowe: próg przepuszczalny, przepływ swobodny, przepływ zatopiony, współczynnik zatopienia

WSTĘP

Progi przepuszczalne (gabionowe) poddawane są oddziaływaniu wody w znacznie większym stopniu niż nieprzepuszczalne (stałe). W konstrukcjach, w których woda przepływa przez korpus i ponad nim, nieposiadających stałych przelewów zewnętrznych (ekranowych) lub wewnętrznych (rdzeniowych), oddziaływanie wody dolnej na przepustowość zaczyna się już przy niewielkich przepływach. Gdy konstrukcje te posiadają stałe przelewy stabilizujące poziom wody górnej, podwyższa się dolna granica występowania przepływów niezatopionych. Zatopienie strumienia przelewowego wodą dolną ogranicza przepustowość obiektu i zmniejsza prędkości przepływu, przez co zmienia warunki stateczności progę [Bajkowski 2007]. Wpływa także na stabilność materiału dennego

Adres do korespondencji – Corresponding author: Sławomir Bajkowski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Wodnej, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: slawomir_bajkowski@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2015

oraz przepływ organizmów wodnych przez korpus. Mniejsze prędkości przepływu, pojawiające się w dolnej partii korpusu, wpływają na intensywność transportu rumowiska rzecznoego przez obiekt [Bajkowski i Łasisz 2010] oraz poprawiają warunki stateczności zewnętrznych elementów progu [Stephenson 1980]. Poznanie warunków zatopienia umożliwia określenie prędkości granicznych transportu rumowiska, obliczenie oddziaływań zmiennych wody dolnej oraz rozpoznanie stabilności siedlisk mikroorganizmów wewnątrz korpusu.

Badania laboratoryjne progu wykonano w Laboratorium Hydraulicznym SGGW w stałym korycie, szerokości $B = 0,6$ m i wysokości $T = 1,0$ m. Korpus progu wysokości $P = 0,32$ m oraz szerokości krawędzi przelewu $L = 0,50$ m wypełniono kruszywem naturalnym frakcji 80÷120 mm, i porowatości $p = 0,421$.

MATERIAŁ I METODY

Zatopienie przelewów stałych odnoszone jest do całkowitego natężenia przepływu swobodnego przez wprowadzenie zmniejszającego współczynnika zatopienia. Dla przelewów tych parametry definiujące współczynnik zatopienia odnoszone są do rzędnej korony progu. Należą do nich parametry geometryczne progu oraz hydrauliczne strumienia i ich wzajemne relacje występujące na długości piętrzenia [Skogerboe i Merkley 1996].

Na progach przepuszczalnych układ zwierciadła wody kształtowany jest parametrami hydraulicznymi strumienia, geometrią progu oraz rodzajem kruszywa wypełniającego korpus progu. Wymiary, kształt oraz obtoczenie i ułożenie ziaren w korpusie [Bajkowski 2014] wpływają na parametry hydrauliczne strumienia wody przepływającej wewnątrz progu. Wpływ cech opisujących kształt i obtoczenie ziaren kruszywa na współczynnik filtracji ośrodków porowatych omawiają w swoim artykule Parylak i inni [2013]. Wartości poszczególnych parametrów i relacje pomiędzy nimi wskazują na możliwość wystąpienia sytuacji, w której korona progu jest całkiem lub częściowo pozbawiona wody, gdy strumień nie wpływa na koronę lub płynie tylko na jej części [Bajkowski 2006].

