

**OPRACOWANIE METODY ZAUTOMATYZOWANEGO
OKREŚLANIA WYSOKOŚCI DRZEWOSTANÓW
NA PODSTAWIE DANYCH LOTNICZEGO SKANOWANIA
LASEROWEGO ORAZ JEJ WERYFIKACJA
W NADLEŚNICTWIE MILICZ**

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR AUTOMATED STAND
HEIGHT DETERMINATION BASED ON AIRBORNE
LASER SCANNING DATA AND ITS EVALUATION
IN MILICZ FOREST DISTRICT**

Piotr Węzyk, Marta Szostak, Piotr Tompalski

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny,
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Słowa kluczowe: wysokość drzewostanu, lotniczy skanowanie laserowe, SILP, NMT, NMPT
Keywords: stand height, airborne laser scanning, SILP, DTM, DSM

Wprowadzenie

Od ponad 15 lat w Lasach Państwowych stosowany jest System Informatyczny Lasów Państwowych (SILP) będący standardem we wszystkich 431 nadleśnictwach. System ten, w jednym z modułów (LAS), zawiera bazę szczegółowych informacji opisowych (atrybutów) o każdym z około 8 milionów pododdziałów będących w administracji PGL LP. Poprzez tworzenie połączeń w oprogramowaniu GIS, tablice bazy atrybutowej SILP/LAS można połączyć relacją z geometryczną bazą danych, tj. – poligonami leśnej mapy numerycznej (LMN). Razem tworzą one poprawną topologicznie warstwę przestrzenną zawierającą wiele atrybutów pochodzących z leśnej inwentaryzacji i planu urządzania lasu. Biorąc pod uwagę przepisy zawarte w Instrukcji Urządzania Lasu (IUL, 2003), baza opisowa (SILP/LAS) oraz geometryczna (LMN) – poza cyklicznym, wykonywanym standardowo co 10 lat, nowym planem urządzania gospodarstwa leśnego – powinny być okresowo aktualizowane na podstawie danych zbieranych w terenie (np. wprowadzanych do rejestratora i z wykorzystaniem odbiornika GPS), bądź też zdalnych zobrazowań (głównie ortofotomap lotniczych i satelitarnych). Coraz częściej biura urządzania lasu i gospodarki leśnej (BULiGL) wykonują

ce prace inwentaryzacyjne zamawiają ortofotomapy lotnicze, by na ich podstawie weryfikować leśne mapy numeryczne, które w przeszłości powstawały na drodze wektoryzacji dokumentów papierowych.

W ostatnich latach coraz częściej występują niekorzystne czynniki abiotyczne i biotyczne takie jak: wiatrołomy, pożary czy gradacje owadów – stąd opracowania kartograficzne wymagają ciągłej aktualizacji podobnie jak i bazy opisowe. Poza pilotowymi projektami (Będkowski, Stereńczak, 2008; Wężyk, Solecki, 2008; Wężyk i in., 2008a; 2008b) dotyczącymi wykorzystania technologii lotniczego skaningu laserowego w pracach z zakresu urządzania i inwentaryzacji lasu w Polsce, wciąż brakuje przepisów i instrukcji wykonawczych, które umożliwiłyby implementację na szeroką skalę tej technologii w PGL LP. Lotniczy skaningu laserowy (ang. *Airborne Laser Scanning*, ALS) jest aktywnym systemem teledetekcyjnym, dzięki któremu pozyskiwana jest chmura punktów o współrzędnych XYZ z wysoką precyzją (ok. ± 15 cm Z; ± 30 cm XY). Odpowiednie metody filtracji i klasyfikacji zbiorów punktów prowadzą do wygenerowania precyzyjnych modeli w tym: numerycznego modelu terenu (NMT; ang. DTM), numerycznego modelu powierzchni terenu (NMPT; ang. DSM) oraz znormalizowanego numerycznego modelu powierzchni terenu (zNMPT; ang. nDSM) reprezentujących aproksymowaną powierzchnię obiektów (Axelsson, 2000; Wężyk i in., 2008a). Precyzyjne modele terenu mają bardzo wiele zastosowań w gospodarce leśnej, ale mogą służyć także badaniom ekologicznym nad biomasą czy sekwestracją węgla (Gołuch et al., 2009; Wężyk i in., 2008b). Technologia ALS jest w stanie dostarczać precyzyjnych informacji dla dużych obszarów zarówno o rzeźbie terenu, jak i o cechach opisujących strukturę samej roślinności, w tym o wybranych parametrach drzewostanów, takich jak choćby o wysokości drzew (McGaughey et al., 2004). Jest ona niezmiernie ważną cechą taksacyjną określaną tradycyjnymi metodami (wysokościomierze) podczas prac z zakresu inwentaryzacji lasu. Wysokość drzew jest wypadkową takich zmiennych jak: gatunek i wiek drzewa, jakość siedliska czy kondycja drzewa, jednocześnie obrazując efekty zabiegów gospodarczych i zdarzeń losowych zachodzących w drzewostanie. Pomiar wysokości wszystkich drzew w drzewostanie był do tej pory niemożliwy do przeprowadzenia ze względu na wysoką czasochłonność i stosowaną metodykę prac inwentaryzacyjnych. Często błąd określenia wysokości przez taksatora posługującego się nawet precyzyjnym wysokościomierzem (np. Vertex III; Haglöf) może przekraczać dopuszczalne w instrukcjach 5% i wiąże się zwykle z dużą subiektywnością wskazania wierzchołka drzewa oraz jego pochyleniem. Pomiar wysokości stosuje się jedynie do nielicznej reprezentacji drzew na powierzchniach kołowych w wybranych drzewostanach poszczególnych grup stratyfikacyjnych. Wybór miejsca lokalizacji powierzchni kołowej, choć ma charakter stochastyczny (regularna siatka), może prowadzić do analizy niereprezentatywnej grupy (np. lokalna zmienność mikrosiedliska). Zaletą technologii ALS w takim przypadku jest określenie wartości średniej dla całego analizowanego pododdziału, z pominięciem luk czy biogrup innych gatunków, na podstawie statystyk pionowego rozkładu chmury punktów ALS.

