

# **"Metodyka analizy zagrożeń powodziowych spowodowanych katastrofami zapór o wysokości $H \geq 15\text{m}$ "**

*Projekt PL0456*

*„Zagrożenia powodziowe powstałe w wyniku katastrof budowli piętrzących”*

**Kraków, marzec 2011 r.**

## Spis treści

<b>1. Wstęp.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Cel opracowania.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Zakres opracowania .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Dane wejściowe (Małgorzata Zielińska) .....</b>	<b>6</b>
4.1. Zakres gromadzonych danych .....	6
4.2. Produkty kartograficzne.....	8
4.3. Dane hydrologiczne .....	9
4.4. Dane z inwentaryzacji dolin powyżej i poniżej budowli piętrzących .....	10
4.4.1. Przekroje poprzeczne .....	11
4.4.2. Inwentaryzacja budowli inżynierskich zlokalizowanych w korycie rzeki .....	13
4.4.3. Inwentaryzacja wałów przeciwpowodziowych .....	15
4.5. Dane o budowlach piętrzących, ulegających katastrofie i ich zbiornikach oraz dane o budowlach piętrzących zlokalizowanych w dolinie poniżej .....	15
<b>5. Scenariusze katastrof (Małgorzata Zielińska, Michał Piórecki) .....</b>	<b>17</b>
5.1. Zasady tworzenia scenariuszy katastrof .....	17
5.2. Identyfikacja możliwych scenariuszy katastrofy zapory betonowej .....	18
5.2.1. Uszkodzenie korpusu zapory .....	19
5.2.2. Przelanie wody przez koronę zapory .....	19
5.2.3. Stan napełnienia zbiornika.....	20
5.2.4. Przepustowość urządzeń upustowych.....	21
5.3. Identyfikacja możliwych scenariuszy katastrofy zapory ziemnej .....	21
5.3.1. Warunki hydrologiczne w zlewni powyżej zbiornika przed katastrofą.....	22
5.3.2. Stan napełnienia zbiornika przed katastrofą .....	23
5.3.3. Kształt, rozmiar i umiejscowienie wyrwy .....	23
<b>6. Opracowanie modeli hydrodynamicznych (Radosław Radoń, Michał Piórecki) .....</b>	<b>28</b>
6.1. Model hydrodynamiczny katastrofy zapory .....	29
6.1.1. Odzworowanie czaszy zbiornika i kształtu zapory.....	29
6.1.2. Reguły sterowania odpływem ze zbiornika .....	30
6.1.3. Model katastrofy zapory .....	31
6.2. Model hydrodynamiczny doliny poniżej zapory .....	33
6.2.1. Schemat doliny .....	33
6.2.2. Przekroje poprzeczne.....	34
6.2.3. Identyfikacja parametrów hydraulicznych .....	36
6.2.4. Obiekty inżynierskie .....	37
6.2.5. Warunki brzegowe.....	38
6.2.6. Kalibracja i weryfikacja.....	39
<b>7. Opracowanie stref zalewowych (Małgorzata Zielińska, Radosław Radoń) .....</b>	<b>44</b>
<b>8. Ocena zagrożenia dla terenów położonych poniżej zapory (Radosław Radoń).....</b>	<b>48</b>

<b>9. Wskazania dotyczące wyboru oprogramowania (Radosław Radoń, Michał Piórecki).....</b>	<b>49</b>
9.1. Określenie typu budowli, która będzie poddawana analizie .....	49
9.2. Wskazanie czy analizie podlegać będzie sam obiekt, czy również dolina poniżej ....	49
9.3. Określenie czy w analizie transformacji hydrogramu w dolinie poniżej zapory będą uwzględniane obiekty inżynierskie.....	50
9.4. Ustalenie sposobu odwzorowania katastrofy zapory .....	50
9.5. Określenie sposobu modelowania doliny poniżej (model jedno czy dwuwymiarowy) .....	51
9.6. Określenie celu analizy i sposobu prezentacji wyników .....	52
<b>10. Literatura .....</b>	<b>54</b>

## 1. Wstęp

Niniejsza metodyka jest wynikiem realizacji projektu nr PL0456 pt. „Zagrożenia powodziowe powstałe w wyniku katastrof budowli piętrzących”. Jest ona próbą zebrania i określenia wytycznych oraz zaleceń, które zdaniem autorów powinny być brane pod uwagę w przypadku realizacji projektów o podobnym charakterze, nie zamykając jednocześnie drogi do ich indywidualnej modyfikacji lub rozbudowy.

## 2. Cel opracowania

Opracowania w zakresie szacowania zagrożeń powodziowych będących rezultatem katastrof zapór wodnych, jakie pojawiały się do tej pory w naszym kraju, bazowały na ogół na tradycyjnych technikach obliczeniowych i przyjętych uproszczeniach co do przebiegu zjawiska katastrofy i transformacji fali powodziowej w dolinie poniżej zapory.

Dostępne dzisiaj narzędzia hydroinformatyczne (w tym jedno- i dwuwymiarowe modele hydrodynamiczne ruchu nieustalonego), materiały geodezyjne i kartograficzne (numeryczny model terenu, ortofotomapy) oraz systemy informacji przestrzennej (GIS), pozwalają na prowadzenie kompleksowych analiz takich zagrożeń w sposób zapewniający wysoką wiarygodność uzyskanych wyników, dając równocześnie w zasadzie nieograniczone możliwości co do mnożenia różnych wariantów obliczeń. Dzięki takiemu podejściu, możliwe jest wykonanie obliczeń dla całego wachlarza scenariuszy katastrof, uwzględniających zarówno odmienne warunki początkowe, czynniki warunkujące mechanizm rozwoju samej katastrofy, jak również specyfikę ukształtowania i zagospodarowania terenów położonych w dolinie poniżej zbiornika. W efekcie finalnym, w oparciu o analizę uzyskanych wyników wielowariantowych obliczeń, określić można prawdopodobne zasięgi stref zalewowych w dolinie w przypadku katastrofy zapory, a także odpowiadające im maksymalne przepływy, głębokości i prędkości wody w poszczególnych przekrojach obliczeniowych.

Wyniki takich obliczeń, a zwłaszcza maksymalne zasięgi stref zalewowych oraz czasy dojścia czoła fali powodziowej, stanowić powinny podstawowy materiał wyjściowy dla jednostek zarządzania kryzysowego, pozwalający na podejmowanie decyzji co do

zakresu i sposobu prowadzenia ewentualnej akcji ewakuacyjnej w przypadku pojawienia się zagrożenia wywołanego katastrofą zapory.

Jak zostało podkreślone powyżej, głównym celem analiz zagrożenia powodziowego powstałego w wyniku katastrof budowli piętrzących jest określenie maksymalnych zasięgów stref zalewowych dla wybranych, najbardziej reprezentatywnych scenariuszy rozwoju wydarzeń. Takie podejście kładzie największy nacisk na właściwe odwzorowanie warunków przepływu wody w dolinie poniżej zapory, a także dobór odpowiednich założeń co do warunków początkowych panujących w zlewni i zbiorniku przed katastrofą, stawiając na drugim planie dokładność odwzorowania i opisu samego przebiegu zjawiska katastrofy obiektu. W przypadku opisu katastrofy zapory betonowej przyjmuje się uogólnienia związane przede wszystkim z opisem kształtu uszkodzonej części przekroju zapory i jego zmiennością w czasie. Założenia uogólniające dla zapór ziemnych dotyczą przebiegu samego procesu sufozji oraz powstawania wyrwy i polegają na generalizacji parametrów geotechnicznych gruntu oraz założeń co do kierunków i tempa rozwoju, a także maksymalnego rozmiaru i ostatecznego kształtu wyrwy. Zjawiska te są od lat przedmiotem licznych badań modelowych oraz tematem wielu artykułów i publikacji. Stworzenie dokładnego matematycznego ich opisu jest jednak zadaniem niezwykle trudnym, z uwagi na konieczność właściwego opisanie porowatej struktury gruntu, wypełnienia porów wodą oraz wyboru właściwej ścieżki, która zapoczątkuje zjawisko filtracji. Pomimo wieloletnich prób, nadal poszukuje się prawidłowego matematycznego sposobu opisu tych zjawisk. Z tego też względu ich uwzględnienie w tego typu opracowaniach z założenia musi bazować na określonych uogólnieniach, nie mających jednak pierwszoplanowego wpływu na końcowe jego rezultaty.

### **3. Zakres opracowania**

Zakres przedmiotowej metodyki został opracowany w oparciu o wyniki projektu nr PL0456 pt. „Zagrożenia powodziowe powstałe w wyniku katastrof budowli piętrzących”, a także dostępną literaturę w przedmiotowym zakresie. Metodykę można podzielić na sześć głównych rozdziałów dotyczących odpowiednio:

- Określenia zakresu danych wejściowych do opracowania,
- Opracowania scenariuszy powodziowych,

- Opracowania modeli hydrodynamicznych,
- Opracowania stref zalewowych,
- Oceny zagrożenia dla terenów położonych poniżej zapory,
- Wskazań dotyczących wyboru oprogramowania.

## **4. Dane wejściowe**

### **4.1. Zakres gromadzonych danych**

Opracowanie modelu hydrodynamicznego umożliwiającego symulację katastrofy budowli piętrzącej oraz propagację powstałej w wyniku katastrofy fali wezbraniowej, w dolinie poniżej, wymaga przygotowania danych wejściowych do modelu. Zarówno jakość opracowanego modelu jak i efekt końcowy obliczeń, którym są mapy zalanych obszarów uzależnione są od dokładności oraz aktualności danych wejściowych. Także jakość analiz przestrzennych, przeprowadzanych na obszarach zalanych, zależy w istotny sposób od danych wejściowych.

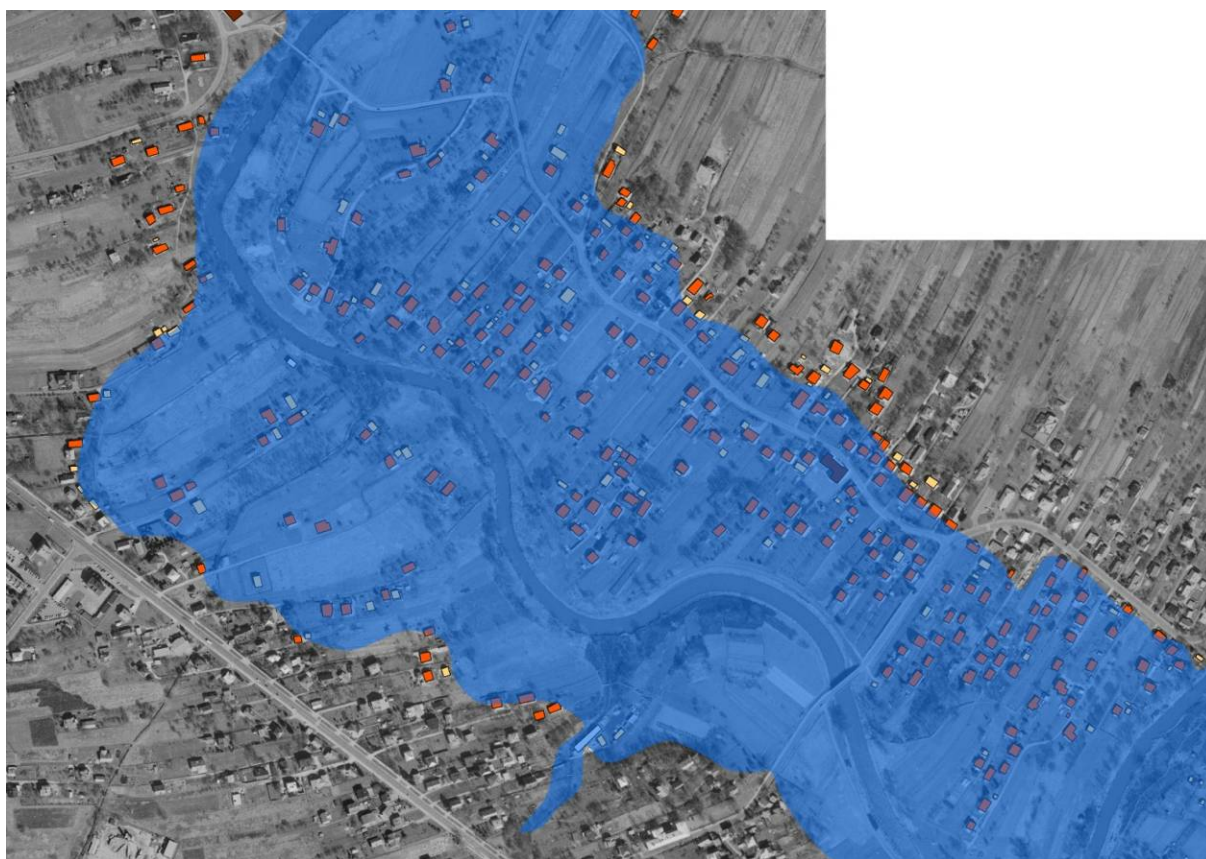
Pozyskanie danych wejściowych wymaga przeprowadzania pomiarów terenowych, prac analitycznych polegających na przystosowaniu zgromadzonych danych do potrzeb posiadanego modelu matematycznego oraz przeprowadzeniu specjalistycznych obliczeń wyznaczających niezbędne charakterystyki.

Dane oraz materiały potrzebne do opracowania modeli matematycznych umożliwiających modelowanie katastrofy budowli piętrzących oraz wyznaczenie obszarów zalanych można podzielić na cztery grupy:

- Produkty kartograficzne,
- Dane hydrologiczne,
- Dane z inwentaryzacji dolin powyżej i poniżej budowli piętrzących,
- Dane o budowlach piętrzących, ulegających katastrofie i ich zbiornikach oraz dane o budowlach inżynierskich zlokalizowanych w dolinie poniżej.

Zależnie od celu wykonywanych obliczeń, a także zakresu wymaganych analiz przestrzennych może być konieczne zebranie informacji o zalewach historycznych, wytypowanie terenów wymagających ochrony przed zalaniem z uwagi na ich znaczenie gospodarcze, kulturowe, społeczne, terenów stwarzających zagrożenie dla

ludzi (np. przemysł chemiczny). Wyznaczenie tych obszarów wymaga konsultacji z beneficjentami opracowania. Informacje można pozyskać w Urzędach Gmin i Miast, Starostwach Powiatowych, Zarządach Melioracji i Urzędach Wodnych oraz Regionalnych Zarządach Gospodarki Wodnej. Wszystkie wytypowane obszary należy w ramach prac kameralnych nanieść na osobne warstwy w systemach GIS. Należy także przygotować warstwy z naniesioną zabudową obszaru oraz infrastrukturą drogową. Jedną z metod jest wektoryzacja obiektów na podkładach map topograficznych lub ortofotomapach. Można także z rejestrów publicznych Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej pozyskać Bazę Danych Obiektów Topograficznych (BDOT) zawierającą warstwy przestrzenne dla różnych rodzajów zagospodarowania terenu (budynki, drogi itp.).



Rysunek 1. Wektoryzacja budynków na zalanym obszarze.

## 4.2. Produkty kartograficzne

Podstawowymi produktami kartograficznymi, które należy pozyskać dla całego obszaru doliny są: numeryczny model terenu (NMT), ortofotomapy w skali 1:5000, mapy topograficzne w skali 1:10000, granice i powierzchnie jednostek podziału terytorialnego.

Ortofotomapy i mapy topograficzne wykorzystywane są na etapie opracowywania modelu hydrodynamicznego a także interpretacji i wizualizacji wyników obliczeń w systemach GIS. Granice administracyjne gmin i powiatów umożliwiają przeprowadzenie analiz przestrzennych dedykowanych przedstawicielom władz samorządowych. Numeryczny model terenu z jednej strony, jest jednym z kluczowych elementów wykorzystywanych na etapie opracowywania modelu hydrodynamicznego doliny poniżej zbiornika zaporowego, a także pozwala na usprawnienie procesu związanego z generowaniem rozkładu głębokości na obszarach zalanych skracając znacznie czas opracowania map. Umożliwia on również opracowanie części przekrojów poprzecznych (w zakresie teras doliny), pozwalając tym samym na zmniejszenie zakresu prac terenowych. Należy pamiętać, iż w trakcie prowadzonych czynności mających na celu przygotowanie numerycznego modelu terenu dla potrzeb jego wykorzystania przy pracach związanych z analizą zjawiska katastrofy zapory oraz transformacji fali powodziowej w dolinie poniżej, należy go uszczegółowić wprowadzając wyniki pomiarów geodezyjnych obiektów liniowych (takich jak obwałowania lub nasypy drogowe) lub kubaturowych, które mogą istotnie wpływać na zasięg i prędkość fali.

