

## DŁUGOŚĆ WPŁYWANIA STRUMIENIA NA KORONIE PROGU PRZEPUSZCZALNEGO Z PRZELEWEM O OSTREJ KRAWĘDZI NA SKARPIE GÓRNEJ

Sławomir Bajkowski✉

Inżynier Inżynierii Łądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

### STRESZCZENIE

Artykuł zawiera analizy warunków przepływu wody przez trapezowy kamienny próg przepuszczalny ze szczelnym ekranem na skarpie górnej. Celem analiz było opracowanie nomogramu oraz zależności matematycznych do ustalania szerokości progu objętego strumieniem przelewowych w zależności od przyjętych założeń modelu fizycznego. Do jego realizacji wykorzystano własne badania modelowe oraz wyniki podane w literaturze. Badania objęły część strumieniem przelewowego, na długości której woda wpływa do wnętrza progu. Do transformacji wyników na obiekty w naturze wykorzystano zasadę podobieństwa hydrodynamicznego według kryterium Froude'a. Na kształtowanie się profilu strumienia przepływającego ponad badanym progiem wpływa średnica kruszywa, z którego wykonany jest przepuszczalny korpus oraz jednostkowe natężenie przepływu wody. Wynikiem prac realizowanych w artykule jest nomogram oraz krzywe regresji opisujące długość strefy wpływania wody do wnętrza przepuszczalnego progu. W analizach uzyskano dobre dopasowanie wyprowadzonych równań do wyników badań modelowych. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w projektowaniu tego typu budowli terenowych.

**Słowa kluczowe:** próg gabionowy, przelew o ostrej krawędzi, długość wpływania strumienia

### WSTĘP

Progi rzeczne stanowią budowle, których celem budowy jest stabilizacja, wzmocnienie i zabezpieczenie dna cieku. Budowane są one w poprzek koryta cieku i zazwyczaj obejmują całą jego szerokość. Razem z progami wykonywane są umocnienia dna oraz brzegów koryta cieku w celu ochrony przed rozmyciem. Coraz częściej konstrukcje progowe wykonuje się z materiałów kamiennych zbrojonych siatką plecioną lub zgrzewaną. Progi takie stanowią przepuszczalne konstrukcje, przez które początkowo woda filtruje, a przy większych natężeniach przepływu przelewa się również ponad ich koronę (Akkerman i Konter, 1985). W celu utrzymania minimalnego poziomu wody gór-

nej progi przepuszczalne zabudowuje się ekranami na skarpie górnej tworzącymi konstrukcje przelewowe lub ściankami szczelnymi usytuowanymi w ich wnętrzu. W konstrukcjach progów trapezowych szczelne ekrany układane są na skarpie górnej. Stanowią one nachylony do poziomu przelew stały o ostrej krawędzi. Górna krawędź przelewu na skarpie trapezowego progu przepuszczalnego wyznacza poziom, po przekroczeniu którego woda przelewa się ponad koronę i wpływa do przepuszczalnego korpusu (Michioku, Maeno, Furusawa i Haneda, 2005; Bajkowski, 2013). Strumień powierzchniowy wpływa w korpus progu wypełniony kruszywem, stanowiący ośrodek porowaty, a następnie przepływa filtracyjnym ruchem turbulentnym przez system nieregularnych porów pomiędzy

Sławomir Bajkowski <https://orcid.org/0000-0002-7010-0600>

✉slawomir\_bajkowski@sggw.pl

ziarnami kruszywa (Bajkowski i Tymińska, 2018). Przy zwiększającym się natężeniu przepływu długość strefy wpływania zwiększa się, aż strumień na koronie osiąga dolną krawędź progę, po przekroczeniu której część wody wpływa na całej szerokości do wnętrza korpusu, a pozostała przepływa ponad progiem.

W artykule przedstawiono analizy wyników badań układu swobodnego zwierciadła wody strumienia przelewającego się nad koroną przelewu skarpowego i wpływającego do przepuszczalnego progę. Kształt swobodnego strumienia jest zależny od wzniesienia zwierciadła wody górnej, geometrii progę oraz parametrów kruszywa wypełniającego korpus, do których zalicza się uziarnienie, rodzaj materiału oraz ułożenie ziaren. Kruszywo użyte do wypełnienia korpusu progę oraz konstrukcja wzmocniająca próg wyznaczają szorstkość powierzchni korony przelewu. Długość wpływania powierzchniowego strumienia do wnętrza przepuszczalnego progę kamiennego ustalono na podstawie laboratoryjnych badań modelowych oraz poprzez transformację tych wyników na obiekty w naturze, wykorzystując teorię podobieństwa modelowego badanego zjawiska.

## MATERIAŁ I METODY

### Parametry i kształt obrysu strumienia przelewowego nad progiem

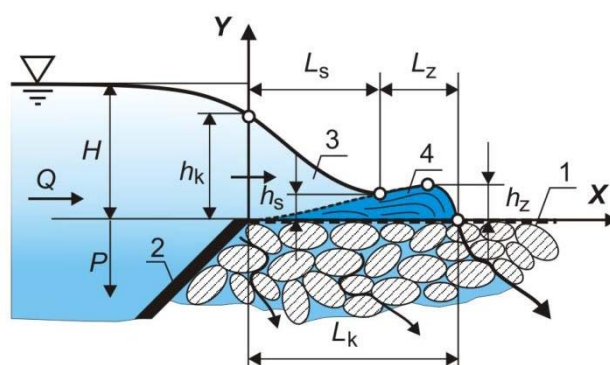
W profilu zwierciadła wody na progach przepuszczalnych wyróżnia się wielkości, które wykorzystywane są do oceny przepustowości przelewu oraz określające głębokości wody w korpusie i na koronie progę. Dla progów stałych ustalane są wyłącznie wartości parametrów strumienia powierzchniowego, dla progów przepuszczalnych definiowane są również wielkości charakteryzujące strumień filtracyjny (Mohamed, 2010; Bajkowski, Tymińska i Piątek, 2019).

