

**SAFEDAM - ZAAWANSOWANE TECHNOLOGIE WSPOMAGAJĄCE
PRZECIWDZIAŁANIE ZAGROŻENIOM ZWIĄZANYM
Z POWODZIAMI**

**SAFEDAM - ADVANCED TECHNOLOGIES IN THE PREVENTION OF
FLOOD HAZARD**

Zdzisław Kurczyński, Krzysztof Bakula

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: monitoring, wały przeciwpowodziowe, LiDAR, UAV, zobrazowania satelitarne, SEKOP, ISOK, ryzyko powodziowe, zagrożenie powodziowe

STRESZCZENIE: Artykuł prezentuje trendy panujące w nieinwazyjnym monitorowaniu wałów przeciwpowodziowych z wykorzystaniem różnorodnych technologii fotogrametrycznych i teledetekcyjnych pozyskujących dane z różnego pułapu lotniczego. Na tym tle zaprezentowano projekt SAFEDAM, którego celem jest stworzenie systemu monitorującego wały przeciwpowodziowe z użyciem nieinwazyjnej, latającej bezzałogowej platformy pomiarowej - skanującej z niskiego pułapu lotu i wykorzystaniu zobrazowań lotniczych i satelitarnych. System będzie wykorzystywał wieloźródłowe dane fotogrametryczne. SAFEDAM umożliwi wykorzystanie z pułapu satelitarnego zarówno danych optycznych (z zakresu światła widzialnego i bliskiej podczerwieni) jak i danych radarowych. W odniesieniu do technik lotniczych wykorzystanie mają dane fotogrametryczne z przycisk zasobu jak i dane pozyskane z platformy BSP (UAV) dedykowanej projektowi SAFEDAM. Wśród danych niskopułapowych wykorzystane są dane z lekkiego skanera lotniczego, obrazowe dane wielospektralne, a także dane termalne. Wieloźródłowe dane pozwalają na przeprowadzenie oceny stan wałów przeciwpowodziowych, jak również umożliwić będą wykrycie ewentualnych zmian, które mogą zaistnieć zarówno w prewencyjnej jak i interwencyjnej konfiguracji systemu. W założeniach system umożliwiać będzie ekspercką ocenę wałów przeciwpowodziowych, która potrzebna jest w pracy specjalistów od zarządzania infrastrukturą przeciwpowodziową, a także organom bezpieczeństwa kryzysowego. Kompleksowy system IT będzie gromadził dane i automatycznie je analizował i wizualizował dostarczając informacji o stanie zagrożenia dla służb hydrologicznych i specjalistów zarządzania kryzysowego. Całość systemu będzie uzupełnieniem dotychczasowych projektów ochrony przeciwpowodziowej kraju (np. ISOK). Projekt SAFEDAM realizujący te założenia finansowany jest ze środków Narodowego Centrum Badania i Rozwoju w programie Bezpieczeństwo i Obronność

1. WPROWADZENIE

Europa, a w tym Polska, w minionych latach była nawiedzana katastrofalnymi powodziami, np. w 1997 czy 2010 roku. Ich przyczyny można upatrywać w zmieniających się warunkach klimatycznych, ale również w nietrafionych inwestycjach, ingerujących w środowisko, a w tym jego przeobrażeniach skutkujących zmniejszeniem naturalnej retencji wód wezbraniowych. Powstały normy i akty prawne, mające na celu ograniczanie ryzyka związanego z tymi geozagrożeniami. Jednym z takich aktów jest Dyrektywa 2007/60/WE

zwana potocznie "Dyrektywą powodziową". Jej implementacją w Polsce jest Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami - ISOK, w którym powódź postrzegana jest jako główne zagrożenie naturalne dla Polski. W projekcie tym ostatecznym produktem, po mapach zagrożenia i ryzyka powodziowego, są plany zarządzania ryzykiem powodziowym. System ISOK pomaga w przeciwdziałaniu ewentualnych negatywnych skutków powodzi w kraju poprzez zarządzanie ryzykiem powodziowym (Kurczyński, 2012).

Opracowanie map zagrożenia powodziowego opiera się głównie na precyzyjnej informacji o ukształtowaniu powierzchni terenu, wyrażanej w formie numerycznego modelu terenu (NMT). Technologią pomiarową najczęściej stosowaną w Europie do zbierania danych niezbędnych do przeprowadzania symulacji wezbraniowych w celu opracowania map zagrożenia powodziowego jest lotnicze skanowanie laserowe ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*) potocznie określane jako LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*), która została zastosowana również w systemie ISOK. Prawie cały kraj został pokryty danymi ze skanowania laserowego, z których wygenerowano między innymi precyzyjny NMT, bardzo dokładnie oddający kształt powierzchni terenu. Dokładność wysokościowa tego modelu, wyrażona przez średni błąd wysokości dowolnego punktu wyinterpolowanej z wynikowego rastrowego NMT określono na poniżej 0.15 m w terenach odkrytych i 0.30 m w terenach zalesionych (Kurczyński i Bakula, 2013).

