

Wybrane systemy monitorujące obwałowania przeciwpowodziowe

Jacek Stanisz¹, Aleksandra Borecka¹, Andrzej Leśniak¹, Krzysztof Zieliński¹



J. Stanisz

A. Borecka

A. Leśniak

K. Zieliński

Selected levee monitoring systems. *Prz. Geol.*, 62: 699–703.

Abstract. Computer measuring systems based on a net of sensors, which register selected physical parameters, could be employed to support the flood hazard management. Such systems were developed as a part of scientific projects in Denmark (IJKDijk/MacroStability) and Holland (IJKDijk Piping). The Computer System for Monitoring Levees (ISMOP) is now being constructed in Poland. For experiment purposes a reservoir comprising of two 208-metre, interconnected segments of a levee

(58 m × 4.5 m, width × height) will be build. In the area of the levee there will be installed 35 sensors to measure the changes of pore water pressure, temperature, vertical strains, levels of a water table and displacements within the levee's body. Furthermore, the levee's strains will be monitored by means of standard geodetic methods and a ground-based, long-range interferometric radar (IBIS-L). The levee will also be monitored by an equipment for measuring electric resistance in the ground and a thermographic camera. An analysis of information obtained by sensors will allow for establishing an optimal method for cost-effective and successful determination of the levees' conditions during the flood and also after its appearance.

Keywords: measuring systems, levee monitoring system, Computer System for Monitoring Levees

Katastrofalne powodzie, które wystąpiły w latach 1997 i 2010 spowodowały znaczne szkody w gospodarce i infrastrukturze kraju. Odpowiedzią na tą sytuację było stworzenie Programu ochrony przed powodzią dorzecza górnej Wisły (Uchwała Rady Ministrów Nr 151/2011 z dnia 9 sierpnia 2011 r.) oraz Odry (Program dla Odry-2006). Celem obu projektów jest zwiększenie bezpieczeństwa powodziowego, zwłaszcza w rejonach gdzie powodzie występują często, a ich przebieg jest dynamiczny. Na problem gospodarowania wodami zwróciła również uwagę Unia Europejska w dwóch dokumentach – Ramowej Dyrektywie Wodnej (Dyrektywa 2000/60/WE z dnia 23 października 2000 r.) oraz Dyrektywie Powodziowej (Dyrektywa 2007/60/WE z dnia 23 października 2007 r.) (Sinaba i in., 2013).

W ocenie ryzyka powodziowego oraz zarządzania sytuacją kryzysową w czasie powodzi coraz większe znaczenie przypisuje się systemom ostrzegania przed powodzią oraz monitoringu wysokości fali wezbraniowej i stanu wałów przeciwpowodziowych. Ta tendencja widoczna jest w kilku krajach europejskich (np. Dania, Holandia), jak również w Polsce.

Zazwyczaj przy realizacji projektów tworzone systemy monitorujące wybrane parametry fizyczne i mechaniczne. Zintegrowane systemy monitorujące spectrum dynamicznych procesów środowiskowych budowane są rzadko (znaczny koszt czujników oraz aparatury zbierającej i przetwarzającej dane). Nie inaczej jest w przypadku badania szczelności i stateczności obwałowań przeciwpowodziowych oraz poznania kinetyki procesów filtracyjno-erozyjnych, obejmujących korpus wału oraz podłoże.

W artykule przytoczono rozwiązania, które stosowane są do pomiaru parametrów fizycznych i mechanicznych, wykorzystujące czujniki umieszczone w korpusie i

podłożu ziemnych obwałowań przeciwpowodziowych. Skupiono się na analizie zintegrowanych systemów wykorzystujących dane z sieci pomiarowych, które zostały zrealizowane (Dania, Holandia) lub są w trakcie realizacji (Polska). Pominięto aspekty związane z budową oraz wdrażaniem systemów informatycznych.