Celem prezentowanej pracy było opracowanie zautomatyzowanych procedur weryfikacji atrybutu wysokości drzewostanów zapisanych w bazie danych SILP/LAS dla zasięgu całego obrębu nadleśnictwa, w oparciu o dane pozyskane technologią lotniczego skaningu laserowego. Badania miały potwierdzić przydatność stosowania w praktyce leśnej nowoczesnych technologii teledetekcyjnych, które poza możliwością pomiaru wysokości wszystkich drzewostanów, w szybkim czasie dają wyniki weryfikowalne i obiektywne w odniesieniu nie

tylko do wybranych cech taksacyjnych drzew, ale również zasięgu (granic) i przestrzennej zmienności cechy w obrębie pododdziału.

W ramach prowadzonych badań opracowano i przetestowano metodykę automatycznego procesu przetwarzania chmur punktów ALS, którą zintegrowano z analizami przestrzennymi GIS, w celu korekcji błędów geometrii obiektów podstawowych tworzących LMN, a także detekcji: luk, polan, obszarów nowych zrębów, wiatrołomów czy obszarów o niskim zwarciu drzewostanu (halizny). Wyniki automatycznego procesu weryfikacji i aktualizacji baz danych geometrycznych i atrybutowych (wysokość) w oparciu o technologię ALS porównano do danych referencyjnych opracowanych metodami tradycyjnymi na drodze ekranowej wektoryzacji ortofotomapy lotniczej, wzmocnionej informacją o wysokości drzewostanu (zNMPT). Dane referencyjne dotyczące wysokości drzewostanu pochodziły z baz SILP/LAS, które były aktualizowane w oparciu o informacje zebrane w terenie metodami tradycyjnymi w roku 2006, tj. w roku poprzedzającym nalot ALS.

Teren badań

Jako obiekt badań wybrano obręb nr 1 (Milicz) zlokalizowany w Nadleśnictwie Milicz (RDLP Wrocław; 51° 27" N; 17° 12" E; rys. 1). Przy wyborze obiektu badawczego kierowano się przede wszystkim jego średnią wielkością (w polskich warunkach), a także aktualnością bazy danych opisowych. Pozostała charakterystyka obiektu badań związana była z jego kształtem (kompaktowy, regularny), wiekiem drzewostanu (średnio 60 lat) oraz zróżnicowaniem gatunkowym (udział sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* > 80%; tab. 1) i układem siedlisk leśnych, jak również zróżnicowaniem rzeźby terenu.

Tabela 1. Skład gatunkowy drzewostanów w obrębie Milicz

Gatunek	Powierzchnia analizowana w obrębie [ha]	Udział powierzchni [%]	Analizowana liczba pododdziałów [szt.]
So	4393,43	82,06	1084
Bk	356,33	6,66	73
Db	308,21	5,76	95
Olcz	104,92	1,96	75
inne	190,93	3,57	107
Razem	5 353,82	100,00	1434



Rys. 1. Teren badań – Nadleśnictwo Milicz (RDLP Wrocław)