Przy opracowaniu map zagrożenia powodziowego, przyjęto metodykę wyznaczania stref zagrożenia w przypadku awarii wałów przeciwpowodziowych, zakładającą, że dla całego dorzecza „usuwano” kolejno wał lewobrzeżny i prawobrzeżny szacując zasięg stref zalewowych. Przy wyznaczaniu obszaru zagrożonego powodzią nie analizowano przyczyn i mechaniki powstawania zniszczenia wałów, wielkości (skali) awarii oraz wpływu na te elementy zaobserwowanego wcześniej stanu technicznego wału, jego konstrukcji i posadowienia. Uniemożliwia to wyznaczanie poziomu ryzyka obszarów chronionych wałami z uwzględnieniem ich konstrukcji, miejsca posadowienia, a szczególnie jego stanu technicznego. Brak takiej możliwości nie pozwala na racjonalne ustalenie priorytetów w planowaniu remontów i przebudowy wałów z uwzględnieniem wielkości zidentyfikowanego ryzyka na obszarach chronionych wałami oraz uwzględnienia stanu wałów w zarządzaniu ryzykiem powodziowym w kontekście tworzenia map zagrożenia i ryzyka powodziowego. Dodatkowo tworzone mapy zagrożenia (poza tymi wykonanymi z określonym prawdopodobieństwem wystąpienia poziomu zwierciadła wody) wykonywane w ramach ISOK nie do końca oddają zatem możliwe do zaistnienia scenariusze awarii wałów.

Przydatność technologii lotniczego skanowania laserowego w monitoringu wałów przeciwpowodziowych przedstawiona została w publikacji Long *et al.* (2010). Dane te są źródłem najdokładniejszych informacji o wysokości terenu, w tym o kształcie wału przeciwpowodziowego. Przykłady chmur punktów ALS (ISOK) dla fragmentu wałów przeciwpowodziowych (w Standardzie I i II o gęstości danych odpowiednio 4 i 12 punktów/m²) zaprezentowane zostały w publikacji Kurczyńskiego i Bakuly (2013).

W Holandii - kraju, który zmuszony jest to szczególnej troski o wały przeciwpowodziowe z racji położenia dużej części kraju poniżej poziomu Morza Północnego, prowadzone są intensywne badania dotyczące mechaniki powstawania awarii wałów, jednak badane są wały o wysokim standardzie ich wykonania. W polskich warunkach mamy jednak do czynienia ze zróżnicowaną sytuacją. Są wały wykonane

zgodnie ze sztuką budowlaną, lecz wiele kilometrów wałów jest wykonanych na przełomie XIX i XX wieku. Trudno zatem mówić o spełnianiu przez nie współczesnych wymagań jakościowych. Wiele tych wałów jest posadowionych na starorzeczach, gdzie zachodzi wzmożone ryzyko powstawania ich uszkodzenia. Na podstawie uzyskanych z: Regionalnych Zarządów Gospodarki Wodnej (RZGW), Wojewódzkich Zarządów Melioracji i Urzędzeń Wodnych (WZMiUW), Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór (IMGW-OTKZ), Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi (MRiRW) – ocen stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli, można wnioskować, że zagraża lub może stanowić poważne zagrożenie bezpieczeństwa ponad 30% urzędzeń wodnych stale piętujących wodę, oraz ponad 1900 km obwałowań. Główny wpływ na taki stan mają:

- minimalny zakres wykonywanych napraw i remontów lub ich brak, związany z brakiem środków finansowych,
- proces starzenia się budowli oraz zniszczenia i uszkodzenia budowli w wyniku występowania częstszych i większych fal wezbraniowych, oraz
- niewystarczająca kontrola stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli.

Na podstawie genezy oraz rodzaju uszkodzeń wałów przeciwpowodziowych zaproponować można następujący ich podział (Jermułowicz, 2015):

1. uszkodzenia/ubytki mas ziemnych;
2. uszkodzenia powierzchniowe;
3. deformacje skarp;
4. osuwiska/zsuwy ziemne;
5. pęknięcia korpusu;
6. rozmycie wału.

Stan wałów przeciwpowodziowych określany jest obecnie przy wykorzystaniu tradycyjnych pomiarów geodezyjnych (tachimetria, niwelacja, pomiary GNSS) uzupełnionych pomiarami geotechnicznymi (wiercenia, sondowania, badania geofizyczne). Dane te gromadzone są w bazach danych odpowiednich jednostek, które zarządzają wałami, ale nie istnieje jednak wspólna baza integrująca wszystkie informacje o wszystkich wałach przeciwpowodziowych. Jedną z większych baz jest System Ewidencji Obiektów Piętujących (SEKOP) prowadzony przez Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego. Baza ta pomimo gromadzenia w niej informacji o stanie wałów przeciwpowodziowych na podstawie wykonywanych regularnie pomiarów nie ma jednak bezpośredniego przełożenia na zarządzanie ryzykiem powodziowym. Nie była również uwzględniona w systemie ISOK. Dane zapisane są w postaci wektorowej w środowisku CAD co uniemożliwia wykonywanie analiz przestrzennych w środowisku GIS, szczególnie w celu wyeksponowania zmian w funkcji czasu.

Niniejszy artykuł prezentuje różnorodne podejścia stosowane w monitorowaniu wałów przeciwpowodziowych z wykorzystaniem różnorodnych technologii teledetekcyjnych wykorzystujących dane z różnego pałapu. Główną częścią artykułu jest jednak prezentacja założeń projektu naukowo-wdrożeniowego, w którym mieć będą

zastosowanie różnorodnych technologii fotogrametrycznych tworząc system zarządzania wałami przeciwpowodziowymi i ryzykiem powodziowym z nimi związanym.

2. TRENDY W MONITOROWANIU WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH TECHNIKAMI TELEDETEKCYJNYMI

Analizując literaturę znaleźć można przykłady różnorodnych technologii teledetekcyjnych, w tym m. in.: interferometrii radarowej, pomiarów satelitarnych GNSS, obrazowań satelitarnych w zakresie optycznym i mikrofalowym (radarowym), lotniczego skanowania laserowego, zdjęć lotniczych czy danych z pokładu UAV, w monitoringu wałów przeciwpowodziowych. Niniejszy rozdział wprowadza i przedstawia krótko możliwości wykorzystania wymienionych technik.