**Dla analiz związanych z katastrofą zapory i transformacją fali powodziowej w dolinie poniżej sugeruje się pozyskanie NMT metodą lotniczego skaningu laserowego (LIDAR), który jest obecnie najszybszą metodą tworzenia cyfrowego modelu wysokości terenu. Dla terenów gęsto zalesionych w celu dokonania właściwej interpretacji wysokości terenu zaleca się wykonywanie pomiarów w okresie jesiennym lub wiosennym. Dokładność pomiaru wysokości powinna być większa niż 0,5 m. Sugeruje się, aby czasie przeprowadzanych nalotów wykonać zdjęcia lotnicze celem opracowania aktualnej ortofotomapy.**

**W przypadku, gdy obszar objęty analizą znajduje się na obszarze południowo - wschodniej Polski, gdzie w ramach opracowywania Systemu Identyfikacji**



**Działek Rolnych (tzw. LPIS – Land Parcel Identification System) sporządzono ortofotomapy w skali 1:13 000, których produktem ubocznym jest NMT, możliwe jest wykonanie opracowania w oparciu o przedmiotowy produkt.**

Wystarczającą jakość ww. produktu potwierdzono w ramach prac wykonanych w trakcie realizacji Projektu PL0456 „Zagrożenia powodziowe powstałe w wyniku katastrof budowli piętrzących”. Analiza powierzchni strefy zalewowej dla 44 wariantów przerwania zapory wykazała, iż różnica pomiędzy powierzchniami stref wygenerowanych w oparciu o NMT pochodzący z LPIS oraz NMT opracowanego technologią LIDAR nie przekracza 2,5%.

### **4.3. Dane hydrologiczne**

Dane hydrologiczne są niezbędne do kalibracji i weryfikacji opracowanych modeli hydrodynamicznych oraz sformułowania warunków brzegowych. Zakres zgromadzonych danych zależy od decyzji czy pozyskiwane są „surowe” dane hydrologiczne i obliczenia wykonywane są przez autorów opracowania, czy wykonanie obliczeń zlecane jest innym specjalistom. W przypadku samodzielnego opracowywania danych źródłowych należy pozyskać dane umożliwiające wyznaczenie charakterystyk opisanych poniżej.

Do kalibracji i weryfikacji modelu potrzebne są hydrogramy stanów i przepływów dla co najmniej dwóch wezbrań historycznych. Kalibracji i weryfikacji modelu dokonuje się na wskazania wodowskazów zlokalizowanych na modelowanym cieku. Do prawidłowego określenia warunków brzegowych, dla tych samych wezbrań historycznych, potrzebne są hydrogramy stanów i przepływów dla pozostałych wodowskazów zlokalizowanych w dolinie. W przypadku braku wodowskazu zamykającego modelowany odcinek rzeki tworzony jest model sieci rzecznej składającej się z modelowanej rzeki i recypienta ograniczonego posterunkami wodowskazowymi znajdującymi się powyżej i poniżej ujścia do odbiornika modelowanej rzeki. Dla tych wodowskazów potrzebne są także hydrogramy stanów i przepływów.

Prawidłowo zidentyfikowany i zweryfikowany model umożliwia przeprowadzenie obliczeń realizujących opracowane scenariusze katastrof. Najbardziej prawdopodobnymi warunkami nastąpienia katastrofy jest praca budowli podczas

ekstremalnego wezbrania powodziowego. Dlatego potrzebne są także hipotetyczne hydrogramy przepływów obliczane dla przepływów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia. **Zaleca się aby dla potrzeb analiz związanych z katastrofą zapór o wysokości  $\geq 15\text{m}$  uwzględniać przepływy występujące raz na 1000 i 10000 lat.**

Dopływ z rzek kontrolowanych (posiadających wodowskazy) uwzględniany jest w modelu jako dopływ punktowy. Wymaga to obliczenia hydrogramu przepływu w miejscu dopływu do modelowanej rzeki. Zasilanie ze strony rzek nie objętych monitoringiem wodowskazowym, uwzględniane jest jako dopływ ze zlewni różnicowych rozłożony wzdłuż analizowanych segmentów rzeki głównej w wyniku zastosowania metod: interpolacyjnej lub ekstrapolacyjnej, w zależności od dostępnych danych hydrologicznych. Do wyznaczenia dopływów, o których mowa wyżej, niezbędne jest pozyskanie danych o powierzchni zlewni w charakterystycznych punktach doliny.

**W każdym przypadku należy pozyskać współrzędne geograficzne analizowanych posterunków wodowskazowych.** Wynika to z faktu, że kilometraż rzeki uzyskany w trakcie geodezyjnych pomiarów terenowych może się różnić od kilometrażu rzeki uzyskanego z innych źródeł. Zależnie od źródła danych podawany jest także kilometraż przekroju wodowskazowego. Różnice mogą dochodzić do kilku kilometrów. **Współrzędne geograficzne wodowskazu umożliwiają naniesienie ich na mapy i precyzyjne wyznaczenie pomierzonego przekroju właściwego do kalibracji i weryfikacji modelu.**

#### **4.4. Dane z inwentaryzacji dolin powyżej i poniżej budowli piętrzących**

Inwentaryzacja doliny prowadzona jest w trakcie geodezyjnych pomiarów terenowych a jej zakres jest następujący:

- Wyznaczenie i pomiarzenie poprzecznych przekroi korytowych i dolinowych,
- Geodezyjna inwentaryzacja budowli inżynierskich znajdujących się w korycie rzeki,
- Wyznaczenie lokalizacji oraz pomiarzenie obwałowań przeciwpowodziowych.

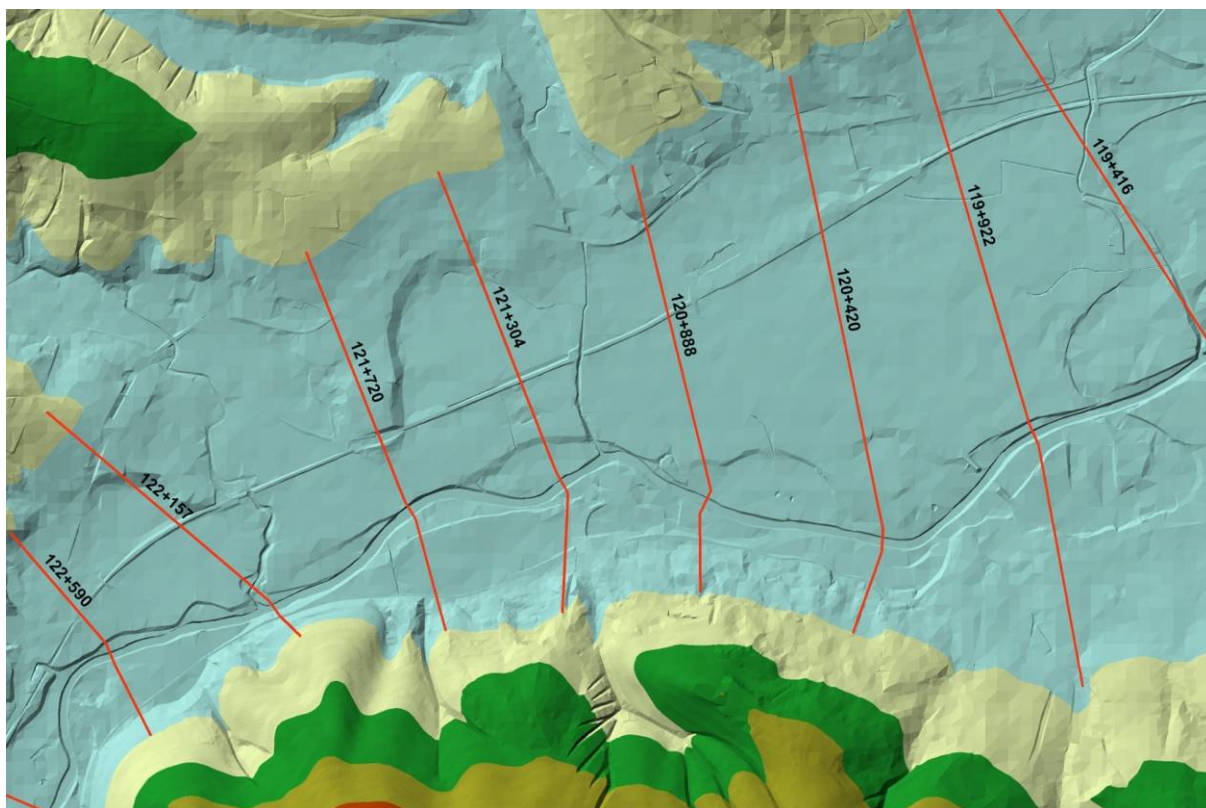
#### 4.4.1. Przekroje poprzeczne

Wyznaczanie przekroi poprzecznych uzależnione jest od zastosowanego modelu matematycznego. Dla modeli jednowymiarowych przekroje poprzeczne prowadzone są przez całą dolinę rzeki. Obejmują koryto rzeki oraz tarasy zalewowe. Dla modeli dwuwymiarowych wyznaczana jest tylko część przekroju dolinowego obejmująca koryto rzeki oraz pas przyległego terenu o szerokości 10-20 metrów. Przekroje korytowe muszą być wyznaczona przez pomiary geodezyjne. Pomiary geodezyjne wymuszone są przez fakt, że żaden numeryczny model terenu nie daje możliwości wyznaczenia części podwodnej koryta rzeki. Przekroje przez tarasy zalewowe w zależności od posiadanych materiałów mogą być wyznaczone przez pomiar geodezyjny w terenie lub zostać wygenerowane z numerycznego modelu terenu. Mierzony metodami geodezyjnymi pas przylegający do koryta rzeki pozwala na połączenie geodezyjnych przekrojów korytowych z numerycznym modelem terenu.

Przekroje korytowe powinny być lokalizowane prostopadłe do osi rzeki. Powinny znajdować się w miejscach gdzie następuje zmiana natężenia przepływu lub zmiana kształtu koryta a także w miejscach występowania infrastruktury drogowej lub budowli piętrzących. Dopuszczalne odległości pomiędzy przekrojami uzależnione są od charakteru rzeki oraz stosowanego do obliczeń modelu matematycznego. **Zaleca aby odległości pomiędzy kolejnymi przekrojami wykonywanymi na potrzeby modeli jednowymiarowych były nie mniejsze niż 500 m dla rzek o charakterze górskim i 1500 m dla rzek nizinnych. Natomiast odległości pomiędzy przekrojami korytowymi wyznaczanymi dla modeli dwuwymiarowych powinny być nie mniejsze niż 250m.**

Przekroje przez tarasy zalewowe wyznaczane są prostopadłe do głównego kierunku biegu doliny. Oznacza to że droga przepływu na tarasach zalewowych może być krótsza niż długość rzeki mierzona w korycie, a połączony przekrój przez tarasy zalewowe oraz koryto rzeki jest linią łamaną. Bez względu na metodę wyznaczania przekrojów (pomiary geodezyjne czy pomiary geodezyjne połączone z danymi z numerycznego modelu terenu), rzędne na obu końcach wszystkich przekrojów poprzecznych powinny być wyznaczone z dostatecznym zapasem, tak aby wyliczone zwierciadło wody było położone niżej. Jeżeli w wyniku przeprowadzonych obliczeń

okaże się, że ten warunek nie jest spełniony należy ponownie wyznaczyć przekrój poprzeczny i powtórzyć obliczenia.



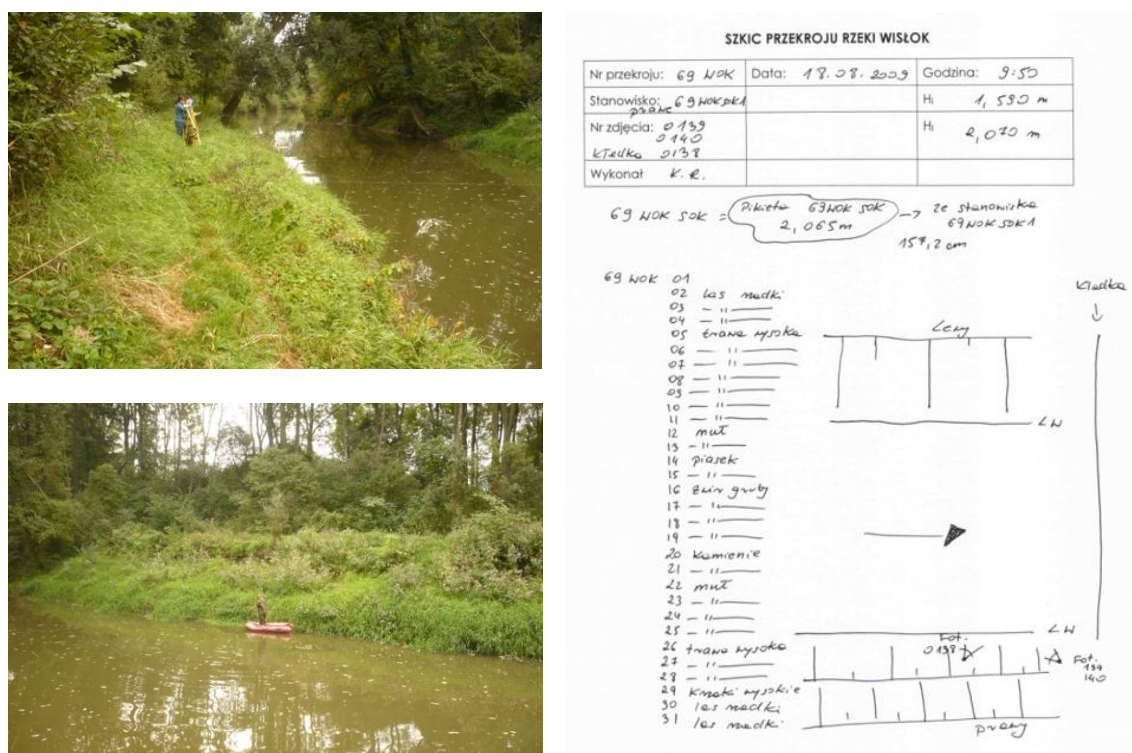
Rysunek 2. Przekroje korytowe i dolinowe naniesione na NMT.

Dla każdego przekroju należy wykonać dokumentację fotograficzną, oraz szkic polowy. Na szkicu należy nanieść lokalizację i numery punktów pomiarowych oraz kierunek z którego zostało zrobione zdjęcie. Lokalizacja przekroju na rzece definiowana jest najczęściej przez jej kilometraż wyznaczony z dokładnością do 1 m. Każde wezbranie może powodować zmiany przebiegu rzeki, dlatego wyznaczony podczas pomiarów terenowych kilometraż może się różnić od kilometrażu historycznego określającego położenie charakterystycznych przekrojów rzeki takich jak dopływy czy lokalizacja budowli inżynierskich.

Wynikiem przeprowadzonych prac jest zestawienie tabelaryczne zawierające wszystkie niezbędne informacje umożliwiające naniesienie przekrojów na mapy oraz wprowadzenie przekrojów poprzecznych do zastosowanego oprogramowania. Zestawienie powinno zawierać także rzędne położenia zwierciadła wody w przekrojach oraz informacje o pokryciu terenu. Forma pokrycia terenu wykorzystywana jest do określenia współczynników szorstkości – parametru

mającego wpływ na dokładność obliczeń położenia zwierciadła wody. Przeprowadzone pomiary oraz dokumentacja pomiarów umożliwiają przygotowanie i wprowadzenie danych opisujących przekroje dolinowe do posiadanych modeli. Geometria przekroju opisana jest za pomocą łamanej, której wierzchołki położone są w charakterystycznych punktach przekroju.

Dokumentowanie przeprowadzonych prac pomiarowych (szkice, zdjęcia, zestawienia tabelaryczne w formie papierowej – sprawozdanie i elektronicznej) wymagane jest dla wszystkich prac wykonywanych w terenie.

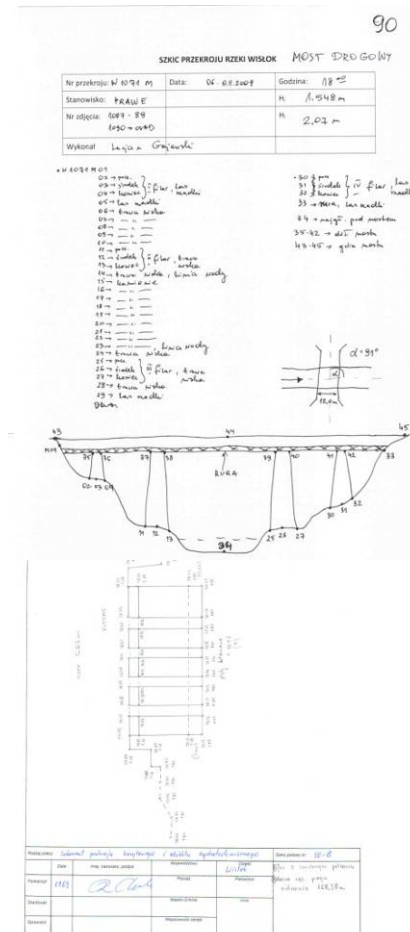


Rysunek 3. Przykład dokumentacji z pomiarów przekrojów korytowych.