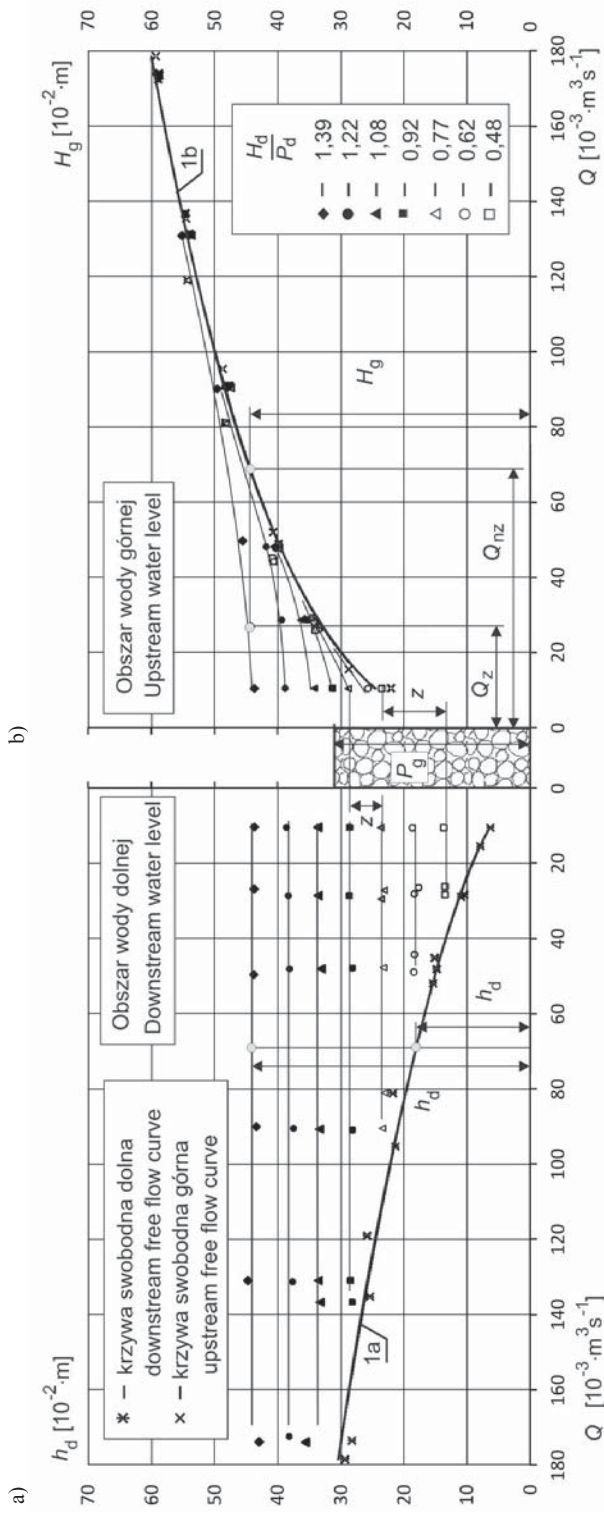
Przepustowość zatopionych progów przepuszczalnych określa się według zależności (1), wprowadzając współczynnik korekcyjny zatopienia (k_z) lub obliczając zredukowany współczynnik wydatku, jak to w swojej pracy przedstawił Mohamed [2010]. Formy przepływu przez przepuszczalne progi kamienne pokazano na rysunku 1. Dla wyszczególnionych przypadków zatopienie strumienia można określać według zasad ustalonych dla przepuszczalnego progu lub dla szorstkiego przelewu, jakim jest korona progu.

W analizach przedstawionych w artykule zatopienie strumienia przepływającego przez próg ustalano według parametrów odniesionych do poziomu dna w stanowisku górnym. Wynikowa formuła zastosowana do obliczania przepustowości zatopionych progów przepuszczalnych (Q_z) ma postać [Bajkowski 2013]:

$$Q_z = k_z \cdot Q_{nz} = k_z \cdot m_F \cdot B_p \cdot \sqrt{2g} H \frac{3}{2} \quad (1)$$

gdzie: k_z – współczynnik zatopienia progu przepuszczalnego [–],

Q_{nz} – wydatek progu niezatopionego [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],



Rys. 2. Krzywe wydatku progu przepuszczalnego według badań autora: a – krzywe w stanowisku dolnym, b – krzywe w stanowisku górnym; 1a – krzywa odpływu swobodnego w stanowisku dolnym, 1b – krzywa przepływu niezatopionego w stanowisku górnym (pozostałe oznaczenia podano w tekście)

Fig. 2. Flow curve for permeable sill according author: a – downstream flow curves, b – upstream flow curves; 1a – downstream free flow curve, 1b – upstream free flow curve (other designations are given in the text)

wody górnej (rys. 2b) określa przepływ strumienia niezatopionego, a punkty ponad tą krzywą odzwierciedlają przepływ strumienia zatopionego.