2.1 Monitorowanie z pułapu lotniczego i satelitarnego

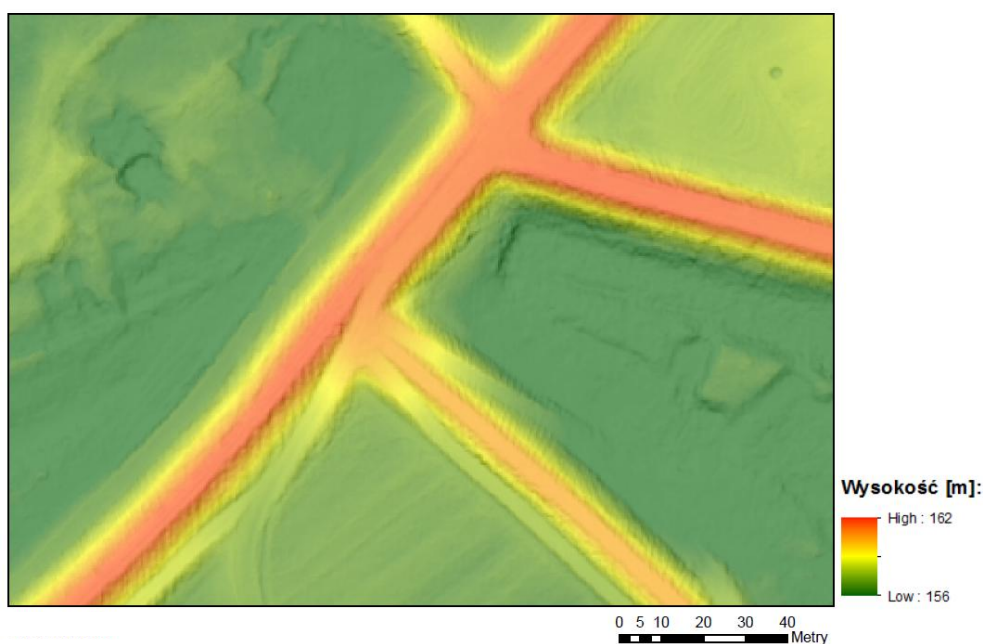
Dane satelitarne wykorzystywane w globalnych analizach mogą być stosowane w monitoringu wałów przeciwpowodziowych. Dotyczy to zarówno danych radarowych (Aanstoos *et al.*, 2010; Zeghal *et al.*, 2011; Lv *et al.*, 2013), jak i optycznych (Hossain *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2011). Rozwój tej technologii skutkuje nieustającym zwiększaniem rozdzielczości przestrzennej (coraz mniejszy piksel) i czasowej (coraz częściej pozyskiwane zdjęcia) dla większości obszaru naszego globu. Dane te w przypadku wielu systemów są, szczególnie w projektach UE, dystrybuowane nieodpłatnie. W Europie, w ramach programu Copernicus funkcjonuje nieodpłatny dostęp do danych satelitarnych m.in. z satelitów serii Sentinel, rejestrujących dane w zakresie optycznym i radarowym, które mogą również mieć zastosowanie w ochronie przeciwpowodziowej. Problemami sygnalizowanymi jednak w pracach naukowych jest fakt, iż udział systemów satelitarnych istnieje w systemach, które działają w przynajmniej dwóch skalach: globalnej i lokalnej. Dane satelitarne służą tu jedynie do monitorowania i wskazywania miejsc dla dokładniejszych pomiarów. Rekomendowane są wręcz pomiary uzupełniające wykonywane w oparciu o bardziej precyzyjne technologie.

Narzędzie wykorzystujące dane satelitarne służyć może wielkoobszarowej analizie obrazowań w celu preselekcji obszarów dedykowanych dla pomiaru platformą bezzałogową. W systemie monitorującym wały przeciwpowodziowe można wykorzystać również dane gromadzone i bezpłatnie udostępniane jednostkom budżetowym przez Służbę Geodezyjną (ortofotomapy lotnicze, numeryczne modele wysokościowe powstałe z danych ALS, a także bazy danych topograficznych). Narzędzie wieloczasowych analiz za pomocą przetwarzania i obserwacji szeregów czasowych wskazywać może na drodze nieskomplikowanych analiz bazujących na wskaźnikach roślinności, obszary, gdzie może mieć miejsce podmywanie, przesączanie, występowanie nielegalnych obiektów, antropopresja i wpływ zwierząt.

2.2. Platformy bezzałogowe w monitoringu wałów

Dane ze skanowania laserowego w sposób quasi-ciągły (dane w postaci dyskretnej, ale o dużej gęstości) oddają zazwyczaj dobrze kształt wałów przeciwpowodziowych