#### 4.4.2. Inwentaryzacja budowli inżynierskich zlokalizowanych w korycie rzeki

Budowlami inżynierskimi znajdującymi się w korycie rzeki są budowle piętrzące (zapory, jazy śluzy, stopnie wodne, zapory przeciwrumowiskowe) oraz mosty i kładki dla pieszych. Pomiary przekrojów dolinowych posiadających budowle inżynierskie należy wykonywać analogicznie jak dla przekrojów pozbawianych obiektów inżynierskich. **Dodatkowo zachodzi konieczność wykonania pomiarów punktów**





Rysunek 4. Przykład dokumentacji z pomiarów terenowych dla przekrojów korytowych z urządzeniami inżynierskimi (most, jaz).

Uwzględnianie mostów w modelu wymaga uzupełnienia obszaru przepływu o dodatkowe przekroje zlokalizowane w niewielkiej odległości poniżej i powyżej przekroju z budowlą inżynierską. Pozwala to uniknąć błędów numerycznych, które występują gdy światło mostu nie mieści się w geometrii sąsiednich przekrojów powyżej i poniżej budowli. Dodatkowe przekroje mogą być pomierzone w trakcie prac terenowych lub wyinterpolowane w oparciu o istniejące przekroje pomiarowe. W przypadku budowli piętrzących wymagane jest pomierzenie przekroju w górnym

i dolnym stanowisku oraz w przekroju linii konstrukcji obiektu tam gdzie umieszczone są przelewy.

#### **4.4.3. Inwentaryzacja wałów przeciwpowodziowych**

Inwentaryzacja wałów przeciwpowodziowych polega na określeniu ich rzeczywistej lokalizacji w terenie oraz wyznaczeniu położenia w korpusie obwałowania śluz wałowych. Dla potrzeb wykonania opracowań związanych z określeniem zagrożenia powodziowego spowodowanego katastrofami budowli piętrzących, mierzone powinny być współrzędne X, Y, H punktów położonych u podstawy skarpy odwodnej wału przeciwpowodziowego oraz na jego koronie. Pomiary zaleca się wykonywać w każdym przekroju dolinowym, w którym występuje obwałowanie. Należy także wykonać pomiary dodatkowe pomiędzy przekrojami dolinowymi dla punktów położonych analogicznie jak w przekrojach dolinowych (podstawa skarpy odwodnej, korona zapory). **Zaleca się aby odległość pomiędzy kolejnymi punktami wzdłuż osi wału przeciwpowodziowego nie była większa niż 50 m.**

#### **4.5. Dane o budowlach piętrzących, ulegających katastrofie i ich zbiornikach oraz dane o budowlach piętrzących zlokalizowanych w dolinie poniżej**

Informacje dotyczące budowli piętrzącej zbierane są pod kątem opracowania prawdopodobnych scenariuszy katastrofy oraz pozyskania danych umożliwiających ich symulację. Zestaw niezbędnych danych uzależniony jest od posiadanego oprogramowania oraz przyjętych w oprogramowaniu założeń uogólniających w zakresie odwzorowania obiektu.

**W każdym przypadku należy zebrać dane o lokalizacji budowli piętrzącej, jej konstrukcji, urządzeniach upustowych oraz podłożu na którym jest posadowiona. Dla wszystkich typów zapór (ziemne, betonowe) podstawowymi danymi dotyczącymi korpusu są długość, najniższa rzędna posadowienia, rzędna korony, szerokość korony i jej kształt. W przypadku zapory betonowej danymi dodatkowymi są ilość i wielkość sekcji betonowych, a w przypadku zapór ziemnych parametry gruntu, z którego został wykonany korpus, parametry i**

**rodzaj uszczelnienia korpusu i ubezpieczenia skarp, a także ich nachylenia. Wymaganymi danymi dotyczącymi urządzeń upustowych jest ich kształt, lokalizacja w korpusie zapory oraz przede wszystkim krzywe wydatków, uzależnione od poziomu wody w zbiorniku oraz położenia zamknięć.**

Dla opracowywania scenariuszy katastrofy cennych informacji dostarcza także dokumentacja powykonawcza budowli. Przed opracowaniem scenariuszy warto także zapoznać się z ocenami stanu technicznego i stanu bezpieczeństwa budowli, a także z wynikami zrealizowanych badań, zalecanych do wykonania w ramach przeprowadzanych ocen.

Bardzo ważnym elementem opracowywanego modelu hydrodynamicznego jest model zbiornika, który w wyniku katastrofy zostaje opróżniony. Opracowanie modelu zbiornika wymaga pozyskania informacji o wszystkich dopływach zasilających zbiornik. Niezbędne jest także pozyskanie krzywej pojemności zbiornika – tj. zależności pomiędzy pojemnością a rzędną zwierciadła wody w zbiorniku. Najlepszym źródłem informacji o geometrii zbiornika są wyniki pomiarów batymetrycznych. Do przygotowania scenariuszy katastrof potrzebne są także charakterystyczne poziomy piętrzenia i odpowiadające im pojemności zbiornika.

W przypadku, gdy w dolinie poniżej znajduje się inny zbiornik należy pozyskać analogiczne dane dla tego zbiornika. Wynik symulacji katastrofy muszą rozstrzygnąć czy zbiornik położony poniżej jest w stanie bezpiecznie przejąć falę wezbraniową powstałą w wyniku katastrofy budowli piętrzącej położonej powyżej czy też ulegnie katastrofie.

W przypadku gdy posiadane oprogramowanie, do odtworzenia pracy zbiornika, wymaga określenia zasad sterowania urządzeń upustowych należy te dane pozyskać. Zasady sterowania urządzeniami upustowymi uzależniają wielkość odpływu ze zbiornika od takich parametrów jak: dopływ do zbiornika, aktualne położenie zwierciadła wody oraz warunki eksploatacji (eksploatacja w okresie niżówek, normalna eksploatacja, pogotowie powodziowe, eksploatacja powodziowa).

Wszystkie niezbędne dane dotyczące budowli piętrzących i zbiorników są w posiadaniu administratorów lub właścicieli tych obiektów.



Podsumowując cały rozdział dotyczący przygotowywania danych wejściowych do opracowania, należy stwierdzić, iż ich pozyskanie pochłania na ogół znaczny procent czasu oraz kosztów potrzebnych na realizację projektu. **Zaleca się jednak aby nie stosować danych archiwalnych starszych niż kilka lat, bez ich wcześniejszej weryfikacji a także sprawdzających pomiarów kontrolnych.** Każde wezbranie może powodować zmiany przebiegu rzeki oraz kształtu jej koryta. Należy też sprawdzić jak w ostatnim czasie zmieniła się zabudowa doliny, infrastruktura drogowa, a także czy wybudowano nowe lub zmodernizowano istniejące wały przeciwpowodziowe.

## 5. Scenariusze katastrof

### 5.1. Zasady tworzenia scenariuszy katastrof

Scenariusze katastrof definiują warunki początkowe oraz schemat przebiegu samego zjawiska polegającego na katastrofie obiektu. **Z uwagi na rodzaje konstrukcji zapór wodnych, z jakimi mamy do czynienia na obszarze Polski, scenariusze podzielić należy na dwie zasadnicze grupy:**

- **Scenariusze dla zapór betonowych,**
- **Scenariusze dla zapór ziemnych.**

Powyższy podział wynika z podstawowych różnic w budowie obiektów, a co za tym idzie odmiennych przyczyn i przebiegu katastrof. W podziale tym do pierwszej grupy należy zaliczyć zapory kamienne, a do drugiej narzutowe.

Określenie warunków początkowych sprowadza się do podania miejsca, w którym rozpoczyna się uszkodzenie zapory, a także określenia przyjętego procesu (przelanie, przebicie, utrata stateczności) doprowadzającego do katastrofy zapory. Konsekwencją katastrofy jest niekontrolowane opróżnianie zbiornika. Wypływ ze zbiornika odbywa się przez powstałą w zaporze wyrwę. Do prognozy tworzenia się wyrwy stosowanych jest wiele modeli. W praktyce sprowadza się to do wyboru jednego z kilku modeli zaimplementowanego w stosowanym oprogramowaniu. Modele wyrwy wymagają podania parametrów, którymi są wymiary zapory i zbiornika oraz początkowego

kształtu wyrwy. Dla zapór ziemnych niezbędne są także fizyczne cechy gruntu w korpusie zapory.

Opracowanie prawdopodobnych scenariuszy katastrof wymaga pozyskania danych dotyczących konstrukcji oraz parametrów technicznych zapór i zbiorników omówionych w Rozdziale 4.4.

Prawdopodobnych scenariuszy katastrof zapór może być wiele. Wybór scenariusza uzależniony jest od przyjętego celu obliczeń. W przypadku gdy obliczenia realizowane są dla potrzeb opracowania planów zagospodarowania przestrzennego, warunków zabudowy i zagospodarowania terenu należy wybierać scenariusze powodujące zalanie maksymalnego obszaru. Taki scenariusz sprowadza się do całkowitego zniszczenia zapory na pewnym odcinku umożliwiającemu całkowite opróżnienie zbiornika.

## **5.2. Identyfikacja możliwych scenariuszy katastrofy zapory betonowej**

Katastrofa zapory spowodowana jest najczęściej przez wiele czynników. Dane o ponad 150 katastrofach, które wydarzyły się na świecie od początku XX roku zostały opracowane przez ICOLD – Międzynarodowy komitet Wielkich zapór [15]. Wynika z nich że w przypadku zapór betonowych głównymi przyczynami katastrof są problemy związane z ich posadowieniem, a zwłaszcza erozja wewnętrzna podłoża (21%) i jego zbyt mała wytrzymałość na ścinanie (21%). Czynnikami dodatkowymi wielu katastrof są awarie urządzeń upustowych lub zbyt mała ich przepustowość (22%). Przyczyny 20 % awarii nie zostały rozpoznane.

Opracowując scenariusze katastrofy dla zapory betonowej należy rozpatrywać następujące czynniki:

- Uszkodzenie korpusu zapory,
- Przelanie wody przez koronę zapory,
- Stan napełnienia zbiornika,
- Uszkodzenie lub zbyt małą przepustowość urządzeń upustowych.

### 5.2.1. Uszkodzenie korpusu zapory

Głównymi przyczynami katastrof zapór betonowych są problemy z ich posadowieniem, a w efekcie utrata stateczności powodująca przewrócenie, lub przesunięcie się części konstrukcji. Przez powstałą wyrwę następuje niekontrolowane opróżnianie zbiornika. Zniszczenie zapory następuje nagle na znacznej części doliny a w przypadku zapór łukowych często na całej szerokości doliny. Proces powstawania wyrwy trwa kilka minut.

Opracowując scenariusz katastrofy zapory betonowej składającej się z samodzielnych sekcji betonowych uszczelnionych na dylatacjach można brać pod uwagę przewrócenie się jednej lub kilku sekcji połączonej z ich przesunięciem w dół doliny. Prawdopodobny jest także scenariusz polegający na wypchnięciu części jednej lub kilku sekcji. Poziom uszkodzenia można przyjmować na poziomie największego osłabienia korpusu betonowego spowodowanego lokalizacją niezbędnych do pracy zapory komór konstrukcyjnych lub na granicy przerwy w betonowaniu spowodowanej warunkami zimowymi.

Czas rozpoczęcia uszkodzenia można połączyć z osiągnięciem maksymalnego dopływu do zbiornika przez falę wezbraniową, maksymalnym poziomem wody w zbiorniku powstałym w wyniku wezbrania lub przelaniem wody przez koronę zapory. Czas powstawania wyrwy należy przyjmować od 5 do 10 minut.

### 5.2.2. Przelanie wody przez koronę zapory

Przelanie wody przez koronę zapory spowodowane jest najczęściej przez zjawiska naturalne jakimi są wezbrania. W przypadku sprawnych urządzeń upustowych hipotetyczny hydrogram przepływów powinien być wyznaczany dla przepływu kulminacyjnego przekraczającego przepływ kontrolny, na który projektowana jest przepustowość urządzeń upustowych. 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 kontrolnych uzależnione jest od klasy budowli i wynosi od 0.02 do 0.5 %. Z tego też względu zaleca się

**opracowanie scenariuszy dla hipotetycznych hydrogramów przepływu o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 0.01\%$  (raz na 10000 lat) oraz  $p = 0.1\%$  (raz na 1000 lat).**

Przelanie wody przez koronę zapory może być także wywołane uszkodzeniem budowli piętrzącej w dolinie powyżej. W przypadku zabudowy kaskadowej zaleca się opracowanie scenariusza katastrofy dla całej kaskady. W przypadku znacznego oddalenia obu budowli można stworzyć scenariusz katastrofy budowli zlokalizowanej poniżej uwzględniający hydrogram dopływu do zbiornika spowodowany katastrofą budowli piętrzącej zlokalizowanej powyżej. Kolejną prawdopodobną przyczyną przelania wody przez koronę zapory może być osunięcie się znacznych mas ziemi do zbiornika.

Przelanie wody przez koronę zapory ziemnej powoduje jej rozmycie powstanie wyrwy oraz rozpoczęcie niekontrolowanego wypływu wody ze zbiornika. Zapory betonowe są bardziej odporne na przelanie się wody przez koronę zapory. Przelanie wody przez koronę zapory betonowej może, ale nie musi być połączone z uszkodzeniem korpusu zapory. Opracowując scenariusze katastrofy, których celem jest wyznaczenie maksymalnej powierzchni zalania spowodowanej katastrofą zapory zaleca się tworzenie scenariusza łączącego przelanie przez koronę z uszkodzeniem korpusu zapory.

### **5.2.3. Stan napełnienia zbiornika**

**Stan napełnienia zbiornika, który należy brać pod uwagę tworząc scenariusze katastrof zapór nie zależy od jej konstrukcji. Można zakładać, że fala wezbraniowa dociera do zbiornika gdy utrzymywany jest normalny poziom piętrzenia (NPP) lub maksymalny poziom piętrzenia (MaxPP).** Normalny poziom piętrzenia odpowiada trybowi normalnej pracy budowli piętrzącej, umożliwiającemu spełnienie wszystkich realizowanych przez zbiornik funkcji. Zakłada się, że symulowane wezbranie następuje gwałtownie, nie dając czasu na obniżenie poziomu zwierciadła wody w zbiorniku. Natomiast przyjęcie maksymalnego poziomu piętrzenia odpowiada sytuacji, w której po pierwszej fali wezbraniowej, spracowanej prawidłowo przez zbiornik, przed obniżeniem zwierciadła wody do normalnego poziomu piętrzenia następuje kolejne wezbranie.

#### 5.2.4. Przepustowość urządzeń upustowych

Zbyt mała przepustowość urządzeń upustowych może wynikać z faktu, że symulowane przepływy wezbraniowe przekraczają wartości maksymalne, na które były projektowane. Możliwa jest także awaria zamknięć lub mechanizmów wyciągowych. Awaria zamknięć może nastąpić przed rozpoczęciem wezbrania lub w jego trakcie. Zbyt mała przepustowość powoduje szybsze napełnienie zbiornika i przelanie wody przez koronę.

**Tworząc scenariusze katastrof należy uwzględnić niekorzystne przypadki pracy urządzeń upustowych.** Określając procent zmniejszenia przepustowości należy pamiętać, że przelewy bez zamknięć są najbardziej niezawodne. Wykluczają awarie zamknięć i urządzeń upustowych.

#### 5.3. Identyfikacja możliwych scenariuszy katastrofy zapory ziemnej

W przypadku zapór ziemnych, do głównych przyczyn katastrof należą: przelanie wody nad koroną zapory oraz erozja wewnętrzna korpusu. Obie te przyczyny prowadzą na ogół do niekontrolowanego rozmywania gruntu korpusu zapory, którego przebieg i rozwój w czasie uzależniony jest od chwilowych warunków przepływu wody przez podlegający zniszczeniu przekrój korpusu zapory, w wyniku stopniowego samoczynnego opróżniania się zbiornika oraz od budowy i parametrów geotechnicznych gruntu stanowiącego korpus ziemny. W przypadku tego typu obiektów należy rozważyć niezależnie obie możliwości katastrofy.

