



NAZIEMNY SKANING LASEROWY ZAPORY WODNEJ W ROŻNOWIE JAKO NARZĘDZIE WSPOMAGAJĄCE MONITORING OBIEKTÓW HYDROTECHNICZNYCH

Pelagia Bilka, Bartosz Mitka, Maria Zygmunt
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kollątaja w Krakowie

TERRESTRIAL LASER SCANNING AS A TOOL TO SUPPORT MONITORING HYDROTECHNICAL OBJECTS WITH REGARD TO WATER DAM IN ROZNOW

Streszczenie

Monitoring i diagnostyka obiektów hydrotechnicznych dostarcza wiedzy z zakresu stanu technicznego obiektu. Głównym celem powyższych procesów jest wyznaczenie oceny tego stanu w określonym momencie użytkowania, poprzez zdefiniowanie jego stabilności i bezpieczeństwa. Diagnoza techniczna, definiowana jest jako zbiór metod i środków do oceny przyczyn ewolucji i konsekwencji zaistniałego stanu technicznego obiektu. W przypadku zapór wodnych, monitoring i diagnostyka opiera się na systemach działaniowych, celowo zaprojektowanych, generujących i przetwarzających informacje, które są podstawą oceny ich stanu technicznego. W niniejszym artykule zaprezentowano możliwość wzbogacenia systemu technicznego monitoringu zapór wodnych o technologię naziemnego skaningu laserowego (TLS – Terrestrial Laser Scanning). Naziemny skaner laserowy jest urządzeniem metrologicznym, które w sposób bezdotykowy dokonuje pomiaru obiektu i zapisuje go w postaci uporządkowanej w przestrzeni chmury punktów. Analizę wspomaganą systemem technicznego technologii TLS przeprowadzono dla zapory wodnej w Rożnowie.

Słowa kluczowe: monitoring zapór wodnych, naziemny skanining laserowy, modelowanie, przekroje z chmury punktów

Summary

Monitoring and diagnostics of hydrotechnical objects provide knowledge about technical condition of the object. The main purpose of the evaluation process is to determine the technical condition at a certain time of use, by defining its stability and security. Technical diagnosis, defined as a set of methods and means to assess the causes, evolution and consequences of given set of technical facility, is a technical system. In the case of dams, monitoring and diagnostics based on active systems, deliberately designed, generating and processing information that are the basis for the assessment of their technical condition. In this article we present the opportunity to enrich the technical monitoring system of water dams by the technology of terrestrial laser scanning (TLS). Terrestrial laser scanning is a device metrology, which in a non-contact measures the object and saves it in the form of an oriented point cloud. The analysis of the technical system, supported by TLS technology was conducted with regard to water dam in Rożnów.

Key words: *water dam monitoring, terrestrial laser scanning, modeling, cross sections of the point cloud*

WSTĘP

Zapory wodne są budowlami technicznymi wymagającymi okresowej, a nawet ciągłej kontroli ich stanu. Niemal wszystkie zapory na świecie objęte są programem działaniowego systemu monitorowania zapór wodnych w formie obserwacji okresowych bądź ciągłych (Lazzarini T. i in., 1977). Badania stanu technicznego zapór wodnych, prócz aspektów bezpieczeństwa, powinny być wykorzystywane do udoskonalania konstrukcji, technologii wykonania oraz do określania warunków eksploatacji (Mikucki Z., 1961). Trudności ścisłego ujęcia statystycznego zjawisk hydrauliki, geotechniki, mechaniki budowli, towarzyszących eksploatacji zapór wodnych, mogą być w pewnym stopniu pokonane przez zastosowanie w szerokim zakresie badań modelowych oraz projektowania modelowego (Mikucki Z., 1970). Obecnie, badanie stanu technicznego betonowych zapór wodnych odbywa się poprzez: pomiary przemieszczeń względnych (szczelinomierze, pochyłomierze i wahadła), pomiary punktów stałej prostej na koronie zapory, pomiary przemieszczeń celowników trygonometrycznych zlokalizowanych w górnych i dolnych partiach strony odpowietrznej zapory, pomiary ciśnień w piezometrach, pomiary stanu wody w zbiorniku, pomiary stanu wody dolnej, całodobowe pomiary temperatury powietrza w otoczeniu zapory, cotygodniowe pomiary temperatur w galeriach (Zaczek – Peplinska J., 2007). Rodzaj,

ilość oraz zasady rozmieszczania urządzeń kontrolno – pomiarowych zależą od typu i klasy ważności budowli (Lazzarini T. i in., 1977). Podczas projektowania urządzeń pomiarowych, metod oraz harmonogramów obserwacji należy dążyć do uzyskiwania możliwości porównywania wyników pomiarów pozyskanych różnymi metodami. Daje to kontrolę przeprowadzonych badań, oraz pozwala na niezależne wyznaczenie wartości przesunięć oraz deformacji.

