

# **RAPORT KOŃCOWY**

z realizacji tematu „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi”

## **CZĘŚĆ III – WYNIKI Z ZAKRESU SKANOWANIA LOTNICZEGO**

## Spis treści:

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Wprowadzenie.....                                                                                                                                                  | 3  |
| 1. Wstęp .....                                                                                                                                                     | 6  |
| 2. Interpolacja numerycznych modeli terenu w oparciu o dane z lotniczego skanowania laserowego.....                                                                | 7  |
| 3. Analiza dokładności danych ze skaningu laserowego dla fragmentu Nadleśnictwa Milicz 12                                                                          |    |
| 4. Wykorzystanie danych z lotniczego skanowania laserowego do określania liczby drzew ..                                                                           | 21 |
| 5. Wykorzystanie danych z lotniczego skanowania laserowego do określania różnych elementów struktury drzewostanów, rozpoznawania dróg oraz składu gatunkowego..... | 52 |
| 6. Możliwość wykorzystania danych z lotniczego skanowania lidarowego i stałych kontrolnych powierzchni próbnych do inwentaryzacji zapasu drzewostanów .....        | 63 |
| 7. Propozycje dalszych kierunków rozwoju aplikacji wykorzystujących dane z lotniczego skanowania laserowego do określania parametrów drzewostanów .....            | 72 |
| 8. Uwagi końcowe.....                                                                                                                                              | 76 |
| ZAŁĄCZNIK.....                                                                                                                                                     | 77 |

## **Wprowadzenie**

Analizy dotyczące danych lotniczych (skaniny laserowe i zdjęcia cyfrowe) wykonywał zespół SGGW i Uniwersytetu we Freiburgu. Praca ta obejmowała tworzenie ortofotomap, modeli terenu i pokrycia terenu oraz określania liczby drzew w drzewostanach i ich wysokości, struktury drzewostanów, składu gatunkowego.

Prace w ramach tego etapu sprawozdawanego tematu wykonywał zespół: mgr inż. Krzysztof Stereńczak (SGGW), mgr inż. Radomir Bałazy (Nadleśnictwo Świeradów), dr inż. Michał Brach (SGGW), mgr inż. Agnieszka Bronisz (SGGW), mgr inż. Karol Bronisz (SGGW), inż. Dariusz Górski (SGGW), inż. Natalia Grala (SGGW), mgr Sandeep Gupta (Uniwersytet we Freiburgu), mgr Johannes Heinzl (Uniwersytet we Freiburgu), prof. dr Barbara Koch (Uniwersytet we Freiburgu), prof. dr hab. Stanisław Miścicki (SGGW), mgr Christoph Straub (Uniwersytet we Freiburgu), mgr Yunsheng Wang (Uniwersytet we Freiburgu), dr Holger Weinacker (Uniwersytet we Freiburgu), dr inż. Rafał Wojtan (SGGW)

## **Terminy i skróty polskie:**

**BULiGL** – Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej,

**Falcon II** – wykorzystany w projekcie system lotniczego skanowania laserowego firmy Toposy (Topographische Systemdaten GmbH, Biberach, Niemcy), charakteryzujący się pulsacyjno – włóknistym typem sensora,

**gęstość punktów [p/m<sup>2</sup>]** – jedna z charakterystyk danych LIDAR-owych, określająca ilość punktów pokrywających jeden metr kwadratowy,

**NMT** – numeryczny model terenu,

**NMPT** – numeryczny model pokrycia (powierzchni) terenu,

**WMK** – wysokościowy model koron, powstający przez odjęcie wartości odpowiadających sobie pikseli w numerycznym modelu pokrycia terenu i numerycznym modelu terenu w obszarze leśnym, bardzo zbliżony do znormalizowanego modelu terenu (nDSM),

## **Terminy i skróty angielskie:**

**CIR** – *color infrared* – kompozycja barwna w zakresie kanałów: niebieskiego, czerwonego i bliskiej podczerwieni imitująca zdjęcie lotniczego spektrostrefowego,

**DSM** – *Digital Surface Model* – numeryczny model pokrycia terenu,

**DTM** – *Digital Terrain Model* – numeryczny model terenu,

**FE** – *first echo* – pierwsze odbicie; część chmury punktów standardowo wydzielana z całości przez firmy dostarczające dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego,

**FELIS** - *Department of Remote Sensing and Landscape Information Systems Albert-Ludwig-University Freiburg, Germany* – Katedra Teledetekcji i Systemów Informacji o Krajobrazie, Uniwersytet we Freiburgu, Niemcy – jednostka współpracująca w projekcie,

**footprint** – wielkość plamki sygnału laserowego po dotarciu do powierzchni Ziemi,

**GPS** – *Global Positioning System* - globalny system pozycjonowania,

**Halcon MVTec** – program wykorzystany w projekcie do analizy obrazów rastrowych

**INS** - *Inertial Navigation Systems* – bezwładnościowy system nawigacyjny, wykorzystywany do zbierania informacji o położeniu samolotu w trakcie wykonywania nalogu skanerem lotniczym,

**IMU** *Inertial Measuring Unit* – bezwładnościowy układ pomiarowy, złożony z żyroskopu i akcelerometru; wchodzi w skład systemu INS,

**LE** - *last echo* – ostatnie odbicie; część chmury punktów standardowo wydzielana z całości przez firmy dostarczające dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego,

**LIDAR** - *Light Detection And Ranging* –system pomiaru i detekcji z wykorzystaniem światła,

**NC** – *natural colors* – kompozycja barwna w zakresie kanałów: czerwonego, zielonego i niebieskiego imitująca zdajecie lotnicze w barwach naturalnych,

**nDSM** – *normalized Digital Surface Model* – znormalizowany model pokrycia terenu,

**strip** –pasa ziemi pokryty przez pojedynczy przelot samolotu (helikoptera) ze skanerem laserowym,

**TreesVis** – program stworzony na uniwersytecie we Freiburg, w którym można między innymi: generować modele terenu, konwertować formaty danych LIDAR-owych, docinać i selekcjonować określone fragmenty danych punktowych,

## 1. Wstęp

Celem prezentowanego opracowania jest przedstawienie wyników i doświadczeń uzyskanych w trakcie realizacji zleconego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych projektu pod tytułem „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi”.

Poniższa praca składa się z następujących części:

Część pierwsza jest wprowadzeniem do technologii lotniczego skanowania laserowego LIDAR (ang.: *Light Detection And Ranging*). Zdaniem Autora jest ona niezbędna do zrozumienia niektórych pojęć znajdujących się w dalszej części opracowania. Poza tym ma ona umożliwić krytyczne spojrzenie na zagadnienie uzyskiwanej dokładności opisywanej technologii oraz przybliżyć historię jej rozwoju.

Część druga jest opisem przeprowadzonych w ramach projektu prac oraz uzyskanych wyników. Ta część sprawozdania jest efektem prac zespołu złożonego z pracowników Wydziału Leśnego SGGW i pracowników Wydziału Leśnego Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu pod kierownictwem prof. dr. hab. Tomasza Zawiły-Niedźwieckiego oraz Wydziału Leśnego na Uniwersytecie we Freiburgu (Department of Remote Sensing and Landscape Information Systems Albert-Ludwig-University Freiburg, Germany) pod kierownictwem prof. Barbary Koch.

Ostatnią częścią przedstawionego raportu jest propozycja rozwiązań i kierunków rozwoju ewentualnych aplikacji, wykorzystywanych do analiz danych z lotniczego skanowania laserowego w leśnictwie polskim.

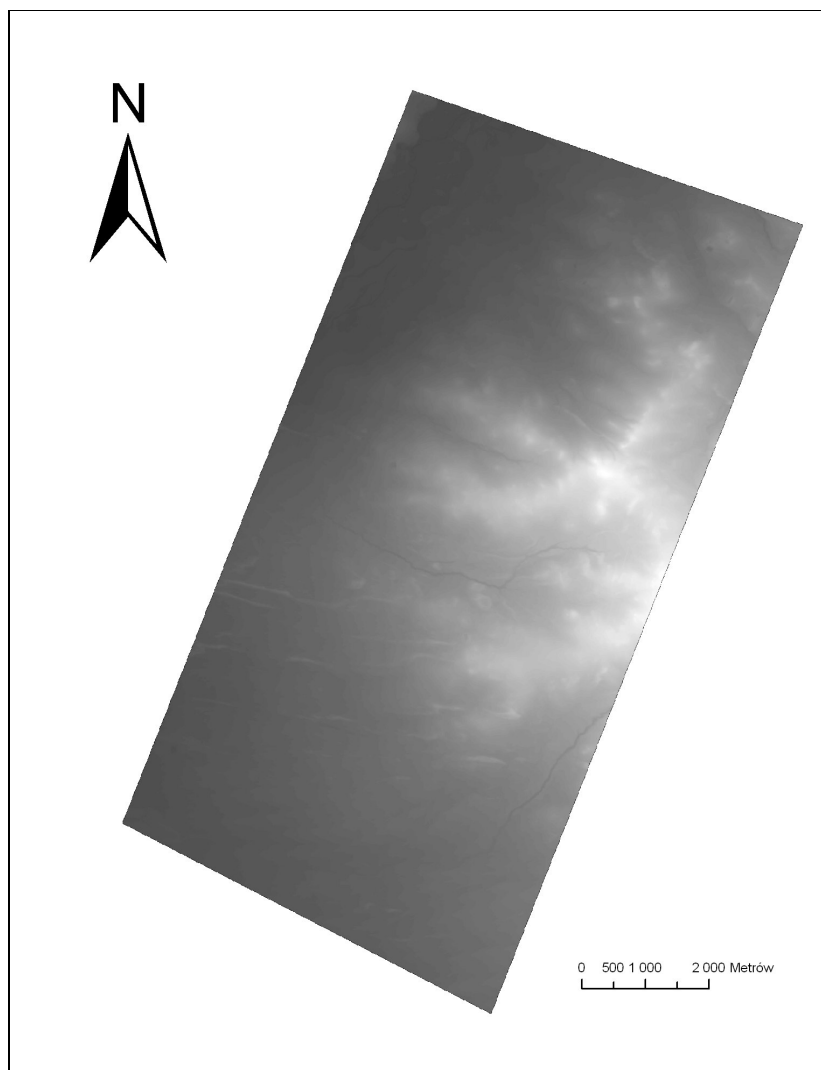
## 2. Interpolacja numerycznych modeli terenu w oparciu o dane z lotniczego skanowania laserowego

Algorytmy wykorzystane do interpolacji numerycznych modeli terenu powstały na Uniwersytecie we Freiburgu, a dokładniejszy opis ich działania można znaleźć w publikacji (Weinacker i in. 2004). Podstawą algorytmu interpolującego jest teoria aktywnego konturu. W pierwszej kolejności tworzony jest raster o wielkości pola podstawowego zależnego od gęstości punktów. Filtracja NMT i NMPT wykonana jest w drugim etapie w oparciu o wcześniej stworzone rastry.

Dla interpolacji obu modeli wykorzystywany jest ten sam algorytm z tym, że w zależności od tego, który model jest aktualnie tworzony inne punkty brane są pod uwagę. Załóżmy, że numeryczny model terenu jest przedmiotem zainteresowania. Algorytm najpierw tworzy pierwotną płaszczyznę w oparciu o najniżej położone punkty. Wielkość oczka rastra w tym modelu jest większa od tego, który jest przedmiotem interpolacji. Płaszczyzna ta staje się podstawą filtracji i tylko punkty najbliższe niej są zachowywane. Następnie każdy punkt ma przypisywaną wartość siły, z jaką przyciąga powierzchnię rastra. W zależności od generowanego modelu, kierunek działania sił jest inny. Efektem działania algorytmów jest powierzchnia, która nie przyjmuje wartości minimalnych i maksymalnych dla danego terenu. Z racji działania sił wartości skrajne są nieznacznie wygładzane. Rzutuje to m.in. tym, że wygenerowany NMPT zawsze wskazywał będzie wartość wysokości drzewa mniejszą od rzeczywistej. W tym przypadku wartości z surowych danych LIDAR-owych dadzą dokładniejsze wyniki.

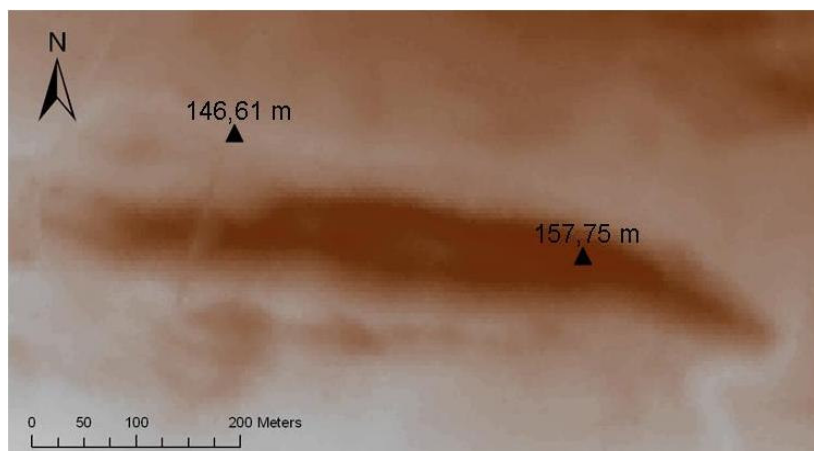
Numeryczny model terenu i numeryczny model pokrycia terenu były podstawą do generowania modelu różnicowego (nDSM). Powstał on przez odjęcie wartości "z" pikseli z DTM-u od wartości „z” odpowiadającym im pikselem z DSM-u. W programie TresVis rozdzielczość modeli nie ma znaczenia. Model nDSM przyjmuje wartość modelu DSM. Model różnicowy był wykorzystywany w większości wykonywanych analiz.

W zależności od potrzeb, generowane były modele o różnej rozdzielczości i wielkości. Poniżej prezentowany jest numeryczny model terenu z rozdzielczością 5 m. Maksymalna rozdzielczość, z jaką udało się wygenerować model dla całej powierzchni wyniosła 2 m. Powierzchnia całego obszaru, jak wiemy, wynosi 8400 ha. Jakikolwiek ograniczenia w rozdzielczości generowanych modeli wynikały wyłącznie z możliwości sprzętowych.



**Ryc. III.1. Obraz numerycznego model terenu obszaru pokrytego przez lotniczy skaning laserowy.**

Obserwując numeryczny model terenu wyraźnie widać pojawiające się na jego powierzchni wydłużone kształty, będące prawdopodobnie wydmami śródlądowymi. Układ tych tworów geologicznych jest wyraźniejszy na modelu o rozdzielczości 2m.

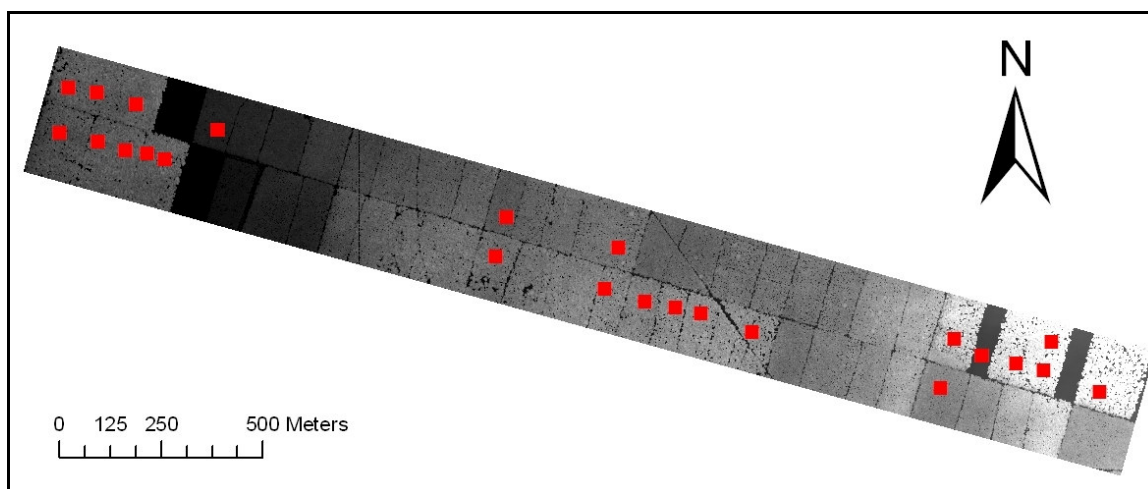


**Ryc. III.2. Wydma śródlądowa, Nadleśnictwo Milicz.**

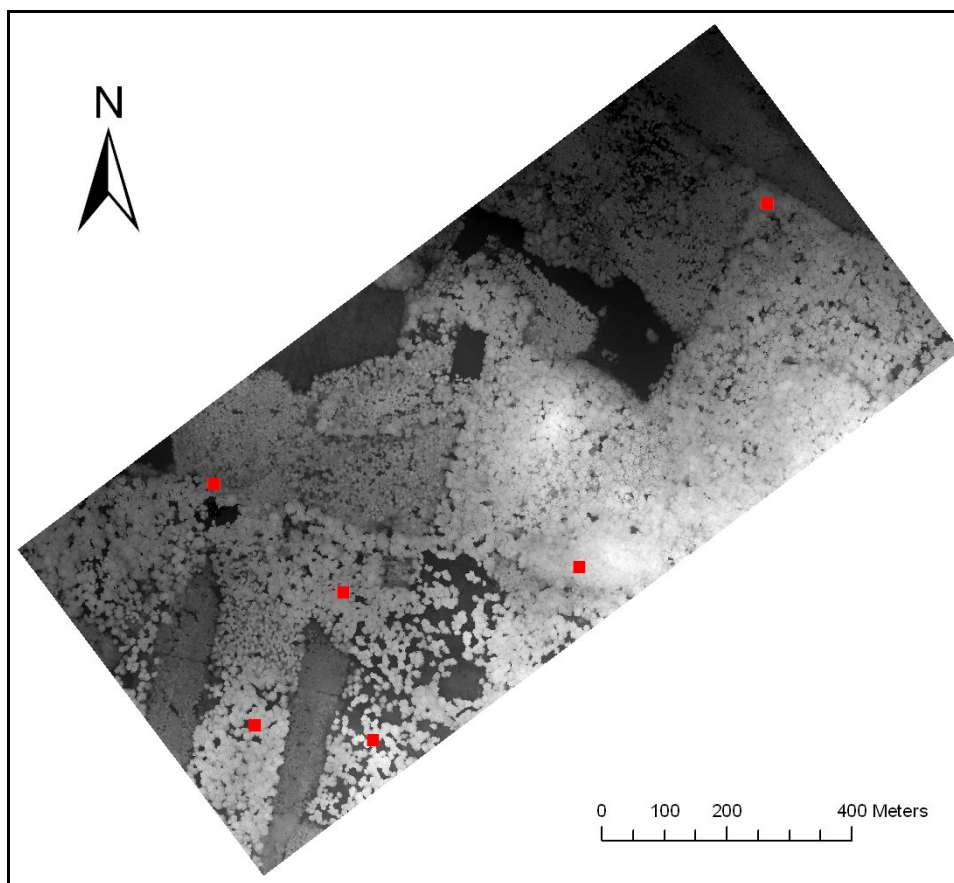
Dla całego obszaru wygenerowano również modele o rozdzielczości 1 m, ale aby pokryć cały obszar musiano go podzielić na 2 części.

Dodatkowo do analiz struktury przestrzennej drzewostanu wygenerowano modele o wielkości ponad 1000 ha oraz model pokrywający się z obszarem zdjęcia nr: a376400. W niektórych analizach (np. podczas klasyfikacji drzewostanów na gatunki) wykorzystywana była informacja spektralna ze zdjęć, stąd dopasowanie wielkości modelu generowanego z danych laserowych do obszaru zdjęcia

Innymi generowanymi modelami były, te obejmujące obszar pokryty przez powierzchnie próbne inwentaryzowane z wykorzystaniem naziemnego skanowania laserowego.



**Ryc. III.3. Obraz numerycznego modelu pokrycia terenu obejmujący powierzchnie próbne (czerwone kwadraty) założone w drzewostanach iglastych.**

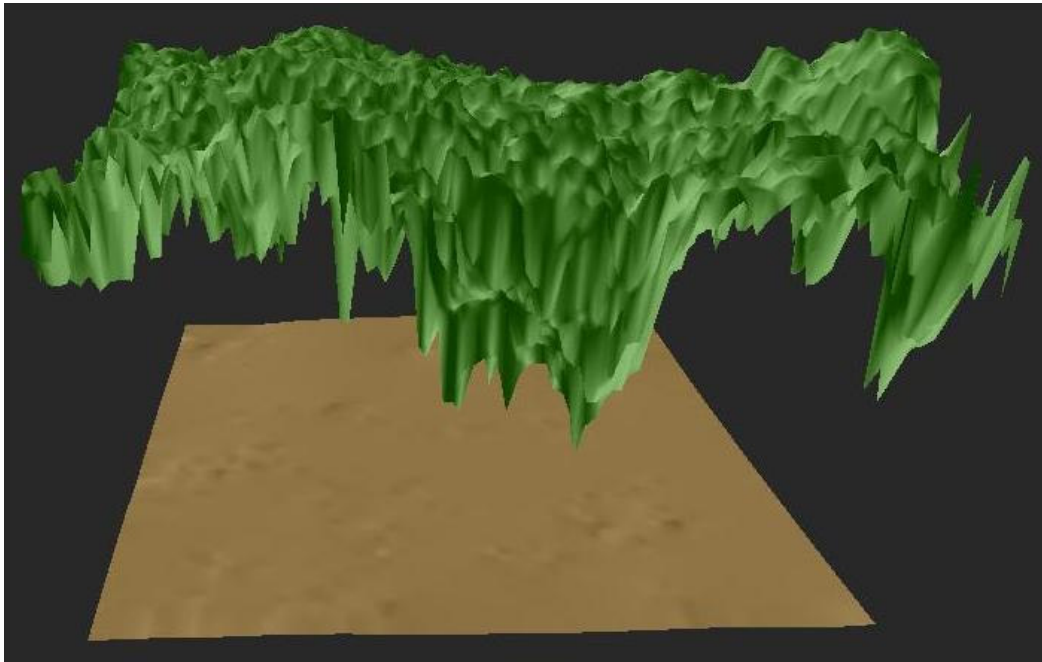


**Ryc. III.4. Obraz numerycznego modelu pokrycia terenu obejmujący powierzchnie próbne (czerwone kwadraty) założone w drzewostanach liściastych lub mieszanych.**

Ponadto dla wszystkich 250 powierzchni próbnych wygenerowano następujące numeryczne modele terenu o powierzchni 50 m × 50 m:

- DTM – o rozdzielczości 1 m
- DSM – o rozdzielczościach: 0,25; 0,5 i 1m
- nDSM – o rozdzielczościach: 0,25; 0,5 i 1m

Modele te wykorzystane zostały głównie do ewaluacji dokładności algorytmów określających zagęszczenia drzew. Poniżej prezentowane są 2 z nich.



**Ryc. III.5. Obraz numerycznego modelu terenu o rozdzielczości 1 m (brązowy) i numeryczny model pokrycia terenu o rozdzielczości 0,5 m (zielony) zwizualizowany w przestrzeni 3D w programie TreesVis.**

### **3. Analiza dokładności danych ze skaningu laserowego dla fragmentu Nadleśnictwa Milicz**

#### **3.1 Cel pracy**

Podstawowym założeniem niniejszej pracy badawczej było dokonanie oceny dokładności danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego wykonanego na terenie nadleśnictwa Milicz w maju 2007 roku. Zbiór danych, jaki udało się zebrać stosując technikę LIDAR-ową, jest obszerny i trudny do weryfikacji w odniesieniu do rzeczywistej powierzchni Ziemi. Zastosowane algorytmy interpolacyjne, parametry urządzenia skanującego, rodzaj drzewostanu czy wreszcie źródła danych referencyjnych w sposób istotny wpływają na jakość odwzorowania rzeczywistej powierzchni terenowej. Czynniki te wpłynęły na konieczność weryfikacji tych danych w oparciu o pomiary terenowe realizowane klasycznymi technikami geodezyjnymi. Rezultaty tych prac pozwoliły na ocenę dokładności skaningu laserowego przy założeniu bezbłędności pomiarów tachimetrycznych.

#### **3.2 Obszar opracowania**

Teren, na którym dokonano pomiarów tachimetrycznych, wybrano w oparciu o następujące kryteria:

- dostępność danych ze skanowania laserowego z 2007 roku,
- występowanie drzewostanów w różnym przedziale wiekowym,
- możliwość prowadzenia szybkich i dokładnych rejestracji tachimetrycznych,
- dostęp do otwartego widnokregu umożliwiającego stabilną obserwację danych z satelitów GPS,
- pokrycie leśną mapą numeryczną,
- czas przeznaczony na wykonanie pomiarów terenowych.



**Ryc. III.6. Obszar objęty pomiarami tachimetrycznymi**

Na podstawie rozpoznania terenowego oraz przeglądu dostępnych danych wytypowano obszar spełniający wszystkie wymagane kryteria (ryc. III.6). Jest to fragment oddziału 219 wydzielenie d oraz oddziału 220 wydzielenia a, b i d (ryc. III.7).

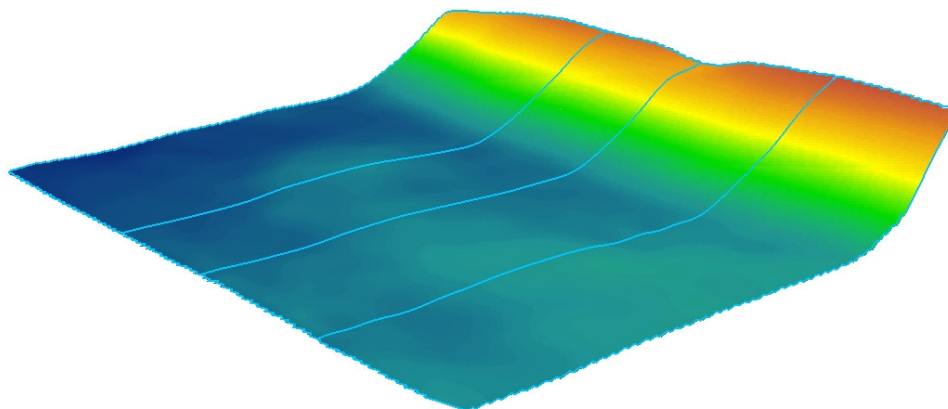


**Ryc. III.7. Lokalizacja powierzchni z uwzględnieniem podziału powierzchniowego.**

Łączna powierzchnia terenu przekracza 5 ha. Gatunkiem panującym jest sosna jednak zróżnicowanie wiekowe jest znaczne ze względu na działania gospodarcze prowadzone na tym terenie. Szczegółowa opis drzewostanów przedstawiono w tabeli III.1.

Tabela III.1. Podstawowe charakterystyki drzewostanów znajdujących się na terenie objętym pomiarami.

| Oddział/<br>wydzielenie | Gatunek<br>panujący | Wiek | Wysokość<br>[m] | Siedlisko | Bonitacja | Zadrzewienie |
|-------------------------|---------------------|------|-----------------|-----------|-----------|--------------|
| 220 b                   | SO                  | 2    | 0               | Bśw       | II        | 1            |
| 220 a                   | SO                  | 9    | 2               | Bśw       | I         | 1            |
| 219 d                   | SO                  | 28   | 11              | Bśw       | I         | 1,1          |
| 220 d                   | SO                  | 109  | 22              | Bśw       | III       | 0,4          |



Ryc. III.8. Wizualizacja ukształtowania terenu dla czterech wybranych drzewostanów.

Część południowa jest praktycznie płaska i stanowi około 70% całości terenu. Pozostałe 30% to piaszczysta wydma o wysokości około 10 metrów (ryc. III.8). Usytuowanie punktu referencyjnego na szczycie wydmy pozwoliło na znaczne rozszerzenie zasięgu pomiarów tachimetrycznych.