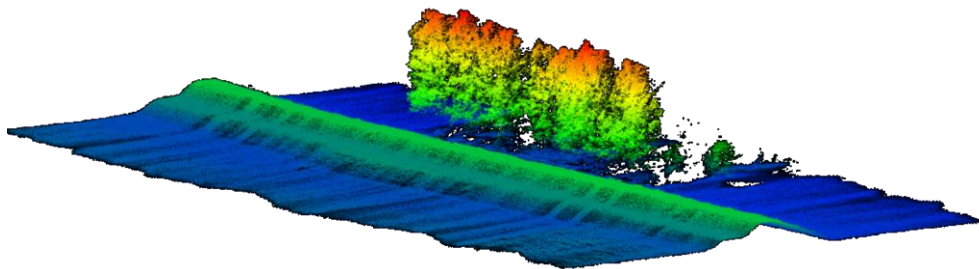
(Long *et al.*, 2010). Przykład opracowania danych lotniczego skanowania laserowego w postaci modelu wysokościowego zwizualizowanego za pomocą palety barwnej i modelu cieniowanego przedstawia rysunek 1 obrazujący fragment wału przeciwpowodziowego. Dużym problemem w wykorzystaniu danych ALS w monitoringu wałów przeciwpowodziowych w Polsce jest jednak fakt, że kolejna edycja skanowania laserowego w skali całego kraju nastąpi nieprędko, stąd lotnicze skanowanie z pułapu lotniczego nie może posłużyć jako źródło danych do permanentnego monitoringu wałów. Stacjonarne skanowanie naziemnymi skanerami, które są już popularnym narzędziem pracy geodetów jest z kolei techniką o małej wydajności. Aby skan obejmował wały przeciwpowodziowe z obu stron, instrument pomiarowy (skaner) musiałby być umieszczony po obu stronach wału (co zmniejsza wydajność) lub na wale, co jest niepożądane podczas wezbrania.



Rys. 1. Widok nałożenia barwnej prezentacji wysokościowej wału przeciwpowodziowego (m. n.p.m.; układ wysokości Kronsztadt 86) i modelu cieniowanego prezentującego topografię wału przeciwpowodziowego (źródło danych ISOK).

Rozwiązaniem tej kwestii są bezzałogowe statki latające (UAV) wykorzystywane od kilku lat w wielu zadaniach związanych z pomiarami o wysokiej dokładności wykonywanych w krótkich odstępach czasu bez znaczących nakładów finansowych również w monitorowaniu wałów przeciwpowodziowych (Tournadre *et al.*, 2014). W ostatnich kilkunastu latach obserwujemy też ogromny rozwój technologii lotniczego skanowania laserowego, które jednak dopiero 2-3 lata temu stało się możliwe do wykonywania z pułapu bezzałogowych platform latających. Badania Flener *et al.*, 2013 udowadnia, że prace tego typu są możliwe również dla bezzałogowych systemów latających. Platforma UAV dostarczać również może chmury punktów z systemu lotniczego skanowania, czego przykład zaprezentowano na rysunku 2 z fragmentem chmury punktów pozyskanej skanerem Yellowscan Mapper fragmentu okolic wybranego

wału przeciwpowodziowego porośniętego obok roślinnością. Dane te prezentują ogromną gęstość danych sięgającą kilkudziesięciu punktów na metr kwadratowy, a pozyskane były z wysokości 30 metrów. Ich dokładność wzajemna wynosi kilka centymetrów (Bakula *et al.*, 2016). Na świecie istnieją jedynie pojedyncze rozwiązania wykorzystujące bezzałogowe platformy lotnicze w monitorowaniu stanu wałów przeciwpowodziowych (Pilarska *et al.*, 2016). Platformy te wykorzystują zazwyczaj niskopułapowe stereoskopowe rejestracje fotograficzne, które służą do pozyskania chmury punktów metodami fotogrametrycznymi. Wykorzystanie w tym celu skanera lotniczego na platformie UAV polepsza wyniki tradycyjnej platformy rejestrującej tylko obrazy cyfrowe przez możliwość modelowania kształty terenu bez roślinności - co zawdzięczamy penetracji roślinności przez wiązkę lasera. Jego zaletą jest przede wszystkim nieinwazyjność pomiaru. O ile pomiar mobilnymi platformami poruszającymi się po wałach jest rozwiązaniem w wielu miejscach dopuszczalnym w okresie bez zagrożenia powodziowego, o tyle w czasie powodzi poruszanie się po namokniętych wałach przeciwpowodziowych jest kategorycznie zabronione. Uniemożliwia to pomiar i monitoring budowli hydrotechnicznych i samych wałów. Bezzałogowy statek powietrzny jest też bardziej mobilny, gdyż pomiar może wykonywać bardzo szybko po obu stronach rzeki, a w przypadku niewielkiej jej szerokości nawet jednocześnie. Zasięg skanowania platformy bezzałogowej poruszającej się ponad obiektem liniowym jest znacznie lepszy niż pomiary, które mogłyby odbywać się z pułapu naziemnego z mobilnych platform znajdujących się obok wałów (okoliczne drogi, skanowanie z platform wodnych).



Rys. 2. Widok izometryczny danych ALS w barwnej prezentacji wysokości pozyskanych z platformy UAV skanerem Yellowscan Mapper

Poza zastosowaniem ultralekkiego skanera lotniczego w monitoringu wałów przeciwpowodziowych miejsce mają kamery optyczne dostarczające danych do tworzenia ortomozajek. Szczególnie istotną informację dostarczać może kamera wielospektralna. Zdjęcia fotogrametryczne rejestrowane w kilku kanałach spektralnych (niebieski, zielony, czerwony i bliska podczerwień) dają możliwość oceny stanu wału poprzez wykrycie zmian w pokryciu roślinnością, stanu gleby odkrytej, obecności wody czy stanu roślinności porastającej glebę. Szczególnie w tym kontekście istotna jest bliska podczerwień (NIR), niemal całkowicie pochłaniana w wodzie a przez roślinność - w zależności od stanu i gatunku znacznie odbijana. Zależności te dają szansę wykrywania gleby pozbawionej pokrywy roślinnej, która to widoczna jest w większości typów uszkodzeń wałów przeciwpowodziowych.