Dla przelewów stałych kształt obrysu strumienia przelewowego zależy od geometrii progę zobrazowanej kształtem ściany przelewowej, jej szerokości i szorstkości oraz od wartości wielkości hydraulicznych, natężenia przepływu i wysokości warstwy przelewowej charakteryzujących parametry strumienia powierzchniowego (Żbikowski i in., 1986). Kształt górnego obrysu strumienia na progach przepuszczalnych zależy również od charakterystyk geometrycznych

ziaren korpusu oraz ich ułożenia (Bajkowski, 2013). Leu, Chanb i Chua (2008) badali progę wypełnione kruszywem kulistym. W analizach układu zwierciadła wody na badanym trapezowym progę przepuszczalnym (1 na rys. 1) ze szczelnym ekranem (2 na rys. 1), na skarpie górnej zdefiniowano wielkości określające głębokości strumienia w charakterystycznych punktach na długości strumienia:

- $h_k$  – głębokość wlotową strumienia w przekroju końcowym krawędzi przelewu skarpowego, stanowiącym jednocześnie przekrój początkowy części przepuszczalnej progę,
- $h_s$  – głębokość końcową swobodnego strumienia w przekroju, poniżej którego na koronie pojawia się falowa strefa zaburzeń,
- $h_z$  – głębokość strumienia w najwyższym punkcie zwierciadła wody na długości falowej strefy zaburzeń,
- $L_k$  – długość strefy wpływania wody na koronie przelewu, mierzona od krawędzi przekroju wlotowego do miejsca zaniku strumienia na powierzchni progę; ta długość wyznacza położenie punktu, który rozdziela na koronie progę strefę pokrytą wodą od części, na której woda nie występuje,
- $L_s$  – długość strefy strumienia swobodnego na odcinku od przekroju wlotowego do miejsca wystąpienia dna pierwszej fali na korpusie,
- $L_z$  – długość falowej strefy zaburzeń powstającej na powierzchni korony progę.

Pomiary profilu zwierciadła wody wykonano w osi stanowiska badawczego, odnosząc uzyskane wyniki do układu współrzędnych OXY (rys. 1), którego półoś rzędnych OY położona jest w płaszczyźnie wlotowej przepuszczalnego progę, a półoś odciętych OX na poziomie rzędnej korony przelewu skarpowego. Modelowe badania laboratoryjne zostały wykonane w Laboratorium Hydraulicznym SGGW. Stanowisko badawcze stanowiło koryto o szerokości 0,203 m, wysokości 0,40 m oraz długości 4,0 m. Badany model stanowi trapezowy próg kamienny wzmocniony siatką o nachyleniu skarp 1 : 1 ze szczelnym ekranem na skarpie górnej. Salmasi, Sattari i Pal (2012) badali próg kaskadowy. Wysokość progę wynosiła 0,10 m, szerokość podstawy była równa 0,40 m, a szerokość korony miała 0,20 m. Badania były wykonane dla jednej frakcji kruszywa. Stanowisko badawcze wyposażono



**Rys. 1.** Strumień przelewowy progów przepuszczalnych z przelewem o ostrej krawędzi na skarpie górnej: 1 – kamienny próg przepuszczalny, 2 – ostrokrawędziowy przelew skarpowy, 3 – strefa strumienia swobodnego, 4 – falowa strefa wlotowa,  $Q$  – natężenie przepływu,  $H$  – wysokość wody górnej nad koroną przelewu,  $P$  – wysokość progów przelewu,  $h_k$  – głębokość wlotowa strumienia,  $h_s$  – głębokość końcowa strumienia swobodnego,  $h_z$  – głębokość strumienia falowej strefy zaburzeń,  $L_k$  – długość strefy wpływania,  $L_s$  – długość strefy strumienia swobodnego,  $L_z$  – długość strefy falowej

**Fig. 1.** Overflow stream of permeable sill with sharp-crested weir on the upstream slope: 1 – stone permeable sill, 2 – sharp-crested weir on upstream slope, 3 – free flow zone, 4 – wave intake zone,  $Q$  – flow rate,  $H$  – upstream water head over weir crest,  $P$  – high of the weir sill,  $h_k$  – head of the inflowing stream,  $h_s$  – end depth of the free stream,  $h_z$  – depth of the wave zone,  $L_k$  – length of the inflow zone,  $L_s$  – length of the free flow zone,  $L_z$  – length of the wave intake zone

w automatyczne elektroniczne urządzenia pomiarowe podłączone do systemu komputerowego (elektromagnetyczny miernik przepływu, elektroniczne mierniki różnicy ciśnień, miernik temperatury wody i powietrza, barometr) oraz ręczne mechaniczne urządzenia kontrolno-pomiarowe (ruchomy wodowskaz szpilkowy, piezometry cieczowe) (Bajkowski, 2009).

W kamiennych progach przepuszczalnych z elementami szczelnymi przelewająca się woda nad stałym przelewem skarpowym wpływa do wnętrza progów (Bajkowski i Jastrzębska, 2012). Początkowo woda wypełnia wolne przestrzenie wewnątrz korpusu w jego dolnej części, w górnych partiach korpusu wolne przestrzenie nie są wypełnione wodą. W czasie tej fazy następuje intensywny ruch wody w korpusie. Jest to faza, w której strumień powierzchniowy przelewający się ponad koroną przelewu skarpowego przepływa jako swobodny. Kształt strumienia nad koroną badanego kamiennego progów modelowego dla współrzędnych wymiarowych i bezwymiarowych przedstawili Bajkowski i Tymińska (2018), a we współrzędnych zredukowanych opisali Bajkowski i inni (2019).

### Parametry kruszywa i zakresy wielkości pomiarowych

Korpus modelu badanego progów wypełniony był kruszywem naturalnym KO. Były to otoczki grupy frakcyjnej 60/80 mm. Gęstość właściwa kruszywa wynosiła  $2,60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , porowatość korpusu  $p = 0,426$ , a wskaźnik porowatości  $e = 0,743$ . Cechy ziaren materiału wypełniającego korpus badanego modelu fizycznego progów ustalano dla miarodajnej analitycznej próbki, wykonując analizę granulometryczną metodą bezpośredniego pomiaru ziaren. Ziarna próbki scharakteryzowano wymiarami zastępczymi:

- $D_s$  [mm] – średnica średnia jako średnia arytmetyczna z długości, szerokości i grubości ziarna,
- $D_z$  [mm] – średnica objętościowa, czyli wymiar ziarna o objętości kulistego ziarna zastępczego.