WYBRANE CZUJNIKI WYKORZYSTYWANE DO ANALIZY PROCESÓW GEODYNAMICZNYCH ZACHODZĄCYCH W OBREBIE WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH

Obecnie, monitorując obwałowania przeciwpowodziowe, stosuje się wiele rozwiązań bazujących na czujnikach:

- temperatury (w tym światłowodach);
- ciśnienia porowego;
- parcia gruntu;
- wychyleń kątowych, umieszczonych w inklinometrach;
- elektrycznych, wykorzystanych w piezometrach.

Poszczególne rodzaje czujników grupowane są w systemy, mające na celu lokalizację miejsc, gdzie następuje rozwój procesów filtracyjno-erozyjnych. W rezultacie, informacja ta pozwala na wstępną ocenę stateczności obwałowania przeciwpowodziowego.

Czujniki temperatury i światłowody

Przy użyciu czujników temperatury mierzone są zmiany gradientów temperatury, które warunkowane są przez zmianę przewodnictwa cieplnego w obrębie ośrodka gruntowego. To rozwiązanie staje się coraz popularniejsze i jest rekomendowane przez Międzynarodowy Komitet Wielkich Zapór (ICOLD) (Radzicki, 2010).

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; jstanisz@agh.edu.pl, aborecka@agh.edu.pl, lesniak@agh.edu.pl, kz@ics.agh.edu.pl.

Spśród wielu rodzajów czujników temperatury (rezystancyjne, półprzewodnikowe, termopary, bimetaliczne, ciśnieniowe, pirometry) w monitoringu wałów przeciwpowodziowych często stosowane są czujniki rezystancyjne. Mierzą one temperaturę bezwzględną za pomocą elementów rezystancyjnych – termorezystorów lub termistorów. Ich działanie oparte jest na zmianach oporności elektrycznej w zależności od mierzonej temperatury (Chwaleba i in., 2003).

Innym typem czujnika temperatury jest światłowód. Umożliwia bowiem jej ciągły, wielopunktowy pomiar na wybranym odcinku, uwzględniając zaburzenia pola hydro-termicznego (Radzicki & Bonelli, 2009). Termomonitoring opiera się na analizie procesu rozpraszania fotonów na płaszczu rdzenia światłowodu, z uwzględnieniem rozproszenia wstecznego (Radzicki & Bonelli, 2012). Rozdzielczość pozwala na pomiar z dokładnością do jednego metra. W praktyce stosowane są dwa rodzaje pomiarów z wykorzystaniem światłowodów: pomiar pasywny (monitoring wału w stanie naturalnym, obciążonego termicznie) oraz pomiar aktywny (użycie źródła ciepła). Porównanie wyników obydwu rodzajów pomiarów pozwala określić prędkość filtracji oraz wskazać lokalizację rozwoju procesu filtracyjno-erozyjnego w ujęciu przestrzennym. Jak wskazują badania (Radzicki, 2012) najbardziej odpowiednim miejscem ułożenia instalacji jest stopa wału po stronie odpowietrznej oraz przestrzeń za ekranem szczelnym. Monitoring wałów przeciwpowodziowych z użyciem tej metody stosowano we Francji (Artières, 2010). W Polsce metoda ta nie była dotąd stosowana.

Czujniki ciśnienia porowego

W monitoringu obwałowań przeciwpowodziowych stosowane są również czujniki mierzące zmiany ciśnienia porowego. Ich konstrukcja oparta jest głównie na dwóch składowych – filtrze oraz elemencie pomiarowym. Jako element pomiarowy stosuje się przetworniki strunowe, piezorezystancyjne, pojemnościowe oraz półprzewodniki (Stanisz, 2013). Coraz popularniejsze stają się czujniki z wibrującą struną.

Czujniki ciśnienia porowego pozwalają określić lokalizację i ocenić rozwój procesu zniszczenia obwałowania. Wzrost ciśnienia porowego powoduje spadek naprężeń efektywnych oraz wzrost dewiatora naprężenia. W konsekwencji prowadzi to do naruszenia pierwotnej struktury ośrodka i może przyczynić się do powstania powierzchni poślizgu gruntu, zwłaszcza w strefach osłabienia (Wiłun, 2010). Zależność ta została potwierdzona w kilku eksperymentach badawczych dotyczących powstania i rozwoju procesów geodynamicznych (Wang & Sassa, 2003; Ortigao, 2004).

