



Informatyczny System Osłony Kraju  
przed nadzwyczajnymi zagrożeniami

# Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO





# **Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR**



Warszawa 2015

**Redakcja:**

dr hab. inż. Piotr Wężyk

**Redakcja techniczna:**

mgr inż. Edyta Stojek – ProGea Consulting

**Kierownik projektu po stronie Wykonawcy:**

mgr Mateusz Maślanka – ProGea Consulting

**Koncepcja publikacji i konsultacje merytoryczne GUGiK:**

mgr Jerzy Zieliński – Dyrektor Departamentu Geodezji, Kartografii i Systemów Informacji Geograficznej

mgr inż. Piotr Woźniak – kierownik projektu ISOK po stronie GUGiK

mgr inż. Adam Andrzejewski

mgr inż. Marzena Kukiela

mgr inż. Edyta Kierys-Kukla

mgr inż. Małgorzata Kaczmarczyk-Koza

mgr Anna Marcinkowska

mgr inż. Anna Uziembło

mgr Piotr Walas

Grzegorz Margasiński

**Projekt okładki:**

mgr Regina Wojtyłko

**Kompozycja na okładce:**

ProGea Consulting (źródło danych: GUGiK)

**Skład i łamanie:**

mgr Regina Wojtyłko

Copyright © Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa 2015  
Wszelkie prawa zastrzeżone

ISBN 978-83-254-2100-7

**Zespół redakcyjny:**

ProGea Consulting

ul. Pachorńskiego 9, 31-223 Kraków

Wydanie 2

Nakład: 180 egz.

# Spis treści

Słowo wstępne .....	9
Słownik pojęć.....	10
<b>1. Podstawowe informacje o projekcie ISOK .....</b>	<b>12</b>
1.1. Projekt ISOK – geneza i cel realizacji.....	12
1.2. Uwarunkowania formalno-prawne projektu ISOK.....	14
1.3. Podmioty odpowiedzialne za realizację projektu ISOK – konsorcjum.....	15
1.4. Harmonogram i zadania realizowane w projekcie ISOK .....	17
1.5. Korzyści płynące z realizacji projektu ISOK.....	20
<b>2. Zadania GUGiK realizowane w ramach projektu ISOK .....</b>	<b>22</b>
2.1. Rola GUGiK w projekcie ISOK.....	22
2.2. Pozyskanie danych wysokościowych w technologii lotniczego skanowania laserowego	23
2.2.1. Obszar opracowania.....	23
2.2.2. Organizacja prac .....	24
2.2.3. Parametry pozyskiwanych chmur punktów ALS w ramach projektu ISOK .....	30
2.2.4. Opis produktu 1 i 2 – dane pomiarowe LiDAR.....	34
2.2.5. Opis produktu 3 – numeryczny model terenu.....	36
2.2.6. Opis produktu 4 i 5 – numeryczny model pokrycia terenu.....	37
2.2.7. Opis produktu 6 – cyfrowe zdjęcia lotnicze .....	37
2.2.8. Opis Raportu dostawy .....	38
2.2.9. Opis metadanych Bloku LiDAR.....	38
2.3. Opracowanie cyfrowej ortofotomapy .....	43
2.3.1. Obszar opracowania.....	43
2.3.2. Organizacja pozyskania i opracowania cyfrowej ortofotomapy.....	44
2.3.3. Technologia wytworzenia i parametry cyfrowej ortofotomapy .....	46
2.3.4. Opis metadanych Bloku ORTO.....	49
2.4. Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k).....	52
2.5. System Zarządzania NMT .....	54
2.6. Zasady udostępniania produktów fotogrametrycznych .....	56
<b>3. Lotnicze skanowanie laserowe – podstawy teoretyczne.....</b>	<b>59</b>
3.1. Zasada działania i uwarunkowania sprzętowe systemu ALS.....	59
3.1.1. Zasada działania.....	59
3.1.2. Architektura systemu .....	60
3.1.3. Realizacja misji fotolotniczej. System zarządzania lotem.....	61
3.1.4. Specyfika danych systemu ALS .....	62
3.1.5. Optyczny układ skanujący.....	64

3.2.	Typowe parametry użytkowe systemów ALS .....	65
3.3.	Skaner batymetryczny .....	68
3.4.	Penetracja szaty roślinnej. Skanowanie pełną długością fali .....	70
3.4.1.	Penetracja szaty roślinnej.....	70
3.4.2.	Analiza pełnego kształtu fali sygnału powracającego.....	71
3.5.	Technologia „wielokrotnych impulsów laserowych w powietrzu” .....	75
3.6.	Dobór parametrów lotu i pracy systemu ALS dla osiągnięcia zadanej gęstości chmury punktów .....	77
3.7.	Blokowe wyrównanie szeregów ALS .....	80
3.8.	Klasyfikacja chmury punktów ALS.....	84
3.8.1.	Zasady klasyfikacji chmury punktów ALS.....	84
3.8.2.	Procedury automatycznej klasyfikacji punktów.....	86
3.8.3.	Klasyfikacja punktów leżących na gruncie .....	87
3.8.4.	Klasyfikacja roślinności oraz budynków .....	89
3.8.5.	Pozostałe klasy w chmurze punktów ALS.....	90
3.8.6.	Sposoby manualnej klasyfikacji punktów.....	92
3.8.7.	Wspomaganie procesu klasyfikacji chmury punktów na obszarach zurbanizowanych przy wykorzystaniu skanerów typu <i>full-waveform</i> .....	93
3.9.	Nadawanie atrybutów koloru chmurze punktów LiDAR.....	97
3.10.	Standardy i formaty wymiany danych LiDAR .....	98
3.10.1.	LAS (ASPRS).....	98
3.10.2.	ASCII .....	101
3.10.3.	LAZ (rapidlasso GmbH).....	102
3.10.4.	MG4 (LizardTech) .....	103
3.10.5.	zLAS (Esri) .....	103
3.10.6.	SHP (Esri).....	104
3.11.	Ocena technologii ALS oraz podstawowych produktów pochodnych.....	105
3.11.1.	Dokładność skanowania lotniczego.....	107
3.11.2.	Zalety i ograniczenia lotniczego skanowania laserowego.....	107
<b>4.</b>	<b>Numeryczne modele wysokościowe i produkty pochodne .....</b>	<b>110</b>
4.1.	Numeryczny model terenu .....	110
4.1.1.	Definicja i sposoby organizacji danych w NMT.....	110
4.1.2.	Źródłowe dane wysokościowe.....	112
4.1.3.	Modelowanie linii krawędziowych .....	115
4.1.4.	Dokładność NMT .....	118
4.1.5.	Standardy i formaty wymiany danych.....	120
4.2.	Numeryczny model pokrycia terenu .....	124
4.2.1.	Definicja i sposoby organizacji danych w NMPT .....	124
4.2.2.	Źródłowe dane wysokościowe.....	125
4.2.3.	Dokładność NMPT .....	126
4.2.4.	Standardy i formaty wymiany danych.....	126
4.3.	Inne numeryczne modele wysokościowe.....	127
4.4.	Inne produkty pochodne.....	129
<b>5.</b>	<b>Kontrola jakości danych referencyjnych.....</b>	<b>132</b>
5.1.	Organizacja kontroli produktów LiDAR w projekcie ISOK.....	132
5.2.	Kontrola jakościowa danych pomiarowych ALS.....	134
5.2.1.	Kontrola kompletności danych ALS .....	134

5.2.2. Kontrola gęstości danych ALS.....	135
5.2.3. Kontrola równomierności gęstości danych ALS.....	136
5.2.4. Kontrola georeferencji względnej Bloku LiDAR.....	137
5.2.5. Kontrola bezwzględnej georeferencji Bloku LiDAR.....	139
5.2.6. Kontrola styków Bloków LiDAR.....	141
5.2.7. Kontrola jakości klasyfikacji chmury punktów ALS.....	142
5.2.8. Kontrola nadania atrybutów RGB.....	144
5.3. Kontrola numerycznego modelu terenu (NMT).....	146
5.4. Kontrola numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT).....	150
5.5. Kontrola dokumentacji.....	151
5.6. Kontrola cyfrowej ortofotomapy lotniczej.....	152
<b>6. Wykorzystanie danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego.....</b>	<b>158</b>
6.1. Wykorzystanie danych wysokościowych opracowanych w projekcie ISOK.....	158
6.2. Opracowanie map zagrożenia i ryzyka powodziowego.....	161
6.2.1. Informacja o podstawie prawnej.....	161
6.2.2. Opis modeli stosowanych w procesie tworzenia MZP i MRP.....	162
6.2.3. ALS jako źródło danych wejściowych do modelowania 1D.....	165
6.2.4. Generowanie stref zagrożenia na podstawie wyników modeli hydrodynamicznych.....	166
6.2.5. Podsumowanie.....	167
6.3. Monitorowanie ruchów masowych (osuwiska, spływy, zerwy).....	168
6.3.1. Badania prowadzone w Polsce.....	168
6.3.2. Dane wykorzystywane w badaniach oraz metody ich opracowania.....	168
6.3.3. Podsumowanie.....	172
6.4. Badania geologiczne i geomorfologiczne.....	172
6.4.1. Dane ALS wykorzystywane w badaniach.....	172
6.4.2. Metody opracowania danych ALS.....	174
6.4.3. Podsumowanie.....	177
6.5. Modelowanie erozji wodnej gleb z zastosowaniem NMT generowanego z chmury punktów ALS.....	178
6.5.1. Model (R)USLE.....	178
6.5.2. Podsumowanie.....	180
6.6. Analizy zmian brzegu morskiego.....	182
6.6.1. Charakterystyka obszaru badań.....	182
6.6.2. Wykorzystywane technologie oraz metody badań.....	182
6.6.3. Podsumowanie.....	184
6.7. Opracowanie map akustycznych.....	187
6.7.1. Mapa akustyczna.....	187
6.7.2. Dane przestrzenne niezbędne przy opracowaniu mapy akustycznej.....	188
6.7.3. Wizualizacja treści map akustycznych.....	188
6.7.4. Potencjalne możliwości wykorzystania danych ALS w opracowaniu map akustycznych.....	189
6.7.5. Podsumowanie.....	190
6.8. Potencjał danych ALS w badaniach archeologicznych.....	192
6.8.1. Początki wykorzystania danych ALS w archeologii.....	192
6.8.2. Pozyskiwanie danych i klasyfikacji chmury punktów ALS dla celów archeologicznych.....	193

6.8.3. Wizualizacja danych ALS i ich interpretacja.....	195
6.8.4. Zakresy wykorzystania danych ALS w archeologii .....	197
6.8.5. Podsumowanie .....	199
6.9. Identyfikacja przeszkód dla ruchu lotniczego.....	201
6.9.1. Informacja o podstawie prawnej.....	201
6.9.2. Identyfikacja przeszkód ruchu lotniczego w oparciu o dane ALS .....	202
6.9.3. Podsumowanie .....	207
6.10. Projektowanie nowych szlaków turystycznych oraz identyfikacja potencjalnych zagrożeń na szlakach .....	208
6.10.1. Metodologia projektowania szlaków turystycznych .....	208
6.10.2. Ocena podstawowych parametrów topograficznych analizowanego terenu ....	209
6.10.3. Wizualizacja analiz przestrzennych 3D z użyciem ALS.....	211
6.10.4. Ocena i odkrywanie walorów historyczno-kulturowych .....	211
6.10.5. Identyfikacja potencjalnych zagrożeń na szlakach.....	212
6.10.6. Podsumowanie.....	214
6.11. Opracowywanie dokumentów planistycznych – plany zagospodarowania przestrzennego i decyzje o warunkach zabudowy.....	216
6.11.1. Informacja o podstawie prawnej .....	216
6.11.2. Dane ALS wykorzystywane w pracach planistycznych .....	217
6.11.3. Podsumowanie.....	222
6.12. Monitoring obszarów sieci Natura 2000.....	223
6.12.1. Obszary Natura 2000 – podstawy prawne .....	223
6.12.2. Monitoring obszarów Natura 2000 i ocena jakości siedlisk .....	224
6.12.3. Zakres zastosowania lotniczego skanowania laserowego w ochronie przyrody	225
6.12.4. Podsumowanie.....	228
6.13. Poprawa jakości danych gromadzonych w Centralnym Rejestrze Form Ochrony Przyrody za pomocą danych ALS.....	229
6.13.1. Informacja o podstawie prawnej .....	229
6.13.2. Poprawa jakości danych przy użyciu produktów technologii ALS.....	230
6.13.3. Podsumowanie.....	233
6.14. Analizy struktury 2D i 3D roślinności drzewiastej.....	234
6.14.1. Historia ALS w badaniach w leśnictwie .....	234
6.14.2. Charakterystyka ALS a specyfika środowiska leśnego.....	235
6.14.3. Inwentaryzacja zasobów leśnych a metody ALS.....	236
6.14.4. Cechy taksacyjne określane na podstawie analiz danych ALS.....	238
6.14.5. Podsumowanie.....	240
6.15. Wykorzystanie danych ALS w modelowaniu zagrożenia pożarowego lasów .....	241
6.15.1. Pożary lasów w Polsce .....	241
6.15.2. Modelowanie zagrożenia pożarowego w oparciu o dane ALS.....	242
6.15.3. Podsumowanie.....	244
6.16. Oceny Oddziaływania na Środowisko .....	244
6.16.1. Raporty Ocen Oddziaływania na Środowisko (OOS) dla przedsięwzięć .....	245
6.16.2. Strategiczne Oceny Oddziaływania na Środowisko (SOOS) .....	247
6.16.3. Przeglądy ekologiczne i analizy porealizacyjne .....	247
6.16.4. Podsumowanie.....	248
6.17. Wsparcie procesu klasyfikacji obrazów lotniczych i satelitarnych w zakresie map pokrycia i użytkowania terenu.....	248
6.17.1. Klasyfikacja obrazów teledetekcyjnych.....	248



6.17.2. Obiektowa analiza obrazu (OBIA).....	249
6.17.3. Wsparcie klasyfikacji OBIA danymi ALS .....	249
6.17.4. Podsumowanie.....	251
6.18. Generowanie prawdziwej ortofotomapy lotniczej na podstawie zdjęć lotniczych oraz NMPT .....	252
6.18.1. Ortofotomapa a prawdziwa ortofotomapa .....	252
6.18.2. Sposoby generowania prawdziwej ortofotomapy.....	254
6.18.3. Podsumowanie.....	257
6.19. Pomiary obiektów liniowych .....	258
6.19.1. Obszary zastosowań danych ALS .....	258
6.19.2. Stosowane gęstości chmur punktów ALS .....	261
6.19.3. Podsumowanie.....	262
6.20. Inwentaryzacja infrastruktury technicznej naziemnej – drogi.....	263
6.20.1. Informacja o podstawie prawnej.....	263
6.20.2. Inwentaryzacja dróg z w oparciu o dane ALS .....	264
6.20.3. Podsumowanie.....	268
6.21. Analizy wolumetryczne 3D .....	269
6.21.1. Wady i zalety technologii stosowanych do pomiaru objętości obiektów .....	269
6.21.2. Podsumowanie.....	276
6.22. Generowanie modeli 3D budynków .....	277
6.22.1. Dane wykorzystywane do tworzenia modeli 3D budynków .....	277
6.22.2. Poziomy szczegółowości budynków 3D .....	278
6.22.3. Wykorzystanie modeli 3D.....	283
6.22.4. Podsumowanie.....	286
6.23. Analiza potencjału energii promieniowania słonecznego .....	286
6.23.1. Metody obliczania potencjału energii promieniowania słonecznego.....	287
6.23.2. Zastosowanie analiz solarnych .....	289
6.23.3. Podsumowanie.....	290
<b>7. Oprogramowanie do przetwarzania i wizualizacji danych LiDAR oraz produktów pochodnych .....</b>	<b>291</b>
7.1. ArcGIS .....	291
7.2. CityEngine.....	292
7.3. CityPlanner .....	293
7.4. DTMaster .....	294
7.5. ENVI LiDAR.....	295
7.6. ERDAS IMAGINE .....	296
7.7. FugroViewer .....	297
7.8. FUSION .....	298
7.9. Geoverse™ .....	299
7.10. GeoMedia.....	300
7.11. GRASS GIS .....	301
7.12. LAsTools.....	303
7.13. LiDAR Online.....	304
7.14. LiMON Point Cloud Tools.....	305
7.15. LiS .....	306
7.16. LP360.....	307
7.17. MicroStation V8i .....	308

7.18. M LiDAR Viewer .....	309
7.19. OPALS.....	310
7.20. OpenTopography.....	311
7.21. Oracle.....	313
7.22. PostgreSQL.....	314
7.23. QGIS.....	314
7.24. SAGA.....	316
7.25. SCOP++ .....	317
7.26. Terrasolid.....	318
<b>8. Przyszłość technologii lotniczego skanowania laserowego .....</b>	<b>320</b>

## Słowo wstępne

Zaawansowany postęp technologii otwiera przed nami nowe kierunki rozwoju, ale także stawia wyzwania polegające na ciągłym doskonaleniu specjalistycznych kompetencji społeczeństwa. Administracja publiczna, wychodząc na przeciw tym wyzwaniom, zobowiązana jest wspierać implementację nowoczesnych i innowacyjnych technologii oraz osiągnięcie wysokiego poziomu ich wykorzystania przez obywateli.

Główny Urząd Geodezji i Kartografii poprzez realizację wielu projektów technicznych mających na celu pozyskanie, aktualizację, zapewnienie szerokiego dostępu i wykorzystanie informacji przestrzennej, w znacznym stopniu przyczynia się do wypełnienia tych zobowiązań.

Jednym ze wspomnianych projektów jest Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK) realizowany w ramach 7. osi priorytetowej „Społeczeństwo informacyjne – budowa elektronicznej administracji”, Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Zastosowanie w projekcie nowoczesnej technologii pozyskiwania danych, jaką jest lotnicze skanowanie laserowe (ang. ALS – *Airborne Laser Scanning*) oraz wysokich standardów jakości sprawia, iż potencjał wytworzonych na potrzeby realizacji projektu ISOK zbiorów danych wysokościowych jest skutecznie wykorzystywany w zadaniach realizowanych przez administrację, przedsiębiorców i obywateli, m.in. w obszarach szeroko pojętego bezpieczeństwa, gospodarki przestrzennej, ochrony środowiska, dziedzictwa kulturowego, turystyki, a także promocji i rozwoju miast oraz regionów.

W dążeniu do efektywnego wykorzystania dostępnych danych przestrzennych kluczowe staje się posiadanie wiedzy o procesie ich pozyskiwania, kontroli jakości, strukturze oraz dobrych praktykach ich zastosowania. W tym celu przygotowaliśmy dla Państwa m.in. niniejszą publikację, której zadaniem jest podniesienie cyfrowych kompetencji i świadomości w zakresie możliwości wykorzystania danych wysokościowych dostępnych dzięki realizacji projektu ISOK, w celu osiągnięcia jak największych korzyści w postaci podejmowania lepszych decyzji, usprawnienia codziennych czynności na stanowiskach pracy oraz optymalizacji złożonych procesów realizowanych w Państwa organizacjach.

Gorąco zachęcam do lektury, do czerpania korzyści z szerokich możliwości, jakie dają nowoczesne technologie pomiarowe oraz do dzielenia się wiedzą i doświadczeniem z zakresu efektywnego wykorzystywania danych przestrzennych.

*Kazimierz Bujakowski*

Warszawa, październik 2014 r.

Główny Geodeta Kraju

# Słownik pojęć

## **Blok LiDAR**

wyodrębniona jednostka produkcji (zwarty obszar), podlegająca jednolitemu wyrównaniu zawartych w nich danych LiDAR oraz opracowaniu produktów LiDAR, w jednym ciągu technologicznym. Na potrzeby realizacji zadań GUGiK w ramach projektu ISOK, zaprojektowany tak, aby pokrywać pełne arkusze „ćwiartek” sekcji map 1:10 000 w układzie współrzędnych PL-1992.

## **dane LiDAR**

dane wysokościowe pozyskane w technologii lotniczego skanowania laserowego.  
synonimy: dane ALS, dane pomiarowe ALS, chmura punktów LiDAR, chmura punktów ALS  
(ang. *LiDAR data, point cloud*)

## **ISOK**

projekt „Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami” realizowany w ramach 7. osi priorytetowej „Społeczeństwo informacyjne – budowa elektronicznej administracji” Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013, na podstawie umowy o dofinansowanie nr POIG.07.01.00-00-025/09-00 z dnia 30.07.2010 r.

## **fotogrametria i teledetekcja**

dziedzina nauki i techniki zajmująca się zdalnym pozyskiwaniem wiarygodnych informacji o obiektach fizycznych oraz ich otoczeniu w wyniku rejestracji, pomiaru i interpretacji ich zdjęć i obrazowań.

## **LiDAR**

akronim utworzony od wyrażenia ang. *Light Detection And Ranging*, utożsamiany ze skanowaniem laserowym. Skaner laserowy – system składający się z emitera światła spójnego oraz odbiornika światła odbitego, który pozwala określić odległość od obiektu. Wyróżniamy:

- lotnicze skanowanie laserowe (ang. *Airborne Laser Scanning*),
- naziemne statyczne skanowanie laserowe (ang. *Terrestrial Laser Scanning*),
- naziemne mobilne skanowanie laserowe (ang. *Mobile Laser Scanning*).

### **lotnicze skanowanie laserowe**

jedna z metod pozyskiwania informacji o terenie i pokryciu terenu. Ideę lotniczego skanowania laserowego sprowadza się do zasady laserowego pomiaru odległości z lecącego samolotu (lub śmigłowca czy statku powietrznego) do powierzchni terenu.

(ang. *Airborne Laser Scanning* – ALS)

### **numeryczny model pokrycia terenu (NMPT)**

cyfrowa reprezentacja rzeźby terenu oraz obiektów znajdujących się na niej (budynki, roślinność, inne zdefiniowane obiekty).

(ang. *Digital Surface Model* – DSM)

### **numeryczny model terenu (NMT)**

zbiór punktów reprezentujących wysokości topograficzne powierzchni terenu wraz z algorytmem interpolacyjnym pozwalającym na odtworzenie tej powierzchni w dowolnym miejscu. Algorytm interpolacyjny jest zasadniczą i nieodłączną częścią numerycznego modelu terenu, gdyż pozwala na określenie wartości wysokości (Z) dowolnego punktu na podstawie jego współrzędnych płaskich (X, Y). Numeryczne modele terenu, oprócz punktów wysokościowych, mogą zawierać również informacje geomorfologiczne.

(ang. *Digital Terrain Model* – DTM lub *Digital Elevation Model* – DEM)

### **ortofotomapa cyfrowa (ORTO)**

rastrowy, kartometryczny obraz terenu powstały w wyniku ortogonalnego przetworzenia zdjęć lotniczych lub scen satelitarnych.

(ang. *orthophotomap*, *orthophoto*, *ortho*)

### **produkty LiDAR**

dane pomiarowe wykonane w technologii lotniczego skanowania laserowego, wytworzone na ich podstawie numeryczny model terenu (NMT) i numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) oraz zdjęcia lotnicze opracowane w ramach projektu ISOK.

# 1. Podstawowe informacje o projekcie ISOK

mgr Mateusz Maślanka  
dr hab. inż. Piotr Węzyk

## 1.1. Projekt ISOK – geneza i cel realizacji

Zapewnienie obywatelom i gospodarce ochrony przed nadzwyczajnymi zagrożeniami, będącymi efektem dynamicznych zmian klimatycznych, jest bardzo ważne ze względu na coraz częstsze występowanie na obszarze Polski kataklizmów powodujących znaczne straty ekonomiczne i społeczne. Powódź z 1997 roku spowodowała ogromne zniszczenia materialne wynoszące około 12 mld zł, jednocześnie pociągając za sobą 55 ofiar śmiertelnych. Kolejna groźna powódź z 2010 roku spowodowała straty ekonomiczne rzędu 14 mld zł oraz pochłonęła 25 ofiar. W tym samym roku zanotowano również około 1300 osuwisk związanych z intensywnymi opadami deszczu.

Po powodzi w 1997 roku, w dorzeczu dwóch największych polskich rzek Wisły i Odry, rozpoczęto realizację projektu pod akronimem SMOK (System Monitoringu i Osłony Kraju). Jego celem, oprócz odbudowy podstawowej infrastruktury technicznej, która znacznie ucierpiała podczas powodzi, była szeroko pojęta osłona przeciwpowodziowa.

