

**Dr inż. Witold Sterpejkowicz-Wersocki**

**Dr hab. inż. Michał Szydłowski**

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Hydrotechniki

ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 058 347 2702

email: wste@pg.gda.pl, mszyd@pg.gda.pl

## **Przyczyny techniczne i hydrauliczne skutki awarii budowli piętrzących**

**Streszczenie:** Katastrofy hydrotechnicznych obiektów piętrzących zdarzają się stosunkowo rzadko, jeśli jednak do takiej katastrofy już dojdzie, to jej skutki są zazwyczaj bardzo dotkliwe i wiążą się z koniecznością poniesienia ogromnych wydatków zarówno na odbudowę samej budowli, jak również na naprawę szkód powodziowych. W artykule omówiono główne przyczyny awarii budowli piętrzących oraz zaprezentowano wyniki komputerowej symulacji przebiegu potencjalnej powodzi wywołanej awarią zapory zbiornika retencyjnego. Jako przykład przedstawiono hipotetyczną awarię bocznej zapory zbiornika Kolbudy II przy Elektrowni Wodnej Bielkowo (woj. pomorskie). Celem symulacji jest możliwości wyznaczenia zasięgu strefy zagrożonej potencjalną powodzią i czasu propagacji fali powodziowej.

### **1. Wstęp**

Zapory ziemne są jednymi z najstarszych konstrukcji inżynierskich na świecie. Przypuszcza się, że były budowane jeszcze w czasach prehistorycznych, jako jedna z wczesnych form działalności człowieka. Za najstarszą zaporę uznaje się jordańską zaporę w Jawie, położoną około 100 km na północny wschód od Ammanu. Konstrukcja ta, typu grawitacyjnego, była kamiennym murem o szerokości 1 m i wysokości 9 m wspartym o 50 m szerokości wał ziemny. Zaporę tę datuje się na 3000 rok p.n.e (Garbrecht, 1986).

Najstarszą budowlą hydrotechniczną wykonaną na ziemiach gdańskich jest Kanał Raduni o długości 13,5 km, wybudowany za sprawą Zakonu Najświętszej Marii Panny w XV w. Wraz z biegiem czasu można zauważyć wzrost wysokości zapór. Do roku 1900 nie było zapór ziemnych przekraczających wysokość 50 m, a do 1931 – 100 m. Obecnie najwyższą zaporą ziemną jest zaporą Rogun w Tadżykistanie, mająca 335 m wysokości.

Na przestrzeni wieków budowle wznoszono w oparciu o doświadczenie i praktykę konstruktorów. Dopiero w drugiej połowie XIX w. zaczęto naukowo określać zasady budowy zapór. W dzisiejszych czasach sprecyzowane są zasady projektowania oraz technologii budowy. Rozwinięte systemy wczesnego ostrzegania, prowadzona konserwacja obiektów oraz nowe technologie naprawy zapór nie dają jednak 100% gwarancji bezpieczeństwa w każdych warunkach pracy budowli.

Jednym z najważniejszych zagrożeń związanych ze wznoszeniem budowli piętrzących wodę jest niebezpieczeństwo częściowego lub całkowitego ich zniszczenia, które powoduje zwykle katastrofalną powódź. Według Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór (ICOLD) (Fiedler, 2007), katastrofa zapory to „zawalenie się lub przemieszczenie części zapory lub jej podłoża, w wyniku którego budowla nie może piętrzyć wody. Na ogół wiąże się to ze znacznie zwiększonym odpływem, stwarzającym zagrożenie dla życia ludzi i ich mienia w dolinie rzeki poniżej zapory”. Jak wskazuje praktyka, mimo szczególnej dbałości w czasie projektowania zapór oraz ich wykonawstwa, ulegają one awariom. Skutkiem awarii zapory są prawie zawsze znaczne zniszczenia obszaru leżącego poniżej budowli oraz często liczne ofiary śmiertelne wśród ludności zamieszkującej tereny bezpośrednio sąsiadujące ze

zbiornikiem wodnym. Wszystko to skłania hydrotechników i inżynierów wodnych do prowadzenia analiz przyczyn awarii zapór i określania hydraulicznych skutków ich awarii.

W Polsce konieczność prognozowania skutków katastrof obiektów piętrzących jest regulowana prawnie. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2007 nr 86 poz. 579) dla budowli piętrzącej o wysokości piętrzenia przekraczającej 2,0 m lub tworzącej pojemność większą niż 0,2 mln m<sup>3</sup>, należy określić przebieg i zasięg fali wezbraniowej wywołanej zniszczeniem lub uszkodzeniem tej budowli (Art. 24, ust. 2).

Wspomniane rozporządzenie nakazuje również tworzenie planów zagospodarowania doliny rzeki poniżej zapory wodnej oraz scenariuszy akcji ratowniczych i ewakuacyjnych na wypadek katastrofy. Do podstawowych informacji niezbędnych do podjęcia wspomnianych działań należy zaliczyć: maksymalne rzędne zwierciadła wody w dolinie poniżej zniszczonej zapory, czas dochodzenia czoła fali wezbraniowej do poszczególnych punktów doliny, zasięg powstałych zalewów oraz prędkość przepływającej wody. Znajomość tych parametrów umożliwi również oszacowanie strat wywołanych powodzią oraz analizę deformacji terenów, przez które przeszła fala powodziowa. Wymienione elementy mogą być dodatkowo dobrą podstawą szacowania strat materialnych. Prognoza hydraulicznych skutków ewentualnej awarii zapory wodnej stanowi podstawę do wykonania oceny wpływu powodzi i zniszczenia zbiornika retencyjnego na środowisko przyrodnicze, a także oceny ryzyka związanego z istniejącymi, bądź nowoprojektowanymi budowlami piętrzącymi.

