

NOWAK Aleksander¹
SOBIERAJ Anna²
SZULWIC Jakub³

Porównanie wyników pomiarów mas ziemnych wykonanych metodą skaningu laserowego i GNSS w kontekście inwestycji komunikacyjnych

WSTĘP

Inwestycje komunikacyjne, a co za tym idzie rozwój i modernizacja infrastruktury kolejowej i drogowej, to jeden z ważniejszych czynników wpływających na rozwój gospodarki. Są kluczowym elementem wielu programów proponowanych przez Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju, m.in. Narodowego Programu Rewitalizacji czy Programu Rozwoju Dróg Krajowych. Istotne jest więc zoptymalizowanie procesów związanych z takimi inwestycjami. Jednym z etapów realizacji inwestycji są roboty ziemne oraz pomiar objętości mas ziemnych. Konieczność obliczenia objętości mas ziemnych zachodzi podczas: inwentaryzacji objętości składowanych materiałów sypkich, wyznaczeniu przewidywanych kosztów robót ziemnych, kontroli ilości zużytego surowca, wyznaczenie ilości wylanego asfaltu itp. W przypadku inwestycji drogowych i kolejowych są szczególnie istotne, gdyż dąży się do zbilansowania robót ziemnych. Ważny jest także aspekt logistyczny – taki jak masowe przewozy materiałów sypkich (np. żwir).

Do obliczeń objętości mas ziemnych niezbędny jest zapis stanu istniejącego powierzchni terenu oraz dane na temat stanu docelowego, jaki przewidział projektant, w ramach danej inwestycji.

Dane terenowe, na podstawie których opracowuje się graficzną reprezentację rzeźby terenu, pozyskiwane są z wykorzystaniem różnego rodzaju technologii pomiarowych (metody geodezyjne, fotogrametryczne, skaningu laserowego naziemny lub lotniczy). Wybór metody pomiaru jest głównie uzależniony od rodzaju rozpatrywanego obszaru, a przede wszystkim od jego wielkości.

W tym artykule autorzy skupiają się na danych uzyskanych w wyniku pomiarów GNSS i skaningu laserowego. Wskazują zalety i wady obu tych rozwiązań w odniesieniu do obliczania objętości mas ziemnych.

1 POMIARY OBJĘTOŚCI MAS ZIEMNYCH

Zakres robót ziemnych w przypadku wspomnianych inwestycji obejmuje m.in.: wykonanie wykopów i nasypów pod obiekty liniowe - drogowe i kolejowe, oraz ich elementów, np. wiaduktów i mostów. Roboty ziemne są rozliczane wg ilości jednostek objętości gruntu w m³, dlatego bardzo ważne jest obliczenie objętości mas ziemnych z odpowiednio dużą dokładnością. Wynika to też ze względów logistycznych, ponieważ inwestor musi wiedzieć, jaką ilość gruntu należy nasypać lub wykopać, jak duży obszar jest potrzebny do jego składowania na placu budowy, a co za tym idzie, ile będzie potrzebnych ciężarówek do jego przewiezienia.

Zarówno przed jak i po wykonaniu robót ziemnych niezbędny jest pomiar ukształtowania powierzchni topograficznej. Możemy wyróżnić:

- metody klasyczne (niwelacja siatkowa, niwelacja punktów rozproszonych, niwelacja podłużna i poprzeczna),
- metody fotogrametryczne,
- skaningu laserowego (naziemny i lotniczy).

Obecnie do pomiarów objętości mas ziemnych coraz częściej wykorzystuje się technologię GNSS (Global Navigation Satellite System). Są one możliwe dzięki istnieniu na obszarze Polski sieci

¹aleksander.nowak@wilis.pg.gda.pl, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

²anna.sobieraj@wilis.pg.gda.pl, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

³jakub.szulwic@wilis.pg.gda.pl, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

permanentnych stacji referencyjnych, które umożliwiają wyznaczanie współrzędnych z centymetrowymi dokładnościami w czasie rzeczywistym i milimetrowym w postprocessingu. Szczególnie ważny z punktu pomiarów objętości mas ziemnych, jest fakt, że stacje te przesyłają poprawki w czasie rzeczywistym, umożliwiając pomiar w technologii RTK (Real Time Kinematic). Dzięki temu w stosunkowo krótkim czasie można wykonać pomiaryz wymaganą dokładnością i dowiązać je do państwowego systemu odniesień przestrzennych. Na terenie Polski funkcjonuje osnowa geodezyjna, którą stanowi państwowa sieć stacji referencyjnych ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS), ale użytkowane mogą być także sieci komercyjne (np. LeicaSmartNet – jako geodezyjna osnowa szczegółowa) i inne dostępne punkty geodezyjnej osnowy szczegółowej wyznaczane przez geodetów uprawnionych i dostępne w Banku Osnów Geodezyjnych.

Najnowszą technologią, która znalazła zastosowanie w geodezji inżynierskiej jest skanowanie laserowe. Znany jest on najczęściej pod nazwą LiDaR(LightDetection and Ranging). Wynikiem pomiarów laserowych jest zawsze gęsta i zwarta tzw. „chmura punktów”, która bardzo dokładnie i szczegółowo odzwierciedla rzeczywistość, co w przypadku obliczania objętości mas ziemnych jest bardzo istotne. Na podstawie chmury punktów może być opracowany trójwymiarowy model obiektu, numeryczny model terenu lub numeryczny model pokrycia terenu. W zależności od rozmiaru/kształtu obszaru będącego przedmiotem pomiarów można wykorzystywać różne technologie skaningu laserowego (lotniczy skanowanie laseroweALS – Airborne Laser Scanning; naziemny skanowanie laserowe TLS – Terrestrial Laser Scanning; mobilny skanowanie laserowe MLS – Mobile Laser Scanning; satelitarny skanowanie laserowe SLS – Satellite Laser Scanning).

1.1 Wymagane dokładności

Pomiary objętości mas ziemnych, jak wszystkie pomiary, obarczone są pewnymi błędami. Mogą one wynikać między innymi z:

- doboru niewystarczająco dokładnej metody pomiarowej i instrumentu,
- niemożliwości dokładnego odwzorowania terenu – stosując klasyczne metody pomiarowe mierzymy tylko wybrane punkty, które stanowią aproksymację rzeczywistego obrazu terenu,
- błędów powstałych w trakcie pomiarów – spowodowanych np. z nieprawidłowym spoziomowaniem instrumentu, złym odczytem wysokości na łącie, niedokładnym scentrowaniem instrumentu nad punktem, niedokładnym celowaniem na środek lustra, niespoziomowaną łątą lub lustrem,
- przyjętego sposobu obliczania.

Objętości mas ziemnych rozlicza się zwykle w jednostkach objętości gruntu, np. metrach sześciennych (m^3), dlatego istotne jest określenie tej wartości z jak najwyższą dokładnością. W Polsce dokładność, z jaką należy określać objętości mas ziemnych hałd, składowisk i zwałowisk, reguluje Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej (Dz. U. 291,poz.1713), gdzie „błąd względny pomiaru objętości zwałowisk nadkładu oraz składowisk urobku nie może przekraczać dla objętości:

1. do 20 tys. m^3 –4% objętości,
2. ponad 20 do 50 tys. m^3 –3% objętości,
3. ponad 50 do 200 tys. m^3 –2% objętości,
4. ponad 200 tys. m^3 –1% objętości.”

Dodatkowo Polska Norma PN-B-06050:1999 zawiera informacje dotyczące robót ziemnych, w szczególności wymogi dotyczące wykonywania i odbioru technicznego robót ziemnych. Jeżeli projekt nie posiada określonych wymiarów liniowych i rzędnych dla robót budowlanych ziemnych, to odchylenia nie powinny być większe od projektowanych niż:

- „± 0,02% dla spadków terenu,
- ± 0,05% dla spadków rowów odwadniających,
- ± 4 cm dla rzędnych w siatce kwadratów 40 m x 40 m,
- ± 5 cm dla rzędnych dna wykopu fundamentowego,
- ± 3 cm dla rzędnych dna wykopu dla rurociągów w gruntach spoistych,
- ± 5 cm dla rzędnych dna wykopu dla rurociągów w gruntach wymagających wzmocnienia,



- $\pm 2 \div 5$ cm dla rzędnych korony nasypu budowlanego,
- ± 5 cm dla wymiarów w planie wykopów rozpartych i dla pozostałych wykopów o szerokości dna poniżej 1,5 m,
- ± 15 cm dla wymiarów w planie wykopów o szerokości dna większej niż 1,5 m,
- ± 5 cm dla odległości krawędzi dna od ustalonej w planie osi wykopów dla przewodów podziemnych,
- ± 10 cm dla wymiarów w pionie wykopów dla przewodów podziemnych,
- $\pm 10\%$ dla nachylenia skarp wykopów fundamentowych,
- $\pm 5\%$ dla nachylenia skarp wykopów dla przewodów podziemnych,
- $\pm +10\%$ dla nachylenia skarp stałego odkładu,
- ± 5 cm dla szerokości korony nasypu budowlanego,
- ± 15 cm dla szerokości podstawy nasypu budowlanego.” [4]

1.2 Metody obliczania objętości gruntów

Masy ziemne zazwyczaj występują w postaci nieregularnych powierzchni. Aby było możliwe jak najdokładniejsze obliczenie ich objętości dzieli się je na elementarne bryły geometryczne. Podziału takiego dokonuje się dzieląc nieregularną bryłę płaszczyznami pionowymi lub poziomymi. Metody obliczania objętości gruntów to:

- metoda siatki kwadratów (prostokątów),
- metoda siatki trójkątów,
- metoda przekrojów poziomych,
- metoda przekrojów poprzecznych,
- metoda aproksymacji powierzchni topograficznej wielomianami algebraicznymi.

W celu uzyskania jak najdokładniejszego wyniku obliczania mas ziemnych powinno się korzystać z numerycznego modelu terenu (NMT) występujących w formie siatki trójkątów, prostokątów lub izolinii. Oprócz tego NMT może być wykorzystany do znalezienia funkcji $z = f(x, y)$ opisującej całą powierzchnię topograficzną bryły. Całkując taką funkcję po powierzchni podstawy bryły można obliczyć jej objętość [1]. W wyborze odpowiedniej metody jako kryterium stosuje się kształt masy gruntu, pracochłonność obliczeń oraz wymaganą końcową dokładność.

2 DANE TESTOWE

Objętości mas ziemnych zostały obliczone na podstawie danych pochodzących z pomiarów wykonanych na terenie Politechniki Gdańskiej. W pomiarach wykorzystano: odbiorniki geodezyjne GNSS i skaner naziemny.

2.1 Pomiar objętości skarpy

Do pomiaru objętości masy ziemnej wybrano fragment skarpy znajdujący się na terenie Politechniki Gdańskiej przy budynku Wydziału Zarządzania i Ekonomii przy ulicy Traugutta w Gdańsku. Pomiary wykonano w październiku 2013 r. przy zachmurzeniu 70% i temperaturze 15°C . W celu zanalizowania dokładnie tego samego fragmentu skarpy oznaczono granice badanego obszaru (Rys. 1).





Rys.1. Obiekt pomiaru

2.1.1 Pomiar GNSS

Do pomiaru wykorzystano zestaw pomiarowy Leica GPS1200+, w którego skład wchodzi antena z odbiornikiem ATX1230 GG oraz kontroler RX1250. Urządzenia te połączone były między sobą za pomocą Bluetooth'a i zamocowane na tyczce pomiarowej. Sprzęt ten przeznaczony jest do pomiarów GNSS, wykorzystuje kanały L1/L2 GPS oraz L1/L2 GLONASS. Umożliwia też wykonywanie pomiarów RTK. Pomiarów dokonano we wcześniej zaplanowanym terminie, a w ich trakcie nie wystąpiły żadne zakłócenia. Wybrano metodę pomiaru GNSS RTK w sieci LeicaSmartNetz wykorzystaniem poprawek powierzchniowych typu MAX. Punkty mierzono równomiernie w odległości ok. 1-2 m. Współrzędne punktu wyznaczane były z uśrednionego wyniku pięciu pomiarów. Z pomiaru uzyskano współrzędne 48 punktów.

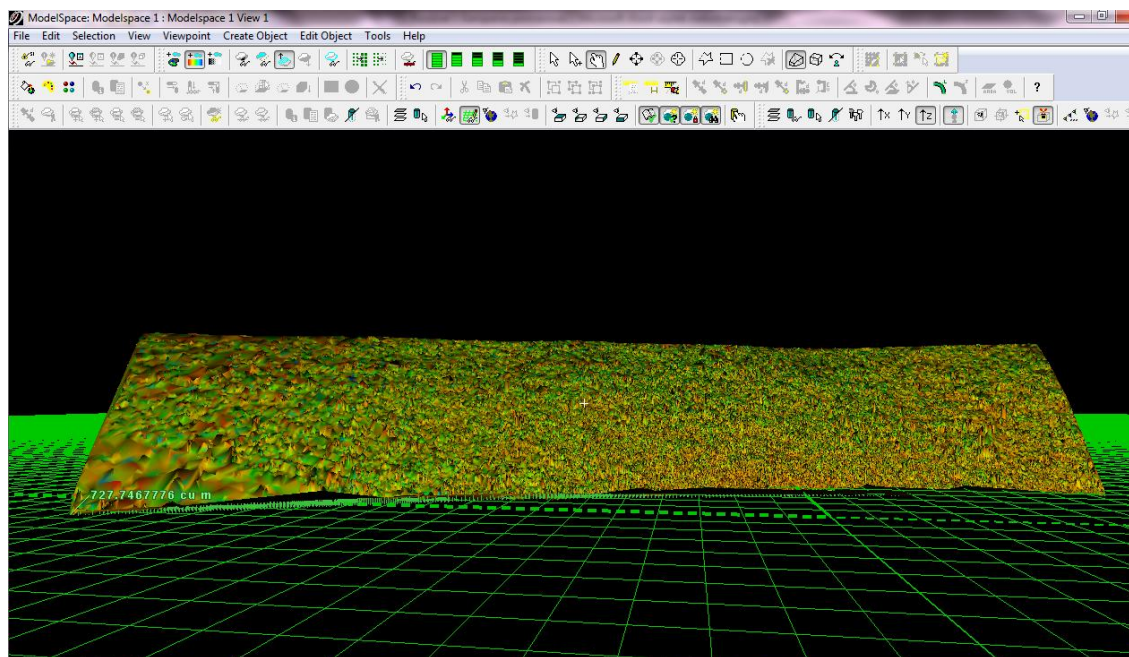
2.1.2 Naziemny skaning laserowy

Podczas kampanii pomiarowej został użyty skaner laserowy ScanStation C10 z firmy Leica. Jest to skaner impulsowy. Jego zasięg wynosi do 300m przy optymalnych warunkach użytkowania, jednak przy skanowaniu gruntu nie należy oczekiwać zasięgu większego niż 200 m. Maksymalne pole widzenia w poziomie i pionie to odpowiednio 360° i 270° . Charakteryzuje się on wszechstronnością, wydajnością oraz łatwością w obsłudze.

Przygotowując kampanię pomiarową skaningu laserowego bardzo ważne jest prawidłowe rozmieszczenie stanowisk pomiarowych, a także tarczek celowniczych. To dzięki nim możliwa jest późniejsza orientacja chmur punktów podczas prac kameralnych. W przypadku pomiaru analizowanego obszaru wystarczające było wykonanie skaningu z jednego stanowiska, ponieważ badany obiekt był niezróżnicowany i względnie niewielki, nie występowały w trakcie pomiaru tzw. „martwe pola”. Zrezygnowano także z umieszczania tarczek. Obiekt zeskanowano ze średnią rozdzielczością.

2.1.3 Opracowanie wyników

Uzyskaną w wyniku skanowania laserowego chmurę punktów opracowano z wykorzystaniem programu LeicaCyclone, który jest firmowym oprogramowaniem wykorzystanego skanera. Program LeicaCyclone oblicza objętość z użyciem metody dla pryzmatoidów. Do obliczenia objętości pomierzonego obszaru przyjęto płaszczyznę odniesienia (dolna granica skarpy) a także wygenerowano siatkę TIN (TriangulatedIrregular Network). Objętość obliczona została dla dwóch odstępów próbkowania: 0,1m i 1,0m. Na rysunku2. przedstawiono zrzut ekranu z siatką TIN i płaszczyzną odniesienia analizowanego fragmentuskarpy. W tabeli 1. przedstawiono uzyskane wyniki pomiaru objętości dla dwóch wariantów próbkowania.



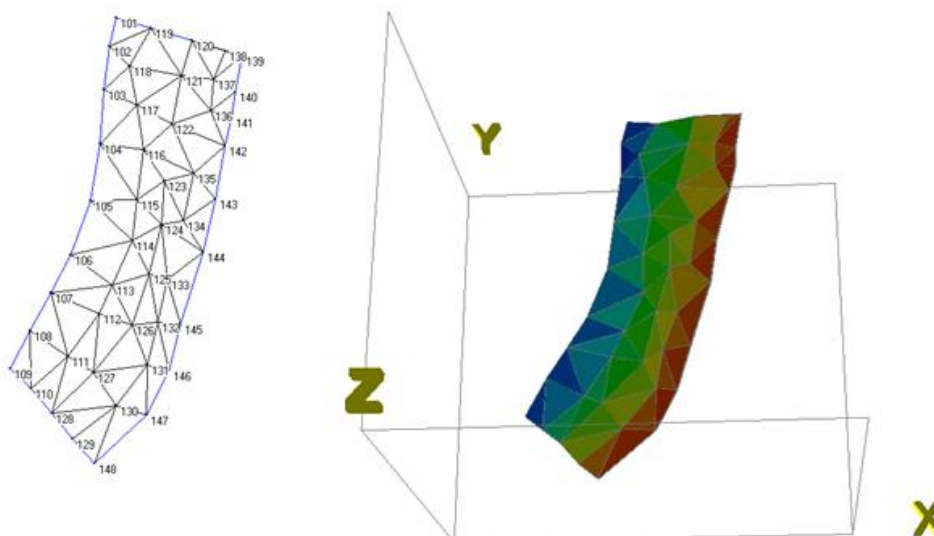
Rys. 2. Zrzut ekranu z siatką TIN i płaszczyzną odniesienia analizowanego fragmentu skarpy

Tab.1. Objętość tego samego fragmentu skarpy w zależności od odstepu próbkowania

Odstęp próbkowania [m]	Objętość [m ³]
0,1	727,7
1,0	735,2

Oczywiście mniejszy krok próbkowania powoduje uzyskanie dokładniejszych wyników, ale zwiększa jednocześnie wielkość zbioru pomiarowego.

Dane z pomiaru GNSS opracowano z wykorzystaniem programów LeicaGeoOffice 8.2 oraz C-GEO. Uzyskany zbiór współrzędnych wykorzystano do zbudowania siatki TIN (Rys.3) i wygenerowania Numerycznego Modelu Terenu (NMT), który był podstawą do obliczeń objętości mas ziemnych.



Rys. 3. Siatka TIN oraz NMT wygenerowane na podstawie pomierzonych punktów

Objętość obliczonej masy ziemnej na podstawie pomiarów GNSS RTK wyniosła 738,4 m³.



Efektom przeprowadzonych prac terenowych i kameralnych są obliczone objętości masy ziemnej metodą skaningu laserowego i GNSS RTK. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 3. Jak widać, różnice są kilkumetrowe, co świadczy o zbliżonej dokładności obu technik pomiarowych.

Tab.2. Zestawienie wyników z pomiarów

Metoda pomiaru	Objętość [m ³]
Skaning laserowy (odstęp próbkowania co 0,1 m)	727,7
Skaning laserowy (odstęp próbkowania co 1,0 m)	735,2
GNSS RTK	738,4

W celu lepszego zobrazowania otrzymanych rezultatów zestawiono w tabeli 3 obliczone różnice objętości w odniesieniu do wartości wzorcowej. Ponieważ obliczona objętość z krokiem próbkowania co 10 cm najlepiej odwzorowuje rzeczywisty teren, została ona wybrana na wartość wzorcową. Otrzymane różnice są niewielkie: 1% dla naziemnego skaningu laserowego, 1,5% dla GNSS RTK.

Tab.3. Różnice objętości w odniesieniu do wartości wzorcowej

Metoda pomiaru	Różnica [m]	Procentowa różnica [%]
Skaning laserowy	7,5	1,0
GNSS RTK	10,7	1,5

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 22grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej błąd względny pomiaru objętości zwałów i składowisk nie powinien przekraczać 4% dla objętości do 20 000 m³.

W analizowanym przykładzie uzyskano dużo większe dokładności – rzędu 1 ÷ 1,5%, co świadczy o przydatności zastosowanych metod.

WNIOSKI

Przy pomiarach wykonywanych w celu obliczenia mas ziemnych najważniejszą kwestią jest nie ilość pomierzonych punktów, ale przede wszystkim ich jakość z punktu widzenia wiernego odzwierciedlenia cech charakterystycznych wybranego obszaru, co w efekcie wpływa na dokładność uzyskanych wyników/obliczeń. Ważnym aspektem jest także czas potrzebny do przeprowadzenia pomiarów i opracowania uzyskanych danych. W stosunku do klasycznych metod wykorzystywanych w obliczaniu objętości mas ziemnych technologie skaningu laserowego i GNSS są użyteczne, zwłaszcza na obszarach o dużej powierzchni. Umożliwiają uzyskanie odpowiednich dokładności oraz są mniej czasochłonne w stosunku do metod klasycznych, co jest dużą zaletą zwłaszcza w przypadku inwestycji drogowych i kolejowych.

Technologia GNSS pozwala na dokonanie pomiaru w punktach charakterystycznych powierzchni i unikanie nadmiarowości pomiaru objętości przy obszarach pokrytych gęstą roślinnością niskopienną, a roślinność wysoka i inne przesłony terenowe dyskwalifikują taki pomiar. Przewaga skaningu laserowego polega na możliwości swobodnego próbkowania wyników także na etapie prac kameralnych. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest ograniczenie wielkości zbioru pomiarowego z zachowaniem dokładności pomiarowych wynikających z przepisów prawa i oczekiwań inwestora. W przypadku skanowania obszarów pokrytych roślinnością utrudnieniem staje się filtracja zeskanowanej powierzchni, do czego należy wykorzystać oprogramowanie i algorytmy opracowane na potrzeby filtracji roślinności [6-8].

Streszczenie

Pomiary objętości mas ziemnych to jeden z etapów związanych z robotami ziemnymi wynikającymi z planowania i prowadzenia inwestycji na danym obszarze. W przypadku inwestycji drogowych i kolejowych są szczególnie istotne, gdyż dąży się do zbilansowania robót ziemnych. Ważny jest także aspekt logistyczny – taki jak masowe przewozy materiałów sypkich (np. żwir).

Zarówno przed jak i po wykonaniu robót ziemnych, niezbędny jest pomiar ukształtowania powierzchni topograficznej. Możemy wyróżnić metody klasyczne (niwelacja siatkowa, niwelacja punktów rozproszonych,



niwelacja podłużna i poprzeczna), metody fotogrametryczne, skaniny laserowe (naziemny i lotniczy). Wybór metody pomiaru jest głównie uzależniony od rodzaju rozpatrywanego obszaru, a przede wszystkim od jego wielkości.

W tym artykule autorzy skupiają się na danych uzyskanych w wyniku pomiarów GPS i skaningu laserowego. Wskazują zalety i wady obu tych rozwiązań w odniesieniu do obliczania objętości mas ziemnych, wskazując na uzyskane dokładności oraz czas poświęcony na pozyskanie i opracowanie danych.

Comparison of the results of earth mass measurements conducted by means of laser scanning and GNSS in the context of transport investments

Abstract

Measurements of the earth mass volume is one of the steps involved in earthworks resulting from the planning and conduct the investment in given area. In the case of rail and road investments are particularly important, as it seeks to balance the earthworks. Also important is the aspect of logistics - such as mass transport of bulk materials (e.g. gravel).

Both, before and after the earthwork, is necessary to measure the topographic surface. We can distinguish classical methods (leveling grid, leveling points distributed, leveling longitudinal and lateral), photogrammetric methods, laser scanning (terrestrial and airborne). The choice of measurement method depends mainly on the type of the area concerned, and above all of its size.

In this article the authors focus on the data obtained from the measurements of GPS and laser scanning. The advantages and disadvantages of both these solutions in relation to the calculation of the earth mass volume is indicated, especially the achieved accuracy and the time spent on the acquisition and processing of data.

BIBLIOGRAFIA

1. Gocał J.: *Geodezja inżynieryjno-przemysłowa część I*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Skrypty Uczelniane / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, ISSN 0239-6114, 1999.
2. Poręba M.: *Nowoczesne metody pomiarów mas ziemnych*. Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji Vol. 19, ISBN 978-83-61576-09-9, 2009.
3. Wężyk P.: *Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie*. Roczniki Geomatyki 2006, Tom IV Zeszyt 4
4. PN-B-06050:1999, Geotechnika – Roboty ziemne – Wymagania ogólne
5. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej (Dz. U. 291, poz. 1713)
6. Błaszczak-Bąk, W., Janowski, A., Kamiński, W., Rapiński, J.: *Optimization algorithm and filtration using the adaptive TIN model at the stage of initial processing of the ALS point cloud*. Canadian Journal Of Remote Sensing, vol. 37 issue 6 pp. 583- 589, 2011. DOI: 10.5589/m12-001
7. Janowski, A., Jurkowska, A., Lewczuk, D., Szulwic, J., Zaradny, A.: *Assessment of cliff stability after the demolition of the engineering facilities*. Conference Proceedings of SGEM: Multidisciplinary Scientific Conferences. Albena, Bulgaria, 2014.
8. Rapiński J., Kamiński W., Janowski A., Błaszczak-Bąk W.: *ALS Data Filtration with FuzzyLogic*. Journal of The Indian Society of Remote Sensing, vol. 39 issue 4, pp. 591-597, 2011. DOI: 10.1007/s12524-011-0130-2