W ramach realizacji projektu SMOK, w latach 1999–2005, podjęto działania dotyczące:

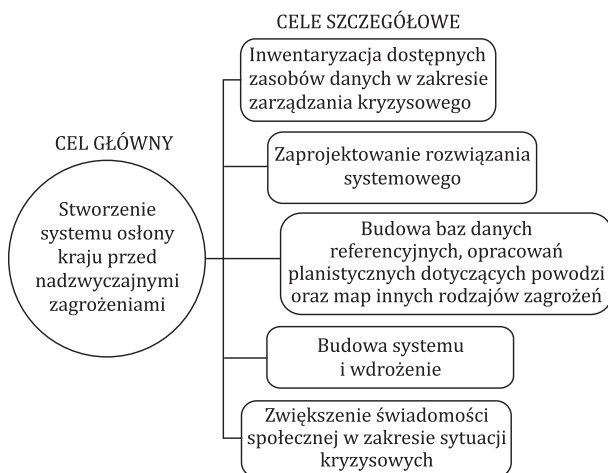
- planowania osłony przeciwpowodziowej w zlewni,
- monitorowania, prognozowania i ostrzegania,
- inwestycji w infrastrukturę przeciwpowodziową,
- prewencji i ograniczenia ryzyka powodzi.

Institutowi Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie (IMGW-PIB) powierzono szerokie działania związane z budową posterunków hydrologicznych i meteorologicznych umożliwiających automatyczne monitorowanie atmosfery i hydrosfery. Uruchomione posterunki monitorowania i przekazywania danych hydrometeorologicznych pozwoliły na wykonywanie w krótkim czasie wielu analiz prowadzących do generowania produktów, które mogłyby być wykorzystane

przez szerokie grono potencjalnych odbiorców. Głównym wnioskiem z realizacji projektu SMOK była potrzeba budowy systemu osłony umożliwiającego kompleksową analizę środowiska geograficznego w naszym kraju. Kluczowe stało się również podjęcie bardziej intensywnych działań zwiększających świadomość społeczeństwa w zakresie ryzyka występowania naturalnych zagrożeń. Przez zwiększenie świadomości ryzyka w społeczeństwie rozumie się przygotowanie dokumentów planistycznych przedstawiających obszary zagrożone zalaniem, zabezpieczenie budynków od ewentualnych zjawisk powodziowych już na etapie ich planowania, a także podnoszenie świadomości mieszkańców zagrożonych terenów przez edukację w zakresie postępowania w czasie powodzi.

Powyższe uwarunkowania skłoniły IMGW-PIB do przygotowania większego projektu, obejmującego swoim zasięgiem terytorium całej Polski. Projekt przyjął nazwę: **Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami** (akronim: **ISOK**). Założenia projektu po raz pierwszy zostały przedstawione w kontekście Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG) w ramach 7. osi priorytetowej POIG (nabór wniosków: 15.04–15.05.2009). W trzecim kwartale 2009 roku została opracowana pierwsza wersja studium wykonalności, która określiła projekt na wyższym poziomie szczegółowości. Umowę o dofinansowanie projektu pomiędzy Władzą Wdrażającą Programy Europejskie a Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytutem Badawczym, podpisano w dniu 30 lipca 2010 roku.

Podstawowym celem projektu ISOK jest stworzenie jednolitego systemu informacyjnego służącego osłonie społeczeństwa, gospodarki oraz środowiska naturalnego przed nadzwyczajnymi zagrożeniami, do których zaliczono m.in. powodzie. W założeniach projektu ISOK cel ten można osiągnąć przez realizację poszczególnych celów szczegółowych (ryc. 1.1).



Ryc. 1.1. Cel główny i cele szczegółowe projektu ISOK

Realizacja projektu ISOK w swoim założeniu ma służyć zwiększeniu bezpieczeństwa obywateli oraz ograniczeniu strat spowodowanych występowaniem zagrożeń naturalnych, technologicznych i synergicznych, w tym w szczególności powodzi, co ma zostać osiągnięte przez wyselekcjonowanie obszarów zagrożonych powodzią, opracowanie dla nich map zagrożenia i ryzyka powodziowego, a w konsekwencji ograniczanie ekspansji gospodarczej na tych obszarach.

## 1.2. Uwarunkowania formalno-prawne projektu ISOK

Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka (POIG) finansowany ze środków UE zakłada zwiększenie dostępności zasobów informacyjnych administracji publicznej oraz usług publicznych w formie cyfrowej dla obywateli i przedsiębiorców. Program ten zakłada wspieranie budowy systemów elektronicznej administracji. System zarządzający nadzwyczajnymi zagrożeniami budowany w ramach ISOK bezpośrednio wpisuje się w cele POIG w ramach 7. osi priorytetowej: „Społeczeństwo informacyjne – Budowa elektronicznej administracji”.

Projekt ISOK spójny jest również z celami Planu Informatyzacji Państwa na lata 2007–2010 oraz celami Strategii rozwoju społeczeństwa informacyjnego w Polsce do roku 2013, które mówią m.in. o przekształceniu Polski w państwo nowoczesne, przyjazne dla obywateli i podmiotów gospodarczych, a więc w państwo posiadające efektywną administrację publiczną, szeroko oddziałyującą na podniesienie poczucia bezpieczeństwa przez wykorzystanie zestandaryzowanych i interoperacyjnych rozwiązań informatycznych.

Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami wpisuje się w ramy Dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (Dz.U. L 288 z 06.11.2007, str. 27–34), zwanej Dyrektywą Powodziową. Głównym celem dyrektywy jest: „(...) ograniczanie negatywnych konsekwencji dla zdrowia ludzkiego, środowiska, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej, związanych z powodzią na terytorium Wspólnoty”. Harmonogram prowadzonego projektu uwzględnił wymagania Dyrektywy Powodziowej, jakie nałożono na państwa członkowskie Unii Europejskiej związane z opracowaniem map zagrożenia i ryzyka powodziowego. Dyrektywa Powodziowa zobowiązuje Polskę do przygotowania planów zarządzania ryzykiem powodziowym do końca 2015 roku (tab. 1.1), a produkty projektu ISOK stanowią podstawę do ich przygotowania.

Wszelkie produkty wytworzone w projekcie ISOK zgodne są również z wymogami Dyrektywy 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiającej infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) (Dz.U. L 108 z 25.04.2007, str. 1–14), w zakresie:

- przechowywania, utrzymywania oraz udostępniania danych z projektu ISOK,
- łączenia w jednolity sposób danych projektu ISOK z danymi pochodzącymi z różnych źródeł, z możliwością szerokiego ich wykorzystania,
- wspólnego korzystania z danych pochodzących z projektu ISOK przez wielu odbiorców z użyciem różnych aplikacji,



- łatwości wyszukania danych pochodzących z projektu ISOK oraz informacji o możliwościach ich przydatności i warunkach wykorzystania,
- możliwości korzystania z danych opracowanych w projekcie ISOK przez inne instytucje, które tych danych nie gromadziły.

Tabela 1.1. Harmonogram procesu wdrażania Dyrektywy Powodziowej w Polsce

Poszczególne etapy wdrażania dyrektywy	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Dostosowanie prawa krajowego do wymogów dyrektywy									
Wyznaczenie właściwych organów oraz obszarów dorzecza									
Opracowanie wstępnej oceny ryzyka powodziowego									
Opracowanie map zagrożenia powodziowego									
Opracowanie map ryzyka powodziowego									
Opracowanie planów zarządzania ryzykiem powodziowym									

### 1.3. Podmioty odpowiedzialne za realizację projektu ISOK – konsorcjum

Złożoność merytoryczna oraz organizacyjna projektu była powodem powołania konsorcjum złożonego z 5 instytucji, których kompetencje leżą w szerokim zakresie problematyki ISOK. W skład konsorcjum weszły: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy oraz Rządowe Centrum Bezpieczeństwa.

**Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB)** był wnioskodawcą projektu Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami. Głównymi zadaniami realizowanymi przez IMGW-PIB jest zaspokaja-

nie potrzeb społeczeństwa, gospodarki narodowej i obronności Państwa w zakresie jego działania, tj.:

- meteorologii,
- hydrologii,
- oceanologii,
- gospodarki i inżynierii wodnej,
- jakości zasobów wodnych,
- gospodarki ściekowej,
- utylizacji osadów ściekowych.

IMGW-PIB wykonuje prace badawcze, rozwojowe, wdrożeniowe, a także jest odpowiedzialny za prace z zakresu utrzymania sieci obserwacyjno-pomiarowej, dzięki której prowadzi obserwację i pomiary oraz opracowuje prognozy i ekspertyzy. Do września 2012 roku IMGW-PIB pełnił rolę lidera konsorcjum ISOK, którą obecnie sprawuje Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej (KZGW).

**Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej (KZGW)** realizuje zadania związane z gospodarowaniem wodami, a w szczególności związane z zarządzaniem wodami oraz korzystaniem z wód w Polsce, wdrażając Dyrektywę 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiającą ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Ramowa Dyrektywa Wodna; Dz.U. L 327 z dnia 22.12.2000, str. 1–73 z późn. zm.).

Działania, jakie według ustawy z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (Dz.U. z 2001 r. Nr 115 poz. 1229 z późn. zm.), realizowane są przez KZGW, to m.in.:

- opracowanie programu wodno-środowiskowego,
- planowanie gospodarowania wodami na obszarach dorzeczy,
- planowanie ochrony przeciwpowodziowej oraz przeciwdziałanie skutkom suszy,
- programowanie, planowanie i nadzorowanie realizacji zadań związanych z utrzymaniem wód lub urządzeń wodnych oraz inwestycji w gospodarce wodnej.

KZGW odpowiedzialny jest również za wdrożenie w Polsce Dyrektywy Powodziowej, w tym za opracowanie wstępnej oceny ryzyka powodziowego oraz map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, czyli jednych z produktów projektu ISOK. KZGW ma także obowiązek wykonania planów zarządzania ryzykiem powodziowym.

**Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK)** realizuje politykę państwa z zakresu geodezji i kartografii, m.in.: prowadzi centralny zasób geodezyjny i kartograficzny, inicjuje prace badawczo-rozwojowe dotyczące rozwoju i wykorzystania technik geoinformatycznych (m.in. w zakresie spraw obronnych, zarządzania kryzysowego) oraz utrzymuje centralny punkt dostępu do informacji przestrzennej, tj. geoportal danych przestrzennych. GUGiK w projekcie ISOK jest odpowiedzialny za budowę referencyjnych baz danych przestrzennych.

**Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy (IŁ-PIB)** realizuje badania naukowe i prace rozwojowe w dziedzinie telekomunikacji i teleinformatyki, w tym z zakresu planowania i projektowania sieci telekomunikacyjnych, systemów radiokomuni-

kacyjnych, szerokopasmowych sieci dostępowych i sieci optycznych, bezpieczeństwa sieci i usług, zarządzania sieciami, projektowania metod komputerowych dla wspomagania decyzji i metod zarządzania wiedzą, kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń, sieci i systemów, oprogramowania dla telekomunikacji i technik informacyjnych, optoelektroniki, rozwoju systemów łączności specjalnej, szczególnie ważnej dla bezpieczeństwa państwa. W projekcie ISOK zadania powierzone IŁ-PIB dotyczą identyfikacji krajowych systemów informacyjnych zawierających różnego typu bazy danych, które pozwalają na zbieranie, przetwarzanie, dystrybucję i przechowywanie danych o nadzwyczajnych zagrożeniach.

**Rządowe Centrum Bezpieczeństwa (RCB)** jest instytucją działającą na podstawie ustawy z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. z 2007 r. Nr 89 poz. 590 z późn. zm.). Zadania RCB polegają na zapewnianiu obiegu informacji między krajowymi i zagranicznymi organami i strukturami zarządzania kryzysowego.

Projekt ISOK finansowany jest z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka kwotą w wysokości 204 mln zł. Budżet państwa finansuje budowę systemu w kwocie 36 mln zł, a Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej przeznaczył na ten cel 60 mln zł. Łącznie wartość projektu wynosi 300 mln zł.

## 1.4. Harmonogram i zadania realizowane w projekcie ISOK

Pierwsze zadanie związane z opracowaniem studium wykonalności projektu rozpoczęło się w 2009 roku. Umowę o dofinansowanie projektu podpisano dnia 30 lipca 2010 roku. Prace projektowe podzielono na zadania realizowane przez poszczególnych członków konsorcjum projektu (tab. 1.2). Zakończenie realizacji projektu zaplanowano na dzień 31 marca 2015 roku, a etap utrzymania rezultatów na kolejne 5 lat.

Tabela 1.2. Zadania realizowane przez członków konsorcjum projektu ISOK (U – udział w przygotowaniu przetargu, konsultacje oraz opiniowanie przez Konsorcjantów, R – realizacja zadania lub części zadania przez Konsorcjanta)

WBS	Nazwa zadania	IMGW-PIB	GUGiK	KZGW	IŁ-PIB
1	Zebranie geodezyjnych informacji przestrzennych oraz wykonanie map zagrożenia powodziowego i ryzyka powodziowego	R	R	U	-
1.1	Zebranie informacji przestrzennych dla BDOT, NMT oraz ortofotomapy	-	R	-	-

Tabela 1.2. cd.

WBS	Nazwa zadania	IMGW-PIB	GUGiK	KZGW	IŁ-PIB
1.1.1	Budowa numerycznego modelu rzeźby i pokrycia terenu (NMT)	-	R	-	-
1.1.2	Budowa i wdrożenie systemu do zarządzania NMT	-	R	-	-
1.1.3	Baza Danych Obiektów Topograficznych	-	R	-	-
1.1.4	Ortofotomapa	-	R	-	-
1.2	Pomiar korytowych przekrojów poprzecznych („mokrych”)	R	-	U	-
1.3	Wykonanie wstępnej oceny ryzyka powodziowego (WORP), map zagrożenia powodziowego (MZP) i ryzyka powodziowego (MRP)	R	-	U	-
1.3.1	Wstępna ocena ryzyka powodziowego (WORP)	R	-	U	-
1.3.1.1	Zebranie materiałów, ich analiza i identyfikacja braków	R	-	-	-
1.3.1.2	Opracowanie metodyki MZP i MRP dla obszarów zagrożonych od strony morza oraz dla Żuław Wiślanych	R	-	-	-
1.3.1.3	Wykonanie WORP przez CMP	R	-	-	-
1.3.1.4	Współpraca merytoryczna KZGW podczas wykonania WORP	-	-	R	-
1.3.2	Przygotowanie danych hydrologicznych w zakresie niezbędnym do modelowania hydraulicznego	R	-	-	-
1.3.3	Wykonanie obliczeń modelowania hydraulicznego z opracowaniem wyników	R	-	-	-
1.3.4	Wykonanie map zagrożenia powodziowego	R	-	-	-
1.3.5	Wykonanie map ryzyka powodziowego w tym pozyskanie danych i szacunek prawdopodobnych strat	R	-	-	-
1.3.6	Doposażenie CMP na potrzeby opracowania WORP, MRP i MZP	R	-	-	-
1.3.7	Mapy zagrożeń i ryzyka powodziowego – wdrożenie w systemie ISOK	R	-	-	-
1.4	Mapy zagrożeń meteorologicznych	R	-	-	-
1.5	Mapy innych zagrożeń	R	-	-	-

Tabela 1.2. cd.

WBS	Nazwa zadania	IMGW-PIB	GUGiK	KZGW	IŁ-PIB
1.6	Mapa Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP)	R	-	U	-
1.7	Konsultacje specjalistyczne związane z opracowywaniem map	R	-	U	-
1.7.1	Konsultacje z zakresu modelowania i wykonywania map zagrożenia i ryzyka	R	-	-	-
1.7.2	Konsultacje z zakresu hydrologii	R	-	-	-
1.7.3	Konsultacje z zakresu geodezji	R	-	-	-
1.7.4	Inne konsultacje specjalistyczne	R	-	U	-
2	Identyfikacja krajowych systemów informacyjnych	-	-	-	R
3	Projekt, budowa i wdrożenie systemu ISOK	U	U	R	-
4	Przygotowanie sieci teleinformatycznej na potrzeby ISOK	R	-	U	-
5	Dostosowanie infrastruktury na potrzeby serwerowni IMGW oraz KZGW/RZGW	R	-	R	-
5.1	Serwerownia IMGW	R	-	U	-
5.2	Serwerownia KZGW/RZGW	-	-	R	-
6	Doposażenie KZGW i RZGW	-	-	R	-
7	Promocja	U	-	R	-
8	Szkolenia	R	-	R	-
8.1	Szkolenia specjalistyczne dla KZGW i RZGW	-	-	R	-
8.2	Szkolenia specjalistyczne dla CMP	R	-	-	-
8.3	E-learning	U	-	R	-
9	Zarządzanie Projektem	R	R	R	R
9.1	Opracowanie Studiów Wykonalności	R	-	-	-
9.2	Zarządzanie bieżące	R	R	R	R

Opis głównych produktów projektu ISOK można znaleźć na stronie internetowej: [www.isok.gov.pl](http://www.isok.gov.pl).

dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW

## 1.5. Korzyści płynące z realizacji projektu ISOK

Stworzenie systemu, który wspiera zarządzanie ryzykiem powodziowym jest bardzo ważnym krokiem do zmniejszenia strat spowodowanych tym zagrożeniem. Działania zmierzające do zwiększenia świadomości występowania zagrożeń naturalnych, przygotowania i przekazywania informacji o niebezpieczeństwie pozwolą na osłonę społeczeństwa, zmniejszając tym samym liczbę ofiar tych zagrożeń.

Realizacja projektu ISOK przez analityczne wyznaczenie obszarów zagrożonych powodzią na podstawie modelowania umożliwi specjalistom od planowania przestrzennego ograniczać zabudowę na obszarach szczególnie zagrożonych powodzią w Polsce, co przyczyni się w perspektywie wieloletniej do zmniejszenia strat w zakresie gospodarki i wzmocni ochronę życia ludzi.

Projekt ISOK umożliwił także Polsce wywiązanie się z obowiązków nałożonych przez Dyrektywę Powodziową, w ramach której wszystkie państwa członkowskie Unii Europejskiej do końca 2013 roku miały wykonać mapy zagrożenia oraz ryzyka powodziowego. Mapy te już dziś są dostępne przez Hydroportal ([www.mapy.isok.gov.pl](http://www.mapy.isok.gov.pl)).

Bogactwo referencyjnych danych przestrzennych pozyskanych w czasie realizacji projektu przynosi wymierne korzyści związane z rozwojem społeczno-gospodarczym Polski. Istnieje szeroki wachlarz zastosowania danych udostępnianych przez GUGiK – od tych związanych z bezpieczeństwem wewnętrznym, geodezją, planowaniem przestrzennym, przez wykorzystanie ich w gospodarce zasobami leśnymi, ochronie dziedzictwa kulturowego, po zastosowania związane z ochroną środowiska czy turystyką. Od początku 2012 roku do końca sierpnia 2014 roku z danych pozyskanych w technologii lotniczego skanowania laserowego oraz wytworzonych na ich podstawie NMT i NMPT skorzystało już ponad 630 instytucji administracji publicznej, firm prywatnych i osób fizycznych.

Niewątpliwie realizacja pierwszego w Europie kompleksowego systemu osłony obywateli przed naturalnymi zagrożeniami w ramach ISOK wpisuje Polskę na listę krajów skutecznie realizujących politykę zwiększania bezpieczeństwa obywateli.

## Literatura

Biała Księga Komisji Europejskiej dotyczącej adaptacji do zmian klimatu i komunikatu dotyczącego przeciwdziałania skutkom susz.

Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dz.U. L 327, 22.12.2000, str. 1–73 z późn. zm.).

Dyrektywa 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) (Dz.U. L 108 z 25.04.2007, str. 1–14).

Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (Dz.U. L 288 z 06.11.2007, str. 27–34).

Malinger A., 2012. *Wprowadzenie do opracowania map zagrożenia powodziowego i ryzyka powodziowego*. Konferencja ISOK-KZGW, Warszawa.

Studium wykonalności projektu „Informatyczny system osłony kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami”.

Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (Dz.U. z 2001 r. Nr 115 poz. 1229 z późn. zm.).

Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. z 2007 r. Nr 89 poz. 590 z późn. zm.).

## Strony internetowe

[www.7poig.mac.gov.pl](http://www.7poig.mac.gov.pl)

[www.gugik.gov.pl](http://www.gugik.gov.pl)

[www.imgw.pl](http://www.imgw.pl)

[www.isok.gov.pl](http://www.isok.gov.pl)

[www.itl.waw.pl](http://www.itl.waw.pl)

[www.kzgw.gov.pl](http://www.kzgw.gov.pl)

[www.rcb.gov.pl](http://www.rcb.gov.pl)

dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW  
 mgr inż. Edyta Stojek  
 dr inż. Urszula Cisło-Lesicka

## 2. Zadania GUGiK realizowane w ramach projektu ISOK

### 2.1. Rola GUGiK w projekcie ISOK

Głównym celem projektu w zakresie realizowanym przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii jest budowa referencyjnych, zharmonizowanych i interoperacyjnych baz danych przestrzennych.

W ramach projektu ISOK, GUGiK jest odpowiedzialny za realizację następujących zadań (ryc. 2.1):

1. Pozyskanie danych wysokościowych w technologii lotniczego skanowania laserowego i wytworzenie na ich podstawie: numerycznego modelu terenu oraz numerycznego modelu pokrycia terenu.
2. Budowa Systemu Zarządzania NMT (SZNMT).
3. Opracowanie cyfrowej ortofotomapy.
4. Opracowanie elementów Bazy Danych Obiektów Topograficznych.

Zadanie	2010		2011				2012				2013				2014				2015	
	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	
1																				
2																				
3																				
4																				

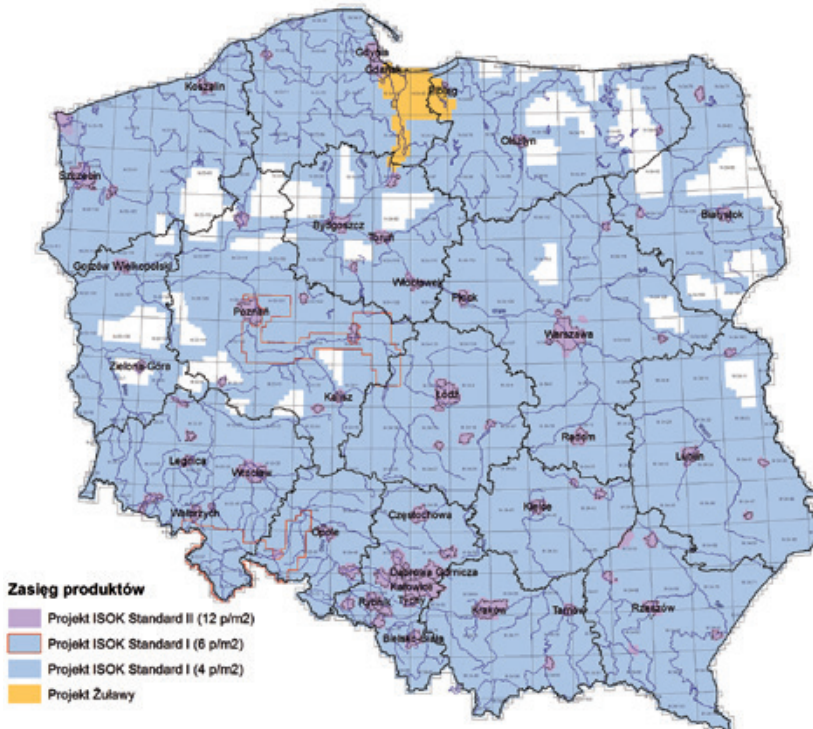
Ryc. 2.1. Harmonogram realizacji zadań GUGiK w projekcie ISOK



## 2.2. Pozyskanie danych wysokościowych w technologii lotniczego skanowania laserowego

### 2.2.1. Obszar opracowania

Na etapie przygotowania projektu wytypowano obszary, dla których konieczne było opracowanie danych wysokościowych w technologii lotniczego skanowania laserowego na potrzeby wykonania modelowania hydraulicznego oraz opracowania map ryzyka i zagrożenia powodziowego. Obszar ten obejmował początkowo powierzchnię 191 tys. km<sup>2</sup>, jednak w toku realizacji projektu rozszerzony został obszar objęty tworzeniem map zagrożenia i ryzyka powodziowego, co zrodziło konieczność pozyskania większej ilości przestrzennych danych wysokościowych. W efekcie, całkowita powierzchnia opracowania danych w technologii lotniczego skanowania laserowego w ramach projektu ISOK obejmuje ok. 289 000 km<sup>2</sup>, co stanowi 92% powierzchni kraju (ryc. 2.2).