3. PROJEKT SAFEDAM – ZAŁOŻENIA I ZAKRES REALIZACJI

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) w 2013 ogłosiło konkurs na projekt realizowany na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa, który z racji jego nierozstrzygnięcia został ponownie ogłoszony w 2015 roku (konkurs 7/2015). Projekt pt: „Zaawansowane technologie wspomagające przeciwdziałanie zagrożeniom związanym z powodzią” – akronim SAFEDAM, którego gestorami są: Państwowa Straż Pożarna, Obrona Cywilna i Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej został w wyniku postępowania konkursowego przyznany do realizacji przez 36 miesięcy konsorcjum w składzie:

- Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii – lider konsorcjum,
- Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB,
- Astri Polska Sp. z o. o.,
- Marcin Szender MSP oraz
- Centralna Szkoła Państwowej Straży Pożarnej w Częstochowie.

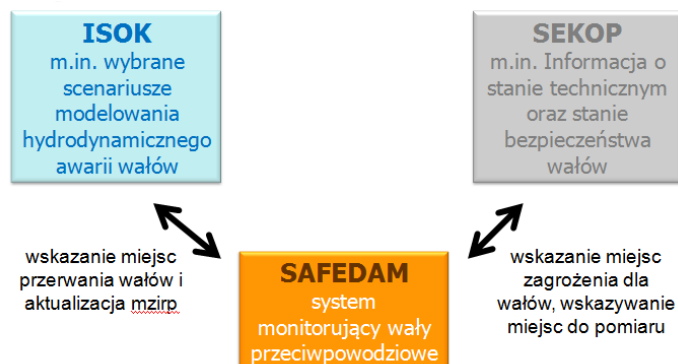
3.1 Założenia projektu

Celem projektu SAFEDAM jest zbudowanie systemu monitorującego wały przeciwpowodziowe z użyciem nieinwazyjnej, latającej bezzałogowej platformy pomiarowej skanującej wiązką lasera z niskiego pułapu lotu, przy dodatkowym wykorzystaniu zobrażeń fotolotniczych i satelitarnych. Wykorzystane są w tym celu najnowocześniejsze technologie fotogrametryczne (w tym LiDAR) i teledetekcyjne.

Kluczowym komponentem demonstratora jest komputerowy system IT, który umożliwi gromadzenie, automatyczną analizę danych 3D oraz ich wizualizację i udostępnianie określonych warstw wynikowych dla służb hydrologicznych i specjalistów zarządzania kryzysowego. System umożliwia również geopartykypację (udział społeczeństwa we współtworzeniu systemu poprzez zbieranie danych geoprzestrzennych) w monitoringu wałów przeciwpowodziowych. Jego wdrożenie zapewni efektywne zarządzanie ryzykiem powodziowym, a całość systemu będzie uzupełnieniem dotychczasowych projektów ochrony przeciwpowodziowej. Tak naszkicowany zakres projektu oznacza, że będzie on uzupełniał ograniczenia systemu ISOK poprzez bezinwazyjny monitoring stanu wałów i wskazywanie miejsc zagrożenia w celu ich szczegółowej kontroli i uzupełnienia map zagrożenia i ryzyka powodziowego (mzirp) w scenariuszach przerwania wałów przeciwpowodziowych, które do tej pory nie uwzględniały danych o stanie technicznym wałów. Tym samym system SAFEDAM wypełni lukę pomiędzy systemem ISOK a bazą SEKOP (Rys. 3.).

System SAFEDAM będzie posiadał dwie, dające się wyraźnie wyodrębnić konfiguracje:

- **interwencyjną**: badanie stanu obwałowań oraz ruchu mas gruntu w sytuacji zagrożenia powodziowego (stany ostrzegawcze i alarmowe na odcinkach rzek),
- **prewencyjną**: badanie obwałowań oraz ruchu mas gruntu przy normalnym stanie wód (badania prewencyjne na wytypowanych odcinkach wałów).



Rys 3. Miejsce system SAFEDAM w monitoring wałów przeciwpowodziowych dla wspomagania przeciwdziałania zagrożeniom powodziowym

W konfiguracji prewencyjnej w efekcie realizacji projektu powstanie system, który przygotowuje ocenę stanu wału na podstawie przestrzennej analizy wielokryterialnej gromadzonych danych rastrowych (modele wysokościowe, ortofotomapy itp.). W pracach badawczych szukane są przyczyny wystąpienia awarii w danym miejscu analizując archiwalne dane teledetekcyjne, dane pomiaru bezpośredniego geofizycznego, ucząc się wykrywania możliwych uszkodzeń.