Literatura opisująca zasady konstrukcji oraz eksploatacji zapór wodnych wskazuje na stosowanie zintegrowanych systemów działaniowych monitorowania zapór wodnych. Coraz częściej badacze podejmują tematykę zastosowania technologii naziemnego skaningu laserowego jako narzędzia wspomagającego te systemy. Wielu z nich wskazuje na zastosowanie naziemnego skaningu laserowego w okresowym, lecz nie w ciągłym monitorowaniu zapór wodnych (Alba M. i in., 2006). W jednym z artykułów włoscy naukowcy zaproponowali pomiary przemieszczeń zapory wodnej na Jeziorze w Cancano techniką TLS. Poprzez wzajemne wpasowywanie wygenerowanych wcześniej siatek trójkątów (TIN – Triangulated Irregular Network) oraz modeli obiektów dla chmur punktów zapory, pochodzących z różnych okresów pomiarowych, tworzyli modele różnicowe, a na ich podstawie oceniali geometrię deformacji sekcji betonowych zapory (Alba M. i in., 2006). Innym, popularnym zagadnieniem staje się zastosowanie technik TLS w badaniu kondycji betonu zapór wodnych (Gumus K. i in. 2013) oraz innych budowli hydrologicznych, między innymi bulwarów (Toś C., 2012).

Autorzy, zainspirowani zastosowaniem naziemnego skaningu laserowego w monitorowaniu dużych obiektów hydrotechnicznych, podjęli prace badawcze których celem było określenie możliwości zastosowania techniki TLS jako narzędzia wspomagającego monitoring zapór wodnych. Analizy przeprowadzono dla zapory wodnej w Rożnowie, wykorzystując dostępne narzędzia opracowania danych numerycznych. Produkty analizy pozwoliły ocenić prawidłowość postawionej hipotezy badawczej, która zakładała, iż naziemny skaner laserowy nie jest wystarczającym urządzeniem monitorującym stabilność obiektów inżynierskich. Jego zastosowanie w systemie monitoringu zapór wodnych pozwala jednak na wzbogacenie wyników obserwacji.

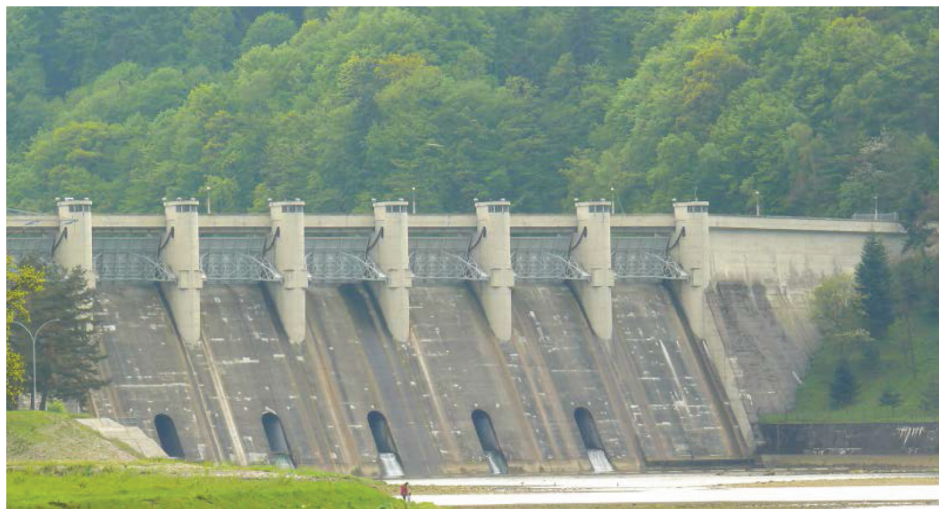
METODYKA BADAŃ WRAZ Z OPISEM

Obiektem badań, dla którego zdalnie pozyskano dane numeryczne przy użyciu naziemnego skanera laserowego była zapora wodna w Rożnowie (Rys. 1). Obiekt hydrotechniczny, powstały dla ujarzemia rzeki Dunajec, zaliczany jest do zapór betonowych ciężkich. Głównym projektantem zapory był Prof. Gabriel Narutowicz (1865 – 1922) – I Prezydent II Rzeczypospolitej Polskiej. Wzniesiona zapora ma długość 550 m, jej szerokość w koronie wnosi 9 m,

wysokość 32.5 m. Betonowy mur zapory, o szerokości 40 m, wzniesiony został na fundamencie wpuszczonym 17 m w podłoże budowli (Kruczek Z., 1986).

