

**Janusz KUBRAK<sup>1</sup>, Michał SZYDŁOWSKI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW

Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU

<sup>2</sup>Katedra Hydrauliki i Hydrologii Politechniki Gdańskiej

Department of Hydraulics and Hydrology Technical University of Gdańsk

## **Zastosowanie modelu Singha i Quiroga do prognozowania hydrogramu wypływu wody przez prostokątną wyrwę w zaporze ziemnej**

### **Singh and Quiroga model application for prediction of hydrograph for earth dam rectangular breach outflow**

#### **Wprowadzenie**

Przelanie się wody nad koroną zapory ziemnej jest częstą przyczyną katastrof zapór. Dlatego też w prognozach awarii zapór ziemnych rozważa się skutki przejścia fali powodziowej w dolinie powstałej w następstwie wypływu wody przez wyrwę w zaporze. Przelewanie się wody nad koroną zapoczątkowuje proces tworzenia się wyrwy w zaporze, który trwa do momentu całkowitego opróżnienia zbiornika lub do chwili sztucznego lub samoczynnego powstrzymania rozmywania wyrwy. Proces tworzenia się wyrwy w zaporze jest bardzo złożony i do dziś nie doczekał się pełnego wyjaśnienia. Charakterystykę modeli tworzenia się wyrwy w zaporze ziemnej znaleźć można w pracach Singha i Scarlatosa (1988), Singha i Quirogi (1988). Cechą wspólną tych modeli jest opis przepływu w zbiorniku pełnymi równaniami hydrodynamicznymi (Lou 1981, Ponce

i Tsivoglou 1981) lub ich uproszczoną formą (Cristofano 1973, Fread 1977, Benoist 1983, Brown i Rogers 1981, 1984, Singh i Scarlatos 1988) i stosowanie warunku ruchu krytycznego lub równania przepływu przez przelew o szerokiej koronie jako prawego warunku brzegowego zadawanego w przekroju wyrwy. Początkowy kształt wyrwy przyjmowany był zwykle jako prostokątny, trójkątny, trapezowy (Cristofano 1973, Fread 1977, 1984, Singh i Scarlatos 1988) lub paraboliczny (Brown i Rogers 1977). Niektórzy autorzy w swoich modelach uwzględniali położenie wody dolnej (Fread 1977, Lou 1981, Ponce i Tsivoglou 1981, Singh i Scarlatos 1988) oraz stabilność ścian wyrwy w warunkach braku (Fread 1984, 1985) lub występowania wody w gruncie zapory (Singh i Scarlatos 1988). Zastosowanie większości modeli wymaga określenia wymiarów zbiornika i zapory, jak również fizycznych cech gruntu w korpusie zapory, np.

średniej średnicy ziaren gruntu, kąta tarcia wewnętrznego i kohezji. Jednym z najtrudniejszych zadań jest zdefiniowanie początkowej wielkości i kształtu wyrwy. Nie biorąc nawet pod uwagę stopnia uproszczenia modelu, istnieje znaczna rozbieżność uzyskiwanych z nich wyników wskutek szerokiej zmienności wartości wprowadzonych parametrów. Natężenie ruchu rumowiska w przekroju wyrwy w trakcie jej rozmywania oblicza się zarówno za pomocą empirycznych zależności (Cristofano 1973, Lou 1981), jak i ogólnie znanych wzorów na natężenie ruchu rumowiska, takich jak: Schoklitscha (Brown i Rogers 1977, 1981), Meyera Petera i Muellera (Fread 1984, Ponce i Tsivoglou 1981), Smarta (Fread 1985) lub Einsteina i Browna, Singh i Scarlatos 1988). Doświadczenia na modelach fizycznych z rozmywalną wyrwą w zaporze (Singh i Scarlatos 1985, Singh i Quiroga 1988) wykazały, że stosowanie formuł na intensywność ruchu rumowiska wleczonego, takich jak Browna, Einsteina i Bagnolda, jest rozszerzeniem ich ważności poza warunki przyjmowane przy ich wyprowadzeniu. Ekstrapolacja taka powinna być potwierdzona doświadczalnie, lecz z braku odpowiednich danych zwykle się jej nie przeprowadza, dlatego wiarygodność informacji uzyskiwana z wszystkich tak budowanych modeli budzi uzasadnione wątpliwości.

