

## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA NAZIEMNEGO SKANINGU LASEROWEGO W KONTROLI I OCENIE STANU TECHNICZNEGO BUDOWLI PIĘTRZĄCYCH WODĘ**

### **APPLICATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING TO THE ASSESSMENT OF A DAM CONSTRUCTION**

Maria Zygmunt, Pelagia Biłka

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** Specyfika hydrotechnicznych budowli piętrzących sprawia, że obiekty te powinny być szczególnie starannie kontrolowane, a pozyskiwane w ramach kontrolnych pomiarów i obserwacji dane powinno się wykorzystać do sporządzania oceny stanu bezpieczeństwa obiektu. Techniki stosowane przy kontroli i ocenie stanu technicznego budowli piętrzących należy doskonalić wraz ze wzrostem doświadczenia w tym zakresie. W niniejszym artykule przeanalizowano możliwość uzupełnienia dotychczas używanych metod kontroli zapór wodnych technologią naziemnego skaningu laserowego, pozwalającą na bardzo szybkie i automatyczne określenie lokalizacji, geometrii oraz właściwości powierzchni obiektów. Wykonane dla zapór Solina–Myczkowce i Rożnów prace badawcze dowiodły, że na podstawie obserwacji uzyskanych skanerem laserowym można wzbogacić podstawowe działania diagnostyczne prowadzone w celu kontroli i oceny stanu technicznego budowli piętrzących.

**Abstract.** The character of structures for water impoundment entails the necessity that these structures should be particularly well inspected and the data obtained in the process of control measurement and observation should be used to prepare the safety assessment of the structure. Measurement techniques used for the inspection of water impoundment structures should be improved along with experience gained in this area. In this paper a possibility of addition of terrestrial laser scanning, allowing quick and automatic determination of location, geometry and features of a surface of the objects, to foregoing methods was analysed. Research carried out for Solina-Myczkowce Dam and Rożnów Dam proved that observations acquired using terrestrial laser scanning can be used to

supplement basic diagnostics conducted to inspect and assess the technical state of dam constructions.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo zapór wodnych, naziemny skaner laserowy, chmura punktów

**Key words:** dam safety, terrestrial laser scanning, point cloud

## WSTĘP

Większość budowli piętrzących w Polsce przekroczyła wiek 50 lat. Tak długi okres eksploatacji, według oceny Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór (ICOLD), światowego autorytetu w zakresie bezpieczeństwa budowli piętrzących, skutkuje zwiększoną liczbą uszkodzeń i możliwości awarii. Stąd też konieczna jest wiedza o aktualnym stanie technicznym i bezpieczeństwie zapór wodnych pozwalająca na podejmowanie prac remontowych i zabezpieczających [Jankowski i Depczyński 2006]. Obowiązek wykonywania kontroli i ocen stanu technicznego budowli piętrzących wynika z istniejących w Polsce uregulowań prawnych. Regulują je przepisy art. 61 i 62 ustawy Prawo budowlane [1994], art. 64 ustawy Prawo wodne [2001]. Natomiast szczegółowy zakres kontroli i zawartość ocen określają *Wytyczne kontroli i bezpieczeństwa budowli piętrzących wodę* [Jankowski 2008].

Pomiary i obserwacje stosowane przy technicznej kontroli pracy budowli piętrzących powinny przede wszystkim obejmować zjawiska opisujące zachowanie się budowli. Do najważniejszych elementów określających zachowanie się zapór wodnych należą przemieszczenia i odkształcenia oraz przebieg filtracji. Podstawowe działania diagnostyczne prowadzone w celu kontroli i oceny stanu technicznego budowli piętrzących to: pomiary przemieszczeń kontrolnych punktów reprezentujących badany obiekt w stosunku do przyjętego układu odniesienia, obserwacje i pomiary filtracji, obserwacje wizualne stanu obiektu oraz analizy w oparciu o modele numeryczne zachowań budowli. Często poza tymi działaniami konieczne jest dokonywanie obserwacji, pomiarów oraz badań specjalnych, m.in. badań stopnia starzenia się betonu [Jankowski i Depczyński 2006].