Dla stosunku H_d/P_d wynoszącego 0,48 położenie zwierciadła wody dolnej nie wpływa na zmianę wydatku progu. Strumień przelewowy pozostaje w fazie przepływu swobodnego. Gdy stosunek ten przewyższa wartość 0,62, na progu występuje faza przejściowa, w której strumień przepływa jako podtopiony. Podniesienie się poziomu wody dolnej ponad koronę progu powoduje, że strumień przelewowy przechodzi w fazę zatopienia i następuje znaczące ograniczenie wydatku. W określeniu tego oddziaływania przyjęto wzniesienia zwierciadła wody górnej (H_g) i dolnej (h_d) odniesione do poziomu dna górnego ($h_d = H_d - P_z$ według rys. 1).

Wartości współczynnika zatopienia dla przelewów stałych o szerokiej koronie, według Pavlovskiego i Berezinskiego, podane za Kiselevem [1974], w zależności od stosunku h_d do H_g , zestawiono w tabeli 1, a według Soboty [1994] – w tabeli 2. Zamieszczone w tabeli 1 wartości współczynników zatopienia zostały opracowane według schematów przepływu pokazanych na rysunku 1. Dotyczą one zatopienia strumienia o głębokości wody górnej (H_g) i dolnej (h_d), przepływającego przez przepuszczalny korpus progu jak przez przelew. Wartości w tabeli 2 podane przez Sobotę [1994] odnoszą się do głębokości h_d i H_g i zależą od stosunku pola przepływu przez obiekt ($B_p \cdot h_d$) do powierzchni przekroju

Tabela 1. Współczynniki zatopienia stałych przelewów o szerokiej koronie [Kiselev 1974]
Table 1. Submerged flow coefficients of the solid long crest sills [Kiselev 1974]

Według Pavlovskiego After Pavlovski		Według Berezinskiego After Berezinski	
$\frac{h_d}{H_g}$	k_z	$\frac{h_d}{H_g}$	k_z
0,700	1,000		
0,750	0,974		
0,800	0,928	0,800	1,000
0,830	0,889	0,820	0,990
0,850	0,855	0,840	0,970
0,870	0,815	0,860	0,940
0,900	0,739	0,880	0,900
0,920	0,676	0,900	0,840
0,940	0,598	0,920	0,770
0,950	0,552	0,940	0,700
0,960	0,499	0,950	0,650
0,970	0,436	0,960	0,590
0,980	0,360	0,970	0,500
0,990	0,257	0,980	0,400
0,995	0,183		
0,997	0,142		
0,998	0,116		
0,999	0,082		

Tabela 2. Współczynniki zatopienia stałych przelewów o szerokiej koronie [Sobota 1994]
 Table 2. Submerged flow coefficients of the solid long crest sills [Sobota 1994]

$\frac{h_d}{H_g}$	k_z								
	$\frac{h_d}{H_d}$								
	1,00	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,00
0,75	1,00								1,00
0,78	0,97								0,97
0,80	0,95	1,00						1,00	0,95
0,82	0,92	0,99	1,00				1,00	0,99	0,92
0,84	0,89	0,97	0,99	1,00		1,00	0,99	0,97	0,89
0,86	0,85	0,94	0,96	0,99	1,00	0,99	0,96	0,94	0,85
0,88	0,81	0,90	0,93	0,97	0,96	0,97	0,93	0,90	0,81
0,90	0,75	0,84	0,88	0,92	0,91	0,92	0,88	0,84	0,75
0,92	0,69	0,78	0,82	0,85	0,84	0,85	0,82	0,78	0,69
0,94	0,61	0,70	0,73	0,76	0,75	0,76	0,73	0,70	0,61
0,96	0,51	0,59	0,62	0,65	0,64	0,65	0,62	0,59	0,51
0,98	0,36	0,44	0,46	0,49	0,48	0,49	0,46	0,44	0,36

