

DOROTA MIROSLAW-ŚWIĄTEK, MARIA MERKEL, KAMIL MAŃK,
ANNA KOSIK*

PROGNOZA HYDROGRAMU WYPŁYWU POWSTAŁEGO W WYNIKU SYMULACJI AWARII ZAPORY BESKO

PREDICTION OF THE OUTFLOW HYDROGRAPH FOLLOWING THE BESKO DAM BREAK SIMULATION

Streszczenie

Jednym z głównych elementów prognozy hydraulicznych skutków awarii zapory jest określenie najbardziej prawdopodobnej przyczyny jej uszkodzenia oraz ilościowego opisanie niekontrolowanego opróżniania zbiornika. W artykule przeanalizowano hydrogramy wypływu powstałe w wyniku symulacji katastrofy zapory Besko. Przedstawiona w artykule symulacja została zaimplementowana w modelu obliczeniowym MIKE 11. Awary zapory modelowano za pomocą modułu obliczeniowego DAMBRK, natomiast gospodarowanie wodą na zbiorniku zostało opracowane w procedurze CONTROL OPERATION. Powstające hydrogramy wypływu przez wyrwę przeanalizowano pod kątem maksymalnego wydatku, objętości oraz czasu narastania i opadania fali.

Słowa kluczowe: awaria zapory, hydrogram wypływu, zaporą Besko, MIKE 11

Abstract

When predicting hydraulic effects of a dam failure, it is essential to identify the most likely cause of the damage and to describe quantitatively the uncontrolled emptying of the reservoir. The paper analyzes the outflow hydrographs resulting from the Besko Dam break simulation. The simulation presented in the article has been implemented in a MIKE 11 model. The dam failure was modeled using the DAMBRK computational module, and the water management in the reservoir was developed in the CONTROL OPERATION procedure. The resulting outflow hydrographs were analyzed in terms of the maximum discharge, water volume and the time of rising and descending of the wave.

Keywords: dam break, outflow hydrograph, the Besko Dam, Mike 11

* Dr Dorota Mirosław-Świątek, mgr inż. Maria Merkel, mgr inż. Kamil Mańk, mgr Anna Kosik, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy.

1. Wstęp

Wystąpienie katastrofy zapory charakteryzuje się bardzo niewielkim prawdopodobieństwem zajścia, co nie oznacza, że jest niemożliwe. Katastrofa zapory spowodowana jest najczęściej przez wiele czynników występujących jednocześnie. Z danych opracowanych przez ICOLD – Międzynarodową Komisję Wielkich Zapór [10] dotyczących 150 katastrof, które wydarzyły się na świecie od początku XX roku, wynika, że w przypadku zapór betonowych, a tego typu zaporą jest Besko, głównymi przyczynami katastrof są problemy związane z ich posadowieniem, a zwłaszcza erozja wewnętrzna podłoża (21%) i jego zbyt mała wytrzymałość na ścinanie (21%). Czynnikiem dodatkowym wielu katastrof są awarie urządzeń upustowych lub zbyt mała ich przepustowość (22%).

Katastrofa zapory prowadzi do nagłego uwolnienia mas wody zgromadzonych w zbiorniku o natężeniu wypływu, które jest nieporównywalne z kulminacją naturalnych wezbrań. Powstająca w dolinie poniżej zapory fala charakteryzuje się natężeniem przepływu i prędkościami przemieszczania się znacznie większymi niż naturalne fale przepływu wód wielkich [5, 8]. Zatem zagrożenia związane z jej przejściem w dolinie rzeki poniżej zapory nie można odnosić do zagrożeń wywołanych przepływem naturalnych wezbrań. Prognozę rozprzestrzeniania się fali w dolinie, wywołanej awarią zapory przeprowadzić można na podstawie symulacji numerycznych [2, 3, 5, 8, 11]. Do podstawowych informacji uzyskiwanych z numerycznego modelowania hydraulicznych skutków awarii zapór należy zaliczyć: maksymalne rzędne zwierciadła wody w dolinie poniżej zniszczonej zapory, czas dochodzenia czoła fali spiętrzenia do poszczególnych punktów doliny, zasięg powstałych zalewów oraz prędkość przepływającej wody. Numeryczne analizy przepływu fali w dolinie rzeki są jedynym narzędziem dostarczającym hipotetycznej informacji związanej z parametrami przepływu wody oraz zasięgiem potencjalnych zalewów [11]. Znajomość tych charakterystyk wspomaga opracowywanie planów ewakuacji i ostrzeżenia ludności przed mogącym wystąpić zagrożeniem powodziowym. Kształt hydrogramu wypływu zależy od głębokości i profilu zbiornika, jak i od kształtu wyrwy, przez którą następuje wypływ wody. Od wartości tych czynników zależy również całkowita objętość oraz zmiana natężenia wypływu [9]. W analizach zakłada się, że w pobliżu częściowo uszkodzonej zapory parametry przepływu w dość krótkim czasie powracają do stanu ustalonego [1].