Zestaw scenariuszy dla katastrofy zapory ziemnej powinien odnosić się do obu ww. głównych przyczyn katastrof i wynikać z analizy czynników mających bezpośredni wpływ na jej charakter, rozmiar i przebieg. Do czynników tych w przypadku zapór ziemnych zaliczyć należy:

- Warunki hydrologiczne w zlewni powyżej zbiornika przed katastrofą (wariantowo warunki powodziowe oraz warunki tzw. „słonecznego dnia),

- Stan napełnienia zbiornika przed katastrofą (normalny poziom piętrzenia, maksymalny poziom piętrzenia, poziom rzędnej korony zapory lub inne pośrednie poziomy),
- Kształt, rozmiar i umiejscowienie wyrwy (określane w oparciu o powszechnie stosowane metody obliczeniowe oraz analizę budowy korpusu zapory).

### **5.3.1. Warunki hydrologiczne w zlewni powyżej zbiornika przed katastrofą**

Warunki hydrologiczne powinny być rozpatrywane w kontekście trybu pracy powodziowej zbiornika, gdyż do katastrof dochodzi najczęściej w warunkach wysokich dopływów do zbiornika i znacznego ich napełnienia, co przekłada się bezpośrednio na intensywność zjawisk filtracyjnych, mogących powodować przesiąki w korpusie, a także teoretyczną możliwość niebezpiecznego nadpiętrzenia zbiornika, mogącą prowadzić w pewnych przypadkach do jego przepełnienia.

**Z tego też względu zaleca się opracowanie scenariuszy dla co najmniej dwóch podstawowych hipotetycznych wezbrań powodziowych o:**

- **maks. przepływie kulminacyjnym o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,1% (raz na 1000 lat),**
- **maks. przepływie kulminacyjnym o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,01% (raz na 10000 lat).**

W uzasadnionych przypadkach rozważyć można dodatkowo falę 1% (raz na 100 lat), ale zazwyczaj – biorąc pod uwagę zapisany w instrukcjach gospodarowania wodą sposób dyspozycji zrzutów wody ze zbiornika – fala taka nie powoduje niebezpiecznego dla obiektu nagłego wzrostu napełnienia zbiornika, mogącego prowadzić do jego katastrofy.

Zaleca się również opracowanie scenariuszy dla warunków tzw. „słonecznego dnia”, tj. warunków normalnej pracy zbiornika, przy niewielkim, stałym dopływie. W tym celu proponuje się przyjmować dopływ i odpływ ze zbiornika na stałym, niewielkim poziomie, równym np. przepływowi nienaruszalnemu w korycie poniżej zapory.

### **5.3.2. Stan napełnienia zbiornika przed katastrofą**

Podstawowymi początkowymi poziomami napełnienia zbiornika w czasie poprzedzającym katastrofę – zarówno w przypadku scenariuszy dla katastrofy wskutek przelania przez koronę zapory jak również wskutek przebicia hydraulicznego, powinny być:

- **Normalny poziom piętrzenia (NPP),**
- **Maksymalny poziom piętrzenia (MaxPP).**

Nie jest zalecane przyjmowanie początkowego napełnienia zbiornika na poziomie rzędnej korony zapory, gdyż w toku prawidłowej eksploatacji obiektu, w sytuacji poprzedzającej nadejście fali powodziowej, utrzymywanie takiego poziomu jest niedopuszczalne ze względów bezpieczeństwa obiektu. Przyjęty początkowy stan napełnienia zbiornika powinien odzwierciedlać takie warunki, jakie w rzeczywistości są możliwe do osiągnięcia w trybie normalnej pracy obiektu i dopuszczalne pod względem technicznym.

### **5.3.3. Kształt, rozmiar i umiejscowienie wyrwy**

Określenie predysponowanego miejsca uszkodzenia korpusu zapory ziemnej wynikać powinno z rozpoznania budowy korpusu zapory, w tym lokalizacji w korpusie elementów takich jak przesłony przeciwfiltracyjne, usytuowania bloku przelewowo-upustowego względem korpusu ziemnego oraz analizy geometrii nasypu (zmiany w geometrii podłużnej i poprzecznej mogą być miejscami potencjalnego osłabienia gruntu wbudowanego w nasyp w sytuacji wzrostu gradientu ciśnień filtracyjnych). Niezbędne na tym etapie jest dokonanie przeglądu istniejącej dokumentacji technicznej obiektu oraz zapoznanie się z wynikami technicznej jego kontroli.

W przypadku scenariuszy katastrofy wskutek przelania wody przez koronę zapory, jako oś wyrwy powstałej wskutek rozmycia korpusu zaleca się przyjmować generalnie linię znajdującą się w połowie długości nasypu ziemnego. Dla obiektów ziemnych posiadających wbudowaną w nasyp sekcję przelewowo-upustową – rozdzielającą nasyp na dwa odcinki, oś wyrwy proponuje się przyjmować w środku długości prawo- lub lewostronnego nasypu.

Decyzja o tym, która strona korpusu ziemnego może być bardziej narażona na rozmycie, powinna wynikać z rozpoznania budowy obiektu i dostępnej dla niego dokumentacji technicznej. Nie wyklucza się w tym miejscu prowadzenia wariantowych symulacji również dla przypadku równoczesnego, obustronnego rozmycia nasypu, jednak należy mieć na uwadze, że taka sytuacja w praktyce jest bardzo mało prawdopodobna.

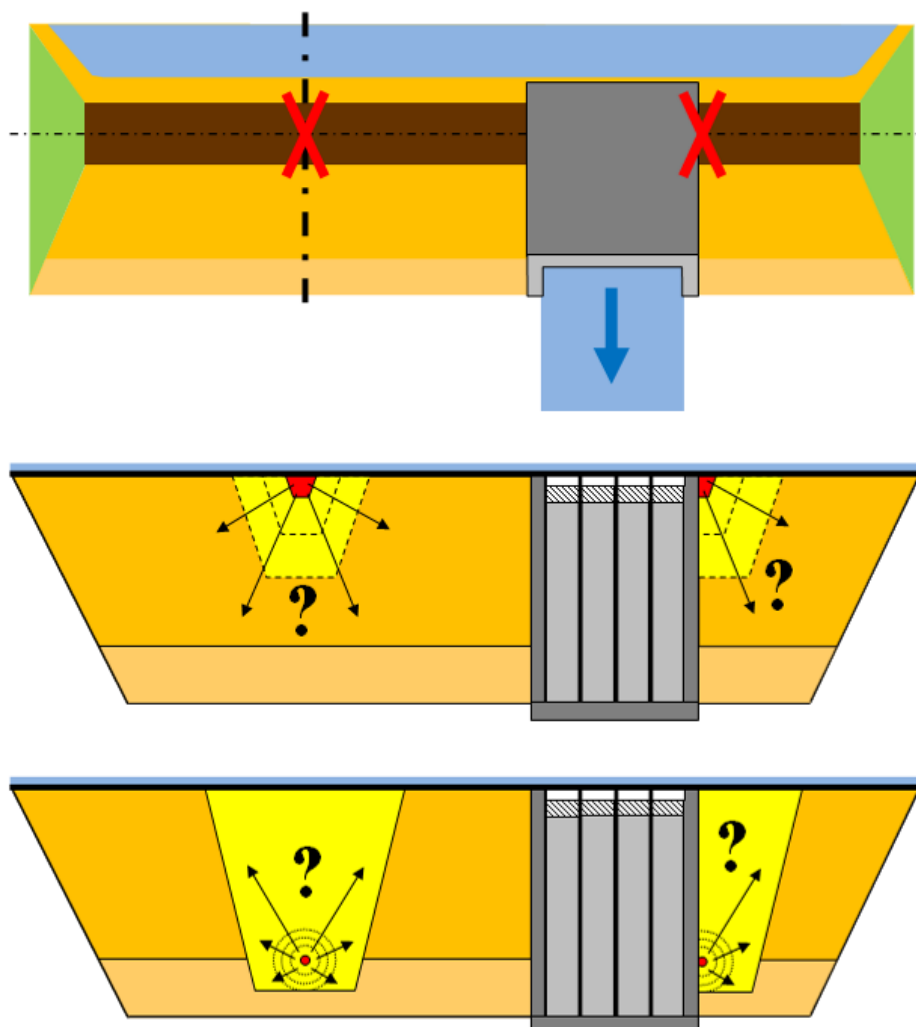
Ponadto, w przypadku występowania ewentualnych zaniżeń w rzędnych korony korpusu zapory, miejsca takie należy traktować również jako miejsca newralgiczne, w których w pierwszej kolejności może dojść do przelania i rozmycia.

**Niezależnie od powyższego, dla każdego obiektu ziemnego, posiadającego wbudowane w korpus elementy takie jak np.: sekcje przelewowo-upustowe, bloki przelewowe, lub inne konstrukcje betonowe lub żelbetowe posiadające ściany stykające się bezpośrednio z nasypem, należy rozważyć potencjalną lokalizację miejsca uszkodzeń (powstania wyrwy) również na styku tych elementów.** W takim przypadku listę możliwych scenariuszy katastrof rozszerzyć można o warianty obejmujące np. równoczesne uszkodzenie nasypu w miejscu jego styku z sekcją przelewowo-upustową oraz w jego części centralnej.

**Dla scenariuszy polegających na katastrofie zapory na skutek przebicia hydraulicznego, skutkującego sufozją gruntu i w konsekwencji (na ogół) również utworzeniem się wyrwy, jako punkt początkowy zjawiska (punkt przebicia) zaleca się zakładać podobnie jak w przypadku katastrof spowodowanych przelaniem, miejsca leżące w osi poprzecznej korpusu ziemnego (bądź jednej z jego stron w przypadku rozdzielenia nasypu blokiem przelewowo-upustowym) lub miejsca znajdujące się na styku sekcji betonowych z gruntem nasypu.** W układzie wysokościowym, rzędną punktu przebicia należy przyjmować w linii krawędzi podstawy skarpy odpowietrznej zapory lub w dnie rowu zbierającego wody z przesiąków. W uzasadnionych przypadkach powinno się rozważyć uwzględnienie dodatkowych poziomów wysokościowych przebicia, a także dodatkowych lokalizacji miejsc ewentualnego uszkodzenia w układzie poziomym obiektu. Dotyczy to miejsc zmiany geometrii nasypu (np. ławeczka skarpy odpowietrznej) oraz innych miejsc newralgicznych, wynikających choćby z dokumentacji technicznej dla korpusu zapory



czy też obserwacji przesiąków przez korpus – rejestrowanych przez aparaturę kontrolno-pomiarową znajdującą się na obiekcie (galeria kontrolno-zastrykowa).



Rysunek 5. Przykładowe lokalizacje miejsc powstania uszkodzeń korpusu zapory ziemnej w przypadku przelania wody przez koronę lub przebicia hydraulicznego i sufozji gruntu.

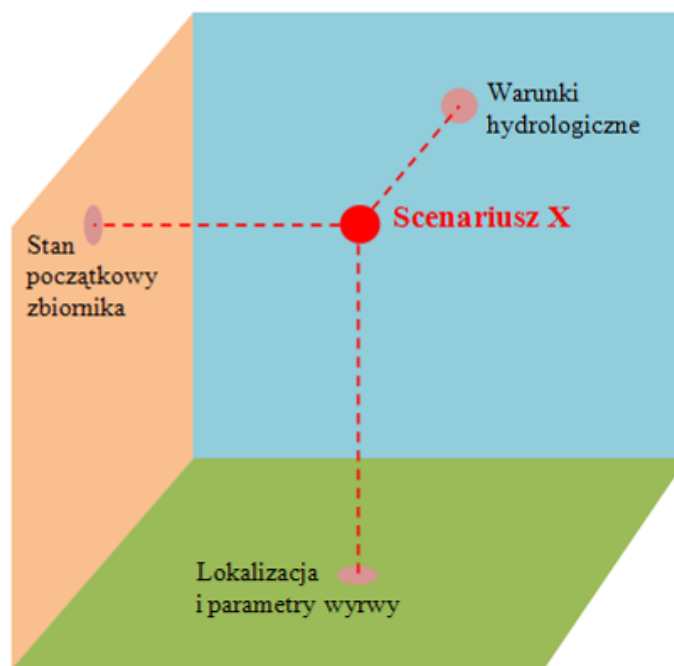
**W obu przypadkach katastrof zaleca się przyjmować trapezowy lub prostokątny kształt wyrwy. Maksymalną możliwą szerokość wyrwy należy wyznaczyć w oparciu o powszechnie stosowane w literaturze formuły empiryczne, bazujące na analizach historycznych katastrof zapór ziemnych (np. Froehlich, MacDonald & Langridge-Monopolis, Von Thun & Gillette, itp.) lub w oparciu o powszechnie stosowane matematyczne modele formowania się wyrwy (np. typu NWS DAMBRK).**

**Dynamikę procesów prowadzących do przebicia hydraulicznego i sufozji gruntu, jak również tempo powiększania się przekroju wyrwy w korpusie zapory – powstałej w wyniku przelania wody przez koronę i stopniowego rozmywania korpusu lub wskutek przebicia hydraulicznego – wyznaczyć można w drodze obliczeń modelowych opartych na zaimplementowanych w modelach hydrodynamicznych formułach erozyjnych (np. formuła Engelund-Hansena lub inne), które opierają się na podstawowych parametrach geotechnicznych gruntu, takich jak np.: średnica ziaren, ciężar właściwy, porowatość, wytrzymałość na ścinanie, itp. Dokonać tego można również wykorzystując stosowane w literaturze wzory empiryczne pozwalające wyznaczyć czas formowania się wyrwy do momentu osiągnięcia jej maksymalnych rozmiarów lub inne metody obliczeniowe – bazujące na niezależnych modelach matematycznych.**

W przypadku obu podstawowych typów katastrof (tj. przebicia oraz przelania przez koronę) zaleca się wprowadzać w profilu zapory tzw. przekrój ograniczający, który pozwala na limitację maksymalnego rozmiaru wyrwy. Linię dna takiego przekroju powinno się przyjmować na poziomie podstawy nasypu ziemnego zapory lub np. na granicy warstw stanowiących podłoże skalne pod zaporą. Boczne ograniczenie przekroju powinny stanowić naturalne zbocza doliny, w którą wbudowany jest korpus zapory, lub np. ściany bloków sekcji przelewowo-upustowych.

**Z uwagi na kompleksowość i integralność obliczeń rozmycia korpusu zapory wskutek przelania wody przez koronę lub przebicia hydraulicznego z dalszymi obliczeniami transformacji fali w dolinie poniżej zapory – zaleca się wykonywać je najlepiej w jednym modelu hydrodynamicznym, obejmującym wszystkie aspekty procesu katastrofy zapory – począwszy od formowania się samego zjawiska, poprzez jego rozwój, aż po skutki katastrofy.**

Podstawowe grupy czynników warunkujących scenariusz katastrofy zapory (zarówno ziemnej jak i betonowej) można graficznie przedstawić za pomocą poniższego diagramu.



Rysunek 6. Podstawowe czynniki warunkujące scenariusz katastrofy zapory.

Położenie scenariusza „X” (czyt. każdego możliwego rodzaju scenariusza) jest równocześnie kombinacją trzech różnych wartości podstawowych parametrów wyjściowych, które powinny być brane pod uwagę przy jego tworzeniu.

Te trzy podstawowe parametry nie są jednak jedynymi, jakie można brać pod uwagę przy konstruowaniu listy scenariuszy katastrofy zapory. Do dodatkowych parametrów należeć mogą np.:

- Reguły sterowania zbiornikiem – reguły wynikające wprost z instrukcji gospodarowania wodą na obiekcie (standardowe) oraz ich wariantowe modyfikacje, np. ilustrujące zasady pracy zbiornika w sytuacji awarii części urządzeń zrzutowych (spustów dennych, klap na przelewach, itp.), czy związane z określonym (specjalnym) typem prowadzenia gospodarki wodą na zbiorniku polegającym np. na maksymalnym wstrzymywaniu zrzutów wody ze zbiornika,
- Synchronizacja czasu kulminacji dopływu i czasu katastrofy obiektu – tzn. zbieżność lub przesunięcie czasowe momentu dojścia kulminacji fali powodziowej do zbiornika i momentu zapoczątkowania katastrofy zapory,

- Kształt przekroju ograniczającego maksymalny rozmiar wyrwy (np. przekrój ograniczony podstawą korpusu zapory lub sięgający stropu podłoża skalnego pod zaporą),
- Inne parametry – uwzględniające którykolwiek z czynników mających wpływ na przebieg katastrofy i ostateczny kształt hydrogramu wypływu przez wyrwę, a w konsekwencji rozmiar szkód w dolinie poniżej zapory.