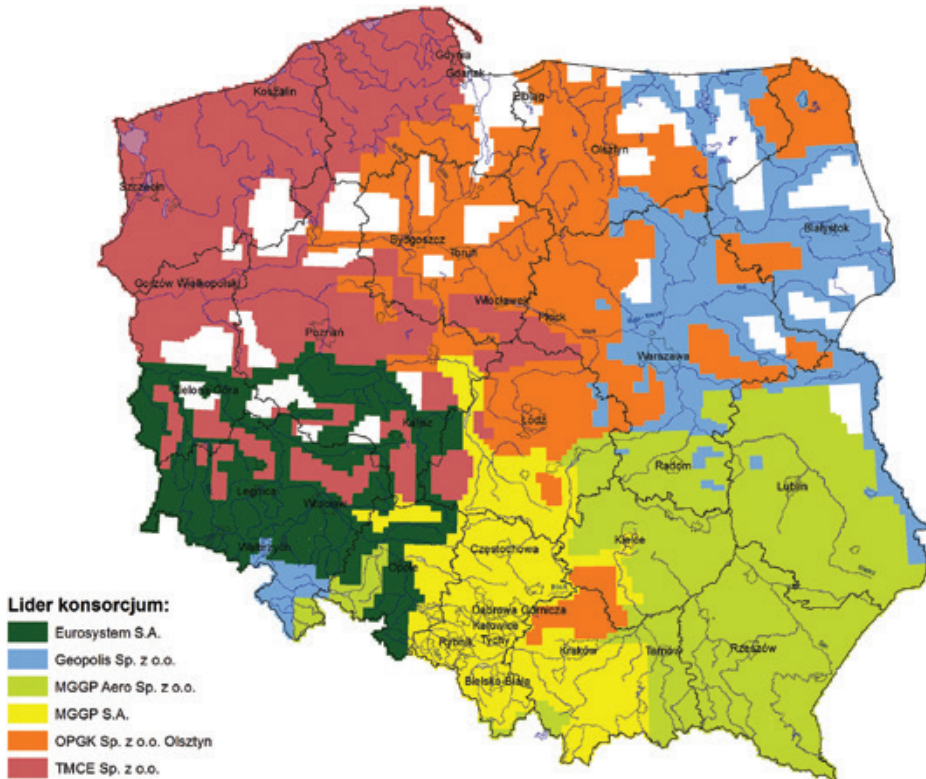


Ryc. 2.2. Zasięg lotniczego skanowania laserowego i opracowania produktów pochodnych w ramach projektu ISOK z podziałem na standardy opracowania oraz projektu „Żuławny”, w którym dane ALS opracowywano w oparciu o specyfikację techniczną przyjętą w projekcie ISOK

## 2.2.2. Organizacja prac

W celu pozyskania danych wysokościowych na przestrzeni lat 2010–2014 w GUGiK przeprowadzono 23 postępowania przetargowe i podpisano z wykonawcami prac (ryc. 2.3) łącznie 33 umowy.

W wyniku przeprowadzonej w 2010 roku analizy dostępnego potencjału wykonawczego w Europie, możliwości technologicznych oraz z uwzględnieniem ograniczeń czasowych realizacji projektu (pierwotnie planowany termin zakończenia projektu to 31.12.2013 r.) obszar opracowania zaplanowany do wykonania w pierwszej kolejności (137 325 km<sup>2</sup>) podzielono na 6 części. W celu wyłonienia wykonawców realizacji prac przeprowadzono postępowanie przetargowe w trybie przetargu ograniczonego (nr ZP/BO-4-2500-47/GI-2500-88/2010/7/2011) na „Wykonanie lotniczego skaningu laserowego (LiDAR) oraz opracowanie produktów pochodnych”. W tabeli 2.1 zaprezentowano wyłonionych w przedmiotowym postępowaniu wykonawców oraz wartości zawartych w lutym 2011 roku umów.



Ryc. 2.3. Obszar lotniczego skanowania laserowego projektu ISOK z uwzględnieniem informacji o liderach konsorcjów

Tabela 2.1. Zestawienie wykonawców wyłonionych w 2011 roku w ramach zamówienia podstawowego na „Wykonanie lotniczego skaningu laserowego (LiDAR) oraz opracowanie produktów pochodnych”

<b>Część nr</b>	<b>Wykonawca</b>	<b>Wartość umowy</b>
I	Tukaj Mapping Central Europe Sp. z o.o. (Polska) – lider konsorcjum, BSF Swissphoto GmbH (Niemcy) – członek konsorcjum, NTT Systems S.A. (Polska) – członek konsorcjum.	7 444 631,30 zł
II	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn, Polska) – lider konsorcjum, Estereofoto Geo-Engenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum.	9 271 987,80 zł
III	Geopolis Sp. z o.o. (Włocławek, Polska) – lider konsorcjum, Kucera International Inc. (Ohio, USA) – członek konsorcjum.	7 479 417,64 zł
IV	EUROSYSTEM S.A. (Chorzów, Polska) – lider konsorcjum, Fugro Aerial Mapping BV (Holandia) – członek konsorcjum.	11 581 704,00 zł
V	MGGP S.A. (Tarnów, Polska) – lider konsorcjum, Geodetski Inženiring Maribor d.o.o. (Maribor, Słowenia) – członek konsorcjum.	6 644 615,32 zł
VI	MGGP Aero Sp. z o.o. (Tarnów, Polska).	8 227 936,20 zł
	<b>ŁĄCZNIE</b>	<b>50 650 292,26 zł</b>

W sierpniu 2011 roku (części Ia–VIa) oraz w sierpniu 2012 roku (części Ib–VIb) uruchomiono zamówienia uzupełniające do zamówienia podstawowego nr ZP/BO-4-2500-47/GI-2500-88/2010/7/2011, odrębnie dla każdej części zamówienia. W toku tych postępowań zawarto 12 dodatkowych umów z wykonawcami realizującymi zamówienie podstawowe na opracowanie danych wysokościowych dla powierzchni 67 290 km<sup>2</sup>. Zestawienie przedmiotowych umów zaprezentowano w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Zestawienie wykonawców wyłonionych w 2011 i 2012 roku w ramach zamówień uzupełniających na „Wykonanie lotniczego skaningu laserowego (LiDAR) oraz opracowanie produktów pochodnych”

<b>Część nr</b>	<b>Wykonawca</b>	<b>Wartość umowy</b>
Ia	Tukaj Mapping Central Europe Sp. z o.o. (Polska) – lider konsorcjum, BSF Swissphoto GmbH (Niemcy) – członek konsorcjum, NTT Systems S.A. (Polska) – członek konsorcjum.	3 119 726,00 zł
IIa	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn, Polska) – lider konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum.	3 500 607,00 zł

Tabela 2.2 cd.

Część nr	Wykonawca	Wartość umowy
IIIa	Geopolis Sp. z o.o. (Włocławek, Polska) – lider konsorcjum, Kucera International Inc. (Ohio, USA) – członek konsorcjum.	2 961 126,00 zł
IVa	EUROSYSTEM S.A. (Chorzów, Polska) – lider konsorcjum, Fugro Aerial Mapping BV (Holandia) – członek konsorcjum.	3 813 600,00 zł
Va	MGGP S.A. (Tarnów, Polska) – lider konsorcjum, Geodetski Inženiring Maribor d.o.o. (Maribor, Słowenia) – członek konsorcjum.	2 825 592,00 zł
VIa	MGGP Aero Sp. z o.o. (Tarnów, Polska).	3 070 984,00 zł
Ib	Tukaj Mapping Central Europe Sp. z o.o. (Polska) – lider konsorcjum, BSF Swissphoto GmbH (Niemcy) – członek konsorcjum, NTT Systems S.A. (Polska) – członek konsorcjum.	1 069 804,80 zł
IIb	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn, Polska) – lider konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum.	359 470,00 zł
IIIb	Geopolis Sp. z o.o. (Włocławek, Polska) – lider konsorcjum, Kucera International Inc. (Ohio, USA) – członek konsorcjum.	956 758,00 zł
IVb	EUROSYSTEM S.A. (Chorzów, Polska) – lider konsorcjum, Fugro Aerial Mapping BV (Holandia) – członek konsorcjum.	352 800,00 zł
Vb	MGGP S.A. (Tarnów, Polska).	1 363 455,00 zł
VIb	MGGP Aero Sp. z o.o. (Tarnów, Polska).	789 321,00 zł
	<b>ŁĄCZNIE</b>	<b>24 183 243,80 zł</b>

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości opracowywanych danych wysokościowych, GUGiK w 2011 roku wyłonił w postępowaniu przetargowym o nazwie „Usługa weryfikacji danych i koordynacji działań w ramach projektu ISOK” (nr ZP/BO-4-2500-20/GI-2500-10/2011) Inspektora Nadzoru i Kontroli (INiK) – podmiot, którego zadaniem było wspomaganie organizacyjne Zamawiającego w trakcie trwania prac oraz przede wszystkim kontrola jakości produktów dostarczanych przez wykonawców opracowujących dane wysokościowe i cyfrową ortofotomapę, o której mowa w rozdziale 2.4. Dane wyłonionego wykonawcy (INiK) zaprezentowano w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Dane wykonawcy (INiK) wyłonionego w 2011 roku w ramach postępowania na „Usługę weryfikacji danych i koordynacji działań w ramach projektu ISOK”

Wykonawca	Wartość umowy
Przedsiębiorstwo Geodezyjno – Informatyczne COMPASS S.A. – lider konsorcjum, MEIXNER Vermessung ZT GmbH – członek konsorcjum, Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno – Kartograficzne OPEGIEKA Sp. z o.o. – członek konsorcjum, ProGea Consulting Piotr Wężyk – członek konsorcjum.	4 342 463,34 zł (w zakresie kontroli danych wysokościowych)

W roku 2012 przeprowadzono dodatkowo zamówienie uzupełniające do zamówienia podstawowego nr ZP/BO-4-2500-20/GI-2500-10/2011, w ramach którego zapewniono kontrolę danych opracowanych przez wykonawców w ramach części oznaczonych literą „b”. Umowę zawarto z konsorcjum INiK na kwotę 488 541,24 zł brutto.

W trakcie dalszej realizacji projektu rozszerzono obszar opracowania danych wysokościowych o kolejne 50 303 km<sup>2</sup>.

W związku z powyższym w roku 2013 przeprowadzono niezależne postępowanie przetargowe w trybie przetargu nieograniczonego (nr ZP/BO-4-2500-20/GI-2500-32/2013) na „Pozyskanie danych wysokościowych w technologii LiDAR oraz opracowanie produktów pochodnych” w celu wyłonienia wykonawców prac dla kolejnych obszarów kraju. Biorąc pod uwagę zdobyte przy realizacji wcześniejszych prac doświadczenia, ponownie podjęto decyzję o podziale obszaru na 6 części. Zestawienie wyłonionych wykonawców oraz wartość zawartych umów prezentuje tabela nr 2.4.

Tabela 2.4. Zestawienie wykonawców wyłonionych w 2013 roku w ramach zamówienia podstawowego na „Pozyskanie danych wysokościowych w technologii LiDAR oraz opracowanie produktów pochodnych”

Część nr	Wykonawca	Wartość umowy
I	Tukaj Mapping Central Europe Sp. z o.o. (Polska).	2 319 484,80 zł
II	Tukaj Mapping Central Europe Sp. z o.o. (Polska).	2 109 499,20 zł
III	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn, Polska) – lider konsorcjum, TERRAMAP Sp. z o.o. – członek konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum, Argus Geo System s.r.o. – członek konsorcjum.	2 176 978,95 zł
IV	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn, Polska) – lider konsorcjum, TERRAMAP Sp. z o.o. – członek konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum, Argus Geo System s.r.o. – członek konsorcjum.	2 139 186,98 zł

Tabela 2.3 cd.

<b>Część nr</b>	<b>Wykonawca</b>	<b>Wartość umowy</b>
V	MGGP Aero Sp. z o.o. (Tarnów, Polska) – lider konsorcjum, MGGP S.A. – członek konsorcjum.	1 893 831,00 zł
VI	MGGP Aero Sp. z o.o. (Tarnów, Polska) – lider konsorcjum, MGGP S.A. – członek konsorcjum.	2 274 272,46 zł
	<b>ŁĄCZNIE</b>	<b>12 913 253,39 zł</b>

Na początku 2014 roku w ramach zamówień uzupełniających do zamówienia podstawowego nr ZP/BO-4-2500-20/GI-2500-32/2013 obszar opracowania danych wysokościowych poszerzono o dodatkowe 33 888 km<sup>2</sup>. Prace na tym obszarze zlecono na początku 2014 roku. Zestawienie zawartych umów zawiera tabela 2.5.

Tabela 2.5. Zestawienie wykonawców wyłonionych w 2014 roku w ramach zamówień uzupełniających na „Pozyskanie danych wysokościowych w technologii LiDAR oraz opracowanie produktów pochodnych”

<b>Część nr</b>	<b>Wykonawca</b>	<b>Wartość umowy</b>
Ia	Tukaj Mapping Central Europe Sp. z o.o. (Polska).	1 730 352,00 zł
Ila	Tukaj Mapping Central Europe Sp. z o.o. (Polska).	1 573 800,00 zł
IIIa	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn, Polska) – lider konsorcjum, TERRA-MAP Sp. z o.o. – członek konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum, Argus Geo System s.r.o. – członek konsorcjum.	1 543 310,70 zł
IVa	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn, Polska) – lider konsorcjum, TERRA-MAP Sp. z o.o. – członek konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum, Argus Geo System s.r.o. – członek konsorcjum.	1 817 442,00 zł
V	MGGP Aero Sp. z o.o. (Tarnów, Polska) – lider konsorcjum, MGGP S.A. – członek konsorcjum.	1 699 068,96 zł
VIa	MGGP Aero Sp. z o.o. (Tarnów, Polska) – lider konsorcjum, MGGP S.A. – członek konsorcjum.	1 446 917,46 zł
	<b>ŁĄCZNIE</b>	<b>9 810 891,12 zł</b>

Podobnie jak w przypadku prac zleczanych w latach 2011–2012, GUGiK w 2013 roku przeprowadził postępowanie w trybie przetargu nieograniczonego (nr ZP/BO-4-2500-50/GI-2500-71/2013) na „Usługę weryfikacji danych w ramach projektu ISOK – INiK3” w celu wyłonienia niezależnego podmiotu odpowiedzialnego za kontrolę jakości danych wysokościowych opracowanych przez wykonawców na mocy umów zawartych w 2013 i 2014 roku. Dane wyłonionego wykonawcy (INiK3) zaprezentowano w tabeli 2.6.

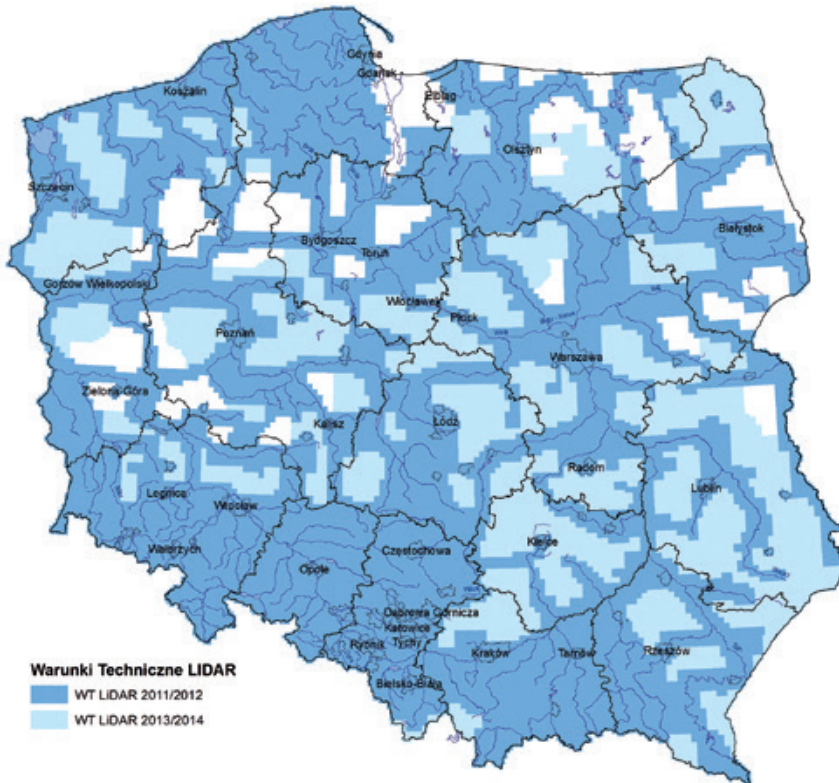
Tabela 2.6. Dane wykonawcy wyłonionego w 2013 roku w ramach postępowania na „Usługę weryfikacji danych w ramach projektu ISOK – INiK3”

Wykonawca	Wartość umowy
GEOSAT Kraków Sp. z o.o. – lider konsorcjum, Meixner Vermessung ZT GmbH – członek konsorcjum, Piotr Myszka Gocompetence – członek konsorcjum.	1 752 395,76 zł

Ze względu na wprowadzenie zmian w warunkach technicznych na opracowanie produktów LiDAR i w celu ich lepszej identyfikacji opisy elementów warunków technicznych dotyczących umów określonych w tabelach 2.1 i 2.2 będą identyfikowane pojęciem **WT LiDAR 2011/2012** (łącznie powierzchnia opracowania to 204 615 km<sup>2</sup>), natomiast opisy elementów warunków technicznych dotyczących umów określonych w tabelach 2.4 i 2.5 poniżej będą identyfikowane pojęciem **WT LiDAR 2013/2014** (łącznie powierzchnia opracowania to 84 198 km<sup>2</sup>). Identyczna sytuacja dotyczy warunków technicznych na kontrolę jakości – opisy elementów warunków technicznych dotyczących umów określonych w tabeli 2.3 będą identyfikowane pojęciem **WT INiK 2011/2012**, natomiast opisy elementów warunków technicznych odnośnie do umów określonych w tabeli 2.6 będą identyfikowane pojęciem **WT INiK 2013/2014** (ryc. 2.4).

Łącznie w latach 2011–2014 GUGiK w ramach realizacji projektu ISOK zlecił opracowanie danych wysokościowych w technologii lotniczego skanowania laserowego dla powierzchni 288 806 km<sup>2\*</sup> o łącznej wartości 97 557 680,57 zł oraz kontrolę jakości tych danych o łącznej kwocie 6 583 400,34 zł.

\* Zasięg opracowania poszczególnych umów może podlegać zmianom m.in z uwagi na ograniczenia możliwości wykorzystania przestrzeni powietrznej w obszarach przygranicznych.



Ryc. 2.4. Podział obszaru opracowania produktów LiDAR w zależności od Warunków Technicznych LiDAR

### 2.2.3. Parametry pozyskiwanych chmur punktów ALS w ramach projektu ISOK

O jakości i kosztach danych wysokościowych opracowywanych z wykorzystaniem technologii lotniczego skanowania laserowego decydują parametry samego skanowania. Ocenia się, że aż 50–60% kosztów wytworzenia produktów przypada na koszty prac lotniczych, a jednym z kluczowych elementów jest gęstość chmury punktów ALS.

Biorąc pod uwagę główny cel projektu, przyjęto dwa standardy różniące się gęstością chmury punktów ALS (tab. 2.7):

- Standard I o gęstości 4 punkty/m<sup>2</sup> (oraz 6 pkt/m<sup>2</sup> dla obszarów priorytetowych).
- Standard II o gęstości 12 punktów/m<sup>2</sup> – miasta powyżej 50 000 mieszkańców.



Tabela 2.7. Podstawowe parametry lotniczego skanowania laserowego w projekcie ISOK

Parametr	Standard I		Standard II
	WT LiDAR 2011/2012	WT LiDAR 2013/2014	WT LiDAR 2011/2012
Gęstość chmury punktów ALS	$\geq 4 \text{ pkt/m}^2$ $\geq 6 \text{ pkt/m}^2$ dla obszarów priorytetowych „Nysa Kłodzka” i „Warta” (ryc. 2.2)	$\geq 4 \text{ pkt/m}^2$	$\geq 12 \text{ pkt/m}^2$ (dwa niezależne wzajemnie prostopadłe kierunki nalotu każdy o gęstości $\geq 6 \text{ pkt/m}^2$ )
Równomierność gęstości punktów laserowych	stosunek średniej odległości punktów laserowych w kierunku lotu i w kierunku poprzecznym zawiera się w przedziale od 1:1,5 do 1,5:1		
Kąt poprzeczny skanowania	$\leq \pm 25^\circ$ $\leq \pm 30^\circ$ – dla Bloku LiDAR, w którym obszar leśny pokrywa mniej niż 30% powierzchni	$\leq \pm 25^\circ$	$\leq \pm 25^\circ$
Pokrycie poprzeczne między szeregami	$\geq 20\%$	$\geq 20\%$ $< 30\%$	$\geq 20\%$
Planowana minimalna szerokość pasa pokrycia poprzecznego	$\geq 100 \text{ m}$		
Maksymalna długość pojedynczego szeregu	$\leq 40 \text{ km}$	–	$\leq 40 \text{ km}$
Szeregi poprzeczne w Bloku LiDAR	minimum 2 szeregi poprzeczne	–	–
Szerokość marginesu wychodzącego poza granice obszaru Bloku LiDAR	nie mniej niż 200 m poza granice równoległe do kierunku lotu  nie mniej niż 400 m poza granice prostopadłe do kierunku lotu	nie mniej niż 200 m poza granice Bloku LiDAR	nie mniej niż 200 m poza granice równoległe do kierunku lotu  nie mniej niż 400 m poza granice prostopadłe do kierunku lotu
Średnica plamki promienia laserowego na powierzchni terenu	$\leq 0,50 \text{ m}$		

Tabela 2.7 cd.

Parametr	Standard I		Standard II
	WT LiDAR 2011/2012	WT LiDAR 2013/2014	WT LiDAR 2011/2012
Dokładność wysokościowa (błąd średni) chmury punktów ALS po wyrównaniu	≤ 0,15 m		≤ 0,10 m
Dokładność sytuacyjna (błąd średni) chmury punktów ALS po wyrównaniu	≤ 0,50 m		≤ 0,40 m
Rejestracja wielokrotnych odbić (ech)	minimum 4 odbicia		
Rejestracja intensywności odbitych sygnałów	tak		
Rejestracja skanowanego pasa terenu kamerą cyfrową	synchroniczna ze skanowaniem dopuszcza się rejestrację fotograficzną w innym terminie niż lotnicze skanowanie laserowe		synchroniczna ze skanowaniem
Termin wykonania lotniczego skanowania laserowego	od połowy października do końca kwietnia	od 20 października do 25 kwietnia	cały rok

Przyjęta podstawowa gęstość dla Standardu I równa 4 punkty/m<sup>2</sup> oznacza średnią odległość punktów równą 0,5 m. Jest to gęstość zapewniająca generowanie precyzyjnego NMT i jest ona przydatna do odwzorowania małych naturalnych form terenowych oraz ważnych form antropogenicznych, takich jak wały przeciwpowodziowe, skarpy, nasypy drogowe i inne tego typu struktury kluczowe z punktu widzenia głównego celu projektu ISOK. W podobnych projektach realizowanych w Europie przyjmuje się różne parametry gęstości. W Szwecji i Finlandii na poziomie 0,5–1,0 punkt/m<sup>2</sup>, parametry gęstości zbliżone do przyjętych w projekcie ISOK występują w niektórych projektach realizowanych w Niemczech, a w Holandii wymagana gęstość wynosi 10 punktów/m<sup>2</sup>. Wymaganie minimalnej gęstości w Standardzie II wynosi 12 punktów/m<sup>2</sup> i należy zwrócić uwagę na wymóg przeprowadzenia w tym standardzie dwóch niezależnych nalotów o prostopadłym układzie szeregów, każdy z gęstością 6 punktów/m<sup>2</sup>. Powyższe wymaganie pozwala osiągnąć poniższe cele:

- uzyskanie większej dokładności numerycznego modelu terenu, a co za tym idzie prawdopodobnych zasięgów powodzi w obszarach miejskich (obszary szczególnie istotne z uwagi na wysoką gęstość zaludnienia i sieci infrastruktury),
- zmniejszenie „martwych pól” (tj. obszarów pozbawionych danych ze względu na przeszkody, głównie wysokie budynki),
- wyeliminowanie ewentualnej konieczności użycia helikoptera zamiast samolotu jako platformy.

Wprowadzony do warunków technicznych parametr równomierności gęstości punktów laserowych zapewnia równomierne pokrycie danymi całego obszaru skanowania. Uniemożliwia on dostarczenie danych, w których występowałyby miejsca o znacznie zwiększonej i obniżonej gęstości skanowania.

