

## Fotogrametria bliskiego zasięgu i skaning laserowy jako metody monitoringu zmian geodynamicznych na przykładzie skarpy w Płocku

Maria Przyłucka<sup>1</sup>, Anna Klimkowska<sup>1</sup>



M. Przyłucka



A. Klimkowska

**Close range photogrammetry and laser scanning as the methods of monitoring geodynamic changes on the example of the scarp in Płock.** *Prz. Geol.*, 64: 504–512.

*Abstract.* Landslides are a phenomenon commonly found on the slopes of valleys and water bodies, as well as areas of rivers, embankments and slopes of excavations. Sudden landslides in these areas can be monitored using photogrammetric technique. The aim of this paper is to present the possibility of close-range photogrammetry (CRP) and terrestrial laser scanning (TLS) to conduct monitoring of surface changes that have taken place due to geodynamic processes. The studies were conducted on a 22-m section of the Vistula River scarp in Płock. Terrestrial images, taken three times every six months, as well as terrestrial laser scanner measurements were used to determine the morphological changes occurring on a portion of the Vistula River scarp in Płock in one year. Based on the measurements, a thick cloud

of points and a three-dimensional terrain model of the area of interest were obtained each time. Next, a comparative analysis of models taken at different times was carried out. Results of measurements allowed demonstrating the overall stability of the slope, i.e. the lack of morphological changes in the analysed period, with minor changes in some of its regions (loss of soil mass in the northern part and the growth in the southern part of the test area). The study shows that, in morphologically difficult areas, CRP can provide information about the direction and magnitude of deformation, when changes are formed rapidly and contribute to large (at least several-decimetre) geodynamic changes.

**Keywords:** close-range photogrammetry, terrestrial laser scanning, landslides monitoring

Osuwisko powstaje w wyniku przemieszczenia materiału ziemnego, skalnego lub zwietrzliny wzdłuż powierzchni poślizgu, pod wpływem siły ciężkości. Uwolnienie mas ziemnych może nastąpić na skutek działania czynników naturalnych (np. katastrofalne opady, trzęsienia ziemi) lub działalności człowieka (np. nasypy, podcięcia stoków). Rejonami sprzyjającymi powstawaniu osuwisk są obszary charakteryzujące się taką budową geologiczną, gdzie warstwy przepuszczalne i nieprzepuszczalne występują naprzemiennie. Osuwiska mogą tworzyć się zarówno na zboczach dolin i zbiorników wodnych, jak i na obszarach źródłkowych rzek, na nasypach oraz w skarpach wyrobisk. Do skutków osuwania się mas ziemnych można zaliczyć degradację terenów objętych osuwiskami oraz zniszczenia posadowionej na nich infrastruktury (np. sieci przesyłowe, sieć drogową, budynki mieszkalne, itp.). Z tego względu wskazany jest monitoring, który polega na porównywaniu cech osuwiska, takich jak: obszar granic, morfologia powierzchni czy położenie punktów kontrolnych w różnym czasie, w celu określenia jego aktywności.

Aktualnie w Polsce stosuje się metody monitoringu wymienione w „Instrukcji obserwacji i badań osuwisk drogowych” Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych z 1999 r. oraz „Instrukcji opracowania mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi” z 2008 r. (Grabowski i in., 2008). W obu tych dokumentach metody monitoringu są dzielone na wgłębne i powierzchniowe (Pilecka, 2013). Monitoring wgłębny opiera się na pomiarach dokonywanych w specjalnie oprzyrządowanych i odwierconych otworach wiertniczych. Obejmuje on zwykle pomiary nachylenia sondy w kolumnach inklinometrycznych, w celu określenia rzeczywistych wielkości i prędkości przemieszczeń oraz

wyznaczenia głębokości ich występowania, a także pomiary zwierciadła wody w otworze piezometrycznym (PIG-PIB, 2015). Monitoring powierzchniowy polega na wyznaczeniu deformacji zachodzących na powierzchni terenu. Wśród metod monitoringu powierzchniowego najczęściej są wymieniane następujące techniki pomiarowe (Pilecka, 2013): statyczne pomiary GNSS (Gili i in., 2000) oraz klasyczne pomiary geodezyjne do precyzyjnego określenia przemieszczeń specjalnie zastabilizowanych na osuwisku punktów pomiarowych; naziemny skaning laserowy (Fanti i in., 2012) oraz lotniczy skaning laserowy (Kurczyński, 2006) do tworzenia wysokorozdzielczych cyfrowych modeli terenu; satelitarna interferometria radarowa (Massonnet & Feigl, 1998) do badania zmian morfologicznych, które zaszły na badanym terenie, widocznych na interferogramach.

Wymienione metody znajdują w Polsce częste zastosowanie w badaniu deformacji powierzchni terenu (Kramarska i in., 2011; Perski i in., 2013). Jednocześnie w polskiej literaturze rzadko występują odwołania do wykorzystania fotogrametrii bliskiego zasięgu (Ćmielewski, 2009; Koleczka, 2011), która z powodzeniem jest wykorzystywana na świecie (np. Cahyono i in., 2008; Cardenal i in., 2008; Travelletti i in., 2012). Metody fotogrametryczne pozwalają na pozyskanie informacji 3D o badanym obiekcie ze zdjęć cyfrowych wykonanych ze stanowisk naziemnych. Jest to szybki sposób i nie wymagający dużych nakładów finansowych, w przeciwieństwie do geodezyjnych pomiarów terenowych czy lotniczego skaningu laserowego.

W pracy przedstawiono wykorzystanie zdjęć wykonanych niemetrycznym aparatem cyfrowym do tworzenia trójwymiarowych modeli terenu fragmentu skarpy rzecznej w Płocku. Zbadano również możliwość porównania

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; maria.przylucka@pgi.gov.pl, anna.klimkowska@pgi.gov.pl.

modeli pozyskanych w różnym czasie oraz porównano wyniki z wynikami otrzymanymi z naziemnego skanera laserowego.

### CEL PRACY

Fotogrametria bliskiego zasięgu (FBZ) jest metodą znaną i wykorzystywaną w geologii od końca XIX w. (Jachimski i in., 1999). Obecnie na szeroką skalę została rozpowszechniona metoda skaningu laserowego, w wyniku którego otrzymuje się quasi-ciągłą reprezentację powierzchni skanowanego obiektu, tzw. „chmurę punktów” (Wężyk, 2006). Bardzo duża rozdzielczość pomiaru, sięgająca kilku punktów na centymetr kwadratowy, oraz szybkość metody sprawiły, że stała się ona bardzo popularna również wśród geologów (Kramarska i in., 2011; Perski i in., 2013). Jednocześnie rozwój oprogramowania fotogrametrycznego umożliwił w łatwy i tańszy sposób pozyskać chmurę punktów ze zdjęć wykonanych niemetrycznym aparatem cyfrowym (Bakuła & Ostrowski, 2012). Technika pozyskiwania trójwymiarowych modeli fotografowanych obiektów może stać się konkurencją dla naziemnego skaningu laserowego. Celem pracy jest przedstawienie możliwości pozyskania trójwymiarowego modelu skarpy rzecznej i przedyskutowania zasadności wykorzystania metody FBZ do monitoringu zmian geodynamicznych zachodzących na obiekcie. W pracy przedstawiono analizy porównawcze trzech trójwymiarowych modeli terenu tego samego obszaru, wykonanych na podstawie naziemnych zdjęć cyfrowych, pozyskanych w odstępach półrocznych. Dodatkowo, w celu zbadania wiarygodności metody, ostatni pomiar poszerzono o porównanie uzyskanych wyników z wynikami naziemnego skaningu laserowego, który jest uważany za metodę o największej rozdzielczości (Pilecka, 2013).

### OBSZAR BADAŃ

Płock leży na prawym brzegu Wisły, pomiędzy 630 a 635 km jej biegu. Historyczne obserwacje stateczności skarpy rzecznej w tym rejonie sięgają 1530 r., kiedy to część zamku osunęła się do Wisły. Od tego czasu wiele obiektów budowlanych zostało uszkodzonych na skutek powierzchniowych ruchów masowych (Trębała, 2005). Strefę wpływu skarpy na zabudowę obecnie szacuje się na 80 m od korony skarpy (Wysokiński, 1998).

Ze względu na szczególną wartość kulturową i historyczną obiektów zlokalizowanych na skarpie, w okresie funkcjonowania województwa płockiego, prowadzono badania stateczności skarpy i prace stabilizujące (Kawałczewska i in., 2012). Skarpa poniżej Starego Miasta była objęta monitoringiem geodezyjnym od 1982 r. (Dąbrowski, 1998), kiedy to założono tzw. „wiekową sieć obserwacyjną”. Pomiar w latach 1982–1998 wykazały przemieszczenia sięgające 10 cm. Skarpa była również obiektem pomiarów fotogrametrycznych, wykorzystujących szeroką gamę urządzeń pomiarowych. Począwszy od 1963 r. wykonano 19 serii zdjęć fotogrametrycznych w przeciągu 25 lat (Ostaficzuk & Wysokiński, 1968; Wysokiński, 1998). Ich opracowanie posłużyło do cyklicznego pozyskiwania planów warstwicznych i profili morfologicznych, co pozwoliło na określanie obszarów prawdopodobnego wystąpienia osuwisk. Na skarpie były prowadzone również inne badania

fotogrametryczne i teledetekcyjne. Jednym z ciekawszych badań było wykonanie w 1985 r. zdjęć termowizyjnych w celu lokalizacji stref, które należy objąć drenażem powierzchniowym, a także stref zawilgoconych (Wysokiński, 1998).

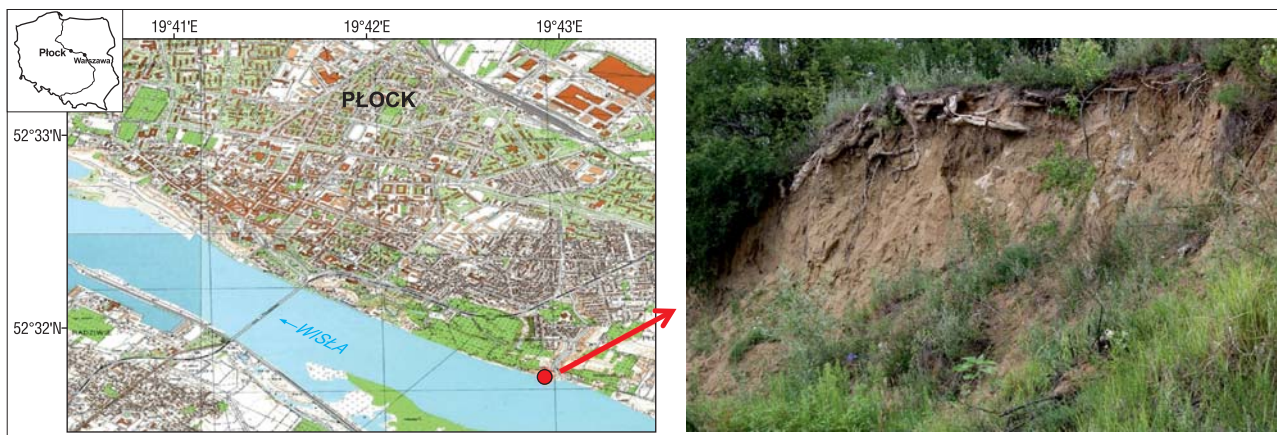
Z uwagi na unikatowy charakter zmian geologicznych skarpy Płockiej oraz konieczność ochrony zabytków i budowl dziedzictwa kulturowego (Katedra, Zamek czy spichlerze z XVII w.) na skarpie, szczególnie pod Starym Miastem, wykonano wiele prac zabezpieczających i stabilizujących (Wysokiński, 1998). Niepowtarzalność warunków geologicznych, hydrogeologicznych oraz lokalnych miejskich sprawiają, że rejon skarpy Płockiej odznacza się oryginalnością i zaprojektowanie skutecznych rozwiązań stabilizujących jest trudne.

Obiekt badań jest usytuowany w Płocku, na prawym brzegu Wisły (52°31'49" N, 19°42'36" E; ryc. 1). Do badań wybrano fragment skarpy o długości 22 m i wysokości 5 m, spełniający optymalne warunki zastosowania metody fotogrametrii bliskiego zasięgu (większa część skarpy jest nieporośnięta roślinnością, obiekt jest dostępny, usytuowanie skarpy względem plaży umożliwia pozyskanie zdjęć naziemnych na całej długości obiektu).

### GEOLOGIA OBSZARU BADAWCZEGO

Obszar badań jest pokryty osadami czwartorzędu. Pierwotnie rozciągało się tu ogromne wyschnięte słodkowodne jezioro, wypełnione iłami plicieńskimi, pstrymi, wybitnie ilastymi, bezwapnistymi z licznymi nieregularnymi plamami koloru żółtego, brązowego i jaskrawoczerwonego (Wysokiński, 1998). W Płocku miąższość iłów pstrych przekracza 30 m. Miąższość pokrywy czwartorzędowej natomiast wynosi od 10 do 120 m, co wynika z deniwelacji powierzchni stropowej powstałych w wyniku zaburzeń glaciotektonicznych (Wysokiński, 1998). Wysokiński wyróżniał cztery zlodowacenia, które miały wpływ na budowę geologiczną okolic Płocka, zaznaczając, że według nowszych danych mogło być ich więcej. Do osadów czwartorzędowych zaliczył cztery poziomy glin zwałowych (zlodowacenia wisły, zlodowaceń środkowopolskich – warty i odry – i zlodowaceń południowopolskich). Poziomy glin zwałowych rozdzielają wodonośne piaski i żwiry.

Skarpa w Płocku powstała głównie w wyniku erozyjnego wpływu Wisły. Strome zbocze doliny jest obszarem podatnym na powstawanie i rozwój osuwisk, a budowa geologiczna sprzyja ruchom mas ziemnych. Głównym czynnikiem kształtującym zmiany morfologii na skarpie jest dynamika rzeki. Dodatkowo strome skarpy doliny rzecznej sprzyjają rozwojowi powierzchniowych ruchów masowych (Ilcewicz-Stefaniuk & Stefaniuk, 2007). Rzeka podcina brzeg skarpy, przez co powoduje osuwanie się mas ziemnych. Powstawanie powierzchniowych ruchów masowych w Płocku jest związane z małą wytrzymałością iłów pstrych, stanowiących najsłabszą powierzchnię w budowie geologicznej zbocza. Iły charakteryzują się zmienną objętością i plastycznością w wyniku zmian wilgotności gruntu. Dlatego granica ily/glina jest powierzchnią poślizgu większości osuwisk na skarpie płockiej (Wysokiński, 1998). Wybudowana w 1969 r. zapora wodna we Włocławku i stworzenie Zbiornika Włocławskiego, sięgającego aż po Płock, dodatkowo znacząco wpłynęła na stateczność skarpy. Ma to związek ze zmianą warunków hydrogeologicz-



**Ryc. 1.** Lokalizacja obszaru badań na tle mapy topograficznej  
**Fig. 1.** Location of the study area on the background of a topographic map

nych i hydrometeorologicznych (opady i roztopy), które powodują wzrost zwilgocenia gruntów na zboczu i zmianę równowagi sił w gruncie (Banach i in., 2013).

### METODYKA BADAŃ

Monitoring zmian geodynamicznych obejmował trzy pomiary terenowe – w listopadzie 2012 r., maju i listopadzie 2013 r. W trakcie każdego pomiaru zostały pozyskane naziemne zdjęcia cyfrowe aparatem Canon EOS 60 D, a podczas ostatniego pomiaru, obok fotogrametrii bliskiego zasięgu, został również wykonany pomiar techniką naziemnego skaningu laserowego skanerem Riegl VZ-400. Pomiary obejmowały rozmieszczenie na fotografowanej

skarpcie 20 tarcz osnowy fotogrametrycznej oraz pomiar współrzędnych ich środków metodą GPS-RTK, z wykorzystaniem odbiornika Leica GX1230GG oraz anteny Leica AX1202GG. Tarcze o wymiarach 23 × 23 cm, z nadrukowanymi niepowtarzalnymi czarno-białymi wzorami z łatwym do zidentyfikowania środkiem (ryc. 2), zostały równomiernie rozmieszczone na fotografowanym obiekcie. W późniejszym etapie opracowania pozwoliło to na rejestrację wygenerowanych trójwymiarowych modeli terenu w globalnym układzie współrzędnych PL-2000. Współrzędne płaskie środków tarcz zostały pomierzone z błędem  $m_y < 2$  cm, współrzędne wysokościowe (elipsoidalne, do elipsoidy GRS80) z błędem  $m_h < 3$  cm.



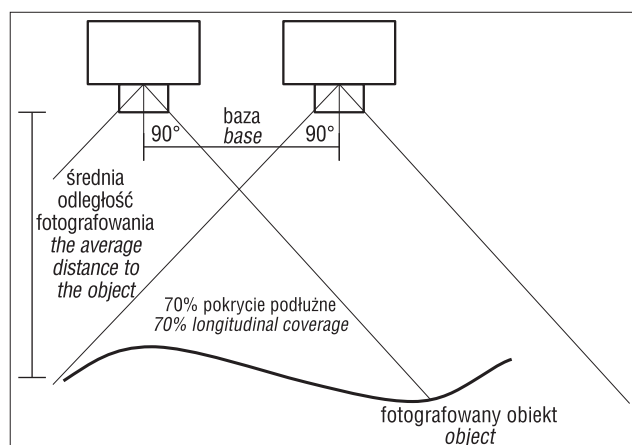
**Ryc. 2.** Osnowa fotogrametryczna na fragmencie skarpy w Płocku. Obie fot. M. Przyłucka  
**Fig. 2.** Photogrammetric network on a part of the slope in Płock. Both photos by M. Przyłucka

Wykonanie zdjęć poprzedzała kalibracja aparatu oparta na 12 zdjęciach pola testowego, na podstawie której wyznaczono elementy orientacji wewnętrznej oraz dystorsję obiektywu. Ponieważ odległość fotografowania pola testowego różniła się od odległości fotografowania skarpy, w trakcie obróbki zdjęć kalibracja została uzupełniona o kalibrację terenową, dokonaną za pomocą zdjęć badanego obiektu. Zarówno kalibracja na podstawie pola testowego, jak i terenowa zostały wykonane w oprogramowaniu Photomodeler Scanner (<http://www.photomodeler.com/index.html>).

Zdjęcia opracowano w programie Photomodeler Scanner, który poprzez funkcję *automatic matching* umożliwia generowanie gęstej, trójwymiarowej chmury punktów fotografowanego obiektu. W celu uzyskania wyżej wymienionego rezultatu, konieczne jest spełnienie następujących warunków geometrycznych (ryc. 3):

- zdjęcia powinny być wykonywane prostopadłe do badanego obiektu i prostopadłe do bazy (odległości pomiędzy jednym i drugim zdjęciem);
- stosunek bazy do odległości fotografowania powinien mieścić się w przedziale 0,2–1,0;
- wzajemne pokrycie podłużne powinno być nie mniejsze niż 70%.

Zdjęcia wykonano z rozdzielczością 13 i 18 Mpx przy odległości fotografowania 2–10 m, wynikiem czego piksel terenowy na zdjęciach był nie większy niż 5 mm. Zdjęcia wykonano szeregami, przy dwóch ustawieniach aparatu, najpierw poziomo, a następnie pionowo. Tabela 1 przedstawia wykorzystaną liczbę zdjęć w opracowaniu dla każdego z pomiarów. W trakcie drugiego pomiaru (w maju 2013 r.) zostało wykonanych ponad dwa razy więcej zdjęć niż w trakcie pierwszego (w listopadzie 2012 r.). Wynika to z faktu, że, mimo blisko siedemdziesięcioprocentowego pokrycia podczas pierwszego pomiaru, wystąpiły trudności w łączeniu zdjęć, na skutek skomplikowanej morfologii



**Ryc. 3.** Schemat warunków geometrycznych pozyskania zdjęć cyfrowych

**Fig. 3.** Scheme of geometrical conditions of acquiring digital images

**Tab. 1.** Liczba wykorzystanych zdjęć dla każdego opracowania  
**Table 1.** Number of images used for each study

Pomiar Measurement	Listopad 1912 November 1912	Maj 1913 May 1913	Listopad 1913 November 1913
Liczba zdjęć Number of images	66	160	185

i pokrycia roślinnością. Ta obserwacja pozwoliła na dokładniejsze zaplanowanie prac przy kolejnych pomiarach, dla których zdecydowano się na zmniejszenie bazy i tym samym wykonanie dużo większej ilości zdjęć.

Trzeci pomiar, w listopadzie 2013 r., rozszerzono o naziemny skanowanie laserowe. Chmury punktów pozyskane z pięciu stanowisk skanera, po połączeniu, obejmują obszar badanego fragmentu skarpy oraz tereny przyległe. W trakcie pomiaru zrezygnowano z wyznaczenia współrzędnych środków tarcz osnowy fotogrametrycznej metodą GPS-RTK (jak miało to miejsce poprzednio), gdyż zostały one odczytane z wynikowego modelu ze skaningu laserowego. Metodą GPS-RTK zostały pomierzone tylko współrzędne stanowiska skanera oraz cztery stanowiska kamery.

Opracowanie cyfrowe zdjęć składało się z pięciu etapów, mających na celu wygenerowanie trójwymiarowych modeli badanego osuwiska, a następnie przeprowadzenie analizy różnicowej i wykrycia zmian morfologicznych powierzchni terenu. Były to:

1. Automatyczna orientacja wewnętrzna i wzajemna zdjęć z danego pomiaru;
2. Generowanie gęstej chmury punktów;
3. Rejestracja chmury w globalnym układzie współrzędnych na podstawie osnowy fotogrametrycznej;
4. Filtracja roślinności;
5. Generowanie modelu w formie siatki TIN.

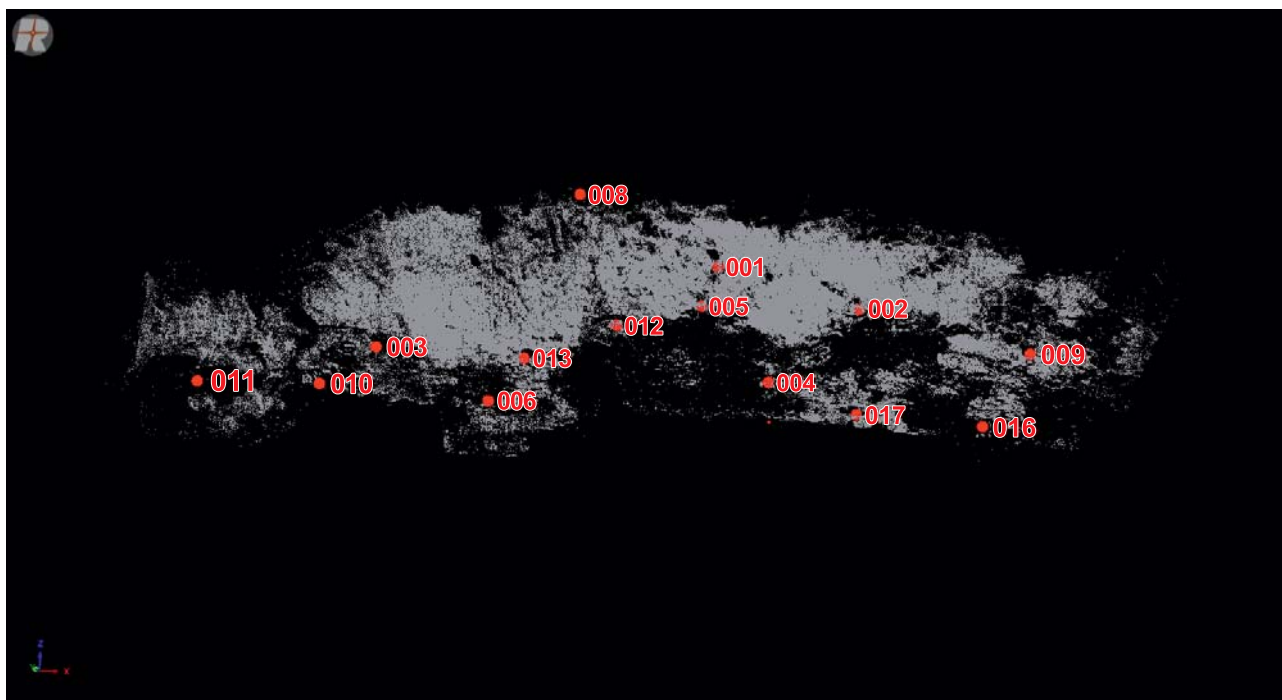
Założenie projektu fotogrametrycznego, gdzie dla każdego zdjęcia zostały znalezione elementy orientacji wewnętrznej i wzajemnej (Cahyono i in., 2008) odbyło się w programie Photomodeler Scanner (etap 1). Następnie w tym samym programie znaleziono wspólne punkty tworzące gęstą trójwymiarową chmurę w układzie współrzędnych PL-2000 (etap 2 i 3). Etap 4 i 5 przeprowadzono w programie RiSCAN Pro (<http://www.riegl.com/index.php?id=221>), gdzie z chmur punktów wykonano siatki trójkątów TIN. Dodatkowo program umożliwił przeprowadzenie analizy różnicowej.

Automatyczna orientacja wzajemna wszystkich zdjęć została zrealizowana poprzez funkcję SmartPoints – *automatic matching*. W wyniku tej operacji zidentyfikowano średnio 440 punktów wspólnych dla każdego zdjęcia. Niektóre ze zdjęć, w szczególności przedstawiające tylko roślinność, oraz większa część zdjęć zorientowanych pionowo nie zostały powiązane z innymi. Próba manualnej identyfikacji wspólnych szczegółów na tych zdjęciach zakończyła się niepowodzeniem, na skutek bardzo złożonej morfologii terenu o niejednoznacznych punktach charakterystycznych, dlatego do wynikowego opracowania zostały wykorzystane w większości tylko zdjęcia o orientacji poziomej. Następnie wygenerowano gęstą chmurę punktów, używając narzędzia Dense Surface Modeling. Liczbę uzyskanych punktów dla każdego z pomiarów przedstawia tabela 2.

**Tab. 2.** Liczba punktów wygenerowanej chmury ze zdjęć dla każdego opracowania

**Table 2.** Number of points for generated cloud from images for each study

Pomiar Measurement	Listopad 1912 November 1912	Maj 1913 May 1913	Listopad 1913 November 1913
Liczba punktów Number of points	1 016 217	139 100	142 760



**Ryc. 4.** Chmura punktów reprezentująca fragment skarpy w Płocku otrzymana dla pierwszego pomiaru wraz z punktami osnowy fotogrametrycznej

**Fig. 4.** The cloud of points representing the fragment of the slope in Płock obtained from the first measurement, together with the photogrammetric network

Więcej punktów zostało wygenerowanych dla pierwszego pomiaru (listopad 2012 r.), mimo że bazował on na ponad dwukrotnie mniejszej liczbie zdjęć (tab. 1, 2). Oznacza to, że zwiększenie liczby zdjęć w maju nie wyeliminowało błędów spowodowanych pokryciem roślinnością.

Etap 3 zrealizowano przez manualny pomiar środków tarcz osnowy fotogrametrycznej. Każdej tarczy przypisano punkt o trzech współrzędnych w układzie lokalnym projektu. Następnie, przez wzajemne powiązanie współrzędnych z układu lokalnego z odpowiadającymi im współrzędnymi w układzie globalnym, przeprowadzono transformację wyników chmur punktów do układu PL-2000. Porównanie współrzędnych nominalnych środków tarcz (pomierzonych GPS-RTK) oraz tych po transformacji całej chmury danych umożliwiło obliczenie błędu średniego rejestracji chmury punktów w układzie globalnym. Dla wszystkich pomiarów nie przekraczał on 8 cm, przy czym najmniej dokładny otrzymano dla pierwszego pomiaru w Płocku – 7,5 cm.

Program Photomodeler Scanner nie umożliwia automatycznej filtracji roślinności, a wynikowa siatka trójkątów zawiera błędy i jest niepełna. Z tego względu zdecydowano się na przeprowadzenie dalszych etapów w programie RiSCAN Pro. Program ten jest przeznaczony do pracy z chmurami punktów pochodzących ze skaningu laserowego. Po zaimportowaniu każdej z otrzymanych chmur wykonano filtrację roślinności, wykorzystując filtry zaimplementowane w programie oraz korekcję manualną. Na rycinie 4 przedstawiono odfiltrowaną z roślinności chmurę punktów z pierwszego pomiaru.

Następnie wykonano triangulację chmur, tworząc powierzchnię trójkątów, reprezentującą fotografowany obiekt. Powierzchnie zostały wygenerowane z rozdzielczością 0,05 m oraz wygładzone przy użyciu filtra wygładzającego Laplacian Smoothing (Ji i in., 2005).

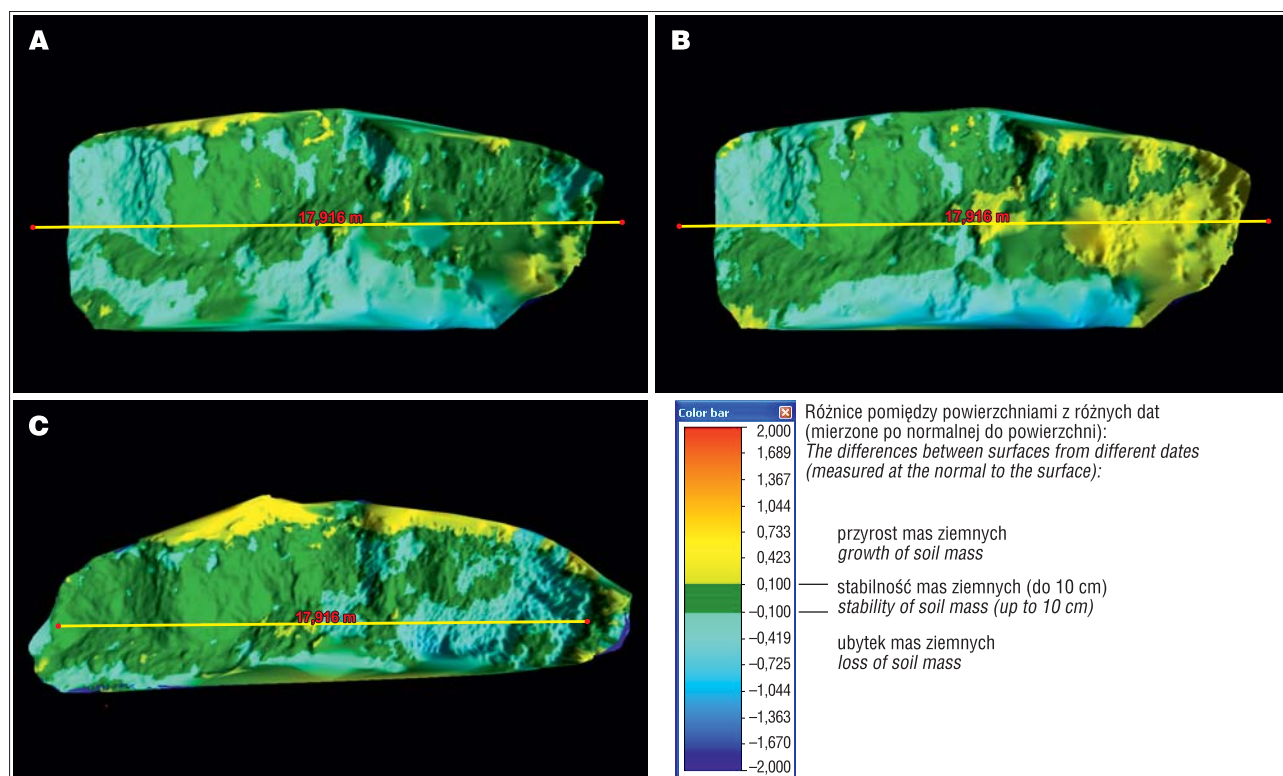
Program RiSCAN Pro umożliwia porównanie opracowywanych powierzchni (narzędzie Surface Comparison). Wynikiem analizy jest przedstawienie za pomocą skali barwnej przyrostu lub ubytku mas ziemnych na powierzchni drugiej względem powierzchni pierwszej (ryc. 5).

Dla trzeciego pomiaru (listopad 2013 r.) opracowano również chmurę punktów pochodzącą z pomiaru skanem laserowym. Praca z danymi odbywała się w całości w programie RiSCAN Pro, gdzie chmury punktów z pięciu stanowisk skanera zostały zorientowane wzajemnie i zarejestrowane w układzie PL-2000, na podstawie pomiarów współrzędnych stanowisk skanera. Następnie ograniczono zestaw danych do fragmentu badanej skarpy i dokonano półautomatycznej filtracji roślinności. Filtracja odbywała się przez iteracyjny proces wycinania punktów, które nie spełniały kryteriów geometrycznych, narzuconych przez parametry filtra. Fragment chmury sprzed i po filtracji przedstawia rycina 6.

W dalszych pracach, podobnie jak miało to miejsce z chmurami punktów pochodzących ze zdjęć, wygenerowano numeryczny model terenu z oczkiem 0,05 m i poddano go wygładzeniu przy użyciu filtra Laplacian Smoothing. Wynikowa powierzchnia została porównana z powierzchniami pochodzącymi ze zdjęć naziemnych (ryc. 7).

## WYNIKI

Otrzymane wyniki ściśle zależą od precyzji wykonanych modeli, rozumianej jako składowa precyzji wyznaczonych chmur punktów oraz ich gęstości, dokładności transformacji chmur punktów do globalnego układu współrzędnych oraz precyzji wynikowej powierzchni reprezentującej badany obiekt (wiarygodności odzwierciedlenia morfologii skarpy przez model). Chmury punktów zostały wygenerowane w automatycznym procesie dla poszczególnych par zdjęć,



**Ryc. 5.** Modele różnicowe wykonane w programie RiSCAN Pro dla badanego fragmentu skarpy w Płocku otrzymane na podstawie porównania powierzchni z chmury punktów ze zdjęć. Różnice pomiędzy powierzchniami z różnych dat zostały przedstawione w skali barwnej: kolor niebieski oznacza ubytek mas ziemnych, zielony stabilność (do 10 cm), żółty przyrost – mierzone po normalnej do powierzchni. **A** – model różnicowy pomiędzy listopadem 2012 r. a listopadem 2013 r., **B** – model różnicowy pomiędzy majem 2013 r. a listopadem 2013 r., **C** – model różnicowy pomiędzy listopadem 2012 r. a majem 2013 r.

**Fig. 5.** Differential models developed using the RiSCAN Pro for a given part of the slope in Płock obtained by comparing the surfaces of point clouds from images. The differences between surfaces from different dates are shown in a color scale: blue colour indicates loss of soil mass, green – stability (up to 10 cm), yellow – growth, measured at the normal to the surface. **A** – differential model between November 2012 and November 2013, **B** – differential model between May 2013 and November 2013, **C** – differential model between November 2012 and May 2013

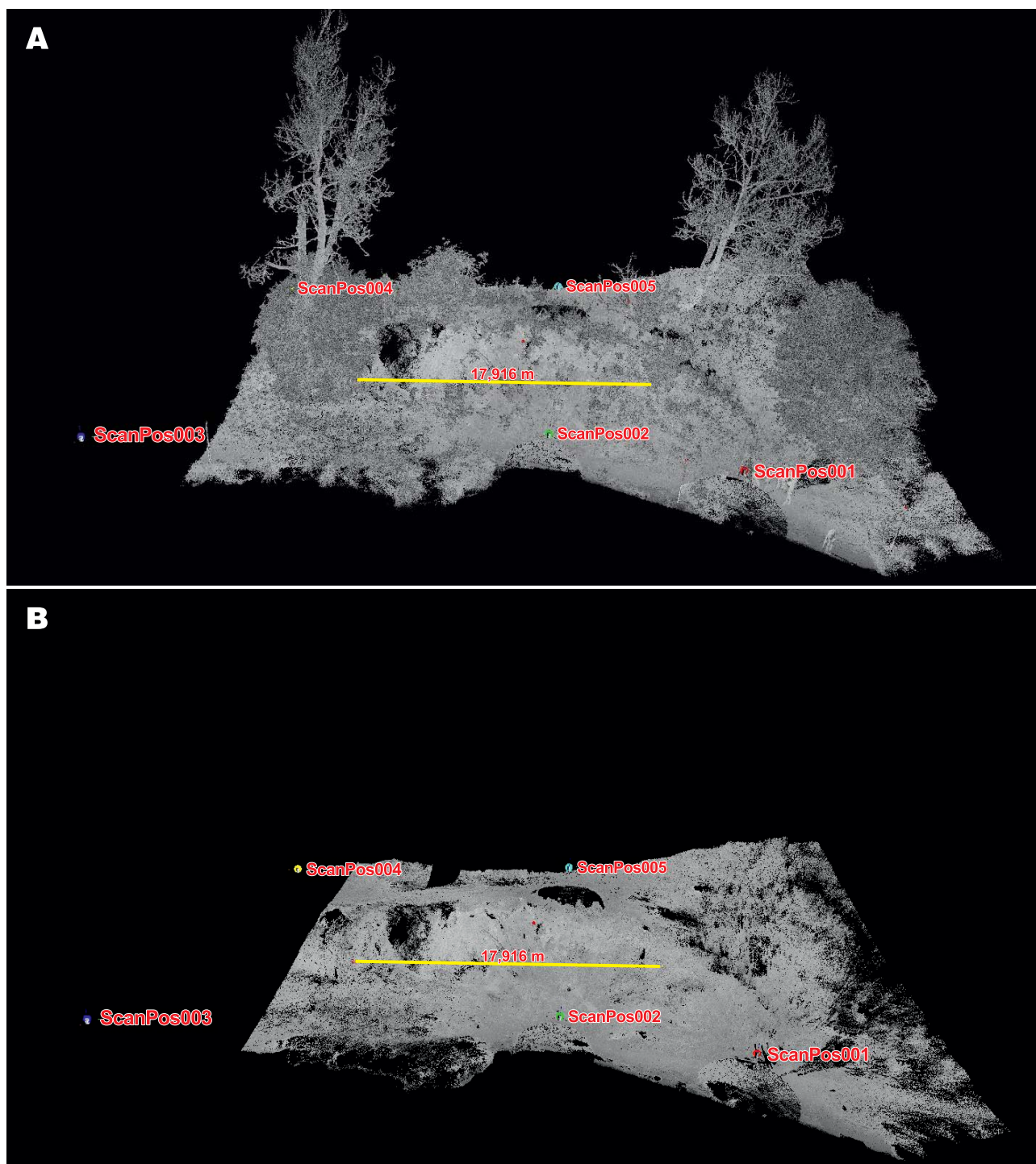
spełniających warunki geometryczne opisane w rozdziale Metodyka badań. Średni błąd RMS dla punktów SmartPoints w najgorszym przypadku wynosił 20 pikseli, co miało miejsce dla pierwszego pomiaru. W pomiarze tym piksel terenowy wynosił 0,05–0,20 cm. Oznacza to, że najmniejsza uzyskana precyzja była nie gorsza niż 4 cm, a w pozostałych przypadkach większa. Średni błąd RMS dla otrzymanych punktów był mniejszy dla drugiego i trzeciego pomiaru (1 piksel), prawdopodobnie z uwagi na większą liczbę zdjęć i dokładniejsze rozwiązanie projektu fotogrametrycznego.

Transformację do globalnego układu współrzędnych dokonano z dokładnością 7 cm dla pierwszego pomiaru, 2 cm dla drugiego i 1 cm dla trzeciego pomiaru. Mimo że tarcze osnowy fotogrametrycznej zostały pomierzone z tą samą dokładnością zarówno w listopadzie, jak i w maju, dokładność transformacji była ponad dwa razy większa dla chmur punktów z drugiego pomiaru niż z pierwszego. Wynika to z precyzji określenia trzech współrzędnych środków tarcz we współrzędnych projektu, która była znacząco większa dla projektów o większej ilości zdjęć.

Wynikowe powierzchnie trójkątów, stworzone na podstawie chmur punktów, zostały wygładzone, w celu wyeliminowania drobnych błędów filtracji roślinności. Wynikowe oczko siatki trójkątów dobrano tak, żeby model był jak najbardziej wierną reprezentacją powierzchni, ale jednocześnie nie fałszował jej obrazu przez dodawanie niepomierzonych punktów. Skarpa w Płocku we wszystkich pomiarach została

odtworzona na podstawie dość gęstej chmury punktów, gdzie odległości pomiędzy punktami nie przekraczały 5 cm (poza miejscami, w których po filtracji roślinności punktów nie było wcale). Wynikowa rozdzielczość modeli powierzchni tej skarpy wynosiła 0,05 m.

Wyniki (ryc. 5) należy interpretować chronologicznie. Różnica pomiędzy pomiarem pierwszym (listopad 2012 r.) a drugim (maj 2013 r.) ukazuje ubytek mas ziemnych (kolor niebieski) ok. 20 cm (w kierunku normalnym do powierzchni) w prawej części skarpy oraz brak zmiany (kolor zielony) w granicach  $\pm 10$  cm na pozostałym obszarze. Przyrost przedstawiony jako kolor żółty na górze skarpy nie jest brany pod uwagę, gdyż wynika on z braku punktów w tej części obiektu na pierwszym modelu. Następnym modelem różnicowym pomiędzy pomiarem drugim (maj 2013 r.) a trzecim (listopad 2013 r.) pokazuje przyrost mas ziemnych w tym samym miejscu, gdzie wcześniej zarejestrowano ubytek. Sumaryczny model różnicowy pomiędzy pomiarem pierwszym i trzecim, obrazujący różnicę jaka zaistniała w okresie jednego roku (od listopada 2012 r. do listopada 2013 r.), pokazuje stabilność oraz niewielki ubytek w lewej części. Interpretacja tak zaobserwowanych zmian geodynamicznych może być dwojaka. Modele w miejscach pokrytych roślinnością zawierają błędy, gdyż były generowane na podstawie małej ilości punktów. Z drugiej strony zaobserwowane zmiany morfologiczne powyżej decymetra odpowiadają oszacowanej precyzji modelu i są większe od dokładności



**Ryc. 6.** Chmura punktów otrzymana ze skaningu laserowego dla fragmentu skarpy w Płocku. **A** – wynikowa chmura przed filtracją roślinności, **B** – chmura po filtracji roślinności. Opracowanie wykonywane w programie RiSCAN Pro firmy Riegl

**Fig. 6.** Cloud of points obtained from laser scans for the part of the slope in Plock. **A** – the resulting cloud before filtration of vegetation, **B** – the cloud after filtration. Developed using the RiSCAN Pro Riegl

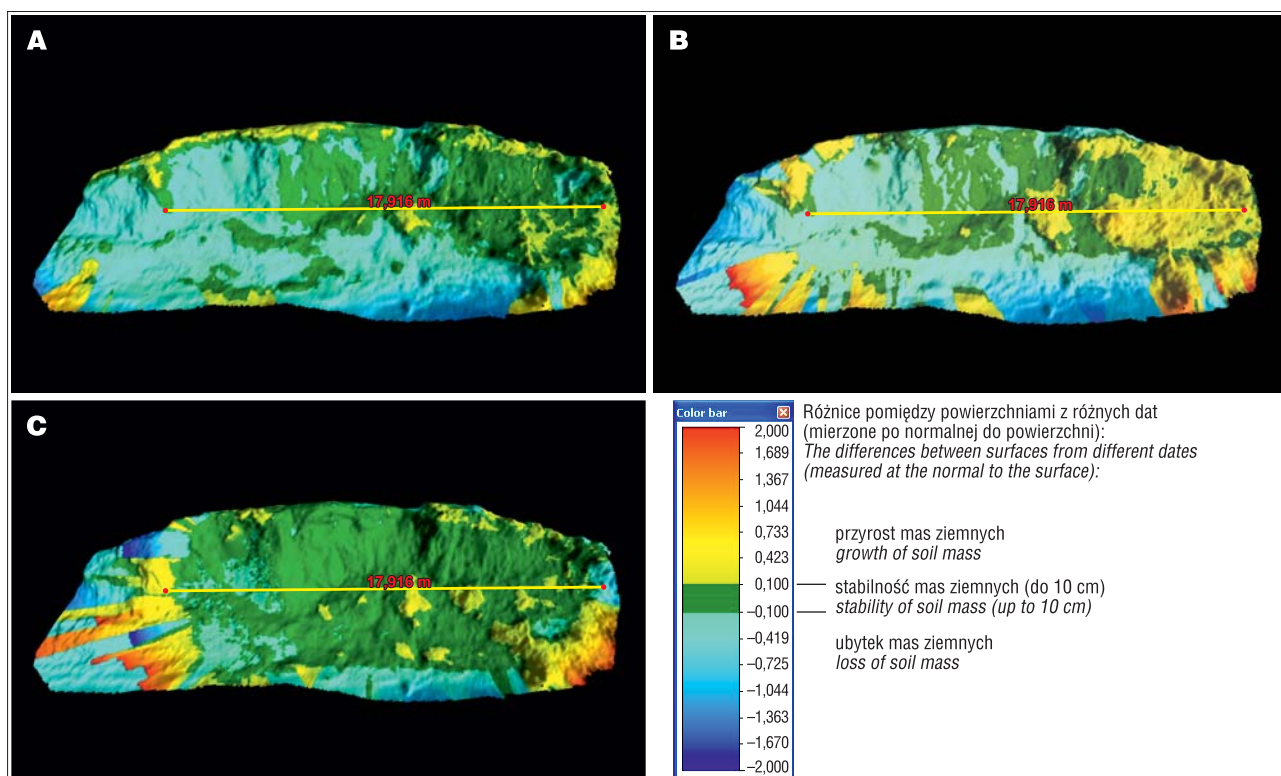
wpasowania modeli w układ globalny, a więc mogą obrazować rzeczywiste zmiany.

Model uzyskany metodą skaningu laserowego różni się od modelu ze zdjęć w bardzo niewielkim stopniu (ryc. 7). Jego porównanie z modelami z pierwszego i drugiego pomiaru ukazuje ten sam charakter zmian. Model jest dokładniejszy w miejscach, gdzie początkowo znajdowała się roślinność, gdyż po filtracji zawiera on punkty odpowiadające powierzchni terenu. Jest to jedyna znacząca przewaga w stosunku do modelu pozyskanego ze zdjęć.

## DYSKUSJA

Omówione wyniki pokazują, że zastosowana metoda fotogrametrii bliskiego zasięgu pozwala wygenerować gęstą chmurę punktów, a w efekcie wysokorozdzielczy model fotografowanego obiektu.

Za wady wykorzystanej metody można uznać przede wszystkim ograniczenie jej przydatności tylko do terenów odkrytych, dobrze dostępnych oraz niepokrytych roślinnością. Dla uzyskania gęstej chmury punktów wskazane jest



**Ryc. 7.** Modele różnicowe wykonane w programie RiSCAN Pro dla badanego fragmentu skarpy w Płocku otrzymane na podstawie porównania powierzchni z chmury punktów ze skaningu laserowego i ze zdjęć. Różnice pomiędzy powierzchniami z różnych dat lub źródeł zostały przedstawione w skali barwnej: kolor niebieski oznacza ubytek mas ziemnych, zielony stabilność (do 10 cm), żółty przyrost – mierzone po normalnej do powierzchni. **A** – model różnicowy pomiędzy listopadem 2012 r. (ze zdjęć) i listopadem 2013 r. (ze skaningu), **B** – model różnicowy pomiędzy majem 2013 r. (ze zdjęć) a listopadem 2013 r. (ze skaningu), **C** – model różnicowy pomiędzy listopadem 2013 r. (ze zdjęć) a listopadem 2013 r. (ze skaningu)

**Fig. 7.** Differential models developed using the RiSCAN Pro for the given part of the slope in Płock obtained by comparing the area of the point clouds from laser scans and images. Differences between surfaces of different dates or sources are shown in color scale: blue colour means the loss of soil mass, green – stability (up to 10 cm), yellow – growth, measured by the normal to the surface. **A** – differential model between November 2012 (CRP) and November 2013 (TLS), **B** – differential model between May 2013 (CRP) and November 2013 (TLS), **C** – differential model between November 2013 (CRP) and November 2013 (TLS)

zastosowanie małej odległości fotografowania oraz zachowanie stosunku bazy fotografowania do odległości – 0,2–1,0.

Porównanie otrzymanych chmur punktów z chmurą z naziemnego skaningu laserowego wypada na korzyść skaningu laserowego. Chmura punktów ze zdjęć naziemnych jest tak samo gęsta w miejscach, które nie były pokryte roślinnością (jeden punkt na 2 cm), jednakże zawiera dużo mniej punktów w miejscach podlegających filtracji. Ponadto chmura ze skaningu jest bardziej regularna, co wynika z technologii pomiarowej (wiązka lasera jest przesuwana o stały interwał w płaszczyźnie pionowej i poziomej, podczas gdy chmura punktów ze zdjęć powstaje przez automatyczne dopasowanie odpowiadających sobie pikseli na parze zdjęć). Należy zaznaczyć, że naziemny skaningu laserowy jest uważany za metodę umożliwiającą pomiar chmury z kilkumilimetrową rozdzielczością, w zależności od wyboru trybu pomiaru. Taka rozdzielczość chmury przy dużym obiekcie osuwiskowym będzie niemożliwa do uzyskania ze zdjęć. Ponadto możliwość filtracji chmury punktów ze skaningu, bez tracenia wszystkich punktów odzwierciedlających powierzchnię terenu stanowi znaczącą przewagę nad fotogrametrią bliskiego zasięgu, gdzie punkty terenu przykryte roślinnością nie zostają w ogóle zarejestrowane na zdjęciu.

Mimo tych znaczących różnic, zastosowanie metody fotogrametrii bliskiego zasięgu pozwoliło na ocenę jej przydatności do tworzenia trójwymiarowych modeli skarpy

rzecznej. W przypadku skarpy w Płocku model uzyskany na podstawie zdjęć dla obszarów odkrytych można uznać za porównywalny z modelem ze skaningu laserowego. Obie metody charakteryzują się podobnymi ograniczeniami, jakimi są konieczność stosowania filtrów roślinności i zależność dokładności od rejestracji bądź stanowisk skanera, stanowisk kamery lub osnowy fotogrametrycznej w układzie globalnym. W obu przypadkach dodatkowy pomiar i wyrównanie osnowy geodezyjnej zwiększyłyby dokładność pomiaru, ale znacznie wydłużył czas pracy. Ponadto wśród zalet fotogrametrii bliskiego zasięgu, w kontekście modelowania i monitoringu osuwisk, należy wymienić przede wszystkim szybkość wykonania pomiarów, mały stopień skomplikowania oraz przeniesienie większości prac do warunków laboratoryjnych. Zalety te wiążą się z małymi nakładami finansowymi, jakie są konieczne do jej wykonania. Ponadto proces rozwiązania projektu fotogrametrycznego, jak i generacja gęstej chmury punktów odbywają się automatycznie z małym udziałem operatora, który może mieć wpływ na dobór najbardziej optymalnych parametrów.

## PODSUMOWANIE

W badaniach zaprezentowano przykład tworzenia trójwymiarowych modeli powierzchni terenu na podstawie zdjęć bliskiego zasięgu. Modele porównano, w celu spraw-



dzenia zasadności ich wykorzystania do badania zmian morfologicznych zachodzących na osuwiskach i obszarach podatnych na ruchy masowe. Porównanie modeli w programie RiSCAN Pro umożliwia analizę różnicową jedynie na podstawie skali barwnej, co utrudnia precyzyjne określenie wielkości deformacji. W przedstawionych badaniach uzyskano trójwymiarowe modele fragmentu skarpy o rozdzielczości 5 cm, porównywalnej z modelem pozyskanym na podstawie skaningu laserowego. W wyniku analizy różnicowej modeli, pozyskanych dla różnych okresów, oszacowano precyzję otrzymanych wartości deformacji jako 10 cm (model był wykonany z rozdzielczością 5 cm, a dokładność rejestracji modelu w układzie globalnym wynosiła 8 cm). Wyniki badań skłaniają do wniosku, że na terenach trudnych morfologicznie metoda pomaga uzyskać informację o kierunku i wielkości dokonanych deformacji wtedy, kiedy przyczyniają się do dużych (przynajmniej kilku decymetrowych) zmian morfologicznych. W przypadku małych i powolnych przemieszczeń, precyzja wykonania modelu jest niewystarczająca, żeby te zmiany wychwytać.

Wiarygodność wyników wzrasta przy zwiększeniu pokrycia wzajemnego zdjęć do 90%, jak to miało miejsce przy drugim i trzecim pomiarze, gdzie średni błąd RMS dla automatycznie generowanych punktów wspólnych Smart-Points wynosił 1 piksel. Ponadto opracowane wyniki pochodzą z danych pozyskanych w trzech terminach w przeciągu roku. W celu uzyskania większej wiarygodności przedstawionych danych wskazany byłby pomiar monitorowanych skarp przez dłuższy okres, kiedy to prawdopodobieństwo wystąpienia znacznych zmian byłoby większe.

Metoda ta z sukcesem może być wykorzystana jako pomocniczy monitoring zmian morfologicznych zachodzących na obiektach odsłoniętych i dostępnych, takich jak: skarpy rzeczne, klify, obrywy skalne. Pozwala w szybki i tani sposób pozyskać trójwymiarowy model terenu, który może być pomocny w określeniu miejsca deformacji oraz oszacowania wielkości przemieszczonych mas ziemnych.

Dalsze badania powinny obejmować określenie możliwości otrzymania porównywalnej lub większej dokładności rejestracji modelu w układzie globalnym bez konieczności pomiaru osnowy fotogrametrycznej, ale na podstawie pomiaru tylko wybranych stanowisk kamery. Prace te znacznie ułatwiłyby możliwość generowania modelu dla obiektów trudno dostępnych, gdzie nie ma możliwości fizycznego rozstawienia tarcz osnowy fotogrametrycznej na badanym obiekcie. W celu zwiększenia wiarygodności FBZ przy wykrywaniu zamian geodynamicznych wskazane jest kontynuowanie okresowych pomiarów na tym samym obiekcie.

Autorzy pragną podziękować recenzentom oraz Redaktorowi Naczelnemu Przeglądu Geologicznego za bardzo cenne uwagi i komentarze. Projekt był realizowany w ramach działalności statutowej Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (nr. 00-8520-1203-00-0). Autorzy pragną podziękować pracownikom Katedry Geodezji i Astronomii Geodezyjnej Wydziału Geodezji i Kartografii, Politechniki Warszawskiej za włączenie się w badania i cenne uwagi merytoryczne, jak również pracownikom Oddziału Geologii Morza PIG-PIB za przeprowadzenie pomiarów naziemnym skanerem laserowym.

## LITERATURA

- BAKUŁA K. & OSTROWSKI W. 2012 – Zastosowanie cyfrowej kamery niemetrycznej w fotogrametrii lotniczej na wybranych przykładach. Arch. Fotogram., Kartogr. Teledetekcji, 24.
- BANACH M., KACZMAREK H. & TYSZKOWSKI S. 2013 – Rozwój osuwisk w strefie brzegowej sztucznych zbiorników wodnych na przykładzie osuwiska centralnego w Dobrzyniu nad Wisłą, zbiornik wrocławski. Prz. Geogr., 85 (3): 397–415.
- CAHYONO B.K., MATORI A.N. ATUNGGAL D. & BASITH A. 2008 – Generating 3D Model of Instable Open Slope Area from 2D Photographs using Commercial Pocket Camera. In Proc. Int. Conf. Construct. Build. Technol.(ICCBT): 335–348.
- CARDENAL J., MATA E., PEREZ-GARCIA J.L., DELGADO J., HERNANDEZ M.A., GONZALEZ A. & DIAZ-DE-TERAN J.R. 2008 – Close Range Digital Photogrammetry Techniques Applied to Landslides Monitoring, XXI<sup>st</sup> ISPRS Congress, Technical Commission VIII, Volume XXXVII Part B8, Beijing, China: 235–240.
- ĆMIELEWSKI B. 2009 – Koncepcja monitoringu stanu bezpieczeństwa osuwiska w Janowcu metodami geodezyjnymi i teledetekcyjnymi. Materiały konferencyjne 10<sup>th</sup> Workshop of Recent Geodynamics of the Sudeten and Adjacent Areas. Szklarska Poręba.
- DĄBROWSKI T. 1998 – Monitorowanie przemieszczeń skarpy Płockiej. Założenia systemu i dotychczasowe wyniki obserwacji. Konferencja „Przemieszczenia Skarpy Płockiej”, Płock 22 maja 1998, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa: 5–30.
- FANTI R., GIGLI G., LOMBARDI L., TAPETE D. & CANUTI P. 2012 – Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano (Italy). Landslides, 5: 1–12.
- GILI J.A., COROMINAS J., RIUS J. 2000 – Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. Eng. Geol., 55: 167–192.
- GRABOWSKI D., MARCINIĘC P., MROZEK T., NESCIERUK P., RĄCZKOWSKI W., WÓJCIK A. & ZIMNAL Z. 2008 – Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych (MOTZ) ruchami masowymi w skali 1 : 10000. Pństw. Inst. Geol., Warszawa: 1–92. <http://www.photomodeler.com/index.html>. <http://www.riegl.com/index.php?id=221>.
- ILCEWICZ-STEFANIUK D. & STEFANIUK M. 2007 – Procesy osuwiskowe w dolinie Wisły. Geologos, 11: 393–399.
- INSTRUKCJA obserwacji i badań osuwisk drogowych. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Opr. „GEODROM”, Kraków 1999.
- JACHIMSKI J., MIERZWA W., MULARZ S. & PYKA K. 1999 – Cyfrowa fotogrametria i teledetekcja w Polsce. Geoinformatica Pol., 1: 11–36.
- JI Z., LIU L. & WAMG G. 2005 – A Global Laplacian Smoothing Approach with Feature Preservation, Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD/CAG 2005).
- KAWALCZEWSKA J., BUKOWSKI A., GELEC E., HARBASZ T., HASA A., LENART W., LIZINIEWICZ J., MACIEJEWSKI S., MARCZAK I., NOWAKOWSKI J., RÓŻAŁSKA E., RUTKOWSKA G., WĘGRZYN A., ZONENBERG J. & ŻELAZIŃSKA M. 2012 – Ku zrównoważonej przyszłości Mazowsza Płockiego. Regionalne Centrum Edukacji Ekologicznej w Płocku, Płock: 281–282.
- KOLECKA N. 2011 – Photo-based 3D scanning vs. laser scanning-Competitive data acquisition methods for digital terrain modelling of steep mountain slopes. Intern. Arch. Photogram., Remote Sensing and Spatial Inform. Sci., 38 (4/W19): 203–208.
- KRAMARSKA R., FRYDEL J. & JĘGLIŃSKI W. 2011 – Zastosowanie metody naziemnego skaningu laserowego do oceny geodynamiki wybrzeża na przykładzie klifu Jastrzębiej Góry. Biul. Państw. Inst. Geol., 446: 101–108.
- KURCZYŃSKI Z. 2006 – Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi. Ofic. Wydaw. Politechniki Warszawskiej, Warszawa: 429–444.
- MASSONNET D. & FEIGL K.L. 1998 – Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Rev. Geophys., 36: 441–500.
- OSTAFICZUK S. & WYSOKIŃSKI L. 1968 – Stacjonarne badania dynamiki zbroczy metodami fotogrametrycznymi. Prz. Geol., 16 (2): 91–93.
- PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WÓJCIK A. & NESCIERUK P. 2013 – Techniki naziemne, lotnicze i satelitarne w rozpoznawaniu osuwisk. Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele. Wyd. INŻYNIERIA Spółka z o.o., t. 4: 30–35.
- PIG-PIB, 2015 – <http://www.pgi.gov.pl/pl/oddzial-karpacki-monitor-ok/metody-monitorowania-osuwisk-ok-pig/metody-wglebne-monitor-ok>.
- PILECKA E. 2013 – Teledetekcja jako metoda analizy ruchów masowych. Zesz. Nauk. Inst. Gosp. Sur. Miner. i Energią PAN, 84: 103–115.
- TRAVELLETTI J., DELACOURT C., ALLEMAN P., MALET J.-P., SCHMITTBUHL J., TOUSSAINT R. & BASTARD M. 2012 – Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 70: 39–55.
- TRĘBAŁA B. 2005 – 30 lat „Wiekowej sieci obserwacyjnej” na skarpie płockiej. Notatki Płockie: Kwart. Tow. Nauk. Płockiego, 50 (2-203): 35–42.
- WĘŻYK P. 2006 – Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie. Roczniki Geomatyki – Ann. Geomatics, 4 (4): 119–132.
- WYSOKIŃSKI L. 1998 – Zabezpieczenie Skarpy Płockiej i jej uwarunkowania. Konferencja „Przemieszczenia Skarpy Płockiej”, Płock 22 maja 1998, Inst. Tech. Budowlanej, Warszawa: 95–151.

Praca wpłynęła do redakcji 16.06.2014 r.  
Aceptowano do druku 29.02.2016 r.