**Reasumując, zestaw scenariuszy katastrofy zapory (w postaci tzw. matrycy scenariuszy) może obejmować teoretycznie nieograniczoną wręcz liczbę wariantów, będących wynikiem kombinacji wielu różnych czynników wyjściowych. Jednakże, z uwagi na czas konieczny do wykonania obliczeń modelowych, a także późniejszą przejrzystość wyników obliczeń, warunkującą możliwość przeprowadzenia ich analizy porównawczej, zaleca się ograniczenie liczby scenariuszy do nie więcej niż kilkunastu (maksymalnie kilkudziesięciu) dla jednego obiektu.**

Dopiero po przeprowadzeniu obliczeń modelowych na tak skonstruowanej matrycy scenariuszy i analizie porównawczej uzyskanych wyników, dokonuje się wyboru kilku najbardziej charakterystycznych i reprezentatywnych scenariuszy, które stanowią podstawę do opracowania stref zagrożenia powodziowego w dolinie poniżej zapory.

## **6. Opracowanie modeli hydrodynamicznych**

**Rzetelna analiza przebiegu zjawiska katastrofy zapory oraz transformacji fali wywołanej tym zjawiskiem w dolinie poniżej powinna opierać się na badaniach modelowych.** Obecne, ogólnodostępne narzędzia hydroinformatyczne umożliwiają w relatywnie prosty sposób przeprowadzenie modelowania dla całego złożonego procesu związanego z przejściem fali powodziowej przez zbiornik, zniszczeniem zapory oraz transformacją w dolinie poniżej hydrogramu powstałego wskutek katastrofy. Modelowanie to stanowi podstawę do wyznaczenia zasięgów stref zalewowych w dolinie poniżej obiektu i analizy skutków całego zjawiska.

W działaniach tych należy stosować się do pewnych ogólnych zasad, które pozwalają na właściwe określenie zakresu prac, tak aby niepotrzebnie nie skomplikować procesu obliczeniowego, bez widocznego efektu poprawy wyników końcowych.

## 6.1. Model hydrodynamiczny katastrofy zapory

**Prawidłowe odwzorowanie katastrofy obiektu piętrzącego, jakim jest zapor wodna nie jest możliwe bez opracowania jego modelu hydrodynamicznego.** Model taki powinien umożliwiać zarówno odwzorowanie czaszy zbiornika i geometrii korpusu zapory, wprowadzenie reguł sterowania odpływem ze zbiornika (w przypadku obiektów ze sterowanymi zamknięciami), jak również – przede wszystkim – pozwalać na implementację przyjętych scenariuszy katastrofy, tj. umożliwiać zdefiniowanie w przekroju zaporowym struktury hydraulicznej typu „dambreak”, opisanego parametrami geometrycznymi, geotechnicznymi i czasowymi.

### 6.1.1. Odwzorowanie czaszy zbiornika i kształtu zapory

**Opis kształtu czaszy zbiornika wodnego zamkniętego korpusem zapory, dla której planowane jest przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych jej katastrofy, zaleca się wykonać za pomocą modelu hydrodynamicznego.** Najlepszym źródłem przekrojów poprzecznych – pozwalającym na najbardziej dokładne oddanie kształtu czaszy zbiornika są pomiary batymetryczne. Metoda opisu czaszy zbiornika na podstawie batymetrii jest ponadto metodą pozwalającą na odwzorowanie tzw. fali wstecznej powstającej w zbiorniku podczas nagłego wypływu wody przez wyrwę (zjawisko to dotyczy zwłaszcza obiektów o konstrukcji betonowej, których katastrofy mają zwykle przebieg bardzo szybki). Z tego też względu jest to metoda zalecana w pierwszej kolejności. Autorzy niniejszej metodyki nie określają w tym miejscu minimalnej liczby przekrojów opisujących zbiornik, choć jest oczywiste, że im ich liczba jest większa, tym dokładniej odwzorowany zostanie zbiornik. Za wynik w zupełności wystarczający z punktu widzenia celu opracowania można przyjąć zachowanie odstępów między przekrojami rzędu około 500 m, przy czym przy wyznaczaniu lokalizacji przekrojów należy wziąć pod uwagę równocześnie konieczność odwzorowania kształtu poziomego czaszy zbiornika – tj. np. ewentualnych, nagłych zmian szerokości zbiornika, zatok i rozgałęzień.

W przypadku braku aktualnych i reprezentatywnych pomiarów batymetrycznych istnieją sposoby pozwalające na odwzorowanie w modelu hydraulicznym pojemności zbiornika za pomocą np. jednego punktu obliczeniowego (przekroju), w którym

implementowana jest cała informacja o pojemności zbiornika w postaci krzywej pojemności (lub krzywej powierzchni zalewu).

**Niezależnie od sposobu opisu geometrii czaszy zbiornika konieczne jest na dalszym etapie prac dokonanie szczegółowej kalibracji pojemności zbiornika.**

Kalibracja taka powinna być wynikiem iteracyjnych obliczeń na stałych wartościach przepływów (stały dopływ do zbiornika) i warunkuje ona prawidłową transformację fali powodziowej przez zbiornik. Jako wzorcową krzywą pojemności zbiornika należy przyjmować krzywą zawartą w aktualnie obowiązującej dla obiektu instrukcji gospodarowania wodą, lub – w przypadku istotnych zmian w pojemności zbiornika (np. zamulenie czaszy) – zaktualizowaną krzywą, wyznaczoną w oparciu o pomiary batymetryczne.

**Uznaje się za wystarczające wykonanie obliczeń kalibracyjnych dla poziomów napełnienia zbiornika co 1,0 m w strefie pojemności wyrównawczej i powodziowej oraz dodatkowo dla charakterystycznych poziomów piętrzenia – NPP, MaxPP i dla poziomu odpowiadającego rzędnej korony zapory. Maksymalne różnice w obliczonych poziomach zwierciadła wody w zbiorniku w stosunku do rzędnych rzeczywistych (krzywa wzorcowa) nie powinny przekraczać 10 cm na każdym z poziomów.**

**Implementacja kształtu zapory, a zwłaszcza kształtu i rzędnych jej korony jest kolejnym, obligatoryjnym elementem budowy modelu hydraulicznego jej katastrofy.** Czynność ta warunkuje możliwość uwzględniania w obliczeniach objętości wody przelewającej się przez koronę zapory, co ma szczególne znaczenie w scenariuszach tego właśnie rodzaju katastrofy. Może ona być przeprowadzona w różny sposób – w zależności od stosowanego rodzaju oprogramowania (modelu hydraulicznego). Najczęściej jednak implementacja kształtu zapory odbywa się w edytorze przekrojów poprzecznych lub bezpośrednio w module odpowiedzialnym za symulację katastrofy obiektu (na ogół jako przelew o szerokiej koronie).

### **6.1.2. Reguły sterowania odpływem ze zbiornika**

**Właściwe odwzorowanie zasad pracy zbiornika ma szczególne znaczenie w przypadku symulacji katastrof zapór w warunkach powodziowych.** O ile w przypadku symulacji wykonywanej dla tzw. „dnia słonecznego” nie ma to

pierwszoplanowego znaczenia (odpływ zakłada się wówczas na ogół na stałej wartości równej dopływowi), o tyle w sytuacji gdy mamy do czynienia z dopływem do zbiornika fali powodziowej (hipotetycznej lub rzeczywistej) o określonej hydrogramem kubaturze, prawidłowa algorytmizacja reguł dysponowania odpływem w zależności od aktualnego dopływu i rzędnej zwierciadła wody w zbiorniku nabiera istotnego znaczenia. W takich sytuacjach, objętość fali przechwycona przez zbiornik, która wynika wprost z przyjętych w tzw. instrukcji gospodarowania wodą na obiekcie zależności pomiędzy dopływem, rzędną wody na zbiorniku i odpływem, warunkuje w wielu przypadkach w ogóle zaistnienie samego zjawiska katastrofy obiektu. Dotyczy to zwłaszcza katastrofy powstałej w wyniku przelania się wody przez koronę zapory, która jak wynika z samego założenia może mieć miejsce tylko w przypadku osiągnięcia (i przekroczenia) przez lustro wody w zbiorniku rzędnej korony. Z kolei możliwość osiągnięcia takiej rzędnej uwarunkowana jest dwoma podstawowymi czynnikami: kubaturą i kształtem fali powodziowej oraz zapisanymi w instrukcji regułami sterowania odpływem ze zbiornika. Z tego też względu uwzględnienie tych ostatnich w modelu hydraulicznym tworzonym specjalnie na potrzeby analizy zjawiska katastrofy obiektu piętrzącego jest elementem nieodzownym. Ponadto dynamika pracy zbiornika, wynikająca z reguł zawartych w instrukcji, przekłada się bezpośrednio na zmiany w rzędnej zwierciadła wody w zbiorniku, a te z kolei na gradient ciśnień filtracyjnych w korpusie, które warunkują proces tworzenia się i rozwoju zjawisk sufozyjnych.

### 6.1.3. Model katastrofy zapory

Dysponując zbudowanym modelem hydraulicznym, opartym na skalibrowanej aktualnej krzywej pojemności zbiornika i opisującym: czasę zbiornika, geometrię korpusu zapory oraz zasady gospodarki wodnej, należy przystąpić do implementacji modelu samej katastrofy. Bazą dla tego etapu prac jest przygotowany wcześniej zestaw scenariuszy. **Przyjęte w poszczególnych scenariuszach założenia co do warunków hydrologicznych, stanu napełnienia zbiornika i parametrów symulowanych uszkodzeń zapory, a także innych – dodatkowych zmiennych, należy „przełożyć” na matematyczny język modelu i zaimplementować w strukturze obliczeniowej odpowiedzialnej za odwzorowanie katastrofy.** W przypadku zalecanego przez autorów niniejszej metodyki stosowania do opisu całego procesu modelowania

jednego narzędzia hydroinformatycznego, implementacja taka dokonywana jest zwykle w specjalnym module przeznaczonym do opisu zjawiska „dambreak”. Polega ona zazwyczaj na wprowadzeniu parametrów obliczeniowych dotyczących:

- Poziomu korony zapory i jej długości,
- Uwzględnienia w obliczeniach tzw. przekroju ograniczającego maksymalny rozmiar uszkodzenia korpusu zapory,
- Usytuowania uszkodzenia korpusu (usytuowania wyrwy – w przypadku zapory ziemnej lub uszkodzonej sekcji zapory – w przypadku zapory betonowej) względem zapory,
- Geometrii uszkodzenia (maksymalna szerokość w dnie, docelowa rzędna dna, nachylenie ścian bocznych),
- Współczynników oporów przy przepływie wody przez uszkodzoną część korpusu zapory,
- Momentu lub warunków determinujących rozpoczęcie procesu katastrofy zapory (np. katastrofa w momencie osiągnięcia przez zbiornik określonego poziomu piętrzenia, katastrofa w momencie pojawienia się w zbiorniku przepływu kulminacyjnego wywołanego falą powodziową, katastrofa w określonej chwili – data, godzina, minuty i sekundy),
- Sposobu opisu zjawiska formowania się i rozwoju przestrzennego uszkodzenia (np. seria czasowa – w przypadku uszkodzeń zapory betonowej, seria czasowa lub formuły erozyjne – w przypadku uszkodzeń zapory ziemnej),
- Przyczyny inicjującej katastrofę (przelanie przez koronę, przebicie hydrauliczne),
- Początkowego stanu napełnienia zbiornika przed katastrofą.

W przypadku symulacji katastrof zapór ziemnych przy zastosowaniu formuł erozyjnych konieczne jest również określenie podstawowych cech fizycznych i mechanicznych gruntu korpusu zapory. Do cech takich należą na ogół: średnica ziaren, ciężar właściwy, porowatość, wytrzymałość na ścinanie, a w przypadku katastrof spowodowanych przebiciem hydraulicznym, dodatkowo np. szorstkość ścian przewodu, który zapoczątkowuje proces sufozji.

Ponadto, z uwagi na konieczność zdefiniowania początkowych warunków brzegowych dla obliczeń formowania się wyrwy lub przewodu przebicia hydraulicznego w czasie,



niezbędne jest określenie wyjściowych parametrów tych struktur, tj. początkowej szerokości i rzędnej dna wyrwy w korpusie zapory lub początkowej średnicy przewodu przebicia i jego rzędnej, czy również np. stosunku średnicy przewodu przebicia do miąższości warstwy gruntu korpusu nad nim zalegającej – jako warunku powstania wyrwy wskutek przebicia i sufozji. W tym miejscu należy zaznaczyć, że przy odwzorowaniu tego typu katastrof w obiektach ziemnych pomija się zwykle występowanie ubezpieczenia z płyt na skarpie odwodnej zapory, parapetów chroniących przed falowaniem na koronie zapory, czy innych trwałych ubezpieczeń, nie mających bezpośredniego wpływu na przebieg zjawisk zachodzących w gruncie korpusu.

Niektóre modele symulacyjne katastrofy zapory ziemnej pozwalają dodatkowo na określenie procentowej objętości gruntu zatrzymanego w profilu zapory wskutek nagłego zapadnięcia się gruntu wywołanego przebiciem i utworzenia się wyrwy.

**Autorzy metodyki nie ograniczają sposobu opisu w modelu hydrodynamicznym zjawisk przebicia hydraulicznego i powstawania wyrwy (lub uszkodzenia sekcji w przypadku zapory betonowej), pod warunkiem uwzględnienia podstawowych parametrów i czynników determinujących ich przebieg, opisanych powyżej – pozostawiając w tym miejscu autorom przyszłych tego typu opracowań dowolność w doborze narzędzia do symulacji uszkodzenia konstrukcji korpusu zapory ziemnej lub betonowej.**

## **6.2. Model hydrodynamiczny doliny poniżej zapory**

### **6.2.1. Schemat doliny**

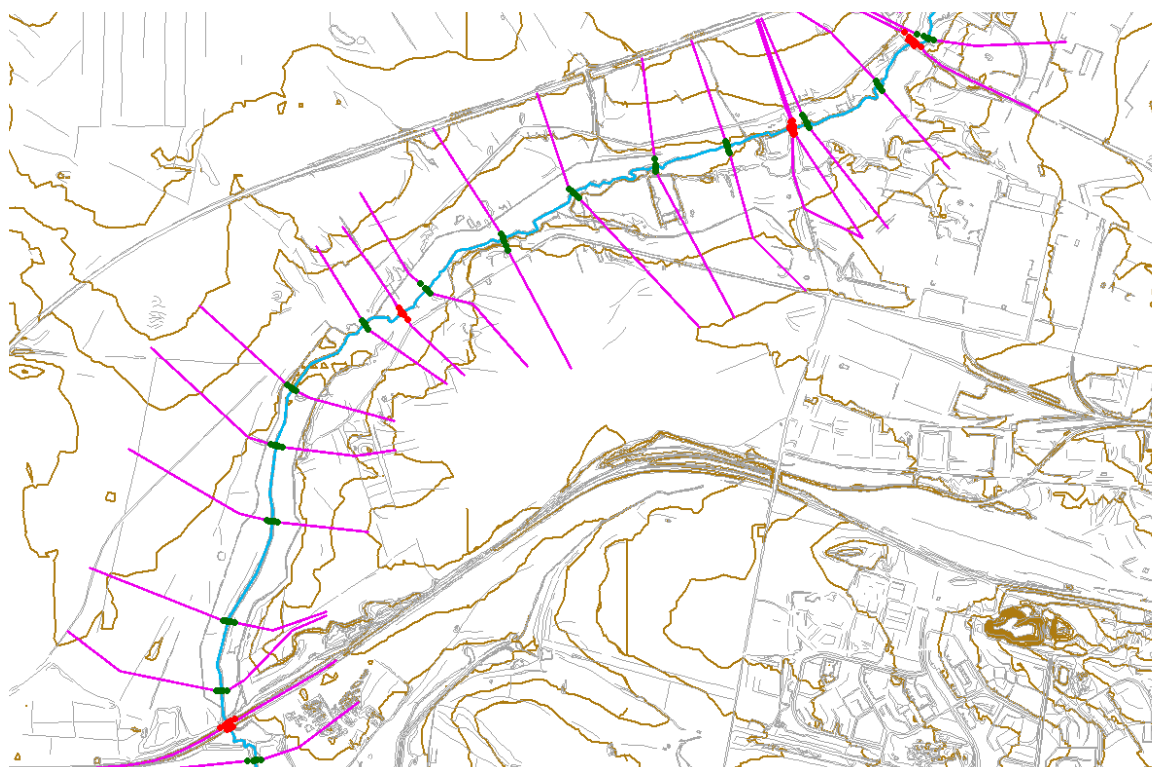
**Trasę modelu jednowymiarowego opisującego katastrofę zapory należy poprowadzić wzdłuż doliny rzecznej, a nie jak to ma miejsce w przypadku tradycyjnego modelu hydraulicznego tworzonego dla potrzeb wyznaczania stref zalewowych wzdłuż osi cieku, z uwzględnieniem wszystkich jej meandrów. Takie podejście wymuszone jest znacznymi głębokościami wody w dolinie (katastrofa zapory powoduje gwałtowne opróżnienie zbiornika wodnego) wielokrotnie przekraczającej wielkości, które mogą wystąpić w przypadku pojawienia się naturalnej powodzi wywołanej rozlewnymi lub nawałnymi opadami deszczu. Kierunek przepływu nie będzie więc determinowany osią rzeki a ogólną topografią doliny. Schematyzacja**

powinna skupić się na uwzględnieniu tych cech doliny rzecznej, które będą miały wpływ na transformację przepływów ekstremalnych, z pominięciem nieistotnych szczegółów, jak niewielkie nasypy, meandry i zakola. Schematyzacja powinna zostać wykonana w sposób, który jednocześnie pozwoli na późniejszą kalibrację modelu w oparciu o fale historyczne, tak aby model w zakresie przepływów historycznie notowanych, w początkowej i końcowej fazie symulacji był w stanie we właściwy sposób przetransformować falę wywołaną katastrofą zapory przy równoczesnym zachowaniu ogólnego kształtu doliny.