Konstrukcja czujników z przetwornikiem strunowym oparta jest o strunę, w pobliżu której umieszczone są dwie cewki. Jedna z nich zawiera magnes, a druga nabiegunnik, który wyznacza kierunek i rozkład linii pola magnetycznego. Czujnik aktywowany przez impuls o zmiennej częstotliwości, wysłany do cewek, powoduje drganie struny. Wypełnienie filtra (znajdującego się na końcu czujnika) wodą powoduje odkształcenie się wewnątrz czujnika czułej, stalowej membrany. Ta z kolei wprawia w drgania

wzbudzoną wcześniej strunę. Częstotliwość jej drgań jest wprost proporcjonalna do ciśnienia porowego wody, wywieranego na membranę. Sygnał przekazywany jest do cewki, gdzie przetwornik elektryczny zamienia go na sinusoidalny sygnał elektryczny. Ten, za pośrednictwem przewodu elektrycznego, przekazywany jest do urządzenia odczytującego (znajdującego się na powierzchni). Określona wartość częstotliwości drgań po przeliczeniu przez współczynnik kalibracji jest przetwarzana na określone jednostki techniczne i wyświetlana użytkownikowi (Stanisz, 2013).

Czujniki parcia gruntu

Czujniki parcia gruntu wykorzystywane są do badań rozkładu parcia w gruncie. Najnowsze rozwiązania bazują na technologii czujników z przetwornikiem strunowym (opisanym wyżej). Czujnik składa się z dwóch płytek, które wypełnione są wtłoczonym pod ciśnieniem, deaeryzowanym olejem (o małej ściśliwości). Powoduje to powstanie poduszki hydraulicznej, która jest bardzo sztywna (czujnik firmy NeoStrain, model 4800, www.neostrain.pl).

Czujniki wychyleń kątowych stosowane w inklinometrach

Systemy inklinometryczne zawierają czujniki, które określają wartość wychYLENIA rur inklinometrycznych zainstalowanych w gruncie. W rurach umieszczony jest przyrząd, który za pomocą dwóch przewodnikowych lub półprzewodnikowych serwoakcelerometrycznych przetworników dokonuje pomiaru wychyleń kątowych w dwóch płaszczyznach. Pozwala to określić głębokość występowania powierzchni ścinania (zniszczenia) w obwałowaniach przeciwpowodziowych.

Czujniki elektryczne umieszczone w piezometrach

Piezometry elektryczne (z elementem piezoelektrycznym lub wibracyjnym) stosowane są do automatycznego pomiaru zwierciadła wód gruntowych. Wykorzystywane są one również do określenia przepuszczalności, spadku hydraulicznego i naporu wody w obwałowaniach ziemnych (Woliński & Wójcik, 2010). Pomiar wielkości fizycznej odbywa się przez filtr pierścieniowy (czujnik EPKO 4, firmy Budokop, www.budokop.com). Znane są przypadki (czujnik firmy NeoStrain, model 4675LV, www.neostrain.pl) stosowania w piezometrach, czujników strunowych. W tym przypadku przymocowany do siłomierza, cylindryczny ciężarek podczas zanurzenia w wodzie zmienia swój ciężar. Powoduje to zmianę naciągu struny, która przekłada się na zmianę częstotliwości rezonansowej.

WYBRANE SYSTEMY MONITORINGU OBWAŁOWAŃ PRZECIWPOWODZIOWYCH

Projekt IJkDijk realizowany był w dwóch etapach (IJk-Dijk/Macrostability – Dania, IJkdijk Piping – Holandia). Założenia programu weryfikowano na niewielkim, 100 × 27,7 × 6 m (długość × szerokość × wysokość), prostolinio-

wym odcinku wału przeciwpowodziowego (Dania), a następnie na kolejnym, prostokątnym obiekcie hydrotechnicznym o parametrach $15 \times 12 \times 3,5$ m (długość \times szerokość \times wysokość) (Holandia). Duńską część projektu zbudowano z piasku, który został pokryty gliną. Na jego koronie umieszczono kontenery z wodą, po czym zalewano wał w trakcie trwania eksperymentu (Courivaud i in., 2011). Część holenderską projektu zbudowano z gliny i posadowiono na piaszczystym podłożu.