Metodyka

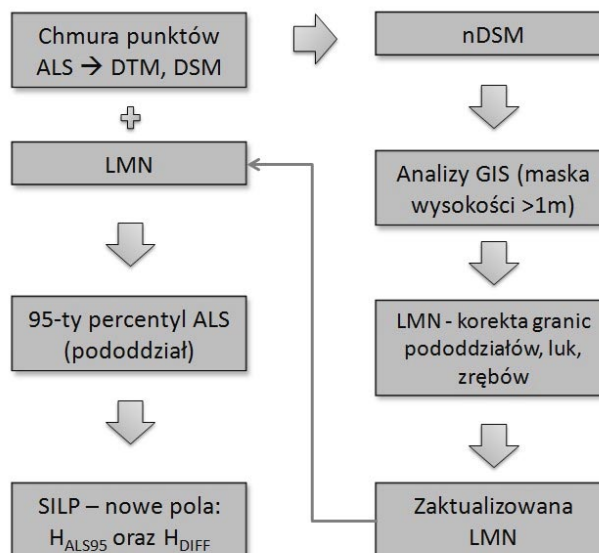
Dane ALS dla Nadleśnictwa Milicz zostały pozyskane w ramach projektu badawczego realizowanego na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych w lipcu 2007 roku z wykorzystaniem skanera Falcon II firmy TopoSys. Podczas nalotu dokonano rejestracji wielospektralnym skanerem linijkowym Toposys (16 Bit; 4 kanały: R, G, B, NIR; rozdzielczość terenowa 0,25 m; GoeTIFF), uzyskując ortoobraz bliski tzw. rzeczywistej ortofotografii (ang. *true ortho*). Wyrównane dane ALS przekazane zostały przez wykonawców w postaci plików ASCII z zapisem kolejnego echa sygnału (FE i LE) oraz jego intensywności (Stereńczak, 2009; Wężyk i in., 2008b).

W oprogramowaniu Terrascan i Terramodeler (Terrasolid Ltd.), a także FUSION (USDA Forest Service, McGaughey, 2007) wygenerowano: numeryczny model terenu (algorytm w oprogramowaniu Terrascan autorstwa Axelsson 2000) oraz numeryczny model powierzchni terenu zapisując je do postaci siatki o oczku 1,0 m (ASCII). Bardzo ważnym etapem przetwarzania danych było uzyskanie poprawnego znormalizowanego numerycznego modelu powierzchni terenu (zNMPT), na który wpływ ma zarówno dokładność NMT jak i NMPT. Parametry generowanego modelu NMPT dobrano na podstawie wcześniejszych prac zespołu (Tompalski et al., 2009). Na poszczególnych etapach przetwarzania danych, takich jak: wektoryzacja ekranowa czy generowanie modeli rastrowych (GRID) z danych referencyjnych (SILP) oraz automatyzacja analiz przestrzennych GIS, wykorzystano oprogramowanie ArcGIS 9.3 (ESRI), w tym narzędzie ModelBuilder. Ze względu na dużą ilość danych zastosowano makropolecenia i tryb wsadowy, przy czym chmurę punktów przetwarzano w oknie o wielkości 1000 x 1000 m. Pozyskanie danych referencyjnych do aktualizacji bazy opisowej polegało na weryfikacji przebiegu granic pododdziałów zapisanych w geometrycznej bazie danych LMN (SHAPE ESRI) wykonywanej przez operatora na ekranie komputera. Większość modyfikacji dotyczyła zmiany przebiegu granic pododdziałów (linii podziału), ale wektoryzowano także nowe obiekty (tzw. luki) wewnątrz drzewostanów. Weryfikacji i aktualizacji dokonano na obrazie cyfrowej ortofotomozaiki wzmocnionej barwną kompozycją modelu zNMPT (Wężyk i in., 2008b; Tompalski et al, 2009). Model ten poddano reklasyfikacji na wartości: powyżej oraz poniżej 1,0 m. Wygenerowano obszary z pokrywą drzewostanu (ID = 0) oraz obszary jej pozbawione (luki, zręby, halizny; ID = 1). Na uzyskanych w ten sposób klasach przeprowadzono generalizację, eliminując obszary mniejsze niż 200 m², nie spełniające warunków zdefiniowanych w IUL (2003), traktujących je jako luki.

Po uzyskaniu poprawnej wektorowej LMN przeprowadzono prace zmierzające do aktualizacji wysokości drzewostanu w opisowej bazie danych SILP/LAS. Wysokość zweryfikowanych geometrycznie pododdziałów (średnia wartość dla całego pododdziału z wyłączeniem wykrytych luk, oznaczona dalej symbolem H_{95ALS}) określano stosując algorytmy zawarte w programie FUSION (McGaughey, 2007), wykorzystując w tym celu wartość 95 percentyla wysokości znormalizowanej chmury punktów.

Na podstawie bazy danych SILP/LAS wygenerowano obrazy rastrowe (GRID) reprezentujące wysokość drzewostanów gatunku głównego (H_{SILP}) wg inwentaryzacji przeprowadzonej metodami tradycyjnymi. W dalszych krokach model rastrowy reprezentujący H_{SILP} porównywano z modelem wysokości ALS (H_{95ALS}), uzyskując w ten sposób raster obrazujący różnice wysokości drzewostanów (H_{Diff}) określanych tymi dwoma metodami. W bazie danych SILP utworzono dwa nowe pola: H_{95ALS} oraz H_{Diff} i wypełniono je wartościami (w trybie automatycznym) z wykorzystaniem aplikacji ModelBuilder ESRI (rys. 2).

