

CEZARY TOŚ*

GEODEZYJNE METODY INWENTARYZACJI WAŁÓW
PRZECIWPOWODZIOWYCH NA PRZYKŁADZIE
BULWARÓW WIŚLANYCH W KRAKOWIESURVEYING METHODS FOR LEVEES
INVENTORY ON THE EXAMPLE OF VISTULA
BOULEVARDS IN CRACOW

Streszczenie

Prace geodezyjne prowadzone na potrzeby oceny stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych o różnej konstrukcji powinny spełniać określone kryteria. W artykule przeanalizowano współcześnie stosowane technologie, w tym pomiary klasyczne, opracowania fotogrametryczne i skaning laserowy. Przedstawiono metodę hybrydową opartą na integracji pomiarów klasycznych, wykorzystaniu tachimetru skanującego oraz dokumentacji fotograficznej. Na podstawie doświadczeń zdobytych w trakcie inwentaryzacji Bulwarów Wiślanych w Krakowie prowadzonych w 2010 r. określono przydatność ww. metod w tego typu pracach. Klasyczne metody uzupełnione skanowaniem z użyciem tachimetrów są optymalne w przypadku konstrukcji ziemnych. Na prostych konstrukcjach murowych lub betonowych dobrze sprawdza się proponowana metoda hybrydowa. Skaning laserowy posiadający niedostępne dla innych metod możliwości jest uzasadniony ekonomicznie w przypadku prac na obiektach o skomplikowanej konstrukcji.

Słowa kluczowe: inwentaryzacja geodezyjna, wały przeciwpowodziowe, skaning laserowy, fotogrametria naziemna

Abstract

Geodetic works carried out for the purposes of evaluation of technical condition of flood embankments have to meet some special technical criteria. Modern technologies such as classical measurements, the photogrammetric studies and laser scanning have been taken into consideration in the paper. The presented method follows a hybrid approach by integration of classical measurements, scanning function of reflectorless tachymeter and camera images. Experiences based on geodetic inventory of the Vistula Boulevards in Cracow conducted in 2010 r allows to determine the usability of above mentioned methods in this specific measurements. It has been found that in the case of inventory of earth structures the optimal method of measurement needs combining classical methods and scanning tachymeter. The proposed hybrid method is also effective when applied for typical concrete constructions. Using of laser scanners is justified only in the case of measurement of very complicated structure.

Keywords: surveying inventory, levees, laser scanning, terrestrial photogrammetry

* Dr inż. Cezary Toś, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Powódź z 2010 roku spowodowała zniszczenia infrastruktury przeciwpowodziowej w całym kraju. Konieczność napraw uszkodzeń powstałych po jej przejściu i szacowania ich kosztów implikuje pytania o optymalne metody geodezyjne inwentaryzacji obiektów hydrotechnicznych. Inwentaryzacja ta musi spełniać specyficzne wymagania techniczne, gdyż jest podstawą opinii budowlanej dotyczącej stanu technicznego konstrukcji, a w dalszej części projektu konserwacji lub odbudowy [1]. Do czynników, od których uzależniony jest dobór metody pomiarowej należy rodzaj i konstrukcja obiektu, wielkość i charakter uszkodzeń, czas i koszt pomiaru, a także czy dany pomiar będzie wykorzystany jako bazowy w dalszym monitoringu obiektu. Analiza tych czynników pod kątem możliwości i ograniczeń dostępnych metod pomiaru prowadzi ostatecznie do optymalnego wyboru technologii. Proces ten staje się coraz ważniejszy z dwóch powodów. Po pierwsze pojawiają się nowe technologie pomiarowe mające nieosiągalne dotąd możliwości, takie jak skaning laserowy. Po drugie, nowoczesne oprogramowanie geodezyjne umożliwia integrację klasycznych pomiarów. Metoda hybrydowa powstała w jej wyniku jest pozbawiona wielu ograniczeń poszczególnych metod wchodzących w jej skład.

W 2010 roku prowadzone były prace inwentaryzacyjne 6 odcinków wałów przeciwpowodziowych o różnej konstrukcji w obrębie Bulwarów Wiślanych w Krakowie. Ich celem było:

- dostarczenie danych dotyczących stanu technicznego elementów i szczegółów dla aktualnej oceny stanu technicznego obiektów,
- zapis aktualnego stanu jako porównawczego w celu określenia postępu procesu degradacji obiektu – pomiar zerowy dla tej metody monitoringu.
- ocena możliwości i efektywności różnych technologii pomiarowych (jako projekt pilotażowy). Opracowanie technologii pomiaru optymalnej w aspekcie lokalnych uwarunkowań.

W związku z tym pomiary geodezyjne dotyczyły nie tylko określenia geometrii, lub jej zmian dla kluczowych elementów konstrukcyjnych przenoszących obciążenia, ale również ubytków materiału, spękań i innych uszkodzeń. W przeprowadzonych pracach zastosowano różne techniki pomiarowe klasyczne, hybrydowe oraz skaning laserowy. W trakcie prowadzenia prac określono możliwości poszczególnych metod w świetle wymagań określenia stanu technicznego obiektów o różnym charakterze. Doświadczenia te są przedmiotem niniejszego artykułu.

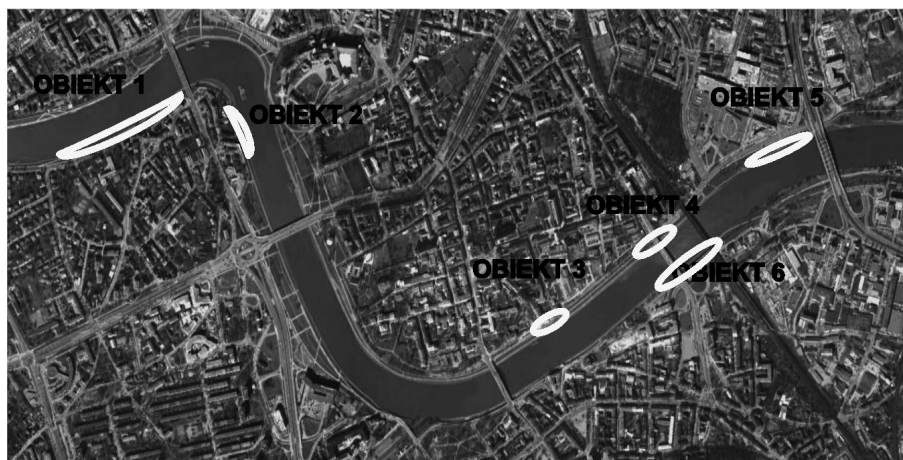
2. Charakterystyka obiektów badań

Pomiarem objęto sześć wybranych obiektów, o różnej charakterystyce technicznej, stanowiących umocnienia skarp koryta Wisły. Przedmiotowe budowle hydrotechniczne zbudowano w latach 1907–1913 przy regulacji koryta rz. Wisły, a w latach 60. przy budowie stopnia Dąbie. Lokalizację obiektów pokazano na rysunku 1.

Obiekty:

- 1) „Bulwary–Tyniecka” km 76+229–76+450, prawy brzeg, wał ziemny i mur oporowy niskiego bulwaru,

- 2) „Bulwary–Zamkowa” km 76+640–76+830, prawy brzeg, wał ziemny i mur oporowy niskiego bulwaru, wzdłuż bulwaru Poleskiego oraz mielizna z naniesionego materiału w okresie wezbrań 2010 r.,
- 3) „Bulwary–Gazowa” km 78+610–78+670, lewy brzeg, mur oporowy bulwaru wysokiego wzdłuż ulicy Podgórskiej,
- 4) „Bulwary–Starowiślna” km 78+970–79+060, prawy brzeg, mur oporowy bulwaru wysokiego – Bulwaru Kurlandzkiego przy moście Powstańców Śląskich,
- 5) „Bulwary–most Kotlarski” km 79+420–79+670, lewy brzeg, mur oporowy bulwaru niskiego wzdłuż Bulwaru Kurlandzkiego,
- 6) „Bulwary – Zabłocie” km 78+970–79+200, prawy brzeg, mur oporowy, bulwar wysoki wzdłuż Bulwaru Podolskiego, przy moście Powstańców Śląskich.



Rys. 1. Lokalizacja obiektów badań
Fig. 1. The location of research objects

Spośród wymienionych obiektów można wyróżnić 3 grupy ze względu na konstrukcję. Obiekt 1 i 2 są wałami o konstrukcji ziemnej, na których szczycie posadowiono kamienne mury o wysokości do 2 m. Druga grupa obejmująca obiekty 3, 4, 6 to wały w postaci murowanych z nieregularnych bloków piaskowca ścian oporowych. Są to obiekty zabytkowe i charakteryzują się one dużą ilością detali architektonicznych. Odsunięte są od koryta rzeki o ok. 20 m. Na przedpolu poprowadzona jest wyasfaltowana droga. Obiekt nr 5 jest wysokim murem oporowym o konstrukcji murowanej ze szlifowanych kamiennych bloków. Posadowiony jest bezpośrednio w korycie Wisły.

Ze względu na zróżnicowanie lokalnych uwarunkowań i biorąc pod uwagę cele nadrzędne realizacji projektu, szczegółowe zadania stojące przed pomiarem są również zróżnicowane. Zadania te i ich charakterystyka zestawiono w tabeli 1.

Wymagania stojące przed pomiarem inwentaryzacyjnym wałów przeciwpowodziowych

Obiekt	Cele szczegółowe	Charakterystyka pomiarów
Bulwary „Tyniecka”, „Zamkowa”	<ul style="list-style-type: none"> – Budowa trójwymiarowego modelu obiektu, umożliwiającego generowanie dowolnie zlokalizowanych profili – Identyfikacja uszkodzeń konstrukcji w postaci wyrw, zapadlisk, wypłukań itp. – Szczegółowa analiza postępu procesu degradacji – wypłukań materiału, osunąć 	W przypadku elementów o konstrukcji ziemnej wymagane dokładności rzędu kilku cm
Bulwary „Gazowa”, „Starowiślna”, „Zabłocie”	<ul style="list-style-type: none"> – Budowa trójwymiarowego modelu obiektu umożliwiającego określenie geometrii dowolnego fragmentu konstrukcji, w tym detali architektonicznych – Identyfikacja uszkodzeń konstrukcji murowych w postaci ubytków, rys itp. – Szczegółowa analiza postępu procesu degradacji detali konstrukcji, w tym dylatacji i szczelin. 	Dokładność modelu rzędu kilku mm. Powtarzalność wyników pomiarów dotyczących określenia geometrii lub jej zmian dla kluczowych elementów konstrukcyjnych przenoszących obciążenia
Bulwar „Most Kotlarski”	<ul style="list-style-type: none"> – Budowa trójwymiarowego modelu obiektu, umożliwiającego określenie geometrii dowolnego fragmentu konstrukcji – Identyfikacja uszkodzeń konstrukcji murowych w postaci ubytków, rys itp. – Szczegółowa analiza postępu procesu degradacji detali konstrukcji, w tym dylatacji i szczelin 	Dokładność modelu rzędu kilku mm oraz możliwość pomiaru z dużej odległości powyżej 120 m lub z niestabilnej platformy. Powtarzalność wyników pomiarów dotyczących określenia geometrii lub jej zmian dla kluczowych elementów konstrukcyjnych przenoszących obciążenia

3. Zastosowane technologie pomiarowe

Przedstawione w tabeli 1 cele szczegółowe i ich charakterystyka pozwalają jedynie na ograniczoną standaryzację procedur pomiarowych. W przedmiotowych badaniach polegały one na zastosowaniu:

- pomiaru klasycznego realizowanego za pomocą stacji pomiarowych,
- metod fotogrametrii cyfrowej,
- skanowania.

Pomiary klasyczne

Metoda tachymetryczna za pomocą stacji pomiarowej pozwala na pomiary wysokiej dokładności rzędu 1–3 mm. W przypadku oparcia jej o trwale stabilizowane punkty osnowy

i sygnalizacji punktów pomiarowych jest metodą w pełni powtarzalną, co predysponuje ją do pomiarów odkształceń konstrukcji. Do zalet można zaliczyć możliwość pomiaru punktów przesłoniętych, np. roślinnością wysoką, ale tylko przy zastosowaniu przyrządów. Pomiar bez przyrządu mogą być stosowane do obserwacji linii nieciągłości terenu oraz szkieletowych obiektów. Główną wadą metody jest możliwość pomiaru ograniczonej liczby punktów. Przy dużych ilościach szczegółów metoda ta jest zbyt czasochłonna. W przedmiotowych badaniach stosowano tę metodę, używając stacji pomiarowej Topcon GPT-9002A do pomiarów punktów osnowy, punktów orientacyjnych dla zdjęć fotograficznych, a także głównych linii szkieletowych powierzchni muru oraz linii nieciągłości terenu i terenów pokrytych roślinnością wysoką. W przypadku punktów osnowy i punktów orientacyjnych pomiar wykonano z dokładnością 1–2 mm, a w pozostałych przypadkach 2–3 mm. Ze względu na brak możliwości stabilizacji punktów pomiarowych nie stosowano tej metody do monitoringu konstrukcji murów oporowych.

Zdjęcia cyfrowe

Zaletą technik fotograficznych jest łatwość prowadzenia prac polowych oraz możliwość pozyskania dowolnie licznych zbiorów danych, co pozwala budować modele 3D o dużej szczegółowości. Zdjęcia cyfrowe rejestrują ponadto informacje niedostępne dla innych technik, takie jak rysy, spękania a także zawilgocenia, wysolenia, występowanie mchów i porostów na powierzchni murów świadczące o braku odporności konstrukcji na atak wody. Dane pozyskane technikami fotograficznymi są jednak mniej dokładne i wymagają dużego nakładu pracy na etapie opracowania kameralnego [2]. Ponadto wykorzystanie zdjęć cyfrowych jest uwarunkowane przez użycie odpowiednio skalibrowanych kamer. W wyniku kalibracji otrzymywane są elementy orientacji wewnętrznej aparatu oraz model zniekształceń geometrycznych zdjęć nim wykonywanych. Dzięki znajomości tych elementów możliwa jest odpowiednia korekcja zdjęć nadająca im cechy kartometryczności [3, 4].

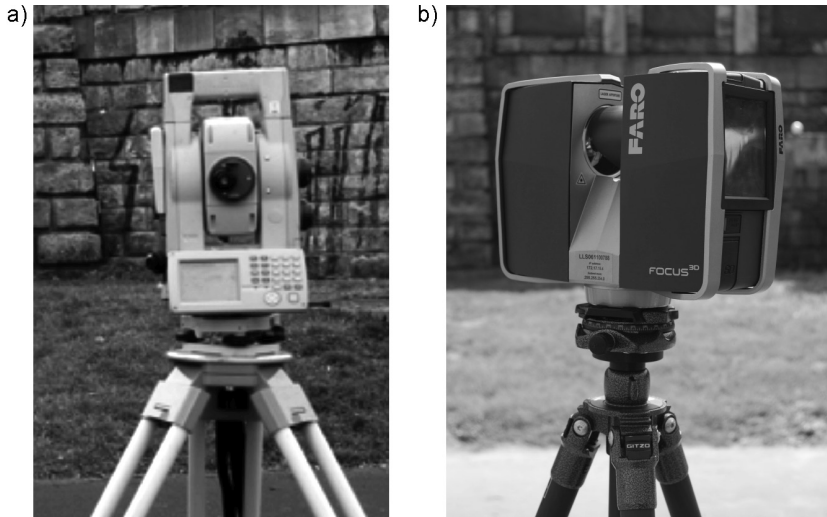
Zdjęcia wykonano za pomocą aparatu cyfrowego skalibrowanego programem PiCalib. Wykonanie zdjęć w każdym przypadku poprzedzało rozmieszczenie na powierzchni obiektu odpowiedniej liczby punktów, których współrzędne wyznaczono metodą biegunową z osnowy geodezyjnej. W przedmiotowych badaniach wykorzystano zdjęcia cyfrowe do inwentaryzacji szczegółów architektonicznych zabytkowych fragmentów murów oraz stworzenia ich fotoplanów.

Skanowanie

W technice skanowania obserwacje pojedynczych punktów są zastąpione chmurami punktów uporządkowanych w postaci regularnej siatki. Położenie każdego punktu jest wyznaczane biegunowo. Gęstość punktów definiowana na początku jest głównym parametrem uwzględnianym przy projektowaniu pomiaru, ważnym szczególnie w przypadku powierzchni nieregularnej. Pomierzone przestrzenne współrzędne biegunowe są bieżąco przetwarzane i zapisywane w układzie XYZ [5]. Technika skanowania ma wiele zalet, główne to:

- krótki czas uzyskania dużej liczby obserwacji,
- zautomatyzowany wybór obserwowanych punktów,
- niezależność od warunków oświetleniowych; skaner laserowy jest systemem aktywnym z własnym źródłem „oświetlenia”,
- niezależność od warunków pogodowych.

Skanowanie może być wykonane dwoma rodzajami instrumentów: tachimetrami skanującymi (rys. 2a) oraz skanerami laserowymi (rys. 2b). Choć zasada działania i dokładność rzędu 5 mm obydwóch urządzeń jest podobna, to wyniki pomiarów są nieporównywalne głównie ze względu na jedną cechę – liczbę obserwacji. Tachimetr skanujący pozwala na pomiar maksymalnie kilku punktów na sekundę, podczas gdy skaner laserowy w tym samym czasie obserwuje od kilku do kilkuset tysięcy punktów.



Rys. 2. a) Tachimetr skanujący GPT 9002A firmy TOPCON oraz b) skaner FARO Focus 3D
 Fig. 2. a) Scanning tachymeter TOPCON GPT 9002A, b) Laser scanner FARO Focus 3D

Tachimetr skanujący ze względu na tę cechę umożliwia uzyskanie do kilku tysięcy punktów w rozsądnym czasie pomiaru, co dla dużego obszaru oznacza małą ich gęstość. W związku z tym dla prawidłowego opisu geometrii obiektu skanowanie nie może stanowić jedyne źródła danych, a jedynie uzupełnienie pomiarów klasycznych wykonanych tym samym instrumentem (tachimetrem skanującym). Do zalet należy zaliczyć powtarzalność pomiaru tą metodą możliwą do uzyskania przy identycznym ustawieniu instrumentu, tym samym nawiązaniu i odpowiednim zaprogramowaniu skanowania [5]. Cecha ta pozwala na wykorzystanie tej techniki do pomiarów odkształceń konstrukcji bez konieczności stabilizacji punktów pomiarowych.

Skanery laserowe ze względu na szybkość pomiaru umożliwiają pozyskiwanie informacji o obiekcie w krótkim czasie o niespotykanej dotąd szczegółowości. Dodatkowo istnieje możliwość integracji wyników ze zdjęciami cyfrowymi wykonywanymi zewnętrznym lub wbudowanym aparatem. W fazie półautomatycznego opracowania chmury punktów zarejestrowane na oddzielnych skanach poddane są eliminacji szumów (*noise reduction*) oraz usunięciu pomiarów zbędnych (*resampling*). Tak przetworzone oddzielne zbiory są następnie scalane i kolorowane na podstawie zdjęć cyfrowych [6].

Ogromna liczba obserwacji sprawia, że nie jest konieczna stabilizacja punktów monitoringu konstrukcji. Metoda ta ma również swoje ograniczenia. Dla skanerów laserowych

w przedmiotowych badaniach bardzo istotne znaczenie ma odległość, z jakiej wykonuje się skanowanie. Przy niewielkich odległościach obszar obserwacji jest ograniczony (kąty poziome i pionowe nie powinny przekraczać 45°), wymuszając zwiększenie liczby stanowisk [7]. Ponadto dla skanerów fazowych granica zasięgu wynosi 100 m, co uniemożliwia pomiar np. z drugiego brzegu Wisły [6]. Konieczne również jest wcześniejsze przygotowanie i pomiar punktów orientacyjnych, aby powiązać chmury punktów z układem współrzędnych. Szczegółowa obróbka materiału pomiarowego wymaga dużego nakładu pracy. Na szczęście nie zawsze jest konieczna. Istnieje możliwość pozostawienia dużych fragmentów pozyskanego zbioru w nieprzetworzonej postaci (chmury punktów), dla potrzeb wizualizacji lub jako materiał archiwalny [8]. Jednak główną wadą tej metody jest mała dostępność wynikająca przede wszystkim z dużego kosztu zakupu urządzenia i oprogramowania.

Metoda hybrydowa z wykorzystaniem tachimetru skanującego

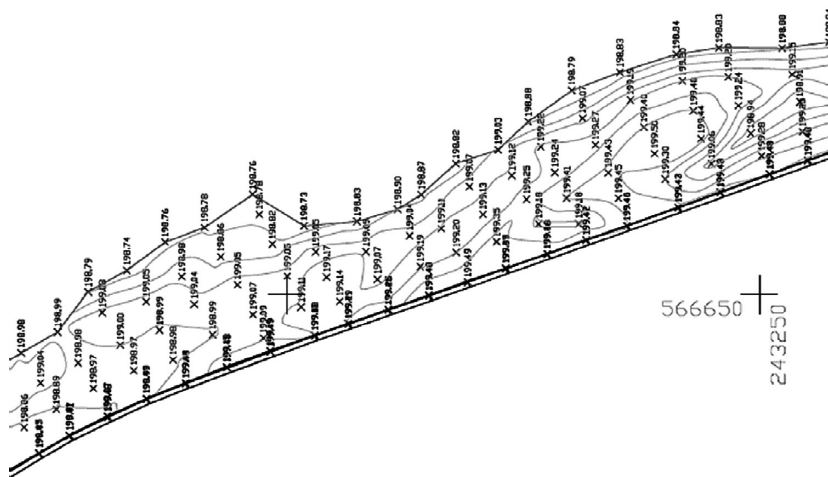
Pewną alternatywą dla skanerów laserowych może być metoda hybrydowa z wykorzystaniem tachimetrów skanujących oraz zdjęć cyfrowych [5]. Polega ona na pomiarze tachimetrycznym linii szkieletowych obiektu oraz punktów służących do orientacji zdjęć cyfrowych. Następnym etapem jest wykonanie skanowania o małej gęstości tym samym instrumentem w celu uzyskania zbioru punktów monitoringu odkształceń konstrukcji. Punkty te nie wymagają stabilizacji. Ostatni etap to wykonanie zdjęć rejestrujących uszkodzenia konstrukcji (rysy, spękania, ubytki), ewentualnie umożliwiających w trakcie opracowania fotogrametrycznego inwentaryzując detali architektonicznych.

4. Charakterystyka prac geodezyjnych prowadzonych na poszczególnych obiektach

Wymagania dotyczące wszystkich obiektów określały konieczność stworzenia modeli 3D. Wymagania dotyczące dokładności i szczegółowości modeli różnią się w zależności od konstrukcji obiektu. Dlatego metody wykonywanych pomiarów i opracowanie ich wyników uznane jako optymalne należy rozpatrywać pod kątem charakterystyki obiektów, których dotyczyły.

Bulwary „Tyniecka” i „Zamkowa”

Dla obiektów tych będących głównie konstrukcjami ziemnymi uznano, że najlepszym ich opisem będzie stworzenie numerycznego modelu terenu. Numeryczny model terenu daje możliwość oglądania powierzchni terenu z różnych perspektyw, co pozwala na zaobserwowanie wszelkich nieregularności powierzchni. Można odczytać wysokości terenu w dowolnym punkcie oraz budować profile terenu o dowolnym przebiegu. Do stworzenia NMT tego terenu wykonano pomiar tachimetryczny linii szkieletowych wałów i wieńczącego ich muru oraz skanowanie tachimetrem skanującym o gęstości około 3×3 m. Nieliczne obszary pokryte wysoką roślinnością uzupełniono pomiarem klasycznym na pryzmat, a w obszarach o widocznych deformacjach wywołanych przez rzekę siatkę skanowania zagęszczono (rys. 3). Pomiary te ułatwiało duże nachylenie stoków konstrukcji i mała liczba uszkodzeń. Powstała dokumentacja wykonana w państwowym układzie współrzędnych spełniła wszystkie założenia dotyczące szczegółowości i dokładności. Monitorowanie ewentualnych zmian będzie polegać na analizie numerycznych modeli terenu powstałych w różnych okresach.



Rys. 3. NMT mielizny powstałej z w obrębie koryta rzeki

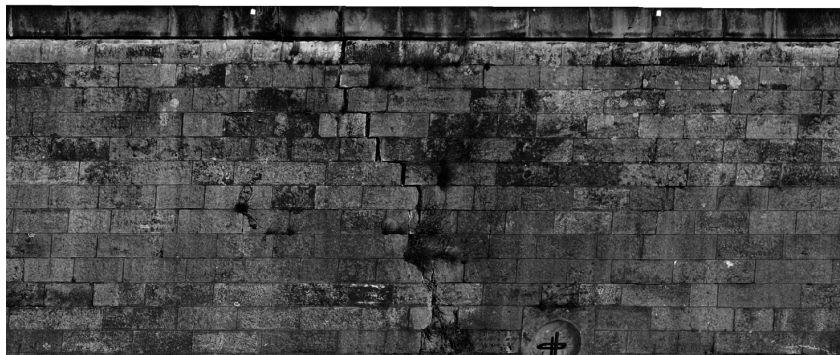
Fig. 3. The DTM of sandbank built within the river

Bulwar „Most Kotlarski”

Wał przeciwpowodziowy w pobliżu Mostu Kotlarskiego jest prostą konstrukcją oporową murowaną ze szlifowanego kamienia pozbawioną detali architektonicznych. Posadowiony jest w korycie Wisły, więc pomiar możliwy jest tylko z drugiego brzegu oddalonego o ok. 120 m. Te cechy (prosta konstrukcja, duża odległość) oraz fakt, że występujące uszkodzenia są głównie w postaci szczelin i pęknięć powoduje, że najlepszą metodą inwentaryzacji jest proponowana metoda hybrydowa. Na bazie klasycznego pomiaru i skanowania o gęstości ok. 1×1 m stworzono model powierzchniowy muru. Zdjęcia wykonano z łodzi, ale możliwe również było zastosowanie teleobiektywu. Zdjęcia zorientowano za pomocą pomierzonych punktów, a w dalszym etapie dzięki funkcji monoplottingu przekształcono do postaci fotoplantów (rys. 4), czyli rzutów ortogonalnych rzeczywistych powierzchni. Są one kartometryczne dzięki kalibracji aparatu i wykonanej na podstawie odpowiednich punktów dostosowania orientacji zdjęć. Zachowują jednolitą skalę na całej powierzchni, a dokładność identyfikacji współrzędnych w lokalnym układzie wynosi ok. 1 cm. Jest to dokładność, z jaką można wyznaczyć usytuowanie i np. długość rys czy wielkości uszkodzonych powierzchni itp.

Fotoplany w postaci tekstury nałożono na model powierzchniowy. Otrzymany model odzwierciedla kształt muru oporowego z dokładnością 5 mm. Natomiast dokładność odtworzenia szczegółów na podstawie faktury modelu to 1 cm.

Budowane modele szkieletowe, w oparciu o wyniki cyklicznie przeprowadzanych pomiarów, będą w pełni porównywalne. Na podstawie zmian kształtu modeli można wyznaczać przemieszczenia i odkształcenia murów większe od 5 mm. Na podstawie faktury modeli komputerowych 3D można zaobserwować i zmierzyć nowo powstałe ubytki, uszkodzenia, zarysowania pęknięcia, ocenić stan spoin, zawilgocenia itp. Porównując faktury modeli powstałych w różnym czasie można dokonywać oceny jakościowej i ilościowej przebiegu degradacji.



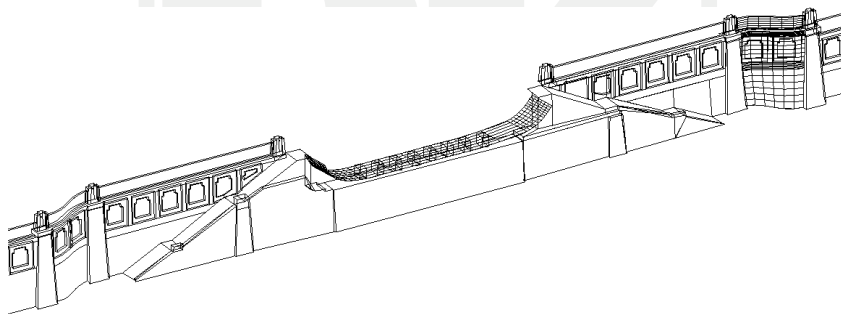
Rys. 4. Ortophotoplan z widocznym pęknięciem muru

Fig. 4. Ortophotoplan showing the crack of wall

Bulwary „Gazowa”, „Starowiślna”, „Zablocie”

Obiekty z trzeciej grupy należą do najbardziej skomplikowanych. Wpływa na to duża ilość detali architektonicznych oraz nierówna powierzchnia murów zbudowanych z nieregularnych bloków kamiennych. W tym przypadku dla celów porównawczych zastosowano metody hybrydową oraz skaning laserowy.

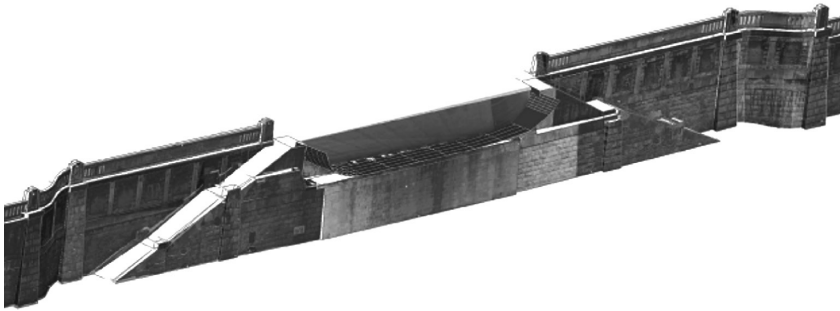
Metoda hybrydowa z wykorzystaniem tachimetru skanującego w tym przypadku nie różniła się zasadniczo od obserwacji przeprowadzonych dla odcinka „Most Kotlarski”, poza tym, że odległość stanowisk od obiektu nie przekraczała 20 m. Podstawę zbudowanego modelu przestrzennego stanowił model krawędziowy 3D zbudowany z danych pozyskanych z pomiaru klasycznego. Wykonane zdjęcia zorientowano i opracowano w programie fotogrametrycznym Pi3000. Dzięki temu możliwe było uzupełnienie modelu szkieletowego o drobne detale architektoniczne niemożliwe do pomiaru metodą klasyczną (rys. 5).



Rys. 5. Model szkieletowy

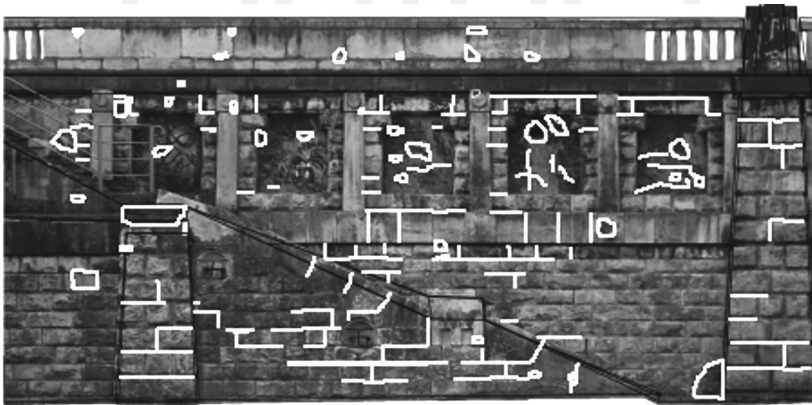
Fig. 5. An edge model

Najbardziej żmudnym etapem pracy okazało się przekształcenie otrzymanego modelu krawędziowego na model powierzchniowy. Jest to niezbędne, gdyż warunkuje prawidłowe przygotowanie fotoplanów, a w dalszym etapie nałożenie ich w formie tekstury na otrzymane powierzchnie (rys. 6).



Rys. 6. Model 3D z naturalną teksturą ze zdjęć
Fig. 6. The 3D model with the texture from digital photograph

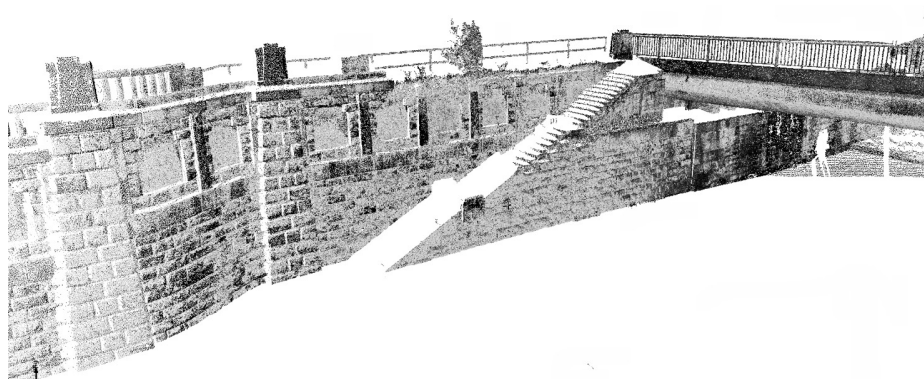
Tekstura ta uzupełnia model o szczegóły istotne dla oceny stanu konstrukcji. Są to rysy spękania ubytki materiału, uszkodzenia spoin, a także silne zawilgocenia. Inwentaryzację tych uszkodzeń wykonaną na modelu przedstawiono na rys. 7. Kartometryczna dokładność uzupełnionych w ten sposób fragmentów jest mniejsza. Końcowym etapem pracy jest uzupełnienie modelu o punkty uzyskane w wyniku skanowania tachimetrem o gęstości 1×1 m. Obserwacje te pełnią rolę pomiaru bazowego w monitoringu deformacji obiektu. Ocena bieżącego stanu może opierać się na procentowym określeniu uszkodzonych powierzchni. Postęp degradacji i deformacje konstrukcji mogą natomiast być ocenione przez porównanie modeli tego typu wykonanych w różnym czasie.



Rys. 7. Inwentaryzacja uszkodzeń na podstawie modelu 3D z naturalną fakturą
Fig. 7. The inventory of damages made on 3D model with the texture from digital photograph

Skaning laserowy wykonano z zastosowaniem urządzenia fazowego Faro FOCUS 3D. Prace polowe polegały na przygotowaniu punktów orientacyjnych, które pomierzono i zasygnalizowano odpowiednimi znakami. Ze względu na małą odległość od obiektu i konieczność zachowania odpowiednich kątów pomiaru, obiekt podzielono na 25 metrowe odcinki skanowane z jednego stanowiska. Na każdym stanowisku wykonywano tzw. pre-skan słu-

żący do określenia zakresu właściwego pomiaru, następnie definiowano docelową gęstość punktów określoną na 5 mm i uruchamiano właściwy pomiar (rys. 8).



Rys. 8. Chmura punktów zarejestrowana z jednego stanowiska
Fig. 8. The cloud of points registered from one occupation point

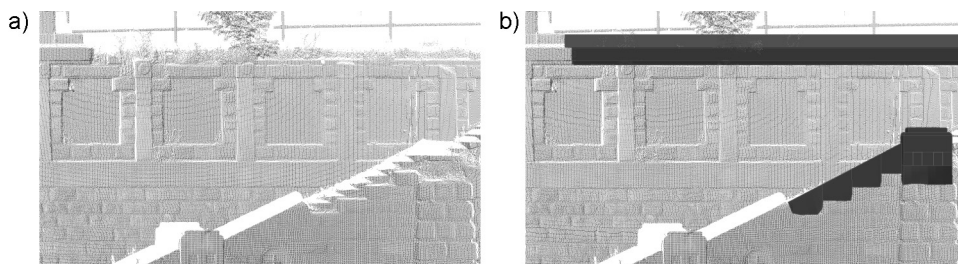
Całość prac na 1 stanowisku przeprowadzono w ok. 15 minut, co jest wynikiem doskonałym, porównywalnym jedynie z metodami fotogrametrycznymi. Skaner ten w trakcie pomiaru wykonuje również zdjęcia wbudowaną kamerą, które służą później do kolorowania chmury punktów. Zdjęcia te są jednak gorszej jakości niż te wykonywane aparatem fotograficznym. Oprogramowanie do obróbki danych pozwala na półautomatyczne łączenie chmur punktów. Opracowanie modelu powierzchniowego jest jednak pracą żmudną. Na szczęście opracowanie to można ograniczyć jedynie do nielicznych rejonów, np. uszkodzeń. Jest to możliwe, gdyż surowa chmura punktów o takiej gęstości sama niesie informację o dużej szczegółowości. Na jej podstawie można nawet określać głębokość uszkodzonych spoin



Rys. 9. Inwentaryzacja ubytków w spoinach wykonana na podstawie chmury punktów wraz z określeniem głębokości szczelin
Fig. 9. The inventory of weld defects with measurements of crevices depth made on cloud of points

mur, co jest niedostępne w przypadku innych metod pomiarowych (rys. 9). Jest to możliwe jedynie przy gęstościach co najmniej równych przeciętnej szerokości spoiny oraz odpowiednim kącie skanowania. Przy dużych jego wartościach promień lasera pada na boczną powierzchnię, a nie dno spoiny. Przyjmując jednak, że głębokość spoiny nie powinna być większa niż jej szerokość, można określić efektywny zakres kąta skanowania na 45° , a taki był stosowany na wszystkich stanowiskach.

Chmura punktów pozwala nie tylko na określenie wielkości uszkodzeń, ale również zaprojektowanie elementów wypełniających uszkodzenia, zmniejszając koszt robót konserwatorskich (rys. 10).



Rys. 10. Ocena ubytków w konstrukcji a) – chmura punktów, b) chmura punktów wraz z zaprojektowanym uzupełnieniem w oprogramowaniu Autodesk

Fig. 10. An assessment of structure defects: a) cloud of points, b) projects of fill of voids in Autodesk

Monitoring odkształceń konstrukcji może być prowadzony przez porównanie dwóch chmur punktów wykonanych w różnym czasie. Porównaniu mogą podlegać pojedyncze punkty charakterystyczne odwzorowane na obydwóch skanach lub linie przekrojów. Można również opracować tzw. mapę różnicową, określającą odchylenia powierzchni obydwóch skanów od siebie.

5. Podsumowanie badań i wnioski

Prace geodezyjne prowadzone dla potrzeb oceny stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych i ich monitoringu muszą być prowadzone technikami dostosowanymi do specyficznych wymagań budowlanych oraz charakterystyki obiektów wynikającej z ich konstrukcji. Z drugiej strony należy brać też pod uwagę dostępność niektórych technik i koszt pomiaru wynikający z zakupu lub amortyzacji sprzętu oraz nakładu pracy. Biorąc powyższe czynniki pod uwagę na podstawie doświadczeń zdobytych w trakcie prac na Bulwarach Wiślanych można stwierdzić, że:

- W przypadku konstrukcji ziemnych techniką spełniającą wszystkie wymagania techniczne i tanią jest klasyczny pomiar tachymetryczny uzupełniony ewentualnie o dane ze skanowania dla obszarów o widocznych deformacjach.
- Ściany oporowe o prostej konstrukcji wymagają uzupełnienia klasycznych pomiarów, w przypadku gdy występuje konieczność rejestracji uszkodzeń typu pęknięcia czy rysy. Dobrym rozwiązaniem wydaje się proponowana technologia hybrydowa oparta

na integracji klasycznego pomiaru, skanowania przy użyciu tachimetru oraz rejestracji fotograficznej. Klasyczny pomiar pozwala na rejestrację ogólnej geometrii obiektu. Odpowiednio opracowane zdjęcia pozwalają na inwentaryzację uszkodzeń i ubytków konstrukcji, natomiast zbiór punktów monitoringu deformacji może być rejestrowany klasycznie lub za pomocą odpowiednio zaprogramowanego skanowania tachimetrem. Dodatkową zaletą tej metody jest to, że może być stosowana nawet przy dużych odległościach przy braku dostępu do obiektu pomiaru.

- Dla obiektów nieregularnych o skomplikowanej konstrukcji skaning laserowy jest najlepszą metodą pomiaru. Cechuje go szybkość rejestracji oraz niedostępna dla innych technik szczegółowość. Biorąc pod uwagę, że tylko niektóre fragmenty chmury punktów wymagają dokładnego opracowania jest to też metoda o niskim nakładzie pracy. Jej główną wadą jest mała dostępność i wysoka cena sprzętu. Proponowana metoda hybrydowa spełnia wprawdzie w tym przypadku wszelkie założenia techniczne, ale wymaga znacznego nakładu pracy na etapie kameralnym.

Prezentowane wyniki badań, zrealizowane w ramach tematu nr Ś-2/242/DS/2012, zostały sfinansowane z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Kucharska-Stasiak E., *Metody pomiaru zużycia obiektów budowlanych*, Przegląd budowlany 2/95, Warszawa 1995.
- [2] Tokarczyk R., Boroń A., *Badanie cyfrowych aparatów fotograficznych dla potrzeb fotogrametrii bliskiego zasięgu*, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”, Vol. 10, Kraków 2000, 63-1 do 63-10.
- [3] Cardenal J., Mata E., Castro P., Delgado J., Hernandez M.A., Perez J.L., Ramos M., Torres M., *Evaluation of a digital non metric camera (Canon D30) for the photogrammetric recording of historical buildings*, „IAPRS and Spatial Information Sciences”, Instabul, Turkey, Vol. 34, Part XXX, 2004.
- [4] Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close range photogrammetry. Principles, methods and applications*, Whittles Publishing, U.K. 2006.
- [5] Toś C., Wolski B., Zielina L., *Scanning tacheometers. Applications of scanning technology at generating precise model of engineering objects*, Monografia 385 seria Inżynieria Środowiska, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.
- [6] Voegtler T., Schwab I., Landes T., *Influence of different materials on the measurements of terrestrial laser scanner*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, B5, Vol. 37, 2008.
- [7] Soudarissanane S., van Ree J., Bucksch A., Lindenbergh R., *Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality*, Proceedings 3DNordOst, Berlin 2007.
- [8] Kamiński W., Bojarowski K., Dumalski A., Mroczkowski K., Trystuła J., *Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego SCANSTATION w badaniu deformacji obiektów budowlanych*, Czasopismo Techniczne, 2-Ś/2008, Kraków 2008, 139-147.