2. Zbiornik i zapora Besko

Rzeka Wisłok o długości 219 km jest największym lewobrzeżnym dopływem Sanu, a zarazem jedną z największych rzek województwa podkarpackiego. Powierzchnia zlewni Wisłoka wynosi ponad 3500 km², z czego jej górna część jest obszarem górzystym i zalesionym, zaś część środkową i dolną stanowią obszary rolniczo-przemysłowe. Na badanym obszarze, najistotniejszym lewostronnym dopływem jest rzeka Morawa (27,9 km), a prawostronnym – rzeki Pielnica (29,3 km) i Stobnica (46,5 km). Według MPHP są to dopływy o charakterze potoków fliszowych, również sam Wisłok ma charakter rzeki fliszowej (rys. 1).

Zbiornik wodny Besko powstał w wyniku przegrodzenia koryta rzeki Wisłok w miejscowości Sieniawa. Elementem piętrzącym jest zapora czołowa betonowa ciężka z jazem II klasy ważności. Zapora o wysokości 38 m i długości 174 m składa się z 14 samodzielnych dylatowanych sekcji. Urządzenia upustowe zlokalizowane są w dwóch centralnie usytuowa-

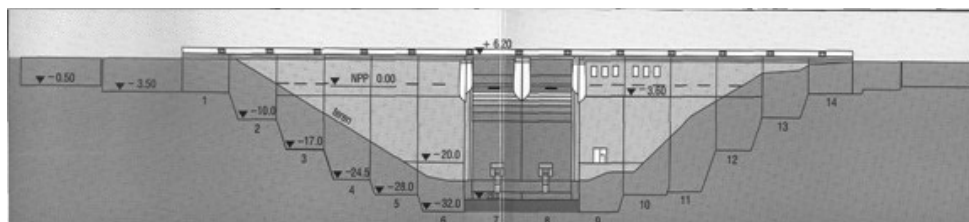
nych sekcjach przelewowo–spustowych (sekcje nr 7 i 8) – rys. 2. Dwa spusty denne o świetle 2,1 x 1,5 m mają maksymalny wydatek 110 m³/s. Przelew powierzchniowy typu Creagera o świetle 2 x 11,2 m zamykany jest klapami o wysokości 2,6 m, a jego maksymalny wydatek wynosi 270 m³/s. Dodatkowo występują dwa rurociągi wody biologicznej o średnicy 200 mm zamykane zasuwami o wydatku 0,62 m³/s. Sumaryczna przepustowość urządzeń przy MaxPP wynosi 380 m³/s.

Zbiornik Besko jest zbiornikiem retencyjnym o maksymalnej głębokości 30 m i średniej głębokości 12 m. Zbiornik zasilany jest głównie przez rzekę Wisłok, ale również przez potoki: Odrzechowski i Głębokie (rys. 4). Powierzchnia zbiornika przy maksymalnym poziomie piętrzenia wynosi 1,31 km², jego pojemność – 13,70 mln m³, natomiast długość – ok. 5 km. Charakterystyczne poziomy piętrzenia wynoszą: MaxPP 337,00 m n.p.m., NPP 332,00 m n.p.m., MinPP 319,80 m n.p.m. Powierzchnia zlewni do przekroju zaporowego wynosi 207 km². Obiekt przekazano do eksploatacji w 1978 r. Główne funkcje zbiornika to ochrona przed powodzią doliny Wisłoka poniżej zapory, zaopatrzenie w wodę na potrzeby komunalne, hodowlę ryb oraz cele energetyczne, a także wyrównanie przepływów na rzece poniżej zapory. Zbiornik i zaporę są obiektami należącymi do Skarbu Państwa użytkowanymi przez Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie.



Rys. 1. Rzeka Wisłok i jej dopływy na badanym obszarze

Fig. 1. The River Wisłok and its tributaries



Rys. 2. Widok na zaporę od strony wody dolnej

Fig. 2. Tailwater view of the Besko Dam

3. Model obliczeniowy MIKE 11

Model MIKE 11 rozwiązuje za pomocą metody różnic skończonych i schematu niejawnego (6 punktowy schemat Abbott–Ionescu) nieustalony przepływ 1D opisany pełnymi równaniami St. Venanta [12]. Program realizuje obliczenia zarówno w warunkach ruchu wolno jak i szybko zmiennego oraz pozwala na symulacje stanu ustalonego oraz nieustalonego. Model uwzględnia wpływ na warunki przepływu obiektów hydrotechnicznych, takich jak mosty, przepusty oraz zabudowy w postaci obwałowań, grobli, nasypów ziemnych i drogowych, wprowadzając do schematu obliczeniowego adekwatne równania opisujące przepływ przez te obiekty [4].