Kąt poprzeczny skanowania ma związek m.in. z penetracją roślinności, co ma znaczenie w obszarze zalesionym. Przy zbyt dużym kącie skanowania zmniejsza się penetracja (promienie lasera padają w korony drzew z boku). W warunkach technicznych przyjęto maksymalną wartość kąta odchylenia od pionu  $\pm 25^\circ$ , z możliwością zwiększenia do  $\pm 30^\circ$  dla Bloku LiDAR, w którym obszar leśny pokrywa mniej niż 30% powierzchni (WT LiDAR 2011/2012).

Obszar opracowania pokrywa się równoległymi szeregami, z niewielkim pokryciem wzajemnym, tworzącymi tzw. Blok LiDAR. W dokumencie WT LiDAR 2011/2012 wymaga się, aby to pokrycie było większe niż 20%, a dodatkowo w celu kontroli szeregi były spięte dwoma szeregami poprzecznymi. To umożliwia wzajemne dopasowanie szeregów w procesie tzw. georeferencji Bloku LiDAR. Maksymalna długość szeregów w WT LiDAR 2011/2012 jest ograniczona do 40 km (ze względu na propagację błędów inercyjnego systemu nawigacyjnego – INS).

Równocześnie wymaga się, aby z chmurą punktów został dostarczony margines danych opracowanego Bloku LiDAR, który umożliwia kontrolę położenia chmury punktów względem sąsiednich Bloków LiDAR.

Promień laserowy ma pewną rozbieżność, stąd wymaga się aby średnica plamki promienia lasera na powierzchni była mniejsza niż 0,50 m.

Rejestracja minimum 4 odbić wiązki promienia lasera podczas skanowania umożliwia rejestrację struktury pionowej obiektów. Pozyskanie odbić pośrednich pomiędzy pierwszym a ostatnim odbiciem znacząco zwiększa informacje o pionowej budowie roślinności (drzewostanów).

Wraz ze skanerem współdziałać może kamera cyfrowa z kolorową matrycą CCD. Kamera ta jest mocowana na platformie skanującej, co oznacza, że w tym samym czasie wyznaczane są elementy orientacji zewnętrznej (ang. EO) zdjęć (położenie i kąty obrotu w momencie fotografowania).

Zdjęcia cyfrowe pozyskiwane w ramach zamówienia wspomagają interpretację chmury punktów ALS na etapie opracowania oraz stanowią źródło informacji do nadania każdemu punktowi chmury ALS atrybutów RGB, przez co możliwe jest stworzenie i zwizualizowanie tzw. kolorowej chmury punktów. Umowy zawarte przez GUGiK zabraniają pozyskiwania zdjęć cyfrowych przez wykonawców na obszarach wyłączonych z rejestracji fotograficznej, w związku z powyższym niektóre ramki danych LiDAR mogą

nie mieć nadanych atrybutów RGB (WT LiDAR 2011/2012) lub przypisane punktom wartości RGB mogą pochodzić ze zdjęć lotniczych udostępnionych na ten cel z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (WT LiDAR 2013/2014).

Bardzo istotną jest pora roku rejestracji danych ALS. Ma to związek z obecnością liści na drzewach liściastych i wynikającą z tego ograniczoną penetracją promieni laserowych. Z tego powodu preferuje się porę jesienno-zimowo-wiosenną, choć ogranicza to wydajność prac lotniczych. Dla lasów iglastych penetracja niewiele zależy od pory roku, jedyną możliwością przeciwdziałania zmniejszonej penetracji jest ograniczenie kąta skanowania, z czego skorzystano przy specyfikacji warunków technicznych. Tabela 2.7 zawiera m.in. informacje dotyczące przyjętego okresu rejestracji danych LiDAR oraz parametru maksymalnego kąta poprzecznego skanowania w projekcie ISOK. Ponadto zapisy warunków technicznych zabraniają wykonywania nalotów przy obecności pokrywy śnieżnej oraz w porach podniesionego poziomu wody w rzekach ponad stan brzegowy i przy czasowym występowaniu oczek wodnych na terenach bezodpływowych po silnych ulewach.

Komentując parametry skanowania, można zauważyć, że stanowią one świadomy i wyważony kompromis między oczekiwaną jakością danych, a szansą ich pozyskania w przyjętych ramach czasowych i dostępnym potencjałem wykonawczym. Ogólnie, przyjęte parametry są przeniesieniem na rynek polski „dobrych praktyk” podobnych rozwiązań stosowanych na świecie.

#### 2.2.4. Opis produktu 1 i 2 – dane pomiarowe LiDAR

Produkt 1 to chmura punktów LiDAR w Standardzie I, z georeferencją, po wyrównaniu i po klasyfikacji, z atrybutami RGB, podzielona na moduły archiwizacji. Produkt 2 posiada te same cechy, ale jest wykonany w Standardzie II. Oba produkty należą do grupy asortymentowej NMT-01 według rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571).

Wynikowa chmura punktów LiDAR opracowywana jest w układzie współrzędnych płaskich prostokątnych oznaczonym symbolem PL-1992 oraz układzie wysokościowym oznaczonym symbolem PL-KRON86-NH, o których mowa w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Dz.U. z 2012 r. poz. 1247).

Produkty zapisywane są w plikach w formacie LAS wersja 1.2, POINT DATA RECORD FORMAT 3, co oznacza, że dla każdego punktu przypisane są następujące informacje:

- współrzędne przestrzenne punktu,
- intensywność odbicia,
- kolejne odbicie (echo) danego impulsu laserowego,
- łączna liczba odbić (ech) danego impulsu laserowego,
- kierunek skanowania,
- znaczenie punktu skrajnego w linii,

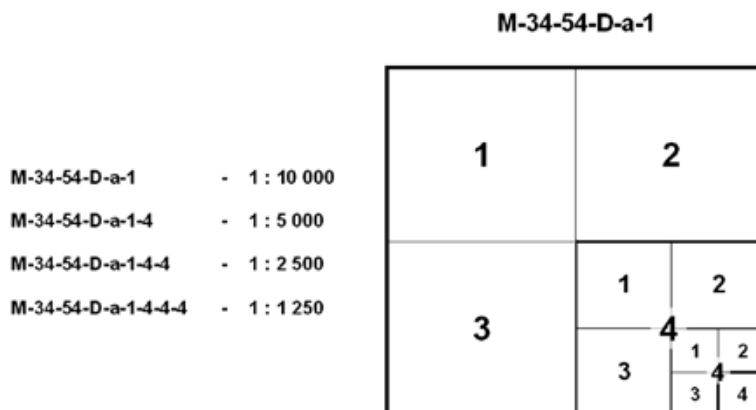
- przynależność danego punktu do klasy,
- kąt, z jakim skaner wyemitował impuls,
- przynależność danego punktu do szeregu,
- czas pozyskania danego punktu,
- składowe RGB punktu.

Klasyfikacja punktów lotniczego skanowania laserowego polega na przypisaniu ich do poszczególnych klas obiektów, do których przynależą (tj. od których się odbiły). W projekcie ISOK wyróżnia się następujące klasy (w nawiasie podano odpowiednik klasy według specyfikacji ASPRS formatu LAS, [www.asprs.org](http://www.asprs.org)):

- 1) punkty przetwarzane, ale niesklasyfikowane (klasa 0 – *Created, never classified*), do której zalicza się m.in.: różne środki lokomocji, takie jak samochody na parkingach, linie przemysłowe napowietrzne, skupiska obiektów nietrwałych i inne obiekty tymczasowe;
- 2) punkty leżące na gruncie (klasa 2 – *Ground*), w skład której wchodzi m.in.: pagórki, skarpy, grunt, wydmy oraz wszelkie inne obiekty stanowiące integralną część środowiska;
- 3) punkty reprezentujące niską roślinność (klasa 3 – *Low Vegetation*), tj. w zakresie 0–0,40 m;
- 4) punkty reprezentujące średnią roślinność (klasa 4 – *Medium Vegetation*), tj. w zakresie 0,40–2,00 m;
- 5) punkty reprezentujące wysoką roślinność (klasa 5 – *High Vegetation*), tj. w zakresie powyżej 2,00 m;
- 6) punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie (klasa 6 – *Building*), w tym m.in.: budynki, budowle, mosty, zapory, jazy oraz inne obiekty inżynierskie;
- 7) szum (klasa 7 – *Low Point*), do której zalicza się punkty omyłkowe oraz piki wysokościowe;
- 8) punkty reprezentujące obszary pod wodami (klasa 9 – *Water*), jak np.: ciekły wodne, jeziora, stawy i inne zbiorniki wodne;
- 9) punkty z obszarów wielokrotnego pokrycia (klasa 12 – *Overlap Points*).

Klasyfikację wykonuje się na wstępnym etapie automatycznie, a następnie podaje dodatkowej manualnej edycji. To właśnie ta czasochłonna edycja stanowi o dokładności klasyfikacji i kosztach opracowania. Należy nadmienić, iż obiekty mogą być przypisane do różnych klas, jeśli oszacowana dokładność klasyfikacji mieści się w granicach błędu.

Modułem archiwizacji w przypadku produktu 2 (Standard II) jest obszar ograniczony granicami „1/64” części sekcji mapy 1:10 000 w układzie współrzędnych PL-1992 (obszar ok. 0,5 × 0,5 km). W przypadku produktu 1 (Standard I), modułem archiwizacji jest obszar ograniczony granicami „1/16” części sekcji mapy 1:10 000 w układzie współrzędnych PL-1992 (obszar ok. 1 × 1 km). Zasadę podziału przedstawia poniższa rycina (ryc. 2.5). Średnia wielkość pojedynczych plików w Standardzie II wynosi ok. 200 MB, a w Standardzie I ok. 400 MB.

**Zasady podziału danych na arkusze i system ich oznaczeń:**

Ryc. 2.5. Zasady podziału danych na moduły archiwizacji  
(źródło: [www.codgik.gov.pl/index.php/zasob/numeryczne-dane-wysokosciowe.html](http://www.codgik.gov.pl/index.php/zasob/numeryczne-dane-wysokosciowe.html))

### 2.2.5. Opis produktu 3 – numeryczny model terenu

Produkt 3 to numeryczny model terenu w strukturze GRID o wymiarach oczka siatki równych 1 m, wytworzony z danych LiDAR, jednolity dla obszarów Standardu I i Standardu II, podzielony na moduły archiwizacji. Numeryczny model terenu zaliczany jest do grupy asortymentowej NMT-1 według rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571).

Numeryczny model terenu generowany jest z punktów LiDAR zaklasyfikowanych do punktów leżących na gruncie oraz reprezentujących obszary pod wodami. Oznacza to wysokie wymagania do procesu odfiltrowania punktów nienależących do terenu, tj. budynków, roślinności i innych obiektów „wystających” ponad teren. Powstałe w ten sposób obszary pozbawione danych w chmurze punktów przed generowaniem wynikowego NMT „wypełnia” się poprzez odpowiednią interpolację.

Numeryczny model terenu opracowywany jest w układzie współrzędnych oznaczonym symbolem PL-1992 oraz układzie wysokościowym oznaczonym symbolem PL-KRON86-NH, o których mowa w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Dz.U. z 2012 r. poz. 1247).

Numeryczny model terenu jest zapisywany w dwóch formatach: ASCII (wykaz współrzędnych XYZ) i Esri GRID (format ArcInfo ASCII GRID).

Numeryczny model terenu tworzy ciągłą obszarowo bazę danych składającą się z poszczególnych modułów archiwizacji. Modułem archiwizacji jest obszar ograniczony granicami „1/4” części sekcji mapy 1:10 000 w układzie współrzędnych PL-1992 (ryc. 2.5).

### 2.2.6. Opis produktu 4 i 5 – numeryczny model pokrycia terenu

Produkt 4 to numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) generowany z danych LiDAR Standardu I w strukturze GRID o wymiarze oczka siatki 1,0 m, podzielony na moduły archiwizacji. Produkt 5 to numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) generowany z danych LiDAR Standardu II w strukturze GRID o wymiarze oczka siatki 0,5 m, podzielony na moduły archiwizacji. Produkt 4 zalicza się do grupy asortymentowej NMPT-0, zaś produkt 5 do grupy asortymentowej NMPT-1, według rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571).

Numeryczny model pokrycia terenu tworzy się na podstawie danych ALS z pierwszego odbicia (ang. *First Echo*), wybierając punkty zaklasyfikowane jako punkty leżące na gruncie, punkty reprezentujące roślinność, punkty reprezentujące budynki budowle i obiekty inżynierskie oraz punkty odpowiadające wysokości zwierciadła wody.

Numeryczny model pokrycia terenu opracowywany jest w układzie współrzędnych oznaczonym symbolem PL-1992 oraz układzie wysokościowym oznaczonym symbolem PL-KRON86-NH, o których mowa w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Dz.U. z 2012 r. poz. 1247).

Numeryczny model pokrycia terenu jest zapisywany w dwóch formatach: ASCII (wykaz współrzędnych XYZ) i Esri GRID (format ArcInfo ASCII GRID).

Numeryczny model pokrycia terenu tworzy ciągłą obszarowo bazę danych, składającą się z poszczególnych modułów archiwizacji. Modułem archiwizacji jest obszar ograniczony granicami „1/4” części sekcji mapy 1:10 000 w układzie współrzędnych PL-1992 (ryc. 2.5).

### 2.2.7. Opis produktu 6 – cyfrowe zdjęcia lotnicze

Produkt 6 to barwne zdjęcia lotnicze wykonane kamerą cyfrową wraz z nadaną georeferencją. Zobrazowania lotnicze służą jako pomocniczy materiał interpretacyjny i źródło informacji o atrybutach RGB dla chmury punktów LiDAR.

Dla Standardu I dopuszczono niesynchroniczną rejestrację szeregu skanowania kamerą cyfrową. Pozwoliło to realizować skanowanie również w porze nocnej, ale bez możliwości rejestracji fotograficznej.

Podstawowe parametry wykonywanych zdjęć:

1. Zdjęcia barwne w barwach rzeczywistych RGB.
2. Rozdzielczość terenowa GSD (ang. *Ground Sampling Distance*):
  - w ramach zamówienia WT LiDAR 2011/2012 dostarczone cyfrowe zdjęcia lotnicze charakteryzują się wartością  $GSD \leq 0,45$  m (Standard I) oraz  $GSD \leq 0,30$  m (Standard II),
  - w WT LiDAR 2013/2014 zdefiniowano wymaganą wartość  $GSD \leq 0,50$  m.
3. Pokrycie poprzeczne i podłużne:
  - w przypadku synchronicznej rejestracji zasięg poprzeczny rejestracji jest nie mniejszy niż szerokość pasa skanowania LiDAR,

- w przypadku niesynchronicznej rejestracji pokrycie poprzeczne zdjęć jest  $\geq 30\%$ ,
  - pokrycie podłużne zdjęć jest  $\geq 60\%$ .
4. Trajektorija nalotu kamerą może mieć inny kierunek w stosunku do trajektorii skanera.

Zdjęcia cyfrowe zapisywane są w formacie TIFF, z rozdzielczością radiometryczną 24 bit/piksel (8 bit/piksel dla każdego z kanałów), z piramidą obrazową (*fullset overview*, metoda *Average*), segmentowane z kompresją JPEG. Wraz ze zdjęciami cyfrowymi dla każdego Bloku LiDAR przekazywane są m.in.: metryka kamery fotogrametrycznej, którą wykonywany był nalot, oraz wykaz elementów orientacji zewnętrznej poszczególnych zdjęć.

### 2.2.8. Opis Raportu dostawy

Dla każdego Bloku LiDAR opracowany jest oddzielny Raport dostawy. Raport dostawy stanowi szczegółowy opis procesów zbierania, opracowania i kontroli danych ALS dostarczanych przez Wykonawcę.

Raport dostawy dla Bloku LiDAR opracowanego w ramach WT LiDAR 2011/2012 zawiera m.in.: opis i wyniki wszystkich kontroli przeprowadzonych przez Wykonawcę, opis opracowania produktu 1 i 2, opis opracowania produktu 3, opis opracowania produktu 4 i 5 oraz opis opracowania produktu 6.

Raport dostawy przekazywany w ramach WT LiDAR 2013/2014 zawiera informacje o sprzęcie użytym do realizacji zamówienia i informacje o wystąpieniu problemów i okoliczności niestandardowych, ich opis wraz z zastosowanym sposobem postępowania, oraz dane trajektorii skanowania i mapę przeglądową dla układu współrzędnych PL-1992.

### 2.2.9. Opis metadanych Bloku LiDAR

Metadane Bloku LiDAR to produkt, który jest tworzony w celu opisanie dodatkowymi informacjami opracowanych w ramach projektu danych wysokościowych: dane pomiarowe LiDAR (produkt 1 i 2) oraz NMT i NMPT (produkt 3, 4 i 5). Dzięki metadansom Bloku LiDAR możliwe jest przede wszystkim wyszukiwanie znajdujących się w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym zbiorów danych, które zostały opisane metadanymi oraz wyszukiwanie informacji na temat tych zbiorów danych. Metadane są dostępne publicznie, przez co odbiorcy otrzymują bogate i aktualne źródło informacji na temat lokalizacji zbiorów danych oraz innych charakterystyk ilościowych i jakościowych tych zbiorów danych.

Metadane Bloku LiDAR to metadane stanowiące element infrastruktury informacji przestrzennej tworzonej na mocy Dyrektywy 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiającej infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) (Dz.U. L 108 z 25.04.2007, str. 1–14) oraz jej aktów wykonawczych (rozporządzenia Komisji Europejskiej i towarzyszące im wytyczne techniczne), których zapisy implementuje w polskim prawie ustawa z dnia 4 marca



2010 r. o infrastrukturze informacji przestrzennej (Dz.U. z 2010 r. Nr 76 poz. 489 z późn. zm.). Zgodnie z wytycznymi technicznymi INSPIRE metadane zbiorów danych przestrzennych opracowywane są w zakresie i formie określonej w normach ISO 19115 (ISO 19115: Geographic information – Metadata) i ISO 19139 (ISO 19139: Geographic information Metadata XML schema implementation). Techniczną implementacją norm ISO jest profil metadanych, który zawiera wykaz elementów istotnych z punktu widzenia opisu zbiorów danych przestrzennych, wraz z określeniem stopnia powinności wypełniania tych elementów (profil określa elementy obligatoryjne, warunkowe i fakultatywne). Profil dla zbiorów danych stanowiących pzgik określa rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 5 września 2013 r. w sprawie organizacji i trybu prowadzenia państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (Dz.U. z 2013 r. poz. 1183). Metadane Bloku LiDAR zostały opracowane zgodnie z profilem dla zbiorów danych NMT, który jest profilem branżowym, rozszerzającym profil zbiorów pzgik o elementy wynikające z rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571).

Zgodnie z warunkami technicznymi pliki metadanych przypisane są do każdego Bloku LiDAR i tworzone są dla każdego pojedynczego modułu archiwizacji wyżej wymienionych produktów LiDAR. Metadane Bloku LiDAR opracowywane są w postaci plików w formacie XML (Extensible Markup Language – uniwersalny język znaczników), których struktura (hierarchia, typy elementów, liczność elementów) musi być zgodna ze schematem XSD (XML Schema Definition – definicja schematu dokumentu XML), określonym w normie ISO 19139. Nazwa pliku metadanych jest unikatowa i odpowiada przypisanemu Kodowi zasobu dla danego modułu archiwizacji (np. produkt 1 – NMT.ISOK.CHP.N-33-59-D-d-2-1-2.xml, produkt 3 w formacie XYZ – NMT.ISOK.XYZ.N-33-59-D-d-2-1.xml).

Pliki XML metadanych posiadają hierarchiczną strukturę i składają się z powiązanych wzajemnie sekcji, encji i elementów metadanych. Sekcje są obiektami nadrzędnymi i składają się z encji, które z kolei stanowią zbiór elementów metadanych zawierających informacje opisujące zbiory danych. Sekcje i elementy stanowią główne obiekty plików metadanych zbiorów danych przestrzennych. W plikach XML metadanych Bloku LiDAR można wyróżnić następujące główne sekcje i ich elementy:

1. Identyfikacja – zawiera elementy identyfikujące jednoznacznie zbiór danych wchodzący w skład Bloku LiDAR:
  - a) tytuł zasobu – zawiera unikatową nazwę zbioru danych składającą się m.in. z daty opracowania danych źródłowych, rozdzielczości przestrzennej lub gęstości chmury punktów (w przypadku danych ALS), nazwy modułu archiwizacji (godło sekcji mapy);
  - b) tytuł alternatywny – jest to element wieloliczny zawierający dodatkowe informacje na temat danego zbioru danych: numer pracy geodezyjnej, symbol godła arkusza, skrócona nazwa projektu, numer Bloku LiDAR oraz numer części projektu;

- c) streszczenie – stanowi ogólny opis zawartości zbioru danych, który powinien zawierać: rodzaj opracowania, informację o rozdzielczości przestrzennej, datę wykonania, informacje o układzie współrzędnych i podziale arkuszowym;
  - d) typ zasobu – określa zakres tworzonych metadanych, w przypadku zbiorów danych z projektu ISOK metadane tworzone są na poziomie każdego zbioru danych (modułu archiwizacji);
  - e) adres zasobu – zawiera informację o linku URL do opisywanego zbioru danych lub strony zawierającej dodatkowe informacje na jego temat;
  - f) unikatowy identyfikator zasobu – jest ciągiem znaków, który jednoznacznie identyfikuje zbiór danych i składa się z kodu zasobu (NMT.ISOK.CHP.<nazwa modułu archiwizacji> – dla danych ALS, NMT.ISOK.XYZ.<nazwa modułu archiwizacji> – dla danych NMT w formacie XYZ, NMT.ISOK.ASC.<nazwa modułu archiwizacji> – dla danych NMT w formacie ASC i NMPT.ISOK.XYZ.<nazwa modułu archiwizacji> – dla danych NMPT w formacie XYZ, NMPT.ISOK.ASC.<nazwa modułu archiwizacji> – dla danych NMPT w formacie ASC) oraz przestrzeni nazw (PL.PZGiK.205), która jest jednocześnie kodem zbioru danych NMT w Ewidencji Zbiorów i Usług Danych Przestrzennych;
  - g) język zasobu – określa język, w którym prowadzony jest zasób (wartość „pol” oznacza język polski);
  - h) typ reprezentacji przestrzennej – opisuje metodę użytą do przestrzennego reprezentowania informacji geograficznej („chmura Punktów” – dla zbiorów danych prowadzonych w postaci chmury punktów – dane ALS, „siatka” – dla zbiorów danych prowadzonych w strukturze grid – NMT, NMPT);
  - i) informacja dodatkowa – ten element wskazuje czy dla opisywanego zbioru danych wysokościowych występuje pełne pokrycie treścią w ramach jednego modułu archiwizacji (TAK/NIE).
2. Klasyfikacja danych przestrzennych – wskazuje ogólną klasyfikację tematyczną Bloku LiDAR za pomocą elementu:
    - a) kategoria tematyczna – określa główny temat zbioru danych pozwalający na wstępne, tematyczne pogrupowanie zasobów danych przestrzennych (zbiorom danych wysokościowych przypisana jest kategoria „*elevation*” – ukształtowanie terenu).
  3. Słowa kluczowe – ta sekcja pozwala na uszczegółowienie wyszukiwania zbioru danych w stosunku do zbyt ogólnej kategorii tematycznej i składa się z elementów:
    - a) wartość słowa kluczowego – to słowa potocznie używane, słowa sformalizowane lub fraza stosowana do opisu danego tematu (np. numeryczny model terenu, numeryczny model powierzchni terenu, Lotniczy skaning laserowy, Ukształtowanie terenu i inne), które pochodzą z określonych słowników źródłowych (tezaurusów);
    - b) standardowy słownik źródłowy – to nazwa formalnie zarejestrowanego słownika lub podobnego wiarygodnego źródła słów kluczowych (np. Standardowy słownik źródłowy: Tezaurus GUGiK, wersja 2.02).
  4. Położenie geograficzne – ta sekcja podaje informację o położeniu geograficznym Bloku LiDAR z wykorzystaniem elementów:

- a) geograficzny prostokąt ograniczający – to element charakteryzujący zasięg przestrzenny zbioru danych przestrzennych w formie minimalnego prostokąta ograniczającego (MBR – *minimum bounding rectangle*) zapisanego w postaci skrajnych (najbardziej wysuniętych w kierunkach zachodnim, wschodnim, południowym i północnym) współrzędnych wyrażonych w stopniach i dziesiątych częściach stopni w elipsoidalnym systemie odniesień przestrzennych ETRS89 (EPSG:4258);
  - b) układ odniesienia współrzędnych – wskazuje układ odniesienia zbioru danych poprzez podanie kodu układu z katalogu EPSG (układ PL-1992 posiada kod 2180) oraz przestrzeni nazw, która jest wersją katalogu EPSG. Zbiory danych wysokościowych mają przypisane zawsze dwa układy: układ współrzędnych płaskich prostokątnych (PL-1992) oraz układ wysokości (PL-KRON86-NH).
5. Odniesienie czasowe – elementy należące do tej sekcji metadanych odpowiadają za informacje o czasowym wymiarze opisywanych danych:
- a) zakres czasowy – definiuje okres, do którego odnoszą się informacje zawarte w pojedynczym zbiorze danych (dokładna data rozpoczęcia pozyskania danych wysokościowych dla modułu archiwizacji produktów Bloku LiDAR);
  - b) data utworzenia – określa czas, w którym zbiór danych został utworzony w postaci cyfrowej.
6. Jakość i ważność – do tej sekcji metadanych należą elementy określające pochodzenie i historię zasobu oraz poziom szczegółowości danych wysokościowych:
- a) pochodzenie – to zwięzły opis procesu tworzenia zbioru danych, wykorzystanych danych źródłowych oraz ewentualnej ocenie jakości zbioru;
  - b) rozdzielczość przestrzenna – określa poziom szczegółowości danych, w przypadku danych NMT i NMPT rozdzielczość przestrzenna jest wyrażona za pomocą terenowego rozmiaru piksela podawanego w metrach (GSD – *ground sampling distance*), a w przypadku danych ALS za pomocą gęstości chmury punktów wyrażonej w liczbie punktów w przeliczeniu na 1 m<sup>2</sup>;
  - c) dokładność położenia – bezwzględna lub zewnętrzna dokładność – za pomocą tego elementu podaje się błąd średni położenia punktu oraz błąd średni wysokości wyrażone w metrach;
  - d) opis procesu tworzenia zbioru danych – element zawiera mianownik skali mapy odpowiadającej modułowi archiwizacji.
7. Zgodność – ta sekcja określa zgodność wykonania zbiorów danych Bloku LiDAR ze specyfikacją techniczną, na podstawie której powstał zbiór danych wysokościowych, za pomocą następujących elementów:
- a) specyfikacja – zawiera wykaz przepisów wykonawczych oraz specyfikacji; specyfikacją nadrzędną dla danych wysokościowych tworzonych w GUGiK w ramach projektu ISOK jest rozporządzenie MSWiA z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571);
  - b) stopień – wskazuje czy opisywany zbiór danych wysokościowych jest zgodny z przytoczoną specyfikacją („true” – zgodny, „false” – niezgodny).