Celowe było zdefiniowanie prędkości rozmywania zapory w funkcji ogólnych parametrów (wysokości zapory, pojemności i głębokości zbiornika, charakterystyk materiału), co pozwoliłoby uprościć matematyczny opis procesu

rozmywania zapory i podać jego analityczne rozwiązania. Singh i Quiroga (1988) podali bezwymiarowe rozwiązanie do obliczania czasu tworzenia się wyrw prostokątnych i trójkątnych oraz wznoszącej się części hydrogramu wypływu przez wyrwę.

W artykule wprowadzono zależności do obliczania czasu rozmywania prostokątnej wyrwy w zaporze dla dwu różnych wartości parametru  $n$ , charakteryzującego szybkość tworzenia się wyrwy. Obliczony czas tworzenia się wyrwy i zmian jej krawędzi w czasie wykorzystano do przykładowych obliczeń hydrogramu wypływu przez wyrwę w zaporze.

### Rozwiązanie Singha i Quiroga (1988)

Model rozmywania wyrwy w zaporze ziemnej oparto na założeniu, że wyrwa jest prostokątna i dopływ wody do zbiornika jest równy odpływowi z niego przez urządzenia upustowe (rys. 1). W obszarze zbiornika obowiązuje równanie ciągłości:

$$A_s \frac{dh}{dt} = -vA_w \quad (1)$$

gdzie:

$A_s$  – powierzchnia zbiornika [ $m^2$ ],

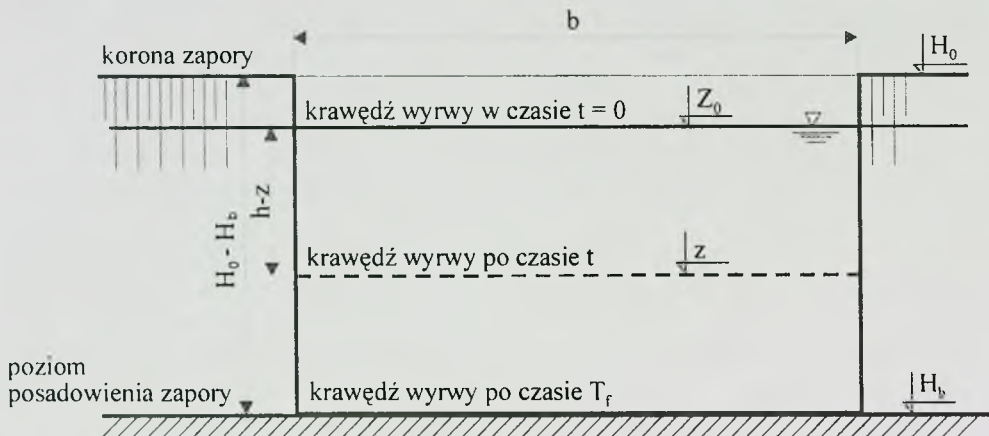
$h$  – rzędna zwierciadła wody w zbiorniku [ $m$ ],

$A_w$  – powierzchnia przekroju strumienia w wyrwie [ $m^2$ ],

$v$  – średnia prędkość przepływu wody w wyrwie [ $m/s$ ],

$t$  – czas [ $s$ ].





RYSUNEK 1. Schemat do obliczania czasu tworzenia się prostokątnej wyrwy w zaprze ziemnej  
 FIGURE 1. Idealized breach section for calculation of breach formulation time of earth dam

Średnią prędkość przepływu wody w wyrwie wyrażono jako prędkość wypływu wody przez niezatopiony otwór:

$$v = C_v (h - z)^a \quad (2)$$

gdzie:

$C_v$  – współczynnik prędkości zależny od kształtu wyrwy, którego wartość Singh i Quiroga przyjmują zmienną w granicach 1,2–1,7 [ $m^{1/2} \cdot s$ ],

$a$  – wykładnik równy 0,5,

$z$  – rzędna krawędzi wyrwy [m].

Prędkość obniżania się krawędzi wyrwy w czasie zdefiniowano jako proporcjonalną do średniej prędkości wypływu wody z wyrwy w potęgze  $n$  oraz stałego dla danego gruntu współczynnika proporcjonalności  $E_f$ , nazwanego dalej współczynnikiem erozyjności i uzależnionego od parametrów gruntu, z którego zbudowana jest zapora:

$$\frac{dz}{dt} = -E_f v^n \quad (3)$$

gdzie:

$E_f$  – współczynnik erozyjności,

$n$  – bezwymiarowy wykładnik, od którego zależą jednostki  $E_f$ .