Głównym celem badań było opracowanie zintegrowanego systemu monitoringu wałów przeciwpowodziowych wraz z modułem zarządzania bezpieczeństwem. W pierwszym przypadku (Dania) system składał się z urządzeń mierzących temperaturę na powierzchni (LIDAR). Dane zbierane były z czujników przemieszczenia (3 sztuki). Wykonano 14 otworów badawczych, zainstalowano 18 piezometrów, 8 czujników ciśnienia porowego oraz 12 czujników wilgotności (Van i in., 2009). Wyniki pomiarów przekazywane były za pomocą sieci repeterów do centrum monitoringu. Analizowano również rozwój procesów filtracyjno-erozyjnych na styku podłoża i korpusu wału, prowadzących do powstania przebić hydraulicznych. Pomiary wykonywano za pomocą czujników światłowodowych mierzących temperaturę i odkształcenie, umieszczonych na geowłókninach (Radzicki, 2012). Takie rozwiązanie, pozwalało na wczesną detekcję rozwoju procesu zniszczenia. Dokładność pomiaru temperatury wyniosła $0,1^{\circ}\text{C}$, natomiast odkształceń $0,02\%$. Rozpoznane zostały przeziąki o minimalnej objętości $0,1$ l/min/m (Artières i in., 2010). Dodatkowo, w celu rozpoznania procesów o charakterze destrukcyjnym zachodzących w wale, wykorzystano metody geofizyczne (termiczne, elektrooporności, potencjału własnego, sejsmiczne, akustyczne i inne) (Radzicki, 2012). Najskuteczniejszymi metodami lokalizacji rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych okazały się termomonitoring oraz pomiar zmian ciśnienia porowego wody.

Zintegrowane systemy monitoringu obwałowań przeciwpowodziowych tworzone są również w Polsce. We współpracy z Akademią Górniczo-Hutniczą w Krakowie oraz firmami SWECO Hydroprojekt Kraków Sp. z o.o. i Neosentio realizowany jest Projekt ISMOP (Informatyczny System Monitoringu Obwałowań Przeciwpowodziowych), który zakłada stworzenie systemu monitorującego statyczne i dynamiczne zachowanie się obwałowania w czasie rzeczywistym. W ramach projektu wybudowany zostanie wał przeciwpowodziowy w skali 1 : 1 (szerokość \times długość \times wysokość: $58 \times 208 \times 4,5$ m). Będzie on składał się z dwóch równoległych do siebie odcinków uformowanych z gruntów o odmiennym współczynniku filtracji (10^{-5} m/s oraz 10^{-6} m/s). Badania będą prowadzone w Czernichowie, 20 km na zachód od Krakowa (ryc. 1).

W wale umieszczone zostaną czujniki w trzech profilach pomiarowych (ryc. 2). Monitoring wewnątrz wału obejmował będzie pomiar ciśnienia porowego, temperatury oraz ciśnienia gruntu (czujniki z przetwornikiem strunowym o niewielkim zakresie pomiarowym). Dodatkowo instalowane będą inklinometry oraz wykorzystany zostanie światłowodowy kabel sensoryczny (do pomiaru temperatury o rozdzielczości zbliżonej do 1m). W celu monitoringu zmiennych zjawisk pogodowych w pobliżu wału umieszczona zostanie stacja meteorologiczna (komplet danych:

czujnik opadów, ciśnienia atmosferycznego, temperatury, wilgotności powietrza, prędkości oraz kierunku wiatru). Pomiary dostarczane przez sieć czujników stanowić będą główny element oceny szczelności oraz pośrednio stateczności wału.

Dodatkowo prowadzony będzie monitoring powierzchniowy obwałowania wykorzystujący sieć geodezyjną do celów rejestracji przemieszczeń i odkształceń wałów, oparty na metodach klasycznych (TC, ewentualnie GPS) oraz pomiary z wykorzystaniem naziemnego radaru interferometrycznego dalekiego zasięgu (IBIS-L). Ponadto zostanie użyta kamera termograficzna FLIR T620.