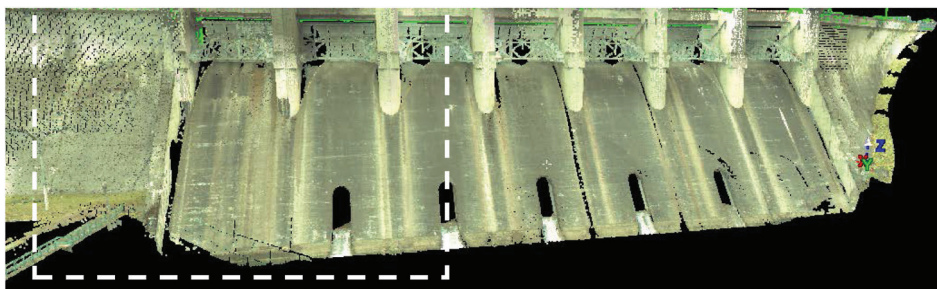
Materiał badawczy w postaci chmury punktów dla zapory wodnej w Rożnowie pozyskano w ramach obozu naukowego Koła Naukowego Geodetów Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Zastosowano impulsowy skaner Leica ScanStation C10, który dokonuje rejestracji chmury punktów w zakresie 360° w poziomie oraz 270° w pionie, przy maksymalnym zasięgu wynoszącym 300 m. Dokładność pojedynczego pomiaru położenia na 50 m wynosi ± 6 mm; dokładność pojedynczego pomiaru odległości na tym dystansie wynosi ± 4 mm (Leica Geosystems Sp. z o.o. 2009).

Stanowiska skanera rozmieszczono tak, aby jak najlepiej zobrazować powierzchnię zapory. Łącznie pozyskano 12 chmur punktów. Pomędzy stanowiskami skanera umieszczono zalecane przez producenta skanera tarcze celownicze (ang. *target mounts*), charakteryzujące się wysokim współczynnikiem odbicia, dzięki czemu były bardzo dobrze rozpoznawalne podczas łączenia ze sobą skanów. Pozyskane chmury punktów zorientowano wzajemnie oraz poddano czyszczeniu w programie *Cyclone 8.1.1*. Produkt finalny to trójwymiarowy model zapory wodnej w Rożnowie (Rys. 2).



Źródło: www.archiwalna.gminagrodek.pl
Source: www.archiwalna.gminagrodek.pl

Rysunek 1. Zapora wodna od strony odpowietrznej w Rożnowie
Figure 1. Water dam in Rożnow



Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 2. Połączone chmury punktów zapory wodnej w Rożnowie
Figure 2. Connected point clouds of water dam in Rożnow

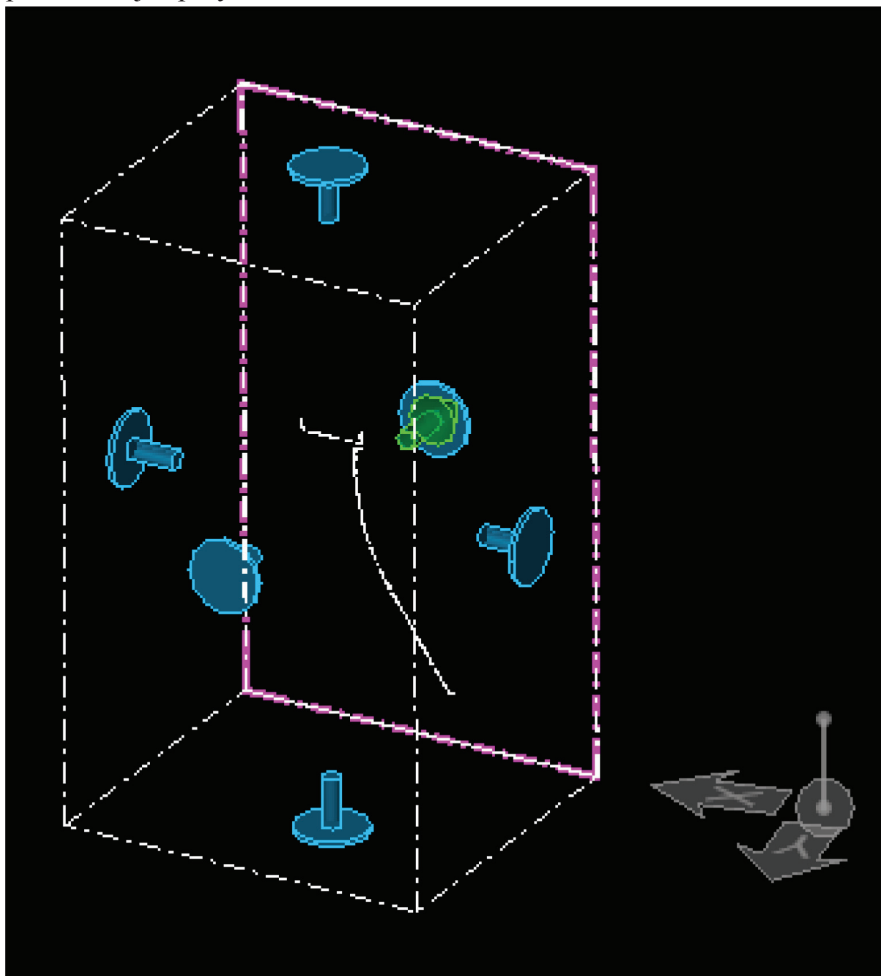
Opracowanie całego zgromadzonego materiału badawczego w postaci trójwymiarowej chmury punktów dla zapory byłoby bardzo czasochłonne. Dla przeprowadzenia analiz wytypowano więc pole testowe, reprezentujące fragment zapory wodnej od strony odpowietrznej (Rys. 2). Średnia gęstość chmury punktów, definiowana jako wartość odległości pomiędzy sąsiednimi punktami dla wyodrębnionego pola testowego (Lichti D., 2004), wyniosła 0,006 m.