Techniki pomiarowe wykorzystywane do kontroli i oceny stanu technicznego budowli piętrzących powinny być doskonałe wraz ze wzrostem doświadczenia w tym zakresie [Jankowski 2008]. Wzbogacenie dotychczas stosowanych metod kontroli zapór wodnych technologią naziemnego skaningu laserowego (TLS), pozwalającą na bardzo szybkie i automatyczne określenie lokalizacji, geometrii oraz właściwości powierzchni obiektów, rodzi duże nadzieje. Skaner wysyłając wiązkę laserową, a następnie rejestrując jej odbicie, na podstawie pomiaru odległości oraz kątów poziomego i pionowego oblicza współrzędne przestrzenne elementów otaczającej go przestrzeni, a na podstawie siły powracającego sygnału wyznacza wartość intensywności odbicia, zwanej „czwartą współrzędną”. W wyniku skanowania laserowego, w bardzo krótkim czasie, pozyskana zostaje olbrzymia ilość obserwacji XYZI w postaci „chmury punktów”.

Problematyka wykorzystania technologii TLS do rejestracji stanu istniejącego obiektów od lat stwarza szerokie pole dla badań naukowych. Literatura naukowa jednoznacznie wskazuje na duży potencjał, zarówno badawczy, jak i praktyczny danych pozyskanych skanerem laserowym w tym zakresie. Szczególnie obiecujące są wyniki badań nad zasto-

sowaniem chmury punktów do opracowania dokumentacji inwentaryzacyjnej budowli i obiektów inżynierskich [Lemmens 2004, Heine i in. 2007]. Wielu naukowców z powodzeniem podejmując również kwestię wykorzystania TLS do monitoringu deformacji zapór wodnych [Schäfer i in. 2004, Alba i in. 2006, Heine i in. 2007, González-Aguilera i in. 2008, Gumus i in. 2013]. Skanowanie laserowe skutecznie zaadaptowano także do badań stanu betonu [Zaczek-Peplińska i Falaciński 2011] i weryfikacji modeli numerycznych pracy budowli piętrowych [Zaczek-Peplińska i Popielski 2013].

Artykuł prezentuje analizę możliwości wykorzystania pozyskanej naziemnym skanerem laserowym chmury punktów do kontroli i oceny stanu technicznego budowli piętrzących. Wykonane dla zapór Solina-Myczkowce i Rożnów prace badawcze, posłużyły do zaprezentowania potencjału technologii TLS na wielu płaszczyznach. Do analiz wykorzystano dane uzyskane w ramach obozów naukowych Koła Naukowego Geodetów Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

## **MATERIAŁ I METODY**

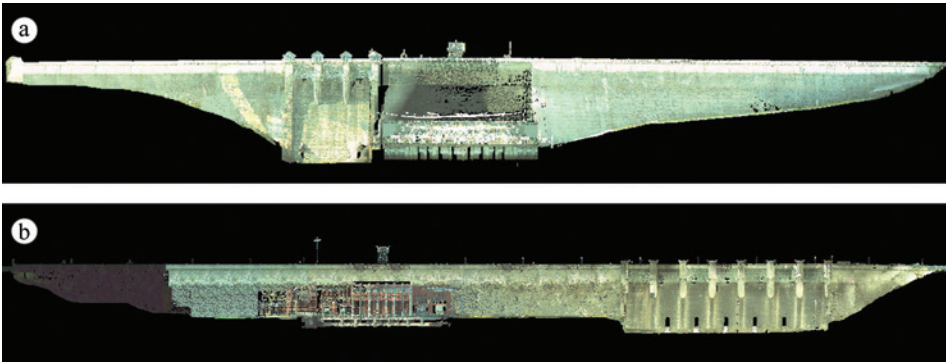
Możliwości wykorzystania naziemnego skaningu laserowego w kontroli i ocenie stanu technicznego budowli piętrzących przeanalizowano na dwóch obiektach: Solina-Myczkowce i Rożnów. Obie budowle powstały w połowie XX w. i ze względu na procesy starzeniowe i reologiczne, wynikające z długiego okresu eksploatacji, wymagają bardziej szczegółowych działań kontrolnych zwłaszcza, że są dwiema najwyższymi betonowymi zaporami wodnymi typu ciężkiego w Polsce i należą do obiektów najwyższych klas, stwarzających największe zagrożenia [Depczyński i Szamowski 1999]. Solina-Myczkowce to zapora wodna na rzece San o wymiarach: wysokość 82 m, długość 664 m, szerokość korony 9 m, kubatura 760 tys. m<sup>3</sup> [www.esolina.pl]. Nieco mniejsza budowla piętrząca Rożnów na Dunajcu ma wymiary: wysokość 49 m, długość 550 m, szerokość korony: 9 m, kubatura: 450 tys. m<sup>3</sup> [www.tauron-ekoenergia.pl].