### 3.3 Pomiar tachimetryczny

Duże i otwarte powierzchnie zrębów zlokalizowanych wokół terenu objętego opracowaniem pozwoliły na założenie precyzyjnej bazy pomiarowej z wykorzystaniem dwuczęstotliwościowego odbiornika GPS klasy geodezyjnej. Zastosowywano model HiperPro firmy Topcon o następujących parametrach:

- odbieranie sygnałów GPS, GLONASS oraz EGNOS (odbiornik GNSS),
- równoczesna rejestracja danych na 20 kanałach,
- śledzenie fal nośnych L1 GPS, L1/L2 GPS, L1 GLONASS, L1 GPS+L1 GLONASS, WASS/EGNOS, pomiar kodowy i fazowy,
- System redukcji zjawiska odbicia sygnału oraz wygładzania zarówno dla pomiaru kodowego i fazowego,

- Śledzenie sygnału satelitów z częstotliwością do 20Hz,
- Format przesyłu danych TPS, NMEA, RTCM, BINEX.

Na dwóch wytyczonych punktach referencyjnych dokonano obserwacji GPS przez okres dwóch godzin. Zebrane rejestracje przesłano do centrum obliczeniowego ASG-EUPOS celem wyznaczenia właściwych współrzędnych w państwowym układzie współrzędnych 1965 oraz wysokość w układzie Kronsztadt'86. Szczegółowy raport dla punktów B1 i B2 wraz z dokładnością wyznaczenia współrzędnych ( $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_p$ ,  $m_h$ ) zawiera tabela III.2 i III.3.

Tabela III.2. Raport z pomiaru punktów obliczonego za pomocą serwisu ASG-EPOS dla punktu B1

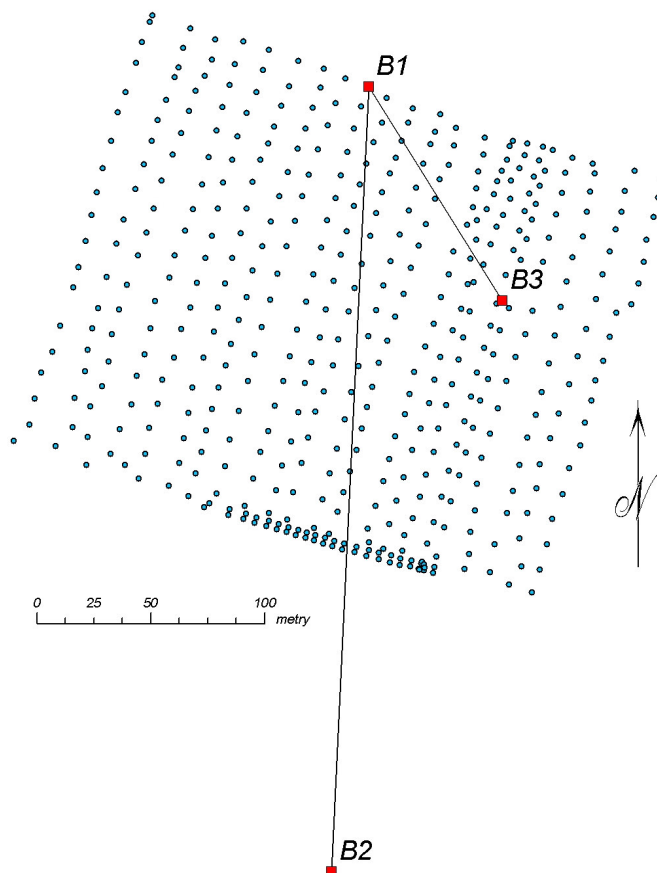
| Punkt B1                                                                      |                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| *****<br>ASG-EUPOS Serwis POZGEO wersja 1.59<br>*****                         |                                                    |
| PLIK                                                                          | :B1.080                                            |
| CZAS POBRANIA                                                                 | :2008-12-02 12:43:57                               |
| CZAS OBLICZEN                                                                 | :2008-12-02 14:46:40                               |
| RINEX - INFORMACJE                                                            |                                                    |
| Nazwa punktu                                                                  | : B1                                               |
| Wysokość anteny                                                               | : 2                                                |
| WYKORZYSTANY MODEL ANTENY: TPSHIPER_LITE                                      |                                                    |
| Info antena L1: DeltaE                                                        | : 0.00164    DeltaN : 0.00070    DeltaUp : 0.08734 |
| Info antena L2: DeltaE                                                        | : 0.00098    DeltaN : 0.00000    DeltaUp : 0.08776 |
| Lista satelitów w pliku RINEX                                                 |                                                    |
| G6 G7 G15 G16 G18 G21 G22 G24 G25 G26 G29 R6 R7 R20 G3 R23 R14 G19 G27 G8 G14 |                                                    |
| WYNIKI OSTATECZNE:                                                            |                                                    |
| Układ 1965 strefa 4                                                           |                                                    |
| X: 5602278.852                                                                | Y: 3738415.596                                     |
| <b>mx: 0.0302</b>                                                             | <b>my: 0.0306</b> <b>mp: 0.0430</b>                |
| WYZNACZONE WYSOKOŚCI PUNKTU:                                                  |                                                    |
| Kronsztadt 86                                                                 | : 125.2284 <b>mh: 0.0202</b>                       |

Tabela III.3. Raport z pomiaru punktów obliczonego za pomocą serwisu ASG-EPOS dla punktu B2

| Punkt B2                                                       |                                                    |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| PLIK                                                           | :B2.080                                            |
| CZAS POBRANIA                                                  | :2008-12-03 14:47:44                               |
| CZAS OBLICZEN                                                  | :2008-12-03 15:11:27                               |
| Numer punktu                                                   | : B2                                               |
| Wysokość anteny                                                | : 2                                                |
| WYKORZYSTANY MODEL ANTENY: TPSHIPER_LITE                       |                                                    |
| Info antena L1: DeltaE                                         | : 0.00164    DeltaN : 0.00070    DeltaUp : 0.08734 |
| Lista satelitów w pliku RINEX                                  |                                                    |
| G2 G4 G5 G12 G24 G29 G30 G31 R4 R10 R19 R20 G21 G10 G16 G13 R6 |                                                    |
| WYNIKI OSTATECZNE:                                             |                                                    |
| Układ 1965 strefa 4                                            |                                                    |
| X: 5601931.416                                                 | Y: 3738410.411                                     |
| <b>mx: 0.0301</b>                                              | <b>my: 0.0305</b> <b>mp: 0.0429</b>                |
| WYZNACZONE WYSOKOŚCI PUNKTU:                                   |                                                    |
| Kronsztadt 86                                                  | : 115.9584 <b>mh: 0.0196</b>                       |

Wykorzystując bazę referencyjną B1-B2, dokonano pomiaru położenia i wysokości 362 punktów stosując tachimetrię trygonometryczną i metodę biegunową. Ze względu na

ograniczona widoczność założono dodatkowy bok odniesienia oparty o punkt B3 skąd pomierzono pozostałe 106 pikiet. Łącznie zmierzono położenie 468 punktów o wyznaczonych współrzędnych X, Y i Z (ryc. III.9).



Ryc. III.9. Szkic pomiarów tachymetrycznych dla wybranego obszaru.

### **3.4 Analiza dokładności danych ze skaningu laserowego w oparciu o pomiary naziemne**

#### **Numeryczny model terenu ze skaningu laserowego**

Do analizy porównawczej wykorzystano wartości punktów wysokościowych pobranych z numerycznego modelu terenu o rozdzielczości 0,5 m i zbudowanego na podstawie chmury punktów z ostatniego odbicia skanowania laserowego (DTM last echo). Wszystkie operacje na danych LIDAR-owych wykonano w oprogramowaniu TreesVis. Rzędne Z numerycznego modelu terenu przypisano dokładnie do położenia punktów wysokościowych z pomiaru tachymetrycznego. Ze względu na różnorodność drzewostanów znajdujących się w zasięgu pomiarów, wyniki zostały rozdzielone na cztery różne obiekty, których rozkład jest zgodny z podziałem powierzchniowym w Nadleśnictwie Milicz.

Dla porównania wyników obliczono błąd systematyczny rozumiany jako wartość średnią różnicy pomiędzy rzędnymi Z ( $\sigma$ ) (wzór [1]) oraz błąd średniokwadratowy (RMSE wzór [2]). Jako wartości prawdziwe przyjęto wyniki pomiaru geodezyjnego (P\_geo).

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{DTM\_Lidar} - Z_{P\_geo})}{n} \quad [1]$$

gdzie (patrz tekst powyżej):

- $Z_{DTM\_Lidar}$  – rzędna Z dla modelu lidarowego
- $Z_{P\_geo}$  – rzędna Z dla pomiaru geodezyjnego
- $n$  – liczba obserwacji

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Z_{DTM\_Lidar} - \sigma) - Z_{P\_geo}]^2}{n}} \quad [2]$$

gdzie (patrz tekst powyżej):

- $Z_{DTM\_Lidar}$  – rzędna Z dla modelu lidarowego
- $Z_{P\_geo}$  – rzędna Z dla pomiaru geodezyjnego
- $\sigma$  – błąd systematyczny
- $n$  – liczba obserwacji

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli III.4.

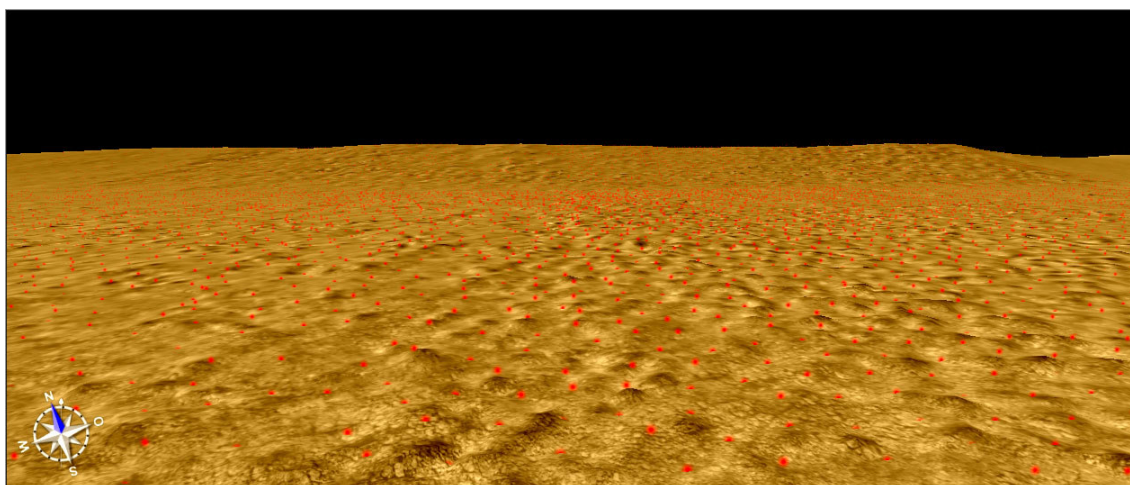
Tabela III.4. Wartości błędu systematycznego i błędu średniokwadratowego dla rzędnych wysokościowych uzyskanych z numerycznego modelu terenu wygenerowanego z danych lidarowych w odniesieniu do rzędnych wysokościowych z pomiarów geodezyjnych

| Oddział/<br>wydzielenie | Gatunek<br>panujący | Wiek | Wysokość<br>[m] | $\sigma$ [m]- błąd<br>systematyczny | RMSE<br>[m] |
|-------------------------|---------------------|------|-----------------|-------------------------------------|-------------|
| 220 b                   | Sosna               | 2    | 0               | -0,19                               | 0,19        |
| 220 a                   | Sosna               | 9    | 2               | -0,18                               | 0,19        |
| 219 d                   | Sosna               | 28   | 11              | -0,14                               | 0,17        |
| 220 d                   | Sosna               | 109  | 22              | -0,19                               | 0,14        |
|                         |                     |      | <b>Średnia</b>  | <b>-0,12</b>                        | <b>0,25</b> |

### Chmura punktów ze skaningu laserowego

Kolejną analizę dokładności wykonano porównując wyselekcjonowane pojedyncze punkty z nalogu LIDAR-owego z odpowiadającym im pikietom z pomiaru tachimetrycznego. Ze względu na ogrom danych zgromadzonych w chmurze punktów konieczna była ich filtracja według następujących kryteriów:

- odrzucenie wszystkich punktów które znajdują się dalej niż 1 m od NMT wygenerowanego wcześniej z ostatniego odbicia skanera („last echo”)
- selekcja takich punktów ze zbioru, które znajdują się od siebie w odległości minimum 1 m



**Ryc. III.10. Chmura punktów ze skanowania laserowego po filtracji w programie TreesVis.**

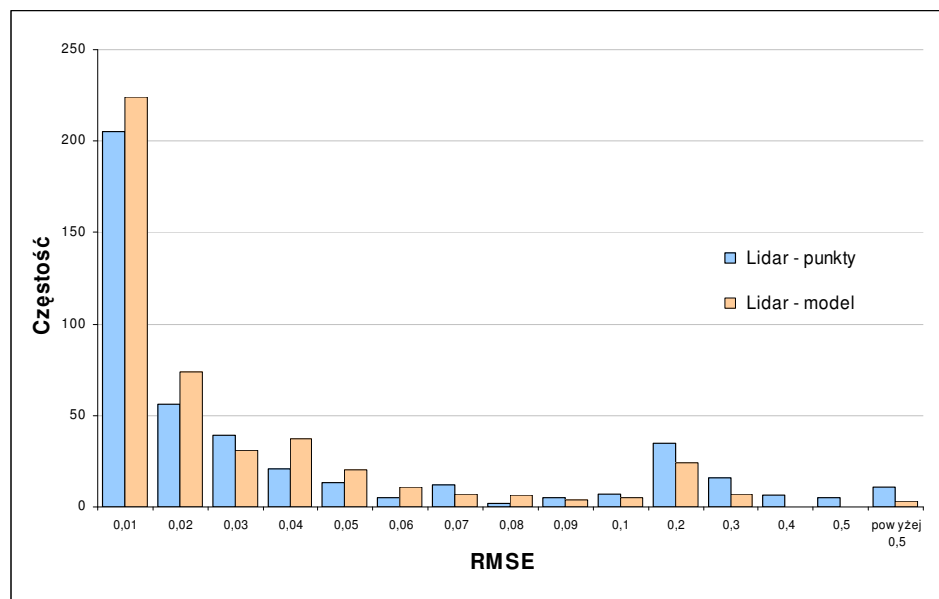
W ten sposób uzyskano punkty położone najniżej w całej chmurze jak również zredukowano ich liczbę (ryc. III.10). Do porównania z pomiarami geodezyjnymi wybrano takie punkty ze skaningu laserowego, które znajdowały się najbliżej wykonanych obserwacji tachimetrycznych. Ponieważ w oddziale 219 wydzielenie d odległości danych z Lidara od pomiaru geodezyjnego były dość znaczne ostateczny zbiór został ograniczony o kilkanaście obserwacji. Do analizy porównawczej wykorzystano wartość błędu systematycznego (wzór [1]) oraz błędu średniokwadratowego (wzór [2]). Wyniki obliczeń z uwzględnieniem różnorodności drzewostanów przedstawiono w tabeli III.5.

Tabela III. 5. Wartości błędu systematycznego i błędu średniokwadratowego dla rzędnych wysokościowych uzyskanych dla wybranych punktów z danych liadrowych w odniesieniu do rzędnych wysokościowych z pomiarów geodezyjnych.

| Oddział/<br>wydzielenie | Gatunek<br>panujący | Wiek | Wysokość<br>drzew [m] | $\Sigma$ [m]- błąd<br>systematyczny | RMSE<br>[m] |
|-------------------------|---------------------|------|-----------------------|-------------------------------------|-------------|
| 220 b                   | Sosna               | 2    | 0                     | -0,14                               | 0,22        |
| 220 a                   | Sosna               | 9    | 2                     | -0,06                               | 0,30        |
| 219 d                   | Sosna               | 28   | 11                    | -0,16                               | 0,23        |
| 220 d                   | Sosna               | 109  | 22                    | -0,15                               | 0,19        |
|                         |                     |      | <b>Średnia</b>        | <b>-0,12</b>                        | <b>0,25</b> |

### 3.5 Wnioski

Uzyskane wyniki wskazują na bardzo wysoką zbieżność danych ze skaningu laserowego z pomiarami geodezyjnymi. Mając na względzie stosunkowo duże odległości pomiędzy punktami z pomiarów tachymetrycznych należy przypuszczać, że zgodność obserwacji z LIDARA może być zdecydowanie wyższa. Gęstość siatki pomiarowej oraz lokalne ukształtowanie terenu w sposób istotny wpływa na uzyskane wyniki. Błąd systematyczny wynoszący w obu przypadkach -0,12 m jest praktycznie do pominięcia, jeżeli weźmiemy pod uwagę dokładność określania pomiaru wysokości tachimetru elektronicznego  $\pm 0,02$  m, dokładność określania współrzędnej z wyrównania obserwacji GPS  $\pm 0,05$  m, czy wreszcie zagłębienia się grota tyczki w ziemi podczas pomiaru pikiety  $\pm 0,02$  m.



Ryc. III.11. Histogram błędu średniokwadratowego dla rzędnych Z pochodzących z numerycznego modelu terenu wygenerowanego z obserwacji lidarowych (Lidar – model) oraz wybranych obserwacji z lidarowej chmury punktów (Lidar – punkty)

Sieć punktów referencyjnych rozmieszczona w siatce o wymiarach około 10x10 m pozwala na uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników, kiedy porównuje się ją w stosunku do modelu ze skaningu laserowego. Unika się w ten sposób lokalnych nierówności terenowych mogących wpłynąć na wynik porównania. Zaobserwowano jednocześnie duże różnice w rzędnych Z na tym fragmencie terenu, gdzie zmienność wysokości była istotna. Wynikają one z nieściśłości, jakie wprowadza algorytm interpolacyjny zastosowany w programie TreesVis dla danych o dużych różnicach w wysokości.

Na dużą dokładność danych LIDAR-owych wskazuje histogram błędu średniokwadratowego pokazujący wysoki udział błędów o minimalnych wartościach kształtujących się w przedziale 0,01 do 0,03 m. co stanowi blisko 70% wszystkich obserwacji (ryc. III.11). Nie stwierdzono równocześnie większych różnic w kształtowaniu się błędu RMSE w zależności od typu drzewostanu, co dowodzi, że możliwe jest stosowanie techniki LIDAR-owej w różnych typach drzewostanów uzyskując równocześnie wierność w odwzorowaniu rzeczywistej powierzchni terenu.

## **4. Wykorzystanie danych z lotniczego skanowania laserowego do określania liczby drzew**

Dane LIDAR-owe, dzięki swej charakterystyce, posiadają ogromny potencjał w określaniu wielu parametrów drzewostanu, przede wszystkim jednak w rozpoznawaniu pojedynczych drzew. Cecha ta spowodowała, że istnieje obecnie wiele doświadczeń w automatycznym określaniu liczby drzew na jednostce powierzchni. Poniżej przedstawiono zbiór metod i algorytmów służących do segmentacji drzewostanu, oraz wyniki uzyskiwane dla różnych drzewostanów.

### ***4.1 Opis metod i wyników określania liczby drzew na podstawie literatury***

Od momentu pojawienia się danych LIDAR-owych możliwe jest automatyczne generowanie wysokościowego modelu koron, który stał się podstawą w procesie określania liczby drzew na jednostce powierzchni. W większości prac można zauważyć, iż dodatkowym, ważnym źródłem informacji są różnego rodzaju zdjęcia lotnicze. W tej części opracowania skoncentrowano się nad możliwościami wykorzystania danych LIDAR-owych do określenia liczby drzew na jednostkę powierzchni.

Możliwość określenia liczby drzew na jednostce powierzchni polega w rzeczywistości na określeniu zasięgów koron i policzeniu poligonów, które powstały w wyniku tych działań. Udowodniono, że lepsze rezultaty daje obraz rastrowy o większej rozdzielczości (mniejsze „oczko” siatki), niż obrazy o małych rozdzielczościach. Wynika stąd jasno, iż możliwość określenia zasięgu korony, a co za tym idzie liczby drzew na jednostce powierzchni, zależy od rozdzielczości, czyli wielkości pola podstawowego w obrazie rastrowym (Heurich i in. 2004b).

Metod segmentacji drzewostanów jest wiele. W odniesieniu do charakterystyki drzewostanów w Polsce najważniejsze są wyniki prac prowadzonych w środkowozachodniej części Europy. Poniżej opisane zostaną przede wszystkim te doświadczenia, a także zebrane wyniki innych prac.

Określanie liczby drzew bardzo często jako głównego źródła informacji używa Wysokościowego Modelu Koron (Numerycznego Modelu Koron, Numerycznego Modelu Różnicowego) powstałego w wyniku automatycznego odjęcia NMPT od NMT. Czynność odjęcia warstw możliwa jest do przeprowadzenia w środowisku wielu programów,

np.: HALCON (Heurich i in. 2004b). Model koron drzew wygładzany jest filtrem Gaussa. Następnie wyszukiwane są na jego obszarze lokalne maksima, które interpretowane są jako osobne drzewa (Maltamo i in. 2004a). Model taki zostaje następnie włączony w proces klasyfikacji jako dodatkowe źródło informacji dla zdjęć lotniczych i satelitarnych (Wack 2006), lub przy pomocy algorytmów i informacji wysokościowej, zawartej w pikselach, poddawany jest procesowi segmentacji. Jak podaje Wack (2006) polepszenie wyników klasyfikacji uzyskiwano dzięki wcześniejszemu rozdzieleniu drzewostanów liściastych od iglastych.

Zależność między wysokością a średnicą korony drzewa wykorzystana została w metodzie zaprezentowanej przez Tiede i zespół (2005). Model wymagał wcześniejszej kalibracji do specyfiki drzewostanu, który miał zostać poddany analizie. Po odnalezieniu przez algorytm najwyższego punktu następowało poszukiwanie innego, wyższego, w promieniu, który odpowiadał średnicy korony. Określenie zasięgu drzew rozpoczynało się od punktów wcześniej określonych jako wierzchołki drzew. Począwszy od najniższych drzew algorytm wyszukiwał sąsiednich pikseli o mniejszej wartości i te uznawał za składniki korony. Piksele wyszukiwane były w określonym promieniu, zależnym od wysokości maksymalnej. Metoda wykazała wysoką skuteczność, w granicach 51%, a dla drzew panujących – 72 %. Główne przyczyny błędów, to błędy w pracy algorytmu, określającego zasięg (dodawanie powierzchni będących lukami do powierzchni korony) oraz nie trafianie impulsów laserowych w wierzchołki drzew, przez co wiele z nich nie zostało zarejestrowanych.

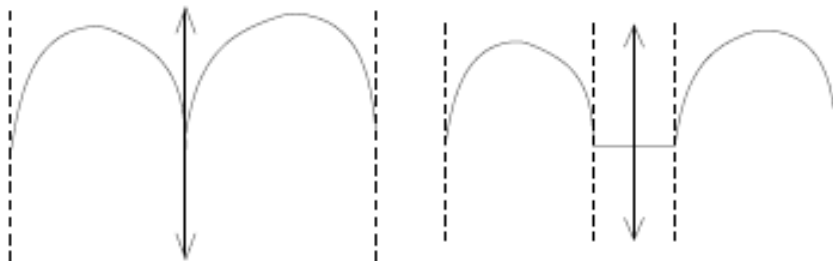
Wykorzystanie algorytmu TIDA (ang.: **T**ree **I**dentification and **D**elineation **A**lgorithm) do określania granic drzew opisane zostało przez Coopsa (Coops i in. 2004). Algorytm ten używa metody „od szczytu w dół” (top-down), która polega na zidentyfikowaniu najpierw radiometrycznego maksimum z sąsiadującymi pikselami. Lokalne maksima służą w następnym etapie do określania centrów, wokół których reszta korony jest formowana. Wyniki analiz zależne są od wielu czynników, takich jak: rodzaj wykorzystywanej technologii, pora dnia, kąt padania promieni słonecznych i kąt pozyskiwania danych. Z racji tego, że cienie odgrywają bardzo ważną rolę, dane LIDAR-owe mają przewagę nad tradycyjnymi metodami fotogrametrycznymi – zdjęciami cyfrowymi, które skażone są występowaniem cieni. Minusem danych LIDAR-owych jest to, że niżej położone korony zasłonięte są przez drzewa z wyższych warstw, co może powodować utrudnienia w ich identyfikacji i negatywnie wpłynąć na wyniki estymacji.

Wykorzystanie algorytmu wyszukującego doliny jako zasięgu poszczególnych koron drzew (Leckie i in. 2003) również osiąga wysoką skuteczność. W metodzie wykorzystano dane LIDAR-owe (rastry o rozdzielczości 0,25 m) i obrazy pozyskane przez DFC (*Digital Frame Camera*) o rozdzielczości 8,5 cm. Opisany algorytm traktuje obraz cyfrowy jako powierzchnię topograficzną. Jego działanie polega na wyszukiwaniu lokalnych minimów i odnajdywaniu dolin pomiędzy koronami, na podstawie jasności pikseli. Im jaśniejsze oczko rastra, tym jest ono położone wyżej. Algorytm tworzy maskę obszarów dolin i obszarów będących koronami. W dalszym etapie odseparowane segmenty są analizowane albo mogą być uważane za korony pojedynczych drzew. Jeśli ten warunek nie jest spełniony następuje rozdzielanie segmentu. Izolacja pojedynczych koron oparta została o materiał z kamery cyfrowej o rozdzielczości 0,5 m. Ostatnim etapem było określenie minimalnej powierzchni oznaczonych poligonów. Wartości mniejsze od założonego progu zostały usunięte. W obu użytych typach danych wyjściowych uzyskano skuteczność ponad 80%. Wysoką skuteczność analiz uzyskano zwłaszcza w rzadkich drzewostanach świerkowych.

Wykorzystanie programu *Arboreal Forest Inventory Tools of Arbonaut Ltd.* oraz algorytmu będącego połączeniem metod zdefiniowanych w Austrii – Joanneum Reaserch i w Niemczech na Uniwersytecie we Freiburgu wykorzystał zespół Hyypy (Hyypä J. i in. 2005). Identyfikacja drzew opierała się najpierw na odnalezieniu lokalnego maksimum z użyciem filtra *low-pass*. Następnie z wykorzystaniem algorytmu *watershed* następowała segmentacja obrazu w siedmiu różnych warstwach o innych ustawieniach w celu ustalenia najskuteczniejszych z nich. Wzrokowa ocena wyłoniła najlepszy wynik segmentacji i tą warstwę wykorzystano w dalszych analizach. Założono na podstawie gatunku, wieku i wysokości maksymalną wielkość korony, a następnie wszystkie grupy, których średnica była większa od zakładanej podzielono, by dokładniej określić liczbę drzew.

Udoskonaloną metodę wykorzystania algorytmu *watershead* opisał Weinacker wraz z zespołem (2004), Mei i Durrieu (2004), Rossmann z zespołem. (2007) oraz Zhao i Popescu (2007). Problem, na który zwrócili oni uwagę dotyczył efektów pracy algorytmu i zawyżania powierzchni korony przy niskim stopniu zadrzewienia analizowanego drzewostanu. Numeryczny model powierzchni terenu, który powstał w wyniku wykorzystania algorytmu *watershead* może być przedstawiony jako obraz w odcieniach szarości tam, gdzie jasności pikseli reprezentują odpowiednie wysokości. Przez odwrócenie drzew do góry pniem, korony tworzą coś w rodzaju misek, zlewni. Granica takiej zlewni jest uznawana za granicę korony drzewa. Takie interpretowanie rzeczywistości przez algorytm prowadzi, szczególnie

w drzewostanach o luźnej strukturze, do przeszacowania powierzchni korony (ryc III.12). Granica wyznaczona przez algorytm nie jest granicą korony drzewa.



**Rys. III.12** Pozycja granicy wyznaczonej przez algorytm *watershead* dla gęstego (po lewej) i luźnego drzewostanu (po prawej); linie przerywane oznaczają właściwe granice drzew, a linie ciągłe granice określone przez algorytm. (Mei, Durrieu 2004).