Rys. 2. Schemat automatycznej metody aktualizacji baz danych SILP oraz LMN z wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego



Wyniki

Weryfikacja i aktualizacja bazy geometrycznej LMN

W wyniku przeprowadzonej fotointerpretacji i wektoryzacji ekranowej ortofotomozaiki, wzmocnionej wartościami modelu zNMPT, wykryto automatycznie 928 luk (94% więcej w stosunku do danych referencyjnych), które stanowiły 375,54 ha (10,1% więcej niż wskazuje referencja). Średnia wielkość automatycznie wykrytej luki była większa aż o 43,3% od średniej wartości określonej manualnie przez operatora, przy czym zgodność lokalizacji luk (występowanie w tym samym miejscu, wyrażone jako procent części wspólnej z analizy przestrzennej GIS) wyniosła 85,6% (tab. 2).

Tabela. 2. Wyniki aktualizacji bazy geometrycznej LMN metodami: manualnej wektoryzacji ekranowej oraz na drodze automatycznego przetwarzania danych ALS.

Typ aktualizacji	Powierzchnia [ha]	Liczba luk [szt.]	Średnia powierzchnia [ha]	Poprawna lokalizacja [szt.]
Manualna na ortofotomozaice/zNMPT	341,18	478	0,71	478
Automatyczna zNMPT (ALS)	375,54	928	0,40	409
Różnica obu metod	34,36	450	0,31	69

W celu weryfikacji wysokości drzewostanów zapisanych w bazie SILP dokonano porównania do wartości H_{95ALS} drzewostanów dla analizowanego obszaru. Sprawdzone istotność różnic (STATISTICA 9) wykorzystując nieparametryczny test Wilcoxona dla par zmiennych. Wykazał on, iż różnice dla badanego obszaru, jak i w rozbiciu na poszczególne główne gatunki lasotwórcze, były wysoce istotne ($p < 0,05$).

Analiza wartości różnic wysokości (H_{Diff}) przeprowadzona dla wszystkich drzewostanów w badanym obrębie wykazała, iż metoda tradycyjna (referencja) przy uwzględnianiu znaków odchyłek, zaniża wynik o wartość +2,28 m. Przy analizowaniu jedynie wartości bezwzględnych (modułów liczb) różnic dla wszystkich drzewostanów, wzrastają one do wartości 3,19 m (tab. 3). Uwzględniając powierzchnię poszczególnych pododdziałów (wagując H_{Diff} powierzchnią poligonu) uzyskano wartości wynoszące +2,38 m (przy uwzględnieniu znaków odchyłek) oraz 2,70 m (wartości bezwzględne bez znoszenia się znaków odchyłek). Stwierdzono jednoznacznie zniżenie wartości wysokości dostępnej w bazie SILP/LAS, wprowadzanej na podstawie naziemnych pomiarów wykonywanych wysokościomierzem (bardzo duże wartości różnic – np. niezaktualizowane zręby) (rys. 3 i 4).

Średnia różnica określenia wysokości wszystkich drzewostanów sosnowych metodą ALS w stosunku do tradycyjnej wykazała wartość na poziomie +2,21 m, wskazując na zniżenie wartości przez pomiar tradycyjny. Jeśli wszystkie wartości H_{Diff} potraktować jako wartości bezwzględne to okazuje się, że średnia różnica utrzymuje się na podobnym poziomie (2,83 m; tab. 3). Analizując te wyniki pod kątem udziału powierzchniowego poszczególnych drzewostanów sosnowych stwierdzono, iż średni błąd wysokości drzewostanu sosnowego określonego metodą ALS w stosunku do danych referencyjnych obniżył się do +2,33 m. Analizując jedynie wartości bezwzględne różnic wagowanych powierzchnią, błąd osiągnął poziom 2,55 m.

Przeprowadzona analiza różnic wysokości (przy uwzględnianiu wartości odchyłek z przeciwnymi znakami) dla poszczególnych klas wieku drzewostanów sosnowych wykazała, iż w przypadku młodszych klas wieku (do około 60 lat), wyniki otrzymane na drodze przetwarzania chmury punktów ALS mają wyższe wartości o ponad 2,0 m w stosunku do danych zapisanych w bazach SILP/LAS. Wartości różnic H_{Diff} okazały się największe dla klasy I: +3,13 m (odch. std. = 4,48 m), maleją dla klasy II do wartości +2,96 m (odch. std. = 1,86 m) oraz ostatecznie dla klasy III +2,33 m (odch. std. = 2,10 m). Wskazuje to na zasadniczy problem aktualizacji danych i ich właściwej oceny w sytuacji szybko rosnących upraw (młodniki, tyczkowiny) oraz ich dostępności dla taksatora. Odchyłki różnic wysokości w starszych klasach wieku (powyżej 60 lat) charakteryzowały się mniejszymi wartościami różnic, nawet zaledwie do 0,5 m. Średnio odchyłki te w znaczących klasach wieku wynosiły: +1,13 m (odch. std. = 3,52 m) w IV klasie, +1,35 m (odch. std. = 4,38 m) w V klasie oraz +0,48 m (odch. std. = 6,40 m) w VI klasie.