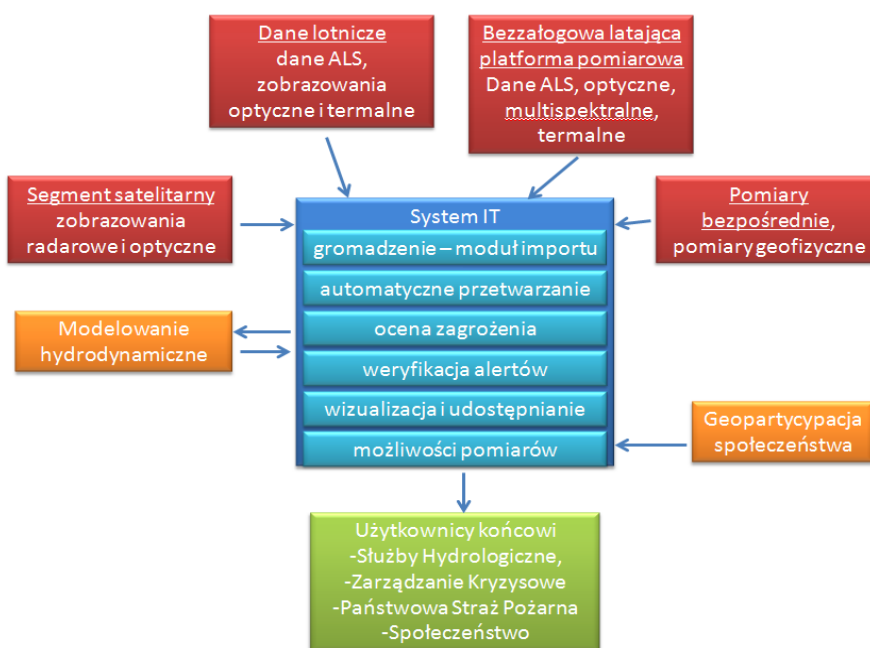
Nowe dane pozyskiwane również przez platformę UAV poprzez automatyczne ich przetworzenie z możliwością kontroli operatora przeliczać będą analizę wielokryterialną stanu wałów i zaprezentują zaktualizowane zagrożenie dla nich. Wyniki publikowane będą z różnymi uprawnieniami i zakresami treści dla grup docelowych. Przedstawiona wcześniej funkcjonalność przede wszystkim istotnie różni system od wektorowo-opisowej bazy SEKOP. Analizy w ramach systemu SAFEDAM wskazują najsłabsze punkty, dla których można przeprowadzić wariantowe symulacje wezbraniowe z przerwaniem wału przeciwpowodziowego, co uzupełnienia scenariusze map tworzonych w ramach ISOK. W wersji prewencyjnej istotne jest również narzędzie automatycznego przetwarzania danych satelitarnych (radarowych i optycznych), które z kilkudniową rozdzielczością czasową tworzyć będzie zasięg wód w rzekach informując o stanie wód pomiędzy wodowskazami. Podstawowymi funkcjonalnościami systemu SAFEDAM w konfiguracji prewencyjnej będą zatem:

- ocena stanu zagrożenia obwałowań oraz ruchu mas gruntu przy normalnym stanie wód (badania prewencyjne na wytypowanych odcinkach wałów),
- gromadzenie danych satelitarnych,
- możliwość wgrywania danych z przgik,
- zbieranie danych multisensoralną platformą UAV,
- ocena stanu wałów pod kątem wystąpienia zagrożenia,
- wskazywanie obszarów do pomiaru bezpośredniego,
- przekazywanie danych do odpowiedniego Centrum Modelowania Powodzi i Suszy (CMPiS) w celu aktualizacji lub uzupełnienia map zagrożenia i ryzyka powodziowego.

W konfiguracji interwencyjnej efektem będzie system, który umożliwi zarządzanie akcją zabezpieczania wałów z narzędziami podglądu stanu wałów, narzędziami pomiaru odległości, objętości, wysokości względnej od lustra wody, tworzenia szkiców do prowadzonej akcji, pomiaru objętości itp. Podstawowe funkcjonalności systemu w konfiguracji interwencyjnej obejmować będą ponadto:

- podświetlanie map zagrożenia powodziowego w różnych scenariuszach,
- zbieranie danych bezzałogową platformą obserwacyjną (BPO) z ich transmisją online,
- monitoring akcji w nocy (obrazowanie termalne),
- tworzenie raportów i dokumentacji zgodnie z przyjętymi standardami,

System SAFEDAM posiada bogaty zbiór danych wejściowych. Zapewni również różnorodną funkcjonalność. Dla ułatwienia interpretacji powiązanie między składowymi segmentami systemu ilustruje rysunek 4.



Rys. 4. Schemat systemu monitoringu wałów przeciwpowodziowych SAFEDAM

3.2 Obiekty testowe

Przyjęta metodyka będzie testowana na obiektach testowych – tj. wybranych odcinkach rzek z obwałowaniami, dla których są pozyskiwane dane z pułapów: satelitarnego, lotniczego, w tym z platformy BPO i pułapu naziemnego. Wykorzystywane będą dane zarówno archiwalne jak i aktualnie pozyskiwane. Jako obiekty testowe wybrano pięć odcinków rzek, na których w nieodległej przeszłości miały miejsce awarie wałów. Są to:

- Wał Iłowsko-Dobrzykowski, (rzeka Wisła, obszar testowy wałów o długości 33 km, w tym 9 km do monitoringu, woj. mazowieckie),
- Otoka Grabińska – Zawieślcze (rzeka Wisła, obszar testowy wałów o długości 25 km w tym 7 km do monitoringu, woj. świętokrzyskie),
- Dolina Świeciechowska (rzeka Wisła, obszar testowy wałów o długości 20 km w tym 6 km do monitoringu, woj. lubelskie),
- Winiary, Wał lewy Wisły (rzeka Wisła, obszar testowy monitorowanych wałów o długości 3 km, woj. świętokrzyskie),
- Warszawa (rzeka Wisła, obszar testowy wałów o długości 20 km).