Pomiary obu zapór wykonano instrumentem Leica ScanStation C10. Jest to skaner impulsowy, co przekłada się na jego duży zasięg: 300 m (przy 90% refleksyjności), oraz niższą, w stosunku do instrumentów fazowych, szybkość pomiaru: 50 000 pkt · s<sup>-1</sup>. Dokładność pomiaru położenia pojedynczego punktu deklarowana przez producenta na odległości do 50 m wynosi 6 mm. Pole widzenia skanera: 360° × 270°. Instrument dodatkowo wyposażony jest w aparat cyfrowy o wysokiej rozdzielczości, z zoomem i automatycznym ustawieniem ostrości, dzięki czemu tworzy kolorowe, fotorealistyczne, wolne od błędów paralaksy skany 3D [Leica... 2009].

Każdą z budowli pomierzono z 12 stanowisk, zlokalizowanych na koronach i w otoczeniu zapór. Pomiar wykonany skanerem laserowym uzupełniono zdjęciami cyfrowymi, wykonanymi wbudowanym w instrument aparatem cyfrowym. Jako punkty wiążące skany pozyskane z poszczególnych stanowisk wykorzystano, gwarantujące najwyższą dokładność, sztuczne obiekty referencyjne w postaci jednoznacznie identyfikowalnych w chmurze punktów obrotowo-uchyłnych tarcz o średnicy 6" oraz dodatkowo podczas pomiaru zapory w Rożnowie zastosowano sfery o średnicy 0,145 m.

Uzyskane za pomocą naziemnego skanera laserowego Leica ScanStation C10 dane poddano wstępnej obróbce w programie Cyclone 8.1.1. Znajdujące się we własnych ukła-

dach chmury punktów zlokalizowano oraz zorientowano względem jednolitych układów współrzędnych, opierając się na obiektach referencyjnych. Rejestracje przeprowadzono z błędem średnim  $RMS = 0,007$  m dla zapory Solina-Myczkowce i  $RMS = 0,012$  m dla zapory w Rożnowie. Następnie manualnie oczyszczono chmury punktów z błędnych i zbędnych obserwacji. Wstępnie opracowane chmury punktów (ryc. 1), w ramach analiz możliwości wykorzystania naziemnego skaningu laserowego w kontroli i ocenie stanu technicznego budowli piętrzących, zweryfikowano pod kątem ich przydatności w wizualnych ocenach stanu powierzchni zapór, pomiarach geodezyjnych oraz późniejszych analizach i interpretacjach.



Ryc. 1. Wstępnie opracowana chmura punktów: a) Solina–Myczkowce, b) Rożnow  
 Fig. 1. Post-processed point clouds: a) Solina–Myczkowce, b) Rożnow

Uzupełnione zdjęciami cyfrowymi skany wykorzystano do wizualnej oceny stanu powierzchni budowli. Szczególną uwagę zwrócono na widoczność rys, spękań i zawilgoceń. Do diagnozy stopnia uszkodzeń i zawilgoceń obiektu wykorzystano również wartość intensywności odbicia wiązki lasera. Zależność natężenia promieniowania odbitego od charakteru powierzchni odbijającej, jej barwy, szorstkości i zawartości wilgoci umożliwiła przeprowadzenie szczegółowych analiz. W celu określenia stanu powierzchni w programie Cyclone 8.1.1 wyodrębniono miejsca z najniższą intensywnością i określono ich procentowy udział. Wykorzystano także techniki automatycznego rozpoznawania obrazów, pozwalające na uzyskanie klas pikseli o podobnych właściwościach odbicia promieniowania. Rastrową reprezentację wyników pomiarów intensywności odbicia wyeksportowano w formacie .tiff. Obrazy intensywności w skali szarości wczytano do programu GEOMATICA 2013, gdzie przeprowadzono klasyfikację nienadzorowaną. Za pomocą algorytmu Fuzzy k-means [Bezdek 1973, Armesto-González i in. 2010], wyodrębniono 16 klas pikseli o podobnych właściwościach odbicia promieniowania. Poprawność analiz skontrolowano, porównując je ze zdjęciami cyfrowymi.