8. Informacje o zarządzaniu zasobem – określa zakres i częstotliwość aktualizacji zbiorów danych wysokościowych.
9. Wymogi dotyczące dostępu i użytkowania – elementy sekcji określają warunki dostępu do danych Bloku LiDAR:
  - a) warunki dotyczące dostępu i użytkowania – w tym elemencie podane są informacje, które wskazują przepisy określające zasady i opłaty związane z użyciem zbiorów danych wysokościowych;
  - b) ograniczenia w publicznym dostępie (prawne) – odnosi się do typów ograniczeń, jakim podlega publiczny dostęp do zbiorów danych wysokościowych ze względów prawnych;
  - c) ograniczenia w publicznym dostępie (względy bezpieczeństwa) – odnosi się do typów ograniczeń, jakim podlega publiczny dostęp do zbiorów danych ze względów bezpieczeństwa.
10. Organizacje odpowiedzialne za tworzenie zbiorów danych przestrzennych oraz zarządzanie nimi, ich przechowywanie i rozpowszechnianie:
  - a) jednostka odpowiedzialna – opisuje organizacje odpowiedzialne za zbiór danych wysokościowych, udostępnianie zbioru danych wysokościowych oraz jednostkę tworzącą zbiór danych;
  - b) rola jednostki odpowiedzialnej – wskazuje, jaką rolę w odniesieniu do opisywanego w metadanych zbioru pełni określona wyżej jednostka (w przypadku metadanych Bloku LiDAR podawane są dane jednostek, które pełnią następujące role: „opiekun” – Główny Geodeta Kraju, „dostawcaZasobu” – CODGiK, „autor” – wykonawca Bloku LiDAR).
11. Informacje o dystrybucji – określają format zapisu danych wysokościowych poprzez wypełnienie elementu:
  - a) kodowanie – definiuje format dystrybucji danych określony przez nazwę i wersję oraz specyfikację (dane ALS – LAS 1.2, NMT i NMPT – ASCII i ArcInfo ASCII GRID).
12. Metadane na temat metadanych – ta sekcja zawiera informacje opisujące metadane:
  - a) punkt kontaktowy – to informacja o organizacji odpowiedzialnej za tworzenie i przechowywanie metadanych;
  - b) data metadanych – informacja na temat czasu tworzenia bądź aktualizacji metadanych;
  - c) wersja normy metadanych – to nazwa użytej normy metadanych (ISO 19115);
  - d) identyfikator pliku metadanych – dane identyfikujące jednoznacznie metadane (identyfikator globalnie unikatowy GUID);
  - e) standard zapisu znaków – to pełna nazwa standardu zapisu znaków użytego dla zbioru metadanych (np. „utf8”);
  - f) język metadanych – to określenie języka, w którym wyrażone są wartości elementów metadanych („pol” – polski).

Pliki XML metadanych Bloku LiDAR można odczytywać, edytować, walidować (sprawdzać ich poprawność) oraz wyszukiwać poprzez serwis [geportal.gov.pl](http://geportal.gov.pl). W serwisie tym

udostępnione są specjalne narzędzia służące zarządzaniu metadanymi. Należą do nich następujące aplikacje i narzędzia internetowe:

Edytor metadanych (<http://edytor.geoportal.gov.pl/edytormetadanych>) – to aplikacja umożliwiająca tworzenie, odczyt i edycję plików metadanych. Dodatkowo użytkownik może samodzielnie walidować plik w przyjętym profilu metadanych oraz opublikować metadane w Katalogu metadanych.

Walidator metadanych (<http://walidator.geoportal.gov.pl/walidatormetadanych>) – to aplikacja sieciowa służąca weryfikacji zgodności plików metadanych z normami i przepisami wykonawczymi. Weryfikacja odbywa się poprzez badanie zgodności ze schematem XML zapisanym w postaci pliku XSD (XML Schema Definition). Walidator dostępny jest również w postaci usługi WPS (Web Processing Service) pod adresem <http://walidator.geoportal.gov.pl/WPSValidator/WPSValidatorService.svc>.

Usługa wyszukiwania CSW (<http://geoportal.gov.pl/uslugi/usluga-wyszukiwania-csw>) – jest to usługa, która umożliwia udostępnianie metadanych znajdujących się w katalogu metadanych. Usługa jest zgodna ze specyfikacją OGC CSW. Dzięki usłudze możliwe jest szybkie i łatwe wyszukiwanie danych przestrzennych. W ramach systemu Geoportal 2 funkcjonują dwie usługi katalogowe: Katalog Metadanych – udostępniający metadane krajowe (<http://mapy.geoportal.gov.pl/wss/service/CSW/guest/CSWStartup>) i Katalog Metadanych – INSPIRE, publikujący metadane zbiorów danych tworzących europejską infrastrukturę informacji przestrzennej (<http://mapy.geoportal.gov.pl/wss/service/CSWINSPIRE/guest/CSWStartup>). Metadane zbiorów danych Bloków LiDAR dostępne są w krajowym Katalogu Metadanych.

Wyszukiwanie metadanych (narzędzie dostępne w przeglądarce mapowej [edytor.geoportal.gov.pl/edytormetadanych](http://edytor.geoportal.gov.pl/edytormetadanych) w panelu Wyszukiwania) – jest to wyszukiwarka metadanych zbiorów danych nie wymagająca od użytkownika szczegółowej znajomości zawartości pliku metadanych. Za pomocą tego narzędzia można wyszukać (poprzez wpisanie danej frazy, wskazanie zasięgu przestrzennego, podanie słowa kluczowego lub innej wartości wybranych elementów metadanych), wyświetlić i pobrać (plik PDF lub XML) metadane oraz wyświetlić na tle mapy ich zasięg przestrzenny.

## 2.3. Opracowanie cyfrowej ortofotomapy

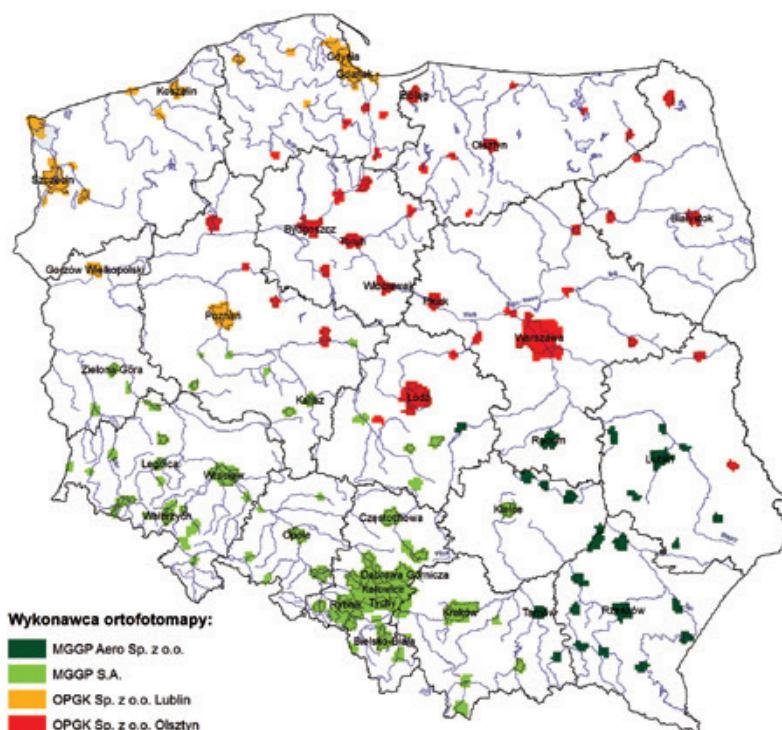
### 2.3.1. Obszar opracowania

W ramach projektu ISOK opracowano wysokorozdzielczą cyfrową ortofotomapę RGB (piksel terenowy 0,1 m) dla terenów zurbanizowanych szczególnie narażonych na wystąpienie nadzwyczajnych zagrożeń, dla których wystąpienie zagrożenia pociąga za sobą największe skutki dla obywatela i przedsiębiorcy. Łącznie cyfrową ortofotomapą lotniczą pokryto 203 miasta Polski, dla których mapy zagrożenia i ryzyka powodziowego są kluczowym materiałem do usprawnienia planowania przestrzennego oraz ograniczenia postępującego rozwoju zabudowy i infrastruktury na obszarach narażonych na niebezpieczeństwo powodzi.

### 2.3.2. Organizacja pozyskania i opracowania cyfrowej ortofotomapy

Ortofotomapa cyfrowa została opracowana w ramach postępowania przetargowego w trybie przetargu nieograniczonego (nr ZP/BO-4-2500-52/GI-2500-66/2011) na „Opracowanie ortofotomapy obszarów miejskich w ramach projektów ISOK i GBDOT” (ryc. 2.6). Jej opracowanie oparto na zdjęciach lotniczych, wykonywanych tzw. wielkoformatowymi (tj. wysokorozdzielczymi) kamerami cyfrowymi. Terenowa rozdzielczość zdjęć wynosiła  $GSD \leq 0,1$  m, rejestracja odbywała się w zakresach spektralnych RGB. W procesie ortorektyfikacji zdjęć został wykorzystany NMT wytworzony z lotniczego skanowania laserowego w ramach projektu ISOK. Ortofotomapę opracowano w dwóch układach współrzędnych: PL-1992 i PL-2000.

Podobnie jak dla lotniczego skanowania laserowego, obszary miast objęte opracowaniem ortofotomapy podzielono na 6 części. Tabela 2.8 przedstawia wykaz wykonawców wraz z wartością zawartych umów i obszarem opracowania.



Ryc. 2.6. Obszar opracowania wysokorozdzielczej ortofotomapy dla miast w ramach projektu ISOK

Tabela 2.8. Zestawienie wykonawców wyłonionych w ramach zamówień na „Opracowanie ortofotomapy obszarów miejskich w ramach projektów ISOK i GBDOT”

<b>Część nr</b>	<b>Wykonawca</b>	<b>Wartość Umowy</b>
I	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne w Lublinie Sp. z o.o.	953 228,91 zł
	Obszar: 23 miasta o łącznej powierzchni 2 951 km <sup>2</sup>	
II	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. w Olsztynie – lider konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. (Lizbona, Portugalia) – członek konsorcjum, Sprint S.A. – członek konsorcjum.	997 138,66 zł
	Obszar: 31 miast o łącznej powierzchni 3 244 km <sup>2</sup>	
III	Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne Sp. z o.o. (Olsztyn) – lider konsorcjum, Estereofoto GeoEngenharia S.A. – członek konsorcjum, Sprint S.A. – członek konsorcjum.	704 267,20 zł
	Obszar: 31 miast o łącznej powierzchni 2 253 km <sup>2</sup>	
IV	MGGP S.A. – lider konsorcjum, Geodetski Inżyniring Maribor d. o.o. – członek konsorcjum, VIDOM Halina Grązka – członek konsorcjum.	1 068 778,98 zł
	Obszar: 32 miasta o łącznej powierzchni 2 948 km <sup>2</sup>	
V	MGGP S.A. – lider konsorcjum, Geodetski Inżyniring Maribor d. o.o. – członek konsorcjum, VIDOM Halina Grązka – członek konsorcjum.	1 516 202,55 zł
	Obszar: 60 miast o łącznej powierzchni 6 141 km <sup>2</sup>	
VI	MGGP Aero Sp. z o.o.	935 843,04 zł
	Obszar: 26 miast o łącznej powierzchni 2 685 km <sup>2</sup>	
	<b>ŁĄCZNIE</b>	<b>6 175 459,34 zł</b>

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości cyfrowej ortofotomapy, GUGiK w 2011 roku wyłonił w postępowaniu przetargowym „Usługa weryfikacji danych i koordynacji działań w ramach projektu ISOK” (nr ZP/BO-4-2500-20/GI-2500-10/2011) Inspektora Nadzoru i Kontroli (INiK) – podmiot, którego zadaniem była, między innymi, kontrola jakości cyfrowej ortofotomapy. Wartość kontroli ortofotomapy wyniosła 612 930,53 zł brutto.

### 2.3.3. Technologia wytworzenia i parametry cyfrowej ortofotomapy

Technologia wytworzenia cyfrowej ortofotomapy dla miast, realizowanej w ramach projektu ISOK nie różni się od typowej technologii stosowanej obecnie. Poniżej przedstawiono wymagane kluczowe parametry tej technologii i samego produktu – cyfrowej ortofotomapy.

#### Zdjęcia lotnicze

- Wykonywane w zakresach RGB wielkoformatową kamerą cyfrową, o rozdzielczości  $GSD \leq 0,1$  m,
- pokrycie podłużne zdjęć  $\geq 60\%$ ,
- pokrycie poprzeczne zdjęć  $\geq 40\%$ ,
- zdjęcia prawie pionowe,
- terminy wykonania zdjęć w porze bez liści na drzewach, tj. od 15 lutego do 30 kwietnia i od 1 do 31 października,
- wysokość słońca nad horyzontem w momencie pozyskiwania zdjęć  $\geq 25^\circ$ ,
- wymagany precyzyjny pomiar współrzędnych środków rzutów w trakcie nalotu w technologii dGNSS. Sugerowany dodatkowy pomiar w locie wszystkich elementów orientacji zewnętrznej zdjęć przez zintegrowane systemy GNSS/INS,
- błąd wyznaczenia współrzędnych środków rzutów nie większy niż 0,10 m dla współrzędnych X i Y oraz 0,15 m dla współrzędnej H,
- format zapisu zdjęć lotniczych:
  - zdjęcia barwne w barwach rzeczywistych RGB, „wyostrzone” („*pan-sharpened*”),
  - TIFF,
  - rozdzielczość radiometryczna 24 bit/piksel (8 bit/piksel dla każdego z kanałów RGB),
  - piramida obrazowa (*fullset overview*, metoda Gaussa),
  - tajlowane  $256 \times 256$ ,
  - kompresja objętościowa JPEG o stopniu kompresji  $q = 4$  lub  $q = 5$ .

#### Polowa osnowa fotogrametryczna

Punkty polowej osnowy fotogrametrycznej sygnalizowane są w terenie. Gęstość i rozkład punktów osnowy zakłada precyzyjny pomiar środków rzutów w locie (GNSS) i – opcjonalnie – pomiar wszystkich elementów orientacji zewnętrznej zdjęć poprzez integrację GNSS/INS. Liczba i rozmieszczenie fotopunktów w bloku zdjęć lotniczych oraz ich lokalizacja na zdjęciach zapewniają wymaganą dokładność opracowania, wyznaczenie dodatkowych parametrów wyrównania kompensujących błędy systematyczne zdjęć oraz wyznaczenie błędów systematycznych pomiaru elementów orientacji zewnętrznej zdjęć.

#### Aerotriangulacja

Podstawowe, wymagane parametry i wskaźniki procesu aerotriangulacji:

1. Aerotriangulacja przestrzenna rozwiązana na bazie polowej osnowy fotogrametrycznej pomierzonej w terenie techniką GPS. W procesie aerotriangulacji wyko-



- rzystane precyzyjne środki rzutów pomierzone w locie technologią dGNSS oraz kąty pomierzone są techniką GNSS/INS (jeśli taki pomiar miał miejsce).
2. Wyrównanie wszystkich zdjęć pokrywających jedno miasto, lub kilku miast stanowiących jeden zwarty obszar, w jednym bloku aerotriangulacji.
  3. Wymagana metoda aerotriangulacji: blokowa z pojedynczych zdjęć, równoczesna, automatyczna.
  4. Wymaga dokładność wyrównania Bloku  $\sigma_0 \leq 3\mu\text{m}$  (błąd średni obserwacji po wyrównaniu).
  5. Dla poszczególnych grup obserwacji wymagana zgodność wartości błędów przed wyrównaniem i po wyrównaniu, nie gorsza niż:
    - 10% wartości błędu dla błędu współrzędnych tłowych,
    - 20% wartości błędu dla błędów współrzędnych fotopunktów,
    - 20% wartości błędu dla współrzędnej środka rzutów, która jest zgodna z kierunkiem nalotu.
  6. Błędy średnie wpasowania Bloku ortofotomapy w połowę osnowę fotogrametryczną spełniają następujące kryteria ( $xy$  w rozumieniu wypadkowej):
    - $\text{RMS}_{xy} \leq 0,08 \text{ m}$ ,
    - $\text{RMS}_z \leq 0,10 \text{ m}$ ,
 RMS rozumiany jest tutaj jako błąd średni średniokwadratowy.
  7. Błędy średnie wpasowania Bloku ortofotomapy na punktach kontrolnych spełniają następujące kryteria ( $xy$  w rozumieniu wypadkowej):
    - $\text{RMS}_{xy} \leq 0,12 \text{ m}$ ,
    - $\text{RMS}_z \leq 0,15 \text{ m}$ .
  8. Różnica współrzędnych ( $D_x, D_y, D_z$ ) między pomiarem fotogrametrycznym, a pomiarem terenowym na żadnym z punktów kontrolnych nie może przekraczać:
    - $D_x, D_y \leq 0,25 \text{ m}$ ,
    - $D_z \leq 0,30 \text{ m}$ .

### Proces generowania i parametry ortofotomapy

Podstawowe, wymagane parametry i wskaźniki jakości ortofotomapy:

1. Układ współrzędnych opracowania (dwa układy współrzędnych płaskich prostokątnych): PL-1992 i PL-2000.
2. Obowiązującym układem wysokościowym jest układ wysokości normalnych PL-KRON86-NH.
3. Piksel terenowy ortofotomapy: 0,1 m.
4. Dokładność lokalizacyjna ortofotomapy (średni błąd położenia obiektu na ortofotomapie):
  - $m_{xy} \leq 0,25 \text{ m}$  dla terenów o nachyleniu  $\leq 6^\circ$ ,
  - $m_{xy} \leq 0,30 \text{ m}$  dla terenów o nachyleniu  $> 6^\circ$ .
5. Ortorektyfikację wykonuje się:
  - na podstawie zdjęć lotniczych przyjętych do pzgik,
  - wykorzystując wszystkie zdjęcia lotnicze o pokryciu podłużnym 60%, pokrywające Blok ortofotomapy,
  - w oparciu o wyniki wykonanej aerotriangulacji,

- wykorzystując zweryfikowane i zaktualizowane dane wysokościowe udostępnione z pzgik (chmura punktów LiDAR i NMT wykonane w ramach projektu ISOK).
6. Ortofotomapa w układzie PL-2000 powstaje poprzez przepróbkowanie (*resampling*) ortofotomapy z układu PL-1992.
  7. W procesie ortorektifikacji stosuje się metodę interpolacji biliniowej.
  8. Blok ortofotomapy wyrównany radiometrycznie pod względem tonalnym, barw i kontrastów w taki sposób, aby sąsiadujące ze sobą moduły ortofotomapy nie nosiły śladów niekorzystnych efektów wizualnych.
  9. Nie dopuszcza się występowania na ortofotomapie zniekształceń obiektów „wystających” ponad teren, w szczególności wiaduktów i mostów, wynikających z nieuwzględnienia tych obiektów w numerycznym modelu terenu. Konieczne są dodatkowe pomiary w celu uzupełnienia numerycznego modelu terenu o linie opisujące krawędzie takich obiektów lub w procesie mozaikowania należy tak dobierać obrazy, aby na wynikowej ortofotomapie ich zniekształcenia nie były widoczne.
  10. Ortoobrazy są zmozaikowane tak, aby tworzyły jednolitą powierzchniowo całość.
  11. Zalecany jest dobór linii mozaikowania ortoobrazów, aby maksymalnie wykorzystać nadirową część zdjęcia i jednocześnie wykorzystać naturalne objekty liniowe.
  12. Wymagane jest, aby linie mozaikowania przebiegały po obrazie powierzchni terenu, omijając budynki, drzewa oraz cienie.
  13. Wymagane jest, aby podczas procesu projektowania linii mozaikowania Wykonawca uwzględnił przesunięcia radialne, pochylenia budynków, drzew oraz kierunki cieni.
  14. Wymagane jest wyrównanie tonalne wzdłuż linii mozaikowania. Niedopuszczalne są widoczne przesunięcia obiektów po obu stronach linii mozaikowania.
  15. Podział na moduły ortofotomapy następuje w procesie wtórnym, przeprowadzanym po uzyskaniu jednego ciągłego ortoobrazu na całym obszarze opracowania.
  16. Format zapisu modułów ortofotomapy:
    - GeoTIFF,
    - kompresja objętościowa JPEG o stopniu kompresji  $q = 4$  lub  $q = 5$ ,
    - rozdzielczość radiometryczna 24 bit/piksel (8 bit/piksel dla każdego z kanałów RGB),
    - piramida obrazowa (*fullset overview*, metoda *Average*),
    - kafelkowanie  $256 \times 256$ .
  17. Modułem ortofotomapy w układzie PL-1992 jest najmniejszy prostokąt opisany na 1/4 części sekcji mapy 1:10 000 w tym układzie.
  18. Modułem ortofotomapy w układzie PL-2000 jest obszar sekcji mapy 1 : 2000.

### 2.3.4. Opis metadanych Bloku ORTO

Metadane Bloku ORTO to produkt, który jest tworzony w celu opisanego dodatkowymi informacjami opracowanych w ramach projektu danych ortofotomapy: ortofotomapa w układzie PL-1992 oraz ortofotomapa w układzie PL-2000.

Metadane Bloku ORTO zostały stworzone na podstawie profilu metadanych dla zbiorów danych ortofotomapy, który podobnie jak profil metadanych NMT stanowi rozszerzenie profilu dla zbiorów danych państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (o którym mowa w rozporządzeniu MAiC z dnia 5 września 2013 r. w sprawie organizacji i trybu prowadzenia państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego – Dz.U. 2013 poz. 1183). Profil metadanych dla zbiorów danych ortofotomapy zawiera elementy właściwe ortofotomapie wskazane w rozporządzeniu MSWiA z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrażeń lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571).

