

# Lotniczy skaniny laserowy (LiDAR-ALS) jako źródło danych do obliczeń stateczności skarp na terenach zadrzewionych i zakrzewionych

Arkadiusz Piechota<sup>1</sup>



**Airborne laser scanning (LiDAR-ALS) as a source of data for calculations of escarpment stability in wooded and bushy areas.** *Prz. Geol.* 65: 811–816.

*Abstract.* The paper discusses the problem of quick acquire height data for calculation of escarpment stability. In past the slope of profile was obtained from classical land survey methods (like Total Station, GNSS, etc.), cartometric measurement on maps or measurements based on a Digital Terrain Model from aerial photography. Now we have a new method that is Airborne Laser Scanning (LiDAR-ALS). In 2011–2014 almost all country was measured in this method. The declared accuracy of height measurement on the durable surfaces is about 0.10–0.15 m. Author compared this method with classical method Global Navigation Satellite System – Real Time Network (GNSS-RTN) on two wooded and bushy areas. The comparison was based on the measurement characteristic points on the profiles and acquisition of height data from LiDAR-ALS data. Data in this method were obtained in two ways: from point cloud and from DTM created from this point cloud. In the next step, height differences were calculated and these data were subjected to basic statistical calculations. The result of the study was a mean error of height data from LiDAR-ALS and conclusions about its usefulness in acquire height data for calculation of escarpment stability.

**Keywords:** Airborne Laser Scanning (ALS), Light Detection And Ranging (LiDAR), Global Navigation Satellite System (GNSS), Digital Terrain Model (DTM), slope measurement, quality control

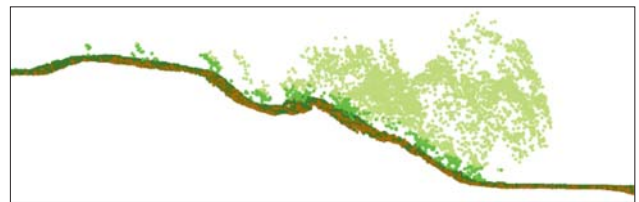
Do obliczeń stateczności skarp oprócz danych geologicznych dotyczących m.in. litologii i genezy oraz parametrów geotechnicznych są wykorzystywane dane o morfologii terenu. Wysokość terenu można pozyskać za pomocą:

- bezpośrednich pomiarów geodezyjnych rzędnych wysokościowych w zadanych ciągach profilowych za pomocą klasycznych lub satelitarnych metod pomiarowych;
- kartometrycznych pomiarów na mapach topograficznych lub zasadniczych;
- pomiarów na podstawie numerycznego modelu terenu (NMT).

Dokładność numerycznego modelu terenu zależy m.in. od metody pozyskania danych do modelu oraz sposobu ich interpolacji. Jednym ze sposobów pozyskania danych o powierzchni terenu jest skaniny laserowy LiDAR (*Light Detection And Ranging*) wykonany metodą lotniczego skaniny laserowego (ALS).

W latach 2011–2014 w ramach państwowego projektu „Informatyczny System Ochrony Kraju” (ISOK) metodą lotniczego skaniny laserowego przeprowadzono pomiary na obszarze prawie całego kraju. Wynikiem prac były chmury punktów wykonane w jednostkowych poligonach zwanych blokami o gęstości skanowania 4–12 pkt./m<sup>2</sup>, w zależności od gęstości zaludnienia terenu (Kurczyński, Bakula, 2013). Dopuszczalny błąd wysokościowy dla punktów usytuowanych na płaskich utwardzonych powierzchniach kształtuje się w granicach 0,10–0,15 m, w zależności od gęstości skanowania.

Dane ALS LiDAR dzięki niewielkiej odległości pomiędzy punktami (0,30–0,50 m) są bardzo dobrym materiałem do tworzenia NMT. Takie zagęszczenie punktów minimalizuje błędy interpolacyjne modelu. Chociaż dokładność wyznaczenia wysokości terenu na obszarach zadrzewionych i zakrzewionych jest niższa od dokładności wysokości terenu zawartych na mapie zasadniczej, to dane



**Ryc. 1.** Przykład profilu wygenerowanego z chmury punktów (LiDAR-ALS). Kolor reprezentuje obiekt, od którego dokonano się odbicie sygnału (brąz – grunt, odcienie zieleni – roślinność niska, średnia i wysoka)

**Fig. 1.** Example of a profile generated from a point cloud LiDAR-ALS. Color represents the object from which the signal was reflected (brown – ground, shades of green – low, medium and high vegetation)