W ramach oceny przydatności danych TLS w geodezyjnych pomiarach zapór wodnych oraz późniejszych analizach i interpretacjach przetworzono chmury punktów, generując opracowania dostarczające szczegółowych informacji inżynierskich o skanowanych obiektach. W procesie tworzenia dokumentacji obiektów inżynierskich, weryfikacji geometrii oraz analiz ich zgodności z dokumentacją projektową szczególnie przydatne

są dwuwymiarowe przekroje [Heine i in. 2007]. W celu utworzenia przekrojów wygenerowano wycinki chmury punktów, które następnie zwektoryzowano w środowisku CAD. W programie Cyclone 8.1.1 wyznaczono lokalizację płaszczyzn tnących, ustalono grubość wycinków (0,05 m) oraz wyeksportowano je do uniwersalnego formatu ASCII. Płastry chmury punktów wczytano do programu AutoCAD z nakładką Kubit PointSense. Przekroje w formie kreskowej, powstałe poprzez półautomatyczną wektoryzację wycinków chmury punktów, wykorzystano do kontroli niezmienności przebiegu geometrycznego poszczególnych elementów budowli.

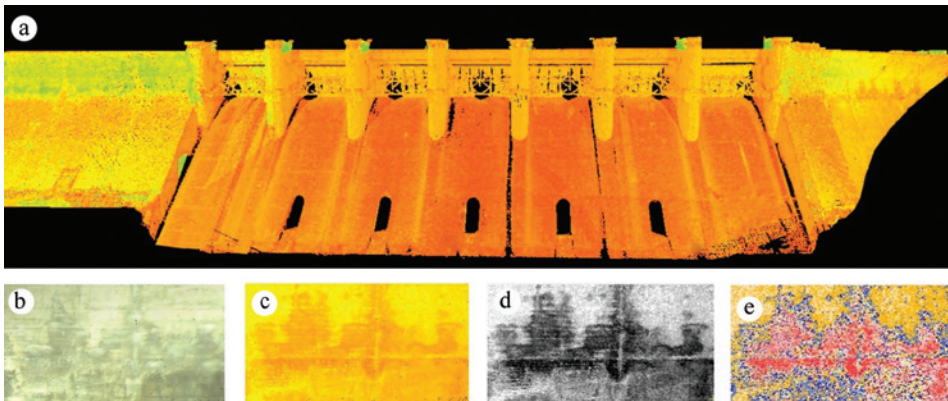
Obok dwuwymiarowych przekrojów w analizach inżynierskich powszechnie stosowane są także modele TIN [Heine i in 2007]. Do utworzenia modeli zapór wykorzystano program Geomagic Studio 2014. Chmury punktów zaimportowano w formacie binarnym Leica .ptx i przekształcono do postaci dokładnych powierzchni, opartych na siatkach TIN. Wybrane fragmenty modeli każdej z zapór przeanalizowano w programie Geomagic Control 2014. Modele TIN wiernie oddające kształt zapory porównano z teoretycznymi modelami CAD, tworząc mapę odchyłek i histogramy różnic.