## 2. Przyczyny awarii zapór ziemnych w Polsce i na Świecie.

Według danych przedstawionych przez Międzynarodową Komisję Wielkich Zapór (ICOLD) (Fiedler, 2007) 70% katastrof występuje w pierwszych 10 latach eksploatacji, najwięcej katastrof odnotowano wśród zapór wybudowanych w latach 1910-1920, dla 31% katastrof zapór ziemnych bezpośrednią przyczyną było przelanie się wody przez koronę zapory (pośrednio w 18%), dla 15% bezpośrednią przyczyną katastrofy była erozja wewnętrzna korpusu zapory (pośrednio w 13%), dla 12% bezpośrednią przyczyną katastrofy była erozja podłoża (pośrednio w 5%).

Powyższe dane wskazują na dwa zasadnicze obszary prowadzące do awarii lub katastrofy budowli: przelanie wody przez koronę zapory ziemnej lub niekorzystne i niekontrolowane zjawiska filtracyjne (sufozja, przebicie hydrauliczne), zachodzące zarówno w samym korpusie budowli, jak również w podłożu pod zaporą. Przelanie się wody przez koronę zapory ma zazwyczaj miejsce na środkowym odcinku zapory. W początkowej fazie wyrwa przybiera kształt litery V o szerokości 3-4 krotnie większej od jej głębokości. W miarę wmywania gruntu dno wyrwy ulega zaokrągleniu. Przebicie hydrauliczne natomiast spowodowane jest nadmierną filtracją wody, przez korpus lub podłożę zapory, powiązaną z wynoszeniem początkowo niewielkich cząstek gruntu. Przepuszczalnie w korpusie zapory (lub w podłożu) powstaje tunel, który powiększa się stopniowo, aż do momentu zawalenia.

Przyczyną uszkodzenia zapory bywa również złe rozpoznanie geologiczne. Powolny proces tworzenia się wyrwy jest zakończony gwałtownym poślizgiem, któremu podlega fragment zapory. Powstająca wówczas wyrwa ma kształt zbliżony do prostokąta lub trapezu i sięga całej wysokości zapory. Te same mechanizmy zniszczenia dotyczą również wałów przeciwpowodziowych, które w odróżnieniu od zapór winny być przystosowane jedynie do okresowego piętrzenia wody.

O dość licznych przypadkach awarii obwałowań, wynikających głównie z rozwoju zjawisk sufozycznych w podstawie wału, ale również z ogólnie złego stanu technicznego, można było się przekonać podczas tegorocznych wezbrań powodziowych, występujących na



terenie Polski. W ostatnich latach dochodziło również do katastrof zapór ziemnych, wśród których najtragiczniejsza w skutkach miała miejsce w Górowie Haweckim w lutym 2000 r. Katastrofa zapory wywołała tam falę wezbraniową o wysokości ok. 7 m, która spowodowała śmierć 3 osób i znaczne straty materialne w mieście (Ambrożewski i in., 2000). Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że przyczyną katastrofy była nadmierna filtracja przez stromą skarpe lewego przyczółka zapory zbudowaną z gruntów nieprzepuszczalnych, przewarstwionych gruntami przepuszczalnymi oraz niedogęszczenie zapory na styku ze skarpe zbocza w wyniku niedbałego wykonawstwa. Rozmycie tego styku musiało więc bezwzględnie nastąpić. Możliwe jest również, że zaporą na lewym przyczółku miała nieco niższą rzędną korony, spowodowaną nadmiernym osiadaniami lub rozmyciem partii przyczółkowej. W tym przypadku nastąpiło przelanie się wód zbiornika przez koronę zapory, co zawsze prowadzi do katastrofy budowli ziemnej. Przelanie się wody przez koronę zapory było również, jak się wydaje, główną przyczyną katastrofy zapory Niedów na rz. Witka w sierpniu 2010 r. (rys. 1).

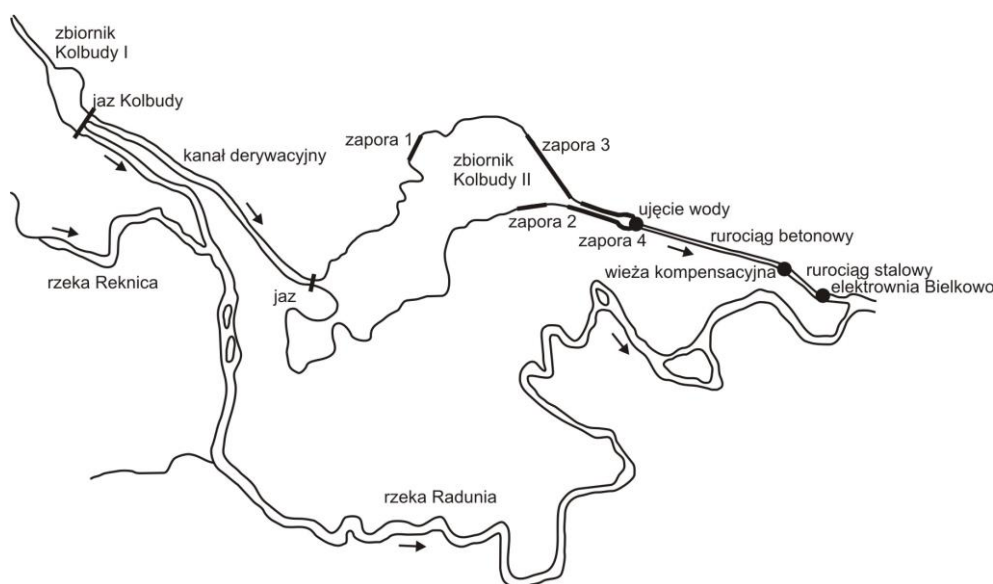


Rys. 1. Zniszczona zaporę ziemną Niedów na rz. Witka podczas powodzi w sierpniu 2010 r. (<http://www.zinfo.pl/galeria/187>)