Symulacja katastrofy zapory ziemnej i betonowej realizowana jest poprzez moduł DAM-BRK. Moduł ten umożliwi modelowanie procesu erozji wyrwy powstałej na skutek jednego z dwóch zdarzeń: przelania wody przez koronę bądź przebiccia hydraulicznego (dla zapory ziemnej). Modelowanie uwzględnia zmienny w czasie proces niszczenia oraz, w przypadku przelania wody przez koronę, różny kształt wyrwy. Dane potrzebne do obliczeń katastrofy zapory to: geometria zapory, właściwości i parametry materiałowe, początkowe i końcowe rozmiary wyrwy oraz zmienność jej rozmiarów w czasie. Opis procesu rozmycia wyrwy w korpusie zapory ziemnej prognozowany jest z wykorzystaniem formuły Engelunda–Hansena do opisu intensywności ruchu rumowiska w przekroju wyrwy. W przypadku katastrofy zapory betonowej istnieje możliwość modelowania nagłego zniszczenia jednej lub kilku sekcji zapory.

Zastosowany w programie moduł CONTROL OPERATION umożliwia zaimplementowanie w modelu reguł sterowania odpływem ze zbiornika zgodnie z instrukcją gospodarowania wody w zbiorniku. Program pozwala także na prognozowanie ruchu fali spiętrzenia poniżej zapory w warunkach zabudowy hydrotechnicznej koryta obiektami, takimi jak: jazy, mosty, przepusty, pompownie oraz innymi urządzeniami do regulacji przepływu. Szorstkość podłoża może być opisana zmiennymi w przestrzeni szorstkości Manninga, Stricklera, Chezy lub Darcy–Weisbacha.

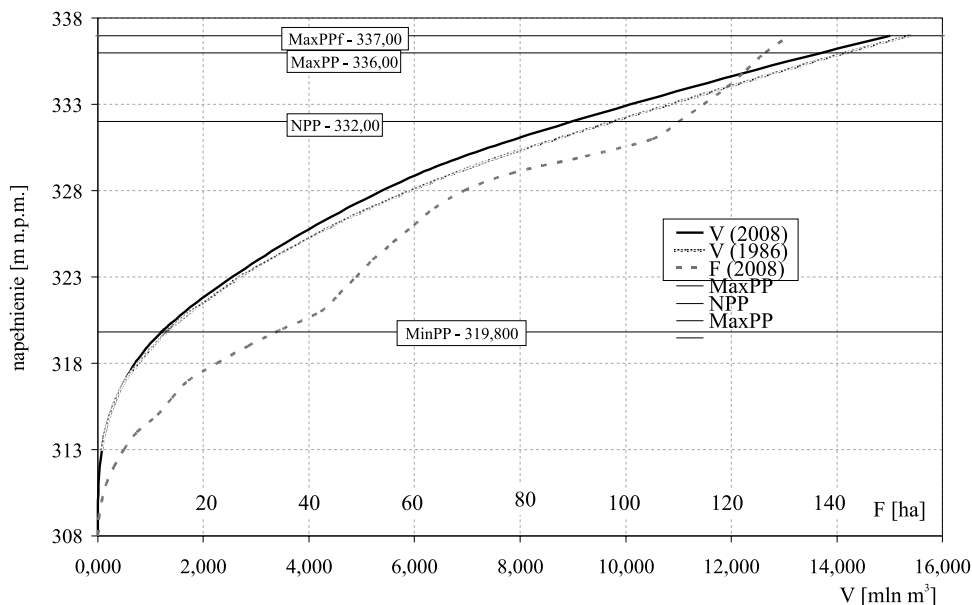
4. Kalibracja i weryfikacja modelu hydrodynamicznego zbiornika Besko

Model hydrodynamiczny zbiornika Besko obejmuje odcinek rzeki Wisłok od wodowskazu Puławy (km 195+220) do początku zbiornika (km 189 + 773), zbiornik o długości 5 km, zaporę Besko (km 184 + 650) i odcinek rzeki poniżej zapory do wodowskazu Sieniawa (km

183 + 600) – rys. 4. Obszar zbiornika Besko opisany jest w modelu MIKE 11 za pomocą 50 przekrojów obliczeniowych.