## **WYNIKI I DISKUSJA**

Obserwacje wizualne powierzchni obiektów są ważnym elementem kontroli stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli piętrzących. Betonowe zapory wodne powinny być kontrolowane pod kątem występowania zmian stanu powierzchni, tj. rys, spękań, nadmiernych zawilgoceń czy przecieków. Ponadto wszelkie stwierdzone podczas oględzin nieprawidłowości powinny być dokumentowane w sposób umożliwiający ich ocenę podczas kolejnych kontroli i przeglądów [Jankowski 2008]. Pozyskane skanerem laserowym dane umożliwiły diagnozę stanu powierzchni. Integrując chmurę punktów z wykonanymi przez kamerę cyfrową skanera zdjęciami, uzyskano realistyczną wizualizację budowli z widocznymi uszkodzeniami (ryc. 2b). Kartometryczna dokładność danych zagwarantowała poprawne zlokalizowanie uszkodzeń i określenie ich rozmiarów, a także odpowiednie ich udokumentowanie. W diagnozowaniu stanu konstrukcji z powodzeniem zastosowano także wartość czwartej współrzędnej – intensywności odbicia wiązki lasera (I). Gładka, nieuszkodzona powierzchnia zapory odznaczała się wyższą intensywnością (kolor jaśniejszy) niż szorstka, spękana czy wilgotna (kolor ciemniejszy) (ryc. 2a). Wyniki klasyfikacji nienadzorowanej ocenione na drodze porównania ze zdjęciami cyfrowymi potwierdziły możliwość wykorzystania wartości intensywności i technik analizy obrazowej do wydzielenia klas powierzchni betonowych o różnych właściwościach (ryc. 2e). Raporty przedstawiające liczebność grupy pikseli o podobnych właściwościach spektralnych wykazały duży wpływ nie tylko uszkodzeń, ale i wilgotności powierzchni na wyniki klasyfikacji. Technologia naziemnego skaningu laserowego umożliwiła więc ocenę stanu powierzchni zapory w dwóch aspektach: poziomu wilgotności (filtracji przez korpus zapory) oraz stopnia uszkodzeń powierzchni. Poziom powierzchniowych procesów erozyjnych i zjawisk filtracyjnych w ramach kontroli stanu technicznego budowli piętrzących może być określony wizualnie [Jankowski 2008], jednak wykorzystanie w tym celu wartości intensywności odbicia wiązki lasera pozwala na bardziej zaawansowane analizy. Ocena bieżącego stanu budowli może opierać się na procentowym



określeniu uszkodzonych bądź zawilgoconych powierzchni. Natomiast postęp degradacji powierzchni zapór wodnych może być oceniony w drodze porównania procentowych wartości uzyskiwanych podczas kolejnych kontroli. Wyniki przedstawionych analiz znajdują swoje potwierdzenie w literaturze. W pracach Zaczek-Peplińskiej i Falacińskiego [2011] czy Armesto-González i in. [2010] na podstawie szczegółowych badań wykazano przydatność wartości intensywności i technik analizy obrazowej w diagnozowaniu stanu budowli.



Ryc. 2. Diagnoza stanu powierzchni zapory Rożnów:

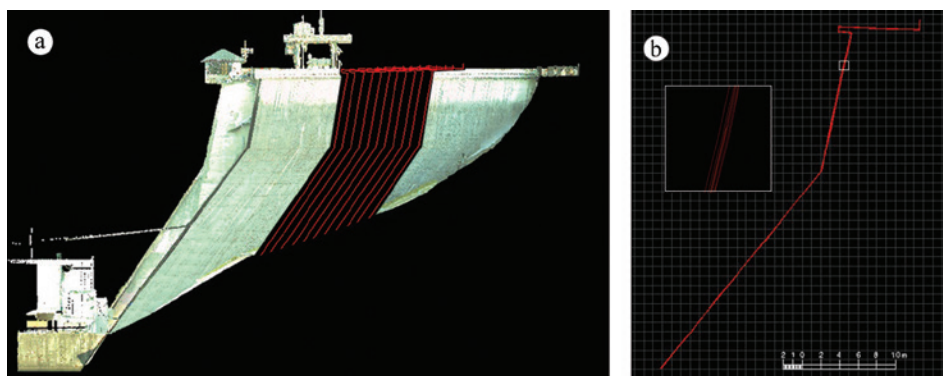
- wizualizacja kolorystyczna czwartej współrzędnej (I) wraz z wyznaczonym polem testowym,
- chmura punktów RGB pola testowego,
- wizualizacja kolorystyczna intensywności odbicia pola testowego,
- rastrowa reprezentacja intensywności odbicia pola testowego w skali szarości,
- wynik działania algorytmu Fuzzy k-means (16 klas) dla rastrowej reprezentacji współrzędnej I

Fig. 2. Surface condition assessment of the Rożnów dam:

- colour visualisation of the fourth coordinate (I) along with the selected test area,
- RGB point cloud of the test area,
- colour visualisation of the test area reflection intensity,
- raster representation of the test area reflection intensity in grayscale,
- the results of the Fuzzy k-means algorithm (16 classes) for the raster representation of coordinate I