Aby uniknąć zawyżania powierzchni koron autorzy wydzieliли w obrazie miejsca, gdzie nie ma wysokiej wegetacji. W tym celu podzielili NMPT na piksele i określili gdzie NMPT osiąga wartości graniczne. Obszary te zostały wyłączone z późniejszych prac. Wyniki klasyfikacji z wykorzystaniem indeksu wegetacji (NDVI) okazały się bardzo dobre i sięgnęły na niektórych powierzchniach 98% poprawnie wykrytych luk. Algorytm *watershead* wykorzystano do przeanalizowania zdjęć lotniczych (HRI - *High Resolution Imager*). Następnie dane z określania miejsc gdzie znajduje się nie-wegetacja wykorzystano do poprawy wyników segmentacji zdjęć lotniczych. Określenie liczby drzew sięgnęło poziom 90%. Szczególnie dobre efekty uzyskano w plantacjach brzozowych.

Poniżej prezentowana jest tabela, w której zebrane są wyniki innych metod pozwalających na określenie liczby drzew na jednostce powierzchni.

**Tabela III.6 Porównanie wyników określania liczby drzew.**

liczba drzew = (dane referencyjne - dane LIDAR-owe/dane referencyjne)×100 [%]

\* liczba drzew górnego piętra; \*\* liczba segmentów składających się z co najmniej 2 drzew

| AUTOR                | DANE REFERENCYJNE     | GĘSTOŚĆ [p/m <sup>2</sup> ] | LICZBA DRZEW [%] | R <sup>2</sup> | UWAGI                                               |
|----------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|----------------|-----------------------------------------------------|
| Coops i in. 2004     | TEREN                 | 0,4-1                       | 90               | -              | TWA i VWS (opis) Św –piętro dominujące              |
|                      |                       |                             | 63,3             | -              | VWS Św                                              |
|                      |                       |                             | 67               | -              | TWA Św                                              |
| Heurich i in. 2004a  | TEREN                 | 10                          | 1,4              | -              | najniższa warstwa drzewostanu                       |
|                      |                       |                             | 5,4              | -              | średnia warstwa drzewostanu                         |
|                      |                       |                             | 57,5             | -              | górne piętro drzewostanu                            |
|                      |                       |                             | 32,6             | -              | drzewostan liściasty                                |
|                      |                       |                             | 43,5             | -              | drzewostan iglasty                                  |
| Heurich i in. 2004b  | TEREN                 | 11                          | 65*              | -              | Św, Bk, Kl, Lp – DSM 0,5m                           |
|                      |                       |                             | 59*              | -              | Św, Bk, Kl, Lp – DSM 1m                             |
|                      |                       |                             | 86*              | -              | Św – DSM 0,5m                                       |
|                      |                       |                             | 65*              | -              | Św – DSM 1m                                         |
|                      |                       |                             | 55*              | -              | Bk, Kl – DSM 0,5m                                   |
|                      |                       |                             | 39*              | -              | Bk, Kl – DSM 1m                                     |
| Hirata 2004          | TEREN                 | 7,5-24,8                    | 75-96            | -              |                                                     |
| Holmgren i in. 2004b | TEREN                 | 1,2                         | 84               |                | drzewostany Św                                      |
|                      |                       |                             | 75               |                | drzewostany So                                      |
|                      |                       |                             | 58               |                | drzewostany mieszane                                |
|                      |                       |                             | 71               |                | średnia dla wszystkich powierzchni próbnych         |
| Kiraly i in. 2006    | ZDJĘCIA QUICKBIRD     | 1,5                         | 166              | -              | plantacje brzozone                                  |
|                      | TEREN                 |                             | 127              | -              |                                                     |
|                      |                       |                             | 95               | -              |                                                     |
|                      |                       |                             | 77               | -              |                                                     |
| Koch i in. 2006      | TEREN                 | 0,5                         | 95,9**           | -              | gospodarczy drzewostan dąglęzjowy                   |
|                      |                       |                             | 87,3             | -              |                                                     |
|                      |                       |                             | 61,2**           | -              | gospodarczy drzewostan złożony z gatunków iglastych |
|                      |                       |                             | 50               | -              |                                                     |
|                      | ZDJĘCIA STEREOSKOPOWE |                             | 85,4**           | -              | gospodarczy drzewostan mieszany                     |
|                      |                       |                             | 61,7             | -              |                                                     |
| Korpela i in. 2007   | TEREN                 | 6                           | 96,3             |                | wszystkie gatunki                                   |
|                      |                       |                             | 98,2             |                | sosna                                               |
|                      |                       |                             | 97,6             |                | świerk                                              |
|                      |                       |                             | 89,6             |                | gatunki liściaste                                   |
| Leckie i in. 2003    | TEREN                 | 2                           | 100              | -              | zagęszczenie 300 drzew/ha                           |
|                      |                       |                             | 100              | -              | zagęszczenie 500 drzew/ha                           |
|                      |                       |                             | 90               | -              | zagęszczenie 725 drzew/ha                           |
|                      |                       |                             | 95               | -              | średnia dla 3 powierzchni                           |

| AUTOR                 | DANE REFERENCYJNE | GĘSTOŚĆ [p/m <sup>2</sup> ] | LICZBA DRZEW [%] | R <sup>2</sup>                              | UWAGI                                                        |
|-----------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Maltamo i in. 2004a   | TEREN             | 10                          | 84*              |                                             | drzewostan świerkowy                                         |
|                       |                   |                             | 94*              |                                             | drzewostan sosnowy                                           |
|                       |                   |                             | 63*              |                                             | drzewostan brzoza                                            |
|                       |                   |                             | 83*              |                                             | średnia dla wszystkich powierzchni próbnych                  |
|                       |                   |                             | 37               |                                             | drzewostan świerkowy                                         |
|                       |                   |                             | 50               |                                             | drzewostan sosnowy                                           |
|                       |                   |                             | 33               |                                             | drzewostan brzoza                                            |
|                       |                   | 39,5                        |                  | średnia dla wszystkich powierzchni próbnych |                                                              |
| Mei i in. 2004        | TEREN             | -                           | 53               |                                             | drzewa oliwne                                                |
|                       |                   |                             | 81               |                                             | plantacja brzozowa                                           |
| Persson i in. 2003    | TEREN             | 15                          | 70               |                                             | drzewostany świerkowo-sosnowo-bukowe                         |
|                       |                   |                             | 90*              |                                             |                                                              |
| Reitberger i in. 2007 | TEREN             | 25 full wave form           | 78*              | -                                           | Metoda segmentacji wykorzystująca detekcji pni.              |
|                       |                   |                             | 53               | -                                           |                                                              |
|                       |                   |                             | 74*              | -                                           | Metoda segmentacji nie wykorzystująca detekcje pni.          |
|                       |                   |                             | 49               | -                                           |                                                              |
| Tiede i in. 2006b     | TEREN             | 10                          | 90               |                                             | wszystkie drzewa dominujące (H>10m)                          |
|                       |                   |                             | 81               |                                             | drzewa dominujące (H>10m) i prawidłowo sklasyfikowane        |
| van Aardt i in. 2006  | TEREN             | <5                          | 89               |                                             | ostateczny efekt klasyfikacji na gatunki iglaste i liściaste |
| Wack i in. 2003       | TEREN             | 5                           | 93               | -                                           | plantacja eukaliptusowa                                      |
| Wack 2006             | TEREN             | 1                           | RMS=21           | 0,93                                        | wszystkie pow.                                               |
|                       |                   |                             | RMS=15           | 0,96                                        | iglaste                                                      |
|                       |                   |                             | RMS=30           | 0,93                                        | >50% liściastych                                             |
|                       |                   |                             | RMS=22           | 0,90                                        | różne drzewostany (10 pow.)                                  |
| Weinacker i in. 2004  | TEREN             | -                           | 87,3             |                                             | Dg                                                           |

Używając 3 różnych metod Pitkanen wraz z zespołem, poddał analizie wysokościowy model koron, by określić liczbę drzew na jednostce powierzchni (Pitkanen i in. 2004). Poniżej przedstawiono wyniki tych estymacji.

**Tabela III.7 Dokładność określania liczby drzew w zależności od metody (RAW - local maxima finding on the unfiltered CHM; GAUS - Gaussian filtered CHM; HBF – height based filtering; ELIM – maxima elimination; LAP – Laplacian blob selection); gęstość pulsów wyniosła 10 p/m<sup>2</sup> (Pitkanen i in. 2004).**

| Method | Percentage of all trees |                     | Basal area of found trees (%) |
|--------|-------------------------|---------------------|-------------------------------|
|        | Found trees             | Non-tree candidates |                               |
| RAW    | 49.2                    | 64.6                | 81.7                          |
| GAUS   | 36.7                    | 6.6                 | 68.0                          |
| HBF    | 37.0                    | 5.9                 | 67.6                          |
| ELIM   | 41.6                    | 8.0                 | 73.2                          |
| LAP    | 41.5                    | 16.9                | 66.8                          |

**Tabela III.8 Procent wykrytych drzew oraz systematyczny błąd wysokości (symbole metod jak wyżej) (Pitkanen i in. 2004).**

| Method | Dominant trees (%) | Other (%) | Bias of height |
|--------|--------------------|-----------|----------------|
| RAW    | 79.4               | 7.4       | -0.46          |
| GAUS   | 61.4               | 2.4       | -0.74          |
| HBF    | 61.2               | 3.4       | -0.79          |
| ELIM   | 68.7               | 4.0       | -0.73          |
| LAP    | 62.4               | 12.5      | -0.97          |

**Tabela III.9 Dokładność szacowania ilości drzew osiągnięta dla sześciu powierzchni próbnych (pod uwagę brana była tylko wysokość drzew powyżej 10 m; gęstość pulsów wyniosła 10 p/m<sup>2</sup> (Tiede i in. 2005).**

| Sample plot                                                  | Field measured trees |                | Lokal Maximum - calculated Trees |                |                 | Perc. of found trees |                |                 |
|--------------------------------------------------------------|----------------------|----------------|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|
|                                                              | All trees            | Dominant trees | All trees                        | Dominant trees | false positives | All trees            | Dominant trees | false positives |
| Plot 22: mature mixed (200 y) valley -side forest            | 57                   | 32             | 30                               | 25             | 0               | 52,6%                | 78,1%          | 0,0%            |
| Plot 50: sub -alpine, well spaced mature (130 - 180y) spruce | 46                   | 43             | 38                               | 35             | 1               | 82,6%                | 81,4%          | 2,6%            |
| Plot 57: mature (90 - 105y) spruce stand                     | 45                   | 44             | 30                               | 30             | 0               | 66,7%                | 68,2%          | 0,0%            |
| Plot 59: juvenile (30 - 50y) spruce stand                    | 177                  | 79             | 51                               | 47             | 0               | 28,8%                | 59,5%          | 0,0%            |
| Plot 60: mature (110 y) beech, valley side                   | 43                   | 30             | 22                               | 20             | 1               | 51,2%                | 66,7%          | 4,5%            |
| Plot 64: mature (100 y) beech, valley side                   | 40                   | 38             | 37                               | 35             | 2               | 92,5%                | 92,1%          | 5,4%            |
| Sum of all plots:                                            | 408                  | 266            | 208                              | 192            | 4               | 51,0%                | 72,2%          | 1,9%            |
| Sum without Plot 59:                                         | 231                  | 187            | 157                              | 145            | 4               | 68,0%                | 77,5%          | 2,5%            |

Wyniki segmentacji danych LIDAR-owych w środowisku oprogramowania Definiens eCognition (Definiens AG, Monachium) (Tiede, Hoffmann 2006a) przedstawiono poniżej.

Metoda polegała na identyfikacji drzew na podstawie lokalnych maksimumów, a następnie określenia zasięgu ich koron na podstawie informacji o jasności zawartej w pikselach. Zastosowany algorytm analizuje przestrzeń i rozbudowuje koronę do momentu, gdy natrafi na sąsiednią koronę. Metoda okazała się być bardzo sprawna. Istotne jest to, że zaledwie 3% wyników okazało się fałszywymi trafieniami, przy czym ilość zidentyfikowanych drzew rosła wraz ze zmniejszaniem obszaru przeszukiwania.

**Tabela III.10. Dokładność określania lokalnych maksimumów dla sześciu różnych powierzchni doświadczalnych (pod uwagę wzięte zostały tylko dominujące drzewa) (Tiede, Hoffmann 2006a).**

| Sample plot                                   | Field measurements | Local maximum calculation |                 | % of found dominant trees |
|-----------------------------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
|                                               | Dominant trees     | Dominant trees            | False positives |                           |
| Plot 22: mature mixed forest                  | 32                 | 24                        | 0               | 75.0                      |
| Plot 50: sub-alpine well spaced mature spruce | 43                 | 35                        | 1               | 81.4                      |
| Plot 57: mature spruce                        | 44                 | 31                        | 0               | 70.5                      |
| Plot 59: juvenile spruce                      | 79                 | 72                        | 4               | 91.1                      |
| Plot 60: mature beech                         | 30                 | 20                        | 1               | 66.7                      |
| Plot 64: mature beech                         | 38                 | 33                        | 3               | 86.8                      |
| Sum of all plots                              | 266                | 215                       | 9               | 80.8                      |

## **4.2 Metody określania liczby drzewa opracowane i wykorzystane w projekcie**

W projekcie zastosowano cztery różne metody określania liczby drzew na jednostce powierzchni. Dwie z nich oparte były na numerycznym wysokościowym modelu koron, czyli powierzchni 2,5D. Kolejne dwie metody bazowały na surowej chmurze punktów - powierzchni 3D.

Analizy oparto na powierzchniach próbnych, których współrzędne środków i pozycje drzew określona zostały metodami geodezyjnymi. Pierwotnie współrzędne środków pomierzono GPS-em, a pozycje drzew określono mierząc azymut i odległość względem środka powierzchni. Metod ta okazała się jednak zbyt niedokładna, biorąc pod uwagę poziom wymagany w planowanych pracach badawczych. Zdecydowano się więc na ponowne określenie współrzędnych środków powierzchni z wykorzystaniem tachimetru elektronicznego. Po tym pomiarze okazało się, że pierwotne położenie powierzchni zmieniło się. Należało więc wszystkie warstwy wektorowe charakteryzujące powierzchnie próbne dociągnąć i obrócić do nowych współrzędnych ich środków. Przy tej okazji stwierdzono

nieuwzględnienie odchyłki kątowej w wykonywanych wcześniej pomiarach busolowych. W trakcie prac przygotowawczych okazało się, że z pośród 30 powierzchni próbnych pierwotnie pomierzonych, jedna została wycięta jeszcze przed wykonaniem lotniczego skanowania laserowego. Kolejne cztery pomierzone powierzchnie nie zostały dociągnięte przestrzennie w zadowalający sposób, gdyż ich struktura wewnętrzna uniemożliwiła prawidłowe rozpoznanie drzew, przez co zostały one wykluczone z późniejszych analiz.

#### **4.2.1 Opis wykorzystanych algorytmów do określania liczby drzew**

Trzy z prezentowanych poniżej algorytmów dokonują segmentacji przestrzeni leśnej na obiekty interpretowane następnie jako pojedyncze korony drzew – pojedyncze drzewa. Segmentacja, w zależności od przyjętej metody, odbywa się w oparciu o wysokościowy model koron lub na surowej chmurze punktów. Są to metody opracowane przez zespół z Freiburga.

Ostatnia z badanych metod określała lokalne maksima na wysokościowym modelu koron. Każde z maksimów interpretowane było jako wierzchołek pojedynczego drzewa. W ten sposób określano liczbę drzew na powierzchni próbnej. Metoda określania liczby drzew, opisana w sprawozdaniu, zaprojektowana została przez autora poniższego opracowania. Jest ona nadal rozwijana i będzie ona głównym składnikiem przygotowywanej przez autora pracy doktorskiej. Już w tym momencie należy wspomnieć, że zostały do niej zaimplementowane narzędzia pozwalające na:

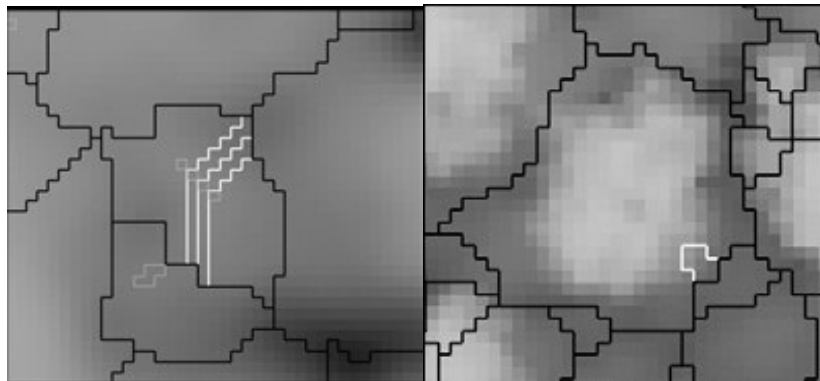
- wyłączenie z analiz powierzchni gruntu,
- segmentacje przestrzeni leśnej na pojedyncze korony,
- ograniczenie zasięgu koron do pewnej określonej wysokości – dzięki czemu uzyskiwany jest, zbliżony do rzeczywistego, kształt korony,
- automatyczne uzyskiwanie parametrów drzew i koron,

W tym miejscu opis metody powinien dać wyobrażenie na temat jej działania i efektywności. Dokładny jej opis znajdzie się w doktoracie, stąd prośba o wyrozumiałość.

#### **4.2.2 Metody oparte na modelach terenu 2,5D**

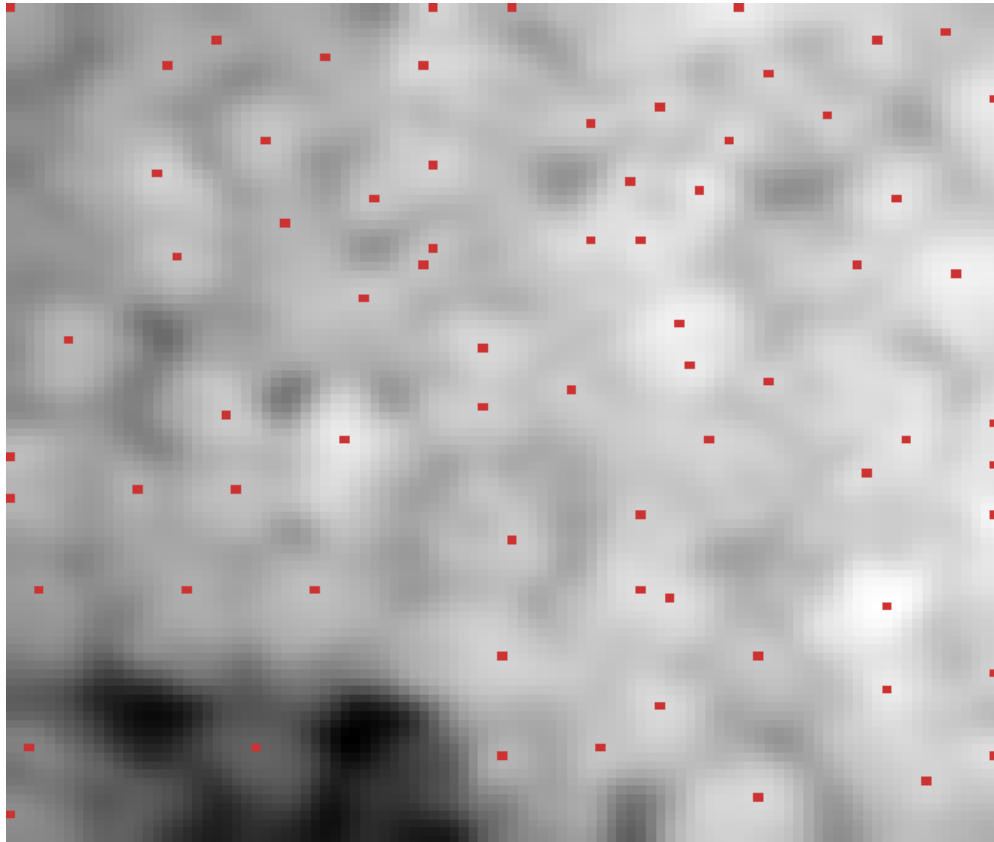
Pierwszy z opisywanych algorytmów został opracowany na Uniwersytecie we Freiburgu (Weinacker i in. 2004) (w tabelach z paragrafie WYNIKI algorytm oznaczony jest jako YW 2,5D). Dzieli on drzewostan na 2 grupy wysokościowe. Najpierw obraz jest filtrowany a następnie wyszukiwane są lokalne maksima. Następnie „pouring algorytm” analizuje macierz pikseli, określając zasięg poszczególnych pikseli. Początkiem pracy

algorytmu jest zawsze wcześniej określony wierzchołek (lokalne maksimum). Po określeniu zasięgu koron usuwane są obiekty, których charakterystyki przestrzenne nie spełniają określonych kryteriów. Usuwane są w ten sposób obiekty, których kształt nie może być koroną drzewa.



**Ryc. III.13. Korygowanie wyników segmentacji koron drzew.**

Drugi z wykorzystanych algorytmów jest wciąż rozwijany (w tabelach z paragrafie WYNIKI algorytm oznaczony jest jako KS 2,5D). W swej filozofii jest podobny do wyżej prezentowanego, ale nie służy do określenia zasięgu koron, a jedynie do zlokalizowania wierzchołków (lub najwyższych części) drzew. W pierwszej kolejności drzewostan dzielony jest 5 metrowe warstwy wysokościowe. Analiza rozpoczyna się od górnego piętra. Najpierw selekcjonowane są najwyższe korony. Ich warstwa jest podwójnie filtrowana filtrem Gaussa. Dla każdej przefiltrowanej warstwy wyznaczane są lokalne maksima. Algorytm przesuwa się o 1 warstwę w dół i w podobny sposób ją analizuje. Po zakończeniu procesu wszystkie wyniki zapisywane są w jednym pliku wyjściowym.



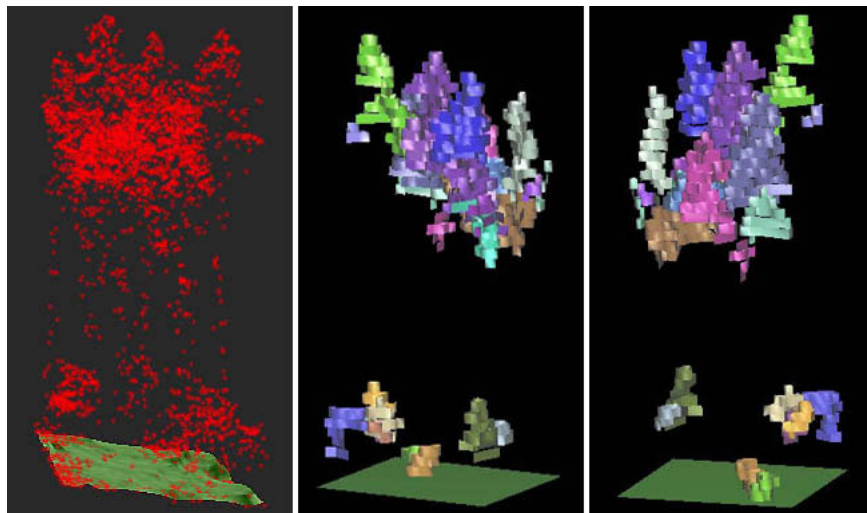
Ryc. III.14. Wyniki zastosowania metody określającej liczbę drzew z wykorzystaniem algorytmu do wykrywania lokalnych maksimów.

#### 4.2.3 Metody oparte na surowych danych LIDAR-owych

Pierwszy z opisywanych algorytmów (w tabelach z paragrafie WYNIKI algorytm oznaczony jest, jako SG 3D) jest autorstwa Sandeepa Gupta. W analizach wykorzystywane są chmury punktów z pierwszego i ostatniego odbicia. W pierwszym etapie numeryczny model terenu z surowymi danymi LIDAR-owymi wykorzystywany jest do określenia absolutnej wysokości każdego punktu. Punkty położone poniżej 5 metrów są usuwane. Poszczególne zbiory punktów (korony drzew), określane są za pomocą zmodyfikowanego algorytmu *"k-means"*.

Drugi z opisywanych algorytmów (w tabelach z paragrafie WYNIKI algorytm oznaczony jest jako YW 3D) zaprojektowany został również na Uniwersytecie we Freiburgu. Jego autorką jest Yunsheng Wang. Podobnie jak w powyżej opisywanej metodzie wysokość chmury punktów z LIDAR-a jest normalizowana. Następnie przestrzeń zdefiniowana przez „x, y, z” transformowana jest w przestrzeń wokseli (rząd, kolumna, warstwa). Każdy z punktów istniejących w rzeczywistości ma swój odpowiednik w przestrzeni wokselowej.

Określenie zasięgu koron odbywa się w oparciu o poszczególne leżące nad sobą warstwy 2D gdzie poszczególne części korony są zdefiniowane. W zależności od gęstości punktów w obrębie piksela, różna jest jego skala szarości. Im ta liczba punktów jest większa tym jaśniejszy jest piksel. Hierarchiczno-morfologiczny algorytm służy do określenia ostatecznego zasięgu korony drzewa. W dalszym etapie wykonywane są dodatkowe operacje mające na celu poprawienie kształtu koron znalezionych automatycznie drzew.



Ryc. III.15. Ostateczny wynik określania zasięgu drzew w przestrzeni 3D (Wang i in. 2008)

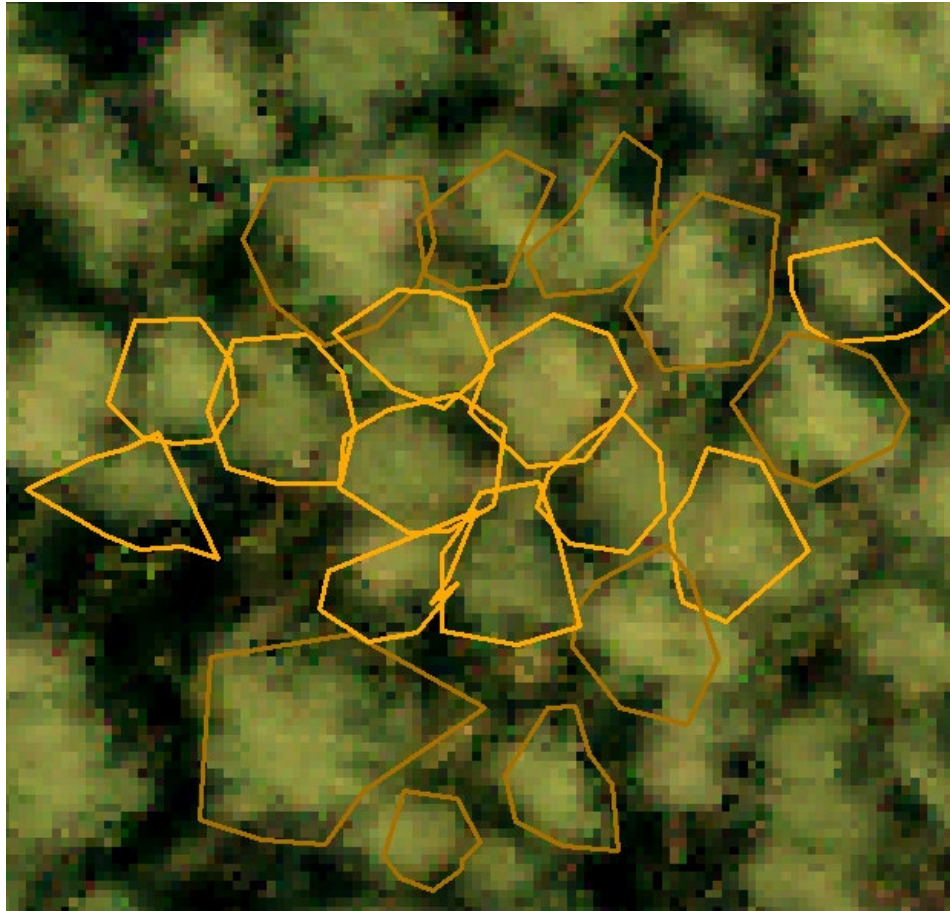
Stosując opisany algorytm możliwe jest określenie następujących charakterystyk drzew:

- wysokość,
- wysokość osadzenia korony,
- średnica korony na różnych wysokościach,
- miąższość korony.