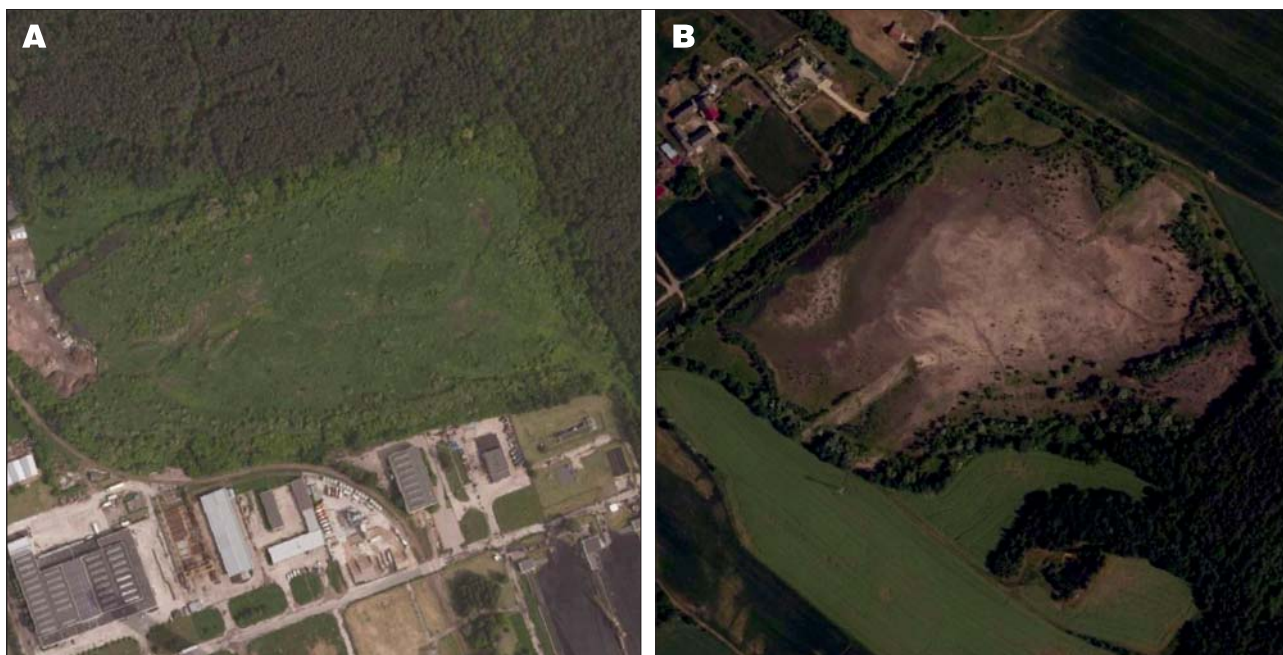
te mogą być pomocne w procesie generowania profili morfologicznych wykorzystanych do obliczeń stateczności skarp (ryc. 1).

Celem niniejszego artykułu jest porównanie metody LiDAR wykonanej na potrzeby programu ISOK z satelitarnym pomiarem GNSS-RTN (*Global Navigation Satellite System – Real Time Network*) do pozyskiwania danych wysokościowych profili morfologicznych, które są wykorzystywane do obliczeń stateczności skarp. Jako obszary badawcze wybrano dwie lokalizacje, gdzie występują tereny zadrzewione i zakrzewione, na których obie metody posiadają pewne ograniczenia.

## CHARAKTERYSTYKA OBSZARÓW BADAWCZYCH

Obszary badawcze to nieczynne składowiska zarośnięte roślinnością średnią i wysoką, tj. krzewy o wysokości 0,4–2,0 m oraz drzewa o wysokości powyżej 2,0 m. Ogólnym celem badań tych obszarów było określenie stateczno-

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



**Ryc. 2.** Obszary prac badawczych. **A** – składowisko pod Warszawą – teren pierwszy, **B** – składowisko pod Wrocławiem – teren drugi  
**Fig. 2.** Research areas. **A** – the landfill near Warsaw – the first area, **B** – the landfill near Wrocław – the second area

ści skarp na potrzeby przyszłego kierunku zagospodarowania terenu. Natomiast zadaniem geodezyjnym, którego dotyczy niniejszy artykuł, był pomiar wysokości terenu wzdłuż charakterystycznych profili. Uzyskane wyniki pomiarów zostały użyte do obliczeń stateczności skarp. Pierwszy rejon badawczy to nieczynne składowisko w okolicach Warszawy – teren pierwszy (ryc. 2). Na koronie skarpy rosną krzaki, natomiast na skłonie drzewa o kilkumetrowej wysokości. Drugi – to składowisko pod Wrocławiem, na obwałowaniu którego rosną drzewa i krzewy o różnej wysokości – teren drugi (ryc. 2). Dla obu lokalizacji wykonano pomiary geodezyjne metodą satelitarną GNSS-RTN oraz pozyskano wysokości ze sklasyfikowanej chmury punktów LiDAR z projektu ISOK, a także wykonanego na bazie tych danych NMT.

#### POMIARY GEODEZYJNE METODĄ GNSS-RTN

Na terenie pierwszym pomierzono niestabilizowane pikietki wysokościowe w punktach charakterystycznych wzdłuż profili morfologicznych, przechodzących przez odwierty i sondowania geotechniczne. Pomiaru dokonano zestawem GNSS, metodą różnicową RTN, przy użyciu stacji referencyjnych ASG.EUPOS (Rozporządzenie, 2011b).

Pomiary satelitarne GNSS-RTN polegają na wyznaczeniu pozycji w przestrzeni anteny odbiorczej na podstawie sygnałów nadawanych z satelitów krążących wokół Ziemi na ściśle określonych orbitach. Satelity te należą do systemów GPS, GLONASS i innych o zbiorczej nazwie GNSS. Metoda RTN polega na dokonaniu korekty wyznaczonej pozycji na podstawie pomiaru wykonanego w tym samym czasie pomiędzy punktem wyznaczanym a punktem o znanych współrzędnych. Pozwala ona na uzyskiwanie centymetrowych dokładności punktów rejestrowanych w terenie. W praktyce metoda ta jest realizowana poprzez permanentny pomiar satelitarny sieci referencyjnych (punktów reperowych), a następnie przekazywanie poprawek (różnic pomiędzy współrzędnymi po-

mierzonymi a katalogowymi) internetowo w czasie rzeczywistym.

Dzięki zastosowaniu wysokiej tyczki (5 m), na której była zamontowana antena odbiorcza, był możliwy pomiar na wysokości korony drzew. Dzięki temu wszystkie pomiary zostały wykonane z rozwiązaniem fazowym, dając możliwość najdokładniejszych wyników. Wynik był uśredniany z pięciu zarejestrowanych pomiarów, a maska elewacji ustawiona była na 10°. Parametry dokładnościowe nie przekraczały parametrów zalecanych przez operatora ASG.EUPOS w trakcie pomiarów GNSS-RTN (Graszka i in., 2013). Miarą zaufania był parametr PDOP (*Position Dilution of Precision*), który nie powinien przekraczać wartości 6. Charakterystyka dokładnościowa przedstawiała się następująco:

- liczba satelitów: 7–15;
- parametr zaufania do pomiaru PDOP: 1,250–3,387;
- błąd wyznaczenia wysokości: 0,013–0,068 m.

Współrzędne były mierzone w państwowym układzie współrzędnych płaskich 2000/strefa 7 oraz układzie wysokości Kronsztad'86.

Teren drugi charakteryzował się podobnymi warunkami, dlatego technika pomiaru była analogiczna. Użyto tego samego sprzętu oraz strumienia poprawek ze stacji referencyjnych ASG.EUPOS. Pomiaru dokonano wzdłuż wcześniej zaprojektowanych przekrojów na podstawie archiwalnej mapy zasadniczej. Charakterystyka dokładnościowa tego terenu wyglądała następująco:

- liczba satelitów: 7–17;
- parametr zaufania do pomiaru PDOP: 1,161–4,051;
- błąd wyznaczenia wysokości: 0,016–0,090 m.

Do mierzenia współrzędnych wykorzystano państwowy układ współrzędnych płaskich 2000/strefa 5 oraz układ wysokości Kronsztad'86.

Aby móc prawidłowo posługiwać się urządzeniami do pomiarów satelitarnych należy zdawać sobie sprawę z pewnych ograniczeń w zastosowaniu pomiarów GNSS metodą RTN. Podstawową przeszkodą jest zasięg telefonii komórkowej (w naszym przypadku nie miało to znaczenia).



Kolejnym utrudnieniem jest brak widoczności pełnego horyzontu, a co za tym idzie śledzenia wszystkich satelitów krążących nad nim. Przykładem są pomiary na terenach zadrzewionych i zakrzewionych. W takich przypadkach spada ilość śledzonych sygnałów (np. z 16 do 7), a w następstwie odbiornik oblicza pozycję na podstawie sygnałów skupionych w jednym kierunku na horyzoncie i zaufanie do takiego pomiaru jest mniejsze.

### POMIARY WYSOKOŚCI NA PODSTAWIE DANYCH LiDAR-ALS

W trakcie prac związanych z pozyskaniem danych dotyczących budowy geologicznej oraz parametrów geotechnicznych potrzebnych do obliczeń stateczności skarp należy pozyskać dane reprezentujące profil morfologiczny. Terenowe pomiary geodezyjne są czasochłonne i kosztowne, ale najdokładniejsze i najaktualniejsze (geodezyjne pomiary satelitarne ułatwiły proces pozyskiwania współrzędnych w terenie). Natomiast kartometryczne pomiary na mapach topograficznych są mało dokładne i mało przydatne, np. dla niedużych form antropogenicznych, a aktualne mapy zasadnicze (mapy geodezyjne w skali 1 : 5000 i wyższej, które w swej treści są znacznie dokładniejsze od map topograficznych) mogą w ogóle nie być dostępne.

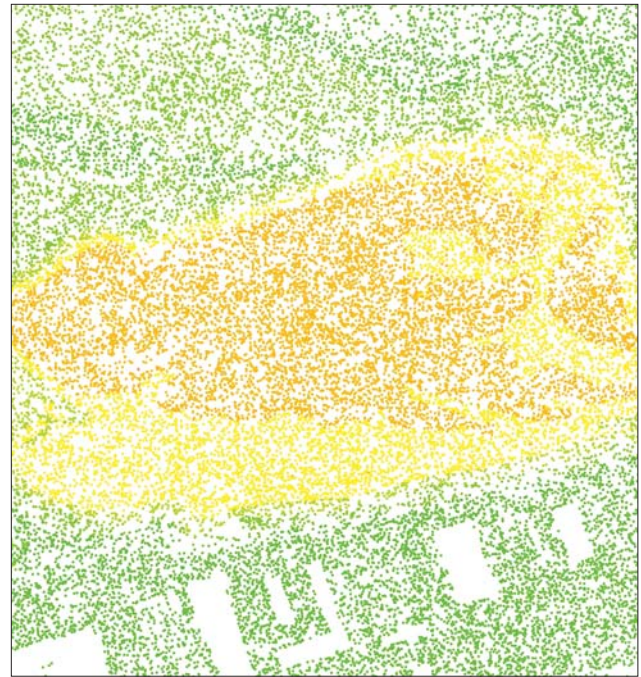
Konkurencyjnym sposobem może się okazać metoda pozyskiwania danych wysokościowych na podstawie danych źródłowych z lotniczego skaningu laserowego LiDAR lub z numerycznych modeli terenu (NMT), wykonanych na podstawie tych danych (Rozporządzenie, 2011a).

W celu weryfikacji wykonano porównanie wysokości odczytanych z lotniczego skaningu laserowego z tymi otrzymanymi z pomiarów satelitarnych GNSS-RTN. Porównania dokonano w dwóch lokalizacjach opisanych powyżej.

Teren pierwszy został objęty nalotem z gęstością próbkowania 12 pkt./m<sup>2</sup>, natomiast drugi – 4 pkt./m<sup>2</sup>. Oba obszary reprezentują gęstość próbkowania przyjętą na większości terenów kraju w ramach programu ISOK. Układ współrzędnych płaskich przyjęty do pomiarów LiDAR-ALS to PUWG1992, natomiast układ wysokości to Kronsztad'86. Dlatego też niezbędne było przetransformowanie współrzędnych pomiarów GNSS-RTN z układu PUWG2000 na PUWG1992 (Rozporządzenie, 2012).

### POMIARY Z DANYCH ŹRÓDŁOWYCH LiDAR

Metoda pozyskiwania wysokości z „chmury punktów” (ryc. 3), powstałej z danych źródłowych LiDAR-ALS, polegała na odczytaniu wartości H punktu zaklasyfikowanego jako grunt i będącego najbliższym punktu z pomiaru GNSS-RTN. Odległość pomiędzy nimi nie przekraczała 1 m (wynika to z faktu, że pozostałe punkty w danym miejscu zaliczono do innej klasy, głównie roślinności niskiej, średniej lub wysokiej). Niewielka odległość pomiędzy punktami dawała nam większą pewność, że reprezentują one tą samą pozycję na profilu. Następnie porównano wartości wysokości z obu metod i poddano prostym obliczeniom statystycznym (ryc. 4). Wynikiem obliczeń była średnia wartość odchyłki oraz błąd średni kwadratowy odczytanych wysokości przy założeniu, że pomiary GNSS-RTN są bezbłędne. Charakterystyka dokładnościowa dla terenu pierwszego (12 pkt./m<sup>2</sup>) wygląda następująco:



**Ryc. 3.** Przykład chmury punktów z pomiarów lotniczego skaningu laserowego. Punkty sklasyfikowane jak „grunt” przedstawione w skali barwnej zależnej od wysokości

**Fig. 3.** Example of a cloud point from an airborne laser scanning. Points classified as “ground” in height-dependent color scale

- maksymalne różnice wysokości (odchyłki): od –0,84 do 0,31 m;
- średnia wartość odchyłki: –0,02 m;
- błąd średni kwadratowy pomiaru ALS LiDAR w stosunku do pomiarów GNSS-RTN: 0,31 m.

Natomiast dla terenu drugiego (4 pkt./m<sup>2</sup>):

- maksymalne różnice wysokości (odchyłki): od –0,45 do 0,27 m;
- średnia wartość odchyłki: –0,04 m;
- błąd średni pomiaru ALS LiDAR w stosunku do pomiarów GNSS-RTN: 0,21 m.

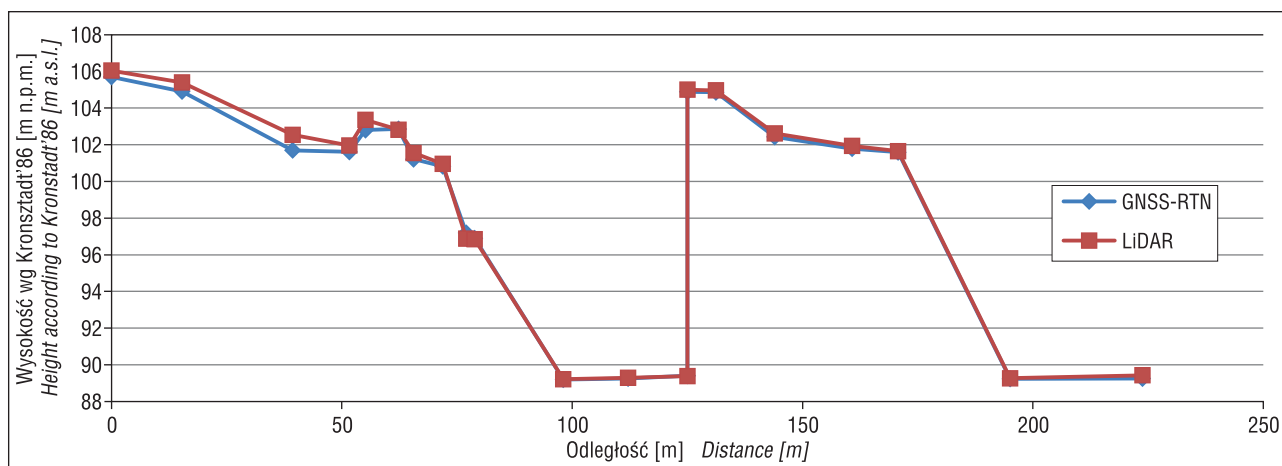
### POMIARY Z NUMERYCZNEGO MODELU TERENU

Z danych źródłowych LiDAR-ALS dla obu terenów metodą rastrową wykonano numeryczne modele terenu – wariant modelu GRID (Wężyk, 2015). W metodzie tej w punktach siatki jest generowany obraz, w którym poszczególnym pikselom nadaje się wysokości reprezentujące punkty siatki GRID (ryc. 5). Model wykonano z wielkością terenową piksela 1 m × 1 m (tzn. wysokości jest reprezentowana przez uśrednioną wartość wszystkich punktów sklasyfikowanych jako grunt na powierzchni 1 m<sup>2</sup>).

Następnie odczytano wysokość w danym pikselu, w którym znajdował się punkt pomiarowy z pomiarów GNSS-RTN. Przy założeniu, że są one bezbłędne charakterystyka dokładnościowa dla terenu pierwszego wygląda następująco:

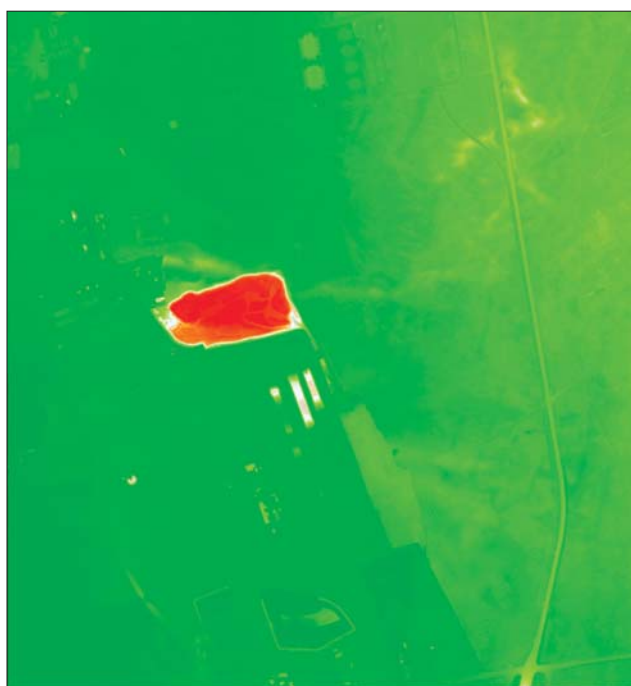
- maksymalne różnice wysokości (odchyłki): od –0,78 do 0,44 m;
- średnia wartość odchyłki: 0,01 m;
- błąd średni NMT w stosunku do pomiarów GNSS-RTN: 0,31 m.