Założenie to jest stosunkowo proste, aczkolwiek poprawne, ponieważ erozja wyrwy jest zależna od naprężeń stycznych i w konsekwencji do średniej prędkości przepływu w wyrwie. Z wyprowadzonych w ten sposób zależności określić można położenie dolnej krawędzi wyrwy w trakcie opróżniania zbiornika i całkowity czas tworzenia się wyrwy.

W celu określenia jednoznacznego rozwiązania problemu określono warunki początkowe:

$$h(0) = H_0, z(0) = Z_0 \quad (4)$$

$H_0$  – rzędna zwierciadła wody w zbiorniku w chwili awarii [m],

$Z_0$  – początkowa rzędna spodu wyrwy [m].

Wprowadzono zależności normalizacyjne określone równaniami (5), (6), (7):

$$h' = \frac{h - H_b}{H_0 - H_b} \quad (5)$$

gdzie:  $h'$  – bezwymiarowa rzędna zwierciadła wody w zbiorniku,  $H_b$  – rzędna posadowienia zapory [m]; dla  $h = H_0$ , wartość bezwymiarowej rzędnej jest równa  $h' = 1$ , a dla  $h = H_b$  jest odpowiednio równa  $h' = 0$ ;

$$z' = \frac{z - H_b}{Z_0 - H_b} \quad (6)$$

gdzie:  $z'$  – bezwymiarowa rzędna spodu wyrwy; dla  $z = Z_0$  ta bezwymiarowa rzędna przyjmuje wartość  $z' = 1$ , a dla  $z = H_b$  wartość  $z' = 0$ ;

$$t' = \frac{t}{T_f} \quad (7)$$

gdzie:  $t'$  – bezwymiarowa wielkość reprezentująca czas,  $T_f$  – całkowity czas tworzenia się wyrwy liczony od chwili zaistnienia wypływu przez wyrwę do osiągnięcia rzędnej podłoża zapory przez krawędź wyrwy [s]; dla  $t = 0$ , wartość  $t' = 0$ , a dla  $t = T_f$ , bezwymiarowa wartość  $t' = 1$ .

Wartości rzędnych  $H_0$ ,  $Z_0$  i  $H_b$  stanowią znane dane wysokościowe zapory. Jak pokazano poniżej, możliwe jest wyprowadzenie zależności dla  $T_f$  na podstawie zdefiniowanych ilorazów bezwymiarowych. Najpierw podano ogólną metodę otrzymania bezwymiarowego analitycznego rozwiązania procesu erozji wyrwy w zaporze ziemnej. Następnie podano szczegółowe rozwiązania. W czasie analiz przyjęto, że  $A_s$  w równaniu (1) pozostaje stałe i wykładnik  $a = 0,5$ . Założenie to oznacza niezmiennosć pola przekroju zbiornika wraz z głębokością i obliczanie średniej

prędkości przepływu w wyrwie jak dla wypływu przez mały niezatopiony otwór.

Pole przekroju strumienia w prostokątnej wyrwie oblicza się z zależności:

$$A_w = b(h - z) \quad (8)$$

gdzie  $b$  – szerokość wyrwy [m].

Wprowadzając równania (8) i (2) do równania (1), otrzymano:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{bC_v}{A_s}(h - z)^{1,5} \quad (9)$$

Podstawiając  $v$  z równania (2) do równania (3), otrzymano:

$$\frac{dz}{dt} = -E_f C_v^n (h - z)^{0,5n} \quad (10)$$

W celu uogólnienia rozwiązania wyprowadzono wyrażenie, które wiąże  $h$  z  $z$ , a następnie wyrażenie uzależniające  $h$  od  $z$  i  $t$ . Dzieląc równanie (9) przez (10), otrzymuje się:

$$\frac{dh}{dz} = \frac{-\frac{bC_v}{A_s}(h - z)^{1,5}}{-E_f C_v^n (h - z)^{0,5n}}$$

skąd

$$\frac{dh}{dz} = \frac{b}{A_s E_f C_v^{n-1}} (h - z)^{(3-n)/2} \quad (11)$$

Wyznaczając  $h$  z równania (5) oraz  $z$  z równania (6), otrzymano:

$$h = h' (H_0 - H_b) + H_b$$

$$z = z' (Z_0 - H_b) + H_b$$

i podstawiając obie zależności do równania (11), tzn.

$$dh = (H_0 - H_b) dh'$$





$$dz = (Z_0 - H_b) dz'$$

uzyskano:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dz} &= \frac{(H_0 - H_b) dh'}{(Z_0 - H_b) dz'} = \\ &= \frac{b}{A_s E_f C_v^{n-1}} (h - z)^{(3-n)/2} = \\ &= \frac{b}{A_s E_f C_v^{n-1}} [(H_0 - H_b) h' - (Z_0 - H_b) z']^{(3-n)/2} \end{aligned} \quad (12)$$

Podstawiając dalej:

$$H = \left( \frac{b}{A_s E_f C_v^{n-1}} \right)^{\frac{2}{3-n}} (H_0 - H_b) \quad (13)$$

$$Z = \left( \frac{b}{A_s E_f C_v^{n-1}} \right)^{\frac{2}{3-n}} (Z_0 - H_b) \quad (14)$$

równanie (12) przekształcono do postaci:

$$\frac{dh'}{dz'} = \frac{Z}{H} (Hh' - Zz')^{(3-n)/2} \quad (15)$$

Najpierw zróżniczkowano wyrażenie w nawiasie  $(Hh' - Zz')$ , tzn.:

$$\frac{d}{dz'} (Hh' - Zz') = H \frac{dh'}{dz'} - Z$$

i z wyrażenia tego wyznaczono  $\frac{dh'}{dz'}$ ,

tzn.:

$$\frac{dh'}{dz'} = \frac{1}{H} \left[ \frac{d(Hh' - Zz')}{Z} \right] + Z \quad (16)$$

po czym porównano wyznaczoną w ten sposób wartość  $\frac{dh'}{dz'}$  z wartością

wyznaczoną z poprzedniego równania, tzn.:

$$\frac{Z}{H} (Hh' - Zz')^{(3-n)/2} = \frac{1}{H} \left[ \frac{d(Hh' - Zz')}{dz'} + Z \right]$$

Po przekształceniach otrzymano:

$$\int \frac{d(Hh' - Zz')}{(Hh' - Zz')^{(3-n)/2} - 1} = Z \int dz'$$

skąd po scałkowaniu uzyskano:

$$\int \frac{d(Hh' - Zz')}{(Hh' - Zz')^{(3-n)/2} - 1} = Zz' + K \quad (17)$$

Bezwymiarowe równanie (17) wiąże rzędną zwierciadła wody z rzędną krawędzi prostokątnej wyrwy. Równanie (17) jest zależne od dwóch parametrów  $H$  i  $Z$ . Oba parametry są bezwymiarowe i obliczane na podstawie znanych wielkości początkowych.

Podstawiając  $h$  wyznaczone z równania (5) oraz  $t$  wyznaczone z równania (7) do równania (9), otrzymano:

$$\frac{dh'}{dt'} = -\frac{T}{H} (Hh' - Zz')^{1,5} \quad (18)$$

gdzie:

$$T = \left( \frac{b}{A_s E_f C_v^{n-1}} \right)^{\frac{2-n}{3-n}} E_f C_v^n T_f \quad (19)$$



gdzie  $T$  jest bezwymiarowym parametrem. Dzieliąc równanie (18) przez (15), otrzymano:

$$\frac{dz'}{dt'} = -\frac{T}{Z} (Hh' - Zz')^{0,5n} \quad (20)$$

Odejmując równanie (20) od (18), otrzymano:

$$\int \frac{d(Hh' - Zz')}{(Hh' - Zz')^{1,5} - (Hh' - Zz')^{0,5n}} = -Tt' + K \quad (21)$$

Równanie (21) wiąże położenie zwierciadła wody w zbiorniku  $H$  z rzędną krawędzi prostokątnej wyrwy  $Z$ . Ponieważ wartość  $T$ , określana z równania (19), jest uzależniona od  $T_f$ , więc  $T$ , oblicza się z równania (21).

## Badania własne

Wykorzystując ogólne zależności podane przez Singha i Quiroga (1988) wyprowadzono wzory do obliczania czasu tworzenia się wyrwy  $T_f$  dla dwu wartości wykładnika, tzn.  $n = 2$  i  $n = 4$  (tab. 1). Natężenie wypływu przez prostokątną, wyrwę oblicza się ze wzoru:

$$Q = bC_v [h'' (H_0 - H_b)]^{1,5} \quad (36)$$

Singh i Quiroga (1988) do obliczeń hydrogramu wypływu przez wyrwę w zaporze wykorzystali przykładowe dane dla zapory Teton w stanie Idaho (USA), która uległa katastrofie 5 czerwca 1976 roku. W obliczeniach przyjęto:  $H_0 = 1615,96$  m,  $Z_0 = 1614,96$  m,  $H_b = 1538$  m,  $A_s = 8\,029\,162$  m<sup>2</sup>,  $C_v = 1,5$  m<sup>0,5</sup>/s, szerokość wyrwy  $b = 65$  m.