Dla krzywych uziarnienia według zastępczych wymiarów ziaren  $D_s$  oraz  $D_z$  określano średnicę miarodajną ziarna  $d_{50}$ . Uzyskano następujące wartości średnicy miarodajnej:

- $D_m = 73,46 \text{ mm}$  ( $D \cong 7,0 \text{ cm}$ ) według wymiaru  $D_s$ ,
- $D_m = 68,70 \text{ mm}$  ( $D \cong 7,0 \text{ cm}$ ) według wymiaru  $D_z$ .

Dla uszeregowanych krzywych uziarnienia według wymiarów ziaren  $D_s$  oraz  $D_z$  określano następujące cechy:

- $C_c$  – wskaźnik krzywizny krzywej uziarnienia według PN-B-02481:1998 ( $C_c \cong 1$ , materiał próbki jednofrakcyjny),
- $C_u$  – wskaźnik jednorodności uziarnienia materiału (współczynnik wysortowania Hazena) według PN-EN ISO 14688-1:2006 ( $C_u < 6$ , materiał próbki jednofrakcyjny),
- $C_k$  – wskaźnik różnoziarnistości według Knoroza ( $C_k \leq 4-5$ , materiał próbki dobrze wysortowany),
- $C_d$  – cecha dominacji oddająca przewagę ziaren większych lub mniejszych od średnicy miarodajnej  $d_{50}$  (Kollis, 1966), ( $C_d > 1$ , w próbce przeważały cząstki o średnicy większej od  $d_{50}$ ).

Kruszywo użyte w badaniach laboratoryjnych cechowało się jednorodnością uziarnienia. Według wskazanych kryteriów materiał próbki był jednofrakcyjny z przewagą ziaren o wymiarach większych od średnicy miarodajnej.

W tabeli 1 zestawiono zakresy pomiarowe podstawowych wielkości i parametrów uzyskanych w badaniach laboratoryjnych. Są to:

- $Q$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] – natężenie przepływu,
- $H$  [m] – wzniesienie poziomu wody górnej nad koroną przelewu skarpowego,
- $Re$  [-] – liczba Reynoldsa liczona według parametrów strumienia przelewowego:

$$Re = \frac{VH_k}{\nu} \quad (1)$$

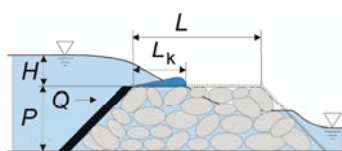
gdzie:

- $H_k$  [m] – wzniesienie linii energii nad koroną przelewu w przekroju wlotowym,
- $V$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] – prędkość przepływu wody nad koroną przelewu,
- $\alpha = 1,1$  – współczynnik Saint Venanta, inaczej Coriolisa (Chow, 1959),
- $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  – przyspieszenie ziemskie,
- $\nu = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  – kinematyczny współczynnik lepkości wody.

**Tabela 1.** Parametry modelu fizycznego i zakresy wielkości pomiarowych

**Table 1.** Parameters of the physical model and ranges measuring values

Parametry modelowe Model parameters	Wartości – Values		
	minimalna minimal	średnia average	maksymalna maximal
$Q$ [ $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	0,376	1,049	1,745
$h_k$ [ $10^{-2} \text{ m}$ ]	0,64	1,24	1,98
$L_k$ [ $10^{-2} \text{ m}$ ]	1,10	4,07	10,50
$H$ [ $10^{-2} \text{ m}$ ]	0,86	1,64	2,39
$H / L$	0,04	0,08	0,12
$H / P$	0,09	0,16	0,24
$H / (H + P)$	0,08	0,14	0,19
Re	5 946	16 756	24 416



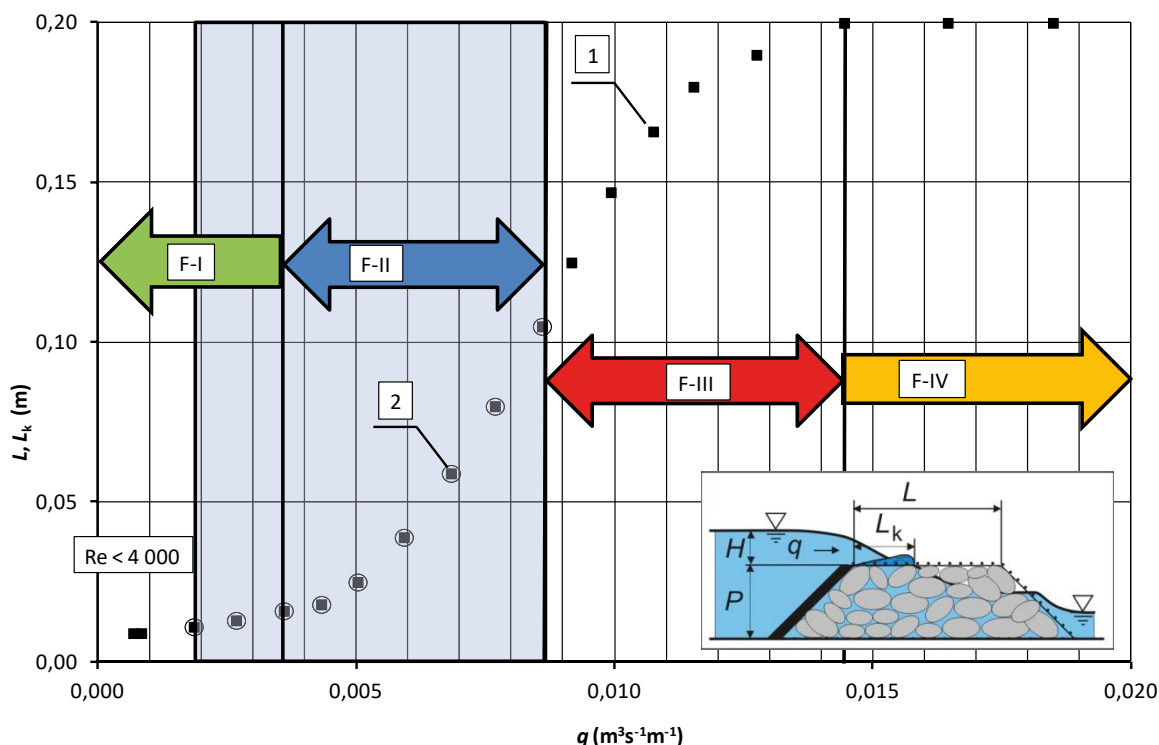
### Długość wpływania strumienia na koronie progę