**W przypadku modelu dwuwymiarowego, którego podstawą jest numeryczny model terenu (NMT), sytuacja przedstawia się odmiennie – obliczenia są wykonywane na siatce obliczeniowej.** W związku z powyższym nie ma konieczności wyznaczania trasy modelu – proces ten wykonywany jest automatycznie w trakcie obliczeń.

### 6.2.2. Przekroje poprzeczne

Podstawowym i najbardziej istotnym elementem wejściowym do budowy jednowymiarowego modelu transformacji fali wywołanej katastrofą są przekroje poprzeczne. Właściwe ich wyznaczenie warunkuje właściwe przeniesienie objętości mas wody wypływającej intensywnie z gwałtownie poszerzającej się wyrwy w dół doliny rzecznej. Przekroje poprzeczne należy sytuować prostopadłe do głównego kierunku biegu doliny, tj. prostopadłe do przebiegu warstwic na głównych zboczach ograniczających dolinę cieku z jego prawej i lewej strony. **Należy pamiętać aby początek i koniec przekrojów poprzecznych posiadał tę samą rzędną i był wyniesiony dostatecznie wysoko powyżej doliny rzecznej, co pozwoli uniknąć sztucznego zawężenia pola przepływu i gwałtownego spiętrzenia wody, a w konsekwencji błędnych wyników.** W zależności od dostępnych materiałów wejściowych przekroje poprzeczne mogą być w całości wykonywane za pomocą bezpośrednich pomiarów terenowych, lub jako połączenie pomiarów terenowych koryta rzeki i terenów przyległych z terasami wygenerowanymi w oparciu o numeryczny model terenu.



Rysunek 7. Przykład lokalizacji przekrojów poprzecznych w dolinie rzecznej.

W przypadku modeli dwuwymiarowych nie występują przekroje poprzeczne, a obliczenia (o czym wspomniano w punkcie dotyczącym schematu doliny) wykonywane są w oparciu o siatkę NMT. W przypadku modeli łączących w sobie elementy modelowania jedno i dwuwymiarowego, a więc takich, dla których przepływy, prędkości i napełnienia w korycie (czyli dla relatywnie niewielkich wartości w skali analizy zjawiska katastrofy zapory) obliczane są z wykorzystaniem modelu 1D, natomiast transformacja na pozostałej części doliny odbywa się z zastosowaniem modelowania 2D, ważne jest odpowiednie połączenie przekrojów poprzecznych z modelu 1D z siatką obliczeniową modelu dwuwymiarowego. W tego typu modelach newralgicznym miejscem, mogącym negatywnie wpływać na wyniki obliczeń jest styk przekrojów poprzecznych z numerycznym modelem terenu. Dlatego bardzo ważne jest aby punkty wspólne dla przekrojów modelu 1D z siatką modelu 2D posiadały identyczne rzędne. Spełnienie tego warunku zapobiega oscylacjom w trakcie obliczeń, i zwiększa stabilność modelu.

### 6.2.3. Identyfikacja parametrów hydraulicznych

Kluczowym parametrem hydraulicznym dla modeli transformacji fali powodziowej, który warunkuje właściwe wyniki obliczeń jest współczynnik szorstkości (oporów przepływu). W przypadku modeli budowanych dla potrzeb katastrof zapór dobór wartości tego parametru stanowi jednak główny element niepewności wpływający na jakość wyników obliczeń. W przypadku modeli rzecznych istnieje szereg opracowań, które wskazują typowe wartości współczynników szorstkości zarówno dla koryt jak i dla terenów zalewowych. **W przypadku wystąpienia katastrofy zapory prędkości i wartości przepływów są tak duże a ilości niesionego i wleczonego materiału tak znaczne, iż zalewane tereny nie mogą być traktowane jako typowe tereny zalewowe, co uniemożliwia ustalenie wartości współczynników szorstkości w standardowy sposób.** Jak wspomniano powyżej w przypadku katastrofy zapory mamy do czynienia nie tylko z przepływem wody w dolinie (szczególnie na odcinku bezpośrednio poniżej zniszczonego obiektu) ale również z przepływem znacznej ilości różnorodnego materiału (części zapory, kamienie, żwir, piasek, namuły, drzewa, samochody, części domów, obiektów inżynierskich i ogrodzeń itd.). Tak więc opór podłoża będzie się dynamicznie zmieniał w miarę jak poszczególne duże elementy będą opadać, toczyć się i zatrzymywać wytracając tym samym energię kinetyczną fali powodziowej. W miarę przesuwania się czoła fali poniżej uszkodzonej zapory wartości współczynnika szorstkości będą się więc obniżać i zbliżać do wartości typowych dla poszczególnych typów zagospodarowania. W związku z opisanymi powyżej faktami **zaleca się dokonanie (w oparciu o kolejne przybliżenia) rozdziału terenu doliny na dwie części:**

- **Część bezpośrednio poniżej zapory, w której wielkość przepływu, prędkości oraz głębokości są tak wysokie, że należy spodziewać się, iż zniszczeniu ulegnie wszystko co znajdzie się w nurcie przepływu. Dla tej części doliny wartość współczynnika szorstkości należy zdefiniować jako jedną globalną wartość wzdłuż całego przekroju i przyjąć wartość bardzo wysoką – rzędu 0,10 – 0,15 (dla „n” wg Manniga),**
- **Część gdzie zauważalny jest znaczący spadek prędkości i głębokości a fala może być traktowana jako typowa fala powodziowa o niskim**

**prawdopodobieństwie przewyższenia. Dla tej części wartości współczynnika szorstkości należy dobierać w oparciu o typowe tablice hydrauliczne (np. wg Ven Te Chow'a).**

Na etapie opracowywania modelu, dla potrzeb jego kalibracji i weryfikacji w oparciu o hydrogramy z wezbrań historycznych wartości współczynnika szorstkości należy dobierać w oparciu o typowe tablice hydrauliczne (np. wg Ven Te Chow'a).

#### **6.2.4. Obiekty inżynierskie**

Do obiektów inżynierskich zaliczane są obiekty mostowe (mosty i przepusty) oraz obiekty hydrotechniczne (zapory, jazy, stopnie, progi, itd.). W przypadku opracowywania modeli rzecznych dla potrzeb wyznaczania stref zalewowych wywołanych naturalnymi powodziąmi, bardzo istotne jest aby wszystkie tego typu obiekty zostały wprowadzone do modelu, gdyż mogą one istotnie wpływać na transformację fali powodziowej w korycie i na terasach zalewowych, i w konsekwencji wpływać na wyniki obliczeń. Odmienne wygląda sytuacja w przypadku modeli tworzonych dla potrzeb analizy zjawiska katastrofy zapory. W tym przypadku, z uwagi na gwałtowny przebieg zjawiska związanego z wypływem olbrzymich mas wody przez ulegającą katastrofie zaporę, należy uwzględnić fakt, iż część obiektów ulegnie zniszczeniu i pominąć ich implementację w modelu, pamiętając o odpowiednim zwiększeniu wartości współczynnika szorstkości. Dokonując wyboru, które obiekty powinny zostać uwzględnione w modelu należy uprzednio przeprowadzić symulację, w warunkach braku wszystkich budowli sprawdzając uzyskane wyniki, szczególnie w zakresie prędkości i głębokości. Analizując wyniki warto kierować się następującymi trzema kryteriami:

- „Kryterium naporu”. Czy obiekt wytrzyma działanie fali powodziowej niosącej znaczne ilości różnorodnego materiału? **Sugeruje się aby na odcinku nieprzekraczającym 5 km nie wprowadzać do modelu obiektów inżynierskich z uwagi na znaczną siłę niszczącą niesionego materiału.**
- „Kryterium głębokości”. Czy obiekt jest znaczący w odniesieniu do przewidywanej głębokości wody i w związku z powyższym czy warto go uwzględnić w modelu? **Dla obiektów przykrytych warstwą wody wyższą od**

ich wysokości można przyjąć założenie, iż nie będą one wpływać na wyniki obliczeń.

- „Kryterium prędkości”. Czy w przypadku gdy kryterium głębokości wykazuje na zasadność implementacji obiektu do modelu, prędkości przepływu nie są na tyle wysokie, iż ma on szansę oprzeć się czołu fali? **Sugeruje się wprowadzanie do modelu tylko tych obiektów, w rejonie których średnie prędkości przemieszczającej się fali nie przekraczają 5 m/s (pomimo spełnienia „Kryterium głębokości”).**

Powyższe kryteria wskazują sposób podejścia do procesu wyboru obiektów inżynierskich, które zostaną uwzględnione w modelu hydraulicznym. Z uwagi na odmienne warunki geomorfologiczne poszczególnych dolin rzecznych na których zlokalizowane są zbiorniki wodne, należy je traktować jako wskaźniki. Na etapie budowy modelu i związanej z tym działaniem implementacji obiektów inżynierskich niezbędna jest dodatkowo wizja w terenie oraz wiedza ekspercka, pozwalająca ostatecznie podjąć decyzję, które z obiektów powinny znaleźć się w modelu.

**W przypadku obiektów inżynierskich, które po przeprowadzonej uprzednio analizie powinny się znaleźć w modelu, należy je zaimplementować bazując na pomiarach geodezyjnych, których zasady opisano w rozdziale 4.4.2 niniejszej metodyki. Implementację należy przeprowadzić zgodnie z warunkami i wymaganiami narzędzi do modelowania 1D bazując na powszechnie stosowanych metodach, takich jak: kombinacja przepustu i przelewu, metoda Water Surface Profile (WSPRO), poprzez bezpośrednie rozwiązanie równania energii metodą iteracyjną, w oparciu o zasadę zachowania energii lub przy zastosowaniu np. wzorów Yarnella, D'Aubuissona, Naglera i innych.**

### 6.2.5. Warunki brzegowe

W modelu hydraulicznym konieczne jest ustalenie warunków brzegowych, ograniczających obszar modelowania. W każdym modelu występują górne i dolne warunki brzegowe oraz opcjonalnie wewnętrzne warunki brzegowe w postaci dopływów skupionych lub rozłożonych. Górne warunki brzegowe definiowane są w postaci hydrogramów przepływów lub stanów wody (rzędnych). Warunki te muszą

być ustalone dla wszystkich górnych odcinków cieków ujętych w modelu. Dolnym warunkiem brzegowym, zamykającym model w zależności od przyjętych założeń modelowania może być hydrogram stanów wody (rzędnych) lub krzywa natężenia przepływów. W przypadku modelu dla katastrofy zapory górnym warunkiem jest hydrogram odpływu powstały w wyniku awarii (w przypadku, gdy modele dla zapory ulegającej katastrofie oraz transformacji fali w korycie poniżej są budowane osobno) lub hydrogram dopływu do zbiornika (przy modelu zintegrowanym). **W tego typu modelach mamy do czynienia z tak znacznym przepływem wywołanym katastrofą zapory, iż dopływy do cieku głównego wywołane reakcją zlewni (czy w postaci dopływów skupionych czy też rozłożonych na długości) mogą być pomijane bez zauważalnego wpływu na wyniki obliczeń.** Warunki te mogą zostać wprowadzone natomiast na potrzeby kalibracji i weryfikacji modelu na wezbraniach historycznych.

#### 6.2.6. Kalibracja i weryfikacja

W przypadku modelu hydrodynamicznego (ruchu nieustalonego) kalibracja wykonywana jest dla określonego wezbrania powodziowego, dla którego znany jest rozkład czasowy i przestrzenny przepływów oraz stanów wody. Polega na określeniu parametrów modelu w taki sposób, aby otrzymać zgodny z powodziowym wezbraniem historycznym, obliczeniowy rozkład stanów wody w profilu podłużnym rzeki, przy prawidłowym układzie warunków brzegowych w postaci hydrogramów przepływu. Zgodność ta sprowadza się do uzyskania zbieżnych hydrogramów stanów wody, zarówno pod względem wartości, jak i czasu w punktach kalibracyjnych (o znanych wartościach historycznych).

Weryfikacja modelu wykonywana jest na wezbraniu powodziowym innym niż wezbranie, dla którego wykonano kalibrację. Polega ona na ocenie zgodności hydrogramów historycznych i obliczeniowych w tych samych punktach oraz w oparciu o te same parametry modelu, dla których wykonano kalibrację.

Kalibracja oraz weryfikacja możliwa jest do przeprowadzenia dla cieku kontrolowanego, tj. takiego, na którym zlokalizowany jest posterunek wodowskazowy. Dodatkowym warunkiem koniecznym do poprawnego przeprowadzenia kalibracji

i weryfikacji jest lokalizacja wodowskazu kontrolnego na odcinku objętym modelem hydraulicznym.

**W przypadku modeli hydraulicznych budowanych na potrzeby analizy transformacji fali powodziowej wywołanej katastrofą zapory, proces kalibracji i weryfikacji modelu wykonywany jest jedynie dla potrzeb sprawdzenia ogólnych zasad jego działania, tj. określenia czy model we właściwy sposób transformuje przepływy w dół doliny i czy zachowana jest relacja pomiędzy wartościami stanów i przepływów w poszczególnych punktach kontrolnych (wodowskazach).**

Należy pamiętać, iż przepływy wywołane katastrofą zapory wielokrotnie przewyższają przepływy związane z typowymi powodziami, wywołanymi opadami deszczu. W związku z powyższym kalibracja modelu dla tak wysokich przepływów jest niemożliwa, z uwagi na brak odpowiednich fal historycznych.