Zgodnie z warunkami projektu ISOK pliki metadanych ortofotomapy przypisane są osobno do każdego modułu ortofotomapy w układzie PL-1992 i PL-2000. Pliki metadanych zapisane są w formacie XML zgodnie ze schematem XSD dla profilu ORTO. Dla wszystkich pojedynczych modułów archiwizacji w danym Bloku ORTO oraz w danym układzie współrzędnych powinien zostać przygotowany jeden plik XML. Nazwa pliku metadanych jest unikatowa i składa się z oznaczenia: rodzaju metadanych, godła arkusza ortofotomapy, daty opracowania ortofotomapy, terenowej wielkości piksela ortofotomapy (GSD) wyrażonego w metrach, skali barwnej ortofotomapy oraz układu współrzędnych ortofotomapy (np. ORTO.ISOK.2012.01.RGB.EPSG2180.N-34-77-D-b-2-2.xml).

Pliki XML metadanych Bloku ORTO składają się, podobnie jak pliki metadanych Bloku LiDAR, z sekcji i elementów. W plikach XML metadanych Bloku ORTO można wyróżnić następujące główne sekcje i ich elementy:

1. Identyfikacja – zawiera elementy identyfikujące jednoznacznie zbiór danych wchodzący w skład Bloku ORTO:
  - a) tytuł zasobu – zawiera unikatową nazwę zbioru danych składającą się m.in. z godła arkusza ortofotomapy, daty opracowania ortofotomapy, terenowej wielkości piksela ortofotomapy (GSD), skali barwnej ortofotomapy;
  - b) tytuł alternatywny – jest to element wieloliniowy zawierający dodatkowe informacje na temat danego zbioru danych: numer pracy geodezyjnej, symbol godła arkusza, skróconą nazwę projektu, numer Bloku ORTO oraz numer części projektu;
  - c) streszczenie – stanowi ogólny opis zawartości zbioru danych, który powinien zawierać: rodzaj opracowania, informację o rozdzielczości przestrzennej, datę wykonania, informacje o układzie współrzędnych i podziale arkuszowym;
  - d) typ zasobu – określa zakres tworzonych metadanych, w przypadku zbiorów danych z projektu ISOK metadane tworzone są na poziomie każdego zbioru danych (modułu archiwizacji);
  - e) adres zasobu – zawiera informację o linku URL do opisywanego zbioru danych lub strony zawierającej dodatkowe informacje na jego temat;

- f) unikatowy identyfikator zasobu – jest ciągiem znaków, który jednoznacznie identyfikuje Blok ORTO i składa się z kodu zasobu (np. ORTO.ISOK.2012.01.RGB.EPSG2180.N-34-77-D-b-2-2) oraz przestrzeni nazw (PL.PZGiK.203), która jest jednocześnie kodem zbioru danych ortofotomapy w Ewidencji Zbiorów i Usług Danych Przestrzennych;
  - g) język zasobu – określa język, w którym prowadzony jest zasób (wartość „pol” oznacza język polski);
  - h) standard zapisu znaków – to pełna nazwa standardu zapisu znaków użytego dla zbioru metadanych (np. „utf8”);
  - i) typ reprezentacji przestrzennej – opisuje metodę użytą do przestrzennego reprezentowania informacji geograficznej (dla Bloku ORTO jest to „siatka”);
  - j) informacja dodatkowa – ten element wskazuje czy dla opisywanej ortofotomapy występuje pełne pokrycie treścią w ramach jednego modułu archiwizacji (TAK/NIE).
2. Klasyfikacja danych przestrzennych – wskazuje ogólną klasyfikację tematyczną Bloku ORTO za pomocą elementu:
    - a) kategoria tematyczna – określa główny temat zbioru danych pozwalający na wstępne, tematyczne pogrupowanie zasobów danych przestrzennych (ortofotomapie przypisana jest wartość „imageryBaseMapsEarthCover”).
  3. Słowa kluczowe – ta sekcja pozwala na uszczegółowienie wyszukiwania zbioru danych w stosunku do zbyt ogólnej kategorii tematycznej i składa się z elementów:
    - a) wartość słowa kluczowego – to słowa potocznie używane, słowa sformalizowane lub fraza stosowana do opisu danego tematu (np. dane referencyjne, sporządzanie ortoobrazów, zobrazowania lotnicze, satelitarne i ortofotomapy i inne), które pochodzą z określonych słowników źródłowych (tezaurusów);
    - b) standardowy słownik źródłowy – to nazwa formalnie zarejestrowanego słownika lub podobnego wiarygodnego źródła słów kluczowych (np. Standardowy słownik źródłowy: Tezaurus GUGiK, wersja 2.02).
  4. Położenie geograficzne – ta sekcja podaje informację o położeniu geograficznym Boku ORTO z wykorzystaniem elementów:
    - a) geograficzny prostokąt ograniczający – to element charakteryzujący zasięg przestrzenny zbioru danych przestrzennych w formie minimalnego prostokąta ograniczającego (MBR – *minimum bounding rectangle*) zapisanego w postaci skrajnych współrzędnych wyrażonych w stopniach i dziesiątych częściach stopni w elipsoidalnym systemie odniesień przestrzennych ETRS89 (EPSG:4258);
    - b) układ odniesienia współrzędnych – wskazuje, w jakim układzie odniesienia zapisany jest zbiór danych poprzez podanie kodu układu z katalogu EPSG (układ PL-1992 posiada kod 2180, układ PL-2000 przyjmuje kody w zależności od strefy: strefa 5 – 2176, strefa 6 – 2177, strefa 7 – 2178, strefa 8 – 2179) oraz przestrzeni nazw, która jest wersją katalogu EPSG. Zbiory danych ortofotomapy mają przypisany układ współrzędnych płaskich prostokątnych.
  - 5) Odniesienie czasowe – elementy należące do tej sekcji metadanych odpowiadają za informacje o czasowym wymiarze opisywanych danych:

- a) zakres czasowy – definiuje okres, dla którego odnoszą się informacje zawarte w pojedynczym zbiorze danych (dokładna data pozyskania danych dla modułu archiwizacji danych Bloku ORTO);
- b) data utworzenia – określa czas, w którym zbiór danych został utworzony w postaci cyfrowej.
6. Jakość i ważność – do tej sekcji metadanych należą elementy określające pochodzenie i historię zasobu oraz poziom szczegółowości danych:
  - a) pochodzenie – to zwięzły opis procesu tworzenia zbioru danych, wykorzystanych danych źródłowych oraz ewentualnej ocenie jakości zbioru;
  - b) rozdzielczość przestrzenna – określa poziom szczegółowości danych Bloku ORTO, wyrażona jest za pomocą terenowego rozmiaru piksela podawanego w metrach (GSD);
  - c) dokładność położenia – bezwzględna lub zewnętrzna dokładność – za pomocą tego elementu podaje się błąd średni położenia punktu wyrażony w metrach;
  - d) opis procesu tworzenia zbioru danych – element zawiera mianownik skali mapy odpowiadającej modułowi archiwizacji zbioru danych.
7. Zgodność – ta sekcja określa zgodność wykonania zbiorów danych Bloku ORTO ze specyfikacją techniczną, na podstawie której powstał zbiór danych za pomocą następujących elementów:
  - a) specyfikacja – zawiera wykaz przepisów wykonawczych oraz specyfikacji; specyfikacją nadrzędną dla danych ortofotomapy tworzonych w GUGiK w ramach projektu ISOK jest rozporządzenie MSWiA z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571);
  - b) stopień – wskazuje czy opisywana metadanymi ortofotomapa jest zgodna z przytoczoną specyfikacją („true” – zgodny, „false” – niezgodny).
8. Informacje o zarządzaniu zasobem – określa zakres i częstotliwość aktualizacji zbiorów danych ortofotomapy.
9. Wymogi dotyczące dostępu i użytkowania – elementy sekcji określają warunki dostępu do danych Bloku ORTO:
  - a) warunki dotyczące dostępu i użytkowania – w tym elemencie podane są informacje, które wskazują przepisy określające zasady i opłaty związane z użyciem ortofotomapy;
  - b) ograniczenia w publicznym dostępie (prawne) – odnosi się do typów ograniczeń, jakim podlega publiczny dostęp do ortofotomapy ze względów prawnych;
  - c) ograniczenia w publicznym dostępie (względny bezpieczeństwa) – odnosi się do typów ograniczeń, jakim podlega publiczny dostęp do zbiorów danych ze względów bezpieczeństwa.
10. Organizacje odpowiedzialne za tworzenie zbiorów danych przestrzennych oraz zarządzanie nimi, ich przechowywanie i rozpowszechnianie:
  - a) jednostka odpowiedzialna – opisuje organizacje odpowiedzialne za prowadzenie zbiorów danych ortofotomapy, udostępnianie ortofotomapy oraz jednostkę tworzącą zbiór danych;

- b) rola jednostki odpowiedzialnej – wskazuje, jaką rolę w odniesieniu do opisywanego w metadanych zbioru danych pełni określona wyżej jednostka (w przypadku metadanych Bloku ORTO podawane są dane jednostek, które pełnią następujące role: „opiekun” – Główny Geodeta Kraju, „dostawcaZasobu” – CODGiK, „autor” – wykonawca Bloku ORTO).
11. Informacje o dystrybucji – określają format zapisu modułu ortofotomapy poprzez wypełnienie elementu:
- a) kodowanie – definiuje format dystrybucji danych określony przez nazwę i wersję oraz specyfikację (GeoTIFF 8 bitów – odcienie szarości kompresja JPEG).
12. Metadane na temat metadanych – ta sekcja zawierają informację o metadanych zapisanych w elementach:
- a) punkt kontaktowy – to informacja o organizacjach odpowiedzialnych za tworzenie i przechowywanie metadanych;
  - b) data metadanych – informacja na temat czasu tworzenia bądź aktualizacji metadanych;
  - c) wersja normy metadanych – to nazwa użytej normy metadanych (ISO 19115);
  - d) identyfikator pliku metadanych – dane identyfikujące jednoznacznie metadane (identyfikator globalnie unikatowy GUID);
  - e) standard zapisu znaków – to pełna nazwa standardu zapisu znaków użytego dla zbioru metadanych (np. „utf8”);
  - f) język metadanych – to określenie języka, w którym wyrażone są wartości elementów metadanych („pol” – polski).

Pliki XML metadanych Bloku ORTO dostępne są za pośrednictwem usługi CSW krajowego Katalogu Metadanych znajdującej się pod następującym adresem internetowym <http://mapy.geoportal.gov.pl/wss/service/CSW/guest/CSWStartup> oraz poprzez narzędzie Wyszukiwanie metadanych dostępne w serwisie mapowym [geoportal.gov.pl](http://geoportal.gov.pl). Odczyt i edycja plików metadanych możliwa jest również w Edytorze metadanych, który jest aplikacją internetową (<http://edytor.geoportal.gov.pl/edytormetadanych>). Walidację plików pod kątem zgodności ze schematem XSD zapewnia narzędzie Walidator metadanych (<http://walidator.geoportal.gov.pl/walidatormetadanych>).

## 2.4. Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k)

Informacja zawarta w bazie danych obiektów topograficznych o szczególności zapewniającej tworzenie standardowych opracowań kartograficznych w skali 1:10 000 (BDOT10k) ma kluczowe znaczenie dla realizacji głównego celu projektu ISOK, w szczególności dla sporządzenia map ryzyka powodziowego.

Prace nad tą bazą trwają od wielu lat, w ramach realizacji w Głównym Urzędzie Geodezji i Kartografii projektu *Georeferencyjna baza danych obiektów topograficznych (GBDOT) wraz z krajowym systemem zarządzania* oraz częściowo w ramach projektu ISOK i zleceń poszczególnych Marszałków Województw. Na przełomie 2013/2014 roku

zbudowano dla obszaru kraju – kompletną, zgodną ze standardem opisanym w rozporządzeniu MSWiA z dnia 17 listopada 2011 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych (Dz.U. z 2011 r. Nr 279 poz. 1642 z późn. zm.), bazę danych obiektów topograficznych – BDOT10k.

BDOT10k na potrzeby projektu ISOK dostarcza wiarygodne, spójne informacje, m.in. w następujących warstwach informacyjnych:

- sieci dróg i kolei,
- sieci cieków,
- sieci uzbrojenia terenu,
- budowle i urządzenia,
- kompleksy pokrycia terenu,
- kompleksy użytkowania terenu,
- inne obiekty przestrzenne.

Przy realizacji BDOT10k wykorzystuje się dane źródłowe pochodzące z bazy danych ewidencji gruntów i budynków, mapy zasadniczej, ortofotomapy cyfrowej, lotniczego skanowania laserowego, danych z baz PRG oraz PRNG, a także pozyskuje się informacje bezpośrednio z wywiadu terenowego.

BDOT10k w efekcie stanowi spójną, zharmonizowaną, opartą na jednolitym modelu danych, referencyjną bazę danych wykorzystywaną w tworzeniu map zagrożenia i ryzyka powodziowego, ale również w powstawaniu innych baz danych tematycznych oraz specjalistycznych i branżowych systemów informacji przestrzennej, niezbędnych dla funkcjonowania wszystkich działów administracji publicznej, w tym dla podejmowania działań bieżących o charakterze zarządczym, planowania i programowania strategicznego.

Dla projektu ISOK baza BDOT10k ma szczególne znaczenie do opracowania map ryzyka powodziowego, a w tym dla:

- podziału obszaru na klasy użytkowania terenu,
- lokalizacji budynków mieszkalnych i oceny liczby mieszkańców,
- wskazania dróg i miejsc ewakuacji ludności,
- lokalizacji obiektów o szczególnym znaczeniu kulturowym, przyrodniczym i gospodarczym,
- lokalizacji obiektów przemysłowych,
- lokalizacji obiektów stanowiących potencjalne zagrożenie w przypadku zalania (cementarze, oczyszczalnie ścieków, ujęcia wody, wysypiska śmieci, składy paliw i chemikaliów itp.),
- lokalizacji obiektów szczególnego znaczenia z punktu widzenia rozprzestrzeniania się wód powodziowych, a w tym m.in.:
  - wałów przeciwpowodziowych, grobli, nasypów,
  - tuneli, mostów, przepustów,
  - zbiorników retencyjnych,
  - zapór, śluz,
  - falochronów,
  - umocnień brzegowych.

Informacje te są konieczne do oceny zagrożenia dla ludności, oceny majątku oraz oceny potencjalnych strat powodziowych, a także prognozowania stref zalewowych.

## 2.5. System Zarządzania NMT

Głównymi produktami, które stanowią bazę danych SZNMT są produkty LiDAR realizowane przez GUGiK w ramach projektu ISOK, czyli:

- chmura punktów ALS,
- numeryczny model terenu (NMT) w strukturze GRID,
- numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) w strukturze GRID.

SZNMT w swojej bazie danych gromadzi również dane dotyczące pozostałych produktów fotogrametrycznych, takich jak: ortofotomapa cyfrowa (m.in. pozyskiwana w ramach projektu ISOK), zdjęcia lotnicze, dane numerycznego modelu terenu pochodzące z innych projektów dotyczących obszaru całej powierzchni Polski i stanowiących uzupełnienie danych tworzonych na podstawie skanowania laserowego. Wszystkie dane prowadzone w SZNMT są częścią państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (pzgik).

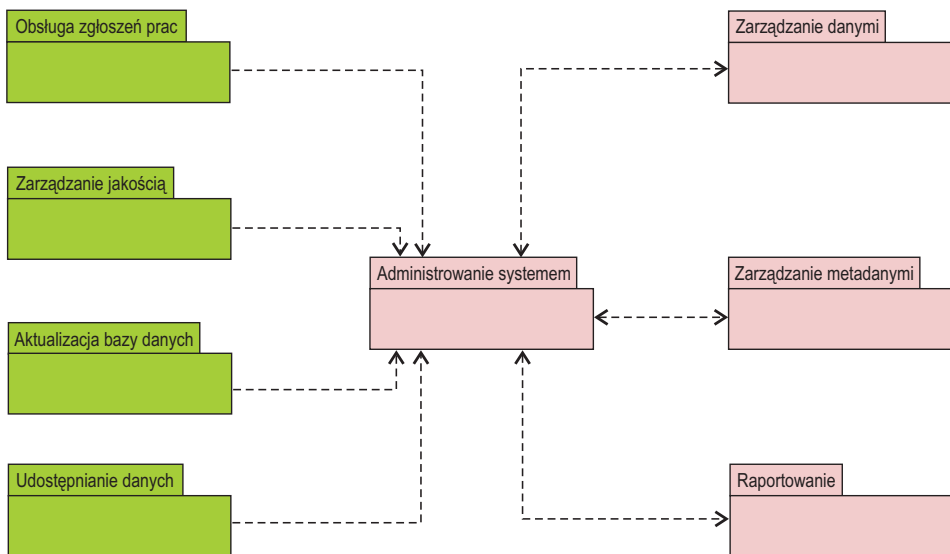
Zarządzanie danymi fotogrametrycznymi w SZNMT realizowane jest poprzez właściwe wsparcie procesów biznesowych związanych z obsługą danych w pzgik, do których należą:

- obsługa zgłoszeń prac geodezyjnych na dostarczenie produktów fotogrametrycznych w zakresie zleceń Głównego Geodety Kraju oraz zgłoszeń prac geodezyjnych dla prac zgłaszanych w CODGiK,
- kontrola jakości danych fotogrametrycznych przed włączeniem danych do pzgik oraz obsługa zgłoszeń błędów pochodzących od zewnętrznych użytkowników danych fotogrametrycznych,
- włączanie i wyłączanie danych fotogrametrycznych do/z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego,
- udostępnianie danych odbiorcom bezpośrednio z SZNMT oraz za pośrednictwem usług sieciowych danych przestrzennych dostępnych w serwisie [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl).

System podzielony został na obszary funkcjonalne, w ramach których opracowane zostały funkcje realizujące wyżej wymienione procesy. Oprócz obszarów głównych, do których należą Obsługa zgłoszeń prac, Zarządzanie jakością, Aktualizacja bazy danych, Udostępnianie danych, wyróżnione zostały jeszcze obszary pomocnicze, wspierające główne procesy: Administrowanie systemem, Zarządzanie danymi, Zarządzanie metadanymi, Raportowanie. Obszary funkcjonalne zostały zrealizowane zgodnie z wymaganiami zdefiniowanymi w rozporządzeniu MSWiA z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571). Diagram powiązań pomiędzy obszarami został przedstawiony na ryc. 2.7.



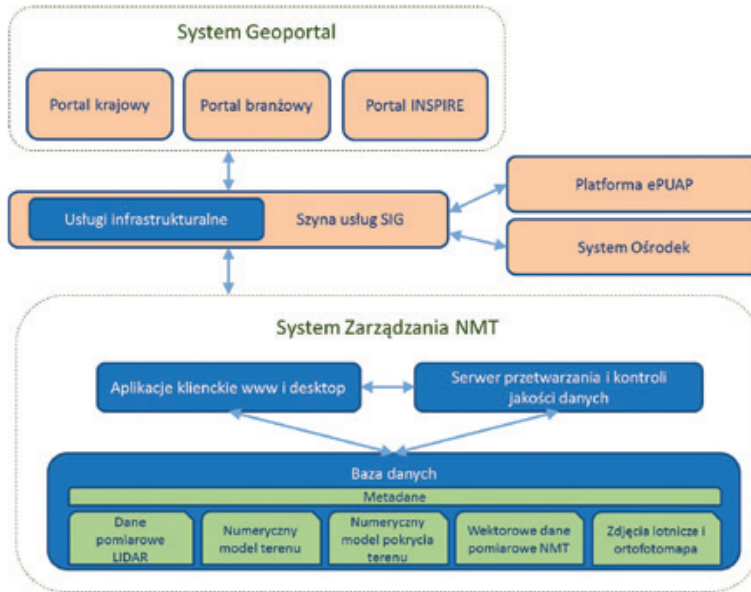
SZNMT jest jednym z wielu systemów dziedzicznych funkcjonujących w GUGiK w ramach spójnej architektury informatycznej SIG (System Informacyjny GUGiK), zbudowanej w oparciu o standardy SOA (ang. *Service Oriented Architecture*). SZNMT jest systemem wewnętrznym komunikującym się z pozostałymi systemami SIG poprzez szynę usług ESB (*Enterprise Service Bus*). Fizycznie SZNMT składa się z komponentów: aplikacja www, aplikacja desktop, serwer przetwarzania i kontroli danych, baza danych (ryc. 2.8). Aplikacja www jest podstawową aplikacją kliencką zapewniającą obsługę wszystkich procesów od strony formalnej. Poprzez integrację z Systemem Ośrodek CODGiK aplikacja www daje możliwość bezpośredniej obsługi zgłoszeń prac geodezyjnych i kartograficznych oraz wszelkich wniosków z zakresu obsługi danych fotogrametrycznych. Komponent ten posiada również funkcje do zlecenia automatycznych zadań z obszarów Zarządzanie jakością (automatyczne kontrole ilościowe i jakościowe), Zarządzanie danymi (wsadowe przetwarzanie danych, analizy przestrzenne), Aktualizacja bazy danych (wsadowe zasilanie bazy danych) i Udostępnianie danych (eksport danych z możliwością jednoczesnej konwersji zbiorów danych). Automatyczne zadania są kolejgowane i przetwarzane przez serwer przetwarzania, który jest odrębną częścią infrastruktury informatycznej SZNMT. Aplikacja desktop to narzędzie zbudowane w oparciu o oprogramowanie GIS, które służy do obsługi manualnych procesów kontroli danych, zarządzania danymi, analiz i wizualizacji (ryc. 2.8).



Ryc. 2.7. Powiązania pomiędzy obszarami funkcjonalnymi SZNMT

Poprzez szynę usług SOA System Zarządzania NMT zintegrowany jest z usługą Elektronicznej Platformy Usług Administracji Publicznej – ePUAP w zakresie obsługi wniosków o udostępnianie danych pzgiK, zapytań o dane pzgiK, obsługi zleceń i zgłoszeń prac geodezyjnych dotyczących produktów fotogrametrycznych. Za pośrednictwem

szyny usług SZNMT dostarcza również produkty fotogrametryczne oraz ich metadane na potrzeby publikacji z wykorzystaniem usług sieciowych w portalu branżowym, krajowym i INSPIRE, które są dostępne w serwisie [geoportal.gov.pl](http://geoportal.gov.pl).



Ryc. 2.8. Architektura i otoczenie SZNMT

## 2.6. Zasady udostępniania produktów fotogrametrycznych

Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK) odpowiada za wykonywanie czynności materialno-technicznych służących realizacji zadań publicznych określonych przepisami ustawy z dnia 17 maja 1989 r. – Prawo geodezyjne i kartograficzne (Dz.U. z 1989 r. Nr 30 poz. 163 z późn. zm.) oraz ustawy z dnia 4 marca 2010 r. o infrastrukturze informacji przestrzennej (Dz.U. z 2010 r. Nr 76 poz. 489 z późn. zm.). Na mocy wspomnianych przepisów jednym z przedmiotów działalności CODGiK jest gromadzenie, prowadzenie oraz udostępnianie baz danych centralnego zasobu geodezyjnego i kartograficznego m.in. w zakresie zobrażeń lotniczych, cyfrowej ortofotomapy, zbiorów danych pomiarowych dotyczących numerycznego modelu terenu, numerycznego modelu pokrycia terenu.

Każdy podmiot ma prawo nabyć dane fotogrametryczne. Zasady udostępniania danych reguluje ustawa Prawo geodezyjne i kartograficzne (pgiK). Na podstawie art. 40a

ust. 2 pkt 1 ustawy pgik, od dnia 12 lipca 2014 r., nie pobiera się opłaty za udostępnianie zbiorów danych dotyczących numerycznego modelu terenu o interwale siatki co najmniej 100 m. Na podstawie art. 40a ust. 2 pkt 2 ustawy pgik nie pobiera się opłaty za udostępnianie w postaci elektronicznej zbiorów danych państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego w celu edukacyjnym, w celu prowadzenia badań naukowych oraz prac rozwojowych, w celu realizacji ustawowych zadań w zakresie ochrony bezpieczeństwa wewnętrznego państwa i jego porządku konstytucyjnego. Za udostępnianie materiałów państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego, poza przypadkami określonymi w ustawie, są pobierane opłaty. Wysokość należnej opłaty oraz sposób jej wyliczenia dla udostępnianych danych przedstawiany jest w Dokumentie Obliczenia Opłaty. Uprawnienia podmiotu dotyczące możliwości wykorzystywania udostępnionych mu materiałów zasobu określa licencja. Kto wykorzystuje materiały zasobu bez wymaganej licencji lub niezgodnie z warunkami licencji lub udostępnia je wbrew postanowieniom licencji osobom trzecim, podlega karze pieniężnej w wysokości dziesięciokrotności opłaty za udostępnienie tych materiałów. Karę pieniężną nakłada w drodze decyzji administracyjnej Główny Geodeta Kraju (jeżeli naruszenie warunków licencji dotyczy materiałów z centralnego zasobu geodezyjnego i kartograficznego).

Dane z CODGiK pozyskuje się, składając odpowiedni wniosek o udostępnienie materiałów centralnego zasobu geodezyjnego i kartograficznego, będący załącznikiem do rozporządzenia Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 9 lipca 2014 r. w sprawie udostępniania materiałów państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego, wydawania licencji oraz wzoru Dokumentu Obliczenia Opłaty (Dz.U. z 2014 r. poz. 917). Formularze dostępne są na stronie CODGiK pod adresem: [www.codgik.gov.pl/index.php/obsługa-klienta/formularze/wnioski.html](http://www.codgik.gov.pl/index.php/obsługa-klienta/formularze/wnioski.html).

## Literatura

- Dyrektywa 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) (Dz.U. L 108 z 25.04.2007, str. 1–14).
- GUGiK, 2011. Warunki techniczne na realizację usługi polegającej na wykonaniu zadań wsparcia i zadań kontroli zamówień realizowanych przez Wykonawców ISOK w ramach zamówienia „Usługa weryfikacji danych i koordynacji działań w ramach projektu ISOK.” Załącznik nr 1 do SIWZ – Warunki techniczne INiK.
- GUGiK, 2011. Warunki techniczne na wykonanie lotniczego skaningu laserowego (LiDAR) oraz opracowanie produktów pochodnych. Załącznik nr 1 do SIWZ – Warunki techniczne.
- GUGiK, 2011. Warunki techniczne na wykonanie ortofotomapy obszarów miejskich w ramach Projektu ISOK.
- GUGiK, 2013. Warunki techniczne na pozyskanie danych wysokościowych w technologii LiDAR oraz opracowanie produktów pochodnych. Załącznik nr 1 do SIWZ – Szczegółowy Opis Przedmiotu Zamówienia wraz z załącznikami – Warunki techniczne.
- GUGiK, 2013. Warunki techniczne na realizację usługi weryfikacji danych w ramach projektu ISOK – INiK3. Załącznik nr 1 do SIWZ – Szczegółowy Opis Przedmiotu Zamówienia wraz z załącznikami – Warunki techniczne.

Norma ISO 19115 (ISO 19115: Geographic information – Metadata).

Norma ISO 19139 (ISO 19139: Geographic information Metadata XML schema implementation).

Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 5 września 2013 r. w sprawie organizacji i trybu prowadzenia państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (Dz.U. z 2013 r. poz. 1183).

Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 9 lipca 2014 r. w sprawie udostępniania materiałów państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego, wydawania licencji oraz wzoru Dokumentu Obliczenia Opłaty (Dz.U. z 2014 r. poz. 917).

Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (Dz.U. z 2011 r. Nr 263 poz. 1571).

Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 17 listopada 2011 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych (Dz.U. z 2011 r. Nr 279 poz. 1642 z późn. zm.).

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Dz.U. z 2012 r. poz. 1247).

Ustawa Prawo geodezyjne i kartograficzne z dnia 17 maja 1989 r. (Dz.U. z 1989 r. Nr 30 poz. 163 z późn. zm.).

Ustawa z dnia 4 marca 2010 r. o infrastrukturze informacji przestrzennej (Dz.U. z 2010 r. Nr 76 poz. 489 z późn. zm.).

## Strony internetowe

[www.asprs.org](http://www.asprs.org)

[www.codgik.gov.pl](http://www.codgik.gov.pl)

[www.geoport.gov.pl](http://www.geoport.gov.pl)

[www.isok.gov.pl](http://www.isok.gov.pl)

[www.mapy.isok.gov.pl](http://www.mapy.isok.gov.pl)

[www.powodz.gov.pl](http://www.powodz.gov.pl)

## 3. Lotnicze skanowanie laserowe – podstawy teoretyczne

dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW

### 3.1. Zasada działania i uwarunkowania sprzętowe systemu ALS

#### 3.1.1. Zasada działania

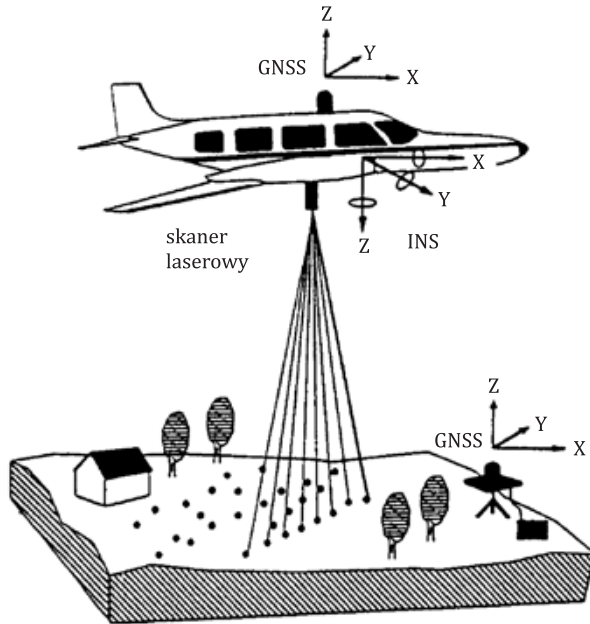
Ideę skanowania laserowego można sprowadzić do zasady laserowego pomiaru odległości z lecącego samolotu (helikoptera) do punktów powierzchni terenu. Jeżeli gęstość terenowych punktów pomiarowych jest dostatecznie duża, to w efekcie uzyskuje się quasi-ciągłą, przestrzenną reprezentację powierzchni terenu.

W praktyce, promień dalmierza laserowego, wysłany przez zwierciadło skanujące lub układ światłowodów, „przechodzi” teren w płaszczyźnie poprzecznej do kierunku lotu. Laser działa impulsowo i z dużą częstotliwością „próbkuje” teren. Energia częściowo odbita od powierzchni terenu jest odbierana przez układ optyczny skanera i rejestrowana. Tak jak w tradycyjnym dalmierzu laserowym, na podstawie pomiaru czasu powrotu odbitego sygnału określa się odległość: samolot – punkt terenowy.

Z dalmierzem synchronicznie współpracuje system GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*), określający pozycję samolotu, z którego wysłano impuls, oraz inercyjny system nawigacyjny (ang. INS), określający aktualne nachylenia kątowe i wektory przyspieszeń platformy, na której zamontowana jest optyczna głowica skanująca. Integracja danych z tych trzech systemów pomiarowych daje położenie, z którego wykonano pomiar odległości, samą odległość i jej kierunek w przestrzeni. Pozwala to określić współrzędne punktu terenowego (X, Y, H), w który w danym momencie był wycelowany dalmierz laserowy (ryc. 3.1). Nietrudno dostrzec, że – na poziomie idei działania – lotniczy skaner laserowy działa jak szybki tachimetr elektroniczny, dlatego też system ten nazywany jest także „Lotniczą Total Station”.

Z opisaney zasady działania widać podobieństwo skanera laserowego do radaru. Istotna różnica sprowadza się do tego, że radar działa w zakresie mikrofalowym, a skaner laserowy w zakresie optycznym. Z tych powodów skaner laserowy często określa się

mianem radaru laserowego lub LiDAR (ang. *Light Detection And Ranging*), tj. systemu, na który składa się laser (emiter światła spójnego) i odbiornik światła odbitego. Pozwala to określić odległość do obiektu.



Ryc. 3.1. Zasada działania lotniczego skanera laserowego

W literaturze, lotnicze skanowanie laserowe, często określa się akronimem **ALS** (ang. *Airborne Laser Scanning*), w odróżnieniu od **TLS** (ang. *Terrestrial Laser Scanning*), odnoszącego się do naziemnego skanowania laserowego, gdzie sam skaner instalowany jest na nieruchomym statywie (tzw. skanowanie stacjonarne) lub ruchomej platformie (samochodowej, kolejowej, innej – tzw. mobilne skanowanie). W przypadku ruchomej platformy funkcjonuje określenie **MLS** (ang. *Mobile Laser Scanning*).

### 3.1.2. Architektura systemu

Na system lotniczego skanowania laserowego składają się dwa segmenty: pokładowy („powietrzny”) i naziemny. W skład segmentu pokładowego wchodzi:

- dalmierz laserowy (ang. *Laser Range Finder – LRF*),
- system pozycjonowania trajektorii lotu oparty na GNSS,
- inercjalny system nawigacyjny INS (ang. *Inertial Navigation System*),
- kadrowa kamera cyfrowa (ewentualnie kamera lub kamery wideo),
- blok rejestracji danych,
- system planowania i zarządzania lotem.

Na segment naziemny składają się:

- naziemna, referencyjna stacja GNSS,
- specjalistyczne oprogramowanie oraz operator do obróbki, przetwarzania danych i generowania wynikowych produktów (tryb *off-line*).

Dalmierz laserowy (LRF) wykorzystuje zakres podczerwieni (bliska podczerwień, najczęściej 1064 nm) lub rzadziej – zakres widzialny. Dalmierz działa impulsowo, z częstotliwością rzędu kilkudziesięciu i więcej kHz (obecnie do 500 kHz), oznacza to próbkowanie (pomiar odległości) do kilkudziesięciu tysięcy (i więcej) punktów na sekundę. Promień lasera, przez optyczny układ skanujący, kierowany jest zwykle w płaszczyźnie poprzecznej do trajektorii lotu. Rejestrowany jest kąt wychylenia promienia od linii pionu (ang. *nadir-off*). W wyniku ruchu samolotu uzyskuje się podczas jednego przelotu dane z wąskiego, prostokątnego pasa terenu pod samolotem – tzw. **szereg danych ALS**. Impuls laserowy dociera do obiektów na powierzchni terenu i jest przez nią rozpraszany. Część energii odbija się w kierunku samolotu i może być zarejestrowana przez optyczny układ odbiorczy, a na jej podstawie określona jest odległość. Oznacza to, że laser musi być odpowiednio silny, silniejszy od używanych w zwykłych dalmierzach naziemnych, gdzie odbicie następuje od lustra na drugim końcu mierzonej odległości. Moc skanera, jak również wymogi bezpieczeństwa, nakładają ograniczenia zakresu działania systemu lotniczego skanowania laserowego.

Nieodłącznym elementem skanowania laserowego jest system GNSS zintegrowane z systemem INS. Pozwala to z dużą częstotliwością mierzyć położenie samolotu i orientację kątową układu skanującego, co w rezultacie oznacza pomiar orientacji w przestrzeni długości pomierzonej do każdego punktu ALS, a tym samym pozwala wyznaczyć przestrzenne położenie takiego punktu w przyjętym układzie współrzędnych. Realizowana jest więc idea pomiaru w locie elementów orientacji skanera, tzw. georeferencja wprost, przed procesem korekcji danych GNSS ze stacji referencyjnych i wyrównaniem.

#### 3.1.3. Realizacja misji fotolotniczej. System zarządzania lotem

Obszar opracowania tzw. Blok LiDAR pokrywa się równoległymi szeregami skanowania o częściowym wzajemnym pokryciu poprzecznym. System planowania i zarządzania lotem zawiera wcześniej przygotowany plan lotu. W trakcie realizacji misji odbiornik GNSS na bieżąco określa aktualne położenie samolotu. Na monitorze pilot otrzymuje informację graficzną i numeryczną o położeniu samolotu na tle wcześniej przygotowanego planu lotu. To pomaga precyzyjnie prowadzić samolot po zaplanowanych osiach szeregów. System planowania, zarządzania i realizacji misji lotniczej skanowania laserowego nie różni się zasadniczo od podobnych systemów używanych podczas zwykłych misji fotogrametrycznych.

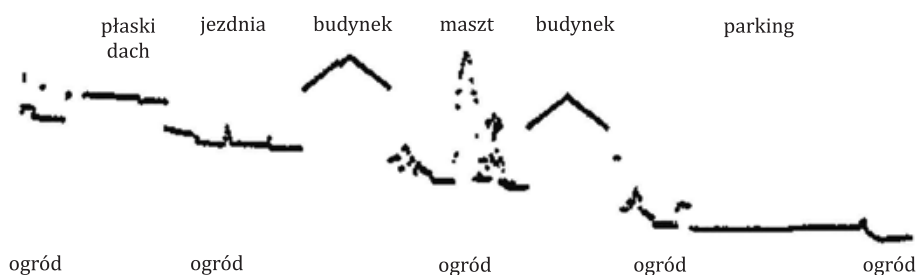
Ze skanerem laserowym może współpracować kamera wideo skierowana pionowo w dół. Kamera ta rejestruje pas terenu szerszy od zasięgu lasera. W celu synchronizacji danych ze skanera laserowego z zapisem wideo każda klatka zapisu obrazu ma zarejestrowany numer i dokładny czas. Oprócz kamery rejestrującej w nadirze, można zainstalować drugą kamerę, skierowaną pod kątem 45° do przodu i dającą perspektywiczny wgląd w obrazowany teren.

Obrazy wideo na etapie obróbki danych są przydatne do interpretacji pokrycia terenu i filtrowania danych pomiarowych. Mogą stanowić również tani, samodzielny produkt w budowanym systemie GIS. Obecnie, zamiast kamer wideo, częściej łączy się rejestrację skanerem laserowym z rejestracją kadrową kamerą cyfrową, zwykle średnioformatową. Zdjęcia takie są przydatne na etapie opracowania danych ALS – mogą służyć do opracowania cyfrowej ortofotomapy oraz tzw. kolorowania chmur punktów wartościami RGB obrazów z kamery. Stanowi to więc połączenie dwóch różnych i niezależnych systemów pozyskiwania danych, tj.: skanera ALS i kamery cyfrowej.

### 3.1.4. Specyfika danych systemu ALS

Z przedstawionego działania systemu skanowania laserowego widać, że w wyniku pomiaru otrzymuje się gęstą sieć punktów o współrzędnych (X,Y, H) określaną jako chmura punktów w układzie współrzędnych WGS-84 lub przeliczoną na inny układ, reprezentującą terenowe punkty, od których odbił się promień lasera (ryc. 3.2).

Opisany proces jest prawie całkowicie zautomatyzowany. Zwykle nie jest to jednak produkt końcowy. Jeżeli produktem finalnym jest na przykład numeryczny model terenu odniesiony do powierzchni gruntu, to wszystkie odbicia od obiektów nie leżących na powierzchni gruntu (jak budynki, drzewa, samochody, kable linii przesyłowej czy nawet ptaki) muszą być usunięte. Ten proces filtrowania danych pomiarowych realizowany jest po misji (tryb *off-line*) i wymaga specjalistycznego oprogramowania i znacznych mocy obliczeniowych. Obróbka danych pomiarowych prowadzona jest interaktywnie i może być zautomatyzowana tylko do pewnego stopnia.

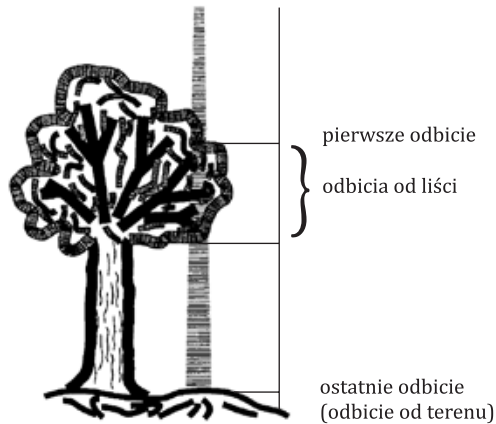


Ryc. 3.2. Profil danych ALS (widoczne odbicia od różnych obiektów terenowych)

Możliwa jest także rejestracja kilku odbić pojedynczego impulsu laserowego. Jeżeli impuls trafi na obszar zadrzewiony, to pierwsze częściowe odbicie nastąpi od korony drzewa, reszta energii przejdzie przez koronę i odbije się od powierzchni gruntu (ryc. 3.3). Między tymi skrajnymi odbiciami mogą pojawić się odbicia pośrednie. Niektóre systemy laserowe rejestrują tylko pierwsze, ostatnie lub oba odbicia (tzw. echa). Istnieją systemy rejestrujące odbicia pośrednie – nawet do 5 odbić oraz systemy rejestrujące pełny kształt fali powracającej, co umożliwi na etapie obróbki wyekstrahowanie wielu odbić. Ma to istotne znaczenie dla stosowania systemu. Na podstawie zarejestrowanych dwóch lub więcej odbić można określić np. wysokość drzew, a nawet numeryczny model wysokości pokrywy lasu

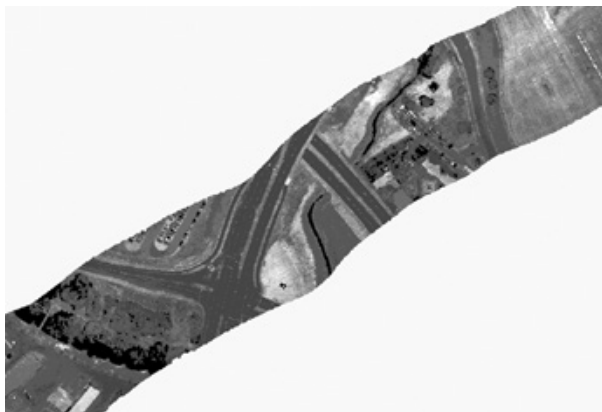


względem powierzchni terenu (tzw. znormalizowany NMPT) czy np. zwis kabli energetycznych. Dla impulsów, które trafią na powierzchnię gruntu lub dach budynku, nastąpi tylko jedno odbicie (pierwsze echo jest równe ostatniemu).



Ryc. 3.3. Wielokrotne odbicia impulsu laserowego od korony drzewa

Obiekty naziemne w różnym stopniu odbijają padającą energię. Najmniejsze odbicie w zakresie bliskiej podczerwieni następuje od powierzchni wody, zaś największe dla lodu i śniegu (50–80%); dla roślinności wynosi ono 30–50%, dla piasku 10–20%. Przy braku sygnału powrotnego, mogą powstać „martwe pola” na skanowanej powierzchni. Nowsze systemy mogą rejestrować intensywność sygnału powrotnego, dając obraz podobny do zdjęcia czarno-białego – tzw. **obraz intensywności** (ang. *intensity image*). Może to ułatwić interpretację punktów ALS i dać podstawę do rozróżnienia pokrycia powierzchni terenu, a nawet automatycznego rozpoznawania obiektów (ryc. 3.4).

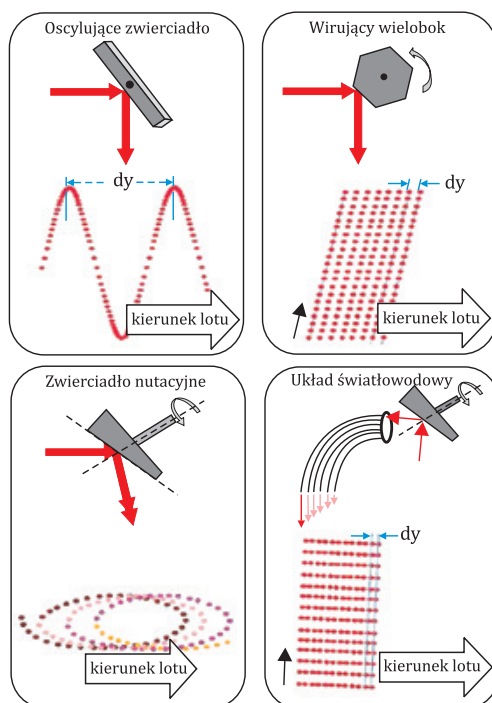


Ryc. 3.4. Obraz intensywności danych ALS (widoczne drogi, skrzyżowania, obszary rekreacyjne itd.)

### 3.1.5. Optyczny układ skanujący

Terenowy ślad linii skanowania oraz rozkład punktów ALS w linii zależą od optycznego układu skanującego. Zilustrowano to na ryc. 3.5. Elementami skanującymi w układach optycznych skanerów mogą być:

1. Oscylujące zwierciadło.  
Ślad linii skanowania tworzy układ zygzakowatych linii prostych lub linie sinusoidalne, o zmiennej gęstości punktów.
2. Wirujący wielobok o zwierciadlanych płaszczyznach.  
Ślad linii skanowania tworzy w terenie układ równoległych linii.
3. Zwierciadło nutacyjne (tzw. skaner Palmera).  
Wirujący promień lasera zatacza stożek, co tworzy układ punktów ALS po elipsach, których ślady przesuwają się w kierunku lotu.
4. Układ światłowodowy.  
Obrotowe zwierciadło kieruje promień lasera na wiązkę światłowodów wyprowadzających energię w formie linii prostopadłej do kierunku lotu. W efekcie chmurę punktów ALS tworzy ciąg linii prostopadłych do kierunku lotu.



Ryc. 3.5. Optyczne układy skanujące i rozkład zeskanowanych punktów na powierzchni terenu  
(źródło: Vosselman, Mass, 2010)

## 3.2. Typowe parametry użytkowe systemów ALS

Wśród ważnych parametrów użytkowych lotniczego skanowania laserowego, decydujących o jego użyteczności i wydajności można wymienić:

- długość fali lasera,
- długość impulsu,
- rozbieżność wiązki lasera,
- energię impulsu,
- tryb skanowania,
- częstotliwość impulsów laserowych,
- częstotliwość skanowania,
- całkowity kąt skanowania,
- wysokość lotu,
- szerokość obrazowanego pasa,
- dokładność dalmierza,
- dokładność pozycjonowania skanera (system GNSS) i pomiaru kątów orientacji (system INS).

Odległość linii skanowania w terenie zależy od częstotliwości skanowania i prędkości lotu. Odległość punktów ALS w linii uwarunkowana jest częstotliwością impulsów systemu, kątem skanowania oraz wysokością lotu. Zwykle tak dobiera się te parametry, aby – w przybliżeniu – otrzymać równomierny rozkład punktów ALS w terenie. Stosowanym parametrem użytkowym, określającym pokrycie powierzchni terenu punktami ALS jest tzw. **gęstość skanowania**, wyrażana w liczbie zarejestrowanych punktów pomiarowych na jednostkę powierzchni terenu. Gęstość skanowania jest pochodną parametrów systemu skanującego oraz parametrów lotu (prędkości i wysokości lotu). Przy określeniu gęstości bierze się pod uwagę zazwyczaj wyłącznie pierwsze odbicia lasera.

Pożądana gęstość punktów zależy od zastosowania, jeśli np. celem skanowania jest opracowanie numerycznego modelu terenu, to stosowana w praktyce gęstość zawiera się w przedziale 0,5–10 punktów/m<sup>2</sup>. W tabeli 3.1 zawarto typowe parametry użytkowe skanerów lotniczych.

Wiodącymi producentami systemów skanowania laserowego na rynku są firmy: Optech Inc. (Kanada), Leica Geosystems (Szwajcaria), Riegl (Austria) oraz Trimble Geospatial (Niemcy). W tabeli 3.2 przedstawiono podstawowe parametry wybranych lotniczych systemów skanowania laserowego.

Tabela 3.1. Typowe parametry użytkowe lotniczych systemów skanowania laserowego

Parametr	Typowe wartości
długość fali lasera	1,064 $\mu\text{m}$
częstotliwość generowania impulsu	kilkadziesiąt kHz (max 500 kHz)
długość impulsu	10 ns
rozbieżność wiązki impulsu	0,25–2 mrd

Tabela 3.1. cd.

Parametr	Typowe wartości
częstotliwość skanowania	25–40 Hz
wysokość lotu	helikopter 200–300 m samolot 500 – 1000 m (max 6000 m)
kąt skanowania (całkowity)	20°–40° (max 75°)
szerokość obrazowanego pasa	0,35–0,7 wysokości lotu
odległość pomiędzy punktami ALS w terenie	0,2–2 m
częstotliwość rejestracji GNSS	0,5–2 Hz
częstotliwość rejestracji INS	50 Hz (max 400 Hz)
dokładność położenia punktów ALS	– sytuacyjna: 0,4 m – wysokościowa: 0,1 m
cena systemu	500–800 tys. USD

### Trendy rozwoju systemów ALS

Pierwsze systemy lotniczego skanowania laserowego pojawiły się w połowie lat 90 XX wieku. W minionych kilku/kilkunastu latach technika zaczęła intensywnie się rozwijać. Rozwój ten obserwuje się zarówno w doskonaleniu samych systemów laserowych (segment pokładowy), jak i metod obróbki danych laserowych.