Wyniki kontrolnych pomiarów geodezyjnych wykonywanych dla potrzeb ocen stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli piętrzących powinny się cechować jak najwyższymi parametrami dokładnościowymi [Jankowski 2008]. Geodezyjne pomiary kontrolne zapór wodnych sprowadzają się do okresowych badań przemieszczeń sieci punktów kontrolnych rozmieszczonych na obiekcie w stosunku do przyjętego układu odniesienia. Ruchy pionowe obiektu wyznacza się, porównując wyniki pomiarów przewyższeń w sieciach niwelacyjnych, gdzie średni błąd wysokości na jedno stanowisko niwelatora nie może przekroczyć 0,15 mm. Natomiast przemieszczenia poziome wyznacza się na podstawie okresowych pomiarów sieci kątowych lub kątowno-liniowych, gdzie średni

błąd kąta wynosi  $\pm 5^{\circ}$ , a błąd długości wynosi  $\pm 1\text{mm} + 1\text{mm} \cdot \text{km}^{-1}$ . Wysokie wymagania dokładnościowe dla pomiarów geodezyjnych wykonywanych w celu kontroli stanu technicznego budowli piętrzących wydają się wykluczać zastosowanie technologii skaningu laserowego w tym zakresie. Zastosowany w pomiarach zapór wodnych skaner laserowy Leica ScanStation C10 umożliwia uzyskanie zdecydowanie niższych dokładności: pomiar kąta  $\pm 37^{\circ}$  i odległość  $\pm 4\text{mm}$  (do 50 m) [Leica... 2009]. Dodatkowo należy uwzględnić błąd rejestracji skanów, zależny od liczby i lokalizacji stanowisk oraz obiektów referencyjnych. Nie można jednak pominąć faktu, że naziemny skaningu laserowy zapewnia powierzchniowe pokrycie obiektu danymi pomiarowymi, wyznaczając współrzędne milionów punktów, a nie jak w przypadku pomiarów klasycznych tylko kilku lub kilkunastu. Utworzone na podstawie chmury punktów przekroje umożliwiły uzyskanie szczegółowych informacji metrologicznych o każdym zeskanowanym fragmencie konstrukcji budowli (ryc. 3a). Nałożenie ich na siebie pozwoliło na kontrolę niezmienności przebiegu geometrycznego poszczególnych elementów budowli i wykrycie nawet niewielkich, milimetrowych odkształceń powierzchni zapory wodnej (ryc. 3b). Ponadto przekroje pozyskiwane w kolejnych cyklach pomiarowych będą w pełni porównywalne, co umożliwi wyznaczenie powierzchniowych (a nie punktowych) deformacji i przemieszczeń, świadczących o destabilizacji konstrukcji, a tym samym zagrożeniu bezpieczeństwa obiektu.

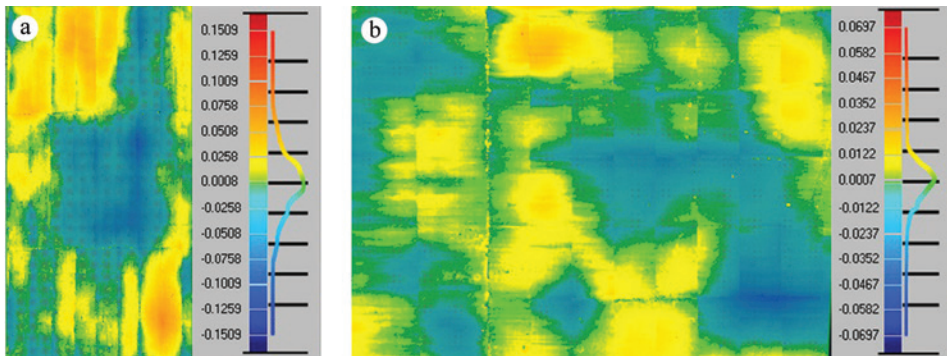


Ryc. 3. Przekroje zapory wodnej Solina–Myczkowce utworzone z chmury punktów  
 a) przekroje poprzeczne fragmentu konstrukcji  
 b) nałożone na siebie przekroje fragmentu konstrukcji