W celu sprawdzenia zasadności zastosowania naziemnego skaniny laserowego jako narzędzia wspomagającego monitoring zapór wodnych (oparty na stosowanych zintegrowanych systemach działaniowych), przeprowadzono szereg opracowań danych numerycznych.

Pierwszym opracowaniem danych 3D było badanie geometrii fragmentu zapory poprzez wykonanie przekrojów z chmury punktów. Naziemny skaniny laserowy jest bardzo często wykorzystywany do bezreflektowego pomiaru geometrii obiektów trudno dostępnych (Kamiński W. i in. 2008). Przekroje z chmury punktów są wykorzystywane do tworzenia dokumentacji obiektów, oraz do badania zgodności stanu faktycznego z dokumentacją projektową. Tworzenie przekrojów z chmury punktów jest szczególnie przydatne do tworzenia dokumentacji dla obiektów podziemnych, tj. tuneli, jaskiń, grot (Kašpar M. i in. 2004). Dla przyjętego pola testowego wyznaczono 14 przekrojów poprzecznych oraz 7 przekrojów podłużnych zapory. Opracowanie wykonano w programie *MicroStation PowerDraft V8i* (Rys. 3). Aby możliwa była praca w środowisku programu, wyrysowanie przekrojów poprzedzono eksportem pliku chmury punktów do formatu .pts, a następnie konwersją do formatu .pod.

Kolejnym opracowaniem danych numerycznych było wygenerowanie siatki TIN dla fragmentu zapory wodnej. Ta czynność polega na poligonowym podziale powierzchni modelu geometrycznego, którego najmniejszym elemen-

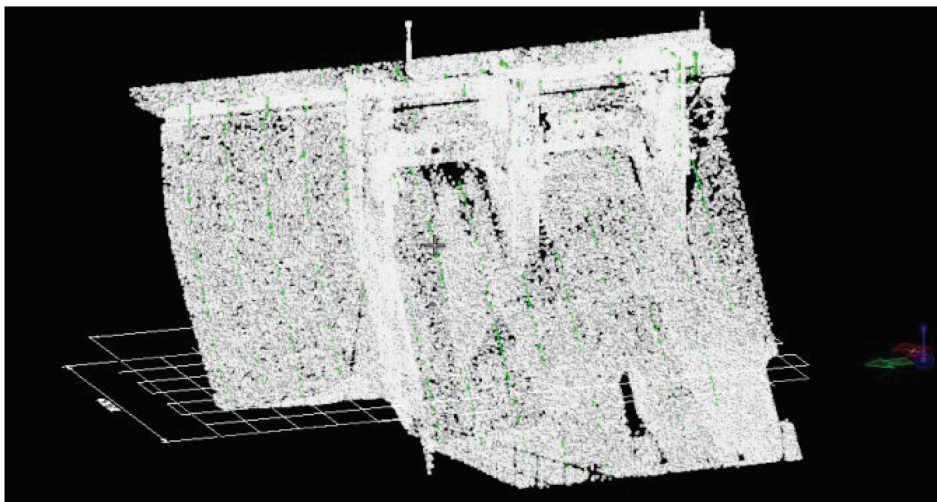
tem jest trójkąt. Poprzez zastosowanie złożonych algorytmów tworzenia siatki TIN, sąsiednie punkty są łączone, tworząc formy powierzchni. Model TIN odpowiada zatem bliższej reprezentacji rzeczywistego kształtu zapory (3D RiskMapping 2008). Opracowanie przeprowadzono w programie *3D Reshaper*. Model gładki oraz model siatkowy zapory posłużyły do analizy kondycji powierzchni odpowietrznej zapory.



Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 3. Narzędzia tworzenia przekrojów w programie
MicroStation PowerDraft V81

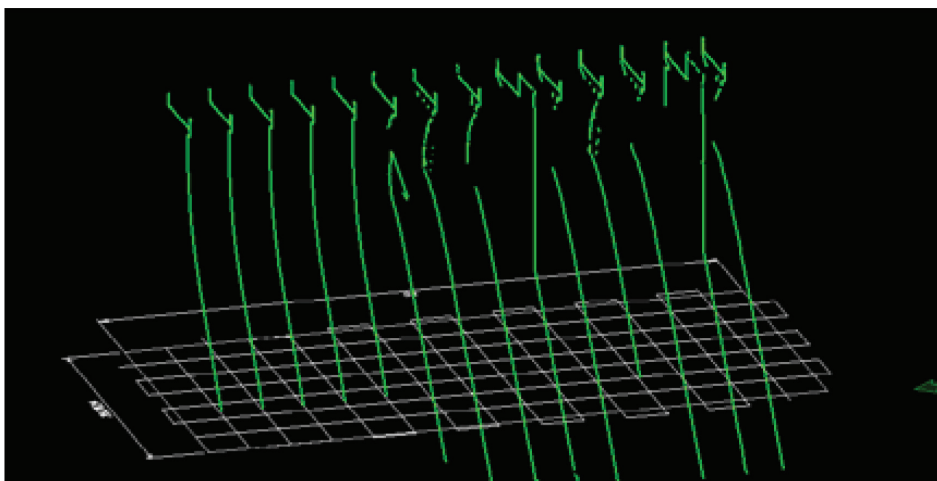
Figure 3 Tools to create cross-sections by *MicroStation PowerDraft V81*



Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

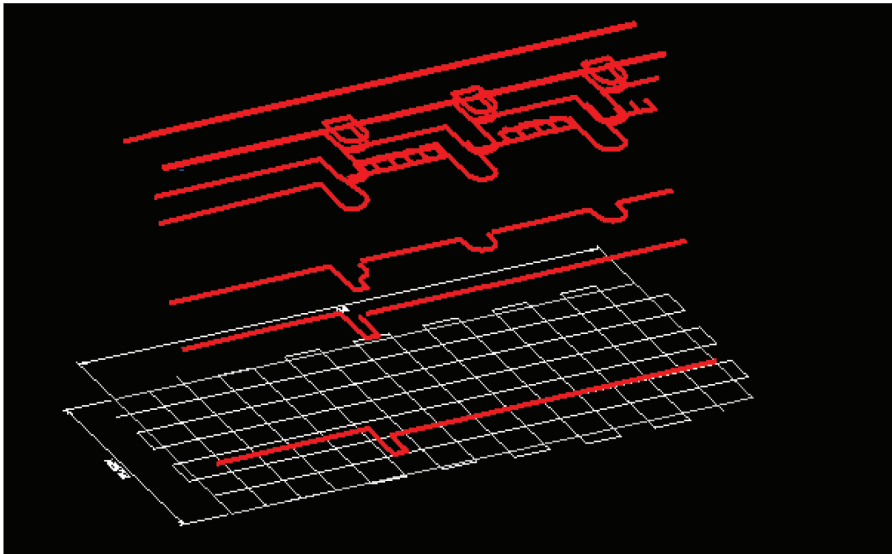
Rysunek 4. Chmura punktów oraz szkic rozmieszczenia przekrojów

Figure 4. Point cloud and sketch of locating cross sections



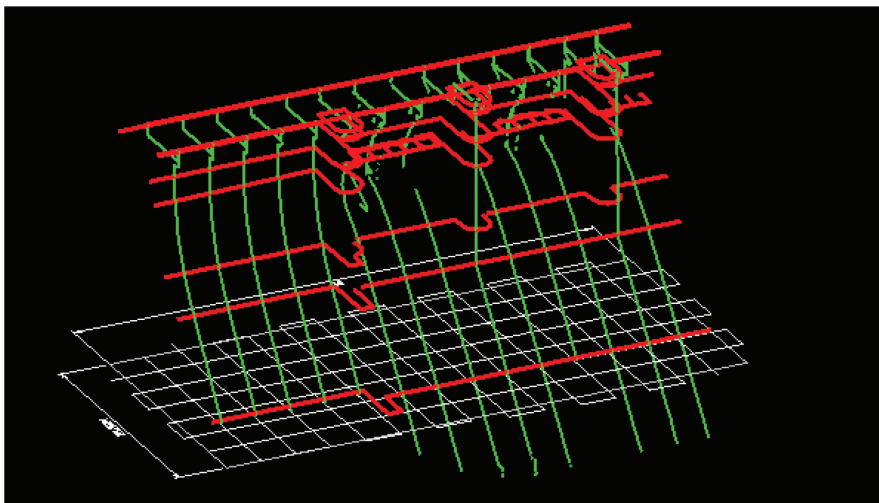
Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 5. Przekroje poprzeczne
Figure 5. Transversal cross sections



Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 6. Przekroje poziome
Figure 6. Horizontal cross sections