W trakcie trwania eksperymentu na zewnętrznych fragmentach projektowanego obwałowania będą prowadzone pomiary geofizyczne metodą elektrooporową.

W projekcie zakłada się umieszczenie łącznie 35 czujników monitorujących zmiany ciśnienia porowego i temperatury, 6 czujników do pomiaru odkształceń pionowych (ciśnienia gruntu), 18 czujników do pomiaru temperatury w strefie przypowierzchniowej, 24 piezometrów (o łącznej długości 82 m), 6 inklinometrów (długość – 6,5 m każdy) oraz około 1300 m światłowodu. Wstępną propozycję rozkładu elementów pomiarowych przedstawiono na rycinie 3.

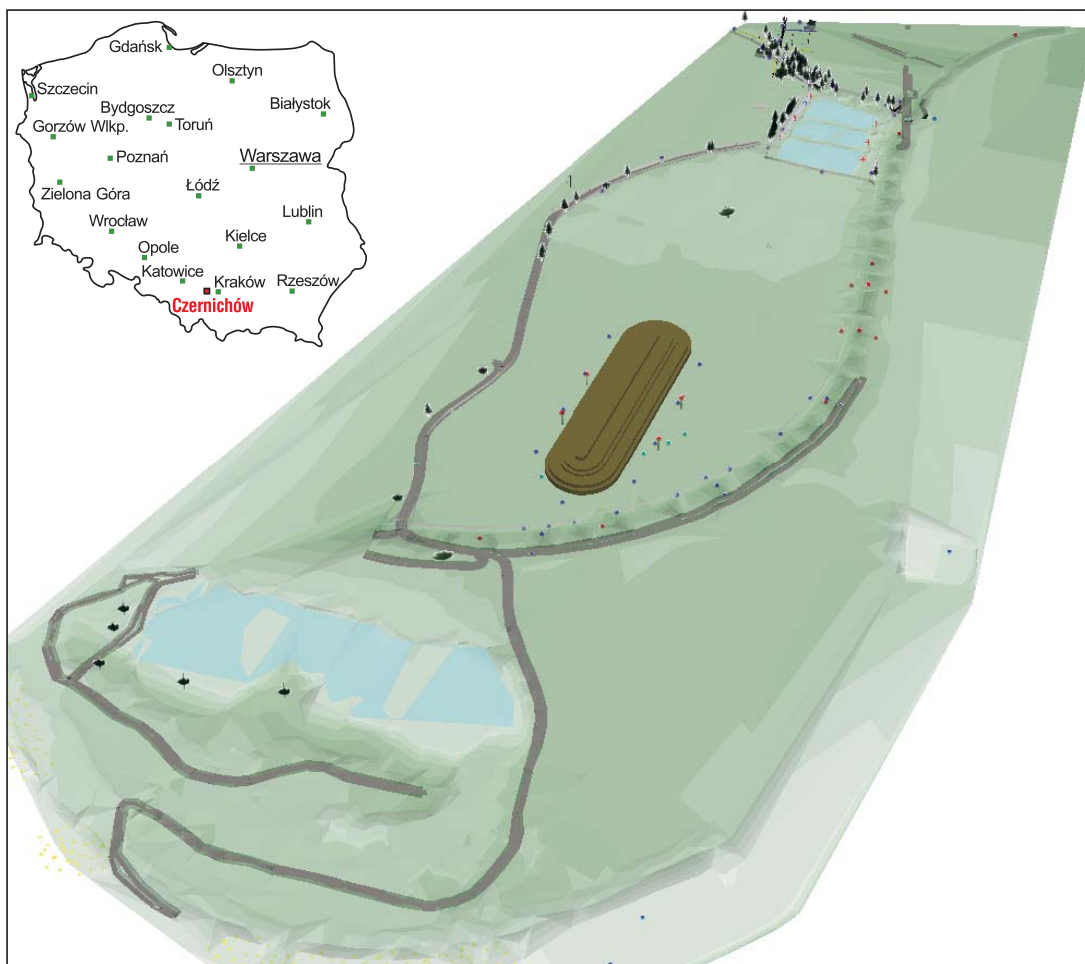
Mierzone przez czujniki parametry fizyczne i mechaniczne będą zapisywane i analizowane w automatycznym systemie pomiarowym. Będzie to system, który na podstawie napływających danych z czujników i modeli numerycznych będzie dokonywał w czasie bieżącym oceny zagrożenia. Ponadto system będzie umożliwiał wizualizację danych na mapach synoptycznych (dane meteo) oraz modelach monitorowanych odcinków wałów (dane pochodzące z sieci telemetrycznej), a także przeglądanie historycznych danych pomiarowych. Na podstawie analizy grupy mierzonych parametrów uruchamiany zostanie sygnał alarmowy, świadczący o wystąpieniu sytuacji kryzysowej lub zagrożenia. Fakt ten będzie zgłaszany w takich przypadkach jak:

- wzrost wartości parametru w określonym czasie,
- zmiany dopuszczalnych gradientów,
- przekroczenie więcej niż jednego zdefiniowanego poziomu,
- uszkodzenie aparatury oraz błędy komunikacyjne (odczyty anomalne lub ich brak).

Wystąpienie danej sytuacji powodziowej (wzrost poziomu rzeki będący wynikiem przepływu fali wezbraniowej lub kulminacyjnej) spowoduje uruchomienie procedury zwiększającej częstość próbkowania mierzonych wartości fizycznych. W chwili obniżenia zwierciadła wody w rzece zmniejszony zostanie krok próbkowania. Takie rozwiązanie umożliwi mniejszy pobór mocy oraz przejście systemu w tryb „czuwania”, umożliwiający np. konserwację systemu lub kalibrację czujników.

Podsumowanie

Zintegrowane, informatyczne systemy monitorujące zachowanie się ośrodka gruntowego stają się coraz bardziej popularne, również w Polsce. Monitoring obwałowań przeciwpowodziowych jest istotny, w kontekście ochrony przeciwpowodziowej. Wyniki projektu mogą przyczynić się do opracowania narzędzi udoskonalających funkcjonowanie krajowego systemu ratowniczo-gaśniczego oraz

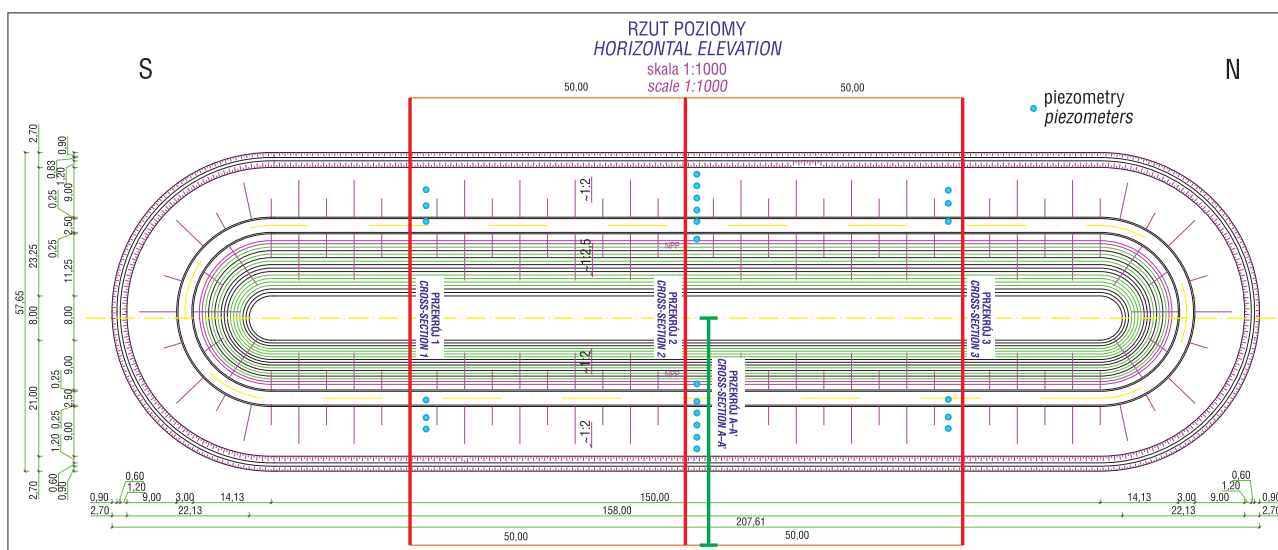


Ryc. 1. Model GIS eksperymentalnego wału przeciwpowodziowego wraz z zaznaczoną lokalizacją na mapie Polski (rys. M. Lupa)

Fig. 1. GIS model of experimental levee along with the location marked on the map Polish (done by M. Lupa)

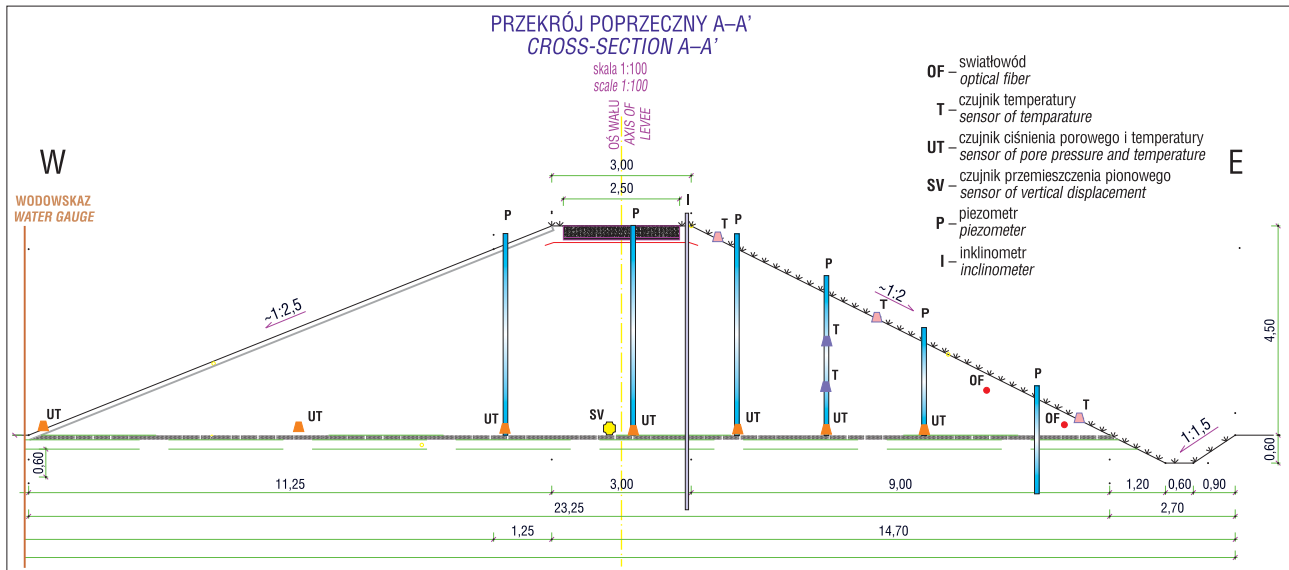
krajowego systemu ratownictwa. Przewiduje się, że docelowym odbiorcą uzyskanych wyników staną się centra zarządzania kryzysowego, gdzie podejmowane są najważniejsze decyzje w przypadku wystąpienia zagrożenia. Roz-

wiązania inżynierskie wykorzystujące opisane czujniki mogą dostarczyć informacji o dynamice i natężeniu procesów zachodzących w obwałowaniach przeciwpowodziowych. Zebrane wyniki pomiarów, usystematyzowane



Ryc. 2. Model wału przeciwpowodziowego wraz z zaznaczonymi przekrojami pomiarowymi (na podstawie SWECO Hydroprojekt Kraków)

Fig. 2. Model experimental levee with selected cross sections measuring (based on SWECO Hydroprojekt Kraków)