3.3. Bezzałogowa platforma pomiarowa

Kluczowym elementem budowanego systemu jest wielosensoralna, bezzałogowa platforma pomiarowo-obszernacyjna. Platforma ta będzie wyposażona w kilka sensorów obrazowych i pomiarowych oraz wypełniać różne funkcje pomiarowe i obserwacyjne. Wśród sensorów można wymienić:

- skaner laserowy wraz z systemami pozycjonowania (GNSS/INS) dla pozyskiwania precyzyjnych danych wysokościowych,
- kadrowe kamery pomiarowe dla pozyskiwania zdjęć fotogrametrycznych, umożliwiając ich dalsze pomiarowe opracowanie (modele wysokościowe, przekroje, ortofotomapa, inne),
- kamerę wielospektralną dla pozyskiwania zdjęć w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni, m.in. dla wykrywania uszkodzeń wałów (wyszukiwanie miejsc braku pokrywy roślinnej na wałach, wskazujących na uszkodzenia wału),
- kamerę obserwacyjną przydatną w czasie prowadzenia akcji ratunkowej,
- kamerę termalną przydatną w czasie prowadzenia akcji ratunkowej, również w warunkach nocnych.

Podjętując decyzje na temat tworzonej BPO dostrzeżono różnicowane co do oczekiwania jej funkcjonalności w warunkach zaistnienia bezpośredniego zagrożenia i prowadzenia akcji ratunkowej, oraz w okresie normalnego stanu wody. Te różnice dotyczyły różnych preferowanych sensorów, czasu przesyłu danych z platformy i wielkości samych danych, pożądanego czasu operowania w powietrzu, łatwości pilotowania itd. Te różnicowane oczekiwania bardzo utrudniały budowę jednej, uniwersalnej platformy bezzałogowej. Analiza potrzeb z jednej strony oraz ograniczone możliwości platform bezzałogowych z drugiej, doprowadziły do wniosku, że łatwiej będzie zbudować dwie platformy, o różnej funkcjonalności.

W projekcie SAFEDAM zdecydowano się na zaprojektowanie i stworzenie dwóch platform:

– Platforma I (prewencyjna)

Zorientowana na zadania pomiarowe, dedykowana pracom ze służbami hydrologicznymi, geodetami, wyposażona w ultralekki skaner laserowy, dwie cyfrowe kamery kadrowe o dużej rozdzielczości, obrazujące w zakresie RGB i NIR dostarczające wysokiej jakości obrazy z pikselem kilkucentymetrowym pozwalające na generowanie ortofotomap o wysokiej rozdzielczości. Połączenie dwóch tych samych kamer, z czego jedna rejestruje wyłącznie NIR daje z kolei możliwość analiz danych

wielospektralnych. Wszystkie trzy sensory będą zamontowane na platformie typu samolot (płanowiec), co daje większy udźwig i dłuższe operowanie w powietrzu. Platforma będzie wykorzystywana głównie w konfiguracji prewencyjnej systemu, przy normalnym stanie wody, do zbierania danych pomiarowych. Platformą tworzoną obecnie w projekcie jest kolejna wersja płanowca NEO-3 produkcji firmy MSP (Rys. 5a).

– **Platforma II (interwencyjna)**

Platforma obserwacyjna, wyposażona w głowicę obserwacyjną w zakresie optycznym i termalnym i będzie przydatna w stanie zagrożenia i prowadzenia akcji ratunkowej, a więc w konfiguracji interwencyjnej systemu. Akcent zostanie położony na większą dyspozycyjność, łatwiejsze operowanie samą platformą i przesył danych z głowicy obserwacyjnej w trybie czasu rzeczywistym. Te priorytety spełni platforma typu wielowirnikowiec, którą jest udoskonalana obecnie wersja wielowirnikowca ZAWISAK produkcji firmy MSP (Rys. 5b).



Rys. 5. Platforma NEO-3 (a) oraz ZAWISAK (b) tworzone w ramach projektu SAFEDAM (źródło: materiały promocyjne MSP)

4. WNIOSKI I PRZYSZŁE PRACE

Światowe trendy w pozyskiwaniu danych geoprzestrzennych zmierzają ku nieinwazyjności, efektywności i ekonomiczności pomiarów. Technologie fotogrametryczne i teledetekcyjne spełniają te założenia. Gwałtownie rosną techniczne możliwości i znaczenie BSP, znoszone są ograniczenia prawne operowania takich platform. Dane satelitarne, których rozdzielczość przestrzenna i czasowa nieustannie się poprawia stają się źródłem

danych, które dostarczać mogą ważnych informacji w wielkoobszarowych analizach w krótkich odstępach czasu. Wszystkie przedstawione trendy znajdują swoją realizację w przedstawionym w tym artykule projekcie SAFEDAM, który ma na celu stosowanie zaawansowanych technologii we wspomaganie przeciwdziałania zagrożenia powodziowego w odniesieniu do wałów przeciwpowodziowych. Projekt ten jest jednocześnie propozycją uzupełnienia dotychczasowej ochrony przeciwpowodziowej łączącej efekty wdrażanego od kilku lat projektu ISOK i prowadzonego w trybie ciągłym systemu SEKOP zbierającego dane i oceny stanu związane z monitorowaniem wałów przeciwpowodziowych. System SAFEDAM tworzony jest przy współdziałaniu hydrologów i geodetów. Dedykowany jest do zarządzania służbom czynnie zajmującym się monitorowaniem wałów i które utrzymywać mogą w aktualnym stanie tworzony system. Dobrze zarządzany system zawierający aktualne dane będzie mógł być źródłem danych dla służb kryzysowych, które to z kolei będą beneficjentem systemu w sytuacjach zagrożenia powodziowego otrzymując aktualną informację o stanie wałów i jego poszczególnych fragmentów, map zagrożenia i ryzyka z uwzględnieniem scenariuszy awarii wałów przeciwpowodziowych.