Natomiast dla terenu drugiego (4 pkt./m):



Ryc. 4. Różnice pomiędzy wartościami wysokości z pomiarów GNSS-RTN i LiDAR

Fig. 4. The graph showing differences between GNSS-RTN and LiDAR height values



Ryc. 5. Przykład numerycznego modelu terenu jako obrazu rastrowego (kolor piksela odzwierciedla wartość wysokości w terenie)

Fig. 5. Example of digital terrain model as raster image (pixel color reflects terrain height value)

- maksymalne różnice wysokości (odchyłki): od  $-0,59$  do  $0,31$  m;
- średnia wartość odchyłki:  $-0,03$  m;
- błąd średni NMT w stosunku do pomiarów GNSS-RTN:  $0,22$  m.

Ponadto porównano wartości wysokości otrzymane z „chmury punktów” LiDAR-ALS oraz z modelu NMT (ryc. 6). Z różnicy pomiarów wyliczono średni błąd kwadratowy pomiędzy metodami, który w obu przypadkach wyniósł  $0,11$  m. Średnia wartość odchyłki wynosi odpowiednio  $0,03$  m dla terenu pierwszego oraz  $-0,01$  m dla terenu drugiego.

## DYSKUSJA

Niniejsze porównanie metod LiDAR-ALS i GNSS-RTN w pozyskiwaniu danych wysokościowych na potrzeby

budowy profili morfologicznych niezbędnych do obliczeń stateczności skarp nasuwa kilka wniosków.

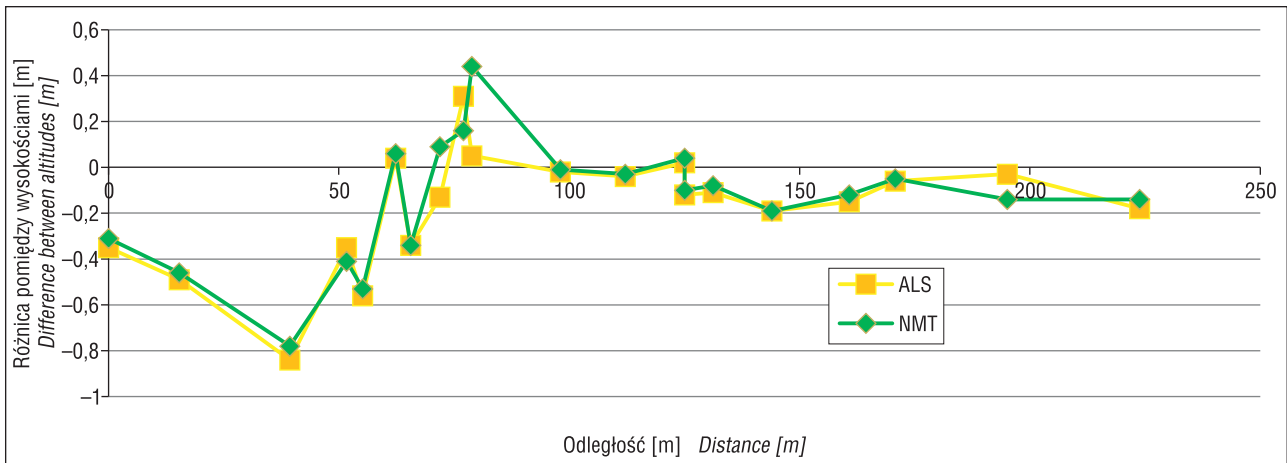
Przede wszystkim należy zauważyć, że ze względu na fakt losowości pomiarów LiDAR-ALS w stosunku do pomiarów GNSS-RTN niemożliwe jest m.in. wykrycie niewielkich szczelin powstałych w gruncie lub odzwierciedlenie rzeczywistego przebiegu linii strukturalnych powierzchni terenu, np. linii krawędziowych na skarpach. Największą wadą takiego stanu rzeczy jest możliwość odczytania wysokości z modelu lub z chmury punktów poniżej lub powyżej krawędzi i popełnienie dużego błędu (w naszym przypadku do  $0,84$  m).

W pobliżu krawędzi skarpy model NMT prowadzi do uśrednienia wysokości z obu stron i zawsze daje wynik zafałszowany, dlatego też bezpieczniejszą metodą byłoby pozyskiwanie wysokości z „chmury punktów”, gdzie można kontrolować zmiany wysokości poprzez np. podgląd przekroju uzyskanego z pasa danych o zadanej szerokości lub posiłkując się mapą zasadniczą, jeśli taka istnieje dla danego obszaru. Korzystając z NMT, można jeszcze wykonać odczyt w kilku profilach będących blisko siebie i spróbować wychwycić błędne odczyty.