Długość wpływania strumienia na progę ( $L_k$ ) odpowiada położeniu punktu, który rozdziela na koronie progę strefę pokrytą wodą od części, na której woda nie występuje. Na rysunku 2 przedstawiono szerokość korony ( $L$ ) oraz uzyskany z badań własnych wykres zależności długości wpływania strumienia ( $L_k$ ) od jednostkowego natężenia przepływu ( $q$ ) dla progę modelowego wypełnionego otoczkami o zastępczej średnicy miarodajnej  $D \cong 7,0$  cm. Długość strefy strumienia wpływającego do wnętrza kamiennego progę zwiększa się wraz ze wzrostem natężeniem przepływu, a na charakter tych zmian wpływa relacja między analizowaną długością wpływania a szerokością korony progę (pkt 1 na rys. 2).

W początkowej fazie (F-I), po przelaniu się wody nad koronę stałego przelewu skarpowego przyrost długości wpływania strumienia jest niewielki. Przyrost

ten znacząco wzrasta w rozwiniętej fazie strumienia (F-II). Oddziaływanie krawędzi dolnej korony progę widoczne jest w końcowej fazie wpływania strumienia (F-III), w zakresie której przyrost długości wpływania ponownie spada i zbliża się asymptotycznie do wartości równej szerokości korony przepuszczalnego progę. Przy dalszym wzroście jednostkowego natężenia przepływu w zanikowej fazie (F-IV) woda pokrywa całkowicie szerokość progę.

Na rysunku 3 pokazano wartości długości wpływania wody do naturalnego przepuszczalnego korpusu z górnym przelewem skarpowym według Grišina (1947) i Siborova (1955). Według nomogramu jednostkowe natężenie przepływu na progach kamiennych zależy od długości wpływania oraz od średnicy materiału kamiennego wypełniającego korpus. Diagram podany na rysunku 3 pozwala określić długości wpływania na koronie przelewu dla trzech frakcji kru-

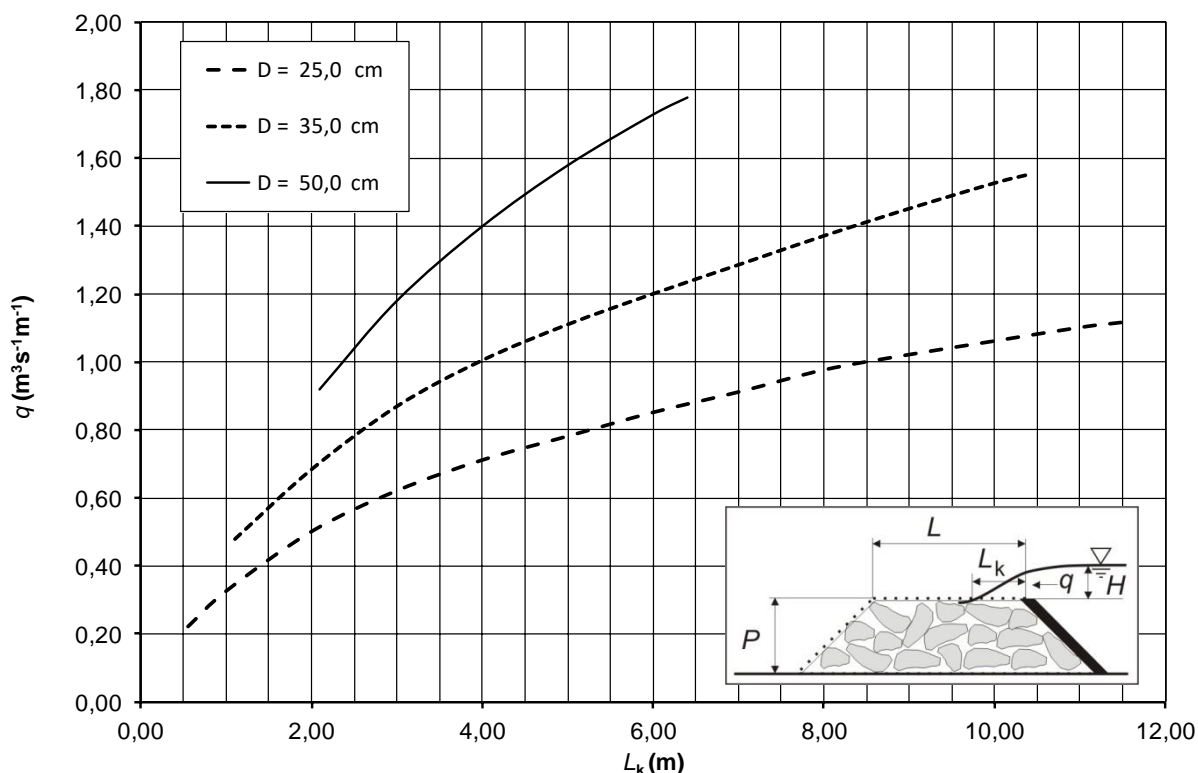


**Rys. 2.** Krzywa wpływania strumienia na progę przepuszczalnym ze szczelnym ekranem na skarpie górnej (według własnych badań laboratoryjnych): 1 – punkty pomiarowe, 2 – punkty obliczeniowe, F-I, ..., F-IV – fazy przepływu  
**Fig. 2.** Stream inflow curve on the permeable sill with sharp-crested weir on the upstream slope (according to own laboratory research): 1 – measuring points, 2 – calculation points, F-I, ..., F-IV – flow phases

szywa o średnicach: 25, 35 i 50 cm. W publikacjach nie sprecyzowano jednak, jakiego rodzaju kruszywa dotyczy nomogram oraz jaka była porowatość korpusu. Kształt krzywych na rysunku 3 wskazuje, że zostały opracowane w zakresie faz wpływania F-I i F-II. Krzywe nie obejmują małych natężeń przepływu oraz nie wchodzi w zakres faz F-III i F-IV. Zostały opracowane dla progów korony, które są pokryte wodą tylko w części wlotowej.