Fig. 3. Cross sections of the Solina–Myczkowce dam created from the point cloud  
 a) transverse cross sections of the fragment of the structure  
 b) overlaying cross sections of a fragment of the construction

Szczegółowych informacji o geometrii zapór dostarczyły także modele TIN. Mapy odchyłek powstałe z porównania fragmentów modeli budowli z teoretycznymi płaszczyznami ujawniły deformacje, odkształcenia i różnice od projektu, ale także niewielkie ubytki, uszkodzenia czy pęknięcia (ryc. 4). Prezentujące rozbieżności histogramy świadczą o możliwości wyznaczenia nawet milimetrowych rozbieżności. Tworzone na podstawie wyników cyklicznych pomiarów zapór wodnych modele będą w pełni

porównywalne i umożliwią powierzchniową (a nie punktową) kontrolę zmian kształtu budowli i powstałych uszkodzeń. Zastosowanie modeli różnicowych w badaniach stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli piętrzących umożliwi dokonywanie oceny ich jakościowego i ilościowego przebiegu deformacji i degradacji. Ponadto szczegółowe przekroje i modele mogą posłużyć do określenia miejsc największych odkształceń powierzchni zapór wodnych, w których należałoby umieścić dodatkowe punkty kontrolne. Potencjał technologii naziemnego skaningu laserowego w powierzchniowych analizach deformacji, odkształceń i przemieszczeń budowli piętrzących oraz możliwość wyznaczenia ich z dokładnością przewyższającą precyzję pojedynczego punktu chmury potwierdzają liczne badania naukowe prowadzone w tym zakresie [Schäfer i in. 2004, Alba i in. 2006, Schneider 2006, Heine i in. 2007, González-Aguilera i in. 2008, Gumus i in. 2013].



Ryc. 4. Mapy odchyłek z histogramami różnic

- a) porównanie fragmentu modelu zapory Solina – Myczkowce z teoretyczną płaszczyzną
- b) porównanie fragmentu modelu zapory Roznów z teoretyczną płaszczyzną

Fig. 4. Maps of deviations with histograms of differences

- a) comparison of the part of the model of Solina – Myczkowcedam with a theoretical plane
- b) comparison of the part of the model of Roznow dam with a theoretical plane

Analiza wyników obserwacji i pomiarów kontrolnych powinna odpowiedzieć na pytanie: „Czy zostały przekroczone wartości dopuszczalne lub graniczne obserwowanych zjawisk?” [Jankowski 2008]. Dla określenia wartości dopuszczalnych i granicznych przemieszczeń, które stanowią o bezpieczeństwie budowli piętrzących, stosowane są modele numeryczne (MES, MRS). Zaobserwowane rzeczywiste zachowanie się budowli porównywane jest z danymi uzyskanymi z modelu. Istotna niezgodność wyników obserwacji z wynikami obliczeń na modelu świadczy o jego nieadekwatności do rzeczywistości [Jankowski i Depczyński 2006]. Weryfikacja modelu w oparciu o tradycyjne, kontrolne pomiary geodezyjne jest ograniczona niewielką liczbą obserwacji wykonanych w miejscach prognozowanych największych przemieszczeń. Utworzone na podstawie chmury punktów szczegółowe przekroje dostarczają pełnej informacji o geometrii budowli, umożliwiając weryfikację modelu numerycznego na całej jego powierzchni, nie tylko w miejscach lokalizacji punktów kontrolnych. Odpowiednie uzgodnienie modelu z realiami w oparciu o szczegółowe dane TLS pozwoli w sposób bardziej wiarygodny



prognozować przyszłe zachowanie się budowli. Możliwość weryfikacji modelu MES zapór wodnych za pomocą pozyskanych skanerem laserowym danych ma potwierdzenie w literaturze [Zaczek-Peplińska i Popielski 2013].