#### **4.3 Opis procesu weryfikacji dokładności algorytmów**

Prace w projekcie skupiły się w pierwszej kolejności na rozwinięciu i dopracowaniu metod. Na tym etapie kilkakrotnie poddawano wyniki ewaluacji, by obrać kierunki rozwoju algorytmu. Jako referencji użyto danych z 30 powierzchni próbnych, dla których określono poziomy zasięg koron drzew. Dane wektorowe z tych pomiarów musiały w pierwszej kolejności zostać dociągnięte do pomiarów środków powierzchni określonych metodami geodezyjnymi. Spośród 30 pierwotnie pomierzonych powierzchni: jedna została wycięta jeszcze przed wykonaniem skanowania laserowego, a cztery wykluczone z powodu

problemów z ich prawidłowym dociągnięciem do danych rastrowych. Do analiz wykorzystano ostatecznie 25 powierzchni próbnych. Poniżej prezentowana jest jedna z nich (Ryc. III.16).



**Ryc. III.16. Powierzchnia próbna nr 11 z dociągniętymi do zdjęcia RGB danymi wektorowymi.**

Generalnie metodykę prac można przedstawić następująco.

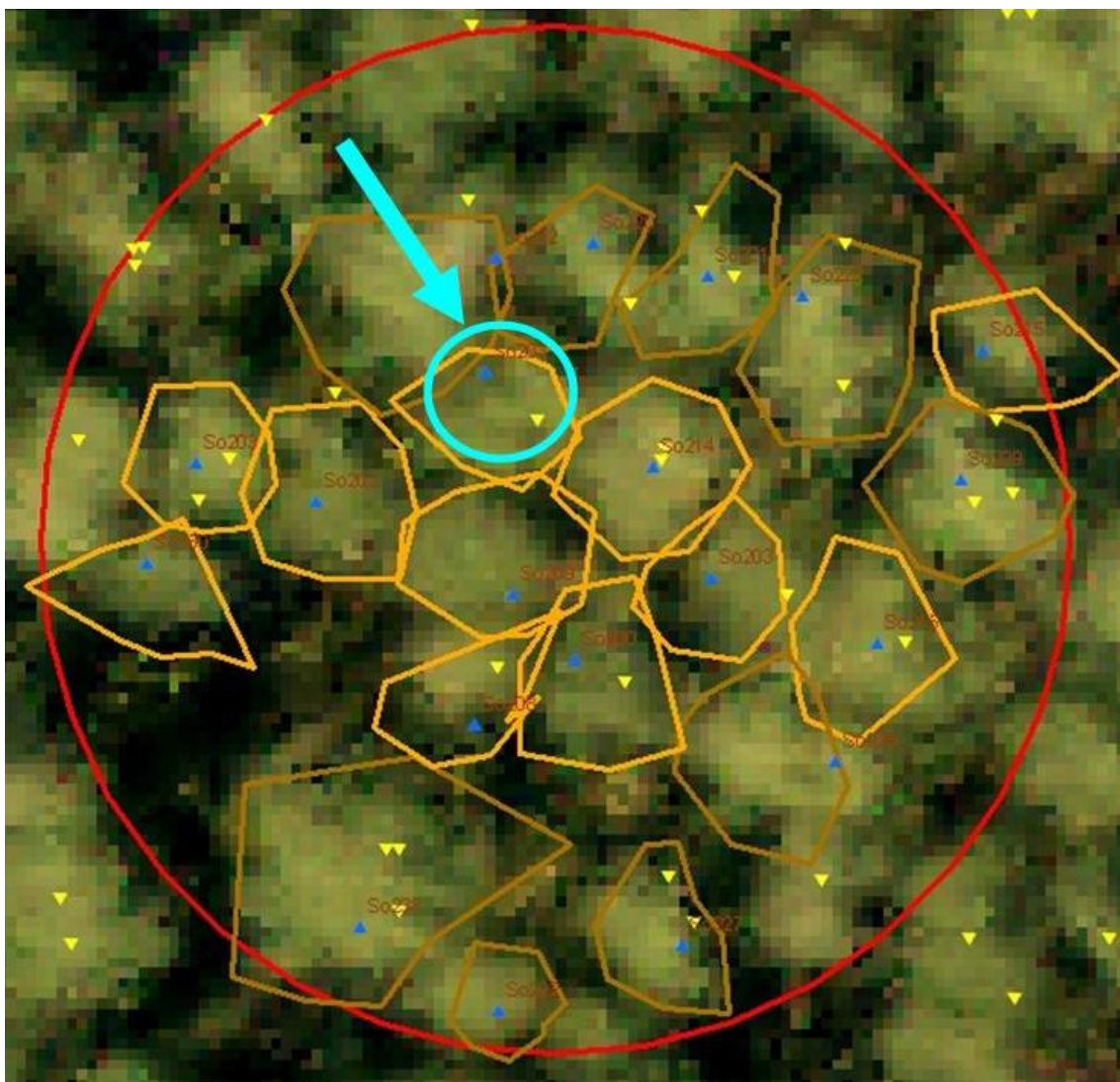
1. Po uzyskaniu wyników zawsze doprowadzono dane do postaci pliku „shp”, gdyż analizy porównawcze prowadzone były w programie ArcGIS 9.2 (ESRI).
2. Następnie, w oparciu o kształt rzutów koron, przyporządkowywano wyniki analiz poszczególnym wierzchołkom drzew. Starano się połączyć wynik automatycznej metody z odpowiadającym mu wierzchołkiem drzewa w warstwie referencyjnej.
3. Gdy w jednym poligonie charakteryzującym koronę drzewa znajdowało się więcej wyników automatycznej segmentacji wynik prawidłowy identyfikowano w oparciu o wartość wysokości.

4. Liczbę wszystkich wyników automatycznej metody segmentacji zakwalifikowanych do powierzchni próbnej zdefiniowano jako sumę punktów wewnątrz powierzchni oraz punktów, które znajdują się w obrębie pomierzonych koron drzew, ale poza zasięgiem powierzchni próbnej.
5. Ostatecznie otrzymywano 2 liczby – pierwsza charakteryzowała liczbę właściwie zdefiniowanych (znalezionych) drzew, druga określała liczbę punktów, w obrębie powierzchni próbnej, uzyskaną z automatycznych metod segmentacji.

Poniżej przedstawiono wszystkie możliwe relacje przestrzenne pomiędzy wynikami automatycznych metod segmentacji a danymi referencyjnymi. Pod każdym obrazkiem znajduje się opis przyjętego rozwiązania.

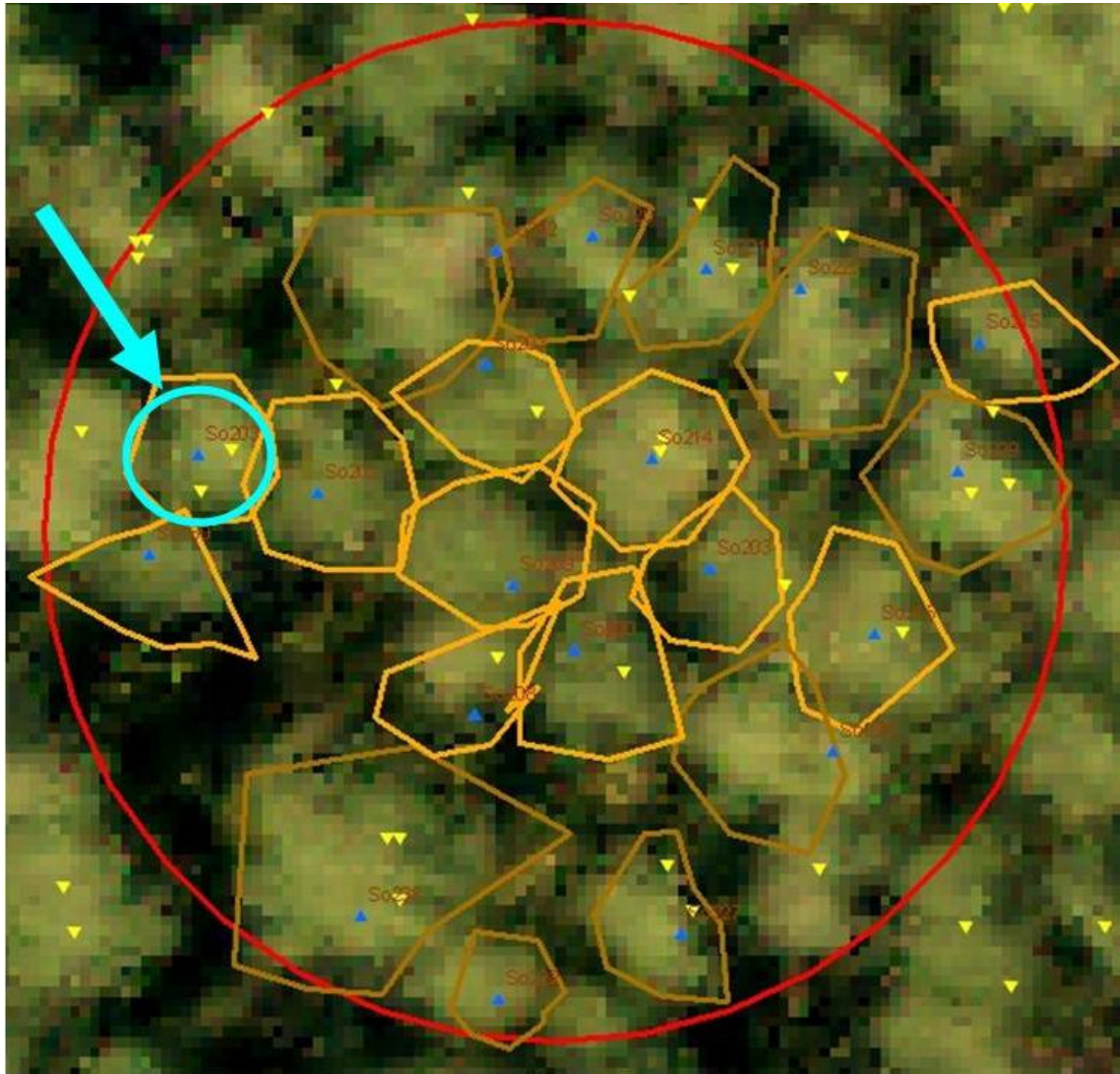
Na poniższych obrazach:

- żółte trójkąty to wyniki automatycznych metod określania liczby drzew na jednostkę powierzchni, często definiowane jako najwyższe punkty w modelu rastrowych lub w surowej chmurze punktów, zależnie od przyjętej metody segmentacji,
- niebieskie trójkąty to wierzchołki drzew określone w pomiarach terenowych,
- poligony o brązowych granicach to zasięgi koron drzew, określone w trakcie pomiarów terenowych,
- niebieska strzałka i okrąg to oznaczenia konkretnych omawianych sytuacji.



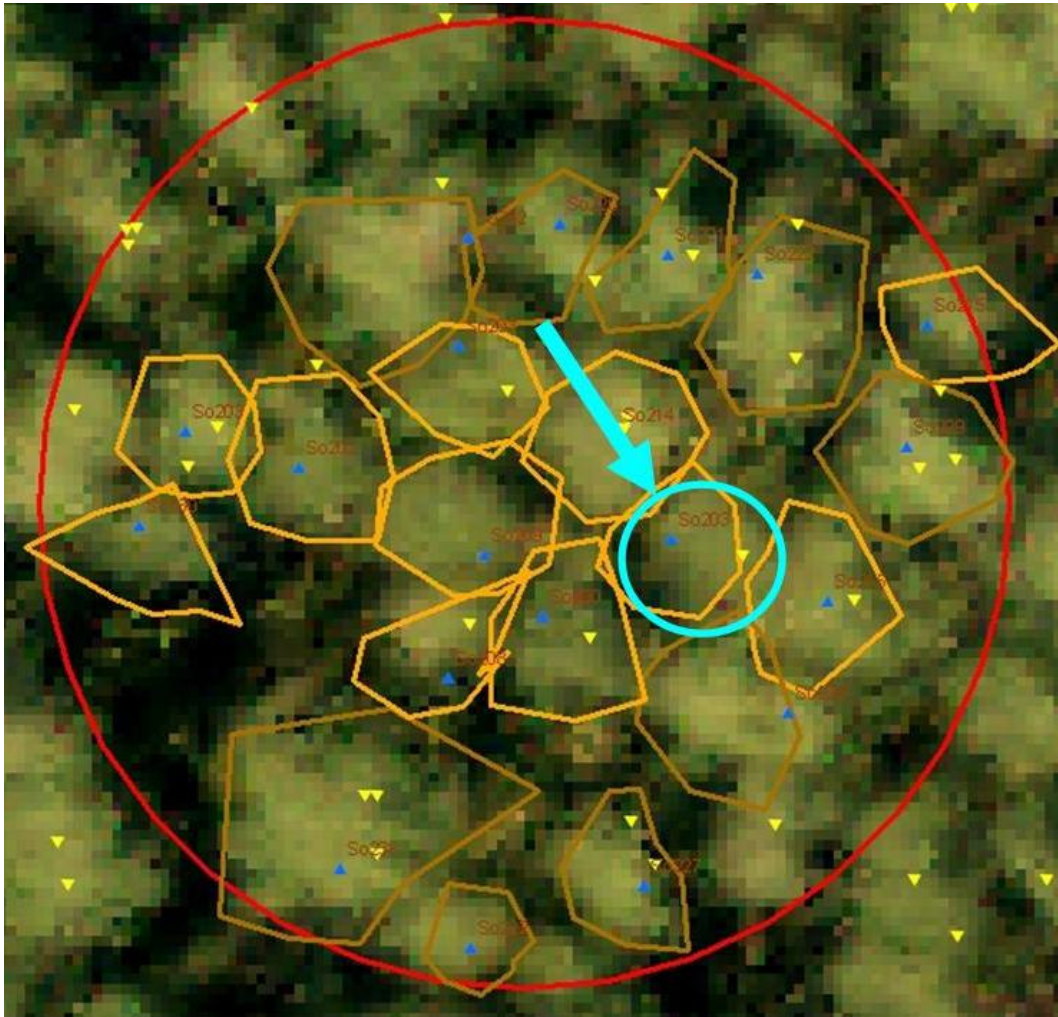
**Ryc. III. 17. Weryfikacja dokładności segmentacji- wariant 1.**

Powyżej prezentowana jest pierwsza z rozpatrywanych sytuacji. W tym przypadku połączenie wyniku z automatycznej segmentacji drzewostanu z danymi referencyjnymi jest łatwe i jednoznaczne. Generalnie takie sytuacje przeważały. Różnica pomiędzy położeniem wierzchołka drzewa określonego w trakcie pomiarów terenowych, a położeniem tego samego drzewa określonym w wyniku analiz automatycznych bierze się z wielu czynników. Najważniejszym jest to, że bardzo często trudno jest określić z poziomu gruntu faktycznie najwyższy element korony. Dodatkowo jego pozycja może być czasami bardzo trudna do określenia.



**Ryc. III.18. Weryfikacja dokładności segmentacji - wariant 2.**

W tym przypadku wynik automatycznej segmentacji wskazał na istnienie dwóch drzew w miejscu gdzie faktycznie występuje tylko jedno. W tym przypadku należy uznać, iż jest to wielokrotne trafienie (ang.: *multi-shoot*). W takiej sytuacji definiowano drzewo jako właściwie określone. W zależności od algorytmu ilość wielokrotnych trafień kształtowała się na poziomie od 2 do 5. Sumarycznie liczba wszystkich punktów w obrębie powierzchni próbnej była sumowana i dla niektórych algorytmów przyjęła bardzo wysoki poziom.

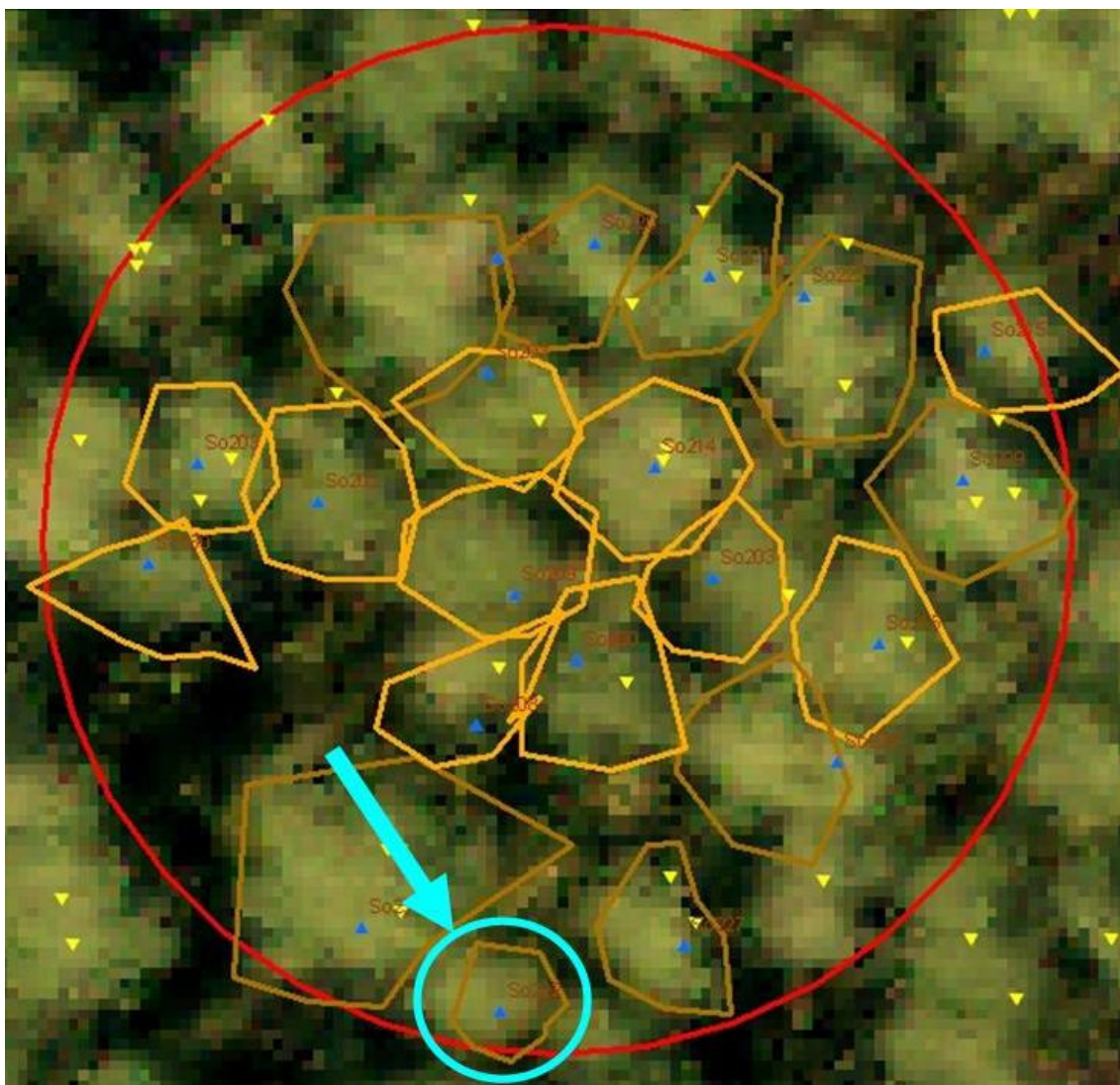


**Ryc. III.19. Weryfikacja dokładności segmentacji - wariant 3.**

Powyższa sytuacja pokazuje sporadycznie występujący problem. Wyraźnie widać, iż wynik automatycznej metody nie znalazł się w zasięgu korony prawidłowo określonego drzewa. W takim przypadku informacje o wysokości drzew (pomiarzy naziemne) i wartości wysokości zapisane w pikselach WMK wykorzystywane były do właściwego zweryfikowania problemu. Powyższe rozbieżności wynikają z następujących powodów:

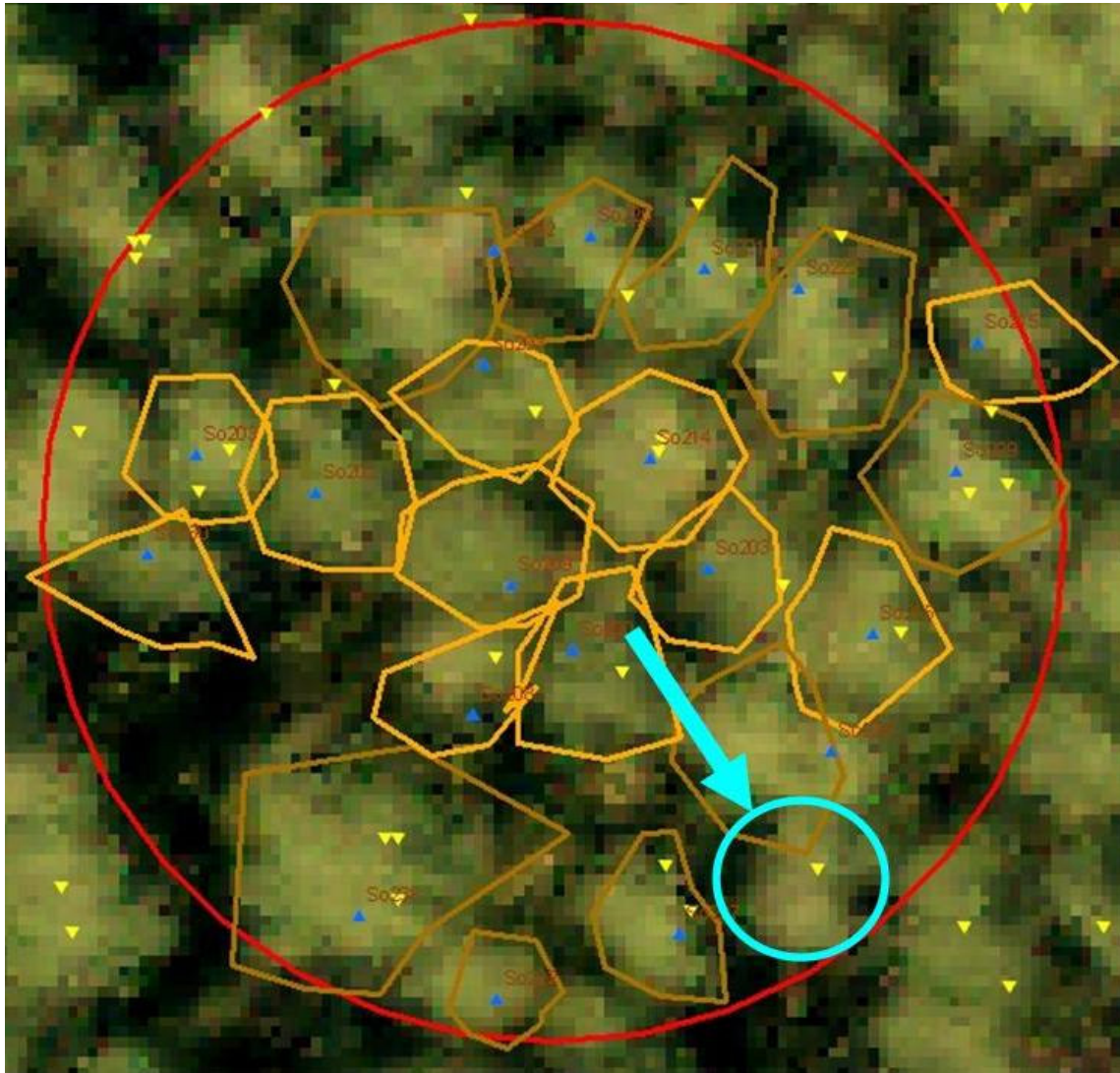
- Określenie zasięgu koron odbywało się z poziomu gruntu w 8 kierunkach od pnia drzewa. Kształt korony określony w ten sposób jest więc dużym uogólnieniem jej rzeczywistego kształtu.
- Dane wektorowe dociągane były do modelu numerycznego tak, by możliwe było zidentyfikowanie tych samych drzew w obu typach danych. Generowało to pewne błędy, których wynikiem mogła być powyższa sytuacja.

– Punkt definiujący wierzchołek automatycznie określonego drzewa był tak naprawdę najwyższym punktem korony. Zakładając, że mogła to być czasami gałąź boczna, mogła ona spowodować powyżej prezentowaną sytuację.



**Ryc. III.20 Weryfikacja dokładności segmentacji - wariant 4.**

W sytuacji prezentowanej powyżej drzewo pomierzone w terenie nie zostało znalezione przy pomocy metody automatycznej. Sytuacja ta występowała wtedy, gdy w sąsiedztwie drzewa większego znajdowało się mniejsze oraz gdy gatunki liściaste i iglaste rosły w zmieszaniu jednostkowym lub gdy sąsiadujące drzewa rosły w różnych warstwach drzewostanu.



**Ryc. III.21. Weryfikacja dokładności segmentacji - wariant 5.**

Sytuacja prezentowana powyżej przedstawia wynik automatycznej metody segmentacji, który nie ma swojego odpowiednika w pomiarach terenowych. Widoczne jest jednak wyraźnie drzewo na zdjęciu RGB.

Wy tłumaczeniem takiej sytuacji może być przede wszystkim sposób kwalifikowania drzew do powierzchni próbnych. W trakcie pomiarów naziemnych drzewa zaliczane są do powierzchni na podstawie położenia pnia. W opisywanych analizach opierano się wyłącznie na położeniu koron drzew. Jak wiemy drzewa mogą być pochylone, przez co pewne korony znalazły się poza powierzchnią próbną, a inne weszły w jej obręb pomimo tego, że pnie drzew znajdowały się poza nią.



## 4.4 Wyniki

Otrzymane wyniki analizowane były osobno dla drzew w pierwszym piętrze drzewostanu i dla wszystkich drzew znajdujących się na powierzchni próbnej. Wynikało to z tego, że dwie metody segmentacji drzewostanu bazowały na modelu 2,5 D, przez co były w stanie analizować jedynie najwyższą warstwę drzewostanu. Po dostarczeniu rezultatów segmentacji przez poszczególnych wykonawców i po ewaluacji wykonanej w programie ArcGIS uzyskano wyniki, prezentowane poniżej. W opracowaniu przyjęto, że *drzewa znalezione* to drzewa znalezione automatycznie przez algorytm i odpowiadające drzewom określonym w terenie, natomiast *automatycznie znalezione drzewa w ramach powierzchni* są to drzewa znalezione automatycznie przez algorytm, których pozycja określona została przez wartość maksymalną wysokości (wierzchołek) i znajdowały się wewnątrz powierzchni próbnej o promieniu 12,61m.

**Analiza 25 powierzchni próbnych z gatunkami panującymi: So, Db, Bk w wieku od 33 do 152 lat. Wszystkie analizowane drzewostany miały strukturę jednopiętrową**

Tabela III.11. Wyniki określania liczby drzew dla 25 powierzchni próbnych.