Badania własne autor opracował dla jednej frakcji kruszywa o średnicy  $D \cong 7,0$  cm i małych modelowych natężeń przepływu ( $Q_{\max} = 1,745$  l·s<sup>-1</sup>). Uzyskany z nich wykres (rys. 2) wskazuje i potwierdza prawidłowość zależności długości wpływania od jednostkowego natężenia przepływu wody nad koroną skarpowego przelewu wlotowego. Nomogram (rys. 3) podaje wartości jednostkowych natężeń przepływu

pozwalające na wykorzystanie krzywych długości wpływania na obiektach większych. Brakuje w nich części krzywych dla małych natężeń przepływów jednostkowych, pozwalających na ich wykorzystanie przy projektowaniu progów na małych rzekach. Przeprowadzone przez autora badania umożliwiają uzupełnienie podanego zakresu o wartości mniejsze od podanych na wykresie. Do analiz uzupełniających i rozszerzających dolny zakres wielkości  $L_k$  i  $q$  z badań własnych wydzielono punkty obliczeniowe (pkt 2 na rys. 2), ograniczając się do zakresu występowania faz F-I i F-II. Pozwoliło to zachować jednorodność analizowanych danych z badań własnych w stosunku do podanych w literaturze. Analizy objęły wyłącznie punkty pomiarowe, dla których uzyskano na modelu przepływ turbulentny przy  $Re > 4000$  (Majewski, 2019).



**Rys. 3.** Krzywe długości wpływania strumienia na koronie progę przepuszczalnego z ekranem szczelnym na skarpie górnej według Grišina (1947) i Siborova (1955)

**Fig. 3.** Curves of the inflow of the stream on the crest of the permeable sill with sharp-crested weir on the upstream slope according to Grišin (1947) and Siborov (1955)

### Modelowanie zjawiska – kryteria i skala

Do przeniesienia uzyskanych na modelu wyników na obiekty w naturze wykorzystano teorię podobieństwa modelowego zjawisk fizycznych. Zdefiniowano dwa układy: modelowy według własnych badań laboratoryjnych, oznaczając je indeksem M (rys. 2), w naturze uzyskany z danych podanych przez Grišina (1947) i Siborova (1955) z indeksem N (rys. 3). Przy modelowaniu i transformacji wyników z modelu na obiekty w naturze uwzględniono podobieństwa:

- geometryczne ( $\alpha_L$ ) wyrażone skalą długości określonej stosunkiem długości na modelu ( $L_M$ ) i w naturze ( $L_N$ ),
- kinematyczne ( $\alpha_T$ ) wskazujące skalę czasu odniesioną do stałego stosunku czasów przesunięć wzdłuż odpowiadających sobie odcinków, czasu na modelu ( $T_M$ ) i czasu w naturze ( $T_N$ ),
- dynamiczne, w którym zachowana jest skala czasów ( $\alpha_T$ ) oraz skala sił ( $\alpha_F$ ) wyrażona stosunkiem siły na modelu ( $F_M$ ) i siły w naturze ( $F_N$ ).

#### Podobieństwo sił ciężkości – kryterium Froude’a

Przepływ cieczy powodowany jest poza siłami bezwładności siłami ciężkości, tarcia, sprężystości i napięcia powierzchniowego. W badanym zjawisku dominująca jest siła ciężkości, której skala powinna być równa skali sił bezwładności ( $\alpha_F$ ) równej liczbie Newtona. Dla osiągnięcia podobieństwa dynamicznego skala sił ciężkości musi być równa skali sił bezwładności. Warunek ten zapisujemy w postaci:

$$\frac{\alpha_p \alpha_L^4}{\alpha_T^2} = \alpha_p \alpha_g \alpha_L^3 \quad (2)$$

Przyjmując stałą jednostkową siłę masową na modelu i w naturze, tzn.  $g_M = g_N$  ( $\alpha_g = 1$ ), oraz wykorzystując tę samą ciecz na modelu i w naturze, tj.  $\rho_M = \rho_N$  ( $\alpha_p = 1$ ), otrzymano zależności określające w funkcji skali długości:

- prędkość przepływu:

$$\alpha_v = \alpha_L^{1/2} \quad (3)$$

- natężenie przepływu:

$$\alpha_Q = \alpha_L^{5/2} \quad (4)$$

Skalę podobieństwa według kryterium Froude’a siły ciężkości przyjęto z uwagi, że długość wpływania bezpośrednio związana jest z charakterystyką swobodnego przepływu strumienia wpływającego od góry do przepuszczalnego korpusu na początkowym odcinku korony.

#### Podstawy modelowania długości wpływania

Prezentowany przypadek należy do zjawiska fizycznego, które wynika z przepływu strumienia powierzchniowego, a następnie wpływanie tych samych mas wody do wnętrza przepuszczalnego korpusu progę. W badaniach podstawowym parametrem pomiarowym jest układ/profil zwierciadła wody, z którego wyodrębniono długość wpływania. Profil swobodnego zwierciadła wody odzwierciedla całkowite opory przepływu (Szuster i Utrysko, 1986), które modelowano, dobierając odpowiednią/konieczną skalę szorstkości. Człon równania Saint Venanta opisujący opory przepływu spadkiem hydraulicznym ma postać:

$$\frac{dh}{dl} = J = \frac{v^2}{C^2 R} \quad (5)$$

gdzie:

$v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] – średnia prędkość przepływu,

$C$  [ $m^{1/2} \cdot s^{-1}$ ] – współczynnik prędkości Chézy’ego,

$R$  [m] – promień hydrauliczny,

$\frac{dh}{dl} = J$  [-] – spadek hydrauliczny.