Ryc. 3. Wstępna propozycja rozkładu elementów pomiarowych wewnątrz i na powierzchni jednego z fragmentów eksperymentalnego wału przeciwpowodziowego

Fig. 3. The initial proposal location measuring elements inside and on the body one of the fragments of the experimental levee

wedle określonej struktury, będą podstawą procesów analizy i oceny ryzyka wystąpienia zdarzenia, w którym nastąpi utrata szczelności i/lub stateczności wału. Możliwe będzie również wskazanie odcinków szczególnie zagrożonych. Po ustąpieniu powodzi możliwa będzie ocena stanu obwałowania. System będzie pośrednio weryfikował skuteczność zastosowanych metod zabezpieczających obwałowania przeciwpowodziowe.

Projekt sfinansowano z grantu przyznanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, numer PBS1/B9/18/2013, w ramach Programu badań stosowanych.

LITERATURA

- ARTIERES O., BECK Y.L., KHAN A.A., CUNAT P., FRY J.J., COURIVAUD J.R., GUIDOUX C. & PINETTES P. 2010 – Assessment of dams and dikes behavior with a fibre optics based monitoring solution. [W:] Romeo G. (red.) 2nd Conference on dam rehabilitation and Maintenance, 23–25 November 2010, Taylor & Francis Group, London: 79–86.
- CHWALEBA A., PONIŃSKI M. & SIEDLECKI A. 2003 – Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa.
- COURIVAUD J.R., PINETTES P., GUIDOUX C., FRY J.J. & BECK Y.L. 2011 – Fiber Optic based monitoring of levees and embankment dams. [W:] 21st Century Dam Design – Advances and adaptations, 31st Annual USSD Conference, 11–15 April, San Diego: 1560–1577.
- ORTIGAO J.A.R. 2004 – Landslide instrumentation and alarm system, [W:] Sayao A.S.F.J. (red.) Handbook of slope stabilization, Springer-Verlag, Berlin: 425–464.
- RADZICKI K. 2012 – Istotne aspekty termomonitoringu procesów destrukcyjnych wałów przeciwpowodziowych. INFRAEKO 2012, 31 maj–1 czerwiec 2012, Kraków: 213–222.
- RADZICKI K. & BONELLI S. 2009 – Evaluation of piping erosion by means of temperature analysis, Stud. Geotech. Mech., 31 (2): 17–34.
- RADZICKI K. & BONELLI S. 2010 – Lokalizacja procesów filtracyjnych oraz określenie stopnia ich nasilenia za pomocą analizy modelem IRFTA światłowodowych pomiarów temperatury, Environmental Engineering. Czas. Tech., 16: 55–62.
- RADZICKI K. & BONELLI S. 2012 – Monitoring of suffusion process development using thermal analysis performed with IRFTA model, 6th ICSE, 27–31 August 2012, Paris: 593–600.
- SINABA B., HUBER N.P., MUFELD M. & SCHUTTRUMPF H. 2013 – A harmonized flood damage assessment approach for the transnational Meuse basin, Comprehensive Flood Risk Management – Klijn & Schweckendiek, Taylor & Francis Group, London.
- STANISZ J. 2013 – Możliwości rozpoznania zagrożenia osuwiskowego na podstawie obserwacji zmian ciśnienia porowego w ośrodku geologicznym. Zeszyty Naukowo-techniczne SITK RP, Nr 3: 351–359.
- VAN M.A., ZWANENBURG C., KOELEWIJN A.R. & VAN LOTTUM H. 2009 – Evaluation on full scale levee stability tests at booneschans and coresspondig Centrifuge Test. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 5–9 October 2009, Alexandria, Egypt : 2048–2051.
- WANG G. & SASSA K. 2003 – Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. [W:] Engineering Geol., 69 (1–2): 109–125.
- WIŁUN Z. 2010 – Zarys geotechniki, WKŁ, Warszawa.
- WOLIŃSKI Ł. & WÓJCIK M. 2010 – Monitoring geotechniczny konstrukcji budowlanych. [W:] Kośmider P. (red.) Geoinżynieria drogi mosty tunele, 2: 72–76.