Tabela 3. Różnica wysokości (H_{Diff}) drzewostanów określanych metodami ALS oraz tradycyjnymi pomiarami podczas inwentaryzacji lasu (baza SILP)

Gatunek główny	Średnia różnica H_{Diff} [m]	Moduł średniej H_{Diff} [m]	Średnia H_{Diff} wagowana powierzchnią pododdziału [m]	Moduł średniej H_{Diff} wagowanej powierzchnią pododdziału [m]
Gat. razem	+2,28	3,19	+2,38	2,70
So	+2,21	2,83	+2,33	2,55
Bk	+3,61	3,93	+2,59	2,85
Db	+2,28	4,96	+2,84	3,86
Olcz	+1,22	4,06	+2,07	3,58

W przypadku analizowanych liściastych gatunków głównych, średnia różnica wysokości (H_{Diff}), w wariancie uwzględnienia znaków odchyłek i przy zastosowaniu wartości bezwzględnych, przyjęła odpowiednio wartości: Bk +3,61 m (3,93 m), Db +2,28 m (4,96 m) i Olcz +1,22 m (4,96 m). Po zastosowaniu wagowania powierzchnią poszczególnych pododziałów uzyskano odpowiednio wyniki dla drzewostanów: Bk +2,59 m (2,85 m), Db +2,84 m (3,86 m) i Olcz +2,07 m (3,58 m).

Uzyskane wyniki dla wszystkich analizowanych gatunków były przeciwne w stosunku do wyników podawanych przez wielu autorów, polegających na zaniżaniu pomiaru wysokości drzew w przypadku stosowania metody ALS (Andersen et al., 2006; Hyypä, Inkinen, 2004; Persson et al., 2002; Maltamo et al., 2004; McGaughey et al., 2004; Abraham, Adolt, 2006). Uzyskane wyniki były jednocześnie zgodne z podobną analizą wykonaną dla obrębu Piasek w nadleśnictwie Chojna (Wężyk et al., 2010). Ponieważ chmura punktów ALS nie może fizycznie przewyższać wierzchołków drzew, należy przypuszczać, że dane referencyjne obarczone były błędem pomiarowym.

Wnioski

Otrzymane dla obrębu Milicz wyniki dowiodły jednoznacznie możliwości wykorzystania danych ze skanowania laserowego ALS w zautomatyzowanym procesie aktualizacji baz danych GIS, tj. geometrycznej (rozumianych jako korekcja przebiegu granic obiektów podstawowych LMN) oraz opisowej (atrybutów wysokości drzewostanu w polach bazy SILP/LAS). Wykorzystanie automatycznego trybu analizy modelu zNMPT może znacznie przyspieszyć bardzo kosztowne prace z zakresu pomiarów geodezyjnych granic wydzieleni oraz dać precyzyjną informację o lokalizacji powstałych zrębów czy gniazd. Do chwili obecnej brak jest ścisłej regulacji w IUL (2003) dotyczącej określania lokalizacji większych luk czy biogrup w poszczególnych wydzieleniach. Istnieje jedynie wymóg opisu miejsca bez podania ścisłej lokalizacji, choć są one elementami LMN. Przewaga technologii ALS nad ortofotomapami polega na tym, iż na modelu zNMPT brak jest przesunięcia radialnego jakim obciążona jest ortofotomapa generowana zazwyczaj na NMT i przez wielu użytkowników traktowana jako obraz referencyjny. Automatyczna analiza rozkładu przestrzennego wysokości na modelu zNMPT daje możliwość obiektywnego wyboru lokalizacji powierzchni kołowych w drzewostanie, eliminując w ten sposób brak jego homogeniczności. Analiza chmury punktów ALS w obrębie całego pododdziału leśnego, pod kątem średniej wysokości wszystkich rosnących w jego granicach drzew, jest znacznie bardziej obiektywna niż pomiar kilku losowo wybranych powierzchni kołowych. Dane z lotniczego skanowania laserowego stanowią dobrą podstawę dla zaawansowanego modelowania statystycznego, którego celem jest precyzyjne oszacowanie tych cech drzewostanu, które korelują z przestrzennym (pionowym i poziomym) rozmieszczeniem punktów z chmury ALS. Dotyczy to przede wszystkim: pierśnicy drzew i wysokości, a w konsekwencji zasobności drzewostanów, parametru będącego podstawą sporządzania planu urządzenia gospodarstwa leśnego (etatów, planów pozyskania). Inne cechy podlegające modelowaniu to np.: wysokość podstawy korony, wysokość Lorey'a, liczba drzew (zagęszczenie) czy ich jakość (Andersen, Breidenbach 2007; Hollaus et al., 2009; Maltamo et al., 2009; Nésset, 2002).