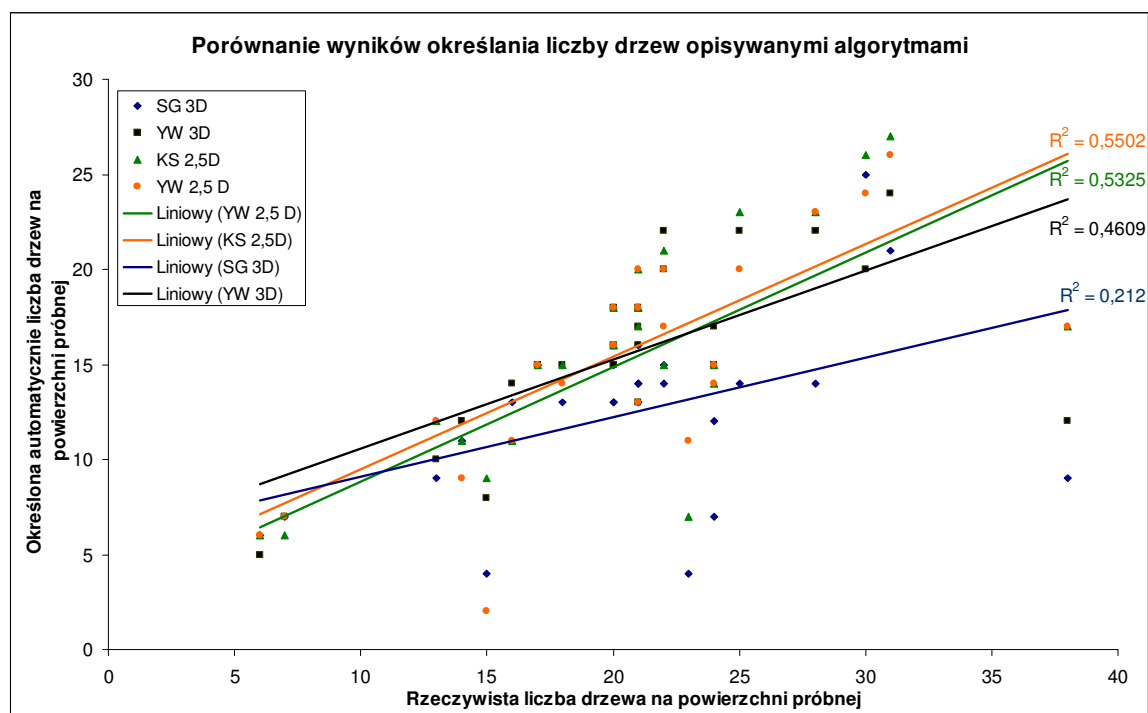
| Liczba drzew – 517                                         | YW 3D | SG 3D | YW 2,5D | KS 2,5D |
|------------------------------------------------------------|-------|-------|---------|---------|
| Znalezione drzewa                                          | ~311  | 373   | ~382    | 396     |
| Znalezione drzewa [%]                                      | ~73   | 60    | ~74     | 77      |
| Automatycznie znalezione drzewa na powierzchni próbnej [%] | ~147  | 150   | ~93     | 91      |

Całkowita liczba drzew znajdujących się na 25 powierzchniach próbnych to 517, składają się na nią również drzewa rosnące pod okapem pierwszego piętra. Były to drzewa, które z punktu widzenia urządzania lasu nie tworzyły drugiego piętra przez co nie zostały scharakteryzowane w operacie. Biorąc pod uwagę specyfikę prowadzonych badań należało jednak pozyskać o nich informację i uwzględnić w analizach. W sumie najlepsze wyniki uzyskano dla metod bazujących na wysokościowym modelu koron. W trzech przypadkach uzyskano dokładności około 75 %.

Najgorsze wyniki uzyskano dla drzewostanów liściastych o złożonej strukturze oraz dla młodych drzewostanów iglastych II klasy wieku.

W pierwszym przypadku wynikało to z przenikania się koron drzew oraz ich wielkości. Przenikanie się koron drzew powoduje, że algorytm ma problem z bezwzględnym ich rozróżnieniem, zaniżając w ten sposób faktyczną liczbę drzew na jednostce powierzchni. Z kolei korony drzew liściastych, w starszym wieku, mają tendencję do tworzenia kopuł gdzie trudno jest wyróżnić dominujący pęd główny. Powoduje to występowanie na powierzchni takiej korony wielu lokalnych maksimum. W ten sposób algorytm zawyża ilość drzew na powierzchni.

W przypadku młodych drzewostanów, metody bazujące na wysokościowym modelu koron nie dały zadowalających wyników przede wszystkim dlatego, że rozdzielczość rastra (wielkość pojedynczego piksela = 0,5m) okazała się zbyt mała. Biorąc pod uwagę stosowaną filtrację (3x3 piksele) wiele małych koron zlewało się w jedną widzianą przez algorytm. Zastosowanie obrazów o większej rozdzielczości (np. 0,25m) wpłynęłoby na poprawę uzyskiwanych dokładności (Stereńczak i in. 2008).



Ryc. III.23. Porównanie współczynników determinacji dla każdej z metod (25 powierzchni próbnych).

Prezentowane wyniki pokazują również, iż metody bazujące na wysokościowym modelu koron generalnie prawidłowo definiowały zasięg korony. Stąd wartości w trzecim wierszu powyższej tabeli (III.11) nie osiągnęły znacząco wyższych wartości od liczby automatycznie znalezionych drzew.

### **Analiza 13 powierzchni na których gatunkiem głównym była sosna pospolita, a wiek drzewostanów wynosił co najmniej 50 lat**

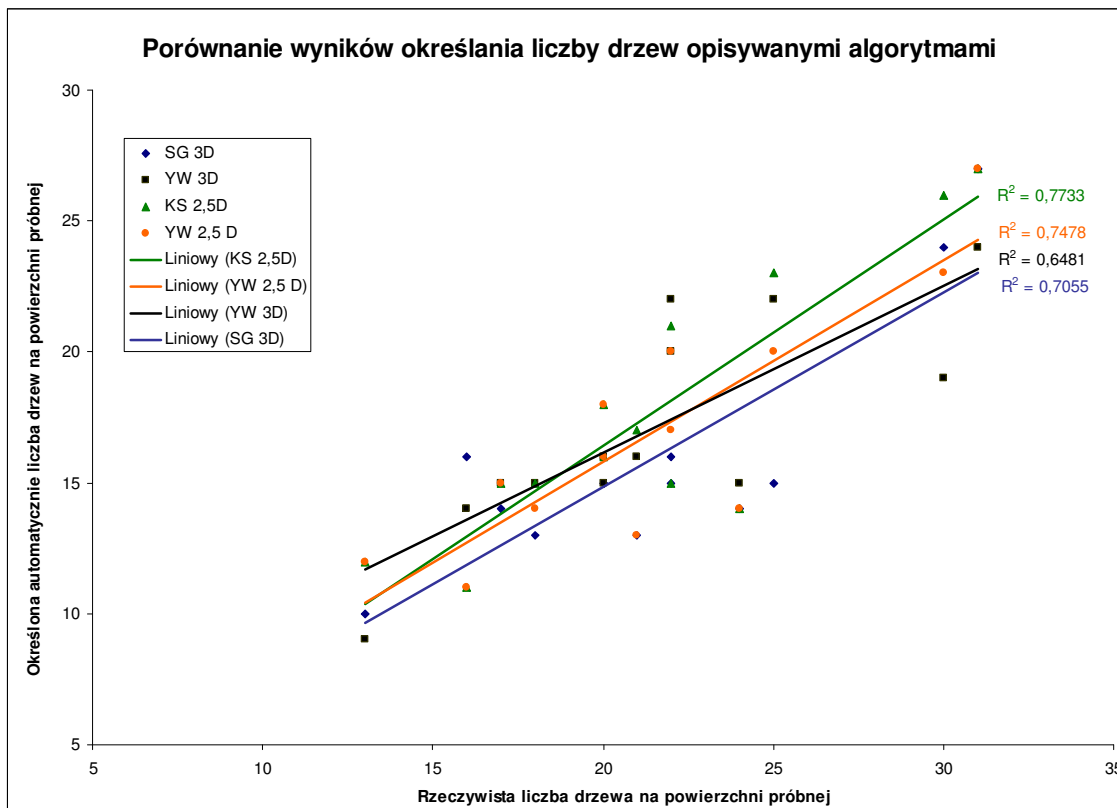
Celem tej analizy było sprawdzenie, jak powyższe algorytmy zachowują się przy analizowaniu starszych drzewostanów sosnowych, z gospodarczego punktu widzenia najważniejszych drzewostanów w Polsce. Do tego doświadczenia wykorzystano 13 powierzchni próbnych, na których znajdowało się 279 drzew. Poniższa tabela (III.12) przedstawia otrzymane wyniki.

**Tabela III.12. Wyniki określania liczby drzew dla 13 powierzchni próbnych, gdzie gatunkiem panującym była sosna pospolita.**

| <b>Liczba drzew - 279</b>                                  | <b>YW 3D</b> | <b>SG 3D</b> | <b>YW 2,5D</b> | <b>KS 2,5D</b> |
|------------------------------------------------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Znalezione drzewa                                          | 224          | 207          | 220            | 230            |
| Znalezionych drzew [%]                                     | <b>81</b>    | <b>75</b>    | <b>79</b>      | <b>82</b>      |
| Max [%]                                                    | 100          | 100          | 92             | 95             |
| Min [%]                                                    | 63           | 58           | 58             | 58             |
| Automatycznie znalezione drzewa na powierzchni próbnej [%] | 150          | 127          | 99             | 99             |

Stwierdzono, że wszystkie wykorzystane algorytmy wykazują wysoką sprawność, gdyż dla wszystkich udało się osiągnąć poziom ponad 70% znalezionych drzew. Ponownie metody bazujące na wysokościowym modelu koron okazały się najlepsze. W zależności od drzewostanu i zastosowanego algorytmu procent znalezionych drzew wahał się od 58 do 100. Zaznaczyć trzeba, że metody 3D dość znacznie przeszacowywały liczbę drzew na powierzchni próbnej, zawyżając ją nawet do 150 % właściwej ilości.

Współczynnik determinacji pomiędzy prawdziwymi liczbami drzew na powierzchniach próbnych a tymi otrzymanymi w sposób automatyczny wzrósł średnio o 0,2 dla 13 opisywanych powierzchni, w stosunku do wszystkich (25) powierzchni wykorzystanych w badaniu. Był to oczekiwany efekt doświadczenia. Z licznych publikacji zagranicznych i doświadczeń własnych autora wynika, że określanie liczby drzew w drzewostanach iglastych daje dużo lepsze efekty niż w drzewostanach liściastych. Poza tym młode drzewostany (I – II klasa wieku) mają na tyle małe korony i duże zwarcie, że bardzo często na obrazach o rozdzielczości 0,5m ich korony zlewają się, tak że wiele koron łączonych jest w pojedyncze obiekty. Powoduje to znaczące zaniżenie automatycznie określonej liczby drzew na powierzchni próbnej.



Ryc. III.24, Porównanie współczynników determinacji dla każdej z metod (13 powierzchni próbnych).

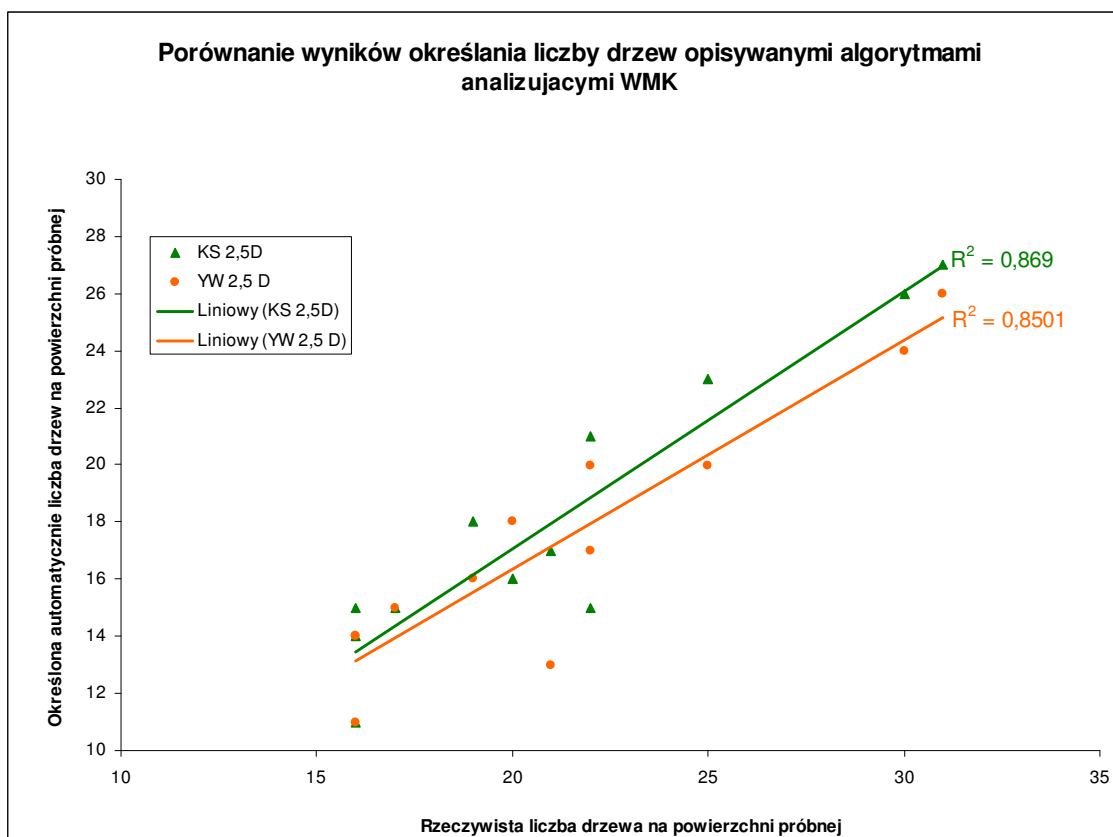
**Analiza 12 powierzchni, na których gatunkiem głównym była sosna pospolita, wiek drzewostanu wynosił co najmniej 50 lat, a do analiz wliczono tylko drzewa wchodzące w skład pierwszego piętra drzewostanu**

Celem doświadczenia było porównanie dwóch metod określania liczby drzew bazujących na wysokościowym modelu koron. W tym celu wybrano 12 powierzchni, dla których w trakcie analiz uzyskano wyniki z działania obu algorytmów. W tym celu z podanej wyżej grupy drzew usunięto osobniki nie wchodzące w skład pierwszego piętra drzewostanu. Następnie porównano wyniki (tabela III.13). Dokładność określania liczby drzew w obu opisanych metod wyniósł ponad 80%, gdzie dla wszystkich powierzchni minimalna liczba prawidłowo określonych drzew wyniosła 62% a maksymalna 100%. Ważny był również niewielki udział tzw.: *multishot-ów*.

Tabela III.13. Wyniki określania liczby drzew dla 12 powierzchni próbnych, gdzie gatunkiem panującym była sosna pospolita, wszystkie drzewa wchodziły w skład pierwsze go piętra drzewostanu.

| Liczba drzew 1p – 255                                      | YW 2,5D | KS 2,5D |
|------------------------------------------------------------|---------|---------|
| Znalezione drzewa                                          | 208     | 218     |
| Znalezionych drzew [%]                                     | 82      | 86      |
| Max [%]                                                    | 91      | 95      |
| Min [%]                                                    | 62      | 68      |
| Automatycznie znalezione drzewa na powierzchni próbnej [%] | 107     | 104     |

W obu przypadkach również współczynnik determinacji przyjął bardzo obiecujące rezultaty. Daje to podstawy do tego, by uznać metody za sprawne, oraz pozwalające na uzyskiwanie powtarzalnych i, w pewnym przedziale, przewidywalnych wyników.



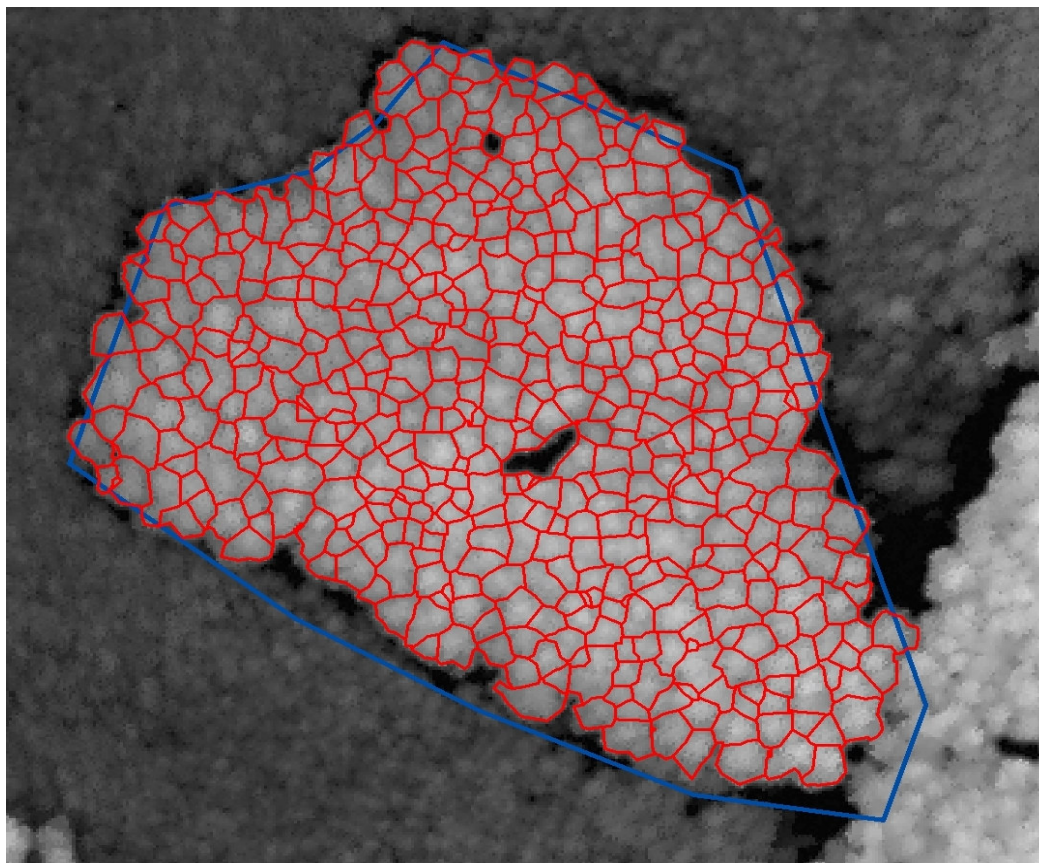
Ryc. III.25. Porównanie współczynników determinacji dla każdej z metod (25 powierzchni próbnych).

#### 4.5 Określanie liczby i wysokości drzew w całych wydzieleniach

W ramach projektu wykorzystano metodę segmentacji rozwijaną na Wydziale Leśnym SGGW i poddano segmentacji całe drzewostany. Efektem tej operacji była analiza dokładności segmentacji i określania charakterystyki wysokościowej drzewostanu.

Do prezentowanej analizy wykorzystano następujące dane:

- Dane dla 10 całkowicie pomierzonych w terenie wydzieleni. Drzewostany najpierw wyselekcjonowano na podstawie ortofoto-mapy i wysokościowego modelu terenu. W trakcie selekcji wyszukiwano takich wydzieleni których granica łatwa była do zdefiniowania, czyli można je było w łatwy sposób oddzielić o reszty powierzchni leśnej. W terenie pomierzono wysokości i pierśnice wszystkich drzew, ich liczbę, oraz zaklasyfikowano je do poszczególnych pięter drzewostanu.
- Dane pochodzące z automatycznej segmentacji wysokościowego modelu koron. Oprócz liczby drzew określono zasięg koron i wysokość poszczególnych drzew. W analizach wykorzystano model o rozdzielczości 0,5 m.



Ryc. III.26. Efekt segmentacji całego wydzielenia z wykorzystaniem algorytmu „pouring”. Kolor niebieski – granica wydzielenia, kolor czerwony – pojedyncze korony drzew.

Podczas wykonywania analiz wykorzystano dane pozyskane przez firmę Toposys. Szczegółowy opis danych został już przedstawiony w innej części raportu. Dane pozyskane za pomocą LIDAR-a wykorzystane zostały do wygenerowania NMT i NMPT. Następnie obydwa modele wykorzystano do obliczenia wartości pikseli w wysokościowym modelu koron o rozdzielczości 0,5 m. Segmentacja wysokościowego modelu koron wykonana była w programie HALCON (MVTec). Wykorzystano w niej algorytm „pouring”, który „oblewając” korony drzew wyznacza ich zasięg. Dodatkowo wydzielono niższe partie drzewostanu, by dokładniej oddać kształt koron drzew.

W celu zweryfikowania dokładności wysokości drzew i drzewostanów na obszarze objętym badaniami wytypowano 7 wydzieli sosnowych o wyraźnie widocznych granicach. Charakterystykę analizowanych powierzchni przedstawiono w tabeli 1. Każdą z wytypowanych powierzchni próbnych zlokalizowano w terenie, a następnie wykonano na niej pomiary pierśnic wszystkich drzew oraz pomiary pierśnic i wysokości do utworzenia krzywej wysokości. Pierśnice drzew mierzono średnicomierzem z zaokrągleniem do 1 mm, zaś wysokości drzew określono za pomocą wysokościomierza Vertex z zaokrągleniem do 1 cm.

Krzywą wysokości wyrównano w obrębie każdego drzewostanu matematycznie metodą najmniejszych kwadratów wykorzystując funkcję Näslunda jako model zależności między wysokością a pierśnicą. Powstałe modele posłużyły do obliczenia wysokości każdego drzewa w badanym wydzieleniu. Na podstawie uzyskanych danych określono: liczbę drzew w drzewostanie, średnią i przeciętną wysokość, dwie wysokości górne (zdefiniowane jako przeciętna wysokość 100 najgrubszych drzew na powierzchni 1 ha i średnia wysokość 100 najwyższych drzew na powierzchni 1 ha), sumę wysokości drzew oraz zmienność wysokości. Pomiary zapisano w postaci bazy danych służącej do wykonywania dalszych analiz.

Dane uzyskane z przetwarzania chmury punktów oraz pomiary naziemne posłużyły do określenia dokładności określania liczby drzew drzewostanu, minimalnej i maksymalnej wysokości drzewostanu, średniej wysokości drzewostanu, wysokości górnej zdefiniowanej jako średnia wysokość 100 najwyższych drzew na 1 ha oraz sumy wysokości. Określono w tym celu błędy absolutne oraz błędy procentowe wtórne.

W pierwszej części tabeli III.14 przedstawiono wyniki pomiarów referencyjnych, w drugiej – wyniki segmentacji chmury punktów oraz odpowiadające tym pomiarom błędy.

**TABELA III.14. Charakterystyka powierzchni próbnych, wyniki automatycznej segmentacji chmury punktów oraz analiza błędów określania poszczególnych cech**

| <b>Powierzchnie próbne</b>      |          |          |          |          |          |          |         |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| Lokalizacja                     | 175b     | 160m     | 159k     | 142i     | 163f     | 146t     | 276j    |
| Obszar                          | 2,53     | 1,30     | 0,89     | 0,58     | 2,00     | 0,90     | 0,60    |
| <b>Pomiar naziemny</b>          |          |          |          |          |          |          |         |
| Liczba drzew                    | 918      | 810      | 296      | 244      | 680      | 470      | 325     |
| h_min                           | 17,22    | 20,91    | 21,82    | 26,33    | 20,08    | 21,40    | 21,57   |
| h_max                           | 37,21    | 27,93    | 34,06    | 28,09    | 25,79    | 30,78    | 26,78   |
| h_sr                            | 27,52    | 25,18    | 28,18    | 26,75    | 23,27    | 25,95    | 24,40   |
| h_g                             | 29,23    | 25,54    | 29,02    | 26,80    | 23,64    | 26,73    | 24,78   |
| hsr_100                         | 31,63    | 26,52    | 30,48    | 26,93    | 24,28    | 29,05    | 25,72   |
| hg_100                          | 32,22    | 26,59    | 30,84    | 26,94    | 24,38    | 28,47    | 25,83   |
| suma_h                          | 25259,07 | 20392,23 | 8341,46  | 6527,55  | 15821,51 | 12195,91 | 7929,23 |
| Stddev_h                        | 3,33     | 0,94     | 2,04     | 0,15     | 0,91     | 1,50     | 0,92    |
| wsp_zm                          | 12,10    | 3,73     | 7,24     | 0,56     | 3,91     | 5,78     | 3,77    |
| <b>Automatyczna segmentacja</b> |          |          |          |          |          |          |         |
| Liczba drzew                    | 747      | 496      | 246      | 190      | 645      | 308      | 237     |
| h_min                           | 5,51     | 17,49    | 12,92    | 19,35    | 9,33     | 6,02     | 15,67   |
| h_max                           | 34,22    | 28,13    | 30,85    | 30,54    | 27,32    | 29,42    | 28,78   |
| h_sr                            | 26,38    | 23,96    | 26,20    | 26,16    | 21,48    | 24,12    | 24,82   |
| hsr_100                         | 30,15    | 25,95    | 28,15    | 28,42    | 23,83    | 26,46    | 27,24   |
| suma_h                          | 19706,34 | 11885,56 | 6444,89  | 4969,99  | 13855,50 | 7427,82  | 5882,24 |
| Stddev_h                        | 3,65     | 1,77     | 2,36     | 2,01     | 2,53     | 2,58     | 2,27    |
| wsp_zm                          | 13,84    | 7,39     | 9,01     | 7,68     | 11,78    | 10,70    | 9,15    |
| <b>Błąd absolutny</b>           |          |          |          |          |          |          |         |
| liczba drzew                    | -171     | -314     | -50      | -54      | -35      | -162     | -88     |
| h_min                           | -11,71   | -3,42    | -8,90    | -6,98    | -10,75   | -15,38   | -5,90   |
| h_max                           | -2,99    | 0,20     | -3,21    | 2,45     | 1,53     | -1,36    | 2,00    |
| h_sr                            | -1,14    | -1,22    | -1,98    | -0,59    | -1,79    | -1,83    | 0,42    |
| hsr_100                         | -1,48    | -0,57    | -2,33    | 1,49     | -0,45    | -2,59    | 1,52    |
| suma_h                          | -5552,73 | -8506,67 | -1896,57 | -1557,56 | -1966,0  | -4768,09 | -2047,0 |
| <b>Błąd procentowy wtórny</b>   |          |          |          |          |          |          |         |
| liczba drzew                    | -18,63   | -38,77   | -16,89   | -22,13   | -5,15    | -34,47   | -27,08  |
| h_min                           | -68,00   | -16,36   | -40,79   | -26,51   | -53,54   | -71,87   | -27,35  |
| h_max                           | -8,04    | 0,72     | -9,42    | 8,72     | 5,93     | -4,42    | 7,47    |
| h_sr                            | -4,14    | -4,85    | -7,03    | -2,21    | -7,69    | -7,05    | 1,72    |
| hsr_100                         | -4,68    | -2,15    | -7,64    | 5,53     | -1,85    | -8,92    | 5,91    |
| suma_h                          | -21,98   | -41,72   | -22,74   | -23,86   | -12,43   | -39,10   | -25,82  |

gdzie:

|          |   |                                                                                                      |
|----------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| h_min    | - | wysokość najniższego drzewa górnej warstwy drzewostanu                                               |
| h_max    | - | wysokość najwyższego drzewa w drzewostanie                                                           |
| h_sr     | - | średnia wysokość drzewostanu                                                                         |
| h_g      | - | przeciętna wysokość drzewostanu                                                                      |
| hsr_100  | - | wysokość górna zdefiniowana jako średnia wysokość 100 najwyższych drzew na powierzchni 1 hektara     |
| hg_100   | - | wysokość górna zdefiniowana jako przeciętna wysokość 100 najgrubszych drzew na powierzchni 1 hektara |
| suma_h   | - | suma wysokości drzew w drzewostanie                                                                  |
| stddev_h | - | odchylenie standardowe wysokości drzew                                                               |
| wsp_zm   | - | współczynnik zmienności wysokości drzew                                                              |

Zastosowany algorytm segmentowania drzewostanu na pojedyncze drzewa charakteryzuje się systematycznym zaniżaniem liczby drzew od kilku do nawet kilkudziesięciu procent. Średnio błąd procentowy wtórny określania liczby drzew na analizowanych powierzchniach wyniósł -23,35% (poprawnie wydzielono prawie 77% drzew).

Minimalna wysokość drzew określana jest z bardzo dużym błędem ujemnym, sięgającym nawet kilkunastu metrów (ponad -70%). Maksymalna wysokość drzewostanu określania jest ze znacznie większą dokładnością. Największe błędy absolutne wyniosły -2,99m (na minus) i +2,00m (na plus). Średnio błąd procentowy wtórny pomiaru wyniósł tu około -0,82m. Średnia wysokość drzewostanu określana jest z niewielkim błędem ujemnym sięgającym nieco ponad -7% (średnio niecałe 5%), czyli wysokością zaniżoną maksymalnie o około 2 metry (średnio o około -1,25m). Podobną dokładność uzyskano dla wysokości górnej: maksymalny błąd wyniósł niecałe 9% (mniej, niż 2 metry). Z kolei suma wysokości określona została z błędem sięgającym ponad -40%, co związane jest przede wszystkim z błędem określania liczby drzew.