## PODSUMOWANIE

Specyfika hydrotechnicznych budowli piętrzących sprawia, że obiekty te powinny być szczególnie starannie kontrolowane, a pozyskiwane w ramach kontrolnych pomiarów i obserwacji dane wykorzystywane do sporządzania oceny stanu bezpieczeństwa obiektu. W warunkach polskich oceny stanu technicznego zapór wodnych nabierają szczególnego znaczenia, gdyż większość z nich przekroczyła okres eksploatacji, po którym zagrożenie ich bezpieczeństwa istotnie wzrasta. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania technologii naziemnego skaningu laserowego do wzbogacenia podstawowych działań diagnostycznych prowadzonych w celu kontroli i oceny stanu technicznego zapór wodnych. Nowoczesna metoda pomiarowa okazała się przydatna zarówno na etapie opisu stanu powierzchni zapór wodnych przy badaniach deformacji budowli, jak i w późniejszych analizach. Technologia TLS zapewniła kompleksowe pokrycia obiektu danymi, będące wiarogodnym uzupełnieniem stosowanych obecnie rozwiązań. Wykorzystanie wartości intensywności odbicia wiązki lasera do określenia stanu powierzchni zapory umożliwiło ocenę poziomu wilgotności oraz stopnia uszkodzeń powierzchni. Utworzone w oparciu o chmurę punktów przekroje i modele TIN dostarczyły szczegółowych informacji o geometrii zapór wodnych, niezastąpionych przy analizach deformacji obiektów, uzupełnianiu sieci punktów kontrolnych czy weryfikacji numerycznych modeli zachowania się budowli.

## PIŚMIENNICTWO

- Alba M., Fregonese L., Prandi F., Scaioni M., Valgoi P., 2006. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. [W:] Proc. of FIG Mondial Congress, Germany.
- Armesto-González J., Riveiro-Rodríguez B., González-Aguilera D., Rivas-Brea T., 2010. Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *J. Archaeol. Sci.* 37(12), 3037–3047.
- Bezdek J.C., 1973. Fuzzy mathematics in pattern classification. PhD dissertation, Cornell University New York.
- Depczyński W., Szamowski A., 1999 Budowle i zbiorniki wodne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa.
- Gmina Solina, [www.esolina.pl](http://www.esolina.pl).
- González-Aguilera, D., Gómez-Lahoz, J., Sánchez J., 2008. A New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner. *Sensors* 8, 5866–5883.
- Gumus K., Erkaya H., Soycan M., 2013. Investigation of repeatability of digital surface model obtained from point cloud in a concrete arch dam for monitoring of deformations, *Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba*, 19(2), 268–286.
- Heine E., Reiner H., Taronger J., 2007. 3D risk mapping: preparing learning material on the use of laser scanning for risk assessment of public infrastructure. International Workshop on the application of terrestrial laser scanning for risk mapping, Valencia, Spain.

- Jankowski W., 2008. Wytyczne kontroli i bezpieczeństwa budowli piętrzących wodę. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Warszawa.
- Jankowski W., Depczyński W., 2006. Diagnostowanie i wzmacnianie budowli zbiorników wodnych. Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego – IX Konf. Naukowo-Techniczna. Instytut Techniki Budowlanej Cedzyna.
- Leica Geosystems Sp. z o.o., 2009. Leica ScanStation C10 Specyfikacje techniczne, Szwajcaria.
- Lemmens M., 2004. Product survey 3D laser mapping. GIM International 18(12), 44–47.
- Schäfer T., Weber T., Kyrinovic P., Zámečniková M., 2004. Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of Gabčíkovo. Proc. INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia.
- Schneider D., 2006. Terrestrial laser scanner for area based deformation analysis of towers and water damns. Proc. 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Baden, Austria.
- TAURON, Ekoenergia, Spółka z o.o., [www.tauron-ekoenergia.pl](http://www.tauron-ekoenergia.pl)
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane. Dz. U. z 2006 r. Nr 156, poz. 1118 z późn. zm.
- Ustawa z dnia 19 lipca 2001 r. – Prawo wodne. Dz. U. z 2001 r. Nr 115, poz. 1229 z późn. zm.
- Zaczek-Peplinska J., Falaciński P., 2011. Evaluation of possibilities to apply laser scanning for estimation of conditions of concrete. Reports on Geodesy 1(91), 539–546.
- Zaczek-Peplinska J., Popielski P., 2013. Technologia naziemnego skaningu laserowego jako narzędzie do weryfikacji geometrii numerycznych modeli zachowania obiektów hydrotechnicznych. Zapory – bezpieczeństwo i kierunki rozwoju. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Warszawa.

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 24.07.2014*