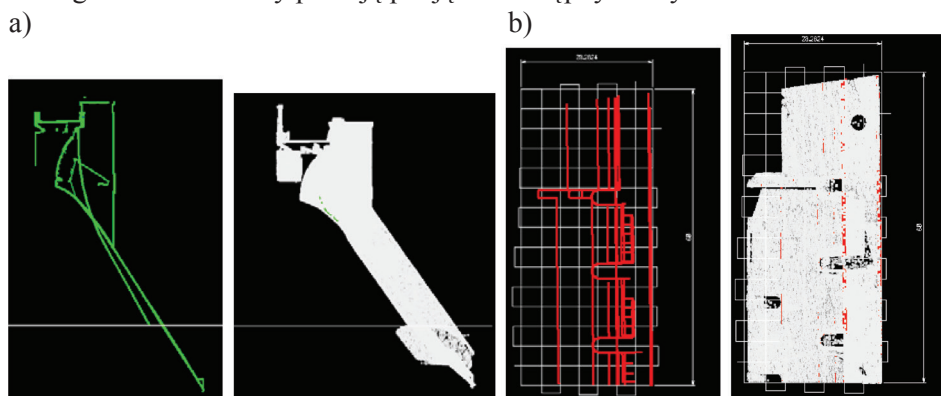


Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 7. Geometria fragmentu Zapory Wodnej w Rożnowie
Figure 7. The geometry of the part of the Water Dam in Rożnow

WYNIKI I ICH DYSKUSJA

Badanie geometrii fragmentu zapory wodnej w Rożnowie, przeprowadzono wykonując przekroje, których rozmieszczenie zostało odpowiednio zaplanowane (Rys. 4). Przekroje poprzeczne (Rys. 5) wykonano w regularnych odstępach, co 4 m. Dodatkowo, w miejscach charakterystycznych (krawędzie spływów). Przekroje poziome (Rys. 6), wyrysowano tylko dla miejsc charakterystycznych. Efekt końcowy prezentuje (Rys. 7). Geometria zapory wodnej w Rożnowie, wyznaczona na podstawie przekrojów z chmury punktów posłużyć może do wyznaczania przemieszczeń i odkształceń powierzchni zapory. Wyniki uzyskuje się poprzez odniesienie wyznaczonych przekrojów do ich odpowiedników utworzonych na podstawie danych numerycznych z innych okresów pomiarowych, bądź na podstawie wektoryzacji dokumentacji projektowej zapory. To zagadnienie Autorzy planują podjąć w następnym artykule.

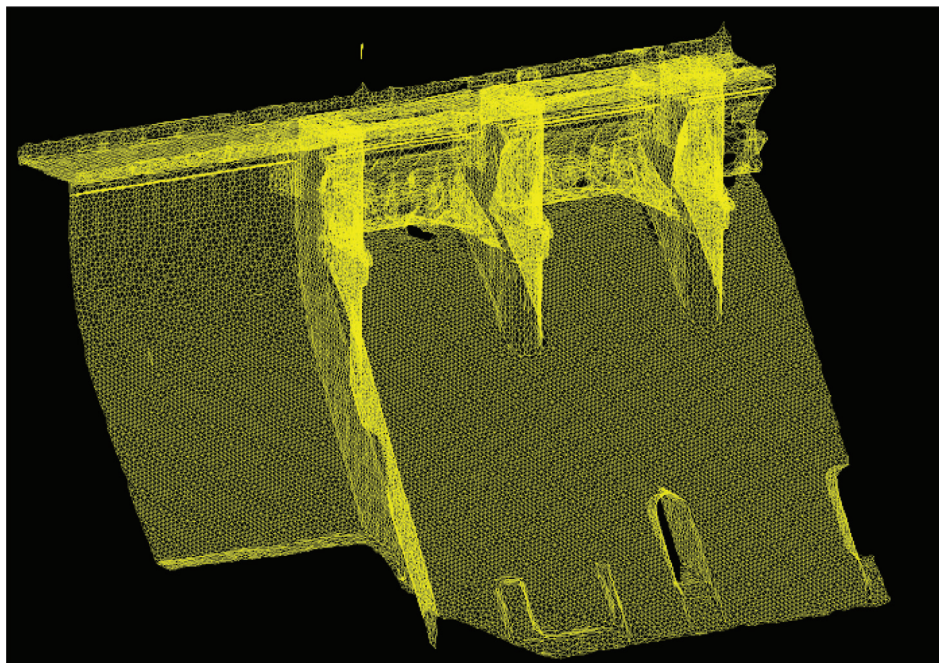


Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 8. Rzuty prostopadły przekrojów zapory; a) Rzut prostopadły przekrojów poprzecznych; b) Rzut prostopadły przekrojów poziomych

Figure 8. The orthogonal projection of cross sections a) The orthogonal projection of transversal cross sections; b) The orthogonal projection of horizontal cross sections

Wyznaczone w opracowaniu przekroje mogą być nakładane na siebie, w celu sprawdzenia niezmienności przebiegu geometrycznego określonych elementów konstrukcji (Rys. 8). Wyznaczone przekroje reprezentują geometrię całego obiektu. Pozwalają na uzyskanie informacji metrologicznych o każdym z zeskanowanych elementów konstrukcji. W tym względzie technologie naziemnego skaningu laserowego zdecydowanie wzbogacają działaniowy system monitorowania zapór wodnych, o nowe, cenne produkty opracowań.



