



## **MODELOWANIE WYPŁYWU WODY PRZEZ HIPOTETYCZNA WYRWE W ZAPORZE ZBIORNIKA RZYMÓWKA**

***Paweł Bobrowski<sup>1</sup>, Piotr Trybuś<sup>1</sup>, Robert Kasperek<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup>Water Service Sp. z o.o. Wrocław, <sup>2</sup>Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

## **MODELLING OF WATER OUTLET THROUGH HYPOTHETICAL DAM BREAK IN DAM OF THE RZYMÓWKA RESERVOIR**

### ***Streszczenie***

Praca dotyczy analizy wypływu wody przez hipotetyczną wyrwę w zaporze suchego zbiornika „Rzymówka” na rzece Kaczawie, który obecnie jest na etapie projektowania. Przeanalizowano dwa warianty rozmycia korpusu zapory: przelanie się wody przez koronę (wariant 1) oraz przebicie hydrauliczne (wariant 2). W modelowaniu uwzględniono różne parametry naruszenia w oparciu o metody parametryczne. Z symulacji wynika, że w przypadku przelania się wody przez koronę powstanie wyrwa o szerokości rzędu 74-78 m, a czas trwania rozmycia będzie w zakresie 0,8-2,1 godz. Natomiast, gdyby wyrwa utworzyła się na skutek przebicia hydraulicznego, jej szerokość wynosiłaby 75 m. Wielkość odpływu wody przez wyrwę oszacowano na poziomie 2337-2597 m<sup>3</sup>/s dla wariantu 1 oraz 1590-2492 m<sup>3</sup>/s dla wariantu 2.

**Słowa kluczowe:** rzeka, suchy zbiornik, wyrwa w zaporze, modelowanie numeryczne

### ***Summary***

*The work concerns analyses of the water outlet through the hypothetical dam break in the dam of the dry reservoir „Rzymówka” on the river Kaczawa, which is currently in the project. One analysed two*

*variants of dam erosion: overflowing water through the dam crest (variant 1) and hydraulic piping (variant 2). In the modeling one took into account different breach parameters based on parametric methods. The results of numerical simulation shows, that in case of the overflowing water through the dam crest will arise the dam break about width 74-78 m, and the duration of washing will be 0,8-2,1 h. However, if the dam break will be created as the result of the hydraulic piping, width would carry out 75 m. Magnitude of the water outflow through the gap has estimated on level 2337-2597 m<sup>3</sup>/s for variant 1 and 1590-2492 m<sup>3</sup>/s for variant 2.*

**Key words:** river, dry reservoir, dam break, numerical modeling

## WPROWADZENIE

Podstawową regulacją opisującą klasy budowli hydrotechnicznej jest załącznik 2 do Rozporządzenia Ministra Środowiska (2007). Precyzuje on sposób klasyfikacji zbiorników okresowo piętrzących wodę, ze względu na skutki ewentualnej katastrofy. Zgodnie z tym Rozporządzeniem, dla budowli hydrotechnicznej o wysokości piętrzenia przekraczającej 2,0 m lub tworzącej pojemność większą niż 0,2 mln m<sup>3</sup> wody, określa się przebieg i zasięg fali wezbraniowej wywołanej jej zniszczeniem lub uszkodzeniem. Wynika z tego, że niezbędną czynnością na etapie klasyfikacji budowli piętrzącej jest sporządzenie map maksymalnych zasięgów stref zalewowych będących skutkiem ewentualnej katastrofy zapory.

Prognozowanie skutków katastrofy zapory suchego zbiornika przeciwpowodziowego, np. skutek powstania wyrwy, stanowi bardzo ważny element podczas oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (Dyrektywa 2007/60/WE). Dotyczy to zarówno map zagrożenia powodziowego, map ryzyka powodziowego, jak i planów zarządzania ryzykiem powodziowym, których termin wykonania przypada na grudzień 2015 r. Na podstawie map maksymalnych zasięgów stref zalewowych ocenia się skutki hipotetycznej katastrofy: uwzględniając liczbę ludności zamieszkałą na zatopionym obszarze, powierzchnię zatopioną przez falę, znaczenie zalanych terenów (zabytki, zakłady przemysłowe o podstawowym znaczeniu dla gospodarki itp.). Decydujący wpływ na skutki propagacji fali poniżej rozmytej zapory ma hydrogram wypływu wody przez wyrwę.

Główną przyczyną awarii i katastrof zapór ziemnych i narzutowych jest przelanie się wody przez koronę budowli piętrzącej (31% przypadków jako przyczyna główna, 18% przypadków jako przyczyna dodatkowa). Sufozja korpusu zapory była główną przyczyną dla 15% przypadków, a dla 13% jako przyczyna dodatkowa. Sufozja podłoża była główną przyczyną dla 12% przypadków

i jako dodatkowa dla 5% (Fiedler i in. 2007; Dewey and Gillette 1993; Piórecki 1986; Radoń i Piórecki 2011, Runkiewicz 2011; Zaleski 2011).

Przeanalizowano stan techniczny zapory zbiornika Niedów na rzece Witka po powodzi i jej katastrofie w 2010 roku przeprowadzili m.in. Rędownicz, Machajski, Batog, Szulgan (2010; 2012a). Funkcją tego zbiornika jest zaopatrywanie w wodę elektrowni Turów i miasta Bogatynia. Przedstawili oni m.in. skutki rozmycia zapory ziemnej wskutek przelania się wody ponad jej koronę, po przejściu przez zbiornik fali powodziowej o ekstremalnej wielkości rzędu 30 hm<sup>3</sup>. Bezpośrednią przyczyną zdarzenia były obfite opady atmosferyczne. Przedstawiono również koncepcję odbudowy tego stopnia (Rędownicz i in. 2012b).

Przelanie się wody przez koronę zapory i przebicie hydrauliczne powodują jej stopniową erozję. Proces ten trwa aż do całkowitego opróżnienia zbiornika. Prędkość rozmywania korpusu zapory, kształt i początkowe wymiary wyrwy są wartościami nieznanymi. Zależą one przede wszystkim od wysokości zapory, pojemności zbiornika, kąta tarcia oraz spójności gruntu tworzącego korpus zapory, rodzaju zastosowanych ubezpieczeń skarpy odwodnej i odpowietrznej (Kubrak i Szydłowski 2003 i 2004; Zhou i Donnelly 2005; Morris i Galland 2000).

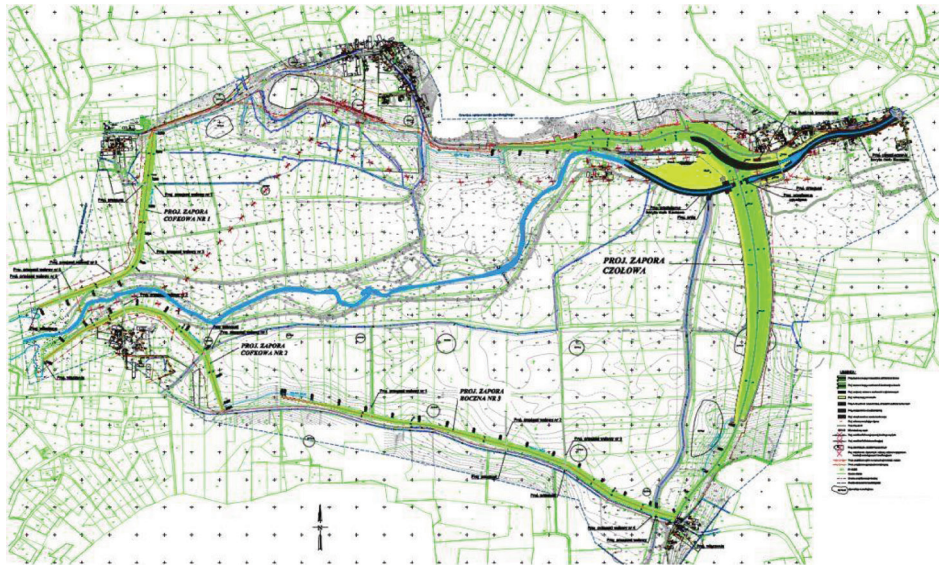
W niniejszej pracy wykonano obliczenia parametrów naruszenia korpusu zapory w oparciu o wzory empiryczne. Uwzględniono dwa warianty powstania wyrwy w zaporze: przelanie się wody przez koronę (wariant 1) oraz przebicie hydrauliczne w korpusie (wariant 2). Uzyskane wyniki parametrów naruszenia tzn. szerokość wyrwy i czas jej formowania, posłużyły do obliczeń numerycznych hydrogramów wypływu przez wyrwę wykonanych za pomocą programu HEC-RAS. W celu oceny uzyskanych wyników, obliczone numerycznie maksymalne przepływy przez wyrwę porównano z maksymalnymi przepływami obliczonymi z zależności prognostycznych.

## **CHARAKTERYSTYKA ZBIORNIKA**

Projektowany suchy zbiornik przeciwpowodziowy położony jest w gminie Złotoryja na terenie pogórza Kaczawskiego, w dolinie rzeki Kaczawy. Zapora czołowa usytuowana jest bezpośrednio powyżej miejscowości Rzymówka. Zamyka ona płaskodenną dolinę Kaczawy stanowiącą czaszę zbiornika w zakresie rzędnych 156,00 ÷ 167,00 m n.p.m. Zbiornik „Rzymówka” jest obiektem I klasy (Trybuś i in. 2014) i obok zbiornika Słup na rzece Nysa Szalona jest jednym z podstawowych elementów biernej ochrony przeciwpowodziowej miasta Legnica (Wujek i in. 2007).

Korpus zapory zlokalizowano w km 42,4 rzeki Kaczawy. Koronę zapory projektuje się na rzędnej 167,40 m n.p.m. Szerokość korony przyjęto równą

6,0m. Zapora będzie miała nachylenie skarpy odpowietrznej i odwodnej 1:3. Długość zapory w osi korony wynosi 843 m (Bobrowski i in. 2015).



**Rysunek 1.** Mapa z projektowanym suchym zbiornikiem przeciwpowodziowym „Rzymówka” (Trybuś P., Bobrowski P., Szymanowski Z., 2014)

**Figure 1.** Map of the proposed dry reservoir flood „Rzymówka” (Trybuś P., Bobrowski P., Szymanowski Z., 2014)

## OKREŚLENIE PARAMETRÓW NARUSZENIA KORPUSU ZAPORY

Decydujący wpływ na kształt hydrogramu wypływu wody przez wyrwę ma kształt i prędkość jej tworzenia. Mając na uwadze fakt, iż przyjęcie parametrów naruszenia ma decydujący wpływ na uzyskane hydrogramy wypływu wody przez wyrwę, zdecydowano się na ich określenie za pomocą powszechnie stosowanych formuł empirycznych. Na podstawie analizy dotychczasowych awarii zapór ziemnych, obliczono zależności statystyczne opisujące parametry naruszenia w funkcji m.in. wysokości zapory, pojemności zbiornika, nachylenia skarp i przyczyn powstania awarii (Using HEC-RAS 2014). W tym celu wykorzystano formułę wg MacDonald and Langridge-Monopolis (MLM) (MacDonald i Langridge-Monopolis 1984), wg Von Thun i Gillette oraz wg Froehlich.

Formuła MLM ma postać:

$$V_{er} = 0.0261(V_w h_w)^{0.769} \quad (1)$$

gdzie:  $h_w$  – wzniesienie zwierciadła wody nad poziomem posadowienia w chwili awarii (m),  $V_w$  – objętość wody zgromadzonej w zbiorniku w chwili awarii ( $m^3$ )

Na podstawie objętości wyerodowanego materiału z zapory  $V_{er}$  ( $m^3$ ) oraz pola powierzchni przekroju  $A$  ( $m^2$ ) korpusu zapory w miejscu wyrwy określono szerokość wyrwy  $B$  (m) i czas trwania rozmycia zapory  $t_f$  (h):

$$B = V_{er} / A \quad (2)$$

$$t_f = 0.0179 V_{er}^{0.364} \quad (3)$$

Formuła Von Thuna i Gilletta została wyprowadzona na podstawie badań z 57 katastrof, przy czym 75% analizowanych katastrof zdarzyło się na zaporach o wysokości do 15 m (Using HEC-RAS 2014):

$$B = 2.5 h_w + C \quad (4)$$

gdzie:  $C$  – parametr określany w funkcji pojemności zbiornika

W przypadku, gdy zaporą jest podatna na erozję czas rozmycia wynosi  $t_f = 0.015 h_w$ , a gdy jest odporna na erozję to  $t_f = 0.02 h_w + 0.25$ .

Froehlich wyprowadził wzory na określenie parametrów naruszenia na podstawie danych z 63 katastrof zapór, z których 76% miały pojemność zbiornika poniżej 15 mln  $m^3$  (Using HEC-RAS 2014). Formuła Froehlicha zawiera współczynniki określające przyczyny powstania katastrofy wskutek przelania przez koronę i przebicia hydraulicznego:

$$B = 0.1803 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.19} \quad (5)$$

$$t_f = 0.00254 V_w^{0.55} h_b^{-0.90} \quad (6)$$

gdzie:  $K_o$  – współczynnik, w przypadku przelania się wody przez koronę przelewu  $K_o = 1.4$ , a w przypadku przebicia hydraulicznego  $K_o = 1.0$ ,  $h_b$  – wysokość zapory (m)

Nachylenie skarp wyrwy –  $Z/B$  (-) przyjęto wg (Radoń, Piórecki 2011):

- wg MacDonald and Langridge-Monopolis (MLM)  $Z/B = 0.5$  (dla wariantu W1)
- wg Von Thun i Gillette  $Z/B = 0.33$  (dla wariantu W1)
- wg Froehlich  $Z/B = 0,9$  (dla wariantu W2)

Dla przyjętej I klasy zbiornika „Rzymówka” o następujących danych: przepływ kontrolny  $Q_k = 349 m^3/s$ ; pojemność zbiornika w czasie awarii  $V = 12,5$  mln  $m^3$ ; wysokość zapory  $H = 167,40$  m n.p.m.; wysokość zwierciadła wody w czasie awarii  $H_{max} = 166,33$  m n.p.m. określono następujące parametry naruszenia (tabela 1 i 2).

**Tabela 1.** Parametry naruszenia w przypadku przelania się wody przez koronę zapory Rzymówka

**Table 1.** Parameters for breach in case overtopping through Rzymówka dam

Metoda/Method	(m)	(h)	Z:B
MLM	$B_{bot} = 75$	0.86	0
Von Thun	$B_{avg} = 78$	2.1	0
Froehlich	$B_{avg} = 74$	1.78	0

**Tabela 2.** Parametry naruszenia dla przebicia hydraulicznego zapory Rzymówka

**Table 2.** Parameters for breach in case piping of Rzymówka dam

Metoda	(m)	(m)	(h)	Z: $B_{bot}$
MLM	$B_{bot} = 75$	$B_{avg} = 80$	0.86	0.5
Von Thun	$B_{bot} = 75$	$B_{avg} = 78$	2.1	0.33
Froehlich	$B_{bot} = 44$	$B_{avg} = 53$	1.78	0.9

gdzie:  $B_{bot}$  – szerokość wyrwy w dnie (m);  $B_{avg}$  – szerokość wyrwy w połowie jej wysokości (m),  
Z/B – nachylenie ścian bocznych wyrwy (-).

## NUMERYCZNE SYMULACJE HYDROGRAMU WYPŁYWU WODY PRZEZ WYRWE

W celu obliczenia hydrogramu wypływu wody przez wyrwę zapory Rzymówka zastosowano oprogramowanie HEC-RAS. W przypadku obliczania przepływów niestabilnych program stosuje równania St. Venanta w postaci:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_b \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (8)$$

gdzie: Q-natężenie przepływu wody ( $m^3/s$ ), A-pole powierzchni przekroju czynnego ( $m^2$ ), x-współrzędna zgodna z kierunkiem przepływu wody (m), t-czas (s),  $S_f$  – spadek hydrauliczny (-).

Podstawowe obliczenia polegają na rozwiązaniu jednowymiarowego równania energii strumienia. Straty energii są uwzględnione w szorstkości (formuła Manninga) i dławieniu (odpowiedni współczynnik kontrakcji mnożony przez zmianę wysokości energii). W miejscach, gdzie mamy do czynienia z ruchem szybkozmiennym, do obliczeń używa się równania zachowania pędu i równania ciągłości. Do budowy modelu w HEC-RAS wykorzystano przekroje dolinowe rzeki Kaczawy na jej 23-kilometrowym odcinku (km 25-48). W przekroju za-

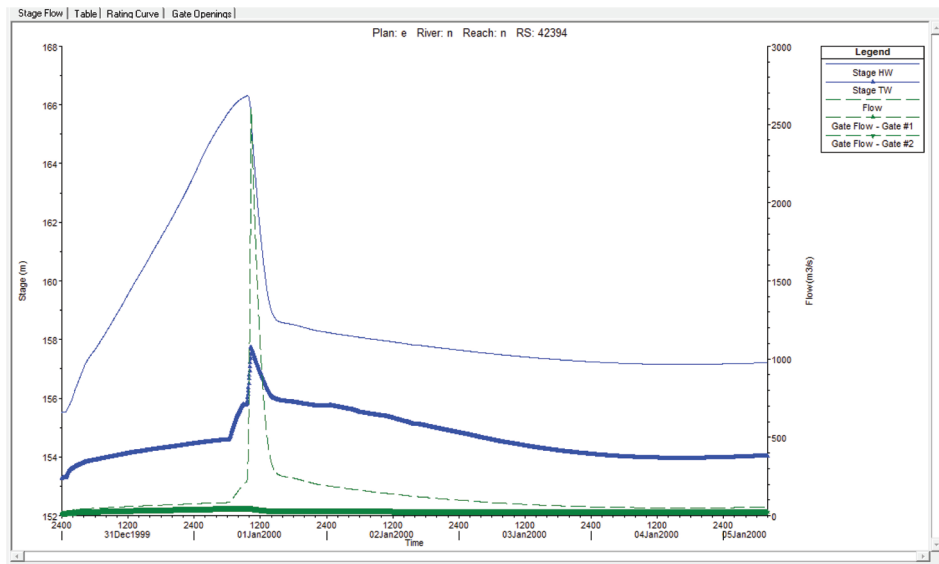
pory km 42,394 zamodelowano urządzenia zrzutowe w postaci przelewu powierzchniowego oraz spustów. Przyjęto następujące założenia:

- początek katastrofy rozpoczyna się w momencie osiągnięcia w zbiorniku maksymalnego poziomu zwierciadła wody,
- prędkość rozmycia zapory jest jednakowa przez cały czas trwania rozmycia zapory.

Dzięki wbudowanemu w HEC-RAS modułowi do obliczeń katastrof zapór możliwe jest wprowadzanie danych dotyczących parametrów naruszenia: szerokość wyrwy w podstawie, końcowa rzędna rozmycia, nachylenia skarp wyrwy, współczynnik wydatku wody przez wyrwę, czas trwania rozmycia. Obliczenia hydrogramu wypływu w programie HEC-RAS wykonano dla przypadku przebicia hydraulicznego (wariant 1-rys. 1, 2, 3 i tab. 3) jak i przelania przez koronę zapory (wariant 2-rys. 4, 5, 6 i tab. 4).

### Wariant 1 – przelanie się wody przez koronę zapory Rzymówka

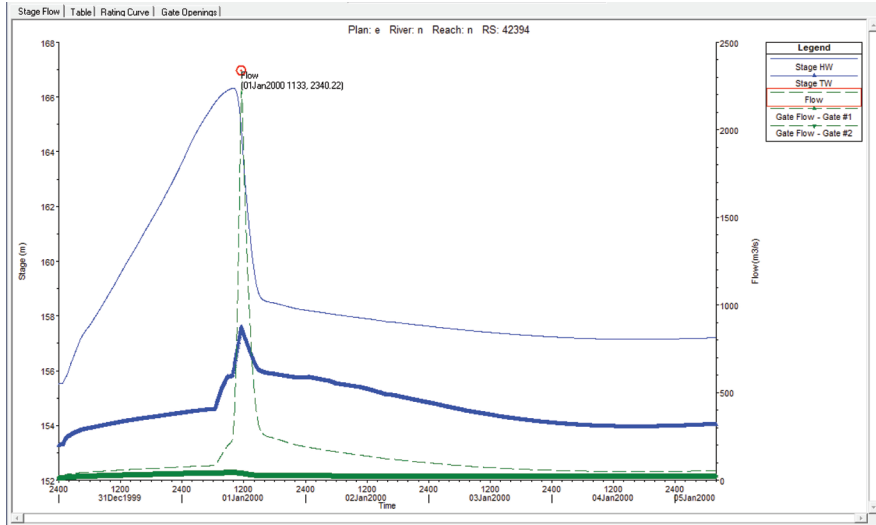
Poszczególne linie na poniższych rysunkach oznaczają: gruba zielona linia to wydatek spustów, cienka zielona przerywana linia to łączny przepływ przez zaporę, gruba niebieska górna linia to poziom wody na stanowisku dolnym, cienka ciągła niebieska linia to poziom wody na stanowisku górnym. Parametry naruszenia wg MLM (tab. 1) wynoszą:  $B_{\text{bot}} = 75 \text{ m}$  i  $T = 0,86 \text{ h}$ .



Rysunek 1. Hydrogram wypływu wody ze zbiornika  $Q_{\text{max}} = 2597 \text{ m}^3/\text{s}$

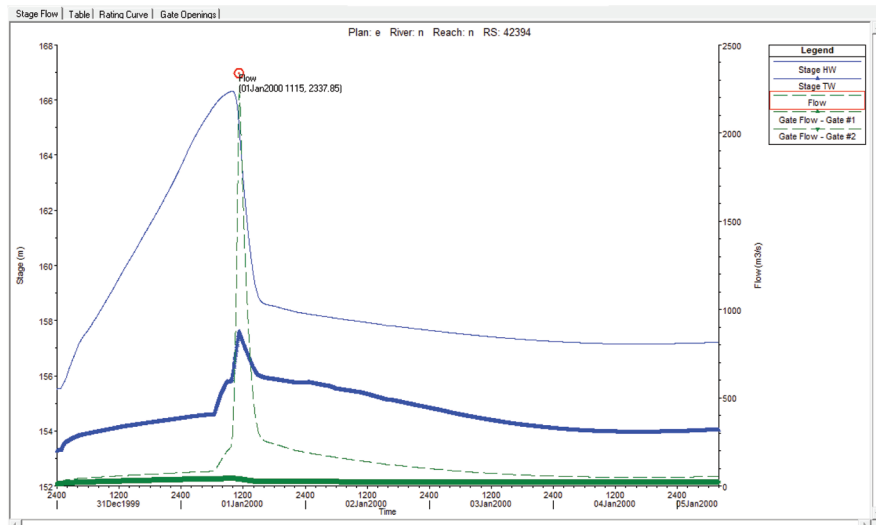
Figure 1. Out flow hydrograph  $Q_{\text{max}} = 2597 \text{ m}^3/\text{s}$

Parametry naruszenia wg Von Thuna (tab. 1) wynoszą:  $B_{ave} = 78 \text{ m}$  i  $T = 2,10 \text{ h}$ .



**Rysunek 2.** Hydrogram wypływu wody ze zbiornika  $Q_{max} = 2340 \text{ m}^3/\text{s}$   
**Figure 2.** Out flow hydrograph  $Q_{max} = 2340 \text{ m}^3/\text{s}$

Parametry naruszenia wg Froehlich'a (tab. 1) wynoszą:  $B_{ave} = 74 \text{ m}$  i  $T = 1,78 \text{ h}$ .

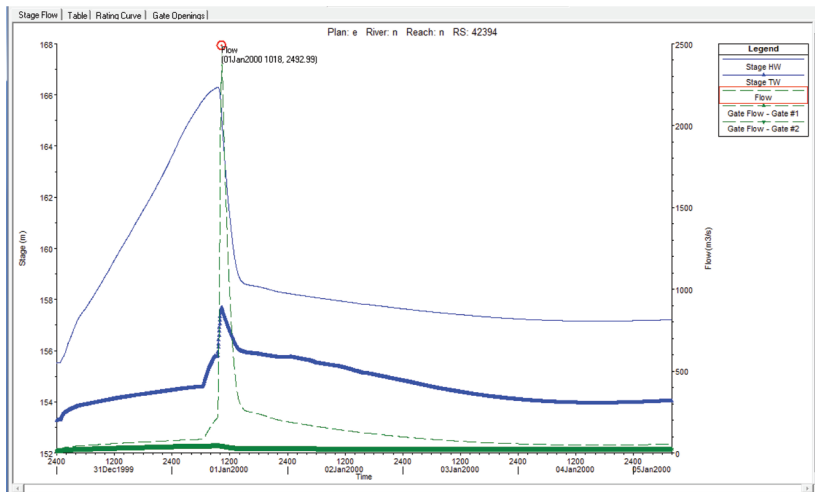


**Rysunek 3.** Hydrogram wypływu wody ze zbiornika  $Q_{max} = 2337 \text{ (m}^3/\text{s)}$   
**Figure 3.** Out flow hydrograph  $Q_{max} = 2337 \text{ (m}^3/\text{s)}$



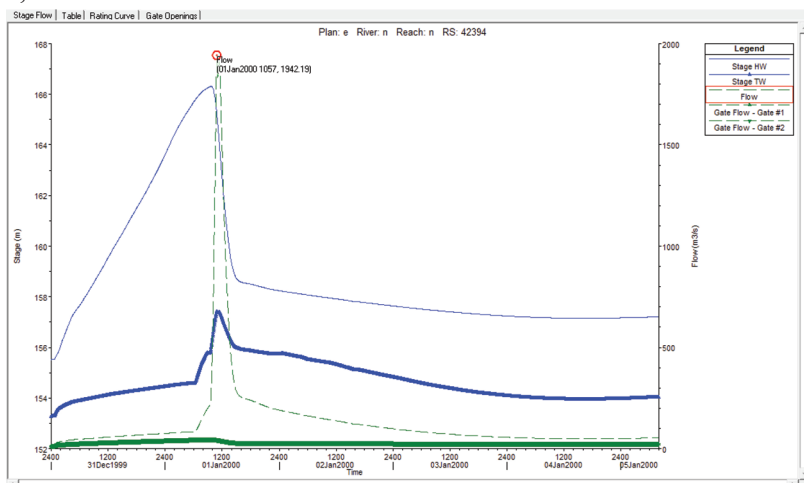
## Wariant 2 – przebiecie hydrauliczne w zaporze Rzymówka

Parametry naruszenia wg MLM (tab. 2) wynoszą:  $B_{avg} = 80$  m;  $B_{bot} = 75$  m;  
 $T = 0,85$ h



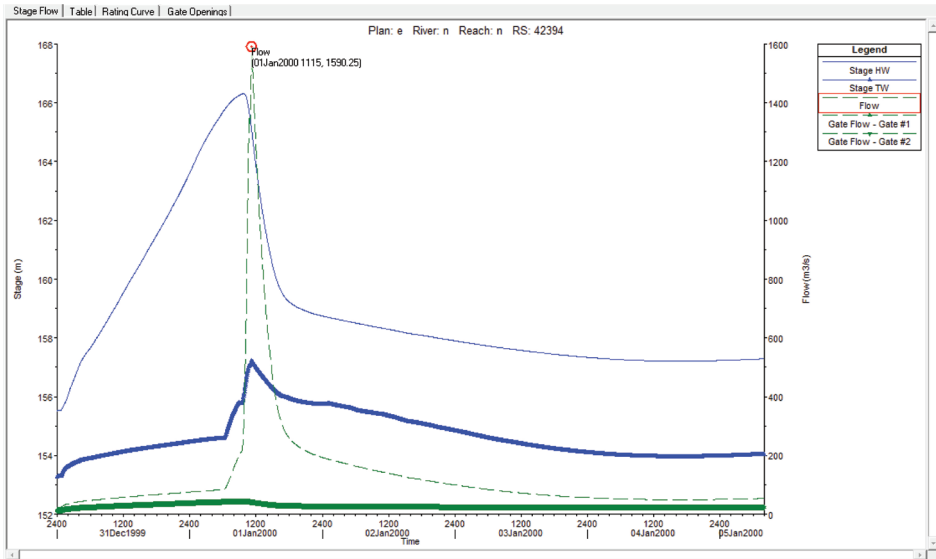
**Rysunek 4.** Hydrogram wypływu wody ze zbiornika  $Q_{max} = 2492$  m<sup>3</sup>/s  
**Figure 4.** Out flow hydrograph  $Q_{max} = 2492$  m<sup>3</sup>/s

Parametry naruszenia wg Von Thuna (tab. 2) wynoszą:  $B_{ave} = 78$  m,  $B_{bot} = 75$  m  
 i  $T = 2,1$  h.



**Rysunek 5.** Hydrogram wypływu wody ze zbiornika  $Q_{max} = 1942$  m<sup>3</sup>/s  
**Figure 5.** Out flow hydrograph  $Q_{max} = 1942$  (m<sup>3</sup>/s)

Parametry naruszenia wg Froehlicha (tab. 2) wynoszą:  $B_{avg} = 53\text{m}$ ,  $B_{bot} = 44\text{ m}$  i  $T = 1,78\text{ h}$ .



**Rysunek 6.** Hydrogram wypływu wody ze zbiornika  $Q_{max} = 1590\text{ (m}^3/\text{s)}$

**Figure 6.** Out flow hydrograph  $Q_{max} = 1590\text{ (m}^3/\text{s)}$

**Tabela 3.** Wyniki obliczeń przepływu wody przez wyrwę– wariant 1

**Table 3.** Calculation results of water flow through gap– variant 1

Metoda	(m)	(h)	Z:B	Q (m <sup>3</sup> /s)
MLM	$B_{bot} = 75$	$t = 0.86$	0	2597
Von Thun	$B_{avg} = 78$	$t = 2.1$	0	2340
Froehlicha	$B_{avg} = 74$	$t = 1.78$	0	2337

**Tabela 4.** Wyniki obliczeń przepływu wody przez wyrwę– wariant 2

**Table 4.** Calculation results of water flow through gap– variant 2

Metoda	(m)	(m)	(h)	Z:B	Q (m <sup>3</sup> /s)
MLM	$B_{bot} = 75$	$B_{avg} = 80$	$t = 0.86$	0.5	2492
Von Thun	$B_{bot} = 75$	$B_{avg} = 78$	$t = 2.1$	0.33	1942
Froehlicha	$B_{bot} = 44$	$B_{avg} = 53$	$t = 1.78$	0.9	1590

## MAKSYMALNE ODPLYWY WODY PRZEZ WYRWE WG ZALEŻNOCI PROGNOSTYCZNYCH

W oparciu o zależności prognostyczne określono maksymalne przepływy wody przez wyrwę zapory Rzymówka. Powyższa metoda nie daje informacji o kształcie hydrogramu wypływu wody przez wyrwę, ale umożliwia określenie maksymalnego przepływu przez nią. Zależności prognostyczne wyprowadzono na podstawie udokumentowanych opisów zaistniałych katastrof zapór (Piece M.W, Thornton C.I, Abt S. R – 2010).

**Tabela 5.** Maksymalne odpływy wody przez wyrwę w zaporze Rzymówka  
**Table 5.** Maximum water flows through dam break of Rzymówka dam

Nr	Metoda/Method	Wzór/Equation	Peak flow Q (m <sup>3</sup> /s)
1	Singh&Snorrason	$Q=13.4h_b^{1.89}$	1809
2		$Q=1.776S^{0.47}$	3846
3	Costa (Using HEC-RAS 2014)	$Q=0.981(Sh_b)^{0.42}$	2791
4	USBR	$Q=19.1h_w^{1.85}$	1189
5	MML	$Q=1.154(V_w h_w)^{0.412}$	2820
6	Froehlich	$Q=0.607V_w^{0.295}h_w^{1.24}$	1201

Wzór nr 1, 2, 4, 5 i 6 – (Piece M.W, Thornton C.I, Abt S. R – 2010), wzór nr 3 – (Using HEC-RAS 2014)

gdzie:  $h_w$  – wzniesienie zwierciadła wody nad poziomem posadowienia w chwili awarii (m),  $h_b$  – wysokość zapory (m),  $V_w$  – objętość wody zgromadzonej w zbiorniku w chwili awarii (m<sup>3</sup>),  $S$  – pojemność zbiornika (m<sup>3</sup>).

### PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Uzyskane parametry hipotetycznej wyrwy ze wzorów empirycznych, różnią się znacznie, tak co do szerokości powstałej wyrwy jak i czasu jej rozmycia. Konsekwencją przyjęcia tak zróżnicowanych parametrów naruszenia do obliczeń numerycznych było otrzymanie hydrogramów opróżniania zbiornika, które cechuje duży rozrzut maksymalnego natężenia wypływu tzn. wariant I, dla parametrów naruszenia wg MLM  $Q_{max} = 2597$  m<sup>3</sup>/s (tab. 3), zaś dla wariant II, dla parametrów naruszenia wg Froehlicha  $Q_{max} = 1590$  m<sup>3</sup>/s (tab. 4).

Tak duża różnica w maksymalnych wydatkach wypływu wody przez wyrwę ma istotny wpływ na zasięg stref zalewowych. W celu oceny poprawności uzyskanych wyników obliczeń numerycznych porównano je z wynikami otrzymanymi wg zależności prognostycznych. Dla wariantu 1-go wyniki obliczeń

numerycznych  $Q = 2597 \text{ m}^3/\text{s}$  dla wyrwy o parametrach wg MLM wykazują dużą zgodność (różnica około 7%) z wynikami maksymalnych wydatków obliczonych wg zależności prognostycznych tzn. wg Costa  $Q = 2791 \text{ m}^3/\text{s}$ . Natomiast dla wariantu 2-go obliczenia numeryczne wypływu wody przez wyrwę o parametrach wg Froehlich  $Q = 1590 \text{ m}^3/\text{s}$  są o około 14% mniejsze od maksymalnych wydatków obliczonych wg zależności prognostycznych tzn. wg Singh&Snorrason  $Q = 1809 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mając na uwadze fakt, iż proces zniszczenia zapory jest zjawiskiem mało rozpoznany, zbieżność osiągniętych wyników maksymalnych wypływów przez wyrwę wynoszącymi 7% dla wariantu 1-go oraz 14% dla wariantu 2-go można uznać za zadawalającą.

## LITERATURA

- Bobrowski, P., Trybuś, P., Kasperek, R., (2015). Redukcja fali wezbraniowej na rzece Kaczawa za pomocą suchego zbiornika Rzymówka. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* (In Print).
- Dewey, R.L., Gillette, D.R., (1993). Prediction of embankment dam breaching for hazard assessment. In *Proceedings of the Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, Geotechnical Special Publication 35, American Society of Civil Engineers, New York.*
- Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dn. 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim.
- Fiedler, K., i in., (2007). *Awarie i katastrofy zapór.* Warszawa: IMGW.
- Kostecki, S., Rędownicz, W., Machajski, J., (2012). Wpływ stanu technicznego na katastrofę zapory zbiornika wodnego Niedów. *Przegląd Budowlany*, 5, 96-99.
- Kubrak, J., Szydłowski, M., (2003). Zastosowanie parametrycznych modeli do określenia parametrów wyrwy w zaporze ziemnej. *Przeg. Nauk. Inż. i Kształt. Środ., Zeszyt 12, 1(26), 52-60.*
- Kubrak, J., Szydłowski, M., (2004). Określenie wypływu przez wyrwę w zaporach wodnych. *Gosp. Wod.* 9, 384-387.
- MacDonald, T.C., Langridge-Monopolis, J., (1984). Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers*, 110/5, 576-86.
- Morris, M.W., Galland, J.C., (2000). *Dambreak modelling guidelines and best practice.* HR, Wallingford.
- Pierce, M.W., Thornton, C.I., abt. S.R. (2010). *Predicting peak outflow from breached embankment dams.* Colorado State University.
- Piórecki, M., (1986). *Zagrożenie powodziowe w dorzeczu Górnej Wisły – na przykładzie modelowania potencjalnych skutków katastrof budowli piętrzących.* Warszawa: Arkady.
- Radoń, R., Piórecki, M., (2011). *Metodyka analiz zagrożeń powodziowych powstałych w wyniku katastrof budowli piętrzących. W: Bezpieczeństwo zapór – nowe wyzwania, IMGW Warszawa, 81-87.*

- Rędownicz, W., Machajski, J., Batog, A., (2010). Ekspertyza stanu technicznego zbiornika i zapory Witka po katastrofie budowlanej w dniu 07.08.2010 roku. Raport SPR nr 8/2010, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Maszynopis.
- Rędownicz, W., Szulgan, R., (2012a). Tymczasowy zbiornik retencyjny na rzece Witce w Niedowie. Przegląd Budowlany, 5, 88-91.
- Rędownicz, W., Szulgan, R., Kazana, R., Nych, A., (2012b). Koncepcja odbudowy stopnia wodnego Niedów na rzece Witce. Przegląd Budowlany, 5, 92-95.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie warunków technicznych, jakimi powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz. U. z 2007 r. nr 86 poz. 579), z dnia 20.04.2007r.
- Runkiewicz, L., (2011). Przyczyny techniczne występowania zagrożeń, awarii i katastrof budowlanych. Inżynier Budownictwa, 10/88, Warszawa, 24-29.
- Trybuś, P., Bobrowski, P., Szymanowski, Z., (2014). Koncepcja suchego zbiornika przeciwpowodziowego „Rzymówka”. Water Service Wrocław, Maszynopis.
- Using HEC-RAS for dam break studies. 2014.
- Wujek, M., Antoszewski, R., Urbański, I., (2007). Studium Ochrony przed powodzią zlewni rzeki Kaczawy. Maszynopis, Hydroprojekt Poznań.
- Zaleski, J., (2011). Odra w kontekście zagrożenia powodziowego i awarii budowlanych. Inżynier Budownictwa, 10/88, Warszawa, 36-42.
- Zhou, R.D., Donnelly, R.C., (2005). Dam break flood estimation by simplified predicting equations. In “Dam Engineering”, XVI/1, 81–90.

Mgr inż. Paweł Bobrowski, Mgr inż. Piotr Trybuś  
Water Service Sp. z o.o. Wrocław  
51-608 Wrocław, ul. Różyckiego 1c / 212  
tel. 71 348 72 15, e-mail: water.service@k.pl

Dr inż. Robert Kasperek  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,  
Instytut Inżynierii Środowiska  
50-363 Wrocław, pl. Grunwaldzki 24  
tel. 71 3205519, e-mail: robert.kasperek@up.wroc.pl

Wpłynęło: 6.02.2015

Akceptowano do druku: 15.10.2015