poprzecznego strumienia w stanowisku dolnym (F_d). Dla prostokątnego kształtu przekroju poprzecznego progów i kanału odpływowego o szerokości równej długości progów stosunek ten zapisuje się jako h_d/H_d . Dla jazów bezprogowych i o niskich progach stosunek ten zbliżony jest do jedności. W badaniach własnych wynosił on $0,96 \div 0,97$ (tab. 2, w. 6). Współczynniki zatopienia w tabeli 2 zmieniają się symetrycznie względem wartości $h_d/H_d = 0,50$. Na rysunku 3 wprowadzono wartości współczynników zatopienia wyłącznie dla $h_d/H_d = 1,0, 0,8, 0,7$ oraz $0,6$.

WYNIKI I DYSKUSJA

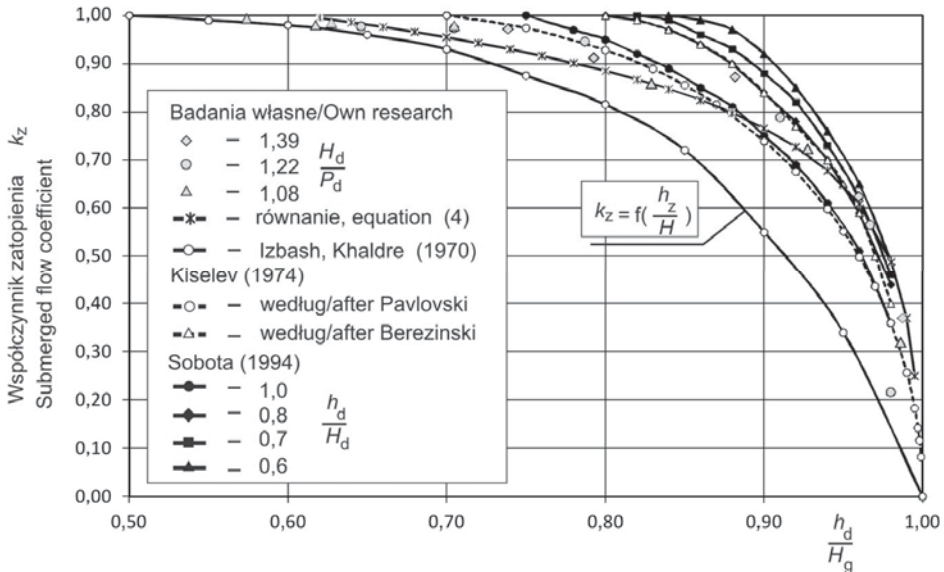
Na wykresie pokazanym na rysunku 3 porównano wartości współczynników zatopienia z badań własnych z podanymi przez Kiseleva [1974] – tabela 1, i Sobotę [1994] – tabela 2. Według Izbasha i Khaldrea [1970] współczynnik zatopienia przelewów na progach przepuszczalnych zależy od stosunku h_z/H , a strumień na koronie takich progów jest:

– niezatopiony, gdy

$$\frac{z}{H} > 0,5 \text{ lub } \frac{h_z}{H} < 0,5 \quad (2)$$

– zatopiony, gdy

$$\frac{z}{H} < 0,5 \text{ lub } \frac{h_z}{H} > 0,5 \quad (3)$$



Rys. 3. Współczynniki zatopienia progów przepuszczalnych i przelewów stałych o szerokiej koronie (oznaczenia podano w tekście)

Fig. 3. Submerged flow coefficients of permeable and solid long crest sills (designations are given in the text)

gdzie: H – wzniesienie zwierciadła wody górnej nad koroną przelewu [m],
 h_z – wzniesienie zwierciadła wody dolnej nad koroną przelewu [m],
 z – różnica poziomów wody górnej i dolnej [m].