Obliczenia wykonano dla wartości wykładnika  $n = 2$ ,  $E_f = 0,00045$  oraz  $n = 4$  oraz  $E_f = 0,000045$ . Wartości parametru erozyjności  $E_f$  dobrano tak, aby uzyskać zgodność obliczonych maksymalnych natężeń wypływu przez wyrwę z obserwowanymi. Obliczone czasy rozmywania prostokątnej wyrwy i maksymalne natężenia przepływu były równe:

$n = 2$	$n = 4$
$T_f = 4766$ s	$T_f = 5081$ s
$Q = 59\,858$ m <sup>3</sup> /s	$Q = 65\,893$ m <sup>3</sup> /s

Na podstawie obserwacji katastrofy oszacowano maksymalne natężenie wypływu przez wyrwę, równe  $Q = 65\,000$  m<sup>3</sup>/s (Fread 1985). Z porównania widać, że obliczone wartości maksymalnego natężenia wypływu przez wyrwę są bardzo zbliżone do oszacowanej na podstawie obserwacji.

Na rysunku 2 pokazano prognozowane części hydrogramu wypływu przez wyrwę w zaporze Teton obliczone podanymi w tabeli 1 wzorami oraz dodatkowo z modelu opracowanego przez Freada (1985). Jak widać, wartość wykładnika  $n$  w omówionym rozwiązaniu wpływa na przebieg zmian położenia spodu wyrwy w czasie (rys. 3). Rozwiązanie Singha i Quiroga pozwala wyznaczyć jedynie wznoszącą się gałąź hydrogramu podczas opróżniania zbiornika przez wyrwę w zaporze w założeniu stałości powierzchni zbiornika ( $A_s$ ). Określenie całego hydrogramu wypływu przez wyrwę możliwe jest przy wykorzystaniu obliczonej zmienności rzędnej krawędzi wyrwy w czasie z zależności (24), (31) i rozwiązaniu równań niestabilnego przepływu w zbiorniku (rys. 3). Lewy warunek

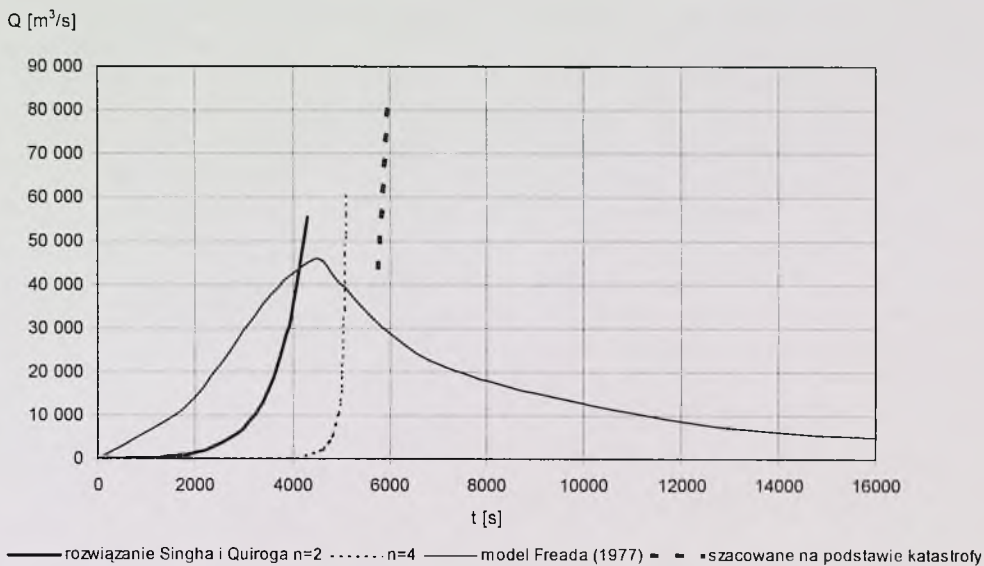


TABELA 1. Zestawienie równań do obliczania czasu tworzenia się wyrwy w zaporze ziemnej

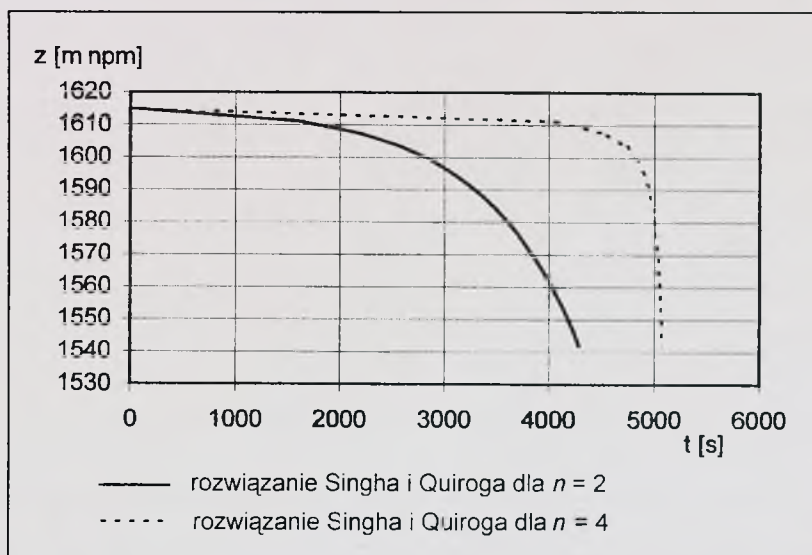
TABLE 1. Equations for calculation of breach formulation time of the earth dam

<p>Dla <math>n = 2</math> równanie (17) ma postać:</p> $\int \frac{d(Hh' - Zz')}{(Hh' - Zz')^{0.5} - 1} = Zz' + K \quad (22)$	<p>Dla <math>n = 4</math> równanie (17) ma postać:</p> $\int \frac{d(Hh' - Zz')}{(Hh' - Zz')^{-0.5} - 1} = Zz' + K \quad (29)$
<p>Skąd po scałkowaniu otrzymano:</p> $2 \left[ \sqrt{Hh' - Zz'} + \ln \left( \sqrt{Hh' - Zz'} - 1 \right) \right] = Zz' + K \quad (23)$	<p>Skąd po scałkowaniu otrzymano:</p> $- (Hh' - Zz') - 2\sqrt{Hh' - Zz'} - 2 \ln \left( 1 - \sqrt{Hh' - Zz'} \right) = Zz' + K \quad (30)$
<p>Z warunków początkowych dla <math>z' = 1, h' = 1</math> wyznaczono stałą <math>K</math>:</p> $2 \left[ \sqrt{H - Z} + \ln \left( \sqrt{H - Z} - 1 \right) \right] - Z = K$	<p>Z warunków początkowych dla <math>z' = 1, h' = 1</math> wyznaczono stałą <math>K</math>:</p> $K = -H + Z - 2\sqrt{H - Z} - 2 \ln \left( 1 - \sqrt{H - Z} \right) - Z$
<p>a następnie przekształcono równanie (22) do postaci:</p> $z' = 1 + \frac{2}{Z} \left[ \sqrt{Hh' - Zz'} - \sqrt{H - Z} + \ln \frac{\sqrt{Hh' - Zz'} - 1}{\sqrt{H - Z} - 1} \right] \quad (24)$	<p>a następnie przekształcono równanie (29) do postaci:</p> $H - Hh' + 2 \left( \sqrt{Hh' - z} - \sqrt{Hh' - Zz'} \right) + 2 \ln \left( 1 - \sqrt{H - Z} \right) - 2 \ln \left( 1 - \sqrt{Hh' - Zz'} \right) = 0 \quad (31)$
<p>Ponieważ <math>h'</math> jest zdefiniowane w funkcji <math>z'</math>, więc należy uzależnić <math>h' - z'</math> od <math>t'</math>. W tym celu korzysta się z równania (21):</p> $\int \frac{d(Hh' - Zz')}{(Hh' - Zz')^{1.5} - (Hh' - Zz')} = -Tt' + K \quad (25)$	<p>Ponieważ <math>h'</math> jest zdefiniowane w funkcji <math>z'</math>, więc należy uzależnić <math>h' - z'</math> od <math>t'</math>. W tym celu korzysta się z równania (21):</p> $\int \frac{d(Hh' - Zz')}{(Hh' - Zz')^{1.5} - (Hh' - Zz')^2} = -Tt' + K \quad (32)$
<p>Po obliczeniu całki otrzymano:</p> $2 \ln \frac{\sqrt{Hh' - Zz'}}{\sqrt{Hh' - Zz'} - 1} = -Tt' + K \quad (26)$	<p>Po obliczeniu całki otrzymano:</p> $-\frac{2}{\sqrt{Hh' - Zz'}} - 2 \ln \left( \frac{1}{\sqrt{Hh' - Zz'}} - 1 \right) = -Tt' + K \quad (33)$
<p>Czas <math>T</math> oblicza się z równania (26) przy <math>t' = 1</math> i <math>z' = 0</math> i przyjęciu <math>h' = h''</math>, gdzie <math>h''</math> wyznacza się z równania (24):</p> $T = 2 \ln \frac{1 - 1/\sqrt{H - Z}}{1 - 1/\sqrt{Hh''}} \quad (27)$	<p>Czas <math>T</math> oblicza się z równania (33) przy <math>t' = 1</math> i <math>z' = 0</math> i przyjęciu <math>h' = h''</math>, gdzie <math>h''</math> wyznacza się z równania (31):</p> $T = \frac{2}{\sqrt{Hh''}} + 2 \ln \left( \frac{1}{\sqrt{Hh''}} - 1 \right) - \frac{2}{\sqrt{H - Z}} - 2 \ln \left( \frac{1}{\sqrt{H - Z}} - 1 \right) \quad (34)$
<p>Czas powstawania wyrwy oblicza się z równania (19) przy <math>n = 2</math>:</p> $T_f = \frac{T}{E_f C_v^2} \quad (28)$	<p>Czas powstawania wyrwy oblicza się z równania (19) przy <math>n = 4</math>:</p> $T_f = \frac{TA^2 E_f C_v^2}{b^2} \quad (35)$





RYSUNEK 2. Prognozowany i oszacowany hydrogram wypływu przez wyrwę w zaporze Teton  
 FIGURE 2. Predicted and observed breach outflow hydrographs for the Teton Dam

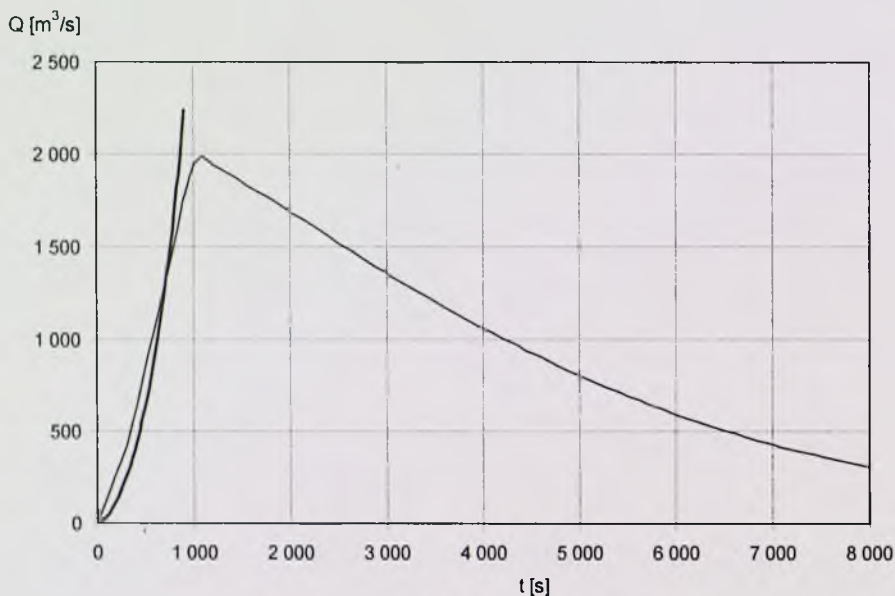


RYSUNEK 3. Zmiany rzędnej wyrwy w czasie w zaporze Teton obliczone dla różnych wartości  $n$   
 FIGURE 3. Relation between breach bottom elevation and time for the Teton Dam, for different values of  $n$



brzegowy rozwiązania równań ruchu stanowi hydrogram dopływu do zbiornika, zaś prawy warunek – równanie przepływu przez przelew o szerokiej koronie. Nie wykonano takich obliczeń dla zapory Teton, gdyż nie dysponowano przekrojami poprzecznymi tego zbiornika. W związku z tym wykonano je dla zbiornika, dla którego posiadano niezbędne dane. Zbiornik opisano 8 przekrojami poprzecznymi. W obszarze

zbiornika rozwiązywano jednowymiarowe równania nieustalonego przepływu. Otrzymany hydrogram wypływu ze zbiornika dla wyrwy o szerokości  $b = 75,5$  m pokazano na rysunku 4. W obliczeniach przyjęto:  $H_0 = 160,5$  m,  $Z_0 = 158,5$  m,  $H_b = 152,5$  m,  $A_s = 5\,000\,000$  m<sup>2</sup>,  $C_v = 1,5$  m<sup>0.5</sup>/s. Obliczenia wykonano dla wartości wykładnika  $n = 2$  i  $E_f = 0,00045$ .



— rozwiązanie równań nieustalonego przepływu w zbiorniku — rozwiązanie Singa i Quiroga dla  $n=2$

RYSUNEK 4. Hydrogram wypływu przez wyrwę w zaprze obliczony na podstawie rozwiązania nieustalonego przepływu w zbiorniku oraz obniżania się krawędzi wyrwy z rozwiązania Singha i Quiroga

FIGURE 4. The predicted hydrograph for dam breach outflow obtained from the unsteady flow solution in reservoir and breach bottom elevation calculated after Singh and Quiroga method



## Podsumowanie

Stosunkowo proste rozwiązanie procesu rozmywania wyrwy w zaporze ziemnej powstałej wskutek przelania się wody nad koroną podane przez Singha i Quiroga pozwala obliczać czas rozmywania prostokątnej wyrwy, zmianę położenia krawędzi wyrwy w czasie i natężenie wypływu przez wyrwę. Porównanie wyników obliczeń natężenia wypływu z wartościami szacowanymi na podstawie obserwacji i uzyskanymi ze złożonego modelu zbudowanego przez Freada (1985) potwierdza wysoką zbieżność obliczanych wartości. Wykorzystano uzyskane z obliczeń wyprowadzonymi wzorami informacje o zmienności położenia wyrwy w czasie do obliczania wypływu przez wyrwę w założeniu nieustalonego przepływu wody w zbiorniku. Uzyskany z obliczeń hydrogram opróżniania zbiornika wskutek powstania wyrwy może być z powodzeniem stosowany do analiz hydraulicznych warunków przejścia fali powodziowej w dolinie poniżej zapory.

## Literatura

- BENOIST G. 1983: Calcul de l'érosion d'une digue par surverse. Département laboratoire national d'hydraulique, Chatou.
- BROWN R.J., ROGERS D.C. 1977: A simulation of the hydraulics events during and following the Teton Dam failure. Proc. Dam-Break Flood Routing Model Workshop, Md.
- BROWN R.J., ROGERS D.C. 1981: User manual for program Brdam. Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, Denver.
- CRISTOFANO E.A. 1973: Method of computing erosion rate for failure of dams. Unpublished preliminary report to United

- States Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- FREAD D.L. 1977: The development and testing of a dam-break flood forecasting model. Proc. of Dam-Break Flood Routing Model Workshop, US Department of Commerce, National Technical Information Service.
- FRAED D.L. 1984: DAMBRK, The NWS dam-break flood forecasting model. National Weather Service, Maryland.
- FREAD D.L. 1985: BREACH, An erosion model for earthen dam failures. NWS Report, Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring.
- KUBRAK J. 1989: Modele numeryczne rozprzestrzeniania się fali wypływającej przez wyrwę w zaporze. *Rozprawy Naukowe i Monografie SGGW* 95: 152.
- LOU W.C. 1981: Mathematical modeling of earth dam breaches. Thesis presented to Colorado State Univ., at Fort Collins, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- PONCE V.M., TSIVOGLOU A.J. 1981: Modeling gradual dam breaches. *J. Hydraulic Division* 107: 7.
- SINGH V.P., QUIROGA A.C. 1988: Dimensional analytical solutions for dam-break erosion. *J. Hydraulic Research* 2.
- SINGH V.P., SCARLATOS P.D. 1988: Analysis of gradual earth-dam failure. *J. Hydraulic Engineering* 114, 1.

## Summary

**Singh and Quiroga model application for prediction of hydrograph for earth dam rectangular breach outflow.** The earth dams breach erosion is analyzed using dimensionless analytical solutions for rectangular breach given by Singh and Quiroga (1988). Data for the historical failure of Teton Dam are used to test these solutions. The calculated changes of breach bottom elevation with time are used for prediction breach outflow hydrograph. The one-dimensional unsteady flow model in reservoir was applied for prediction breach outflow hydrograph.



**Authors' addresses:**

Janusz Kubrak  
Warsaw Agricultural University  
Department of Hydraulic Engineering  
And Environmental Recultivation  
Nowoursynowska 166  
02-787 Warszawa  
Poland

Michał Szydlowski  
Technical University of Gdańsk  
Department of Hydraulics Hydrology  
ul. Narutowicza 11/12  
80-950 Gdańsk  
Poland