Dla oceny jakości kalibracji weryfikacji modelu proponuje się oprzeć na następujących parametrach:

- Współczynnik korelacji (R)
- Specjalny współczynnik korelacji ( $R_s$ )
- Całkowity błąd kwadratowy (CBK)
- Błąd stanu kulminacji ( $\Delta H_{\max}$ )
- Błąd przepływu kulminacyjnego ( $\Delta Q_{\max}$ )
- Przesunięcie kulminacji ( $\Delta t_{\max}$ )
- Błąd objętości fali wezbraniowej ( $\Delta V_{\max}$ )

Współczynnik korelacji należy określić dla stanów z następującego wzoru, gdzie:  $h_o$  – stan obserwowany,  $h_c$  - stan obliczeniowy:

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N h_{o(i)} \cdot h_{c(i)} - \sum_{i=1}^N h_{o(i)} \cdot \sum_{i=1}^N h_{c(i)}}{\left[ \left[ N \sum_{i=1}^N h_{o(i)}^2 - \left( \sum_{i=1}^N h_{o(i)} \right)^2 \right] \left[ N \sum_{i=1}^N h_{c(i)}^2 - \left( \sum_{i=1}^N h_{c(i)} \right)^2 \right] \right]^{1/2}}$$

Współczynnik korelacji należy określić dla przepływów z następującego wzoru, gdzie:  $Q_o$  – przepływ obserwowany,  $Q_c$  - przepływ obliczeniowy:



$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N Q_{o(i)} \cdot Q_{c(i)} - \sum_{i=1}^N Q_{o(i)} \cdot \sum_{i=1}^N Q_{c(i)}}{\left[ \left[ N \sum_{i=1}^N Q_{o(i)}^2 - \left( \sum_{i=1}^N Q_{o(i)} \right)^2 \right] \left[ N \sum_{i=1}^N Q_{c(i)}^2 - \left( \sum_{i=1}^N Q_{c(i)} \right)^2 \right] \right]^{1/2}}$$

Kryterium określania miar zgodności dla współczynnika korelacji:

- $0,95 < R \leq 1,00$       znakomity
- $0,80 < R \leq 0,95$       bardzo dobry
- $0,70 < R \leq 0,80$       dobry
- $0,60 < R \leq 0,70$       dość dobry
- $0,00 < R \leq 0,60$       niezadowalający

Specjalny współczynnik korelacji należy określić dla stanów z następującego wzoru, gdzie:  $h_o$  – stan obserwowany,  $h_c$  - stan obliczeniowy:

$$R_s = \left[ \frac{2 \sum_{i=1}^N h_{o(i)} \cdot h_{c(i)} - \sum_{i=1}^N h_{c(i)}^2}{\sum_{i=1}^N h_{o(i)}^2} \right]^{1/2}$$

Specjalny współczynnik korelacji należy określić dla przepływów z następującego wzoru:  $Q_o$  – przepływ obserwowany,  $Q_c$  - przepływ obliczeniowy:

$$R_s = \left[ \frac{2 \sum_{i=1}^N Q_{o(i)} \cdot Q_{c(i)} - \sum_{i=1}^N Q_{c(i)}^2}{\sum_{i=1}^N Q_{o(i)}^2} \right]^{1/2}$$

Kryterium określania miar zgodności dla specjalnego współczynnika korelacji:

- $0,95 < R_s \leq 1,00$       znakomity
- $0,85 < R_s \leq 0,95$       bardzo dobry
- $0,70 < R_s \leq 0,85$       dobry
- $0,60 < R_s \leq 0,70$       dość dobry

- $0,00 < R_s \leq 0,60$  niezadowalający

Całkowity średni błąd kwadratowy należy określić dla stanów z następującego wzoru, gdzie:  $h_o$  – stan obserwowany,  $h_c$  – stan o obliczeniowy:

$$CBK = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (h_{o(i)} - h_{c(i)})^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^N h_{o(i)}} \cdot 100\%$$

Całkowity średni błąd kwadratowy należy określić dla przepływów z następującego wzoru:  $Q_o$  – przepływ obserwowany,  $Q_c$  – przepływ obliczeniowy:

$$CBK = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (Q_{o(i)} - Q_{c(i)})^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^N Q_{o(i)}} \cdot 100\%$$

Kryterium określania miar zgodności dla całkowitego średniego błędu kwadratowego:

- $0,0 \leq CBK [\%] < 3,0$  znakomity
- $3,0 \leq CBK [\%] < 6,0$  bardzo dobry
- $6,0 \leq CBK [\%] < 10,0$  dobry
- $10,0 \leq CBK [\%] < 25,0$  dość dobry
- $25,0 \leq CBK [\%]$  niezadowalający

Błąd stanu kulminacyjnego należy określić dla stanów jako różnicę rzędnych wartości maksymalnej hydrogramów obliczeniowego i obserwowanego.

Kryterium określania miar zgodności dla błędu stanu kulminacyjnego.

- $0 \text{ cm} \leq (\Delta H_{\max}) < 5 \text{ cm}$  znakomity
- $5 \text{ cm} \leq (\Delta H_{\max}) < 10 \text{ cm}$  bardzo dobry
- $10 \text{ cm} \leq (\Delta H_{\max}) < 15 \text{ cm}$  dobry

- $15 \text{ cm} \leq (\Delta H_{\max}) < 20 \text{ cm}$       dość dobry
- $20 \text{ cm} \leq (\Delta H_{\max})$                       niezadowalający

Błąd przepływu kulminacyjnego należy określić dla przepływów jako różnicę wartości maksymalnej hydrogramów obliczeniowego i obserwowanego.

Kryterium określania miar zgodności dla błędu przepływu kulminacyjnego.

- $0 \% \leq (\Delta Q_{\max}) < 3 \%$                       znakomity
- $3 \% \leq (\Delta Q_{\max}) < 6 \%$                       bardzo dobry
- $6 \% \leq (\Delta Q_{\max}) < 10 \%$                       dobry
- $10 \% \leq (\Delta Q_{\max}) < 25 \%$                       dość dobry
- $25 \% \leq (\Delta Q_{\max})$                       niezadowalający

Przesunięcie kulminacji należy określić dla stanów jako przesunięcie w czasie wartości maksymalnej hydrogramu obliczeniowego i obserwowanego:

Kryterium określania miar zgodności dla przesunięcia kulminacji.

- $0 \text{ h} \leq (\Delta t_{\max}) < 0,5 \text{ h}$                       znakomity
- $0,5 \text{ h} \leq (\Delta t_{\max}) < 1,0 \text{ h}$                       bardzo dobry
- $1,0 \text{ h} \leq (\Delta t_{\max}) < 1,5 \text{ h}$                       dobry
- $1,5 \text{ h} \leq (\Delta t_{\max}) < 2,0 \text{ h}$                       dość dobry
- $(\Delta t_{\max}) \leq 2,0 \text{ h}$                       niezadowalający

Błąd objętości fali wezbraniowej należy określić dla przepływów jako różnicę objętości fali obliczeniowej i obserwowanej

Kryterium określania miar zgodności dla błędu objętości fali wezbraniowej.

- $0 \% \leq (\Delta V_{\max}) < 3 \%$                       znakomity
- $3 \% \leq (\Delta V_{\max}) < 6 \%$                       bardzo dobry
- $6 \% \leq (\Delta V_{\max}) < 10 \%$                       dobry
- $10 \% \leq (\Delta V_{\max}) < 25 \%$                       dość dobry
- $(\Delta V_{\max}) \leq 25 \%$                       niezadowalający

W przypadku kalibracji dla każdego z kryteriów zaleca się aby model otrzymał co najmniej ocenę „dobry”, w przypadku weryfikacji co najmniej „dość dobry”.

## 7. Opracowanie stref zalewowych

**Efektem końcowym obliczeń symulujących katastrofę budowli piętrzącej jest sporządzenie map, na których wyznaczone zostaną zasięgi zalanych obszarów.**

Z punktu widzenia służb administracji samorządowej, opracowujących plany zagospodarowania przestrzennego oraz wydających decyzję o warunkach zabudowy i zagospodarowaniu terenu, istotne jest wyznaczenie maksymalnego obszaru, który zostanie zalany w wyniku katastrofy budowli piętrzącej wraz z wyznaczeniem rozkładu głębokości na tym obszarze. Natomiast dla służb kryzysowych zajmujących się sporządzaniem planów ewakuacyjnych, równie ważną informacją jest czas przemieszczania się czoła fali powodziowej w odniesieniu do strategicznych punktów doliny, a także rozkład prędkości, z którego można wyciągać wnioski o kierunkach przepływu wody oraz potencjalnych zniszczeniach w infrastrukturze drogowej i zabudowie.

Najpełniejszy obraz rozkładu zarówno prędkości jak i głębokości uzyskuje się stosując modele trójwymiarowe. W praktyce modele trójwymiarowe (3D) są rzadko stosowane, ze względu na znacznie większy zakres danych wejściowych, które trzeba pozyskać do budowy modelu, długi czas potrzebny na jego opracowanie oraz znacznie większy w porównaniu do modeli jedno- (1D) i dwuwymiarowych (2D) czas obliczeń. Stosując modele jedno- i dwuwymiarowe z dostateczną dla zastosowań praktycznych dokładnością można wyznaczyć rozkłady głębokości. Analizowanie rozkładu prędkości możliwe jest przy stosowaniu modeli co najmniej dwuwymiarowych. W modelach jednowymiarowych, w których uzyskuje się uśrednioną prędkość dla całego przekroju informacja o wartości obliczonej prędkości ma znaczenie jedynie orientacyjne, a kierunek przepływu wody jest zgodny z założonym schematem obliczeniowym (np. z głównym kierunkiem przebiegu doliny). W praktyce stosowane są także modele hybrydowe stanowiące połączenie modeli jednowymiarowych z modelami dwuwymiarowymi. Modele dwuwymiarowe stosowane są zazwyczaj na obszarach zurbanizowanych, gdzie z uwagi na wysoką gęstość zaludnienia mamy do czynienia z największymi zagrożeniami dla zdrowia i życia ludzi.

Bardzo ważną informacją dla odbiorców map, które prezentują zasięg stref wywołanych katastrofą zapory, są dane dotyczące głębokości zalewu w charakterystycznych przedziałach oraz w przypadku stref wyznaczonych w oparciu o wyniki modelowania 2D – dane dotyczące rozkładu prędkości.

**Zaleca się przyjmowanie na mapach następujących zakresów głębokości:**

- **$H \leq 0.5$  m – tzw. „przedział niepewności” z powodu dokładności danych, zwłaszcza numerycznego modelu terenu,**
- **$0.5 \text{ m} < H \leq 2 \text{ m}$  – obszar niskiego zagrożenia dla ludzi,**
- **$2 \text{ m} < H \leq 4 \text{ m}$  – obszar podwyższonego zagrożenia dla ludzi,**
- **$H > 4 \text{ m}$  – obszar wysokiego zagrożenia dla ludzi,**

**oraz przedziały prędkości:**

- **$v \leq 0.5$  m/s – prędkość mała – woda ma niewielką prędkość oddziaływania na obiekty,**
- **$0.5 \text{ m/s} < v \leq 1 \text{ m/s}$  – prędkość średnia – woda ma umiarkowaną zdolność oddziaływania na obiekty,**
- **$1 \text{ m/s} < v \leq 2 \text{ m/s}$  – prędkość duża – woda ma silną zdolność oddziaływania na obiekty, stanowi również poważne zagrożenie dla ludzi,**
- **$v > 2 \text{ m/s}$  – bardzo duża prędkość – woda ma bardzo silną zdolność oddziaływania na obiekty, jest w stanie przemieszczać obiekty o bardzo dużych rozmiarach i masie oraz naruszać strukturę obiektów statycznych, stanowi bardzo poważne zagrożenie dla ludzi.**

Opisane powyżej wartości są zbieżne z przyjętymi w „Metodyce opracowania map zagrożenia powodziowego dla potrzeb wdrażania Dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim” wykonanej na zlecenie Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej w 2009 r.

Wyznaczenie stref zalewowych dla potrzeb prezentowania zasięgu katastrofy zapory polega na stworzeniu numerycznego modelu powierzchni wody (NMPW). Połączenie numerycznego modelu powierzchni wody z numerycznym modelem terenu

w systemach GIS pozwala na wyznaczenie zasięgu zalanych obszarów oraz rozkładu głębokości w wyznaczonym obszarze. Wygenerowane w systemach GIS strefy zalewu zaleca się wizualizować na mapach topograficznych lub ortofotomapach, tak aby maksymalnie ułatwić interpretację zagrożenia spowodowanego katastrofą budowli piętrzącej. Analizując wykonane strefy zalewu należy zwrócić uwagę na obszary, które zostały wyznaczone jako tereny zalane, a nie mają kontaktu z główną strefą zalewu. Może to być spowodowane dokładnością NMT lub wynikać z niewłaściwych założeń na etapie budowy modelu hydraulicznego. Obszary takie należy poddać interpretacji eksperckiej i w przypadku stwierdzenia ich niepoprawności wyłączyć z zasięgu stref zalewowych.

Zasady tworzenia NMPW uzależnione są od zastosowanego w obliczeniach modelu numerycznego. W modelach jednowymiarowych, w których wynikiem obliczeń jest poziom zwierciadła wody jednakowy dla całego przekroju nanosi się wyznaczone przekroje dolinowe i korytowe jako linie łamane o znanych współrzędnych X, Y oraz obliczonej dla danego przekroju rzędnej zwierciadła wody. Otrzymany w ten sposób zbiór izolinii przekształcany jest w systemach GIS w NMPW. W przypadku obliczeń wykonanych przy pomocy modeli dwuwymiarowych (lub trójwymiarowych) wynikiem obliczeń jest bezpośrednio NMPW.

**Poza mapami wyznaczającymi maksymalny obszar zalania, w przypadku analiz zagrożeń powodziowych spowodowanych katastrofą budowli piętrzącej zaleca się wykonanie map obrazujących zasięg strefy zalewowej w ściśle określonym czasie, liczonym od momentu katastrofy budowli piętrzącej.**

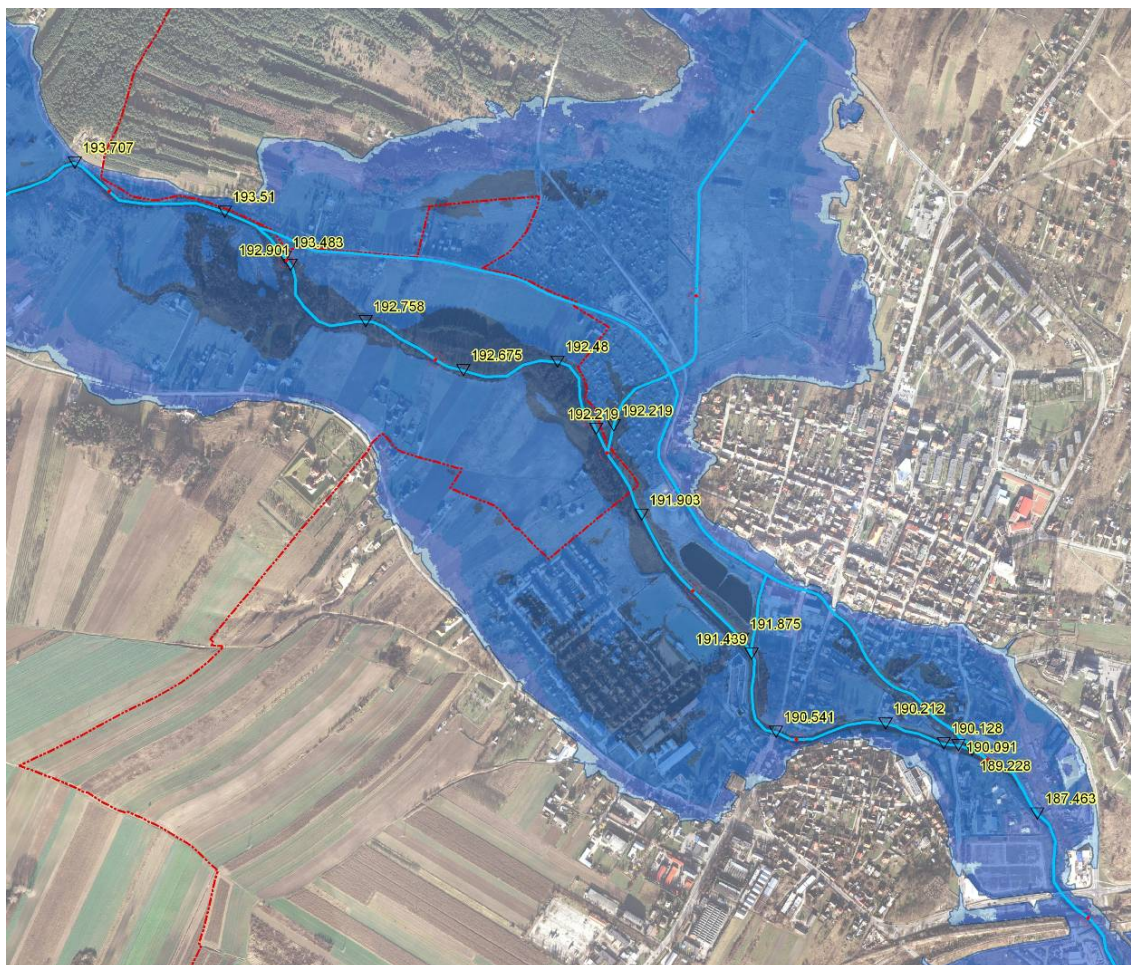
Zarówno w przypadku zapory betonowej jak i ziemnej jest to złożony proces, ponadto jego przyczyny są odmienne w przypadku zapór ziemnych i betonowych.

Pierwszym problemem jest konieczność ustalenia momentu, który uznany powinien być za początek wypływu fali z przekroju zaporowego (tzw. „czas zero”). O ile w przypadku zapory betonowej problem ten nie występuje, ponieważ zniszczenie korpusu zapory trwa od kilku do kilkunastu minut, to w przypadku zapory ziemnej proces formowania się kanału wywołanego przebicciem, lub wyrwy powstałej na skutek przelania się wody przez koronę trwa znacznie dłużej i uwarunkowany jest m.in. od parametrów gruntu, z którego wykonany jest korpus obiektu – w związku z tym proces ten może trwać od jednej do nawet kilku godzin. Sytuacja taka powoduje

problem z jednoznacznym ustaleniem momentu, który uznany powinien być za początek wypływu fali z przekroju zaporowego (tzw. „czas zero”).

Kolejny problem pojawia się w momencie określania czasu dojścia czoła fali do poszczególnych, charakterystycznych punktów w dolinie poniżej zapory. Każda dolina rzeczna w której lokowany jest zbiornik charakteryzuje się odmienną geomorfologią, co wpływa na zasięg i prędkości przemieszczania się fali oraz zagospodarowaniem terenu co powoduje, iż fala w różnym czasie dociera do kolejnych zlokalizowanych w dolinie miejscowości (jest to z kolei istotne dla służb kryzysowych).