Prezentowane wyniki są porównywalne z podobnymi badaniami prowadzonymi w różnych ośrodkach naukowych. Średnia dokładność określania liczby drzew na poziomie 77%, którą uzyskano w ramach niniejszej analizy, wydaje się zadowalająca (Coops i in. 2004, Heurich, Weinacker 2004, Holmgren i Persson 2004). Biorąc pod uwagę to, że algorytm ma zdolność analizowania tylko najwyższego piętra drzewostanu, metoda dedykowana jest wyłącznie do drzewostanów jednopiętrowych. Drzewostany poddane analizie są typowymi

gospodarczymi drzewostanami sosnowymi rosnącymi na niżu Polski. Poza tym algorytm cały czas jest w fazie rozwijania, więc nie jest to jego ostateczna postać. Kluczowym przy tego typu pracach jest uzyskiwanie powtarzalności uzyskiwanych wyników i na tym skupione zostaną dalsze prace.

Uzyskana w wyniku zastosowania automatycznych procedur wysokość drzew i drzewostanów, jak się spodziewano, jest zaniżona w stosunku do wartości rzeczywistych. Jest to związane przede wszystkim z faktem zastosowania do określenia wysokości drzew wysokościowego modelu terenu i wysokościowego modelu pokrycia terenu: generalnie wykorzystywanie modeli terenu interpolowanych z danych LIDAR-owych skutkuje takim rezultatem. Prawdopodobnie poprawy dokładności można by się spodziewać przy zastosowaniu, zamiast interpolowanych modeli, bezpośredniej segmentacji chmury punktów. Segmentacja chmury punktów wymaga zaawansowanych algorytmów i nowych narzędzi. Prace te będą prowadzone w kolejnych badaniach. Kolejnym elementem wpływającym na dokładność uzyskiwanych wyników są parametry danych uzyskanych w wyniku nalotu LIDAR-owego. W prezentowanej tu analizie wykorzystano chmurę punktów o pokryciu 5 punktów na 1 m<sup>2</sup> oraz rejestrowano wyłącznie pierwsze i ostatnie odbicie. Obecnie dostępne są już nowe systemy skanerów mogące rejestrować większą ilość odbić lub rejestrować cały kształt wysłanej fali (ang. full waveform) (Reitberger i in. 2006), dzięki którym możliwe będzie uzyskiwanie wyników o większej dokładności.

Prezentowane powyżej wyniki, uzyskane dla typowych drzewostanów gospodarczych, w odczuciu autorów są zadowalające, zwłaszcza, że zostały otrzymane w wyniku zastosowania powtarzalnego, automatycznego algorytmu. Nawet w przypadku, gdy są to dane obarczone błędem systematycznym, w powiązaniu z referencyjnymi danymi terenowymi możliwe jest ich wykorzystanie w praktyce, np. w metodzie inwentaryzacji wykorzystującej stałe kontrolne powierzchnie próbne (Miścicki 2000).

Warto również zwrócić uwagę, że w wielu pracach dotyczących tego zagadnienia do segmentacji wydzielano albo bardzo luźne drzewostany świerkowe, albo plantacje drzew, dzięki czemu wyniki wszelkich analiz są niemalże tak dobre jak pomiarów referencyjnych (Kiraly i Brolly 2006; Wack i in. 2003). Przedmiotem analizy w tym przypadku nie były specjalnie wyróżniane, łatwe z punktu widzenia uzyskiwanych wyników, drzewostany, lecz typowe drzewostany gospodarcze.

Przeprowadzone badania wykazały, że możliwa jest automatyzacja pomiarów liczby i wysokości drzew, zasięgu poziomego koron, detekcji luk i liniowych przerw w drzewostanie, dominujących drzew określanie przebiegu dróg wykorzystując dane uzyskane z lotniczego

skanowania laserowego. Uzyskane wyniki nie są może w wielu wypadkach zadowalające, ale pamiętać należy o kilku warunkach ograniczających możliwość praktycznego zastosowania LIDAR-a. Są to: gęstość drzewostanów oraz złożony skład gatunkowy i skomplikowana budowa przestrzenna. Z tego względu nie we wszystkich drzewostanach możliwe jest obecnie analizowanie struktury. Wiele zależy od przyjętego systemu skanowania oraz wykorzystanego sprzętu. Dodatkowo metody wymagają dalszego rozwoju. Wydaje się jednak że najważniejsza zaleta prezentowanych prac jest ich obiektywizm, powtarzalność i automatyzacja.

## 5. Wykorzystanie danych z lotniczego skanowania laserowego do określania różnych elementów struktury drzewostanów, rozpoznawania dróg oraz składu gatunkowego

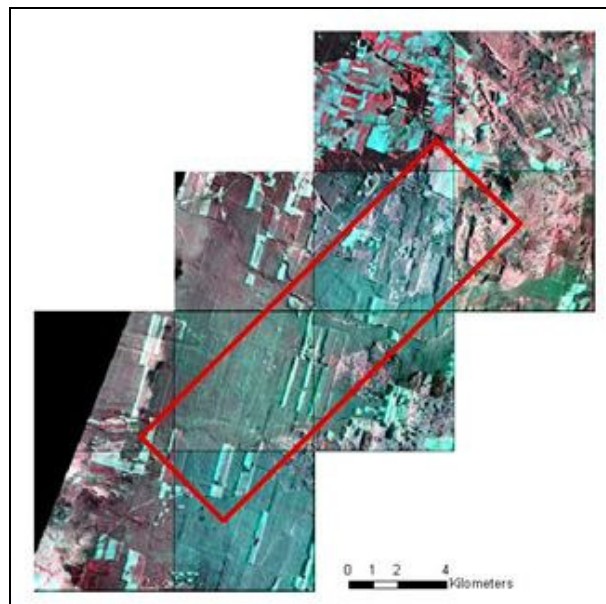
Poniższy rozdział prezentuje wyniki analiz uzyskanych przy współpracy z zespołem FELIS z Freiburga w zakresie:

- Automatycznego określenia zasięgu luk
- Automatycznego określenia położenia pojedynczych dominujących drzew (przestoje, nasienniki, itp.).
- Automatycznego określenia granic homogenicznych partii drzewostanu
- Półautomatycznego wyróżnienia przebiegu dróg
- Automatycznej klasyfikacji gatunków drzew

Dodatkowo w analizach wykorzystano prawdziwe ortofoto-mapy (RGB i CIR) o rozdzielczości 0,25 m.

### 5.1 Obszar i zakres analiz

Obszar analizy zlokalizowano na terenie Nadleśnictw Milicz i obejmował 1000 ha zamykający się w prostokącie 1700 na 600 m (Ryc. III.27).



Ryc. III.27. Lokalizacja obszaru badań.

Zadania polegały na opracowaniu metod służących do:

- określenia luk, gniazd i powierzchni zrębowych,
- wyróżniania pojedynczych drzew panujących,
- określenia zasięgu homogenicznych partii drzewostanu.

Osobno wybrano mniejsze powierzchnie w celu przetestowania metod:

- określenia przebiegu dróg,
- określenia gatunków drzew.

## **5.2 Dane do analiz**

Wykonawca na potrzeby prowadzonych analiz na bazie danych z lotniczego skaningu laserowego (LIDAR-a) wygenerował następujące modele terenu:

- numeryczny model terenu (NMT) (ang. *Digital Terrain Model - DTM*),
- numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) (ang. *Digital Surface Model - DSM*),
- wysokościowy model koron (WMK) (ang. *Crown Height Model - CHM*).

## **5.3 Wyniki analiz**

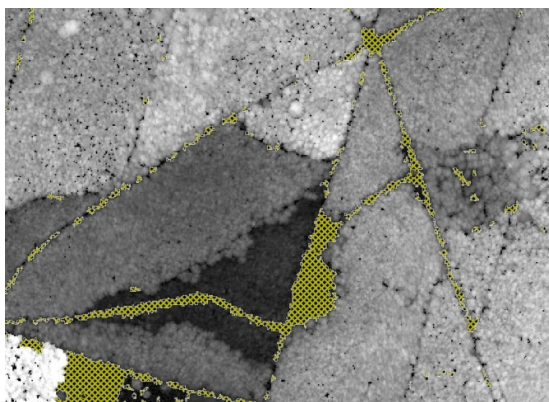
### **5.3.1 Automatyczne określenie zasięgu luk**

Kolejne etapy automatycznego procesu określania zasięgu luk przebiegały następująco:

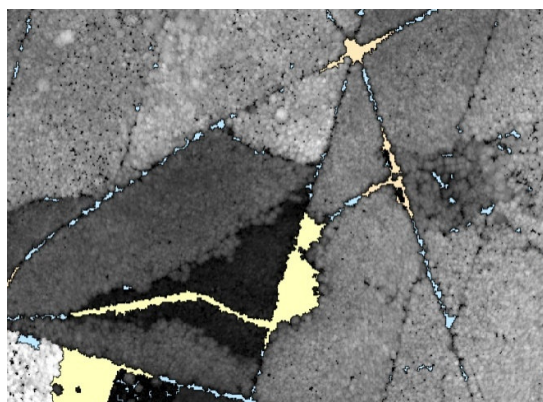
1. Wyselekcjonowano powierzchnie, których wysokość nie przekraczała 1m. Dokonano tego w oparciu o wysokościowy model koron.
2. Zgrupowano piksele w wieloboki stanowiące potencjalne luki w drzewostanach.
3. Dokonano klasyfikacji zgrupowań pikseli w zależności od ich minimalnej i maksymalnej wielkości do następujących grup:
  - 9m<sup>2</sup> - 200m<sup>2</sup>
  - 201m<sup>2</sup> - 2000m<sup>2</sup>
  - 2001m<sup>2</sup> - 30000m<sup>2</sup>
  - 30001m<sup>2</sup> - 99999999m<sup>2</sup>
4. Uzupełniono automatycznie nieciągłości w obrębie poligonów stanowiących potencjalne luki w drzewostanach (były to pojedyncze piksele lub grupy pikseli).
5. Przekonwertowano dane z postaci rastrowej do wektorowej.

6. Wyniki przeanalizowano wzrokowo dla sprawdzenia ich wiarygodności.

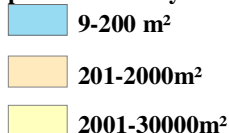
Parametry dobrane do selekcji płatów mogą być dowolnie modyfikowane w zależności od potrzeb. Przykładowe wyniki wyróżniania luk przedstawiono na rysunkach III.28 i III.29.



Ryc. III.28. Przykład automatycznego wyróżniania luk na podstawie wysokościowego modelu koron.



Ryc. III.29. Luki zaklasyfikowane do różnych klas powierzchniowych.



### 5.3.2 Automatyczne określenie położenia pojedynczych dominujących drzew (przestoje, nasienniki, itp.).

Zadanie to zostało wykonane według następującego schematu:

1. W pierwszym etapie wykorzystano filtr minimalny (21m x 21m) do filtracji numerycznego modelu pokrycia terenu (DSM\_21).
2. Obliczono różnice pomiędzy pierwotnym a przefiltrowanym numerycznym modelem pokrycia terenu ( $DSM - DSM_{21} = Diff\_Model$ ).
3. W oparciu o różnicowy model pokrycia terenu (Diff\_Model) wyselekcjonowano obszary, dla których różnica wysokości wyniosła ponad 5m.
4. Wyselekcjonowano obiekty spełniające następujące kryteria:
  - minimalna powierzchnia 12,56 m<sup>2</sup>,
  - maksymalna powierzchnia 312 m<sup>2</sup>,
  - maksymalna średnica 60 m.

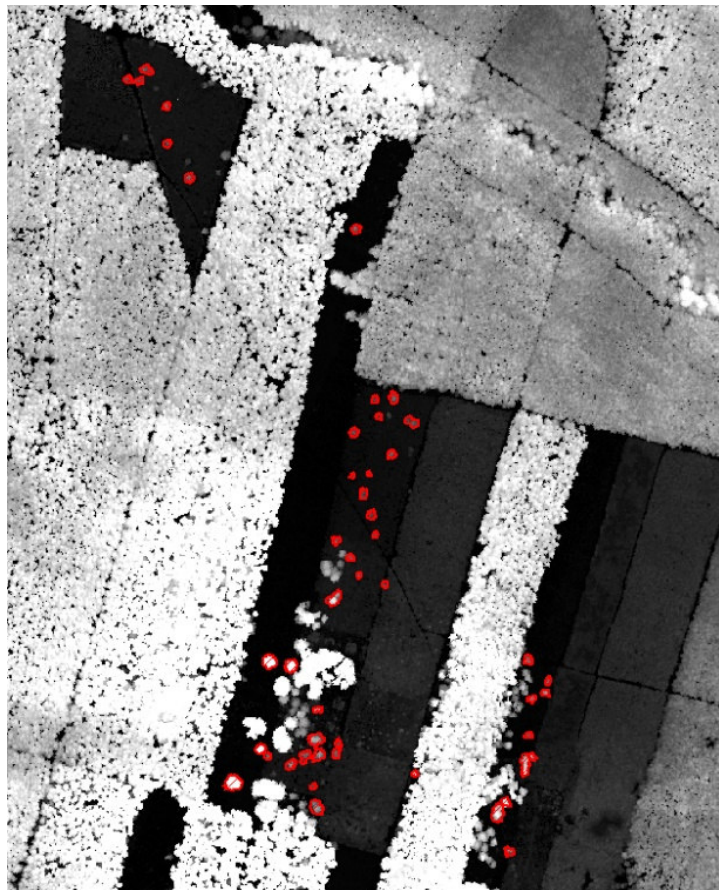
Obszary te nazwano standardowymi.

5. Wyliczono maksymalną wysokość dla potencjalnych obszarów standardowych.

6. Określono różnicę między maksymalną wysokością w poligonie drzewa i w obrębie jego otoczenia. Wartość średniej wysokości w otoczeniu określano dla obszaru w promieniu 10m od konkretnego drzewa.

7. Poligon uznawano za pojedyncze dominujące drzewo, jeśli obliczona różnica wysokości była większa niż 7,5m.

Wszelkie parametry przyjęte w analizie mogą być zmienione w zależności od definicji pojedynczego drzewa dominującego.



**Ryc. III.30. Przykładowy wynik automatycznego wyróżniania pojedynczych drzew dominujących (zaznaczone kolorem czerwonym)**

### 5.3.3 Automatyczne określanie granic homogenicznych partii drzewostanu

Opisywana poniżej metoda może zostać podzielona na dwie zasadnicze części:

1. Przydzielanie poszczególnych pikseli do różnych klas.
2. Grupowanie sklasyfikowanych obiektów do poszczególnych segmentów (ang. *stand units*) homogenicznych części drzewostanu.

Wykonano doświadczenie gdzie w trakcie klasyfikacji gatunków na iglaste i liściaste, zamiast danych LIDAR-owych pozyskanych zimą i latem, do klasyfikacji wykorzystano współczynnik NDVI. Wskaźnik ten określano w oparciu o kanały: czerwony (R) i podczerwony (IR) - pozyskane ze zdjęć lotniczych – stosując następujący wzór:

$$NDVI = (IR-R)/(IR+R) \quad [3]$$

Eksperyment wykazał dużą przydatność tego typu weryfikacji metody opracowanej przez FELIS

W pierwszej kolejności cały obszar poddany został klasyfikacji gatunki drzew liściastych, iglastych oraz dno lasu (powierzchnie niezadrzewione, gdzie  $h < 1m$ ). Klasyfikacja oparta jest na danych LIDAR-owych pozyskanych z nalogów w dwóch okresach stanu wegetacji: w pełnym ulistnieniu – termin nalogu – lato i w trakcie spoczynku wegetacyjnego – nalog zimowy. W związku z tym, że dane w projekcie nie zawierały dwóch serii danych LIDAR-owych nie wykorzystano klasyfikacji jako materiału pomocniczego w analizach. Stwierdzono jednak przydatność współczynnika NDVI, jako zastępczego w omawianym przypadku klasyfikacji.

**W dwóch kolejnych etapach opisywanej metody wykorzystano informacje o zróżnicowaniu struktury powierzchni poszczególnych obiektów („nierówności powierzchni”) i ich wysokości.**

Jako podstawową powierzchnię w opisywanej metodzie przyjęto obszar drzewostanu o wielkości 20x20m, która odpowiada pojedynczemu pikselowi rastra. Jest to wielkość powierzchni pola podstawowego, która była podstawą przy wydzieleniu homogenicznych części drzewostanu. Dla takiego „piksela ” charakteryzowano znajdujący się w nim drzewostan i przydzielano do poszczególnych klas.

Poniżej przedstawiono zestaw charakterystyk, które obliczono dla każdego oczka (20x20m):

- procentowy udział drzewostanów iglastych, liściastych i powierzchni nie zadrzewionych,
- zróżnicowanie struktury powierzchni (ang. *surface roughness*),
- klasę wysokości.

Parametry te użyto następnie podczas klasyfikacji poszczególnych powierzchni podstawowych do klas strukturalnych:

Parametrami wejściowymi dla segmentacji są:

- długość boku kwadratu użytego do podziału obszaru badań (tu: 20 m),
- minimalna wielkość segmentu (tu: 0,2 ha),
- próg klasyfikacji komórek wewnątrz „drzewostanów jednowiekowych” (o małym zróżnicowaniu wysokości) i „drzewostanów różnowiekowych” (o dużym zróżnicowaniu wysokości) zdefiniowano jako iloraz odchylenia standardowego wysokości  $\sigma$  i średniej wartości tej cechy  $\mu$  (współczynnik zmienności wysokości):

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

- Klasy wysokości przydzielone komórkom o małej zmienności wysokości:

Klasa wysokości 1:  $h > 30$  m,

Klasa wysokości 2:  $30 \text{ m} \geq h > 25$  m,

Klasa wysokości 3:  $25 \text{ m} \geq h > 20$  m,

Klasa wysokości 4:  $20 \text{ m} \geq h > 15$  m,

Klasa wysokości 5:  $15 \text{ m} \geq h > 10$  m,

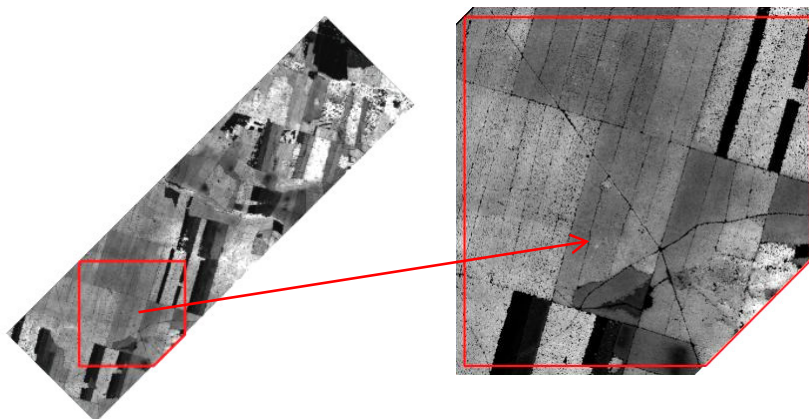
Klasa wysokości 6:  $10 \text{ m} \geq h > 5$  m,

Klasa wysokości 7:  $5 \text{ m} \geq h > 1$  m,

Ostatecznie do oczka rastra 20x20m przypisano procentowy udział badanych cech i w zależności od tego sklasyfikowano cały obszar na homogeniczne części drzewostanu.

### 5.3.4 Półautomatyczna metoda wyróżnienia przebiegu dróg

Analizę przeprowadzono na 187 ha powierzchni będącej fragmentem wcześniej wybranego obszaru (Ryc. III.31).



**Ryc. III.31. Wysokościowy model koron obszaru badań z zaznaczonym fragmentem powierzchni, na której przeprowadzono sprawdzenia półautomatycznej metody wyróżniania dróg.**

Podstawowym warunkiem zastosowania półautomatycznej metody określania przebiegu dróg jest możliwość zobaczenia ich na dostępnych materiałach teledetekcyjnych (lub fotogrametrycznych). Dla badanego obiektu były to: numeryczny model terenu, prawdziwa ortofotomapa o rozdzielczości 0,25 oraz warstwa obiektów liniowanych nadleśnictwa Milicz. Ważnym elementem, który należy uwzględnić w takiej analizie jest fakt, że nie wszystkie obiekty liniowe znajdujące się w lesie są drogami. Wymagane jest więc uściślenie definicji lub pogodzenie się z faktem wyróżniania wszystkich obiektów liniowych.

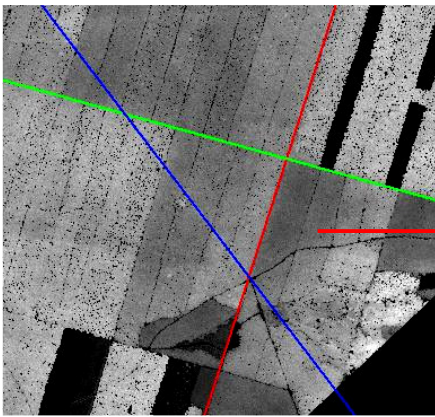
Całą analizę poprzedziła dokładna wzrokowa weryfikacja przydatności materiałów teledetekcyjnych obszaru niniejszego studium. Jak się okazało wszelkie nierówności terenu (wzniesienia, wydmy śródlądowe) są łatwiejszymi obiektami do określania przebiegu dróg, gdyż widoczne są jako lokalne zmiany numerycznego modelu terenu. Jednak z racji tego, że większość obszaru badawczego znajdowała się na terenie płaskim trudno było wykorzystać wcześniejsze doświadczenia zespołu FELIS.

Na bazie wizualnej oceny dostępnych materiałów wybrano wysokościowy model koron WMK jako najlepszy do planowanej analizy. Generalnie półautomatyczna metoda wyróżniania przebiegi dróg składa się z następujących etapów:

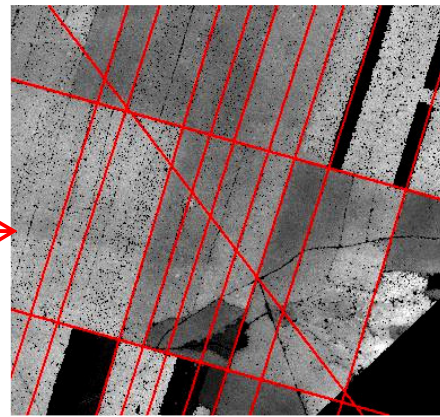
1. Operator definiuje jeden lub więcej kierunków poszukiwań obiektów liniowych.
2. Równoległe tworzone są poligony w każdym kierunku poszukiwania z określoną szerokością np. 10m.
3. W każdym z poligonów określany jest potencjalny segment drogi. Obliczany jest kąt pomiędzy krawędzią poligonu, a segmentem drogi i bazując na tym dokonywana jest selekcja właściwych fragmentów drogi.

4. Do każdego wybranego fragmentu drogi dopasowywana jest linia regresji. W tym procesie wykorzystywana jest ważona metoda najmniejszych kwadratów, dzięki czemu eliminowany jest wpływ wartości odstających.
5. Wszystkie linie regresji (trendu) są przecinane między sobą i dzielone na mniejsze odcinki drogi.
6. Każdy z fragmentów drogi podlega akceptacji w oparciu o zbuforowany poligon przy wykorzystaniu wysokościowego modelu koron.

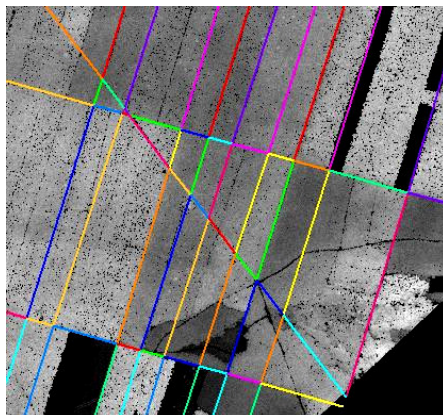
Kolejne kroki analizy służącej wyodrębnieniu dróg zilustrowano na rysunkach III.32-35.



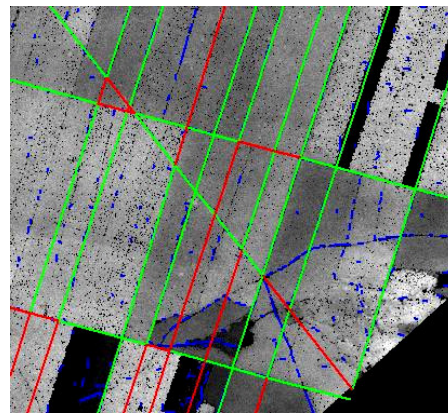
Ryc. III.32. Interaktywnie zdefiniowane trzy kierunki poszukiwania obiektów liniowych.



Ryc. III.33. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem trzech kierunków poszukiwań



Ryc. III.34. Skrzyżowane linie regresji.



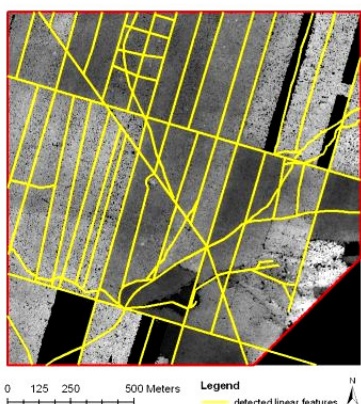
Ryc. III.35. Sklasyfikowane skrzyżowane linie regresji: kolor zielony – linie zatwierdzone, kolor czerwony – linie niezatwierdzone przez algorytm, kolor niebieski – potencjalne drogi.

Bazując na wizualnej interpretacji zdjęć lotniczych i modeli wysokościowych zidentyfikowano wiele struktur liniowych na powierzchni objętej badaniem. Jednak dokonanie jednoznacznego wskazania czy są to drogi czy inne obiekty liniowe było trudne.

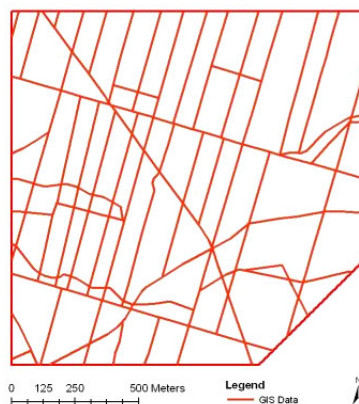
Opisana powyżej metoda jest jednym z pierwszych doświadczeń wykonanych w terenie leśnym, dlatego należało znaleźć rozwiązanie następujących problemów:

- część dróg zakryta jest przez roślinność – trudno jest zidentyfikować ich przebieg metodami automatycznymi,
- występuje różna pokrywa dróg – trudno jest jednoznacznie określić przedział spektralny charakteryzujący drogi,
- część obiektów liniowych nie jest widoczna na NMT (np. linie oddziałowe) – nie wszystkie używane są jako szlaki komunikacyjne. Jeśli nie ma śladu obiektu na numerycznym modelu terenu, trudno jest go automatycznie określić.

Ostateczny efekt poszukiwania dróg przedstawiono na rysunkach III.36 i III.37.



Ryc. III.36. Obiekty liniowe zidentyfikowane w oparciu o dane LIDAR-owe.



Ryc. III.37. Układ sieci dróg obszaru badań.