Wartości współczynnika zatopienia dla badanego proggu obliczono przy ustabilizowanych poziomach wody dolnej, przy jej wzniesieniu ponad progiem dla stosunku H_d/P_d wynoszącego 1,08, 1,22 oraz 1,39. Dla takiego położenia wody dolnej względem proggu współczynnik zatopienia uzyskany z badań własnych opisano następującym wzorem:

$$k_z = 0,1721 \cdot \ln \left(1 - \frac{h_d}{H_g} \right) + 1,1620, \quad R^2 = 0,910 \quad (4)$$

Wielkość współczynnika k_z opisanego formułą (4) odnosi się do badanego proggu wypełnionego kruszywem o określonej frakcji i porowatości. Może on ulec zmianie w trakcie eksploatacji proggu, np. przez zakolmatowanie przestrzeni porowej.

Wyniki uzyskane z badań własnych wskazują, że pełne zatopienie strumienia rozpoczyna się, gdy h_d/H_g przekroczy wartość 0,60. W początkowej fazie pełnego zatopienia wartości współczynnika zbliżone są do podanych przez Izbasha i Khaldrea [1970], w końcowej – do wartości dla stałych przelewów o szerokiej koronie. Zatopieniu strumienia przelewowego towarzyszy znaczne ograniczenie spadku (z) na proggu. Prowadzi to do zmniejszenia udziału przepływu filtracyjnego w całkowitym przepływie i ustalenia się warunków zbliżonych do panujących na przelewach nieprzepuszczalnych [Bajkowski 2006].

Tabela 3. Współczynniki zatopienia według autora
 Table 3. Submerged flow coefficients after author

Parametry Parameters	Wartości Values					
H_d [10^{-2} ·m]	35,10		39,43		45,07	
P_d [10^{-2} ·m]	–		32,35		–	
H_d/P_d	1,08		1,22		1,39	
P_z [10^{-2} ·m]	–		1,35		–	
h_d [10^{-2} ·m]	33,75		38,08		43,72	
h_d/H_d	0,96		0,97		0,97	
	Q_z [10^3 ·m ³ ·s ⁻¹]	H_g [10^{-2} ·m]	Q_z [10^3 ·m ³ ·s ⁻¹]	H_g [10^{-2} ·m]	Q_z [10^3 ·m ³ ·s ⁻¹]	H_g [10^{-2} ·m]
	32,74	34,23	48,53	38,86	69,63	43,73
Strumień zatopiony (Q_z dla H_g) Submerged flow (Q_z for H_g)	39,59	36,39	50,61	39,39	72,74	44,28
	56,05	40,71	61,02	41,84	79,40	45,55
	92,68	47,88	95,71	48,38	103,26	49,58
	132,93	53,79	134,86	54,04	143,55	55,14
	139,58	54,64	176,48	58,94	178,91	59,20
	175,19	58,80	–	–	–	–
	Q_{nz} [10^3 ·m ³ ·s ⁻¹]	H_g [10^{-2} ·m]	Q_{nz} [10^3 ·m ³ ·s ⁻¹]	H_g [10^{-2} ·m]	Q_{nz} [10^3 ·m ³ ·s ⁻¹]	H_g [10^{-2} ·m]
	10,48	34,23	10,49	38,86	10,41	43,73
Strumień niezatopiony (Q_{nz} dla H_g) Free flow (Q_{nz} for H_g)	28,63	36,39	28,63	39,39	26,90	44,28
	48,12	40,71	48,12	41,84	49,61	45,55
	90,71	47,88	90,53	48,38	90,11	49,58
	131,01	53,79	131,30	54,04	130,93	55,14
	136,77	54,64	172,48	58,94	173,87	59,20
	174,04	58,80	–	–	–	–
	Q_z/Q_{nz}	h_d/H_g	Q_z/Q_{nz}	h_d/H_g	Q_z/Q_{nz}	h_d/H_g
	0,320	0,986	0,216	0,980	0,150	0,999
Współczynnik zatopienia (k_z) Submerged flow coefficient (k_z)	0,723	0,927	0,566	0,967	0,370	0,987
	0,858	0,829	0,789	0,910	0,625	0,960
	0,979	0,705	0,946	0,787	0,873	0,882
	0,986	0,627	0,974	0,705	0,912	0,793
	0,980	0,618	0,977	0,646	0,972	0,738
	0,993	0,574	–	–	–	–

WNIOSKI

Zatopieniem definiuje się stan, w którym poziom wody dolnej wpływa na strumień wody przepływający przez próg i nad przelewem utworzonym na koronie. Powoduje to ograniczenie odpływu wody, przejawiające się spadkiem przepustowości obiektu. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Ilość wody przepływająca przez kamienny korpus zależy od warunków hydraulicznych wynikających z oddziaływania poziomu wody dolnej. W zależności od stopnia tego oddziaływania przepływający strumień może być niezatopiony lub zatopiony.