**W związku z powyższym zasięg stref zalewowych po określonych przedziałach czasowych powinien być ustalany dla każdego obiektu i scenariusza indywidualnie i bazować na eksperckiej ocenie przebiegu zjawiska katastrofy zapory i wypływu wody przez wyrwę, uwzględniającej dodatkowo specyfikę doliny poniżej obiektu (zlewnia górską, nizinna, gęsta, luźna zabudowa itp.).**



Rysunek 8. Fragment mapy z wyznaczoną strefą zalewową.

## 8. Ocena zagrożenia dla terenów położonych poniżej zapory

Strefy zalewowe wyznaczone w oparciu o wybrane scenariusze katastrofy zapory pozwalają na ocenę zagrożenia dla terenów położonych w dolinie poniżej obiektu, który ulega katastrofie. Analiza tego typu jest szczególnie ważna dla struktur zarządzania kryzysowego, pozwalając organom administracji rządowej i samorządowej określić zakres możliwych zniszczeń oraz opracować scenariusze działań prewencyjnych związanych przede wszystkim z ostrzeganiem oraz ewakuacją ludności z zagrożonych terenów.

Ocenę zagrożenia dla terenów położonych poniżej zapory przeprowadza się poprzez ilościowe i przestrzenne określenie zagrożeń dla różnego typu infrastruktury znajdującej się w dolinie rzecznej poniżej przekroju zaporowego dla założonych wcześniej scenariuszy awarii zapory.

**Zaleca się, aby ocenę zagrożenia przeprowadzić w oparciu o ustalone klasy obiektów kubaturowych (zabudowa) oraz obiektów liniowych (drogi, linie kolejowe).**

**Proponuje się przyjęcie następujących klas obiektów kubaturowych do oceny zagrożenia:**

- Budynki gospodarcze,
- Budynki mieszkalne,
- Obiekty przemysłowe,
- Budynki użyteczności publicznej,
- Cmentarze,

**oraz klas obiektów liniowych:**

- Drogi,
- Linie kolejowe,
- Obwałowania.

Klasy powyższe należy potraktować jako podstawowe, pozwalające na szacunkowe określenie możliwych zagrożeń dla zdrowia i życia ludności a także zagrożeń związanych z funkcjonowaniem przemysłu, administracji oraz zapewnieniem ciągłości transportu. W zależności od potrzeb i założonych celów oceny można poszerzać zakres analizowanych klas o kolejne związane np. z ochroną przyrody (obszary Natura 2000,



rezerваты i pomniki przyrody, itd.), bezpieczeństwem energetycznym (lokalizacja linii energetycznych, stacji elektroenergetycznych), skażeniami chemicznymi, biologicznymi itd.

## 9. Wskazania dotyczące wyboru oprogramowania

Podstawą właściwego określenia przebiegu zjawiska katastrofy zapory oraz ew. transformacji fali wywołanej tym zjawiskiem w dolinie poniżej jest dobór odpowiedniego narzędzia do przeprowadzenia wymaganych analiz.

Przy podejmowaniu decyzji o wyborze oprogramowania należy wziąć pod uwagę kwestie przedstawione w poniższych podrozdziałach.

### 9.1. Określenie typu budowli, która będzie poddawana analizie

W zależności czy będzie to budowla ziemna czy betonowa konieczne będzie zastosowanie odmiennych formuł obliczeniowych. W przypadku symulacji katastrofy zapory ziemnej możliwe będą jej dwie przyczyny: przebicie hydrauliczne lub przelanie się wody przez koronę zapory. W następstwie tych zjawisk konieczne będzie modelowanie procesu erozji wyrwy z uwzględnieniem zmiennego w czasie procesu niszczenia oraz różnego kształtu wyrwy. W przypadku katastrofy zapory betonowej konieczna będzie symulacja nagłego zniszczenia jednej lub kilku sekcji zapory betonowej. Istnieją dwie możliwości analizy tego zjawiska – uproszczone z zastosowaniem formuł empirycznych lub zaawansowane analizujące przebieg zjawiska w czasie z wykorzystaniem narzędzi do modelowania hydraulicznego. **Zaleca się korzystanie z gotowych narzędzi informatycznych w celu analizy tych zjawisk.**

### 9.2. Wskazanie czy analizie podlegać będzie sam obiekt, czy również dolina poniżej

W przypadku, gdy celem analizy jest nie tylko określenie hydrogramu powstałego na skutek katastrofy zapory ale również jego transformacja w dolinie rzeki poniżej, należy wykorzystać model hydrodynamiczny. Z uwagi na gwałtowność zjawiska konieczne

jest zastosowanie modelu hydraulicznego dla ruchu nieustalonego. **Wskazane jest, aby w tego typu analizach wykorzystywać zintegrowane narzędzia, które umożliwiają jednoczesną analizę katastrofy zapory i będącą jej efektem transformację fali powodziowej w dolinie poniżej.**

### **9.3. Określenie czy w analizie transformacji hydrogramu w dolinie poniżej zapory będą uwzględniane obiekty inżynierskie**

Na etapie przystąpienia do wyboru narzędzi do określenia przebiegu zjawiska katastrofy zapory i transformacji powstałej na jej skutek fali wezbraniowej należy określić, czy w analizach będzie uwzględniany wpływ obiektów inżynierskich – takich jak mosty, stopnie, progi itp. **W przypadku analizy doliny rzecznej poniżej zapory, która uległa katastrofie, warto kierować się trzema kryteriami (naporu, głębokości i prędkości) opisanymi w punkcie 6.2.4 niniejszej metodyki. W przypadku, gdy analiza kryteriów wykaże potrzebę implementacji części obiektów do modelu hydrodynamicznego narzędzie wybrane do analiz powinno umożliwiać transformację fali wezbraniowej przez obiekty inżynierskie, przy jednoczesnym założeniu, iż będą one pracowały zarówno grawitacyjnie jak i ciśnieniowo.**

### **9.4. Ustalenie sposobu odwzorowania katastrofy zapory**

Przy podejmowaniu decyzji o wyborze narzędzia do budowy modelu należy określić w jaki sposób odwzorowane zostanie w modelu zjawisko katastrofy. Z technicznego punktu widzenia istnieją metody pozwalające na odwzorowanie procesu zniszczenia zapory bezpośrednio w głównym narzędziu do modelowania, wykorzystywanym równocześnie do obliczeń transformacji fali w dolinie poniżej, jak również metody polegające np. na obliczeniu zniszczenia zapory w innym – „zewnętrznym” programie i przeniesieniu wynikowego hydrogramu wypływu wody przez uszkodzony przekrój w miejsce górnego warunku brzegowego w głównym modelu dla doliny. W pierwszym przypadku, implementacja kształtu zapory oraz zjawiska „dambreak” dokonywana jest na ogół w specjalnym module obliczeniowym, pozwalającym na wprowadzenie

parametrów i wielkości charakterystycznych symulowanego uszkodzenia zapory. W drugim przypadku odwzorowanie procesu katastrofy następuje w odrębnym, specjalnie do tego celu skonstruowanym oprogramowaniu. Z uwagi na powyższe, przed zakupem oprogramowania należy dokładnie przeanalizować techniczne możliwości dostępnych na rynku narzędzi do modelowania w zakresie odwzorowania zjawiska katastrofy zapory. **Z uwagi na integralność modelu, zapewniającą możliwość wykonywania wielowariantowych analiz i późniejszą łatwość interpretacji wyników, rekomendowane jest implementowanie zjawiska katastrofy zapory bezpośrednio w modelu hydrodynamicznym, który ma równocześnie posłużyć do obliczeń propagacji fali powodziowej wywołanej katastrofą zapory.**

## **9.5. Określenie sposobu modelowania doliny poniżej (model jedno czy dwuwymiarowy)**

Wybór właściwego rodzaju transformacji fali powodziowej zależy od charakterystyki geomorfologicznej doliny poniżej zapory, która uległa katastrofie. W przypadku zlewni zwartych, gdzie przeważa przepływ wzdłuż ograniczonej w przestrzeni doliny, właściwym rozwiązaniem jest zastosowanie modelu jednowymiarowego. W przypadku gdy dolina poniżej zapory jest rozległa i płaska a woda rozlewa się szeroko, niekoniecznie wzdłuż kierunku przebiegu koryta głównego, bardziej odpowiednim jest wykorzystanie modelu dwuwymiarowego (a więc takiego, które pozwala określić lokalne kierunki i prędkości przepływu wody niezależnie od głównego przebiegu doliny). W praktyce inżynierskiej wybór ten jest znacznie bardziej złożony, a wyżej opisane kryterium nie jest jedynym brany pod uwagę przy wyborze modelu. Należy na tym etapie uwzględnić dodatkowo takie czynniki jak łatwość zastosowania konkretnego modelu transformacji fali, dostępność danych wejściowych, znaczenie (wartość) zalewanych terenów, czas wykonywanych obliczeń, możliwości finansowe zlecającego czy oczekiwana dokładność obliczeń. W tym miejscu należy zauważyć, iż osiągalna na drodze modelowania matematycznego dokładność samego procesu katastrofy zapory jest obarczona znacznym błędem – analizowane jest hipotetyczne, bardzo złożone zjawisko fizyczne, którego dokładny przebieg można ocenić jedynie w przypadku zaistnienia katastrofy, a również w tym przypadku wystąpi tylko jeden z

możliwych hipotetycznie przypadków katastrofy. W świetle powyższego stosowanie modeli dwuwymiarowych jest mocno dyskusyjne i brak jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, na ile zastosowanie modelu 2D wpłynie na jakość uzyskanych wyników. **W związku z powyższym sugeruje się stopniowanie poziomu szczegółowości obliczeń:**

1. **Utworzenie prostego modelu 1D obejmującego całą dolinę.**
2. **W przypadku problemów interpretacyjnych uszczegółowienie modelu 1D poprzez wprowadzenie dodatkowych gałęzi sieci rzecznych.**
3. **Wykonanie modelu dwuwymiarowego dla wybranych (głównie silnie zurbanizowanych) obszarów.**

## **9.6. Określenie celu analizy i sposobu prezentacji wyników**

W przypadku, gdy celem prac jest wyznaczenie zasięgu stref zalewowych powstałych na skutek katastrofy zapory lub analizy przestrzenne ilości obiektów kubaturowych i liniowych, które znajdują się w zasięgu oddziaływania tych stref, ważne jest aby istniał prosty sposób eksportu wyników analizy katastrofy zapory oraz transformacji fali w dolinie poniżej do systemów informacji przestrzennej. **Oprogramowanie do modelowania powinno także umożliwiać eksport wyników analiz do plików tekstowych oraz arkuszy kalkulacyjnych.**

**Podsumowując rozdział dotyczący wskazań dotyczących wyboru oprogramowania, dla potrzeb właściwego określenia przebiegu zjawiska katastrofy zapory oraz transformacji fali wywołanej tym zjawiskiem w dolinie poniżej najwłaściwszym rozwiązaniem – uwzględniającym bieżące techniki obliczeniowe i aktualne rozwiązania z zakresu hydroinformatyki – jest wykorzystanie ogólnodostępnego oprogramowania do modelowania hydraulicznego, spełniającego ww. warunki.**

Przykładem takiego oprogramowania jest pakiet oprogramowania MIKE11 (w przypadku analiz bazujących na modelowaniu jednowymiarowym) wraz z dodatkowymi modułami Dambreak oraz Structure Operations lub MIKE FLOOD (modelowanie dwuwymiarowe) wykorzystywany w ramach projektu PL0456

„Zagrożenia powodziowe powstałe w wyniku katastrof budowli piętrzących” lub inne oprogramowanie porównywalne, spełniające wyżej określone wymagania.

## 10. Literatura

1. Dariusz Gotlib, Adam Iwaniak, Robert Olszewski, GIS: obszary zastosowań. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.
2. DHI, Mike 11, MikeNAM, MikeGIS User Guide and Scientific Documentation. 2009.
3. DHI, Modeling the world of water. Software catalogue, 2009.
4. Henrik G. Muller, Morten Rungoe, Integrating Floodplain management and numerical modelling, using ArcView Danish Hydraulic Institute. 1996.
5. Lynn E. Johnson, Geographic Information Systems in Water Resources Engineering. Taylor Francis Group 2009.
6. Shamsi, U.M. GIS and Modeling Integration. CE News, Vol. 13, No. 6, July 2001, (2001).
7. E. Fontenot, D. Kerper, M. Butts, A. Taylor – "Achieving stakeholder credibility – A flood modelling case study" – b.d. – b.d.
8. Georgina Corestein, Ernest Bladé, Manuel Gómez, Josep Dolz, Eugenio Oñate, Javier Piazzese, - "1d Cross Sections From A 2d Mesh, A Feature For A Hydraulic Simulation Tool" - Barcelona, Spain - 2006
9. B. Lin, J. M. Wicks, R. A. Falconer, K. Adams – "Integrating 1D and 2D hydrodynamic models for flood simulation" – b.d. – 2006
10. M.G.F. Werner – "A comparison of flood extent modeling approaches through constraining uncertainties on gauge data" – Delft, The Netherlands - 2004
11. "Mike 21 Flow Model, Hydrodynamic Module, User Guide" – Hørsholm, Denmark – 2007
12. "Mike 21 Flow Model, Hydrodynamic Module, Scientific Documentation" – Hørsholm, Denmark – 2007
13. "Mike Flood, 1D-2D Modelling, User Manual" - Hørsholm, Denmark – 2007
14. Dam Failures. Statistical Analysis, Ruptures de barrages. Analyse statistique, 1995. Biuletyn99 Icold – cigb.
15. Katastrofy zapór analiza statystyczna. Biuletyn 99 CIGB – ICOLD, 2000, Storożyńska K. [red], Polski komitet Wielkich zapór, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

16. Fiedler K., 2007, Awarie i katastrofy zapór – zagrożenia, ich przyczyny i skutki oraz działania zapobiegawcze. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, s. 216.
17. Agata Włodarczyk, Aleksandra Seliga „ Metodyki na potrzeby opracowania dokumentów implementujących dyrektywę powodziową w Polsce”, Hydrotechnika XII 2010, Ustroń 18-20 maja 2010,
18. Ustawa z dnia 17 lutego 2005r o informatyzacji działalności podmiotów realizujących zadania publiczne (Dz. U. Nr 64 poz. 565)
19. Ustawa z dnia 12 lutego 2010r. o zmianie ustawy o informatyzacji działalności podmiotów realizujących zadania publiczne (Dz. U. Nr 40 poz. 230)
20. Kubrak J., Nachlik E. Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych, Monografia , Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
21. Nachlik E., Kostecki S., Gądek W., Stochmal R. Stefy zagrożenia powodziowego, BKPBS, Wrocław 2000.
22. Nowak J. Flood Wave Forecasting in Large River Catchment. Proc. of International Conference on „Operational Hydrology”. Wola Zręczycka 22-24.09.1991: s 123-135, 1992.
23. Ozga-Zielińska M. i inni Powodziogenność rzek pod kątem bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych i zagrożenia powodziowego, Materiały Badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia no 29, IMGW Warszawa 2003.
24. Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. Hydrologia stosowana. PWN, Warszawa 1994.
25. Radczuk L., Szymniewicz R. i inni Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego, BKPBS, Wrocław 2001.
26. Szymkiewicz R. Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach, PWN Warszawa 2000.
27. Wołoszyn J., Czamara W., Eliasiewicz R., Krężel J. Regulacja rzek i potoków, AR Wrocław 1994.
28. Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, 2002.
29. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains; USGS, Water-supply Paper 2339.
30. Handbook on good practices for flood mapping in Europe, 2007.

31. A. Borowicz, J. Kwiatkowski, J. Spatka, E. Zeman – „Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego dla potrzeb wdrażania Dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim” DHI Polska, Warszawa 2009
32. A. Buczek, B. Hejmanowska, M. Marmol, R. Rachwał, S. Rachwał – „Metodyka opracowania produktów geodezyjnych i kartograficznych dla potrzeb wdrażania Dyrektywy 2007/60/WE w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim”, Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne w Krakowie Sp. z o.o.; Kraków 2009
33. K.Molkersrød, T.Konow – „Non-structural requirements on dams in Norway”, Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), b.d.
34. J. Jorgeson, X. Ying, W. Wardlaw – “Two-Dimensional Modeling Of Dam Breach Flooding”, US-China Workshop On Advanced Computational Modelling In Hydroscience & Engineering; September 19-21, Oxford, Mississippi, USA
35. Ying, X. and Wang, S.Y. “Two-dimensional numerical simulations of Malpasset dam-break wave propagation,” Proceedings of 6th International Conference on Hydroscience and Engineering, Brisbane, Australia, May 30 – June 3, 2004.