Ponadto losowość pomiarów LiDAR-ALS oraz automatyzacja klasyfikacji punktów może prowadzić do zafałszowania danych źródłowych. Przykładem może być pojedynczy blok betonowy występujący na hałdzie zarośniętej drzewami. Jeśli zaklasyfikowany zostanie jako „grunt” i posłuży do budowy profilu morfologicznego, to może doprowadzić do zafałszowania modelu.

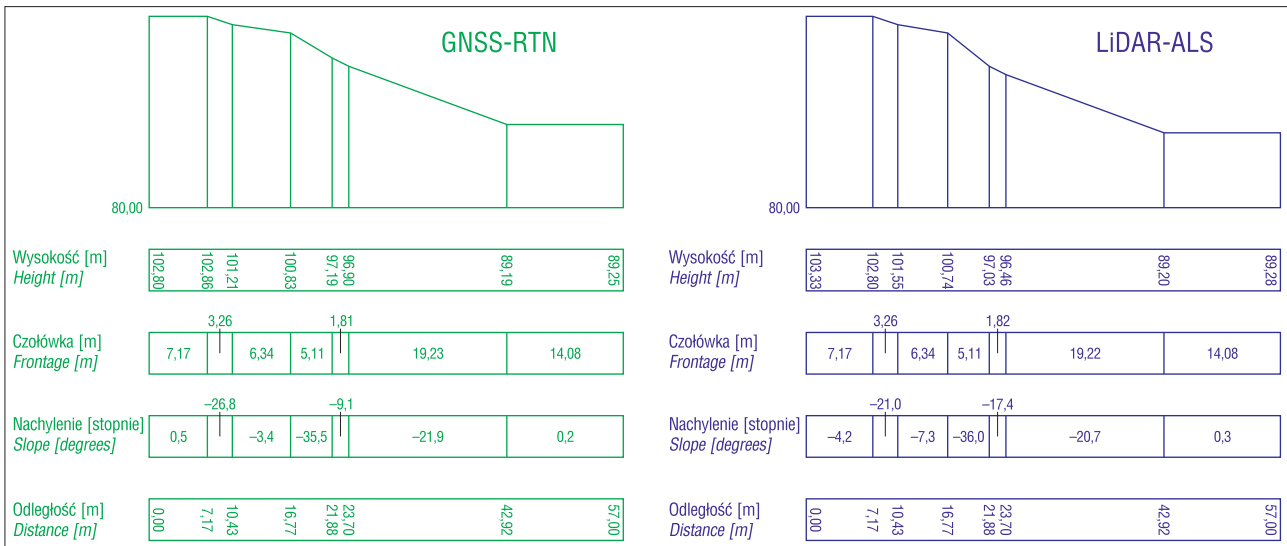
Hałda w terenie pierwszym zbudowana jest m.in. z gruzu żelbetonowego o różnej wielkości, co powoduje, że odczytanie prawidłowej wysokości jest znacznie utrudnione w przeciwieństwie do np. obwałowań terenu drugiego zbudowanego z nasypów budowlanych o zbliżonej granulacji (maksymalna różnica wysokości pomiędzy danymi LiDAR-ALS a pomiarami GNSS-RTN dla terenu pierwszego jest wyższa niż dla drugiego). Dlatego też informacje o budowie powierzchni terenu prac są bardzo istotne. W celu weryfikacji należałoby wykonać ponowny odczyt na kilku profilach będących blisko siebie, starając się wychwycić błędne odczyty.

Ponadto, jak widać na rycinie 7 kształt skarpy jest zachowany bez względu na metodę pomiarową. W zależności od długości podstawy skarpy oraz wielkości przewyższenia, nachylenie skarpy obliczone z pomiarów bezpo-



Ryc. 6. Wykres przedstawiający różnicę pomiędzy wysokościami odczytanymi z surowych danych LiDAR-ALS a numerycznym modelem terenu powstałym z tych danych (NMT)

Fig. 6. The graph showing the difference between the altitudes read from LiDAR-ALS raw data and the digital terrain model generated from these data (DTM)



Ryc. 7. Przykładowe porównanie przekroju powstałego z pomiarów GNSS-RTN (zielony) z przekrojem powstałym z danych LiDAR-ALS (niebieski)

Fig. 7. Example of comparison of profile from GNSS-RTN measurements (green) with profile from LiDAR-ALS data (blue)

średnich i odczytów danych LiDAR-ALS może się znacznie różnić. Im większe przewyższenie i dłuższa podstawa, tym różnice w odczytach wysokości mają mniejszą wagę przy obliczeniach nachylenia skarpy. Dlatego zaleca się generalizowanie kształtu morfologicznego skarpy. Pomoże to uniknąć wykorzystywania profili morfologicznych o nachyleniach obciążonych dużym błędem w stosunku do rzeczywistego ich kształtu.