Stosując zasadę podobieństwa modelowego i dzieląc wszystkie modelowe składniki równanie (5) przez odpowiadające im wartości naturalne, uzyskuje się następujące ilorazy skal:

$$\frac{\alpha_H}{\alpha_L} = 1 = \frac{\alpha_v^2}{\alpha_C^2 \alpha_R} \quad (6)$$

Przekształcając równanie (6) poprzez wprowadzenie równości skal modelowania  $\alpha_L = \alpha_H = \alpha_R$  i uwzględniając równanie (3), otrzymuje się:

$$\alpha_C = \frac{\alpha_V}{\sqrt{\alpha_R}} = \frac{\sqrt{\alpha_L}}{\sqrt{\alpha_L}} = 1 \quad (7)$$

Ze wzoru (7) wynika, że współczynnik prędkości ( $C$ ) do wzoru Chézy'ego na modelu i w naturze powinien być taki sam. Według Manninga–Stricklera ten współczynnik wyraża wzór:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = k_{St} R^{1/6} \quad (8)$$

gdzie:

$n$  [ $m^{-1/3} \cdot s$ ] – współczynnik szorstkości powierzchni Manninga,  
 $k_{St}$  [ $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ ] – współczynnik oporów przepływu Stricklera.

Konieczną skalę współczynnika prędkości ( $\alpha_C$ ) wyznacza się z zależności:

$$\alpha_C = \frac{\alpha_R^{1/6}}{\alpha_n} = \frac{\alpha_L^{1/6}}{\alpha_n} = 1 \quad (9)$$

z której uzyskuje się skalę współczynnika szorstkości  $\alpha_n$  wyrażoną wzorem:

$$\alpha_n = \frac{n_M}{n_N} = \alpha_L^{1/6} \quad (10)$$

gdzie:

$n_M$  [ $m^{-1/3} \cdot s$ ] – współczynnik szorstkości kamiennej powierzchni korony progu modelowego na długości wpływania strumienia według badań własnych,  
 $n_N$  [ $m^{-1/3} \cdot s$ ] – współczynnik szorstkości kamiennej powierzchni korony progu naturalnego dla podanych średnic kruszywa, których krzywe długości wpływania strumienia zostały podane przez Grišina (1947) i Siborova (1955).

Równanie (10) pozwala obliczyć nie tylko współczynnik szorstkości modelu fizycznego ( $n_M$ ) lub współczynnik szorstkości powierzchni odwzorowanego obiektu w naturze ( $n_N$ ), ale również ocenić geometryczną skalę modelowania ( $\alpha_L$ ) związaną z szorstkością powierzchni modelu i obiektu w naturze.

Współczynnik szorstkości kamiennej powierzchni modelu progu ( $n_M$ ) obliczono z przekształconego wzoru (8) do postaci:

$$n_M = \frac{R_M^{1/6}}{C_M} \quad (11)$$

gdzie:

$R_M$  [m] – promień hydrauliczny przekroju strumienia na długości wpływania ( $L_k$ ) o średniej głębokości strumienia równej  $h_k / 2$ ,

$C_M$  [ $m^{1/2} \cdot s^{-1}$ ] – współczynnik prędkości obliczony z przekształconego wzoru (5) dla przekroju o głębokości równej  $h_k / 2$  i średniego spadku zwierciadła wody na długości wpływania.

Współczynnik szorstkości kamiennej powierzchni progu obiektów w naturze ( $n_N$ ) obliczono według średnic kruszywa, dla których opracowano nomogram na rysunku 3. Współczynnik szorstkości powierzchni korony do wzoru (8) ustalony z „uwzględnieniem wysokości form budujących relief dna” według Stricklera (za: Breusers i Raudkivi, 1991; Radecki-Pawlik, Carling, Słowik-Opoka i Breakspeare, 2005) opisany jest zależnościami:

$$n_N = \frac{1}{k_{St}} \quad (12)$$

$$k_{St} = \frac{21,1}{\sqrt[6]{d_{50}}} \quad (13)$$

gdzie:

$d_{50\%}$  [m] – średnica kruszywa według danych Grišina (1947) i Siborova (1955).



### Geometryczna skala modelowania

W analizach prezentowanych w artykule geometryczną skalę modelowania ( $\alpha_L$ ) wymaganą do przeliczenia długości wpływania ( $L_{kN}$ ) oraz jednostkowego natężenia przepływu ( $q_N$ ) obliczono z równania (10) dla znanych wartości współczynników szorstkości:  $n_M$  i  $n_N$ . Obliczając  $n_M$  ze wzoru (11), a  $n_N$  ze wzorów (12) i (13), wymagane skale geometryczne obliczono ze wzoru (10) przekształconego do postaci:

$$\alpha_L = \frac{1}{M_L} = \alpha_n^6 = \left( \frac{n_M}{n_N} \right)^6 \quad (14)$$

Wykorzystując zależności analizowanych wielkości modelowych i w naturze, uzyskano skale geometryczne równe:  $\alpha_L = 0,08$  dla  $D = 25,0$  cm,  $\alpha_L = 0,06$  dla  $D = 35,0$  cm i  $\alpha_L = 0,04$  dla  $D = 50,0$  cm. Dla uzyskanych wartości skal modelowania współczynnik skali ( $M_L$ ) był odpowiednio równy: 13, 18, 25. Wykorzystywane w analizach wartości wielkości dla obiektów w naturze obliczono ze wzorów:

- $L_{kN}$  [m] – długość wpływania strumienia do wnętrza progu w naturze:

$$L_{kN} = M_L L_{kM} \quad (15)$$

- $q_N$  [ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ] – naturalne jednostkowe natężenie przepływu:

$$q_N = M_L^{3/2} q_M \quad (16)$$

Zestawienie współczynników szorstkości oraz zakresy uzyskanych wartości parametrów obliczeniowych podano w tabeli 2.