Obecnie realizowane badania naukowe nad doborem i metodyką przetwarzania danych oraz prace koncepcyjne nad systemem zamykają pierwszy, dwunastomiesięczny etap projektu SAFEDAM. Zdecydowano o jego funkcjonalności, zaprojektowano wszystkie określone narzędzia i opracowano metodykę przetwarzania danych geoprzestrzennych. Tak powstały demonstrator wkracza obecnie w prace informatyczne związane z integracją jego poszczególnych komponentów. Przyszłe prace projektu w drugim roku jego trwania związane będą również z dalszymi testami poszczególnych komponentów systemu: oblotami platform, przetwarzania danych nimi pozyskanych oraz testowania narzędzia pobierania i przetwarzania danych satelitarnych. Ostatnim etapem w trzecim roku prac nad projektem będą testy w warunkach rzeczywistych, poprzedzone szkoleniami służb będących gestorem projektu, które zajmować będą się systemem lub jego poszczególnymi komponentami.

PODZIĘKOWANIA

Projekt "Zaawansowane technologie wspomagające przeciwdziałanie zagrożeniom związanym z powodzią (SAFEDAM)" finansowany jest ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Bezpieczeństwo i Obronność, nr umowy DOB-BIO7/06/01/2015

LITERATURA

Aanstoos J. V., Hasan K., O'Hara C., Prasad S., Dabbiru L., Mahrooghy M., Nobrega R., Lee M., Bijay S., 2010. Use of remote sensing to screen earthen levees. *Proceedings. 2010 39th IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*. Washington, DC: IEEE.

Bakula K., Ostrowski W., Szender M., Plutecki W., Salach A., Górski K., 2016. Possibilities of using LiDAR and photogrammetric data obtained with unmanned aerial system for levees monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, pp. 773-780.

Flener C., Vaaja M., Jaakkola A., Krooks A., Kaartinen H., Kukko A., Kasvi E., Hyyppä H., Hyyppä J., Alho P., 2013. Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-photography. *Remote Sensing*, 5(12), pp. 6382-6407.

Hossain A. A., Easson G., Hasan K., 2006. Detection of levee slides using commercially available remotely sensed data. *Environmental & Engineering Geoscience*, 12(3), pp. 235-246.

Jermołowicz P., 2015. Zjawiska filtracji, przesiąków i sufozji w budownictwie. Skuteczne systemy zabezpieczeń stateczności i odwodnienia. Warszawa.

Kurczyński, Z., 2012, Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego a dyrektywa powodziowa. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, pp. 209-217.

Kurczyński Z., Bakula K., 2013. Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, wydanie specjalne, pp. 59-68.

Long G., Mawdesley M. J., Smith M., Taha A., 2010. Simulation of airborne LiDAR for the assessment of its role in infrastructure asset monitoring. *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Tizani W (ed). Nottingham University Press, Nottingham, UK.

Lv X., Yazici B., Bennett V., Zeghal M., Abdoun T., 2013. Joint pixels InSAR for health assessment of levees in New Orleans. *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, pp. 279-288.

Tournadre V., Pierrot-Deseilligny M., Faure P. H., 2014. UAV Photogrammetry to Monitor Dykes-Calibration and Comparison to Terrestrial LiDAR. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(3), pp. 143-148.

Pilarska M., Ostrowski W., Bakula K., Górski K., Kurczyński Z. 2016. The potential of light laser scanners developed for unmanned aerial vehicles – the review and accuracy, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, pp. 87-95.

Yang M. D., Lin J. Y., Yao C. Y., Chen J. Y., Su T. C., Jan C. D., 2011. Landslide-induced levee failure by high concentrated sediment flow—A case of Shan-An levee at Chenyulan River, Taiwan. *Engineering Geology*, 123(1), pp. 91-99.

Zeghal M., Abdoun T., Yazici B., Lv X., Bennett V., Mercado V., Marr A., 2011. Health assessment of levees using remote sensing and field monitoring. *International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response*. Stanford University, California. September 15-16, 2011.

SAFEDAM - ADVANCED TECHNOLOGIES IN THE PREVENTION OF FLOOD HAZARD

KEY WORDS: levee monitoring, LiDAR, UAV, satellite imagery, SEKOP system, ISOK, flood hazard, flood risk

Summary

The article presents the trends in non-invasive monitoring of flood levees using a variety of photogrammetry and remote sensing technologies. Referring to those solutions of the SAFEDAM project is introduced in this article. The aim of the SAFEDAM project is the creation of system for levees monitoring using unmanned aerial vehicles (equipped with light LiDAR unit, multispectral and/or thermal camera), optical and radar satellite imagery and archival aerial imagery. Multi-sourced and multi-temporal data allow to evaluate the levees condition. A comprehensive IT system enables the collection, automatic data analysis and visualization for hydrological services and crisis management professionals. Its implementation will ensure effective management of flood risk. SAFADAM complements the already implemented projects of flood protection in Poland such as ISOK. The project is financed by National Centre for Research and Development in Defense, Security Programme [grant number DOB-BIO7/06/01/2015].

Dane autorów / Authors details

Dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW
e-mail: z.kurczynski@gik.pw.edu.pl
telefon: 22 234 7587

Dr inż. Krzysztof Bakula
e-mail: k.bakula@gik.pw.edu.pl
telefon: 22 234 7694

Przesłano / Submitted 31.10.2016
Zaakceptowano / Accepted 30.12.2016