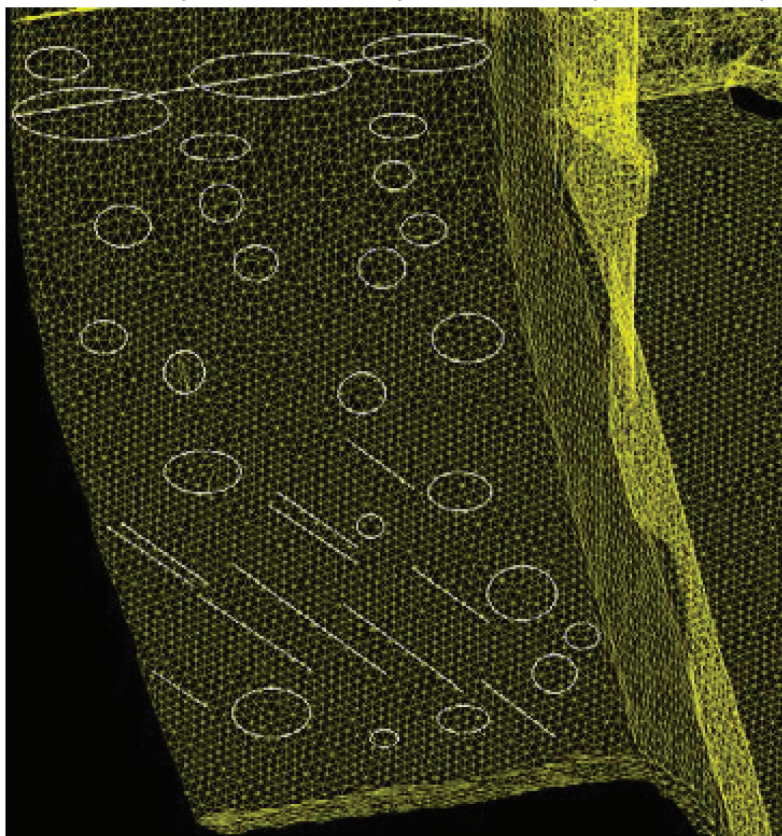
Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 9. Tryb siatkowy modelu TIN
Figure 9. Wire TIN Mesh

Wygenerowane w programie *3D Reshaper* siatki trójkątów, posłużyły do dwóch celów. Jednym z nich było sprawdzenie stanu betonu, przez wyznaczenie wypukłości, ubytków, oraz linii nieciągłości. Opracowania dokonano drogą weryfikacji wygenerowanego w trybie siatkowym modelu TIN (Rys. 9). Otrzymany model wyeksportowano do pliku w formacie .dxf, by następnie w środowisku programu *AutoCAD 2013* możliwa była optyczna analiza zmian geometrii. Wyniki prezentuje (Rys. 10).

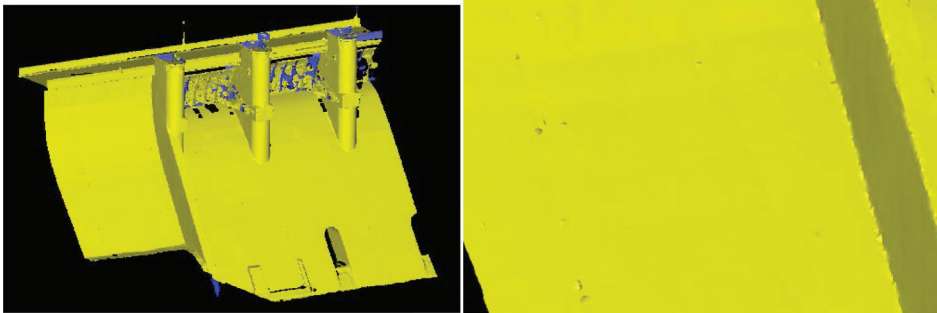
Wyznaczone na podstawie deformacji siatki trójkątów, linie nieciągłości oraz miejsca deformacji powierzchni zapory, w sposób jednoznaczny określają kondycję konstrukcji oraz deformacji (betonu). Na ich podstawie możliwe jest wnioskowanie na temat procesów degradacji jakim podlega powierzchnia zapory betonowej. Jak wynika z (Rys. 10), w dolnej części analizowanego obszaru widoczne są równoległe linie nieciągłości, co może świadczyć o zaistniałej, jednolitej sile zewnętrznej, która je wywołała (np. siła osiadania budowli).