Możliwość stosowania metody pozyskiwania wysokości z LiDAR-ALS jest determinowana przede wszystkim przez założoną pewność obliczeń stateczności skarpy. Jeśli przyjęte do modelu obliczeniowego poszczególne dane wejściowe (warstwy gruntu, parametry geotechniczne, wartości nachyleń skarpy, itp.) dają wyniki minimalnego współczynnika pewności (współczynnik stateczności)  $F_{min}$  bliskie jedności, to należałoby zastanowić się czy nie byłoby bezpieczniej pozyskać dane wysokościowe z pomiaru bezpośredniego. Eliminuje to niepewność wynikającą z wykorzystania metody LiDAR-ALS do obliczeń nachyleń skarpy, w której to błędy odczytu wysokości mogą mieć

znaczący wpływ na wynik końcowy współczynnika  $F_{min}$  (Wiłun, 1976).

Dlatego też na terenach zadrzewionych i zakrzewionych sugeruje się wykorzystywanie danych LiDAR-ALS przy wstępnych obliczeniach stateczności skarpy oraz w przypadkach gdy skarpy mają długie podstawy i jednostajne nachylenie. W pozostałych sytuacjach, gdy dokładność wyznaczenia minimalnego współczynnika pewności ma kluczowe znaczenie, należałoby sięgnąć po bezpośrednie metody pomiarowe w celu pozyskania wysokości obciążonych mniejszym błędem.

## PODSUMOWANIE

Metoda pozyskiwania wysokości z danych LiDAR z programu ISOK ma wiele zalet. Jedną z nich jest szybkie i względnie niekosztowne pozyskiwanie wysokości dla dowolnej ilości profili obliczeniowych, bez potrzeby pomiarów terenowych (niezależnie od pogody, pory roku, bezpieczeństwa pracy itp.).



Jak widać z powyższych doświadczeń średni błąd kwadratowy różnicy wysokości pomiędzy pomiarem bezpośrednim a lotniczym skanowaniem laserowym na terenach zadrzewionych i zakrzewionych wynosi w przybliżeniu 0,2–0,3 m (zależne jest to m.in. od gęstości próbkowania oraz gęstości pokrywy roślinnej). Nie ma większego znaczenia czy dane pozyskuje się z danych źródłowych (chmury punktów), czy z NMT. Statystycznie wielkość błędu jest zbliżona, a średnie wartości odchyłki w granicach centymetrów świadczą o nieznacznym wpływie błędów systematycznych na pozyskiwane dane. Aby uniknąć błędów grubych zaleca się wykonywanie odczytów w kilku profilach równoległych do siebie i znajdujących się względnie blisko siebie.

Podsumowując, można stwierdzić, że metoda pozyskiwania wartości wysokości z danych LiDAR jest mniej pewna ale perspektywiczna, dlatego też warto nauczyć się używać tego narzędzia i wykorzystać we wszystkich projektach, w których można je zastosować. Rozwój dokładniejszych metod pomiarowych w lotniczych laserowych systemach skanujących oraz algorytmów służących do wstępnej obróbki danych mogą w przyszłości zaowocować produktem porównywalnym dokładnościowo z pomiarami bezpośrednimi wysokości na terenach zadrzewionych i zakrzewionych.

Autor pragnie podziękować Recenzentom za poświęcony czas oraz cenne uwagi.

## LITERATURA

- GRASZKA W., ORUBA A., RYCZYWOLSKI M., WAJDA S. 2013 – ASG.EUPOS – Poradnik użytkownika. GUGiK. Warszawa: 13–24.
- KURCZYŃSKI Z., BAKUŁA K. 2013 – Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. Arch. Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. spec. Warszawa: 59–68.
- ROZPORZĄDZENIE 2011a – Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 3 listopada 2011 roku w sprawie baz danych dotyczących zobrażeń lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu. Dz.U. z 2011 r. nr 263 poz. 1571.
- ROZPORZĄDZENIE 2011b – Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 9 listopada 2011 roku w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego. Dz.U. z 2011 r. nr 263 poz. 1572.
- ROZPORZĄDZENIE 2012 – Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 roku w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych. Dz.U. z 2012 r. poz. 1247.
- WĘŻYK P. (red.) 2015 – Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR. Warszawa: 110–131.
- WIŁUN Z. 1976 – Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności. Warszawa: 290–297.