### 3. Stopień wodny w Bielkowie.

Elektrownię Wodną Bielkowo zbudowano w 1925 roku jako czwartą siłownię wodną na Raduni (Jarzębińska i in., 2005). Jest to elektrownia derywacyjna z dwoma zbiornikami o wyrównaniu półdobowym. Przy projektowaniu elektrowni wykorzystano fakt, iż Radunia pomiędzy Kolbudami Górnymi a odległym o 3,5 km Bielkowem zatacza pętlę. Długość pętli mierzona po korycie rzeki wynosi ponad 10 km, różnica wysokości – ponad 40 m. Wystarczyło wykonać 3,5 km „skrót”, by wykorzystać ten duży spadek na jednym obiekcie. Schemat węzła wodnego Elektrowni Bielkowo pokazano na rys. 2.

Poprzez spiętrzenie wód rzeki Raduni do rzędnej 86,00 m npm za pomocą jazu betonowego powstał zbiornik Kolbudy I o powierzchni 6 ha wypełniający naturalną dolinę Raduni. Na jazie następuje rozrząd wód rzeki Raduni na stare koryto, łączące się poniżej budowli z prawobrzeżnym dopływem – Reknicą, i na kanał derywacyjny o długości 1350 m, zawieszony na południowo – zachodnim skłonie wzgórza morenowego w Kolbudach. Kanał prowadzi wodę do zbiornika Kolbudy II, będącym przedmiotem zainteresowania niniejszego artykułu. Zbiornik ten powstał poprzez obwałowanie naturalnego zagłębienia terenu czterema ziemnymi zaporami bocznymi z ekranem glinowym o łącznej długości 3600 m. Powierzchnia zbiornika wynosi 54 ha, pojemność całkowita obu zbiorników elektrowni Bielkowo  $2,45 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , a pojemność martwa  $1,22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Woda spiętrzona w zbiorniku jest ujmowana w zamku wodnym i za pomocą kanału żelbetowego oraz rurociągu stalowego kierowana jest do turbin. Spad uzyskany za pomocą piętrzenia i derywacji wynosi 44,8 m.



Rys. 2 – Schemat węzła wodnego Elektrowni Wodnej Bielkowo

#### 4. Zjawiska filtracyjne w zaporze bocznej.

Zbiornik Kolbudy II przystosowany jest do piętrzenia wody do rzędnej 86,30 m npm (powodziowej) bez szkody dla gruntów przyległych. Najniższy dopuszczalny poziom zbiornika określono na rzędnej 83,25 m npm.

Zbiornik wypełnia naturalne zagłębienie terenu. Zanim do zbiornika skierowano wodę zasilającą elektrownię w Bielkowie, w jego miejscu położone były zmeliorowane pola. Stworzenie w takim miejscu zbiornika retencyjnego wymagało sztucznego podniesienia niektórych fragmentów brzegów, przy pomocy zapór bocznych. Zbudowano cztery odcinki obwałowania ziemnego z ekranem glinowym uformowanym na skarpie odwodnej, który dnem dochodzi (wcina się) w naturalne - gliniaste podłoże czaszy zbiornika.

Do analizy skutków potencjalnej awarii wytypowano zaporę nr 1 (rys. 3), usytuowaną w przybliżeniu równoległe do drogi wojewódzkiej nr 221 Gdańsk Orunia - Kościerzyna, ze względu na stałe zawilgocenie (podmoknięcie) podstawy skarpy odpowietrznej (Rys. 5). Zapora nr 1 charakteryzuje się następującymi parametrami geometrycznymi: rzędna korony ok. 88,00 m npm, szerokość korony 3,0 m, długość 238 m, szerokość podstawy 23,0 m, wysokość maksymalna 5,0 m.

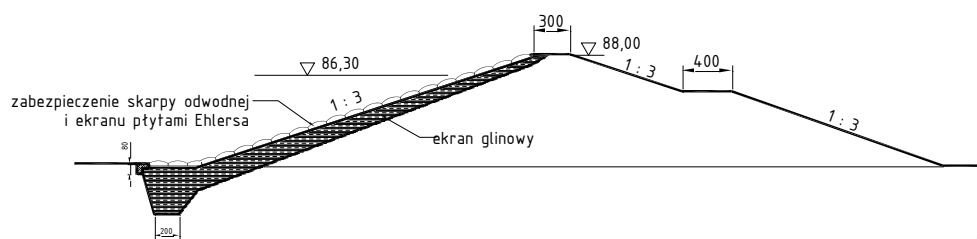






Rys. 3 – Zapora boczna nr 1

Skarpa po stronie odwodnej umocniona jest do dna zbiornika betonowymi blokami Ehlersa, natomiast korona zapory oraz skarpa odpowietrzna nie posiadają „ciężkich” umocnień – ich umocnienie stanowi darnina. Element uszczelnienia zapory stanowi ekran glinowy. Konstrukcję zapory ilustruje przekrój pokazany na rys. nr 4.



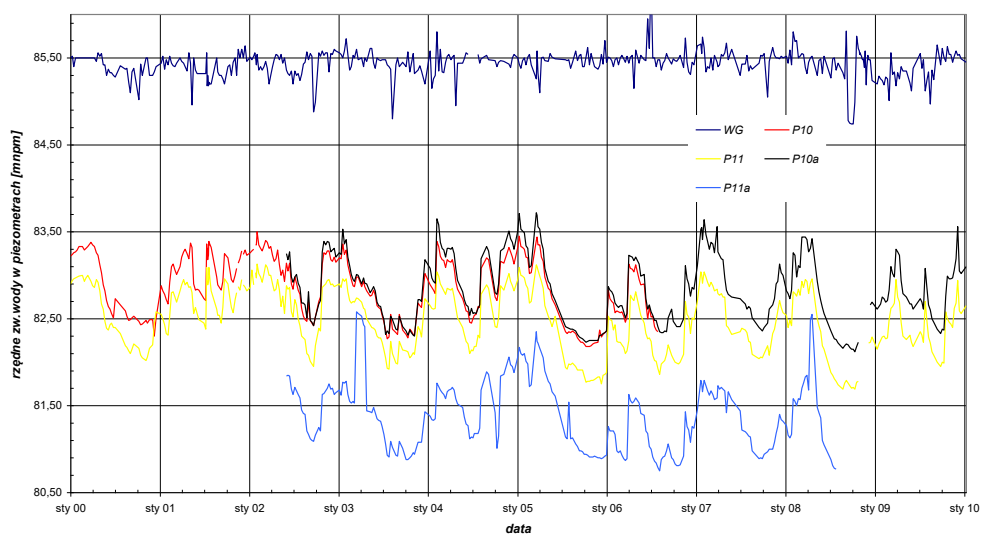
Rys. 4 – Typowy przekrój przez zapórę boczną na zbiorniku Kolbudy II





Rys. 5 – Obszar podmokły w podstawie skarpy odpowietrznej zapory nr 1

Występująca niemal przez cały rok na powierzchni terenu woda u podstawy skarpy (rys. 5), budziła wątpliwości co do szczelności zbiornika, jednak analizując przebiegi wahań zlokalizowanych tam piezometrów (rys. 6) można stwierdzić, że obserwowane położenie zwierciadła wody gruntowej w małym stopniu determinowane jest położeniem wody w zbiorniku, a zależy przede wszystkim od aktualnych opadów atmosferycznych. Świadczą o tym również amplitudy wahań poziomów zwierciadła wody: w zbiorniku – 68 cm, w piezometrze w koronie zapory P10a – 123 cm, a w piezometrze P11 w podstawie skarpy 100 cm (dane za 2009 rok). W poprzednich latach kontrast ten był jeszcze bardziej widoczny.



Rys. 6 – Przebiegi wahań zwierciadła wody w piezometrach zapory nr 1 w latach 2000-2010

Ukształtowanie terenu przyległego w tym miejscu do zapory jest nieckowate z najniższej położoną częścią w rejonie piezometrów. W odległości kilku metrów od podstawy skarpy znaleźć można stary, niedrożny rów melioracyjny, którego zadaniem było zbieranie wód powierzchniowych. Obecnie wody te spływają z obszaru niecki i z uwagi na słabo przepuszczalne podłoże (gliny i piaski pylaste) gromadzą się w jej najniższej położonej części.

Okresowym badaniem i oceną stanu technicznego budowli hydrotechnicznych elektrowni wodnej Bielkowo i innych obiektów na Raduni zajmują się od wielu lat specjaliści z Politechniki Gdańskiej z zakresu budownictwa wodnego. Na podstawie wieloletnich obserwacji kształtowania się zwierciadła wody w sieci piezometrów, pomiarów odkształceń sieci reperów kontrolowanych i oględzin terenowych można stwierdzić, że aktualny stan techniczny przedmiotowej zapory bocznej nr 1 jest dobry i nie ma zagrożenia dla jej stateczności i bezpieczeństwa w normalnych warunkach eksploatacji (Szudek i in., 2010).

Wśród zasadniczych czynników, które mogłyby doprowadzić do potencjalnej awarii lub katastrofy omawianej zapory wymienić można następujące zagrożenia:

- 1) nadmierna filtracja, rozwój zjawisk sufozyjnych, prowadzących do przebicia hydraulicznego, w wyniku przerwania lub osłabienia ciągłości uszczelnienia zapory, np. przez zwierzęta ryjące; rozwój zjawisk filtracyjnych można obserwować i z wyprzedzeniem podejmować odpowiednie naprawy – duże znaczenie ma tu okresowa kontrola stanu technicznego oraz codzienne przeglądy budowli wykonywane przez obsługę; należy w tym miejscu wspomnieć, że dla wszystkich obiektów hydrotechnicznych na Raduni okresowe oceny stanu technicznego wykonywane są co roku, podczas, gdy Prawo Budowlane wymaga sporządzania takich ocen co 5 lat – na podstawie doświadczeń i obserwacji zachowania się budowli można stwierdzić, że dla obiektów hydrotechnicznych jest to okres zdecydowanie zbyt długi, gdyż w razie wystąpienia nieprawidłowości nie można będzie dostatecznie wcześniej podjąć odpowiednich działań;
- 2) utrata stateczności skarpy odwodnej – najczęstszą przyczyną niestateczności jest zbyt gwałtowne obniżanie poziomu wody w zbiorniku – generuje się wówczas tzw. ciśnienie spływowe w nasyconej wodą skarpie odwodnej, które w określonych warunkach prowadzić może do powstania osuwiska; w przypadku omawianego obiektu zdarzenie takie może być następstwem innej awarii np. rurociągu derywacyjnego doprowadzającego wodę do elektrowni;
- 3) utrata stateczności skarpy odpowietrznej – najczęstszą przyczyną utraty stateczności skarpy odpowietrznej jest przelanie się wody ze zbiornika przez koronę zapory – dochodzi wówczas w pierwszej kolejności do rozmycia skarpy odpowietrznej, a w drugiej – do utraty stateczności całej zapory, ponieważ bez brakującej części korpusu, zaporę nie będzie w stanie przejść i zrównoważyć siłę parcia wody. W warunkach zbiornika Kolbudy II sytuacja taka nawet w warunkach nawalnych opadów jest mało prawdopodobna, gdyż zbiornik ten w przeważającej części jest wyniesiony ponad otaczający go teren, a więc spływ powierzchniowy będzie znacznie ograniczony. Kluczową rolę pełni tu kanał doprowadzający wodę do zbiornika (również wyniesiony ponad otaczający go teren) oraz rozrząd wody, odbywający się na jazie w Kolbudach. Innym przypadkiem stwarzającym zagrożenie utraty stateczności skarpy jest, gdy krzywa depresji wyklinowuje się na skarpie odpowietrznej np. w wyniku braku lub kolmatacji drenażu w podstawie skarpy. Stan taki grozi wyparciem filtracyjnym gruntu, a tym samym obsunięciem się skarpy.

Mimo dobrego stanu technicznego zapór bocznych zbiornika Kolbudy II właściciel i operator Elektrowni Wodnej Bielkowo – ENERGA Elektrownie Straszyn Sp. z o.o., zlecił wykonanie analizy potencjalnej awarii obiektu w celu realizacji zarządzania ryzykiem powodziowym.





## 5. Modelowanie hydraulicznych skutków katastrofy budowli piętrzącej.

W literaturze opisywane są różne metody prognozy parametrów wyrwy tworzącej się w zaporze ziemnej, czasu jej tworzenia się i hydrogramów wypływu przez wyrwę. Wyniki takich prognoz trudno jeszcze traktować jako w pełni wiarygodne, pomimo, że uwzględniają one takie czynniki, jak porost traw, krzewów na zaporze, utwardzoną nawierzchnię, czy występowanie w korpusie zapory rdzenia, mogące spowodować znaczne przedłużenie procesu rozmycia. Istnieje duża liczba różnych modeli umożliwiających symulację procesu tworzenia się wyrwy w zaporze ziemnej i prognozowania hydrogramu wypływu ze zbiornika w następstwie jej powstania. Charakterystykę różnych modeli tworzenia się wyrwy w zaporze ziemnej znaleźć można w pracy pod redakcją Szydłowskiego (2003). W przedstawionej w artykule analizie wykorzystano najprostsze podejście, przyjmując, że wytypowany, 20 metrowy odcinek zapory ulegnie całkowitemu i natychmiastowemu przerwaniu. Ta skrajna sytuacja, aczkolwiek mało realna, zapewnia powstanie po awarii korpusu zapory największej z możliwych fal wezbraniowych, a co za tym idzie najintensywniejszych skutków powodziowych. Biorąc pod uwagę cel pracy, którym była analiza potencjalnych skutków katastrofalnej powodzi, podejście takie wydaje się właściwe. Przyjmując taki scenariusz awarii wyznaczono hydrogram wypływu wody przez wyrwę a następnie wykonano numeryczną symulację powodzi na zagrożonym terenie.

W celu wykonania obliczeń symulacyjnych powierzchniowego przepływu wody w trakcie powodzi, niezbędne są dwa modele numeryczne. Pierwszy z nich jest to numeryczny model terenu (NMT), który powinien zawierać informację o rzeźbie, pokryciu i zagospodarowaniu terenu zagrożonego ewentualnym zalaniem. Dane z tego modelu są następnie wykorzystywane w modelu hydrodynamicznym.

Ukształtowanie powierzchni obszaru przepływu stanowi podstawę do określania lokalnych spadków terenu zagrożonego zalaniem, zaś informacje o zabudowie, pokryciu i zagospodarowaniu terenu są niezbędne do określenia granic i geometrii obszaru obliczeniowego oraz szorstkości powierzchni, po której następować może przepływ wody. Wspomniane dane opracowywane są obecnie głównie przy pomocy systemów geoinformatycznych (GIS). Przedstawioną symulację numeryczną powodzi wykonano wykorzystując NMT wykonany przez OPGK Gdańsk (2009) na zlecenie inwestora. W pracach geodezyjnych wykorzystano techniki fotogrametryczne. Materiałem źródłowym były zdjęcia z nalotu lotniczego wykonanego w lipcu 2009 roku. Model terenu wykonany został z rozdzielczością przestrzenną dochodzącą lokalnie do 1 metra (rys. 7).

Złożoność zjawiska przepływu wody ze swobodnym zwierciadłem w rzeczywistych warunkach terenowych powoduje, że właściwe odwzorowanie powodzi można uzyskać tylko dzięki modelowaniu przepływu dwuwymiarowego. Najczęściej stosowanym w hydrodynamicie matematycznym modelem przepływu wody ze swobodną powierzchnią są równania wody płytkiej (Abbott, 1979). Model ten wyprowadza się z ogólnych równań przepływu, stosując procedurę uśrednienia wzdłuż głębokości. Dodatkowo przyjmuje się, że opory w ruchu nieustalonym można szacować identycznie jak w ustalonym, używając w tym celu np. formuły Manninga (Kubrak i Nachlik, 2003).

W przypadku dwuwymiarowym wektorowa zachowawcza postać równań nieustalonego przepływu wody jest następująca:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (1)$$





$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + 0,5gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + 0,5gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ -gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$x, y$  – horyzontalne zmienne przestrzenne [m],

$t$  – czas [s],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],

$h$  – głębokość wody [m],

$u$  – składowa prędkości przepływu w kierunku  $x$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$v$  – składowa prędkości przepływu w kierunku  $y$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$S_o$  – spadek terenu (dna) w kierunku  $x$  i  $y$  [-],

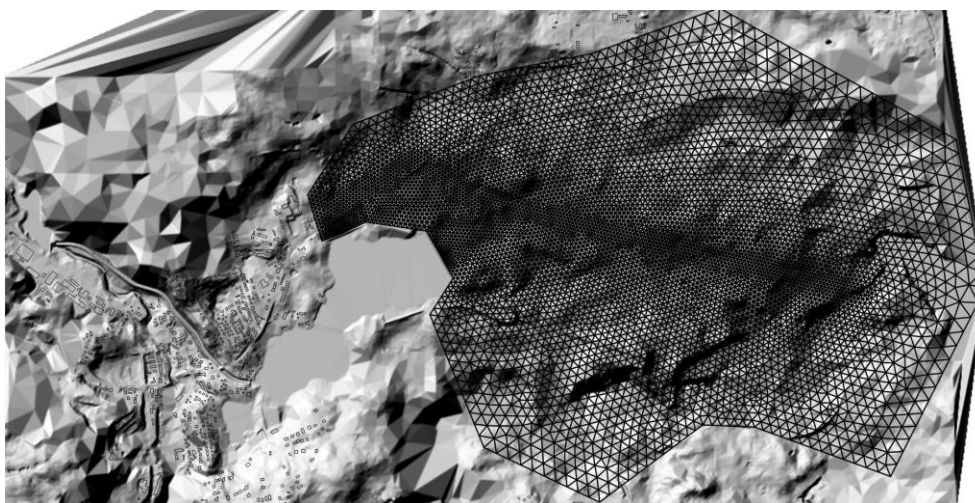
$S_f$  – spadek hydrauliczny w kierunku  $x$  i  $y$  [-].

Powyższy układ równań jest układem równań różniczkowych cząstkowych typu hiperbolicznego, którego rozwiązaniem dla zadanych warunków początkowych i brzegowych są funkcje  $u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  oraz  $h(x, y, t)$ .

W przyjętym rozwiązaniu do dyskretyzacji przestrzennej równań wybrano metodę objętości skończonych (MOS). Metoda ta ma swój szeroki opis w literaturze (LeVeque, 2002), stąd pominięto tu szczegóły rozwiązania. Numeryczne całkowanie równań modelu wykonano programując rozwiązanie w języku Fortran.