### WYNIKI

Stosując wyznaczone skale geometryczne ( $\alpha_L$ ), wyniki laboratoryjnych badań  $L_M$  oraz  $q_M$  wyznaczone dla jednego progu modelowego, transformowano na trzy obiekty w naturze (rys. 4). Uzyskane wartości wprowadzono w pole wykresu podanego przez Grišina (1947) i Siborova (1955) opracowanego w układzie  $L_k = f(q, D)$ . Obliczone długości wpływania dla poszczególnych skal podobieństwa geometrycznego potwierdzają ogólny trend wpływu na tę wartość jednostkowego natężenia przepływu i średnicy kruszywa.

**Table 2.** Calculation parameters of model and nature objects

**Tabela 2.** Parametry obliczeniowe modelu i obiektów w naturze

Parametry Parameters	Model laboratoryjny Laboratory model	Obiekty w naturze – Natural objects		
		skala – scale 1 : 13	skala – scale 1 : 18	skala – scale 1 : 25
$D$ [m]	0,07	0,25	0,35	0,50
$n$ [ $m^{-1/3} \cdot s$ ]	0,025	0,038	0,040	0,042
$q_{min}$ [ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ]	0,002	0,087	0,141	0,231
$q_{max}$ [ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ]	0,009	0,403	0,656	1,074
$L_{kmin}$ [m]	0,011	0,143	0,198	0,275
$L_{kmax}$ [m]	0,105	1,365	1,890	2,625
$Re_{min}$ [-]	5,95E+03	2,97E+05	4,84E+05	7,92E+05
$Re_{max}$ [-]	2,44E+04	7,60E+05	1,24E+06	2,03E+06
$r$ współczynnik korelacji liniowej – linear correlation coefficient		0,971	0,975	0,978

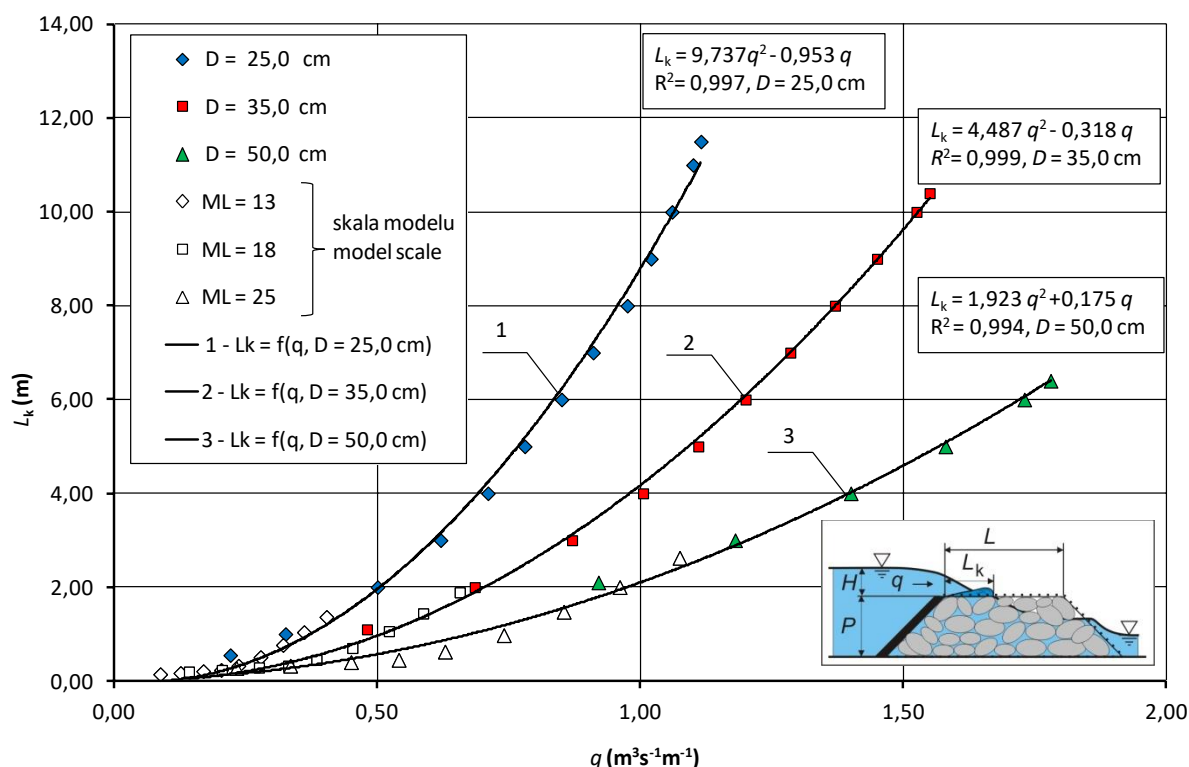
Uzyskane z badań wyniki pokrywają się z wynikami z literatury, a jednocześnie rozszerzają dolne granice wykorzystania krzywych w zakresie jednostkowego natężenia przepływu i odpowiednio długości wpływania. Na rysunku 4 podano równania krzywych regresji opracowane dla poszczególnych średnic kruszywa łączące wyniki badań autora i z literatury. Współczynniki korelacji prezentowanych na rysunku 4 krzywych regresji zestawiono w tabeli 2. Wyniki badań laboratoryjnych transformowane na obiekty w naturze uzupełniły krzywe w dolnym zakresie jednostkowych natężeń przepływu. Dla średnicy kruszywa 25,0 cm dolna granica stosowania nomogramu dla przepływu jednostkowego obniżyła się z 0,220 do 0,087  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , dla średnicy 35,0 cm z 0,480 do 0,141  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , a dla średnicy 50,0 cm z 0,920 do 0,231  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Analizowane zmienne cechuje pełny liniowy związek korelacyjny, a opracowane

krzywe regresji charakteryzuje dobre dopasowanie do danych  $R^2 > 0,99$ .

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania oraz analizy ich wyników w zakresie opracowania zależności graficznych i matematycznych do obliczania długości strefy wpływania strumienia na koronie przepuszczalnego progów z przelewem o ostrej krawędzi na skarpie górnej wskazują na następujące wnioski:

1. Wyniki badań na modelach fizycznych progów gabionowych daje się wykorzystać do określenia długości wpływania strumienia do wnętrza progów w naturze.
2. Uzyskane z przeliczenia skali wartości długości wpływania pokrywają się z wartościami podanymi w literaturze.