Okresowa inwentaryzacja drzewostanów z wykorzystaniem technologii ALS i fotogrametrii cyfrowej gwarantuje z całą pewnością utrzymanie baz danych SILP oraz LMN na

wysokim poziomie aktualności i poprawności, a jednocześnie pozwala na ograniczenie kosztownych prac terenowych. W aspekcie zapowiadanych w Polsce projektów laserowego skanowania lotniczego, które mają pokryć około 145 000 km², należy jak najszybciej wprowadzić odpowiednie wewnętrzne modyfikacje do IUL (PGL LP) tak, aby umożliwić wykorzystanie danych ALS w inwentaryzacji lasu oraz całym pakiecie innych zadań związanych z bioróżnorodnością czy zrównoważonym rozwojem lasów.

Literatura

- Abraham J., Adolt R., 2006: Stand height estimations using aerial images and laser scanning data. International Workshop „3D Remote Sensing in Forestry”. Wien, 24-31.
- Andersen H.E., Reutebuch S.E., Mcgaughey R.J. 2006: A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 32 (5), 355-366.
- Andersen H.-E., Breidenbach J., 2007: Statistical Properties of Mean Stand Biomass Estimators in a Lidar-Based Double Sampling Forest Survey Design. [In:] Rönnholm P., Hyypä H., Hyypä J., (eds.), ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland.
- Axelsson P., 2000: DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII/4B, Amsterdam, 203-210.
- Będkowski K., Stereńczak K., 2008: Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki* t.6, z.8, PTIP, Warszawa, 55-60.
- Gołuch P., Borkowski A., Józków G., Tymków P., Mokwa M., 2009: Application of Digital Terrain Model generated from Airborne Laser Scanning data in Hydrodynamic Modelling. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXI No. 3, 61-72.
- Hollaus M., Wagner W., Schadauer K., Maier B., Gabler K., 2009: Growing stock estimation for alpine forests in Austria: A robust lidar-based approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(7): 1387-1400.
- Hyypä J., Inkinen M., 1999: Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, vol. 16, No. 2, 27-42.
- IUL, 2003: Instrukcja Urzędzenia Lasu – załącznik do Zarządzenia nr 43 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 18 kwietnia 2003 r.
<http://www.lasy.gov.pl/dokumenty/gospodarka-lesna/urzadzanie/iul>
- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkänen J., Yu X., 2004: The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. Abstract. *Canadian Journal of Forest Research*, 1791–1801.
- Maltamo M., Peuhkurinen J., Malinen J., Vauhkonen J., Packalén P., Tokola, T., 2009: Predicting tree attributes and quality characteristics of scots pine using airborne laser scanning data. *Silva Fennica*, 43(3): 507-521.
- McGaughey R.J., 2007: Fusion/ldv: Software for lidar data analysis and visualization. Software manual. USDA Forest Service. Pacific Northwest Research Station.
- McGaughey R., Carson W., Reutebuch S., Andersen H.-E., 2004 Direct measurement of individual tree characteristics from LIDAR data. Proceedings of the Annual ASPRS Conference, 23–28 May 2004. Denver: *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*.
- Naesset E., 2002: Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 88-99.
- Persson A., Holmgren J., Söderman U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 68, No. 9, 925–932.
- Stereńczak K., 2009: Single tree detection based on airborne LIDAR (ALS) data. *Annals of Geomatics*, Vol. VII, 2 (32), 121-126. PTIP, Warszawa.
- Tompalski P., Wężyk P., de Kok R., Kukawski M., 2009: Determining the number of trees using airborne laser scanning and true orthoimagery. *Annals of Geomatics*, Vol. VII, 2 (32), 133-141. PTIP, Warszawa.

- Wężyk P., Borowiec N., Szombara S., Wańczyk R., 2008a: Generowanie numerycznych modeli powierzchni oraz terenu w Tatrach na podstawie chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS). Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 18, 651-661.
- Wężyk P., Solecki K., 2008: Określanie wysokości drzewostanów Nadleśnictwa Chojna w oparciu o lotniczy skaningu laserowy (ALS). [In:] Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 18, 663-672.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M., 2008b: Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. 8th International Conference on LiDAR Applications in Forest Assessment and Inventory. Sept. 17-19. Edinburgh, UK. (CD), 636-645.
- Wężyk P., Szostak M., Tompalski P., Zajączkowski G., 2010: The role of Airborne Laser Scanning in updating and revision of GIS databases – a case study in the Polish State Forest (Chojna District). Proceedings of SilviLaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, 14-17.09.2010, Freiburg, Germany.

Abstract

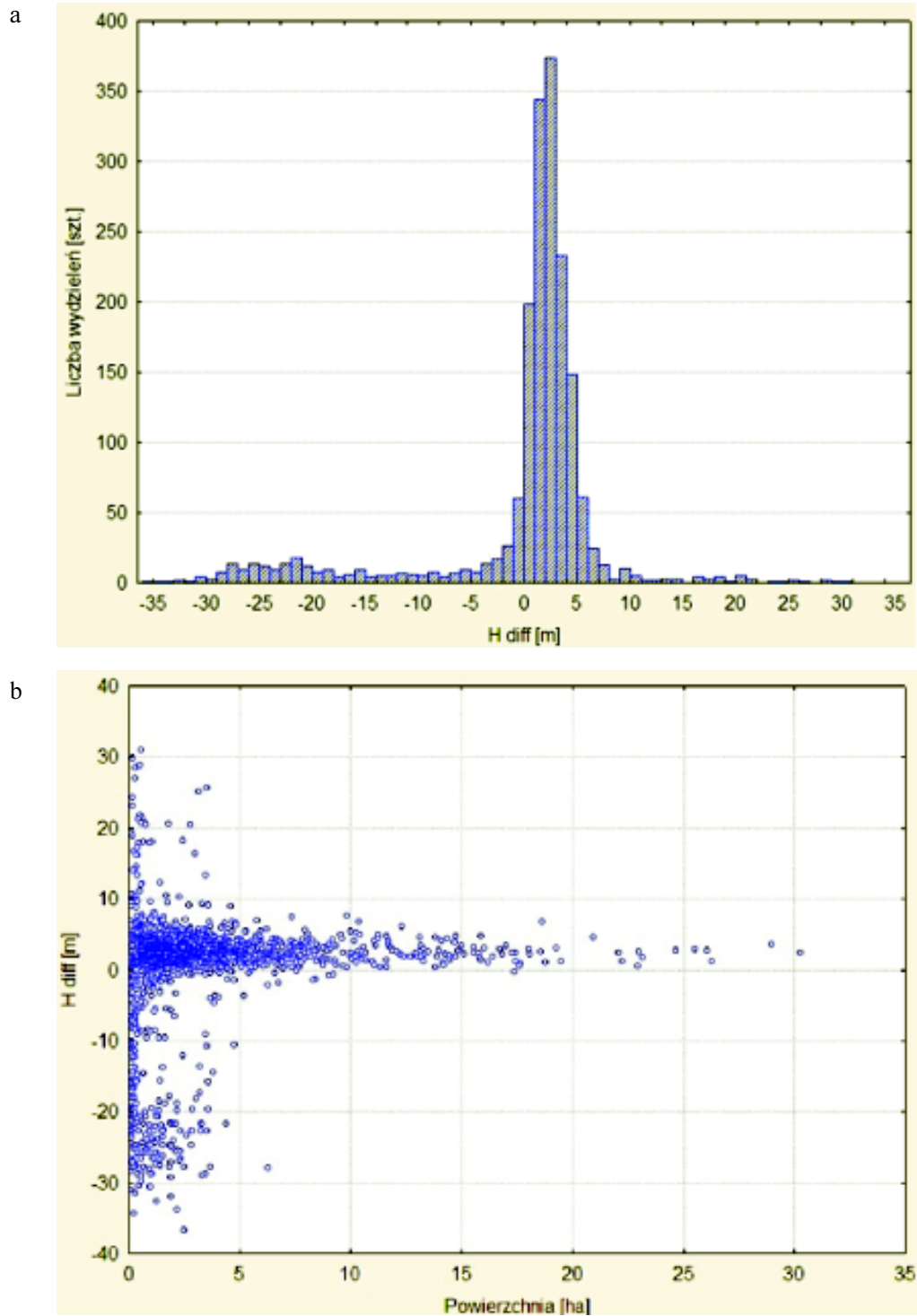
The aim of the research was implementation of airborne laser scanning (ALS) data for automated updating of compartment borders (LMN – forest digital map) and height attribute (SILP – descriptive database). The Milicz forest district was chosen as the test area. New fields in the database were filled with the mean stand height value and the difference to existing height value from the last inventory (2006). The updated compartment height values were calculated without gaps and without the 5 m border buffer belt of the stand as 95th percentile of normalized height point cloud values. In order to compare these results with tree height values from the forest inventory, raster layers (GRID) representing both heights were generated and map algebra was used to calculate the differences (H_{diff}). The study area consisted of 1,434 compartments with total area equal to 5,353.82 ha, from which 1084 compartments were pine stands (4,393.43 ha; 82.06%). The height values from the descriptive SILP/LAS database were on average lower with regard to all analyzed tree species and stands than the heights from ALS data. The difference was equal to +2,3m (3.2m for absolute values). It was found that numerous pine young stands significantly contributed to the height difference value due to their outdated height parameter, which sometimes even reached the value by 3.13m lower than ALS data. The research confirmed that the use of modern remote sensing technologies like ALS in forest practice opens a new space in the quick and precise forest inventory. The proposed automated procedures of stand height verification based on airborne laser scanning data allow for fast assessment of geometric and descriptive data update status.