## 6. Symulacja numeryczna powodzi

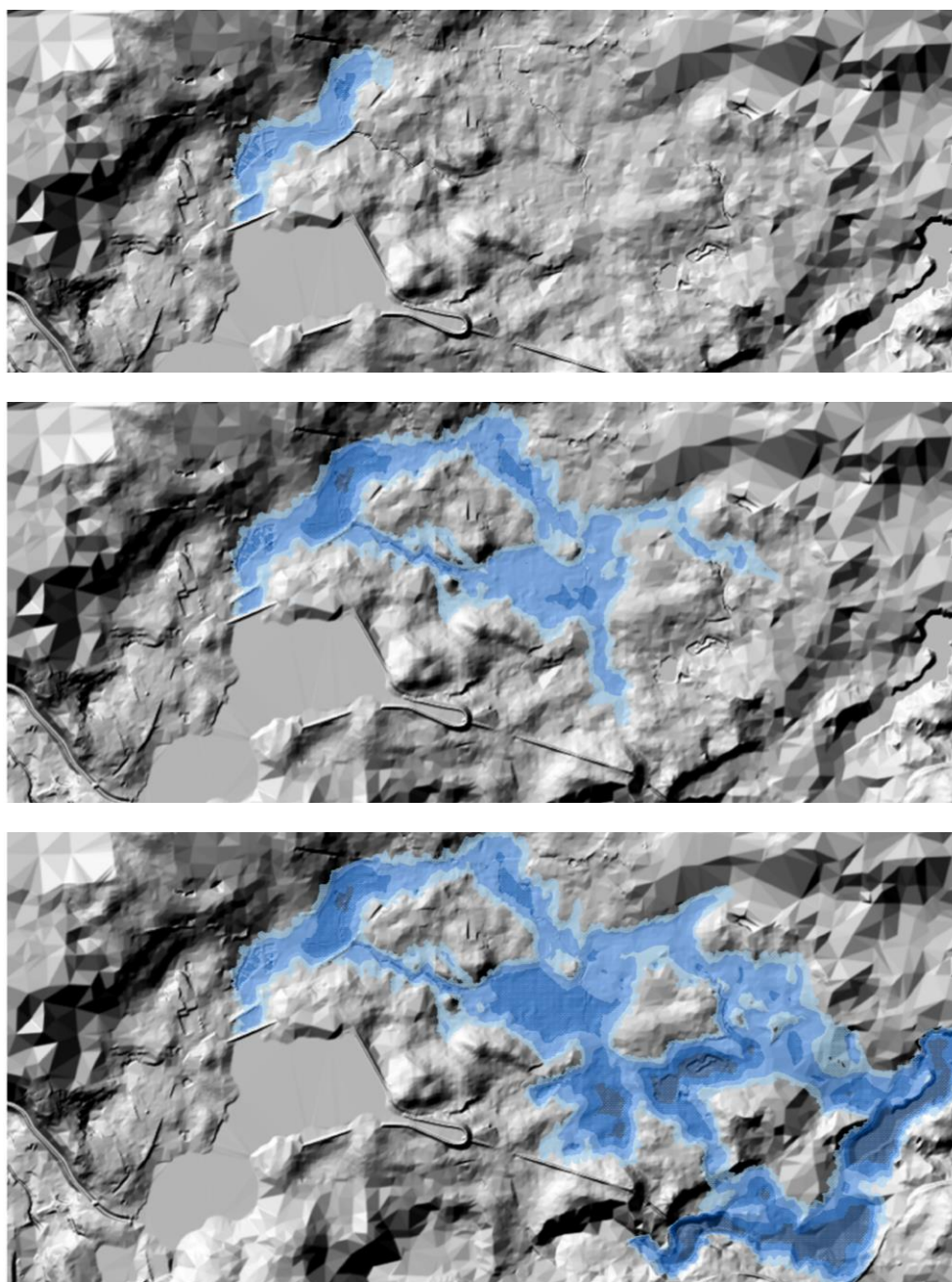
Jak wspomniano wcześniej w symulacji numerycznej zagrożenia powodziowego spowodowanego hipotetyczną katastrofą zapory nr 1 zbiornika Kolbudy II przyjęto najbardziej niekorzystny hydrogram wypływu przez wyrwę. Założono, że możliwy dopływ do zbiornika rzędu  $\text{SWQ}=21,3 \text{ m}^3/\text{s}$  jest równy odpływowi przez rurociąg do Elektrowni Wodnej Bielkowo. Oznacza to, że ujmowana do elektrowni woda nie przyspiesza opróżniania zbiornika i w związku tym tempo opadania zwierciadła zależy tylko od wartości wydatku wody przepływającej przez wyrwę w zaporze. Maksymalne, chwilowe natężenie wypływu przez wyrwę przekroczyło  $130 \text{ m}^3/\text{s}$ , przy maksymalnej rzędnej zwierciadła  $86,3 \text{ m npm}$ .



Rys. 7 – Numeryczny model terenu i siatka elementów obliczeniowych



Geometrię obszaru zagrożonego potencjalną powodzią przedstawiono na rys. 7. Została ona pokryta niestructuralną siatką numeryczną złożoną z 12463 trójkątnych elementów obliczeniowych. Siatka obliczeniowa została lokalnie zagęszczona wzdłuż zapory zbiornika aby lepiej odwzorować złożoną strukturę przepływu wody w pobliżu wyrwy. Obliczenia przeprowadzono z krokiem czasowym  $\Delta t = 0,1$  s, a całkowity czas symulacji wynosił 1,5 h. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 8. Poszczególne grafiki przedstawiają ewolucję zalewu powodziowego od chwili przerwania zapory. Zaprezentowane głębokości przedstawiono zgodnie z wytycznymi Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej (2010), w których odcienie koloru niebieskiego od najjaśniejszego oznaczają odpowiednio strefy zalewu o głębokości do 0,5 m, następnie do 2 m, do 4 m i ponad 4 m.



Rys. 8 – Zasięg powodzi i głębokość wody po czasie 15, 45 oraz 90 minut od awarii zapory.

## 7. Wnioski

Przedstawiona teoretyczna analiza technicznych przyczyn awarii ziemnych budowli piętrzących oraz praktyczny przykład numerycznej symulacji hydraulicznych skutków hipotetycznej katastrofy istniejącego obiektu, skłaniają do następujących wniosków:

1. Do utraty stateczności zapory ziemnej dochodzi najczęściej w wyniku rozmycia skarpy odpowietrznej i zapory jako całości, spowodowanego przelaniem się wody przez koronę zapory lub w wyniku rozwoju niekorzystnych zjawisk filtracyjnych (sufozja, przebicie hydrauliczne) w korpusie lub podłożu zapory.
2. Analiza katastrof budowli piętrzących, jakie dotychczas miały miejsce na świecie, w tym w Polsce, skłania do wniosku, że przy przelaniu się wody przez koronę budowli piętrzącej czynnikami sprzyjającymi katastrofom były: zbyt mała przepustowość budowli oraz błędy lub zaniedbania eksploatacji obiektu. Natomiast w przypadku katastrof wynikających z niekorzystnych zjawisk filtracyjnych w budowlach ziemnych, przyczyną ich były przecieki wzdłuż uprzywilejowanych dróg filtracji, które doprowadzały do przebicia hydraulicznego korpusu zapory. Wynika stąd też konieczność posiadania wiedzy o aktualnym stanie technicznym budowli piętrzących, pozwalającej na podejmowanie prac remontowych i zabezpieczających we właściwym czasie.
3. Okres eksploatacji obiektów piętrzących powyżej 50 lat, według oceny Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór (ICOLD), skutkuje zwiększoną ilością uszkodzeń i możliwości awarii. W przypadku zapór bocznych zbiornika Kolbudy II, mających ponad 80 lat, nie obserwuje się jednak zjawisk, które mogłyby świadczyć o zagrożeniu ich bezpieczeństwa. Wydaje się, że budowle hydrotechniczne, wówczas budowane, charakteryzują się znacznie większymi współczynnikami bezpieczeństwa, niż obecnie. Dla przykładu w świetle obowiązujących przepisów przepływ miarodajny dla budowli hydrotechnicznych EW Bielkowo wynosi  $Q_{M 0,5\%} = 41,6 - 49,6 \text{ m}^3/\text{s}$  (przepływ o prawdopodobieństwie  $p=0,5\%$ ), podczas gdy łączna przepustowość stopnia wynosi  $Q = 132,9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zdolność przepustowa urządzeń piętrzących elektrowni przewyższa więc ponad 2,5 krotnie wartość przepływu miarodajnego.
4. Przedstawione wyniki przykładowej symulacji przepływu fali powodziowej, powstającej w wyniku hipotetycznej awarii jednej z zapór zbiornika Kolbudy II, czytelnie obrazują zagrożenie powodziowe, jakie niesie ze sobą konstrukcja budowli piętrzących. Tego typu analizy wymagane są w Polsce prawnie, dla obiektów projektowanych. W przypadku analizowanego przykładu dla istniejącego obiektu intencją zlecniodawcy obliczeń była aktualizacja map zagrożenia powodziowego, które wykorzystywane są w procesie zarządzania ryzykiem powodziowym.
5. Opracowywanie map zagrożenia powodziowego uwzględniające takie parametry jak zasięg strefy zagrożenia powodziowego, głębokość zalewu i prędkość przepływu wody, mogą być pomocne przy opracowywaniu przez Centra Zarządzania Kryzysowego, strategii ochrony przeciwpowodziowej, zarządzaniu przez właścicieli i zarządców budowli i cieków wodnych ryzykiem powodziowym, wspomaganii administracji lokalnej w podejmowaniu decyzji dotyczących rozwoju zabudowy na terenach zagrożonych powodzi, a także przy opracowywaniu przez firmy ubezpieczeniowe systemów swoich produktów dla zainteresowanych osiedlaniem się lub inwestycjami na terenach zagrożonych.





## LITERATURA

- [1] Abbott M. B.: *Computational hydraulics: elements of the theory of free-surface flows*, London: Pitman 1979.
- [2] Ambrożewski Z.J., Fiedler K., Mazurczyk A.: *Ekspertyza prawdopodobnych przyczyn katastrofy zapory ziemnej na rzece Młynówce w Górowie Iławeckim*, OTKZ IMGW Warszawa, 2000.
- [3] Fiedler K. – *Awarie i katastrofy zapór – zagrożenia, ich przyczyny i skutki oraz działania zapobiegawcze*, IMGW, Warszawa, 2007
- [4] Garbrecht G.: *Wasserspeicher (Talsperren) in der Antike, Antike Welt*, 2nd special edition: Antiker Wasserbau, s.51-64, 1986.
- [5] Jarzębińska T., Jasińska E., Majewski W., Wołoszyn E., Zaradny H.: *Charakterystyka Raduni i jej zlewni w świetle Ramowej Dyrektywy Wodnej UE*, Gdańsk IBW PAN, 2005.
- [6] Kubrak J., Nachlik E.: *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*, SGGW Warszawa, 2003.
- [7] LeVeque R. J.: *Finite volume methods for hyperbolic problems*. New York: Cambridge University Press 2002.
- [8] Nachlik E., Kostecki S., Gądek W., Stochmal R.: *Strefy zagrożenia powodziowego*, Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego, Wrocław 2000.
- [9] *Numeryczny model terenu, obiekt Lublewo – Kolbudy – Bielkowo*, Okręgowe przedsiębiorstwo Geodezyjno – Kartograficzne OPGK, Gdańsk, 2009.
- [10] Szudek W., Sterpejkowicz-Wersocki W., Dunikowski R. – *Ocena stanu technicznego i stopnia bezpieczeństwa EW Bielkowo na rz. Raduni*, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Gdańsk, 2010.
- [11] Szydłowski M.: *Matematyczne modelowanie hydraulicznych skutków awarii zapór wodnych*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk, Zeszyt 22, Warszawa, 2003.

**Przedstawione w artykule wyniki są częścią pracy zleconej i sfinansowanej przez firmę ENERGA Elektrownie Straszyn Sp. z o.o.**

### Technical reasons and the consequences of failure of dams

**Summary:** Disasters of dams occur relatively rarely, but if such a disaster has to occur, its effects are usually quite severe and are associated with the need to incur huge expenditure, both for the reconstruction of the buildings, as well as to repair flood damage. The article discusses the main causes of dams failure and presents the results of computer simulation of the progress of potential flooding caused by a failure of the dam reservoir. As an example a hypothetical failure of the dam Kolbudy II at the hydropower plant Bielkowo is presented. The purpose of the simulation is the possibility to designate a potential range of flood risk zones and flood wave propagation time.