### 5.3.5 Automatyczna metoda klasyfikacji gatunków drzew

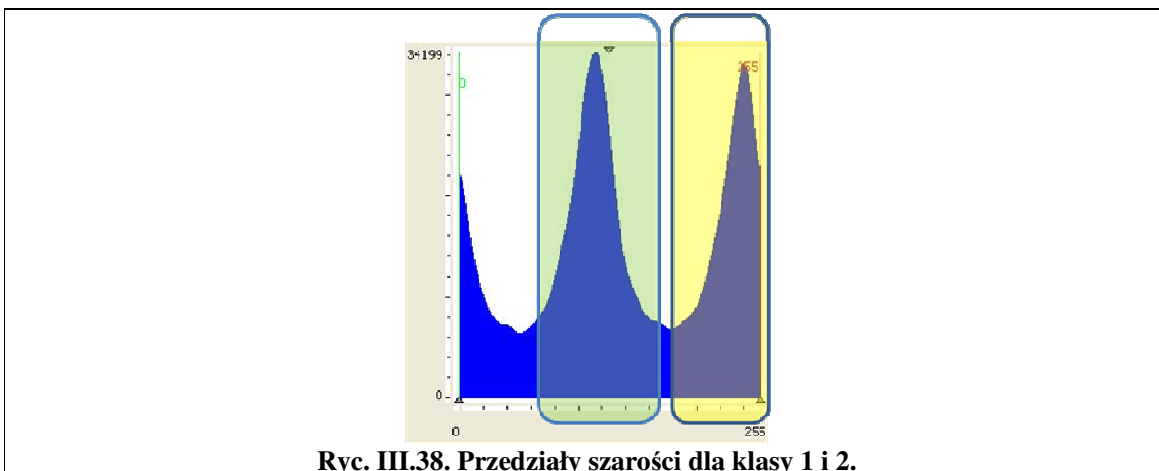
W analizie tej wykorzystano dane z obszaru 500x500m będącego fragmentem terenu badań. Bazując na danych referencyjnych pozyskanych w terenie można było wyróżnić 4 gatunki drzew So, Św, Bk, Db. By poprawić wyniki analizy, dane poddano segmentacji, w toku, której wyróżniono 2 klasy wysokościowe.

Proponowana metoda opierała się na dwuetapowej klasyfikacji. W każdym z nich próg automatycznej klasyfikacji do grup gatunków, był ustalany automatycznie w oparciu o histogram reprezentujący obraz z pominięciem informacji o gatunku drzewa.

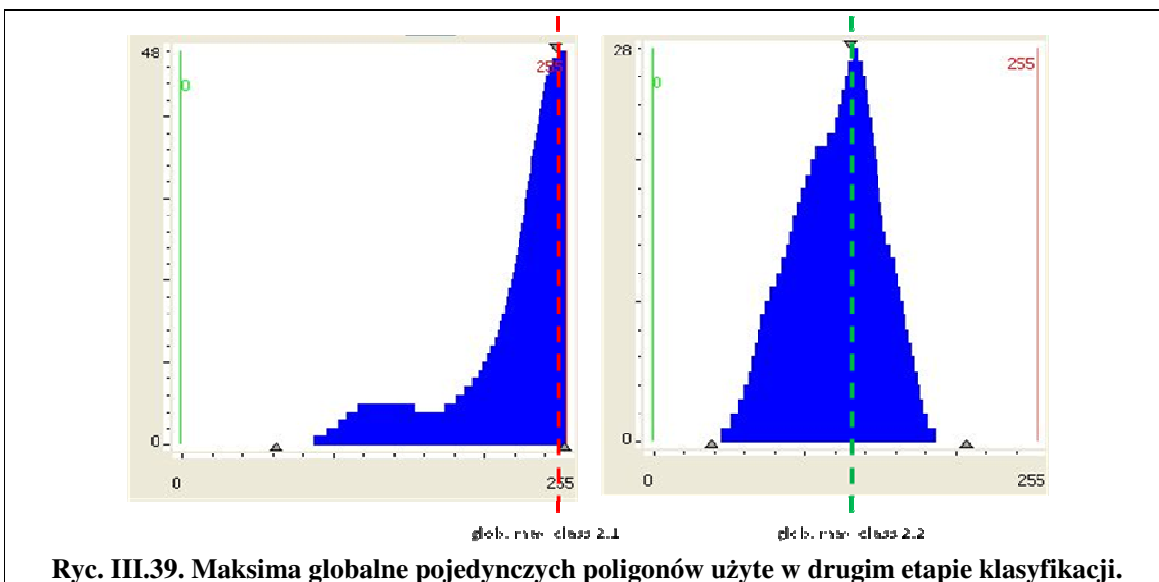
W pierwszej klasyfikacji rozróżniono 2 klasy:

- dąb i drab
- buk i gatunki iglaste.

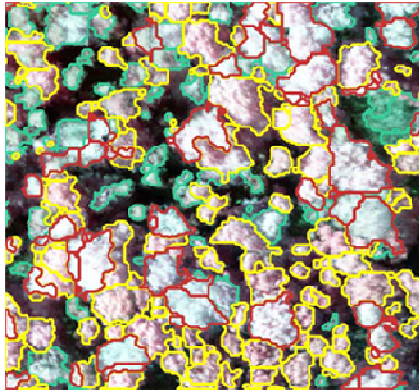
Charakterystykę skal szarości wyróżnionych klas przedstawiono na rysunku III.38.



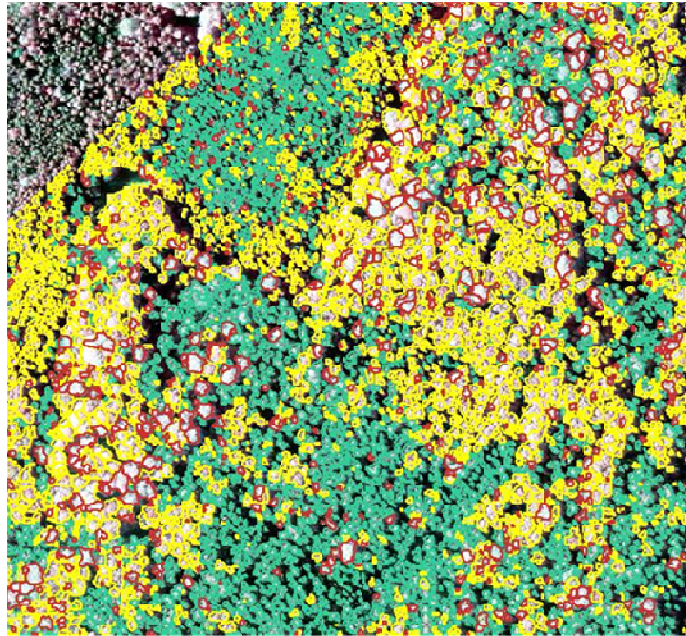
Następnie drugą grupę poddano ponownej klasyfikacji, w wyniku, której podzielono ją na Bk i gatunki iglaste (Ryc. III.39).



W toku weryfikacji metody dokonanej na kilku powierzchniach próbnych określono ogólną jej dokładność na poziomie 84%. Duży wpływ na wyniki miały błędy w segmentacji (Ryc. III.40).



**Beech**  
**Oak/Hornbeam**  
**Conifers**



Ryc. III.40. Efekt końcowy klasyfikacji badanego obszaru (zdjęcie po prawej) i jego powiększony fragment (zdjęcie po lewej).

## **6. Możliwość wykorzystania danych z lotniczego skanowania laserowego i stałych kontrolnych powierzchni próbnych do inwentaryzacji zapasu drzewostanów**

### **6.1 Materiał badawczy**

#### **6.1.1 Naziemne powierzchnie próbne**

Materiał badawczy stanowiły dane pochodzące z 34 powierzchni próbnych założonych w drzewostanach Obrębu Milicz (RDLP Wrocław). Był to uaktualniony podzbiór powierzchni próbnych założonych w ramach tematu badawczego prowadzonego na Wydziale Leśnym SGGW w Warszawie w latach 2005-2006. W okresie sierpień-wrzesień 2005 zostały one pomierzone po raz pierwszy jako stałe kontrolne powierzchnie próbne. Wówczas, korzystając z techniki GPS, obliczono współrzędne ich środków. Czas rejestracji (stosowano naliczanie 1-sekundowe) był taki, jak czas trwania całego pomiaru powierzchni próbnej. Po wykonaniu prac terenowych obliczono współrzędne środków powierzchni próbnych stosując technikę DGPS. Wykorzystano do tego dane zbierane przez stację referencyjną WROCŁAW. Zostały one udostępnione przez ośrodek ASG-PL w Katowicach. Współrzędne środków powierzchni próbnych zostały przeliczone z układu odniesienia WGS1984 do układu „1965”.

W roku 2006 powierzchnie próbne zostały odnalezione i zmierzone powtórnie. Ich wielkość w terenie wynosiła średnio 391 m<sup>2</sup> i wahała się (w zależności od wieku drzewostanu) od 200 do 500 m<sup>2</sup>. Średni wiek drzewostanów wyniósł 85 lat (w zakresie 15-150 lat). Skład gatunkowy był zróżnicowany: sosna była gatunkiem dominującym na 16 powierzchniach próbnych, buk na 11, dąb na 3, olsza na 2, modrzew na 1, brzoza na 1. Przeciętny stopień pokrycia powierzchni przez korony wyniósł 59% (w zakresie 20-95%). Średnia wysokość drzew wyniosła 23,9 m (w zakresie 5-39 m), a wysokość górna (liczona jako średnia trzech najwyższych drzew na powierzchni próbnej) 26,1 m (w zakresie 5-40 m). Średnia liczba drzew (o pierśnicy co najmniej 7 cm) na powierzchni próbnej wyniosła 16,2 sztuk (w zakresie 0-33), w tym drzew I piętra 14,4 sztuk (w zakresie 0-33). Średnia zasobność wyniosła 330 m<sup>3</sup>/ha (w zakresie 0-665 m<sup>3</sup>/ha), a średnie zagęszczenie drzew (o pierśnicy co najmniej 7 cm) 490 szt./ha (w zakresie 0-1300 szt./ha).

#### **6.1.2 Dane ze zobrażeń LIDAR-owych**

Na podstawie danych dotyczących współrzędnych środków powierzchni próbnych utworzono koła, wewnątrz których przeprowadzono odpowiednie pomiary. Zastosowano

dwie wielkości kół:  $500 \text{ m}^2$  (promień 12,61 m) i  $1963,5 \text{ m}^2$  (promień 25,0 m). Pierwsza z tych wielkości była nieco większa lub (w przypadku niektórych powierzchni próbnych) taka sama jak w terenie. Druga była większa niż w terenie. Dla każdej z tych wielkości zastosowano dwa warianty zaliczenia drzew do próby: według centroid (drzewo zaliczano do próby, jeżeli centroida jego korony znalazła się wewnątrz koła) lub według „granicy” (drzewo zaliczano do próby, jeżeli choć jeden fragment obrysu korony znalazł się wewnątrz koła). Rozmiar powierzchni wyznaczonych na podstawie danych ze skanowania laserowego był większy od powierzchni naziemnych ze względu na trudności w precyzyjnym zlokalizowaniu położenia powierzchni próbnych. W związku z tym zdecydowano się na przyjęcie wielkości powierzchni próbnej w ten sposób, by zwiększyć prawdopodobieństwo znalezienia się powierzchni próbnej założonej w terenie w obrębie zobrazowania laserowego. Zdecydowano się na przyjęcie takiego rozwiązania ze względu na fakt, że w testowanej metodzie istotne jest powiązanie ze sobą średnich wartości cech w obrębie drzewostanu, a nie dokładne scharakteryzowanie punktu, którym jest powierzchnia próbna.

Dysponowano następującymi podstawowymi danymi będącymi rezultatem pomiarów i przetworzeń zobrazowań LIDAR-owych:

- maksymalna wysokość poszczególnych drzew zaliczonych do próby,
- najniższa obserwowana część korony,
- powierzchnia rzutu korony,
- maksymalna średnica korony.

Na podstawie tych danych utworzono nowe cechy charakteryzujące poszczególne powierzchnie próbne:

- LD = liczba drzew w obrębie powierzchni próbnej,
- HL = średnia wysokość drzew (średnia arytmetyczna),
- HG = wysokość górna (średnia trzech najwyższych drzew na powierzchni próbnej),
- NH = suma wysokości drzew na powierzchni próbnej,
- P = suma powierzchni rzutów koron,
- OZ = suma objętości koron (dla drzewa liczona jako objętość stożka o podstawie takiej jak powierzchnia rzutu korony i wysokości takiej jak długość korony tj. różnica między wysokością drzewa a najniższą obserwowaną częścią korony).

## **6.2 Obliczenie zależności między zasobnością i zagęszczeniem drzew obliczonymi na ziemi a cechami z danych LIDAR-owych**

Przyjmując, że zmienną zależną jest – uzyskana z naziemnych pomiarów powierzchni próbnych – jedna z cech (zasobność  $V$  lub liczba wszystkich drzew  $ZAG$ ), a zmiennymi niezależnymi cechy obliczone na powierzchniach LIDAR-owych (w miejscu odwzorowania naziemnych powierzchni próbnych), obliczono regresję wielokrotną. Wykorzystano do tego 34 powierzchnie próbne. Przyjęto kwadratową funkcję zmiennych niezależnych, która w przypadku dwóch zmiennych  $t$  i  $z$  ma ogólną postać:

$$y = a_0 + a_1t + a_2z + a_3t^2 + a_4z^2 + a_5tz$$

Jako zmienne niezależne przyjmowano trzy cechy oraz odpowiednie ich kwadraty i pary iloczynów. Przyjęcie tylko trzech cech wynikało z faktu, że każda z sześciu wskazanych cech LIDAR-owych miała jednego pokrewnego odpowiednika. I tak alternatywnymi parami były:

- HL i HG,
- LD i NH,
- P i OZ.

Z tego powodu można było utworzyć osiem kombinacji zestawu cech wyjściowych. Dobór zmiennych do równania regresji wykonano metodą krokową „wstecz”, korzystając z programu Statistica.

Wskazane wyżej obliczenia zostały wykonane czterokrotnie z uwzględnieniem, że zmienne niezależne różniły się w zależności od wielkości próby LIDAR-owej i w zależności od sposobu zaliczenia drzew (koron) do próby.

## **6.3 Wyniki**

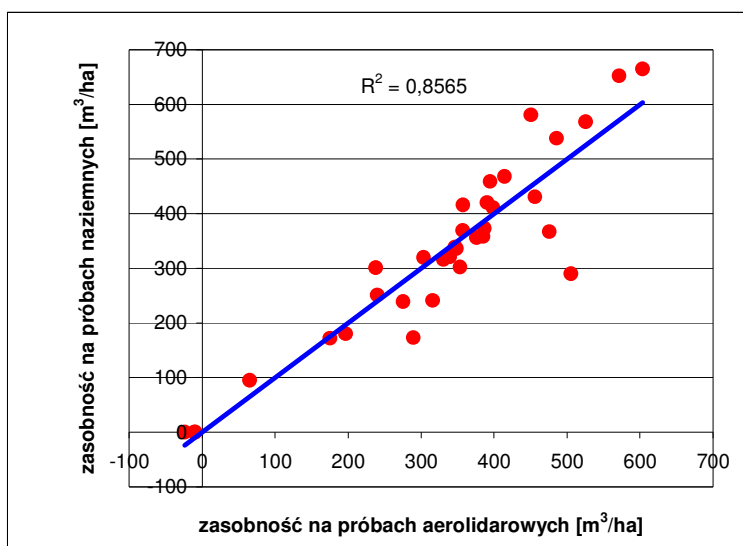
### **6.3.1 Zależność między zasobnością na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami na LIDAR-owych powierzchniach próbnych**

Stwierdzono, że siła związku między zasobnością  $V$  na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami określonymi na podstawie LIDARA różniła się w zależności od wielkości powierzchni LIDAR-owej i sposobu zliczenia drzew do próby. Największa była w przypadku powierzchni „centroid 500 m<sup>2</sup>”, a najmniejsza w przypadku powierzchni „granica 2000 m<sup>2</sup>” (tab. III.15). Ogólnie – zależność tę należy ocenić jako bardzo silną (rys. III.41). Największa wartość współczynnika korelacji wyniosła  $R=0,925$  (istotność  $p<0,001$ ).

W przypadku powierzchni próbnych „centroid 500 m<sup>2</sup>” trzy zestawy cech można uznać za szczególnie przydatne. Za każdym razem znalazła się tam cecha OZ (objętość koron). Cechy HG lub HL oraz LD lub NH można byłoby uznać za jednakowo przydatne.

**Tabela III.15. Wyniki obliczeń regresji wielokrotnych zależności między zasobnością na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami określonymi na podstawie LIDARA. Przyjęto cztery rodzaje prób LIDAR-owych różniących się wielkością (odpowiednik w terenie) oraz sposobem zaliczania drzew do próby (żółtym kolorem podkreślono najsilniejsze zależności).**

| Zaproponowane zmienne (+ ich kwadraty i pary iloczynów) | Wielkość i rodzaj powierzchni próbnych LIDAR-owych                                 |                                                          |                                                                                    |                                                           |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                                                         | Wg centroidy – 500 m <sup>2</sup>                                                  | Graniczne – 500 m <sup>2</sup>                           | Wg centroidy – 2000 m <sup>2</sup>                                                 | Graniczne – 2000 m <sup>2</sup>                           |
|                                                         | Wybrane zmienne; w ostatnim wierszu współczynnik korelacji R                       |                                                          |                                                                                    |                                                           |
| HL, OZ, NH                                              | HL <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HL*OZ, HL*NH<br>0,915                          | OZ, HL*NH, OZ*NH<br>0,871                                | HL <sup>2</sup> , HL*OZ, HL*NH, OZ*NH<br>0,891                                     | HL*OZ, HL*NH, OZ*NH<br>0,840                              |
| HL, OZ, LD                                              | HL <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD <sup>2</sup> , HL*OZ, OZ*LD<br><b>0,924</b> | HL, OZ, LD <sup>2</sup> , HL*LD, OZ*LD<br>0,891          | HL <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD <sup>2</sup> , HL*OZ, HL*LD<br><b>0,898</b> | OZ <sup>2</sup> , LD, LD <sup>2</sup> , HL*OZ<br>0,856    |
| HL, P, NH                                               | HL <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , NH <sup>2</sup> , HL*P<br>0,897                 | HL <sup>2</sup> , HL*P, HL*NH, P*NH<br>0,869             | NH, HL*P, P*NH<br>0,850                                                            | P <sup>2</sup> , HL*NH, P*NH<br>0,839                     |
| HL, P, LD                                               | P <sup>2</sup> , HL*P, HL*LD<br>0,883                                              | P, HL*LD, P*LD<br>0,870                                  | HL <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , HL*P<br>0,849                                   | P <sup>2</sup> , LD, LD <sup>2</sup> , HL*P<br>0,851      |
| HG, OZ, NH                                              | HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HG*OZ, HG*NH<br><b>0,922</b>                   | HG <sup>2</sup> , OZ, HG*NH, OZ*NH<br>0,891              | HG, OZ, HG*NH, OZ*NH<br>0,883                                                      | HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HG*NH, OZ*NH<br>0,863 |
| HG, OZ, LD                                              | HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD <sup>2</sup> , HG*OZ, HG*LD<br><b>0,925</b> | HG, OZ, LD, HG*LD, OZ*LD<br><b>0,907</b>                 | HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD, LD <sup>2</sup> , HG*OZ<br><b>0,899</b>    | HG, HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HG*OZ<br>0,841    |
| HG, P, NH                                               | HG <sup>2</sup> , NH <sup>2</sup> , HG*P, HG*NH, P*NH<br>0,899                     | HG <sup>2</sup> , HG*P, HG*NH, P*NH<br>0,888             | P, HG*NH, P*NH<br>0,852                                                            | HG, P <sup>2</sup> , NH, HG*NH, P*NH<br><b>0,871</b>      |
| HG, P, LD                                               | HG, HG <sup>2</sup> , P, P <sup>2</sup> , LD, HG*LD<br>0,912                       | HG, P, LD, LD <sup>2</sup> , HG*LD, P*LD<br><b>0,911</b> | HG <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , HG*P<br>0,870                                   | HG <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , HG*P<br>0,840          |

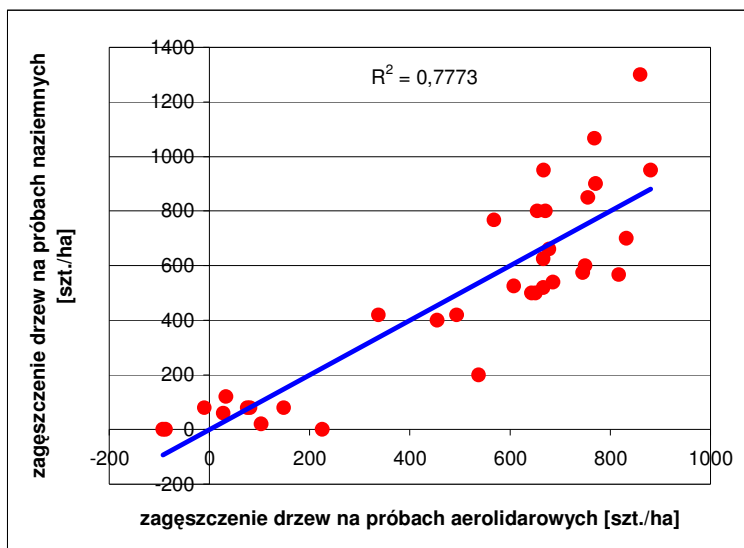


Rys. III.41. Zależność między zasobnością na naziemnych powierzchniach próbnych a obliczoną na podstawie cech LIDAR-owych. Wyniki dla najlepszego modelu zależności (powierzchni typu "centroida 500")

### 6.3.2 Zależność między zagęszczeniem drzew na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami na LIDAR-owych powierzchniach próbnych

Stwierdzono, że siła związku między zagęszczeniem drzew *ZAG* na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami LIDAR-owymi różniła się w zależności od wielkości powierzchni LIDAR-owej i sposobu zliczenia drzew do próby. Tak jak w przypadku zasobności – największa była przy stosowaniu powierzchni „centroid 500 m<sup>2</sup>” (najlepszy wynik dla powierzchni „granica 500 m<sup>2</sup>” potraktowano jako przypadkowy), a najmniejsza przy stosowaniu powierzchni „granica 2000 m<sup>2</sup>” (tab. III.16). Ogólnie – zależność tę należy ocenić jako bardzo silną, choć nieco mniejszą niż w przypadku zasobności (rys. III.42). Największa wartość współczynnika korelacji wyniosła  $R=0,888$  (istotność  $p<0,001$ ).

W przypadku powierzchni próbnych „centroid 500 m<sup>2</sup>” najlepszym zestawem cech okazał się HL, OZ i NH. Jednak zamiana którejś z tych cech na HG lub P lub LD nie spowodowałaby zbyt dużego pogorszenia siły związku.



Rys. III.42. Zależność między zagęszczeniem drzew na naziemnych powierzchniach próbnych a obliczonym na podstawie cech LIDAR-owych. Wyniki dla najlepszego modelu zależności (powierzchni typu "centroida 500")

Tabela III.16. Wyniki obliczeń regresji wielokrotnych zależności między zagęszczeniem drzew na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami LIDAR-owymi. Przyjęto cztery rodzaje prób LIDAR-owych różniących się wielkością (odpowiednik w terenie) oraz sposobem zaliczania drzew do próby (żółtym kolorem podkreślono najsilniejsze zależności).

| Zaproponowane zmienne (+ ich kwadraty i pary iloczynów) | Wielkość i rodzaj powierzchni próbnych LIDAR-owych           |                                                    |                                             |                                 |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|
|                                                         | Wg centroidy – 500 m <sup>2</sup>                            | Graniczne – 500 m <sup>2</sup>                     | Wg centroidy – 2000 m <sup>2</sup>          | Graniczne – 2000 m <sup>2</sup> |
|                                                         | Wybrane zmienne; w ostatnim wierszu współczynnik korelacji R |                                                    |                                             |                                 |
| HL, OZ, NH                                              | HL, OZ, NH, NH <sup>2</sup> , HL*OZ<br>0,882                 | NH, NH <sup>2</sup> , HL*NH, OZ*NH<br>0,888        | NH, NH <sup>2</sup> , HL*NH, OZ*NH<br>0,855 | NH, HL*NH<br>0,795              |
| HL, OZ, LD                                              | OZ, LD <sup>2</sup> , HL*OZ<br>0,865                         | HL, OZ, HL*OZ, HL*LD, OZ*LD<br>0,851               | LD<br>0,763                                 | LD<br>0,773                     |
| HL, P, NH                                               | NH, NH <sup>2</sup> , HL*NH, P*NH<br>0,868                   | NH, NH <sup>2</sup> , HL*NH, P*NH<br>0,864         | NH, HL*NH<br>0,796                          | NH, HL*NH<br>0,795              |
| HL, P, LD                                               | P, HL*P<br>0,840                                             | HL <sup>2</sup> , P, LD <sup>2</sup> , HL*LD, P*LD | LD<br>0,763                                 | LD<br>0,773                     |

| Zaproponowane<br>zmiennie (+ ich<br>kwadraty i pary<br>iloczynów) | Wielkość i rodzaj powierzchni próbnych LIDAR-owych            |                                         |                                                   |                                    |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                                   | Wg centroidy –<br>500 m <sup>2</sup>                          | Graniczne –<br>500 m <sup>2</sup>       | Wg centroidy –<br>2000 m <sup>2</sup>             | Graniczne –<br>2000 m <sup>2</sup> |
|                                                                   | Wybrane zmiennie; w ostatnim wierszu współczynnik korelacji R |                                         |                                                   |                                    |
|                                                                   |                                                               | 0,840                                   |                                                   |                                    |
| HG, OZ, NH                                                        | NH, NH <sup>2</sup> ,<br>HG*NH,<br>OZ*NH<br>0,852             | HG, HG <sup>2</sup> ,<br>HG*OZ<br>0,807 | NH, NH <sup>2</sup> ,<br>HG*NH,<br>OZ*NH<br>0,841 | NH, HG*NH<br>0,796                 |
| HG, OZ, LD                                                        | OZ, LD <sup>2</sup> ,<br>HG*OZ<br>0,863                       | OZ, LD <sup>2</sup> ,<br>HG*OZ<br>0,864 | OZ, HG*OZ<br>0,824                                | OZ, HG*OZ<br>0,797                 |
| HG, P, NH                                                         | P, HG*P<br>0,811                                              | HG, HG <sup>2</sup> , P<br>0,825        | P, HG*P<br>0,811                                  | NH, HG*P<br>0,786                  |
| HG, P, LD                                                         | NH, HG*NH<br>0,808                                            | P, HG*P<br>0,811                        | P, HG*P<br>0,811                                  | P, HG*P<br>0,797                   |

## 6.4 Dyskusja

Wykorzystanie drzewostanów Obrębu Milicz jako obiektu badań stworzyło dobrą okazję do porównania rezultatów zastosowania pomiarów LIDAR-owych z pomiarami fotogrametrycznymi. Traktując wyniki pomiarów na powierzchniach próbnych LIDAR-owych jako potencjalne próby I fazy w dwufazowej kombinowanej metodzie inwentaryzacji lasu, możliwe było porównanie z rezultatami podobnego opracowania wykonanego z wykorzystaniem zdjęć lotniczych (Miścicki 2007). Porównanie to traktować należy jako wstępne, gdyż analiza wykonywana była na podstawie nieidentycznego materiału pomiarowego. W porównaniu tym istotne jest przede wszystkim zestawienie uzyskanej w obydwóch metodach siły związku pomiędzy zapasem a cechami określonymi na podstawie materiałów pozyskanych zdalnie oraz fakt możliwej automatyzacji przetwarzania danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego. W cytowanym tu opracowaniu wykorzystano pomiary 283 naziemnych powierzchni próbnych (267 w drzewostanach w wieku powyżej 20 lat) wykonane w roku 2005 i takiej samej liczby prób fotolotniczych z roku 1997, zlokalizowanych w miejscu odwzorowania powierzchni naziemnych. Położenie

powierzchni próbnych LIDAR-owych z roku 2006 było zdeterminowane przez położenie 34 stałych powierzchni próbnych naziemnych jednych z tych, które były wykorzystane w cytowanych tu badaniach. Można więc przyjąć, że materiał badawczy jest porównywalny, a stąd rezultaty badań nad wykorzystaniem zdjęć lotniczych a zobrazowań LIDAR-owych do inwentaryzacji lasu metodą kombinowaną – porównywalne.

W przypadku zasobności, siła związku między tą cechą obliczoną na powierzchniach naziemnych a cechami fotolotniczymi, określona przy pomocy współczynnika korelacji  $R=0,830$  (Miścicki 2007), była mniejsza niż w przypadku cech LIDAR-owych ( $R=0,925$ ).

W cytowanych tu badaniach (Miścicki 2007) nie obliczano zależności między zagęszczeniem drzew na powierzchniach naziemnych a cechami na fotolotniczych powierzchniach próbnych. Można więc posłużyć się tylko odniesieniem do wcześniejszych badań (Miścicki red. 2000) biorąc jednak pod uwagę, że technika opracowania fotogrametrycznego stała wówczas (w roku 2000) na gorszym poziomie – stąd rezultaty uzyskane dziś mogłyby być lepsze. W przypadku zagęszczenia wszystkich drzew siła związku ( $R=0,697$ ) była znacznie mniejsza niż dla prób LIDAR-owych ( $R=0,888$ ). Należy także nadmienić, że wykonując pomiary na zdjęciach lotniczych wykorzystywano wiek drzewostanu jako dodatkowo cechę. Nie była ona wykorzystana w niniejszych badaniach.

Ogólnie można stwierdzić, że siła związku między cechami mierzonymi na ziemi a cechami określonymi na podstawie danych z LIDARA była większa niż w przypadku powierzchni fotolotniczych. Oznacza to, że zautomatyzowanie obliczeń cech LIDAR-owych stwarza jakościowo nową (lepszą) sytuację dla pomiarów prowadzonych metodą kombinowaną. Na przykład zapas drzewostanów Obrębu Milicz o powierzchni leśnej 7599 ha, przy stosowaniu 267 prób naziemnych jako części inwentaryzacji wykonywanej metodą kombinowaną i 1980 prób LIDAR-owych, mógłby być oszacowany z błędem ok.  $\pm 2,6\%$  (przy poziomie istotności  $p=0,05$ ). Byłaby to dokładność bardzo zbliżona do tej, którą uzyskano w ramach inwentaryzacji urzędzeniowej z zastosowaniem 835 powierzchni próbnych naziemnych. Dalsze zwiększenie liczby prób LIDAR-owych prowadziłyby do zwiększenia dokładności inwentaryzacji. Takie rozwiązanie byłoby możliwe, jeżeli koszt automatycznego pomiaru w niewielkim stopniu zależałby od liczby prób LIDAR-owych. Przedstawione w tej części opracowania wyniki należy traktować jako wstępne. Biorąc jednak pod uwagę fakt, że dla danych pochodzących ze skanowania laserowego uzyskano wyższe, niż dla danych fotogrametrycznych współczynniki siły związku między zapasem a zestawami cech określanymi z przetworzenia danych zdalnych, dla większej liczby powierzchni próbnych zapas może zostać określony z błędem niższym, niż w klasycznej metodzie

inwentaryzacji wykorzystującej zdjęcia lotnicze. Teza ta wymaga jednak weryfikacji na większym materiale pomiarowym.

## **6.5 Wnioski**

1. Należy stosować powierzchnie próbne LIDAR-owe dostosowane wielkością do naziemnych powierzchni próbnych.
2. Lepszym sposobem zaliczania drzew do próby LIDAR-owej jest metoda „centroidy”.
3. Cechą LIDAR-ową szczególnie przydatną do obliczenia zasobności jak i zagęszczenia drzew jest „suma objętości koron” (OZ). Pozostałe cechy: wysokość (HG górna lub HL średnia), liczba drzew widoczna na obrazowaniu (LD) lub suma wysokości drzew (NH) mają podobne znaczenie dla objaśnienia zależności między danymi naziemnymi a LIDAR-owymi.

## **7. Propozycje dalszych kierunków rozwoju aplikacji wykorzystujących dane z lotniczego skanowania laserowego do określania parametrów drzewostanów**

Zdalne metody pozyskiwania informacji o lesie rozwinęły się z różnym skutkiem na całym świecie. W zależności od struktury lasów i sposobów ich inwentaryzacji, mają one większe lub mniejsze znaczenie w poszczególnych krajach. W Indiach inwentaryzacja prowadzona jest głównie w oparciu o zobrażenia satelitarne, kraje skandynawskie rozpoczęły już praktyczne wykorzystanie skaningu laserowego w inwentaryzacji lasu. W Niemczech leśnicy czynią pierwsze kroki, by wykorzystać dane LIDAR-owe do określania zasobności drzewostanów.

Pierwszy raz w historii teledetekcji i fotogrametrii stanęliśmy przed problemem ogromnej ilości danych, o bardzo wysokiej jakości. Problem, przed jakim staje dzisiaj odbiorca, to wybór pomiędzy technologiami ich pozyskiwania i przetwarzania. Pytanie, jakie w tych warunkach powstaje, brzmi: czy w leśnictwie na pewno techniki te są potrzebne, czy przypadkiem badania nad rozwojem technologii teledetekcyjnych nie były, i nie są, prowadzone wyłącznie na potrzeby samej technologii, a nie leśnictwa?

W Polsce, doświadczenia w wykorzystaniu danych teledetekcyjnych i fotogrametrycznych są bardzo bogate i sięgają lat siedemdziesiątych XX wieku (Piekarski 1972). Długo rozwijane i udoskonalane nie znalazły zastosowania w praktyce. Dzisiejsza technologia daje nowe możliwości pozyskiwania informacji. Wykorzystanie komputerów pozwala na całkowitą automatyzację prac oraz zupełnie nowe podejście do zagadnienia wizualizacji.

Pierwsze prace prowadzone głównie we współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi wykazują, że istnieją praktyczne podstawy wdrożenia technologii lotniczego skanowania laserowego w warunkach polskich. Struktura gatunkowa i przestrzenna naszych lasów, gdzie większość obszaru pokrywają jednopiętrowe lub jednogatunkowe drzewostany, głównie iglaste, pozwala na zautomatyzowanie wielu prac.

Spośród szeregu zbieranych w trakcie taksacji lasu cech drzewostanu, możliwe do automatycznego określenia z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego i zdjęć lotniczych (lub obrazów satelitarnych) są następujące:

- miąższość drzewostanu,
- wysokość pojedynczych drzew i drzewostanów,

- liczba drzew na jednostkę powierzchni (np.: hektar),
- budowa pionowa drzewostanu,
- wydzielenie powierzchni nie stanowiących wydzieleni, określenie zasięgu luk oraz ich wysokościowego położenia,
- określenie składu gatunkowego,
- określenie położenia przestojów,
- wskazanie niższych warstw drzewostanu (np.: młodego pokolenia),
- zmieszanie (wyrażone obiektywną liczbą),
- zwarcie i zagęszczenie (wyrażone obiektywną liczbą),
- określenie bonitacji (o ile wiek będzie znany),
- stopień uszkodzenia drzewostanu (wymaga nowej definicji),
- przyrost drzewostanu – możliwy przy cyklicznym wykorzystaniu LIDAR-a,
- określenie przebiegu liniowych szczegółów sytuacyjnych,
- pochylenie, wystawa i inne cechy związane z numerycznym modelem terenu będą operacją automatyczną, (nie ma w tej chwili danych, które mogą dostarczyć w szybszy sposób NMT dla ogromnego obszaru z taką dokładnością jak LIDAR),
- podział przestrzeni leśnej na homogeniczne partie drzewostanu.

Powyższa lista wymaga kilku słów komentarza.

Określenie zapasu wymaga zmiany podejścia do inwentaryzacji lasu. W pierwszej kolejności określenia grup drzewostanów, w których możliwa jest tego typu inwentaryzacja, przy jak najmniejszym udziale prac naziemnych. Oznacza to również ustalenie wielkości powierzchni próbnej oraz jej kształtu, znalezienia nowych kryteriów (uwzględniających patrzenie na las z „góry”) dzielenia drzewostanów na grupy stratyfikacyjne (co oczywiście jest możliwe). Optymalizacja wielkości i kształtu powierzchni próbnych do wykorzystania w nowej metodzie inwentaryzacji lasu wymaga przeprowadzenia dalszych badań. Wykorzystanie obecnie obowiązujących wielkości nie jest niewłaściwe, gdyż minimalizuje wpływ mikroźródnicowania pierśnicowego pola przekroju drzew drzewostanu na uzyskane wyniki. Jedynym niebezpieczeństwem jest w tym przypadku uzyskanie nieefektywnych (tj. obarczonych błędem większym, niż możliwym do uzyskania) estymatorów miąższości.

Przede wszystkim najpierw trzeba odpowiedzieć na pytanie co jest prawdziwą – referencyjną dla innych pomiarów wysokością drzewa? Gdy będziemy umieli na to pytanie odpowiedzieć, to w przypadku nowego podejścia do tego tematu, wysokość drzew

i drzewostanów określana powinna być w oparciu o wstępnie przefiltrowane surowe dane LIDAR-owe. Obliczanie wysokości na podstawie wysokościowego modelu koron (różnicowego modelu terenu), poza prostotą i szybkością, ma jeden poważny mankament – z reguły zaniża wartości wysokości. W tym momencie można zaznaczyć możliwość automatycznego określania bonitacji, i to dla partii drzewostanów, a nie dla całych wydzieleń. Do jej określania wymagane jest tylko pozyskanie informacji o wieku. Tego zdalnie jeszcze nie można robić.

Liczba drzew to cecha, która nie była określana na szerszą skalę w lasach polskich. Czy jest ona potrzebna? – na pewno tak. Istniejące metody dają gwarancję że zawsze około 80 - 90 % drzew będziemy w stanie policzyć, stosunkowo niskim kosztem. Pytanie czy ta dokładność nas zadawała?

Bazując na zdobytych doświadczeniach można z całą pewnością stwierdzić, że analiza wysokościowego modelu koron, czy surowej chmury punktów, dostarczy poza informacją o budowie pionowej jeszcze wielu innych charakterystyk drzewostanów. Wskazanie występowania niskiej roślinności wymaga jeszcze stwierdzenia czy jest to podszyt, czy istotny z gospodarczego punktu widzenia podrost. Tego może dokonać taksator, ale na takiej zasadzie, że skieruje się w wyselekcjonowane wcześniej obszary o właściwej powierzchni. Będzie to o wiele bardziej efektywny sposób taksacji. Opisano już voxel (Chasmer i in. 2004, Lefsky i in. 2002) – jednostkę przestrzeni, i skorelowano ją z danymi LIDAR-owymi. Liczebność punktów w poszczególnych klasach przestrzeni leśnej wykorzystywana jest między innymi do szacowania biomasy i miąższości drzewostanu (Naesset E. 2004). Oczywiście analiza chmury punktów wymaga większego doświadczenia, wiedzy i wydajniejszych algorytmów, ale jest na pewno przyszłością.

Określenie przerostów, dróg, luk, gniazd czy innych nieciągłości w środowisku leśnym jest problemem w większości przypadków rozwiązany. Wszystko sprowadza się do podania właściwej definicji i kryteriów jakie te obiekty powinny spełniać. Ważne jest by przy ich formułowaniu wzięto pod uwagę zupełnie inną perspektywę obserwowania lasu oraz nowe możliwości wykorzystywanych do tego celu narzędzi.

Takie cechy jak zwarcie czy zagęszczenie, podobnie jak wiele innych, mogą zostać w końcu konkretnie zdefiniowane i opisane konkretnymi współczynnikami liczbowymi. Ich określenie jest już operacją automatyczną a co za tym bardziej obiektywną. Może to być w najbliższym czasie jedna z ważniejszych cech, w pewnym stopniu mówiąca o kondycji zdrowotnej drzewostanów, głównie górskich.

Wykonywana w odstępach 5-10 letnich inwentaryzacja z wykorzystaniem LIDAR-a może zostać skonsumowana przez metodę określania miąższości biomasy, monitorowania zmian drzewostanów i bardzo dokładnego oszacowania przyrostu drzewostanu. Wymaga to jednak zmiany filozofii podejścia do mapy numerycznej i przejścia na format rastrowy, przynajmniej na poziomie warstw fakultatywnych.

Ostatnia z proponowanych cech – wydzielenie homogenicznych części drzewostanu, także wymaga przedstawienia przestrzeni leśnej w postaci rastra. W związku z komplikowaniem się przestrzeni leśnej (efekt rębni częściowych i spełnianie przez las funkcji pozaprodukcyjnych) coraz częściej pododdział nie będzie jednorodnym pod wpływem struktury i składu gatunkowego obiektem przestrzennym, ale poszczególne jego części będą się na tyle od siebie różnić, że będą pełniły zupełnie inne funkcje. Trudno będzie wtedy zrozumieć dalsze opisywanie takich struktur wspólnie. Dodatkowo wektorowy sposób prezentowania drzewostanu – dynamicznego tworu o bardzo różnorodnej strukturze przestrzennej, wydaje się już zupełnie przestarzały. Biorąc pod uwagę pojemność szeroko dostępnych macierzy dyskowych, szybkość procesorów i dostępność zaawansowanych algorytmów przetwarzających obrazy rastrowe należy zmienić filozofię leśnej mapy numerycznej. Zdefiniowanie homogenicznych części drzewostanu, jako jednostki podstawowej i nadanie jej rangi odpowiadającej dzisiejszemu wydzieleniu, pozwoli na utrzymanie podziału przestrzeni leśnej na oddziały, a jednocześnie wreszcie pozwoli na wiarygodne prezentowanie informacji o drzewostanach. Elastyczność rastra pozwoli na różny stopień szczegółowości w zależności od skali, umożliwi prezentację np. przestojów, nasienników, luk i gniazd, pozwoli wizualizować tę swoistą różnorodność struktury przestrzennej każdego drzewostanu.

Przedmiotem osobnego projektu powinno stać się wykorzystanie NMT w leśnictwie. Jest to od dawna polecane przez naukę, i dotychczas nie akceptowane przez leśnictwo źródło danych mogące być wykorzystane praktycznie w większości czynności gospodarczych.

## 8. Uwagi końcowe

Z racji tego, że struktura wiekowa i gatunkowa Nadleśnictwa Milicz zbliżona jest do przeciętnych dla polskich lasów, doświadczenia zdobyte dla tego obiektu mogą zostać bezpośrednio przełożone na większą część kraju. Trudno jest biorąc pod uwagę czas dostarczenia danych LIDAR-owych, przedstawić wszystkie możliwości wykorzystania danych z lotniczego skanowania laserowego w leśnictwie polskim. Autorzy mają jednak nadzieję na kontynuację zainteresowania Lasów Państwowych tą tematyką.

Jak pokazują doświadczenia innych krajów, tematyka zdalnego pozyskiwania informacji o lesie jest trendem światowym. Polska nie może i nie powinna zostać w stosowaniu najnowszych technologii w tyle. Naszym zadaniem powinno być nie tylko wdrażanie osiągnięć, ale również czynny udział w tworzeniu naszych metod. Po raz pierwszy tak zbliżyliśmy się do czołówki światowej. W dobie wzrostu kosztów pracy ludzkiej, stawianie na rozwój nowoczesnych technologii, wydaje się po prostu przejawem gospodarności i wyrażeniem troski o kondycję Lasów Państwowych w przyszłości.

Ostatnia uwaga dotyczy ortofotomapy. Konferencja SIP w LP we wrześniu 2008 pokazała niepokojący trend uznawania ortofotomap za całkowicie bezbłędne i wykorzystywanie ich nawet do poprawy geometrii leśnych map numerycznych. Aby uściślić warto zwrócić uwagę, że ortofotomapa powstaje w oparciu o numeryczny model terenu. Oznacza to, że współrzędne wierzchołków drzew są takie same jak ich podstaw. Generują to nawet kilkumetrowe błędy na skrajach zdjęć i całkowite zniekształcenie geometrii. Dlatego bardzo ostrożnie należy podejść do tych materiałów od strony geometrii. Tylko mapy „trueorthophoto”, oparte o numeryczny model pokrycia terenu z danych LIDAR-owych, mogą być referencją do aktualizacji map leśnych tak by nie wprowadzać do nich dodatkowych błędów. Mogą one również służyć jako weryfikacja dokładności innych wykorzystywanych materiałów. Pamiętajmy, że dokładność modeli z danych LIDAR-owych sięga kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów.

## **ZAŁĄCZNIK**

Pozyskanie danych przestrzennych do sporządzenia ortofotomapy,  
Numerycznego Modelu Terenu (NMT) i Numerycznego Modelu Pokrycia  
Terenu (NMPT) poligonu badawczego – obrębu Milicz Nadleśnictwa Milicz -  
sprawozdanie techniczne

### **INFORMACJE OGÓLNE O PROJEKCIE**

Projekt wykonano na podstawie Umowy z dnia 29 sierpnia 2006 i aneksu Nr 1 do Umowy zawartej pomiędzy Zleceniodawcą którym była Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego z siedzibą w Warszawie przy ul. Nowoursynowskiej 166, a Wykonawcą którym była firma Tele Atlas Polska Sp. z o.o. z siedzibą w Warszawie przy ul. Ludnej 2.

Projekt został wykonany w ramach Projektu Badawczego którego celem było wyselekcjonowanie użytecznych w leśnictwie sposobów zdalnej rejestracji obrazu lasu oraz opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na różnych technikach geomatycznych.

Część tych badań została objęta niniejszym projektem w ramach którego na obiekcie badawczym „Milicz” wykonano cyfrowe zdjęcia lotnicze oraz skaniny laserowe. W następnym etapie w oparciu o te dwie technologie wykonano ortofotomapę oraz Numeryczny Model Terenu i Numeryczny Model Powierzchni Terenu.

### **WYKONANIE CYFROWYCH ZDJĘĆ LOTNICZYCH**

#### **NALOT FOTOGRAMETRYCZNY**

W dniach 5-7 maja 2006 roku wykonano nalot fotogrametryczny na obiekcie z użyciem niżej wymienionego sprzętu:

- samolot Cessna 402B o numerze rejestracyjnym SP - KFT
- kamera cyfrowa Vexcel UltraCam D
- system nawigacyjny CCNS4
- system rejestracji parametrów pracy kamery AERO Control

Obiekt został pokryty 707 zdjęciami o pokryciu podłużnym 60% i pokryciu poprzecznym 40% które wykonano w 22 szeregach w kierunku wschód – zachód.

Zdjęcia wykonano w bardzo dobrych warunkach pogodowych tj. przy bezchmurnym niebie.

Zdjęcia zapisano na twardym dysku zewnętrznym na którym zajęły 800 GB pamięci.

Powykonawczy plan nalotu przedstawiono na rysunku III.37.

#### POMIAR WSPÓŁRZĘDNYCH ŚRODKÓW RZUTÓW KAMERY W LOCIE

Obliczenia elementów pracy kamery przeprowadzono w oparciu o dane ze stacji permanentnej GPS WROC usytuowanej na terenie miasta Wrocławia oraz stacji referencyjnej GPS ustawionej na obiekcie.

Obliczenia współrzędnych środków rzutów (środka fazowego anteny lotniczej) zostały policzone programem Ashtech Office Suite for Survey (AOSS) ver.2.11 a obliczenia parametrów kątowych pracy kamery zostały wykonane w oprogramowaniu AERO Control.

#### **ZAŁOŻENIE I POMIAR OSNOWY FOTOGRAMETRYCZNEJ**

Celem prac polowych było wyznaczenie techniką GPS współrzędnych X,Y,Z, 24 punktów osnowy fotogrametrycznej założonej wg projektu który został wykonany w oparciu o plan nalotu nałożony na mapę topograficzną w skali 1:10 000, i odbitki zdjęć lotniczych na których zaznaczono projektowane fotopunkty. Fotopunkty wybierano na dobrze odfotografowanych elementach na powierzchni terenu takich jak skrzyżowania dróg narożniki ogrodzeń itp. Niezależnie od pomiaru fotopunktów, na obiekcie pomierzono dwa pola testowe wykorzystane w następnym etapie prac do kalibracji skaningu laserowego.

Obserwacje przeprowadzono w okresie od 21.06.2006 do 27.06.2006. Pomiary wykonano na punktach wyznaczonych oraz na punktach nawiązania, czyli na 24 fotopunktach, na dwóch punktach sieci POLREF 3 punktach osnowy I klasy oraz 2 punktach osnowy wysokościowej - reperach. Do pomiaru użyto zestawów odbiorników *Z XII* i *Javad* firmy *Ashtech*. Pomiar został wykonany metodą statyczną z interwałem 15-sekundowym. Długość sesji obserwacyjnej na fotopunktach wynosiła 45 min., na punktach osnowy I klasy 90 minut, a na punktach PPOLREF 120 min. Pomiary zostały obliczone i wyrównane programem *Pinnacle*

w układzie współrzędnych „1992”. Maksymalny błąd położenia X,Y wyznaczanego punktu wynosi 11,5 mm a maksymalny błąd wysokości punktu wynosi 15 mm.

## **AEROTRIANGULACJA**

### **DANE TECHNICZNE**

Cały obszar opracowania pokryto zdjęciami cyfrowymi wykonanymi za pomocą kamery UltraCamD firmy Vexcel.

|                                         |                               |
|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Obszar pokrycia .....                   | 84 km <sup>2</sup>            |
| Rodzaj zdjęć .....                      | kolorowe (RGB) cz-białe (PAN) |
| Rozmiar zdjęcia panchromatycznego ..... | 11500 x 7500 pixeli           |
| Rozmiar Piela panchromatycznego .....   | 9 $\mu$ m                     |
| Skala zdjęć .....                       | GSD 16 cm                     |
| Pokrycie poprzeczne .....               | q = 40%                       |
| Pokrycie podłużne .....                 | p = 60%                       |
| Ogniskowa obiektywu .....               | 105,200 mm                    |
| Baza podłużna (Bx) .....                | 720 m                         |
| Baza poprzeczna .....                   | 736 m                         |

Wyrównanie zostało przeprowadzone w jednym bloku liczącym 707 zdjęć. Przy opracowaniu wykorzystano pakiety oprogramowania firmy INTERGRAPH (ImageStadion Automatc Triangulation ver. 05.00.04.00)

### **PRACE PROJEKTOWE**

Założono projekt aerotriangulacji z uwzględnieniem precyzyjnych środków rzutów i INS.

Środki rzutów i dane INS rejestrowane były w czasie lotu i policzone w post-procesingu.

Obliczenia współrzędnych środków rzutów (środka fazowego anteny lotniczej) zostały

policzone programem Ashtech Office Suite for Survey (AOSS) ver.2.11 a obliczenia

parametrów kątowych pracy kamery zostały wykonane w oprogramowaniu AERO Control.

Obliczenia elementów pracy kamery przeprowadzono w oparciu o dane ze stacji

referencyjnej WROC i stacji bazowej GPS usytuowanej na obiekcie.

## OBSERWACJE PUNKTÓW KAMERALNEGO ZAGĘSZCZENIA (WIĄŻĄCYCH)

Automatyczny pomiar współrzędnych tłowych punktów wiążących przeprowadzono na panchromatycznych zdjęciach za pomocą ImageStation Automatc Triangulation.

Na każdym zdjęciu pomierzono przynajmniej 3-4 punkty wiążące/przejsciowe na punkt Grubera. Nie stwierdzono obszarów ze słabymi wiązaniami, czyli nie było miejsc, gdzie oprogramowanie nie pomierzyło wystarczającej liczby punktów wiążących i przejściowych. Jedynie w okolicy większych obszarów wodnych i zalesionych manualnie poprawiono i domierzono parę punktów wiążących i przejściowych.

## WYRÓWNANIE I CHARAKTERYSTYKA DOKŁADNOŚCIOWA PROCESU WYRÓWNANIA

Aerotriangulację wykonano metodą niezależnych wiązek z uwzględnieniem środków rzutów i kątów:  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  pozyskanych w czasie lotu fotogrametrycznego.

Cały obszar wyrównano w jednym bloku.

Błąd średni obserwacji po wyrównaniu wyniósł 8,0  $\mu\text{m}$ .

Błąd średni kwadratowy wpasowania bloku w punkty osnowy :  $m_x = 0,190 \text{ m}$

$m_y = 0,244 \text{ m}$

$m_h = 0360 \text{ m}$

## SKANNING LASEROWY

### INFORMACJE OGÓLNE

Liczba lotów ..... 3

Data nalołów: ..... 5/02/2007; 5/03/2007

Tryb pomiaru: ..... pierwsze i ostatnie odbicie

Grid:..... 1 m

Rozdzielczość pionowa ..... 0,01 m

System współrzędnych: ..... 1992 / 2000, Kronsztad 86

Wysokość lotu ..... 850 m n.p.m.

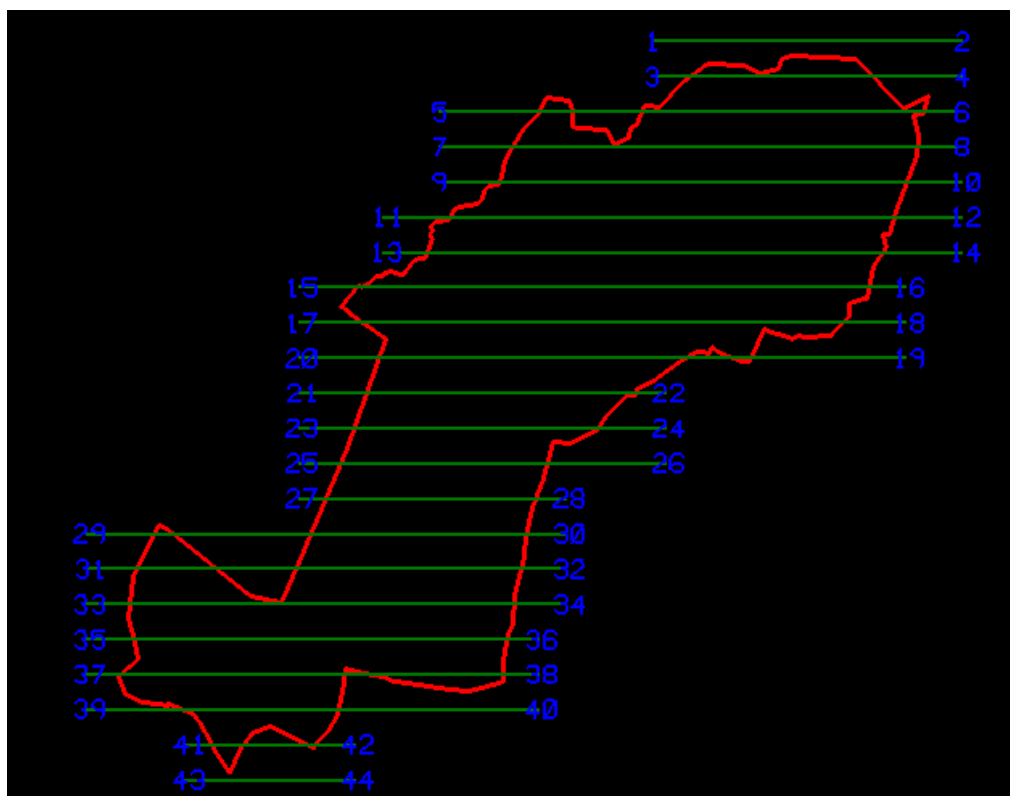
W czasie nalołu na obiekcie ustawiono dwie stacje referencyjne GPS. Przy opracowaniu danych dGPS wykorzystano oprogramowanie PosGPS v.4.3. Obliczeń dokonano w układzie WGS84 a następnie przetransformowano do układów „1992” i „2000”.

## OPRACOWANIE NUMERYCZNEGO MODELU TERENU I NUMERYCZNEGO MODELU POKRYCIA TERENU.

Współrzędne punktów „chmury punktów” x,y,z liczone były na podstawie danych z systemu INS i pojedynczych pomiarów laserowych odległości. Punkty rejestrowano w siatce 0,5 x 0,5 m a następnie wykonano resampling do siatki 1m x 1m.

Model Numeryczny Powierzchni zawiera informacje o wszystkich zarejestrowanych odbiciach niezależnie od rodzaju powierzchni (teren, roślinność, budynki itp.). Na modelu mogą występować pola martwe w miejscach gdzie promień lasera nie odbił się od powierzchni jak np. wody, szklane połacie dachów, dymy kominów itp. Model Powierzchni został oczyszczony z „szumów” poprzez filtrację chmury punktów oprogramowaniem DTM Master i SCOPE ++ Firmy INPHO.

Numeryczny Model Terenu opracowano na podstawie NMP filtrując chmurę punktów z odbić od obiektów usytuowanych na terenie takich jak roślinność, budynki itp.



Ryc. III.37. Powykonawczy plan nalotu przy wykonywaniu zdjęć lotniczych