2. Zatopienie strumienia badanego progu przepuszczalnego rozpoczyna się, gdy h_d/H_g przekroczy wartość 0,60.

3. W początkowej fazie pełnego zatopienia wartości współczynnika zbliżone są do podanych przez Izbasha i Khaldrea [1970] dla progu przepuszczalnego, w końcowej – do wartości dla stałych przelewów o szerokiej koronie.

4. Zatopienie strumienia przelewowego powoduje zmniejszenie spadku na progu, co prowadzi do zmniejszenia udziału przepływu filtracyjnego w całkowitym przepływie i ustalenia się warunków zbliżonych do panujących na przelewach stałych.

PIŚMIENNICTWO

- Bajkowski, S. (2006). Rozdział przepływu na przelewie gabionowym. *Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ.* 2(34), 113–120.
- Bajkowski, S. (2007). Proste kryteria oceny bezpieczeństwa jazów na rzekach nizinnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 4/2, 7–14.
- Bajkowski, S. (2013). Warunki przepływu wody przez budowle przepuszczalne. *Rozprawy Naukowe i Monografie*, 341. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Bajkowski, S. (2014). Konstrukcja i wykorzystanie potrójnego diagramu rozmiaru, kształtu i ułożenia ziaren w gabionie. *Landform Analysis*, 26, 71–75.
- Bajkowski, S., Łasisz, K. (2010). Pomiary dna rzeki i zwierciadła wody na progach kamiennych. *Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ.* XIX, 3(49), 12–20.
- Izbash, S.V., Khaldre, K.Y. (1970). *Hydraulics of River Channel Closure*. Translated from the Russian by G.L. Cairns. Butterworths, London, 174.
- Kiselev, P.G. (1974). *Spravočnik po gidravličeskim rasčetam*. Izdatelstvo Energia, Moskwa.
- Mohamed, H. (2010). Flow over Gabion Weirs. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8), 573–577.
- Parylak, K., Zięba, Z., Bułdys, A., Witek, K. (2013). Weryfikacja wyznaczania współczynnika filtracji gruntów niespoistych za pomocą wzorów empirycznych w ujęciu ich mikrostruktury. *Acta Sci. Pol., Architectura*, 12(2), 43–5.
- Skogerboe, G.V., Merkle, G.O. (1996). *Irrigation Maintenance and Operations Learning Process*. Water Resources Publication, 358.
- Sobota, J. (1994). *Hydraulika. T. I i II*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- Stephenson, D. (1980). The Stability of Gabion Weirs. *Water Power and Dam Construction*, April, 24–28.

SUBMERGED FLOW COEFFICIENT OF THE PERMEABLE SILL

Abstract. The article presents the research conducted to identify the submergence conditions of the rectangular permeable sill. They were executed as a laboratory tests and analysis aiming at determining the relation describing the submerged flow coefficient (k_c). The submerged flow coefficient was calculated on the basis of the submerged to free flow discharge ratio. The analysis include definition of the parameters affecting the values of the submerged flow coefficient and the scientific description of calculation formula. The submerged flow coefficient depends on the ratio of the downstream water depth to the upstream headwater (h_d/H_g). The submergence of the permeable sill stream begins when the ratio (h_d/H_g) exceeds 0.60. In the initial phase the values of submerged flow coefficient are similar to values given for the permeable sills. The final phase is characterized by submergence flow coefficient similar to values for solid sills.

Key words: permeable sill, free flow, submerged flow, submerged flow coefficient

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.06.2015

Cytowanie: Bajkowski, S. (2015). Współczynnik zatopienia progu przepuszczalnego. *Acta Sci. Pol., Architectura*, 14(2), 53–62.