Regularna, okresowa obserwacja zapory w technologii TLS mogłaby posłużyć do analizy czasowo-przestrzennej deformacji powierzchniowych. Drugim celem tworzenia siatki TIN było otrzymanie modelu fragmentu zapory. Dzięki wygenerowanej siatce trójkątów w trybie gładkich powierzchni uzyskano model, najbardziej oddający rzeczywisty kształt zapory (Rys. 11). Modelowanie zapór wodnych, w oparciu o dane numeryczne pozyskane w procesie naziemnego skaningu laserowego, doskonale sprawdza się w przypadku badań modelowych oraz projektowania modelowego zjawisk hydrauliki, geotechniki, mechaniki budowli. Dzięki wiarygodnemu modelowi 3D zapory wodnej, łatwiej jest dokonywać analiz scenariuszy zdarzeń dla różnych warunków hydrotechnicznych.



Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 10. Analiza zmian geometrii
Figure 10. Analysis of changes in geometry



Źródło: opracowanie własne
Source: Own elaboration

Rysunek 11. Tryb gładkich powierzchni modelu TIN
Figure 11. Smooth TIN Mesh

WNIOSKI

Zapory wodne to szczególne obiekty hydrotechniczne, których monitoring powinien być prowadzony na najwyższym poziomie dokładności oraz niezawodności. Współczesne technologie pozwalają na stosowanie zintegrowanych systemów pomiarowo – kontrolnych monitorowania zapór wodnych. Stałe i okresowe obserwacje tych obiektów hydrotechnicznych można wzbogacić o dane TLS. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania chmur punktów do pozyskania produktów opracowań służących monitorowaniu zapór wodnych. Przekroje, siatki TIN, czy modele zapór wodnych to produkty, które z powodzeniem świadczą o zasadności wykorzystania naziemnego skaningu laserowego jako narzędzia wspomagającego monitoring zapór wodnych. Okresowa obserwacja obiektu techniką TLS przyniosłaby możliwość tworzenia modeli różnicowych tych produktów opracowań. Zdalne pozyskiwanie danych numerycznych, pozwala na kompleksowe (a nie punktowe) pozyskanie danych dla całego obiektu. Jest to zdecydowaną zaletą naziemnego skaningu w odniesieniu do tradycyjnych metod geodezyjnych.

LITERATURA

Alba, M., Giussani, A., Roncoroni, F., Scaioni, M., Valgoi, P. (2006). Geometric Modelling of a Large Dam by Terrestrial Laser Scanning. In Proc. of FIG Mondial Congress, Germany

- 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*, v. 19, no 2, p.268-286, abr-jun, 2013.
- Kamiński W., Bojarowski K., Dumalski A., Mroczkowski K., Trystuła J. (2008). Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego ScanStation formy Leica w badaniu deformacji obiektów budowlanych. *Środowisko. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej. Zeszyt 2-Ś/2008*.
- Kášpar M., Pospíšil J., Štroner M., Křemen T., Tejkal M. (2004). Laser scanning in civil engineering and land surveying. *Vega s.r.o., Hradce Králové, Czechy*
- Kruczek Z. (1986). Jeziora Rożnowskie i Cichowskie – Przewodnik turystyczny. Warszawa – Kraków
- Lazzarini T. (1977). Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia, Państwowe Przedsiębiorstwo wydawnictw Kartograficznych, Warszawa
- Leica Geosystems Sp. z o.o. (2009). Leica ScanStation C10 Specyfikacje techniczne, Szwajcaria
- Lichti D. (2004). A resolution measure for terrestrial laser scanners. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34, Part 3
- Mikucki Z. (1961). Metody badań i kontroli zapór wodnych na fliszu karpackim dla zapewnienia im bezpieczeństwa. *Praca Instytutu Gospodarki Wodnej, Tom I, Warszawa*
- Mikucki Z. (1970). W sprawie zaleceń Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór, dotyczących pomiarów kontrolnych zapór ziemnych i narzutowych. *Gospodarka Wodna*, nr 7
- Zaczek – Peplinska J. (2007). Koncepcja modernizacji klasycznych sieci poziomych do wyznaczania przemieszczeń obiektów hydrotechnicznych. *Rozprawa doktorska, Warszawa*
- Toś C. (2012). Geodezyjne metody inwentaryzacji wałów przeciwpowodziowych na przykładzie Bulwarów Wiślanych w Krakowie. *Środowisko, Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej. Zeszyt 23*.
- 3D RiskMapping (2008). *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*

Mgr inż. Pelagia Biłka, Mgr inż. Maria Zygmunt,
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, WIŚiG, Katedra Geodezji
ul. Balicka 253a, pok.224, 30-149 Kraków
dr inż. Bartosz Mitka
Katedra Geodezji Rolnej, Katastru i Fotogrametrii
Ul. Balicka 253 a, 30-0149 Kraków
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie