

**OKREŚLENIE BIOMASY SOSNY ZWYCZAJNEJ
(*PINUS SYLVESTRIS* L.)
W PUSZCZY NIEPOŁOMICKIEJ NA PODSTAWIE
PRZESTRZENNEGO ROZKŁADU CHMURY PUNKTÓW
NAZIEMNEGO SKANINGU LASEROWEGO**

BIOMASS AND VOLUME PROFILE OF THE SCOTS PINE
(*PINUS SYLVESTRIS* L.) IN THE NIEPOŁOMICE FOREST
BASED ON TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA –
A CASE STUDY

Piotr Wężyk, Marta Szostak, Piotr Tompalski

Katedra Ekologii Lasu, Laboratorium Geomatyki, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Słowa kluczowe: masa części nadziemnej, TLS, woksel, sekwestracja węgla
Keywords: above ground biomass, TLS, voxel, carbon sequestration

Wprowadzenie

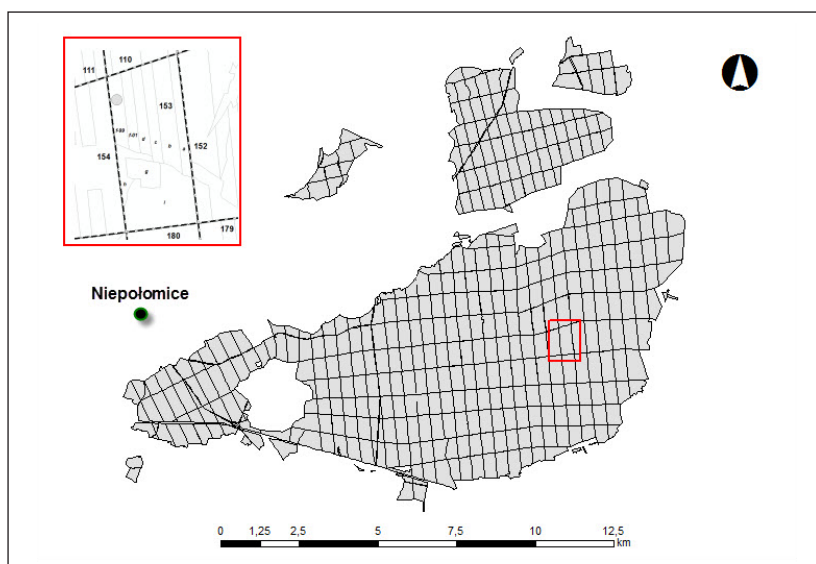
Wsparcie monitoringu oraz zarządzania środowiskiem przyrodniczym, na drodze wykorzystania potencjału jednej z najnowocześniejszych technologii geoinformacyjnych, jaką jest LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*), jest niezwykle aktualną problematyką badawczą i wdrożeniową. Publikacje naukowe (Chasmer i in., 2004; Hyypä i in., 2004.; Maas i in., 2008; Wężyk i in., 2009) wskazują na nowatorskie podejście w określaniu wybranych cech taksacyjnych i parametrów pomiarowych drzew (zbieranych często podczas inwentaryzacji lasu lub prac monitoringowych) metodą naziemnego (ang. *Terrestrial Laser Scanning* – TLS) oraz lotniczego skanowania laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning* – ALS). W zarządzaniu przestrzenią leśną oraz modelowaniu zmian w krajobrazie z wykorzystaniem analiz przestrzennych GIS, informacja 2D staje się już niewystarczająca. Istnieje silne zapotrzebowanie także na informację typu 3D. Najnowocześniejsze technologie teledetekcyjne, takie jak naziemny skanowanie laserowe (TLS) umożliwiają pomiar 3D rzeczywistej struktury przestrzennej obiektów, w tym drzew. Chmury punktów TLS reprezentują kształty drzew i powierzchnie koron (Bucksch i in., 2010; Henning, Radtke, 2006; Király, Brolly, 2010; Reitberger i in., 2010).

Pomiary drzew i drzewostanów realizowane tradycyjnymi metodami coraz częściej zastępowane są zautomatyzowanymi analizami chmur punktów, pochodzącymi ze skaningu laserowego. Tą metodą określa się m.in.: średnicę pnia (np. na 1,3 m), wysokość drzewa, podstawę korony drzewa, lokalizację pnia, długość, szerokość i powierzchnię korony drzewa oraz objętość pnia i korony. Równoległe do prac nad TLS, obserwuje się duże zainteresowanie badaczy modelowaniem powierzchni koron drzew (Model Koron Drzew – MKD), opartym głównie na przetwarzaniu chmury punktów lotniczego skanowania laserowego (Wężyk, 2008; Będkowski, Wężyk, 2010), w kierunku automatycznego określania liczby drzew (Wężyk i in., 2010) i ich wysokości.

Technologie zdalnego obrazowania (zarówno z poziomu lotniczego, jak i satelitarnego czy naziemnego), aby otrzymane wyniki analiz można było uznać za wiarygodne, wymagają odpowiednich danych referencyjnych. Przedmiotem prezentowanej pracy była metodycznie poprawna demonstracja badań nad wykorzystaniem TLS do określania biomasy testowej sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Prace rozpoczęto od czasochłonnego pozyskania danych referencyjnych, a następnie przystąpiono do pozyskania chmury punktów TLS i jej przetworzenia. Celem przeprowadzonego testu było ustalenie zależności pomiędzy wybranymi cechami taksacyjnymi i parametrami pomiarowymi, takimi jak: masa i objętość nadziemnej części drzewa oraz poszczególnych frakcji, a także wysokością drzewa. Prace koncentrowały się nad wyznaczeniem pionowego profilu (rozkładu przestrzennego) biomasy części nadziemnej stojącej sosny zwyczajnej, metodą zautomatyzowanych procedur (algorytmów), przetwarzających chmury punktów TLS.

Teren badań

Realizację prac badawczych (dzięki uprzejmości firmy FARO Polska), rozpoczęto w maju 2009 roku, w oddziale 153 w kompleksie głównym Puszczy Niepołomickiej na terenie Nadleśnictwa Niepołomice (Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych w Krakowie;



Rys. 1. Lokalizacja powierzchni badawczej – kompleks główny Puszczy Niepołomickiej, wydzielanie 153f

N 50°02'16.72", E 20°24'2.1"; rys. 1). Powierzchnię testową zlokalizowano w centralnej części pododdziału 153f, który przez SILP (2009) był opisany jako jednopiętrowy drzewostan sosnowy (sosna zwyczajna) o średnim wieku 147 lat, średniej pierśnicy 42 cm i wysokość 27 m. Drzewostan w tym wydzieleniu rósł na siedlisku boru mieszanego wilgotnego (BMw) i znajdował się w II klasie bonitacji. Wydzielenie 153f zajmowało powierzchnię 1,4 ha, a zasobność drzewostanu wynosiła 277,82 m³ (SILP, 2009).

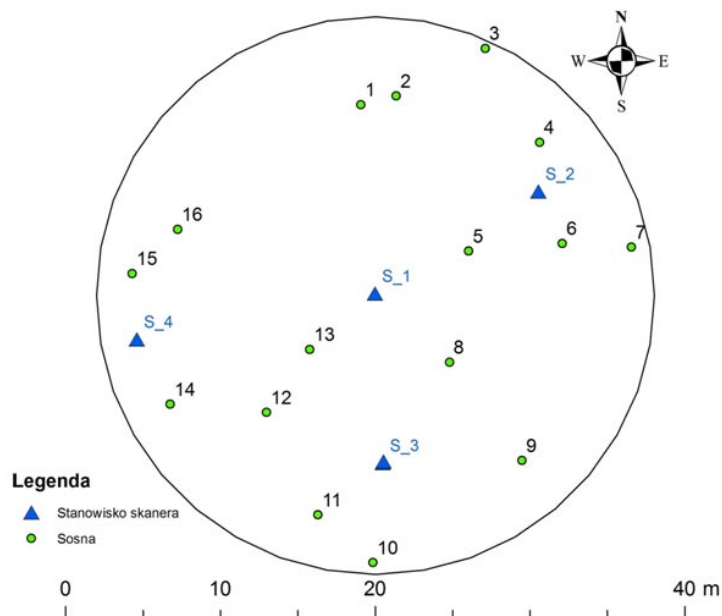
Powierzchnia testowa miała kształt koła o promieniu 18 m (1017,88 m²), a w jej obrębie znalazło się 16 stojących sosen. W chwili przeprowadzania badań drzewostan znajdował się w fazie całkowitego uprzątania drzewostanu, co pozwoliło na bardzo dogodny wybór lokalizacji 4 stanowisk skanera FARO oraz na przeprowadzenie pomiarów bezpośrednich na ściętych drzewach.

1. Metodyka

Prace terenowe

W zaprezentowanej pracy przyjęto autorską metodykę wielostanowiskowego skanowania, polegającą na obrazowaniu drzewostanu z jednej centralnej i trzech rozłożonych na okręgu stanowisk skanera (Wężyk i in., 2007; rys. 2).

Etap I. Prace TLS rozpoczęto od wyznaczenia optymalnej pozycji centralnej (S_1 środka powierzchni kołowej) oraz trzech kolejnych (S_2 do S_4) stanowisk skanera, a także od rozmieszczenia pięciu sfer (kul) referencyjnych, służących do integracji pozyskanych chmur



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia stanowisk (S_1 ÷ S_4) naziemnego skanera laserowego (TLS) wraz z lokalizacją drzew na powierzchni kołowej



Rys. 3. Skaner FARO PHOTON 80 ze zintegrowaną kamerą cyfrową Nikon

punktów. Skanowania dokonano przy użyciu naziemnego skanera laserowego FARO PHOTON 80 (rys. 3) według metodyki prac, opracowanej podczas realizacji projektu dla DGLP (Wężyk i in., 2007). Skaner fazyowy FARO, obracając się wokół własnej osi (obrót 180° , wiązka lasera wysyłana w obu kierunkach), wysyłał promieniowanie podczerwone w płaszczyźnie pionowej (zakres -70° do $+90^\circ$), dzięki czemu skanowaniem objęta była niemal cała sfera 3D powierzchni kołowej (nie licząc niewielkich przestrzeni bezpośrednio pod skanem). Rozdzielczość skanowania ustalono na poziomie 1/4 pełnej rozdzielczości urządzenia, co pozwala w trudnych warunkach drzewostanowych na stosunkowo szybkie pozyskanie chmury punktów (ok. 7 minut na stanowisko).

Etap II. W tym etapie przeprowadzono podstawowe pomiary referencyjne dla pozyskania wybranych cech dendrometrycznych oraz innych parametrów pomiarowych drzew, polegające na określeniu:

- współrzędnych biegunowych poszczególnych pni za pomocą busoli (SUUNTO) oraz taśmy mierniczej;
- pierśnicy drzewa przy pomocy średnicomierza; pomiar ten był wykonany w pięciu kierunkach, to jest ramieniem średnicomierza skierowanym do środka powierzchni kołowej i prostopadle do tego kierunku oraz dodatkowo 3 pomiary prostopadle do kierunku skanowania z poszczególnych zewnętrznych (S_2÷S_4) stanowisk skanera;
- obwodu pnia sosny na wysokości 1,3 m od podstawy pnia, wykonanego przy pomocy taśmy mierniczej;
- wysokości wierzchołka koron sosen, przy pomocy wysokościomierzy Suunto i Vertex (Haglöf);
- wysokości podstawy korony drzew (pierwsza wyraźna żywa gałąź z zielonymi igłami) przy użyciu wysokościomierza Vertex (Haglöf).

Etap III. W ostatnim etapie prac terenowych przeprowadzono bezpośrednie pomiary dendrometryczne na ściętych sosnach (rys. 4). Na leżących drzewach dokonano określenia długości pnia poprzez pomiar odcinka pomiędzy odziomkiem a wierzchołkiem drzewa, długości korony oraz maksymalnej szerokości korony. Ponadto trzy wybrane sosny zostały pomierzone sposobem sekcyjnym (Bruchwald, 1999), tj. przyjmując dla dwóch pierwszych sekcji długość 0,5 m, natomiast dla pozostałych 1,0 m. Pomiar średnicy i obwodu sekcji wykonywano taśmą w jej środku. Na jednej sośnie, która charakteryzowała się średnią, dobrze rozwiniętą prawidłowo zeskanowaną koroną, przeprowadzono szczegółowe badania nad określeniem biomasy korony (w stanie świeżym), tj.: grubych konarów i zdrewniałych gałęzi, pędów wraz z igłami (tzw. cetyny) oraz powszechnie występującej w Puszczy Niepołomickiej jemioly (*Viscum album* L.). W terenie, poza pomiarem wykonanym wagą elektroniczną, pobrano próbki pędów z igłami do badań laboratoryjnych, w celu określenia ich masy suchej (s.m.) oraz udziału poszczególnych frakcji.

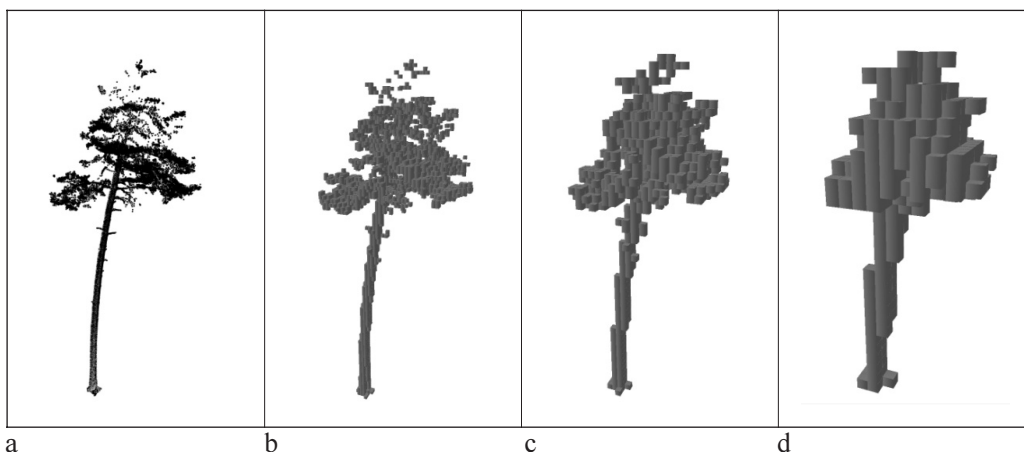


Rys. 4. Pomiary biometryczne realizowane na ściętych sosnach: a – pomiar sekcyjny, b – określanie masy konarów i gałęzi korony sosny

Prace kameralne

Chmury punktów TLS po ich wzajemnym wpasowaniu (ang. *matching*) do lokalnego układu współrzędnych (0, 0, 0) stanowiska S_1 (ang. *master scan*) oraz odfiltrowaniu szumów i niskich wartości odbicia (FARO Scene 4.8) wyeksportowano do formatu XYZ (ASCII). W dalszej kolejności przetwarzano je w oprogramowaniu Terrasolid, w celu usunięcia dalszych błędów (tzw. *low points* pod aproksymowaną powierzchnią gruntu oraz *ghost points* nad wierzchołkami) oraz poprawnej klasyfikacji. Stosując algorytmy dostępne w module TerraScan (Terrasolid) stworzono klasy punktów: grunt, niska vegetacja, wysoka vegetacja. Chmura punktów TLS została manualnie podzielona na osobne zbiory danych (format plików LAS 1.2), reprezentujące pojedyncze drzewa. Pozwoliło to na poprawę tempa przetwarzania danych i analizę wyników na komputerach osobistych.

Zbiory punktów TLS dla pojedynczych sosen zostały poddane przetwarzaniu w kierunku wygenerowania pikseli 3D czyli tzw. wokseli (ang. *voxels*; Popescu, Zhao, 2008; Chasmer i in., 2004) o różnie definiowanej przez operatora wielkości (rozmiarze boku; rys. 5). Zastoso-



Rys. 5. Konwersja chmury punktów TLS do postaci wokseli o różnej wielkości boku: a – chmura punktów, b – 0,25 m, c – 0,5 m, d – 1,0 m

wany autorski algorytm pozwolił także na filtrowanie wokseli, metodą progowania (np. uznanie za wksel bryły zawierającej minimum 3 punkty TLS). Procedura ta została zastosowana dla wszystkich zeskanowanych sosen, w tym dla wybranego drzewa testowego. W tym przypadku woksele dodatkowo podzielono na klasy reprezentujące pień oraz koronę sosny.

Wyniki

Pomiary terenowe wykonane na powierzchni kołowej posłużyły określeniu podstawowych informacji o drzewostanie jak i doskonaleniu automatycznych algorytmów do określania wybranych cech drzew (Wężyk i in., 2010). Średnie wartości pomiarowe dla ściętych 16 sosen w stosunku do danych SILP (aktualność 2009; Plan Urządzania Lasu z 2001 r.) wyniosły odpowiednio: pierśnica 46,0 cm (+4,0 cm różnicy), wysokość 26,0 m (-1,0 m), wysokość podstawy korony 20,0 m (brak danych w SILP/LAS). Wyniki te mają charakter jedynie informacyjny, świadczący o zmienności w pododdziale, gdyż najczęściej losowo wybrana (jak w tym przypadku) próba nie odzwierciedla cech metrycznych lokalnej populacji drzew w wydzieleniu, a dotyczy statystyki całej grupy stratyfikacyjnej.

W celu określenia biomasy pojedynczego drzewa testowego, do dalszych pomiarów wybrano dorodną sosnę o numerze 13 (pierśnica $D = 52,7$ cm, wysokość drzewa $H = 28,3$ m, długość korony $CL = 8,6$ m, podstawa korony $CB = 19,7$ oraz szerokość korony $CW = 9,3$ m), bardzo dobrze zeskanowaną (brak przesłonięć korony i pnia przez inne drzewa) z trzech stanowisk S_1, S_3 i S_4. Na ściętej sosnie przeprowadzono pomiar sekcyjny pnia oraz określono masę świeżych gałęzi (stan świeży = s.św.), cetyny i występującej w koronie jemioly. Miąższość grubizny drzewa testowego wyniosła $3,42$ m³, co przy średniej gęstości drewna w stanie świeżym (800 kg/m³), daje masę około 2736 kg. Masa konarów i gałęzi analizowanego drzewa testowego nr 13 wyniosła $490,0$ kg, a pędów z igłami $109,4$ kg. Kilka osobników jemioly rosnących w szczytowej partii korony sosny miało masę aż $13,5$ kg. Łącznie, całkowita masa drzewa (strzały i korony) wyniosła $3348,9$ kg, przy czym sama korona drzewa testowego ważyła $612,9$ kg (określona pół godziny po ścięciu drzewa; s.św.).

Podczas ważenia poszczególnych frakcji korony, do woreczków foliowych pobrano 6 próbek uigłonych pędów ($892,6$ g; s.św.) z różnych części leżącej korony (tab. 1).

W laboratorium Katedry Ekologii Lasu na Wydziale Leśny Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie określono wagę poszczególnych frakcji w stanie świeżym oraz suchym (s.s.). Suszarki laboratoryjne z podciśnieniem pozwoliły na określenie zawartości wody w próbkach pędów z igłami na średnim poziomie $51,3\%$ (tab. 1). Po wysuszeniu próbek uzyskano łącznie $277,2$ g igieł (śr. próbki $46,2$ g, tj.: $30,9\%$ masy pierwotnej; $63,4\%$ cetyny suchej) i $158,0$ g pędów (śr. próbki $26,3$ g; odpowiednio $17,8\%$ i $36,6\%$). Na podstawie uzyskanych wyników laboratoryjnych i terenowych obliczono łączną masę cetyny (s.s.) drzewa testowego, która wyniosła $53,3$ kg. Masa zielonych żywych igieł wyniosła $34,0$ kg, a niezdrzewniałych pędów $19,3$ kg.

Uzyskane wyniki porównano do wartości określonych na bazie wzoru empirycznego, opracowanego na 113 ściętych sosnach w ramach projektu *Forest Environmental Monitoring and Management System* (FOREMMS; 5FP IST EU), realizowanego w kompleksach Puszczy Niepołomickiej (Socha, Wężyk, 2007). Do porównania wykorzystano uproszczoną formułę wyznaczenia biomasy frakcji korony (tab. 2) w postaci poniższego wzoru empirycznego (1):

Tabela 1. Masa cetyny z korony sosny testowej o numerze 13

Nr próbki	Masa [g]				Frakcja próbki [%]			
	stan świeży (s.św.)	stan suchy (s.s.)			pędy z igłami	woda	igły	pędy
	pędy z igłami	pędy z igłami	igły	pędy				
p1	133,52	63,74	36,66	27,08	47,74	52,26	27,46	20,28
p2	133,60	62,95	39,59	23,36	47,12	52,88	29,63	17,49
p3	180,75	85,45	56,51	28,94	47,27	52,73	31,26	16,01
p4	133,13	64,85	41,64	23,21	48,71	51,29	31,28	17,43
p5	158,27	80,82	56,38	24,44	51,06	48,94	35,62	15,44
p6	153,33	77,37	46,44	30,93	50,46	49,54	30,29	20,17
Suma	892,60	435,18	277,22	157,96	Średnia [%]			
Średnia	148,77	72,53	46,20	26,33	48,73	51,27	30,92	17,81
Korona sosny testowej	Masa [kg]				Frakcja [%]			
	109,35	53,31	33,96	19,35	100,00	–	63,45	36,55

$$B_x = b_0 \times D^{b_1} \times e^{CF} + \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:

- B_x – biomasa frakcji,
- b_0, b_1 – parametry równania,
- D – pierśnica,
- CF – współczynnik korelacji równy $SEE^2/2$, gdzie SEE jest błędem standardowym estymacji,
- ε – błąd przypadkowy rozkładu normalnego.

Wyznaczone ze wzoru empirycznego (1) wartości wykazały największe różnice (tab. 2) na poziomie 33,5% dla cetyny w stanie suchym (17,9 kg różnicy). Najmniejszy błąd wykazała frakcja pędów w stanie świeżym, bo zaledwie na poziomie 4,8%.

Integracja danych (chmury punktów TLS, pomiary biometryczne) pozyskanych w terenie oraz określonych laboratoryjnie umożliwiły prowadzenie analiz nad przebiegiem profilu pionowego, objętości oraz biomasy korony testowej sosny.

Tabela 2. Frakcje biomasy sosny testowej o numerze 13

Frakcja biomasy	Biomasa [kg]		Różnica	
	wzór empiryczny (1)	pomiary terenowe 2009	[kg]	[%]
Pędy świeże (s.św.)	104,11	109,35	-5,24	-4,79
Pędy suche (s.s.)	71,18	53,31	17,87	33,52
Igły świeże (s.św.)	67,32	74,56	-7,24	-9,71
Igły suche (s.s.)	29,91	33,96	-4,05	-11,93

Tabela 3. Objętość korony drzewa wyznaczona na podstawie woksela

Wymiar boku woksela [m]	Objętość [m ³]		
	minimalna liczba punktów wewnątrz woksela		
	1 pkt.	2 pkt.	3 pkt.
0,25	59,3	48,6	41,9
0,5	155,3	139,9	129,5
1,0	336,0	323,0	313,0

Wyniki dotyczące biomasy i objętości korony były rozpatrywane łącznie. Objętość korony obliczono na podstawie wygenerowanych woksela (tab. 3). Docelowy rozmiar piksela 3D wybrano na drodze najlepszego wpasowania w wyniki pomiarów terenowych. Objętość korony (CV) obliczono z wykorzystaniem wzoru empirycznego na paraboloidę obrotową (Wężyk i in., 2008) według wzoru (2):

$$CV = \frac{\pi CW^2 CL}{12} \quad (2)$$

gdzie: CV – objętość korony [m³], CW – szerokość korony [m], CL – długość korony [m].

Objętość korony sosny, obliczona według wzoru na paraboloidę na podstawie danych z pomiarów terenowych na drzewie leżącym, wyniosła 292,1 m³. Do wartości tej najbardziej zbliżone były wyniki uzyskiwane przy generowaniu woksela o rozmiarze boku 1,0 m (liczba woksela 313; łączna objętość 313 m³; tab. 3).

Analiza wybranych cech (charakterystyk) drzewa pozwoliła na opisanie dwóch podstawowych nadziemnych jego elementów, tj. klas: pnia drzewa oraz jego korony (tab. 4). Zaproponowany wskaźnik objętości (WV) jest ilorazem objętości: całego drzewa oraz cylindra wyznaczonego przez pole przekroju poprzecznego korony i wysokości drzewa (rys. 6).

Na bazie uzyskanych wyników opracowano wykres zmienności pionowego rozkładu masy oraz objętości drzewa (rys. 7) Wykres pokazuje bardzo wyraźnie spadek nadziemnej biomasy drzewa, aż do sekcji (na osi X zaprezentowano 1,0 m sekcje), na wysokości której pojawiają się gałęzie sosny. Na pierwszy rzut oka pojawić się może w tym miejscu wykresu pewna graficzna niezgodność. Można by podejrzewać, że w tym miejscu zaczynają się gałęzie, jednak referencyjna podstawa korony (CB) wynosiła 19,7 m. Otóż wykres pokazuje wyraźnie, iż na odcinku od 15,5 m występują już martwe konary, których brak było w oczyszczonej części strzały. Podlegają one jednak skanowaniu, co widać wyraźnie na rysunku 5 oraz po wzroście objętości drzewa (wyraźnie od około 16,0 m). Dodatkowo należy wziąć pod uwagę, iż metodyka pomiaru podstawy korony drzewa zazwyczaj dotyczy miej-

Tabela 4. Wybrane charakterystyki drzewa testowego przedstawione liczbą punktów TLS

Cecha drzewa		Drzewo (pień + korona)	Pień	Korona
Liczba punktów TLS	n	113062	52347	60715
	%	100	46,3	53,7
Objętość	m ³	316,42	3,42	313,0
	%	100	1,1	98,9
Wskaźnik objętości (WV)	%	16,46	0,18	16,28
Objętość /liczba punktów	m ³ /punkt	0,0026	0,00006	0,00515
Biomasa	kg	3348,8	2736,0	612,8
Biomasa/punkt	kg/punkt	0,030	0,052	0,010

sca na pniu (wysokości), z którego wyrasta żywa gałąź. Tymczasem obciążone gałęzie sosny zwisają często wiele metrów poniżej tej wyżej opisanej wartości. Powoduje to największe problemy w ustalaniu metodyki i przyjęciu odpowiedniej referencji dla prowadzenia badań naukowych. W przypadku analiz chmur punktów TLS, objętość korony charakteryzowana jest od wysokości, na której zwisające gałęzie odbijają promienie lasera, a nie od miejsca nasady gałęzi na pniu drzewa.

Wnioski

Informacje o drzewach i drzewostanie pozyskiwane współcześnie na drodze zdalnego obrazowania, w tym w oparciu o technikę naziemnego skanowania laserowego, pozwalają na obiektywną analizę wybranych cech taksacyjnych. Stwarzają możliwości definiowania nowych parametrów biometrycznych lub przeprowadzania złożonych analiz, jak choćby zaprezentowana próba określenia zmienności w profilu pionowym drzewostanu cechy objętości drzewa (pnia i korony łącznie) oraz jego biomasy (części nadziemnej). Te automatycznie generowane charakterystyki mogą być z powodzeniem wykorzystywane w realizacji zadań wielofunkcyjnego leśnictwa. Coraz częściej pojawiający się w badaniach naukowych termin „precyzyjne leśnictwo”, dzięki technologii LiDAR, a szczególnie integracji lotniczego i naziemnego skanowania laserowego, ma szansę zmienić obecne urządzeniowe podejście „drzewostanowe” do pojedynczych analizowanych drzew. Jeszcze nie tak dawno wydawało się to całkowicie niemożliwie. Wybrane cechy drzew i drzewostanów, a także zadrzewień, mają kluczowe znaczenie w aspekcie badań nad sekwestracją węgla w ekosystemach, a tym samym limitami emisji CO₂ do atmosfery, co kształtuje politykę energetyczną kraju z uwzględnieniem obowiązujących konwencji (Strzeliński i in., 2008). Do takich właśnie istotnych parametrów z pewnością można zaliczyć powierzchnię, objętość oraz biomasę poszczególnych frakcji korony drzewa (Socha, Wężyk, 2007; Wężyk, 2008). Wraz z zastosowaniem technologii LiDAR oraz fotogrametrii i GIS służą one uszczegółowieniu analiz związanych z prowadzeniem tzw. zrównoważonej gospodarki leśnej (Bruchwald, 2008).

W pracy z powodzeniem przedstawiono metodykę integracji wielowymiarowych pomiarów terenowych, zarówno tradycyjnych jak i TLS. Zaawansowane analizy chmury punktów TLS umożliwiły określenie przestrzennej zmienności w profilu pionowym objętości oraz biomasy drzewa, otwierając nowe perspektywy badań nad odpowiednim kształtowaniem wzajemnych relacji pomiędzy objętością korony i biomasą drzewa. Takie właśnie parametry są obecnie wykorzystywane przy tworzeniu modeli wzrostu drzew, a skanowanie laserowe daje niezmiernie obiektywne dane referencyjne. Nowo zaproponowane charakterystyki drzewa, określane wskaźnikiem objętości TLS, są oczywiście znane specjalistom z zakresu hodowli lasu, ale jednocześnie nie mogą być precyzyjnie wyznaczane tradycyjnymi metodami. Analiza pionowej zmienności biomasy w drzewostanie może być także wykorzystywana do analiz związanych ze statyką (odpornością lasu na uszkodzenia od wiatru czy śniegu) czy zagadnieniami przeciwpożarowymi (ocena rozmieszczenia palnego materiału ważnego dla typu pożaru), jak również szeroko rozumianą ekologią lasu.

Niewątpliwie, coraz szybciej skanujące instrumenty pomiarowe (np. FARO FOCUS 3D) i coraz lepiej penetrujące wiązki promieniowania światła (skanery typu *full waveform*; np. RIEGL VZ-4000) powodują, iż w niedalekiej przyszłości technologia TLS będzie szeroko wykorzystywana w pracach z zakresu: inwentaryzacji, urządzania, użytkowania, ochrony

czy hodowli lasu, oferując obiektywne i precyzyjne dane. Autor wyraża nadzieję, że współcześnie leśnicy będą mogli przekazać swoim następcom te dane nie jako opis słowny, ale jako uniwersalny cyfrowy zapis form, kształtu i wymiarów pojedynczych drzew i struktury pionowej i poziomej drzewostanów.

Literatura

- Bucksch, A., Fleck, S., Rumpf, S., Rademacher, P., 2010: Woody biomass extraction from laser scanned trees. *Silvilaser 2010*. Freiburg, Germany.
- Będkowski K., Wężyk P., 2010: Lotniczy skaniny laserowy. [W:] Okła K. (red.) *Geomatyka w Lasach Państwowych. Część I. Podstawy*, rozdz. 14.5.1. Teledetekcja i fotogrametria obszarów leśnych. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych. Warszawa: 326-343.
- Bruchwald A., 1999: *Dendrometria*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.
- Bruchwald A., 2008: Analiza potrzeb dotyczących uzupełnienia pomiaru lasu o elementy teledetekcyjne w kontekście wykorzystania modeli wzrostu. [W:] *Techniki geopatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości*. Wydawnictwo SGGW: 42-50.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., Treitz, P., 2004: Assessing the 3d-frequency distribution of airborne and ground-based lidar data for red pine and mixed deciduous forest plots. [In:] Thies M., Koch B., Spiecker H., Weinacker H. (eds.) *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Freiburg, Germany: 66-70.
- Henning, J.G., Radtke, P.J., 2006: Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science* 52(1): 67-80.
- Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggren H., Rönholm P., Pyysalo U., Pitkanen J., Maltamo M., 2004: Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. [In:] Thies M., Koch B., Spiecker H. i Weinacker H. (eds.) *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, Proceedings of the ISPRS Working Group VIII/2*. Freiburg, Germany. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and the Spatial Information Sciences XXXVI-8/W2: 82-89.
- Király G., Broly G., 2010: Volume calculations of single trees based on terrestrial laser scanning. *Silvilaser 2010*. Freiburg, Germany.
- Maas H.-G., Bienert A., Scheller S., Keane E., 2008: Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 1366-5901, vol. 29 (5): 1579-1593.
- Popescu S.C., Zhao K., 2008: A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment* 112(3): 767-781.
- Reitberger J., Heurich M., Krzystek P., 2010: Estimation of stem volume by using 3d tree segments derived from full waveform lidar data. *Silvilaser 2010*. Freiburg, Germany.
- SILP, 2009: *Wybrane tabele*. Nadleśnictwo Niepołomice.
- Socha J., Wężyk P., 2007: Allometric equations for estimating the foliage biomass of Scots pine. *European Journal of Forest Research* 126 (2): 263-270.
- Strzeliński P., Jagodziński A.M., Wencel A., Zawila-Niedzwiecki T., 2008: Szacowanie zasobów węgla w lasach z wykorzystaniem technik geomatycznych. [W:] Zawila-Niedzwiecki T., Zasada M. (red.) *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości*. Wyd. SGGW, Warszawa: 114-125.
- Wężyk P., 2008: Modelowanie chmury punktów ze skaningu laserowego w obszarze koron drzew. [W:] *Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb*. *Archiwum Fotogrametrii i Kartografii i Teledetekcji* vol. 18: 685-695.
- Wężyk P., Ratajczak M., Tompalski P., 2010: Automatyczna ekstrakcja wybranych cech taksacyjnych sosny z chmury punktów naziemnego skaningu laserowego (TLS). Poster. V Krajowa Konferencja System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych – Możliwości wykorzystania najnowszych osiągnięć geomatyki w Lasach Państwowych. CEPL Rogów 14-15.09.2010.
- Wężyk P., Tompalski P., de Kok R., Szostak M., Kukawski M., 2010: Metoda szacowania liczby drzew w drzewostanie sosnowym z wykorzystaniem danych ALS oraz ortoobrazów. *Sylwan*, 154 (11): 773-782.

- Wężyk P., Koziol K., Glista M., i Pierzchalski M., 2007: Terrestrial Laser Scanning Versus Traditional Forest Inventory. First Results from the Polish Forests. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI. Part 3 / W52. 424-429. Espoo, Finland. 12-14.09.2007. s. 424-429.
- Wężyk P., Sroga R., Szwed P., Szostak M., Tompalski P., Koziol K., 2009: Wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w określaniu wybranych cech drzew i drzewostanów. *Archiwum Fotogrametrii. Kartografii i Teledetekcji* vol. 19: 447-457.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M., 2008: Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. Proceedings of SilviLaser 2008. 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. Sept. 17-19. 2008 – Edinburgh, UK: 636-645.

Abstract

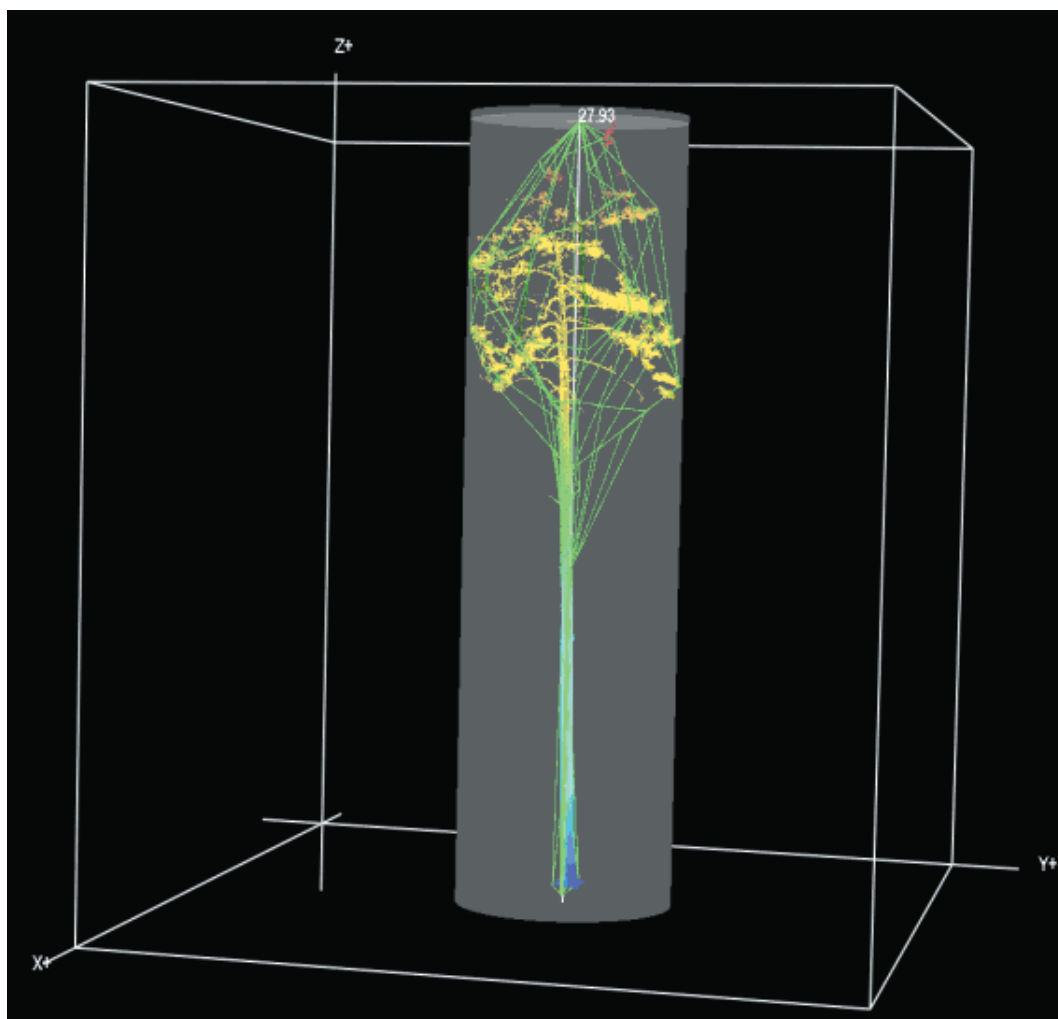
The state of the art technology like Terrestrial Laser Scanning (TLS) allows measuring the 3D structure of real world objects, including trees. The data delivered by the TLS - very dense point clouds – represent shapes and surfaces of the objects and their type (e.g. using intensity of the laser beam). Forest ecosystem plays an important role in the regulation of the carbon dioxide (CO₂) content in the atmosphere and in carbon sequestration as well. In forest, carbon is stored in wood biomass: tree trunks, branches, roots, foliage (needles and leaves) and in the organic material in soil. Using GIS spatial analyses for the carbon sequestration modeling, the 2D information seems to be not sufficient. 3D information of the spatial biomass and volume distribution is needed and is important not only for forest professionals, but also for energy policy and international conventions.

*The study was done in the Niepolomice Forest in the mature Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand (Regional Forest Directorate Krakow. compartment 153f). The age of the stand was 147 years and mean values of DBH 42 cm and height 27 m. The study circular plot ($r=18m$; area $\sim 1000sqm$) consisted of 16 pines (mean: DBH 46 cm; $H = 26.0 m$) which were scanned using the FARO PHOTON 80. The 4 scans (1 central position and 3 additional around the central one) were made to get full representation of the tree stems and crowns (branches with needles). Tree number 13 (DBH 52.7 cm; $H 28.3 m$; crown length 8.6 m. crown width 9.3 m) was selected for the biomass study. The stem diameter and perimeter was measured every 1m (section) to get the references for the TLS analysis. The wet biomass of the selected tree parts was: 490.0 kg - branches. 109.3 kg shoots with needles 13.5 kg - mistletoe. The sum of the wet crown biomass was 612.8 kg (96.3 t/ha). The laboratory elaboration based of 6 samples from the crown allowed to receive the dry biomass of crown (53.3 kg) and its fractions: needles 34.0 kg, shoots 19.3 kg. The obtained results were compared to empiric formula (Socha, Wężyk 2007), which delivered results for the wet biomass of shots with needles 104.1 kg (4.8 % difference) and dry biomass 71.2 kg (33.5 % difference). Based on the voxel analysis of the TLS data the vertical characteristic of the volume and biomass distribution was determined.*

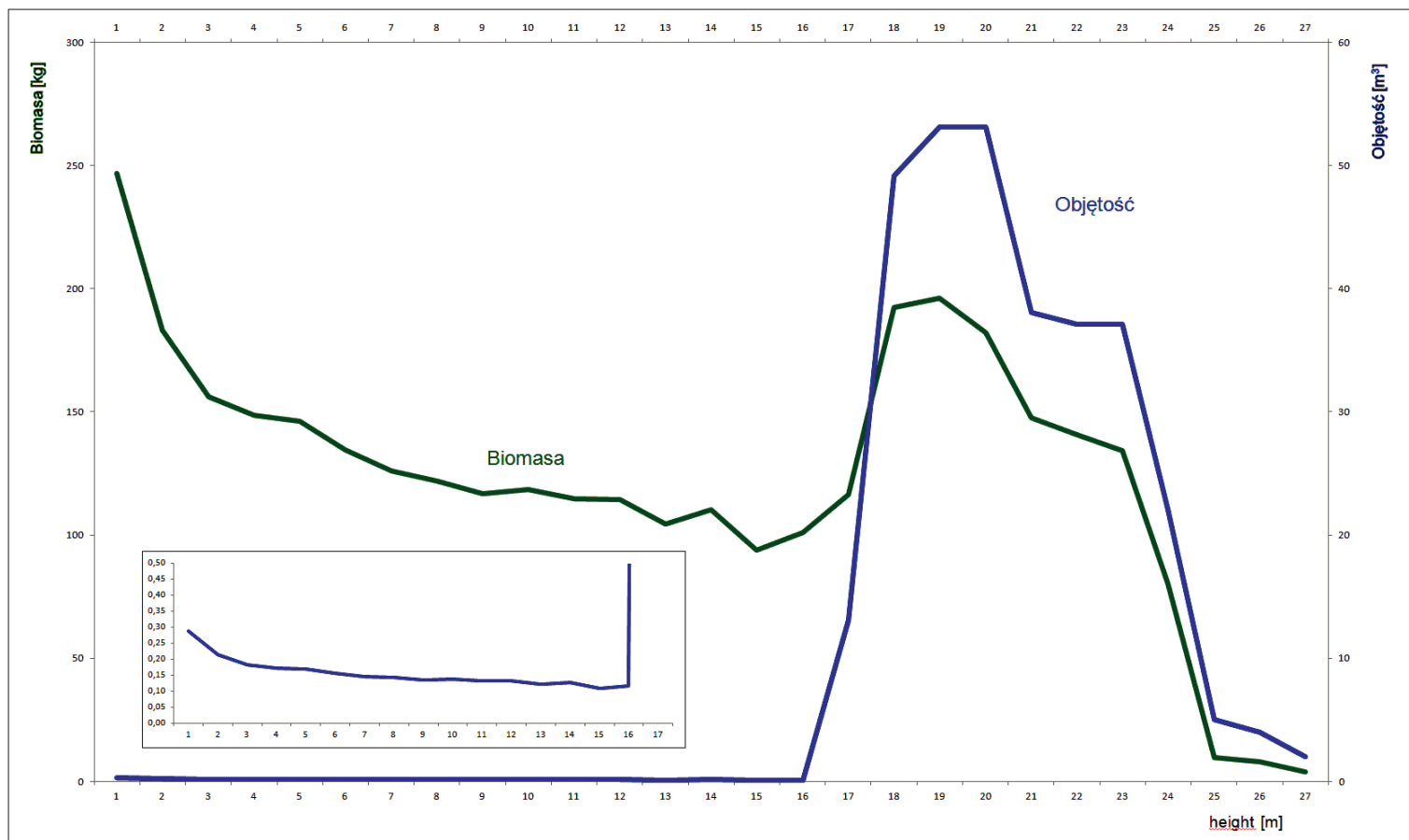
dr inż. Piotr Wężyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
tel. 12 662 50 82

dr inż. Marta Szostak
rlszosta@cyf-kr.edu.pl
tel. 12 662 50 76

mgr inż. Piotr Tompalski
piotr.tompalski@ur.krakow.pl
tel. 12 662 50 76



Rys. 6. Zaproponowany wskaźnik objętości sosny (w kolorze zielonym – bryła objętości drzewa wyznaczona przez linie szkieletowe; w kolorze szarym – objętość analizowanego cylindra wpasowanego w całe drzewo)



Rys. 7. Wykres przedstawiający zmianę biomasy i objętości w 1,0 m sekcjach wysokości nad gruntem; z lewej strony w ramce powiększenie ułatwiające analizowanie zmienność objętości strzały sosny w profilu pionowym