**Rys. 4.** Długość wpływania strumienia na obiektach w naturze progów przepuszczalnym z ekranem szczelnym na skarpie górnej: 1 –  $D = 25,0$  cm, 2 –  $D = 35,0$  cm, 3 –  $D = 50,0$  cm

**Fig. 4.** The length of the inflowing on the objects in nature permeable sill with sharp-crested weir on the upstream slope: 1 –  $D = 25.0$  cm, 2 –  $D = 35.0$  cm, 3 –  $D = 50.0$  cm

3. Uzyskane wyniki pomiaru długości strefy wpływania z badań modelowych, po uwzględnieniu skal podobieństwa geometrycznego, pozwoliły na uzupełnienie dolnych zakresów krzywych z literatury.
4. W modelowaniu przepływu na progach przepuszczalnych obejmującego formę swobodnego przepływu strumienia powierzchniowego można wykorzystać podobieństwo sił ciężkości według kryterium Froude'a.
5. Transformowane z badań modelowych wyniki pozwoliły na uzupełnienie nomogramu dla obiektów w naturze, podane równania cechuje dobre dopasowanie do danych.
6. Uzyskane z analiz równania mogą być wykorzystane w projektowaniu obiektów rzeczywistych do ustalenia szerokości korony kamiennego progę zajętej przez strumień.

## PIŚMIENNICTWO

- Akkerman, G. J. i Konter, J. L. M. (1985). *Hydraulic Design Criteria for Rockfill Closure to Tidal Gaps, Vertical Closure Method* (Report M 1741, part IV). Delft: Delft Hydraulics Laboratory.
- Bajkowski, S. (2009). System pomiarowo-kontrolny Laboratorium Hydraulicznego SGGW. W A. Wita (red.), *Bezpieczeństwo zapór – bezpieczeństwo ludności i środowiska* (strony 195–203). Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.
- Bajkowski, S. (2013). *Warunki przepływu wody przez budowle przepuszczalne*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Bajkowski, S. i Jastrzębska, U. (2012). Badanie wpływu kształtu progę gabionowego na podział przepływu. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 4 (58), 263–272.
- Bajkowski, S. i Tymińska, A. (2018). Water surface profile of the trapezoidal permeable sill with sharp-crested weir on the upstream slope. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus. Environmental Processes*, 17 (4), 15–22.
- Bajkowski, S., Tymińska, A. i Piątek, S. (2019). Zredukowane współrzędne obrysu strumienia na trapezowym progę przepuszczalnym z przelewem o ostrej krawędzi na skarpie górnej. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 28 (1), 61–71. doi: 10.22630/PNIKS.2019.28.1.6
- Breusers, H. N. C. i Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring. Hydraulic Structures Design Manual Series*. London: Taylor & Francis.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York, McGraw-Hill.
- Grišin, M. M. (red.). (1947). *Gidrotehničeskij sooruzeni*. Moskwa: Strojizdat. Poligrafika pri Soviete Ministrov CCCP.
- Kollis, W. (1966). *Gruntoznawstwo techniczne*. Warszawa: Wydawnictwo Arkady.
- Leu, J. M., Chanb, H. C. i Chua, M. S. (2008). Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19, 331–337.
- Majewski, W. (2019). *Hydrauliczne badania modelowe inżynierii wodnej*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy.
- Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T. i Haneda, M. (2005). Discharge through a permeable rubble mound weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (1), 1–10. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:1(1)
- Mohamed, H. I. (2010). Flow over Gabion Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 8, 573–577. doi: 10.1061/\_ASCE\_IR.1943-4774.0000215
- PN-B-02481:1998. Geotechnika. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
- PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczenie i opis.
- Radecki-Pawlik, A., Carling, P. A., Słowik-Opoka, E. i Breakspeare, R. (2005). Badania terenowe form zwirowo-piaszczystych w rzece o charakterze podgórskim. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3, 119–134.
- Salmasi, F. S., Sattari, M. T. i Pal, M. T. (2012). Application of data mining on evaluation of energy dissipation over low gabion-stepped weir. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, 36, 95–106. doi: 10.3906/tar-1011-1506
- Siborov, A. A. (red.). (1955). *Spravočnik po Hidrotehnikę*. Moskwa: Vsesoūznyj Naučno-Issledovatel'skij Instytut Vodospabzheniâ, Kanalizacii, Hidrotehničeskij Sooruzenij i Inženiernoj Gidrogeologii (VODGEO).
- Szuster, A. i Utrysko, B. (1986). *Hydraulika i podstawy hydromechaniki*. Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
- Żbikowski, A., Bajkowski, S., Batijewski, W., Dąbkowski, S. Z. L., Kubrak, J. i Lipka, W. (1986). Wytyczne wymiarowania przelewów i ich kanałów odprowadzających w budowłach wodno-melioracyjnych. W H. Okruszko (red.), *Obliczenia hydrauliczne przelewów budowli wodno-melioracyjnych* (strony 9–93). Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.

## **THE INFLOW LENGTH OF THE STREAM ON THE CREST OF THE PERMEABLE SILL WITH SHARP-CRESTED WEIR ON THE UPSTREAM SLOPE**

### **ABSTRACT**

The article contains the analysis of the conditions of water flow through the trapezoidal stone permeable sill with a sharp-crested weir on the upper slope. The aim of the analysis was to develop a nomogram and mathematical relationships to determine the width of the sill covered by the overflow stream. In the implementation of the task, our own model research and results provided in the literature were used. The tests covered a part of the overflow stream at the length of which water inflows into the body of sill. The hydrodynamic similarity principle according to the Froude criterion was used to transform the results into objects in nature. The profile of the stream flowing over the tested sill is influenced by the diameter of the aggregate from which the permeable body is made and the unit water flow rate. The result of the works carried out in the article is a nomogram and regression curves for determining the length of water inflowing to the permeable sill. In the analyses, the good fit of the equations into the introduced variables was obtained. The obtained results can be used in the design of this type of field structures.

**Key words:** gabion sill, sharp-crested weir, sloping upstream face, length of stream inflow