dr inż. Piotr Wężyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl

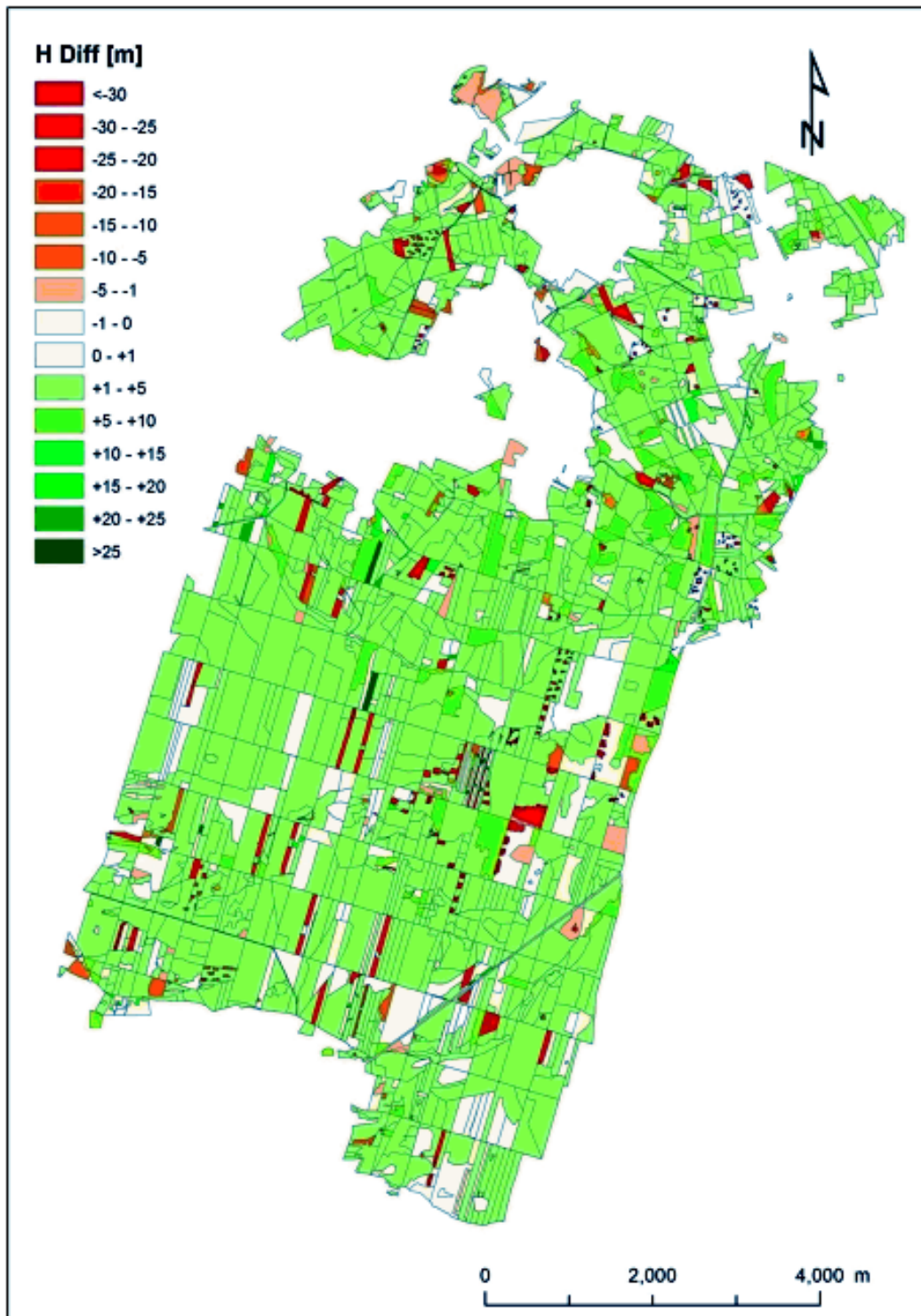
dr inż. Marta Szostak
rlszosta@cyf-kr.edu.pl

mgr inż. Piotr Tompalski
piotr.tompalski@ur.krakow.pl

tel.: +48 12-662-5082



Rys. 3. a – histogram liczebności pododdziałów w poszczególnych stopniach odchyłki, b – wykres rozrzutu odchyłki [m] w zależności od powierzchni pododdziałów [ha]



Rys. 4. Mapa przestrzennego rozmieszczenia wartości różnic H_{Diff} w analizowanym obrębie Milicz