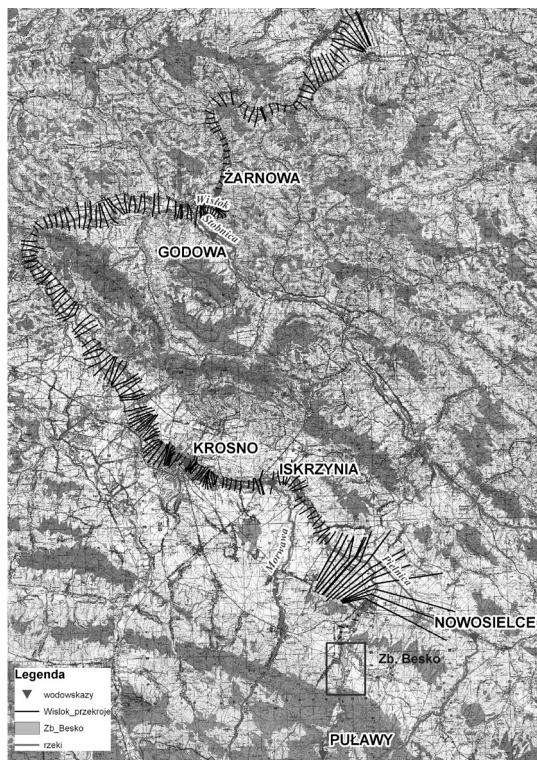
Proces kalibracji modelu zbiornika Besko obejmował poprawne odtwarzanie przez model krzywej pojemności zbiornika (rys. 3) oraz wydatków urządzeń przelewowych i upustowych zgodnych z instrukcją eksploatacji obiektu. W opracowanym modelu obszar zbiornika został zawężony do czaszy głównej (rys. 5). Takie podejście, pomimo bardzo dokładnego odwzorowania czaszy głównej, spowodowało, że objętość zbiornika dla danego poziomu piętrzenia była zdecydowanie mniejsza od objętości wynikającej z krzywej pojemności zbiornika. Błąd średni kwadratowy obliczony dla rzędnych piętrzenia wody w zbiorniku wynosił 1,30 m. W praktyce przyjmuje się, że różnica dla danej objętości zgromadzonej wody w zbiorniku nie powinna przekraczać różnicy kilku cm w wysokości piętrzenia. W celu zmniejszenia błędu modelu w ostatnim przekroju obliczeniowym w zbiorniku (km 184 + 673) zaimplementowano dodatkowe objętości dla każdego z poziomów piętrzenia (MIKE 11 opcja Add. storage area). Ponieważ do wysokości 315 m n.p.m. model odtwarzał pojemność zbiornika z zadowalającą dokładnością, iteracyjną procedurę doboru dodatkowych objętości rozpoczęto od tej wysokości piętrzenia. Błąd średni kwadratowy obliczony dla rzędnych piętrzenia wody w zbiorniku wynosił po kalibracji modelu 0,04 m, a maksymalna różnica wysokości piętrzenia 0,06 m.

Działanie urządzeń upustowych zapory Besko odwzorowano w modelu za pomocą modułu STRUCTURE OPERATION. W module tym definiuje się warunki logiczne, które muszą być spełnione dla określonej reguły sterowania w zależności od dopływu oraz rzędnej piętrzenia wody w zbiorniku. W module STRUCTURE OPERATION zgodnie z instrukcją gospodarowania wodą dla zbiornika Besko zaimplementowano obowiązujące reguły sterowania.



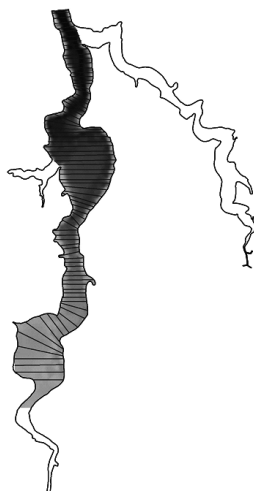
Rys. 3. Krzywa pojemności zbiornika Besko

Fig. 3. The Besko Reservoir storage curve



Rys. 4. Lokalizacja przekrojów do modelu hydrodynamicznego

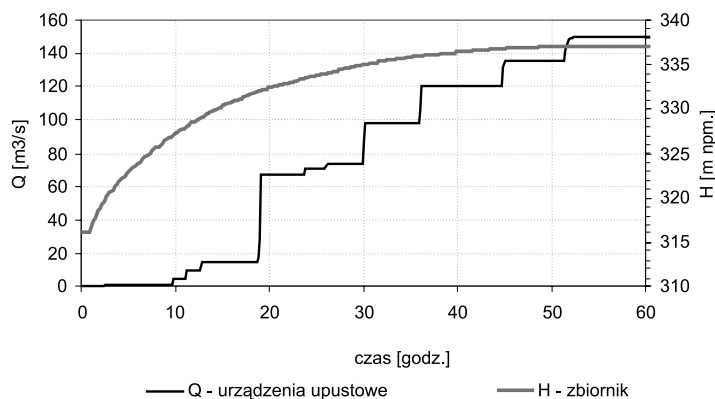
Fig. 4. Location of cross sections for the hydrodynamic model



Rys. 5. Odzworowanie czaszy głównej zbiornika Besko w modelu

Fig. 5. Representation of the Besko Reservoir

Poprawność zaimplementowanych w module STRUCTURE OPERATION reguł sterowania została sprowadzona przez wykonanie obliczeń testowych. Dla stałych dopływów wody do zbiornika w zakresie od $20 \text{ m}^3/\text{s}$ do $450 \text{ m}^3/\text{s}$ i różnych początkowych poziomów piętrzenia wody w zbiorniku sprawdzano zgodność odpływu z urządzeń upustowych i poziomów piętrzenia z instrukcją gospodarowania wodą dla zapory Besko (rys. 6). Testowano także bilans objętości wody dla obiektu. Wszystkie wykonane testy potwierdziły poprawne działanie modelu w tym zakresie. Całkowity błąd bilansu objętości wody nie przekroczył dla tego przypadku 2%.



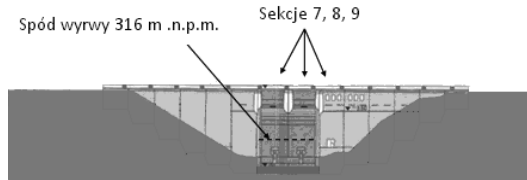
Rys. 6. Wyniki testu modelu dla stałego dopływu do zbiornika $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ i początkowej rzędnej piętrzenia 316 m n.p.m.

Fig. 6. Model test results for a constant inflow of $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ and primary water level 316 m asl

5. Symulacja katastrofy

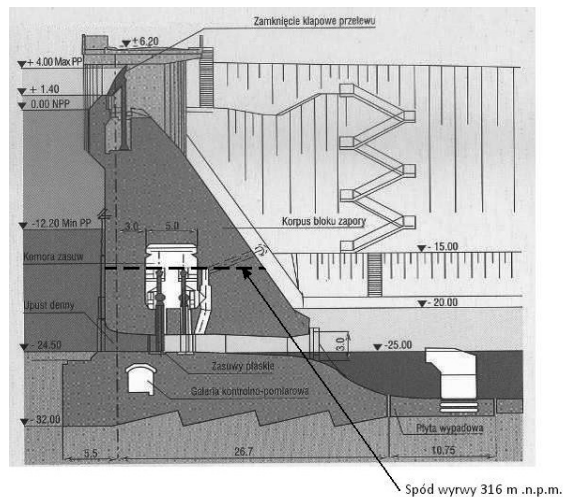
Z materiałów opublikowanych przez ICOLD – Międzynarodową Komisję Wielkich Zapór [10] wynika, że głównymi przyczynami katastrof zapór betonowych są problemy związane z ich posadowieniem. Jednak w przypadku zapory Besko wydaje się, że bardziej prawdopodobny scenariusz zakłada przełanie się wody przez jej koronę, powodując uszkodzenie sekcji betonowych, z których zbudowana jest zapora. Na podstawie literatury [1, 2] przyjęto założenie, że uszkodzenie zapory następuje 10 minut po osiągnięciu maksimum przez falę wezbraniową powodującą przełanie wody. Wybrane sekcje zostają wypchnięte, w następstwie czego powstaje wyrwa powodująca gwałtowne opróżnianie zbiornika. W celu określenia wielkości uszkodzeń przeanalizowano dokumentację powykonawczą z betonowania zapory. Ostateczny poziom wyrwy przyjęto na granicy przerwy w betonowaniu spowodowanych warunkami zimowymi (316 m n.p.m.). Założono, że wypchnięty jest blok betonowy o całkowitej szerokości sekcji do przyjętego poziomu 316 m n.p.m. W opracowanych scenariuszach uszkodzonymi sekcjami, w różnej konfiguracji, były sekcje przelewowo-upustowe (nr 7, 8) oraz przylegająca do nich sekcja 9 (rys. 7). Są to sekcje, w których znajdują się niezbędne do pracy zapory: komora urządzeń napędowych, komora zasuw, spusty denne, galeria kontrolno-pomiarowa, sterownia oraz komora pompowni. Betonowy korpus zapory jest w tych sekcjach najslabszy (rys. 8).

Wyrwa ma kształt prostokąta, którego wysokość zmienia się w bardzo krótkim czasie (5 minut) [7] od rzędnej korony 338 m n.p.m. do rzędnej 316 m n.p.m. Przyjęta na rzędnej 316 m n.p.m. krawędź wyrwy znajduje się (w zależności od rozpatrywanej sekcji) 6–7 m powyżej dna zbiornika w pobliżu zapory (rys. 7). Z krzywej pojemności zbiornika (rys. 3) wynika, że po obniżeniu poziomu wody do 316 m n.p.m. objętość zbiornika wynosi 0,38 mln m³, co odpowiada zaledwie 2,4% pojemności przy MaxPP. Można przez to rozumieć, że dla założonego poziomu dna wyrwy, zbiornik zostanie prawie całkowicie opróżniony.



Rys. 7. Sekcje zapory ulegające uszkodzeniu

Fig. 7. Damaged sections of the dam



Rys. 8. Przekrój poprzeczny przez sekcję przelewowo-upustową (nr 7 i 8)

Fig. 8. Cross section of the spill-discharge section (No. 7 and 8)

W programie MIKE 11 zmiany w czasie prostokątnego ubytku zdefiniowane zostały jako seria czasowa, w której w postaci funkcji czasu określono szerokość ubytku (*width* – $W(t)$), nachylenie skarp (slope – $S(t)$) i poziom dolnej krawędzi ubytku (*level* – $L(t)$).

W przyjętym scenariuszu propagacja ubytku w postaci trzech bloków betonowych (sekcja 7, 8, 9) w czasie jest następująca:

$$W(t) = 42 \text{ m dla } t \geq 0$$

$$S(t) = 0 \text{ dla } t \geq 0$$

$$L(t) = 338 \text{ m n.p.m. dla } t \geq 0$$

$$L(t) = 316 \text{ m n.p.m. dla } t \geq 300 \text{ s}$$

W obliczeniach założono, że w chwili rozpoczęcia wezbrania poziom wody w zbiorniku wynosi $MaxPP = 337$ m n.p.m., co odpowiada sytuacji, gdy po przejściu jednej fali powodziowej, która została przyjęta przez zbiornik w celu redukcji wezbrania w dolinie poniżej, następuje drugie wezbranie.

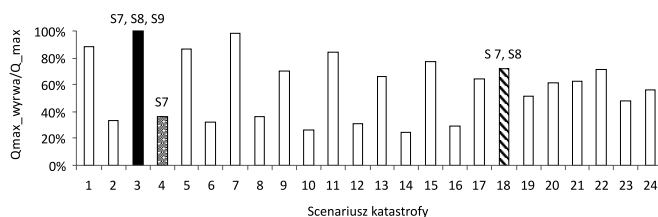
6. Prognoza hydrogramów wypływu z wyrwy

Zapora Besko jest budowlą hydrotechniczną klasy II. Według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie, prawdopodobieństwo pojawienia się przepływów miarodajnych i kontrolnych wynosi $Q_m = 0,3\%$, $Q_k = 0,05\%$, co odpowiada wystąpieniu wezbrania odpowiednio raz na 333 oraz 2000 lat. Na takie wezbrania projektowana jest pojemność zbiornika oraz przepustowość urządzeń upustowych zapewniająca bezpieczną pracę zbiornika. Aby doszło do przelania wody przez koronę zapory w opracowanych scenariuszach przyjęto wezbranie o prawdopodobieństwie wystąpienia raz na 1000 lat ($p = 0,1\%$) oraz raz na 10 000 lat ($p = 0,01\%$).

Opracowując scenariusze, przyjęto, że urządzenia upustowe pracują ze 100% bądź 50% efektywnością, co odpowiada sytuacji, gdy wezbranie rozpoczyna się w czasie remontu urządzeń upustowych lub ich awarii, ograniczając możliwość sterowania zamknięciami. Sterowanie odbywa się zgodnie z zasadami gospodarowania w okresie eksploatacji powodziowej [6].

W wyniku różnych kombinacji liczby uszkodzonych sekcji, hydrogramów dopływu wody do zbiornika oraz efektywności urządzeń upustowych powstały 24 scenariusze przebiegu katastrofy zapory, dla których wykonano symulacje obliczeniowe (tab. 1). Do analizy zmienności hydrogramów wypływu z powstałej wyrwy, wybrano najpierw ten najbardziej niekorzystny pod względem wartości maksymalnego wydatku – S_MaxPP_S789_P001_U50 (wariant 1), a następnie dwa inne odpowiadające tym samym warunkom, a różniące się jedynie liczbą uszkodzonych sekcji (wariant 2 i wariant 3) – rys. 9.

W tabeli 2 przedstawiono parametry kulminacji hydrogramów wypływu dla analizowanych trzech scenariuszy. W przypadku zniszczenia 3 sekcji przepływ maksymalny $Q_{max} = 5728,7$ m³/s i jest o 39% większy od maksymalnego przepływu dla sytuacji, kiedy uszkodzone są 2 sekcje oraz o 172% większy od wariantu, w którym wypchnięta została tylko jedna sekcja. We wszystkich trzech przypadkach wartości kulminacji fal zostają osiągnięte w tym samym czasie, a mianowicie w piątej minucie po rozpoczęciu wypychania sekcji betonowych zapory przez wodę, czyli w chwili całkowitego wypchnięcia, a rzędna wyrwy wynosi wtedy 316 m n.p.m. (punkt 5). Ze względu na różne szerokości wyrw czasy opadania fali wypływu różnią się istotnie we wszystkich trzech wariantach (rys. 10). W wariacie 3, kiedy awarii ulega tylko jedna sekcja (szerokość wyrwy ma wtedy 15 m), przepływ wraca do stanu ustalonego po ok. 9 godzinach, natomiast dla uszkodzonych trzech sekcji (wariant 1 – szerokość wyrwy 42 m) trwa to już tylko ok. 3 godziny. Hydrogram dla wariantu 2 (w którym szerokość wyrwy wynosi 30 m) jest bardziej zbliżony do hydrogramu wariantu 1. W tym przypadku powrót do przepływu ustalonego następuje po ok. 4 godzinach. Podobieństwo wariantów 1 i 2 można również zauważyć na rys. 11 przedstawiającym zmianę rzędnej zwierciadła wody w wyrwie. Około trzeciej godziny po awarii w przypadku dwóch i trzech uszkodzonych sekcji (wariant 1 i 2) wysokość fali w wyrwie wynosi już poniżej 5 m, tymczasem dla wariantu 3 sytuacja taka następuje dopiero po 7 godzinach.



Rys. 9. Warianty wybrane do analiz zmienności hydrogramów wypływu (scenariusz nr 3 – wariant 1; scenariusz nr 18 – wariant 2; scenariusz nr 4 – wariant 3)

Fig. 9. Scenarios chosen for the outflow hydrographs analysis

Tabela 1

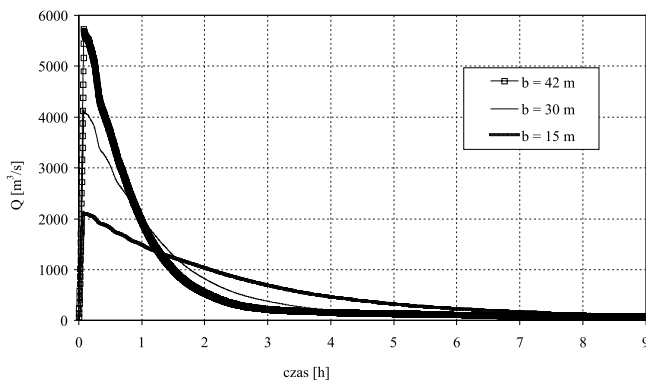
Analizowane scenariusze symulacji katastrofy zapory Besko

Lp.	Rzędna wody w zbiorniku	Uszkodzone sekcje	Dopływ do zbiornika o prawdopodobieństwie wystąpienia	Praca urządzeń upustowych [%]	Maksymalna rzędna wody w zbiorniku H_{max} [m n.p.m.]	Maksymalne natężenie przepływu przez wyrwę Q_{max_wyrwa} [m ³ /s]
1	MaxPP	S7, S8, S9	0,01	100	336,75	5,09E + 03
2	MaxPP	S7	0,01	100	336,75	1,88E + 03
3	MaxPP	S7, S8, S9	0,01	50	338,38	5,73E + 03
4	MaxPP	S7	0,01	50	338,38	2,11E + 03
5	MaxPP	S7, S8, S9	0,1	100	336,44	4,97E + 03
6	MaxPP	S7	0,1	100	336,44	1,84E + 03
7	MaxPP	S7, S8, S9	0,1	50	338,22	5,67E + 03
8	MaxPP	S7	0,1	50	338,22	2,08E + 03
9	NPP	S7, S8, S9	0,01	100	333,89	4,04E + 03
10	NPP	S7	0,01	100	333,89	1,50E + 03
11	NPP	S7, S8, S9	0,01	50	336,09	4,84E + 03
12	NPP	S7	0,01	50	336,09	1,79E + 03
13	NPP	S7, S8, S9	0,1	100	333,13	3,78E + 03
14	NPP	S7	0,1	100	333,13	1,40E + 03
15	NPP	S7, S8, S9	0,1	50	335,01	4,42E + 03
16	NPP	S7	0,1	50	335,01	1,65E + 03
17	MaxPP	S7, S8	0,01	100	336,75	3,69E + 03
18	MaxPP	S7, S8	0,01	50	338,38	4,14E + 03
19	NPP	S7, S8	0,01	100	333,89	2,93E + 03
20	NPP	S7, S8	0,01	50	336,09	3,51E + 03
21	MaxPP	S7, S8	0,1	100	336,44	3,60E + 03
22	MaxPP	S7, S8	0,1	50	338,22	4,09E + 03
23	NPP	S7, S8	0,1	100	333,13	2,74E + 03
24	NPP	S7, S8	0,1	50	335,01	3,21E + 03

Porównanie parametrów kulminacji dla analizowanych wariantów

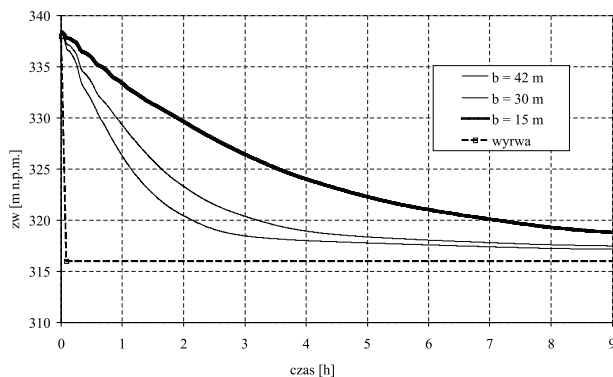
Wariant	Szerokość wyrwy b [m]	Q_{\max} [m ³ /s]
1	42	5729
2	30	4136
3	15	2106

Różnice w dynamice hydrogramów wpływają także na objętość wody wypływającą przez wyrwę. Dla uszkodzonych trzech sekcji 50% objętości wypływa już w ciągu pierwszej godziny (rys. 12). Do wypłynięcia takiej ilości przez wyrwę o szerokości 15 m nie dochodzi nawet po 2,5 h. Niemniej jednak w każdym przypadku po 9 godzinach od awarii znaczna część (sięgająca 80%) objętości jest już poza zbiornikiem.



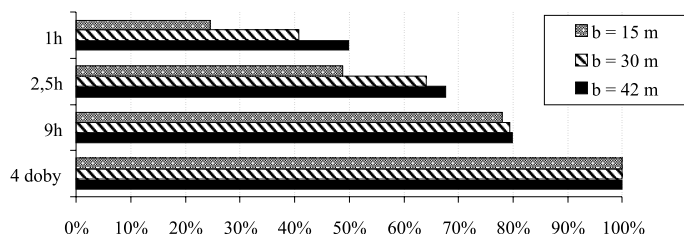
Rys. 10. Hydrogram wypływu dla pierwszych 9 godzin po awarii

Fig. 10. Outflow hydrograph for the first 9 hours after the break



Rys. 11. Hydrogram rzędnej zwierciadła wody w wyrwie

Fig. 11. Water level in the breach hydrograph



Rys. 12. Względna objętość wody wypływającej przez wyrwę

Fig. 12. Relative water volume

7. Wnioski

Przeanalizowane w artykule rezultaty obliczeń symulacyjnych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Opracowany w programie obliczeniowym MIKE 11 model hydrodynamiczny zbiornika zapory Besko oraz model katastrofy zapory pozwalają na określenie hydrogramów wypływu z powstałej wyrwy.
2. Opracowane hydrogramy mogą być wykorzystane do analizy hydraulicznych skutków katastrofy zapory Besko w dolinie rzeki poniżej zbiornika.
3. W przypadku uszkodzenia trzech sekcji zapory w ciągu pierwszej godziny od wystąpienia katastrofy wypływa ok. 50% zgromadzonej wody w zbiorniku.
4. We wszystkich trzech analizowanych scenariuszach maksymalnie po 9 godzinach po awarii przepływ wraca do stanu ustalonego.
5. Wartości kulminacji fal Q_{\max} różnią się w bardzo szerokim zakresie od 2106 do 5729 m³/s.
6. Dynamika fal wypływu powstałego z wyrwy o szerokości 30 i 42 m ma podobny charakter.

Literatura

- [1] Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V., *Experimental verification of methods for calculating partial dam-break waves*, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 49, 2008, 754–761.
- [2] Chanson H., *Application of the method of characteristics to the dam break wave problem*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 47, No. 1, 2009, 41–49.
- [3] De Wrachien D., Mambretti S., *Dam-Break Problems, Solutions and Case Studies*, WIT Press, Southampton 2009.
- [4] DHI Mike Flood, *1D–2D Modelling, User Manual*, Hørsholm, Denmark 2007.
- [5] Gallegos H., Schubert J., Sanders B., *Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California*, Advances in Water Resources, 2009, 1324–1335.
- [6] Hydroprojekt Kraków, *Zbiornik wodny Besko na Wisłoku – Instrukcja gospodarowania wodą – Aktualizacja 1998*, 1998.
- [7] ICOLD, *Dam-Break Flood Analysis Review and recommendation*, Bulletin 111, 1998.

- [8] Kubrak J., *Modele numeryczne rozprzestrzeniania się fali wyphywającej przez wyrwę w zaporze*, Rozprawy Naukowe i Monografie SGGW, Warszawa 1989.
- [9] Pilotti M., Tomirotti M., Valerio G., *Simplified Method for the Characterization of the Hydrograph following a Sudden Partial Dam Break*, Journal of Hydraulic Engineering – ASCE, Vol. 136, 2010, 693-704.
- [10] Storożyńska K. (red.), *Katastrofy zapór analiza statystyczna*, Biuletyn 99 CIGB – ICOLD, POLCOLD, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 2000.
- [11] Szydłowski M. (red.), *Matematyczne modelowanie hydraulicznych skutków awarii zapór wodnych*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Warszawa 2003.
- [12] Szymkiewicz R., *Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.