W zakresie rozwoju systemów skanowania laserowego rozwój idzie w kierunku wzrostu ich wydajności oraz wzrostu liczby rejestrowanych odbić (ech) pojedynczego impulsu laserowego. Wzrost wydajności osiągnąć jest poprzez wzrost częstotliwości generowania impulsów laserowych.

W zakresie opracowania danych ALS rozwój polega na doskonaleniu metod wyrównania bloków szeregów ALS oraz metod klasyfikacji i filtracji chmury punktów ALS. Zważywszy na ogromne zbiory danych mają tu zastosowanie metody automatyczne.

Niektóre z tych problemów są naświetlone w dalszej części rozdziału.

Tabela 3.2. Podstawowe parametry wybranych lotniczych systemów skanowania laserowego

Skaner	Tryb skanowania	Częstotliwość skanowania [Hz]	Częstotliwość impulsów laserowych [kHz]	Kąt skanowania [°]	Rozbieżność wiązki lasera [mrad]	Energia impulsu [μJ]	Dokładność dalmierza [cm]	Długość impulsu [ns]	Digitizer [ns]
Optech 2033	lustro skanujące	0-70	33	±20	0,2 / 1,0	N/A	1,0	8,0	N/A
Optech 3100	lustro skanujące	0-70	33-100	±25	0,3 / 0,8	< 200	1,0	8,0	1
Optech Gemini	lustro skanujące	0-70	167	±25	0,15 / 0,25 / 0,8	< 200	3,0	7,0	N/A
Optech Orion	lustro skanujące	-100	167	±25	0,25	< 200	2,0	7,0	N/A
TopoEye MkII	skanowanie stożkowe	35	5-50	14,20	1,0	N/A	< 1,0	4,0	0,5
TopoSys I	liniowy	653	83	±7,15	1,0	N/A	6,0	5,0	N/A
TopoSys II Falcon	liniowy	653	83	±7,15	1,0	N/A	2,0	5,0	1
Trimble Harrier	wirujący pryzmat	160	160	±30	0,5	N/A	2,0	4,0	1
Leica ALS50	lustro skanujące	25-70	83	±37,5	0,33	N/A	N/A	10	N/A
Leica ALS50-II	lustro skanujące	35-90	150	±37,5	0,22	N/A	N/A	10	1
Leica ALS60	lustro skanujące	0-100	200	±37,5	0,22	N/A	3,0-4,0	5,0	1
Riegl LSM-Q560	liniowy	160	240	±30,0	0,3	8	2,0	4,0	1
Riegl LSM-Q680i	liniowy	200	266	±30,0	0,5	8	2,0	4,0	1

### 3.3. Skaner batymetryczny

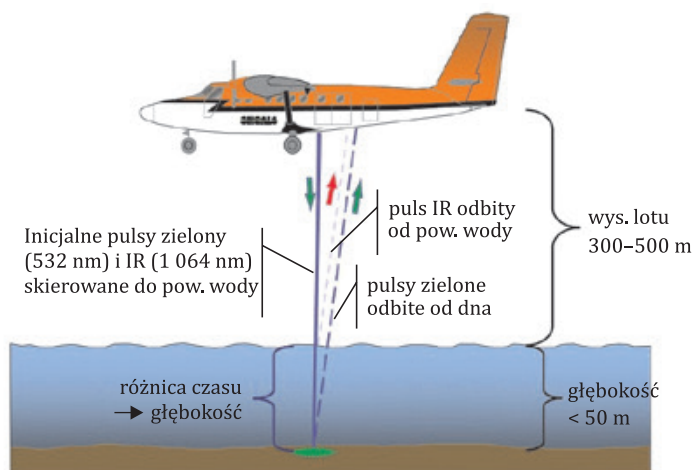
Przedstawione powyżej lotnicze systemy skanowania laserowego można określić jako „topograficzne”, tj. służące do zbierania danych wysokościowych na lądzie. Obok nich występują również systemy batymetryczne, których promień lasera może penetrować wodę i na tej podstawie dawać informacje o obecności obiektów podwodnych czy topografii dna morskiego. Zasięg takiej penetracji zależy od przezroczystości (czystości) wody. Dla morskich wód przybrzeżnych może sięgać do 50 m.

Zależność przenikania promieni laserowych przez wodę zależy od jej czystości (przezroczystości). Jest to tak silna i oczywista zależność, że głębokość penetracji danego systemu podaje się zwykle nie w formie głębokości penetracji wyrażonej w metrach głębokości, ale w formie wielokrotności widoczności – tzw. krążka Secchiego.

Krążek Secchiego to skonstruowany przez Pietro Angelo Secchiego przyrząd do pomiaru przezroczystości wody. Krążek Secchiego jest białą, matową płytką w kształcie koła o standaryzowanej średnicy i bieli. Opuszczany jest z łódki w danym zbiorniku wodnym na wyskalowanej linie lub przecie z podziałką centymetrową. Czystość wód określa się głębokością, do której jest jeszcze widoczny krążek.

Penetracja systemów batymetrycznych zawiera się w przedziale od 1 do 3 głębokości krążka Secchiego.

Koncepcję działania skanera batymetrycznego zilustrowano na ryc. 3.6. System wykorzystuje jednocześnie dwa lasery w zakresie światła: podczerwonego i zielonego. Wiązki zwykle nie są prostopadle skierowane do powierzchni terenu, jak w przypadku lotniczego skanowania laserowego topograficznego, ale do przodu, pod kątem 15–20°.



Ryc. 3.6. Koncepcja działania systemu skanowania batymetrycznego. Impuls IR odbija się od powierzchni wody lub lądu, podczas gdy impuls zielony penetruje wodę i odbija się od dna zbiornika wodnego (źródło: Quadros, Collier, Fraser, 2008)

Przykładem systemu batymetrycznego jest system SHOALS produkcji firmy Optech (Kanada). System ten wykorzystuje dwa lasery: laser niebiesko-zielony (długość fali 532 nm) i laser podczerwony (bliska podczerwień, długość fali 1064 nm). System wysyła oba impulsy laserowe jednocześnie, promień podczerwony doznaje na powierzchni wody rozproszenia i częściowego odbicia zwierciadlanego, promień niebiesko-zielony przenika przez wodę, doznaje rozproszenia i częściowo odbija się od dna. Na podstawie różnicy odległości zarejestrowanej z obu promieni laserowych określa się głębokość wody. System SHOALS jest przeznaczony głównie do pomiaru strefy brzegowej wybrzeża morskiego i topografii dna morskiego w strefie przybrzeżnej. Penetruje wodę do głębokości 50 m ([www.optech.ca](http://www.optech.ca)).

Skanery batymetryczne mogą być wykorzystywane również do pomiarów batymetrycznych wód śródlądowych: jezior i rzek. Czystość takich wód jest bardzo zróżnicowana, a efektywna głębokość penetracji zwykle znacznie mniejsza niż w przybrzeżnej strefie morskiej.

Skanery batymetryczne, oprócz tego, że wykorzystują laser zielony, różnią się od topograficznych znacznie większą mocą, mniejszą częstotliwością impulsów laserowych i operowaniem z mniejszych wysokości lotu. W tabeli 3.3 zestawiono podstawowe parametry obu rodzajów skanerów.

Tabela 3.3. Porównanie typowych parametrów skanerów topograficznego i batymetrycznego (źródło: Toth, 2011)

Parametr	Skaner topograficzny	Skaner batymetryczny
długość fali lasera	1064 nm (IR)	530 nm (zielony)
rozbieżność wiązki impulsu wysłanego	wąska (0,3 mrd)	wąska (0,3 mrd)
rozbieżność wiązki impulsu powracającego	wąska (0,3 m z wys. 1000 m)	duża (2 m z wys. 300 m)
częstotliwość generowania impulsu	duża (do 400 kHz)	mała (1–10 kHz)
szerokość impulsu	krótka (5–10 ns)	krótka (<5 ns)
energia emitowana	mała (5–10 $\mu$ J)	duża (5–10 mJ)
kąt padania	nadir (0°)	do przodu (15–20°)
sensor laserowy	pojedynczy laser	podwójny laser (2 długości fali)
dokładność pomiaru odległości	1–3 cm	3–5 cm
ślad skanowania	równoległe linie, sinusoidalny	eliptyczne linie (skaner Palmera)
sensory optyczne	kamera cyfrowa MS	kamera cyfrowa HSI/MS
georeferencja	GNSS/INS	GNSS/INS
platforma	samolot, helikopter	samolot, helikopter
wysokość lotu	500–1000 m (i więcej)	300–500 m
przetwarzanie	dyskretne odbicia, pełny kształt fali	pełny kształt fali

## 3.4. Penetracja szaty roślinnej. Skanowanie pełną długością fali

### 3.4.1. Penetracja szaty roślinnej

W obszarach zalesionych znaczna część impulsów laserowych odbija się od koron drzew i tylko część z nich dociera do powierzchni gruntu. Zależy to od gatunku drzew, zwarcia koron i pory roku. Ocenia się, że w porze zimowej przez korony drzew dociera do powierzchni gruntu około 35% impulsów laserowych w lesie iglastym i ponad 60% w lesie liściastym. W porze letniej penetracja ta wynosi odpowiednio 25–40% dla lasu iglastego i 20–25% dla lasu liściastego. Penetracja przez roślinność jest unikatową cechą skanowania laserowego, szczególnie przydatną dla budowy numerycznego modelu terenu i stanowi o jego przewadze nad tradycyjnymi zdjęciami lotniczymi w tym zakresie.

Stwierdzenia, że lotnicze skanowanie laserowe penetruje roślinność nie należy rozumieć dosłownie. Liście na drzewach i same konary są przeszkodą dla promieniowania laserowego, promień laserowy nie może przeniknąć przez liść czy inną przeszkodę. Należy jednak uwzględnić fakt, że promień laserowy, to w istocie rozbieżna wiązka promieniowania, która trafiając na drzewo, częściowo przenika między liśćmi i może dotrzeć do gruntu, odbić się od niego i powrócić do skanera.

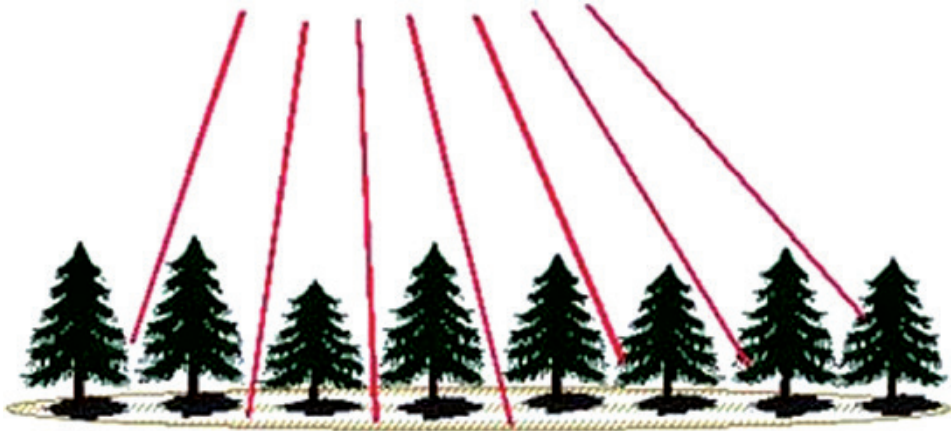
Penetrację impulsów przez zwarty las widać na profilu danych skanowania laserowego, gdzie łatwo wyróżnić punkty odbite od koron drzew i od powierzchni gruntu (ryc. 3.7). Dla większości aplikacji pożądana jest duża penetracja punktów ALS przez szatę roślinną. Tak jest np. przy zastosowaniu danych ALS do budowy numerycznego modelu terenu (NMT), gdzie liczą się tylko punkty odbite od powierzchni gruntu, pozostałe muszą być odfiltrowane w procesie opracowania. Jest to na tyle ważne, że dla zwiększenia gęstości punktów odbitych od gruntu obrazowanie ALS korzystniej jest realizować w porze jesienno-zimowo-wiosennej, tj. w okresie, w którym nie ma liści na drzewach liściastych.



Ryc. 3.7. Profil zeskanowanych danych przez obszar zalesiony

Nie bez znaczenia jest tu również kąt skanowania. Penetracja impulsów w zwartym lesie jest najlepsza w strefie nadirowej i maleje ku brzegom skanowanego pasa (ryc. 3.8). W celu zwiększenia penetracji ogranicza się kąt skanowania w obszarach zalesionych do około  $\pm 20 - 25^\circ$ .





Ryc. 3.8. Zmiana penetracji impulsów laserowych przez korony drzew w polu widzenia skanera

### 3.4.2. Analiza pełnego kształtu fali sygnału powracającego

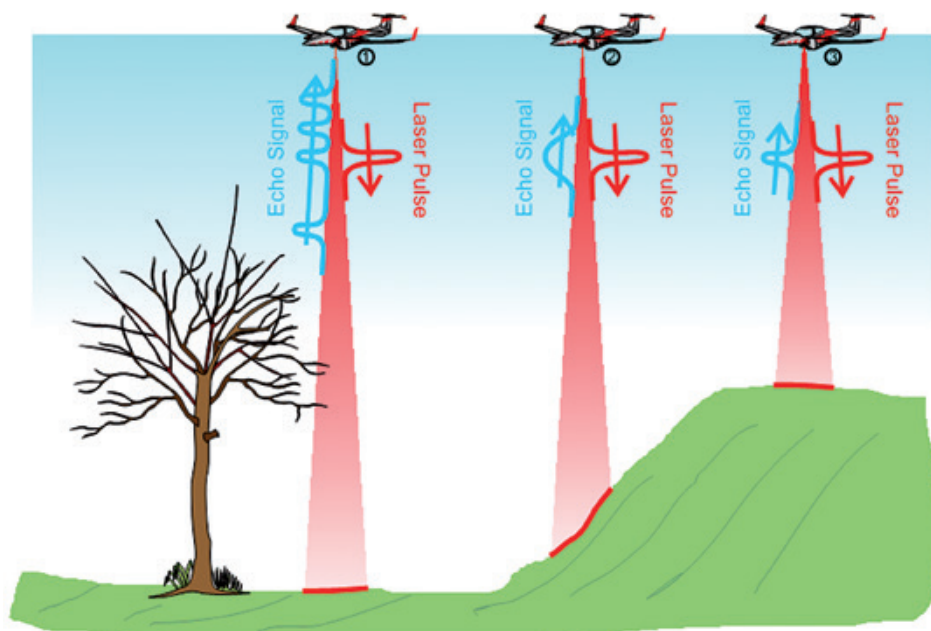
Ważnym dla użytkownika parametrem skanowania jest liczba rejestrowanych odbić (ech) pojedynczego impulsu laserowego. Jeśli impuls napotyka na swej drodze np. drzewo czy kable napowietrzne, to może nastąpić kilka odbić, niosących informacje o „przestrzeni” obiektu. Z tego punktu widzenia można wyróżnić 3 generacje skanerów:

- generacja 1: rejestracja czasu odbicia jednego impulsu (pierwszego echa),
- generacja 2: rejestracja pierwszego i ostatniego echa, a nawet więcej, do 5 ech,
- generacja 3: pomiar nie tylko odległości do obiektu, ale pełnego kształtu fali odbitej (ang. *full-waveform*).

Wyślany impuls laserowy może przenikać i częściowo odbijać się od kilku obiektów napotkanych po drodze. Przykładem jest roślinność – impuls odbija się częściowo od korony drzewa, niżej położonych krzewów i następnie od gruntu (ryc. 3.9, 3.10).

Należy zdawać sobie sprawę, że promień laserowy ma pewną rozbieżność, w wyniku której ślad tego promienia w terenie, tzw. plamka (ang. *beam*), przyjmuje w rzeczywistości kształt eliptyczny. Jej rozmiar zależy od kąta zbieżności promienia, wysokości lotu i kąta, pod którym promień pada na powierzchnię terenu. Jeśli np. rozbieżność promienia wynosi 0,3 mrd (miliradiana), to z wysokości lotu równej 1000 m, w części nadirowej, da to ślad w terenie w kształcie koła o średnicy 0,3 m. Ślad ten będzie się zwiększał ku skrajom pasa obrazowania i przyjmie kształt elipsy. Dodatkowy wpływ na kształt plamki ma nachylenie terenu (ryc. 3.9). Sygnał odbity od powierzchni prostopadłej będzie charakteryzował się bardziej zwartą energią (większa amplituda przy mniejszej szerokości echa), w przeciwieństwie do odbicia od powierzchni nachylonej (mniejsza amplituda przy większej szerokości echa).

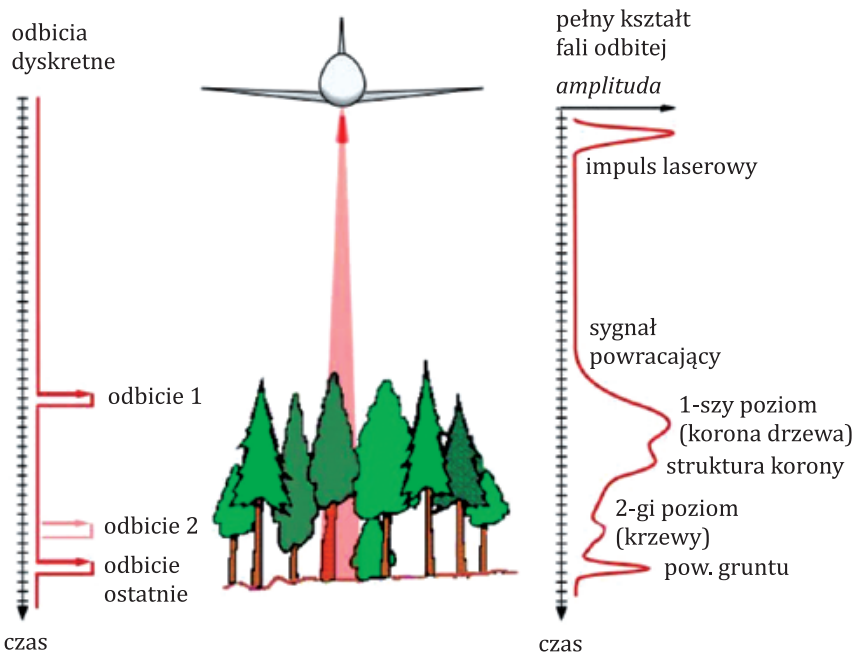
W sygnale powracającym można wyróżnić odbicie od powierzchni gruntu w formie silnego „piku”, którego kształt będzie zależał od kilku czynników (właściwości odbiciowych powierzchni i nachylenia powierzchnia terenu). Jeśli impuls laserowy napotka po drodze inny obiekt (np. drzewo, kable itp.), od którego nastąpiło częściowe odbicie, to kształt powracającego sygnału jest bardziej złożony i da się w nim wyróżnić kilka „pików” energii (ryc. 3.9, 3.10). Ich maksima są interpretowane jako dyskretne (punktowe) odbicia o określonej odległości skaner–obiekt, co daje w wyniku kilka zarejestrowanych ech.



Ryc. 3.9. Porównanie kształtu sygnału laserowego emitowanego i odbitego w zależności od powierzchni odbijającej (źródło: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))

W systemach trzeciej generacji (tzw. *full-waveform*) rejestruje się pełny kształt fali odbitej. Powracający ciągły sygnał podlega digitalizacji (inaczej: dyskretyzacji, kwantowaniu) z dużą częstotliwością tak, że zarejestrowane punktowe wartości amplitudy oddają kształt fali ciągłej (ryc. 3.11, 3.12, 3.13). Na etapie obróbki danych ALS pozwala to wyodrębnić wielu ech. Wyjaśniono to na ryc. 3.12. Pierwszy wykres etapu pozyskiwania danych ilustruje analogowy impuls laserowy wysłany przez system laserowy (kolor czerwony), a następane 3 sygnały (niebieskie) odpowiadają sygnałowi odbitemu od konarów drzewa, ostatni sygnał – odbiciu od gruntu. Sytuacja ta odpowiada przypadkowi pierwszemu na rycinie 3.9. Ten analogowy sygnał jest próbkowany (kwantowany) ze stałym czasowym interwałem (środkowy wykres), a następnie konwertowany w przetworniku analogowo-cyfrowym do strumienia danych cyfrowych (dolny wykres).

Ten strumień danych jest zapisywany na nośniku do dalszego opracowania w trybie *offline* (post-processing).



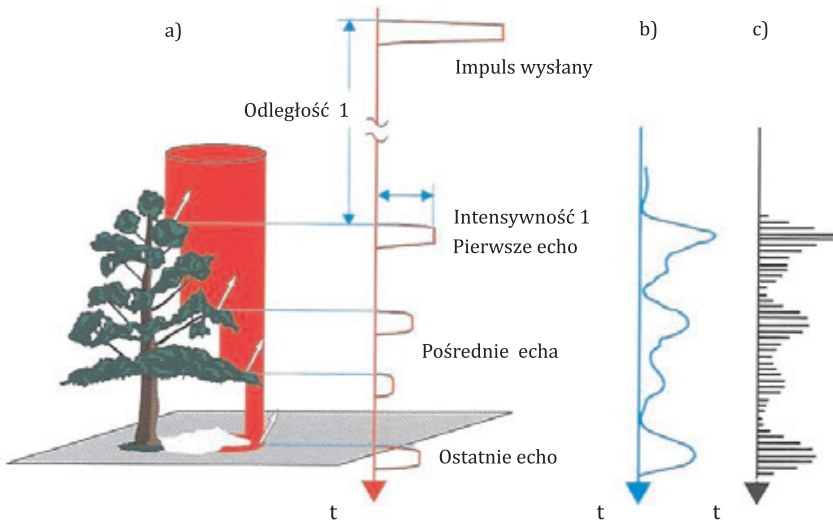
Ryc. 3.10. Porównanie odbitego sygnału laserowego przy tradycyjnym sposobie rejestracji (odbicie dyskretne) i przy rejestracji pełnego kształtu sygnału powracającego (źródło: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))

Na etapie post-processingu (dolna część ryc. 3.12) zapisany powracający sygnał (echo) jest perfekcyjnie rekonstruowany i szczegółowo analizowany w celu określenia odległości do celu, kształtu powracającego sygnału, wskaźników rodzaju obiektu, od którego nastąpiło odbicie oraz jego parametrów.

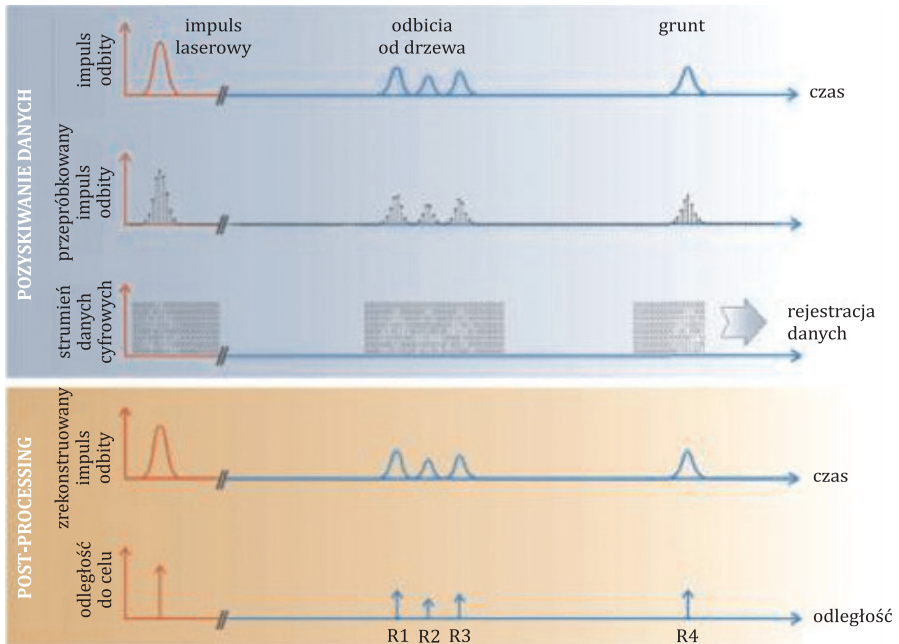
W zarejestrowanym odbitym sygnale można badać nie tylko odległość (wysokość obiektu), ale pełną charakterystykę echa (ryc. 3.13), a w tym:

- amplitudę (intensywność) odbicia  $P$  [DN],
- odległość  $R$  [m],
- szerokość echa  $S_p$  [ns].

Analiza taka pozwala na ekstrakcję dodatkowej informacji o właściwościach obserwowanych obiektów, ich „szorstkości” i właściwościach odbiciowych. Jest to istotny krok w kierunku modelowania fizykalnego, opisującego interakcję impulsu laserowego ze złożonymi obiektami naziemnymi. Przykładem takich obiektów są drzewa i inna roślinność.

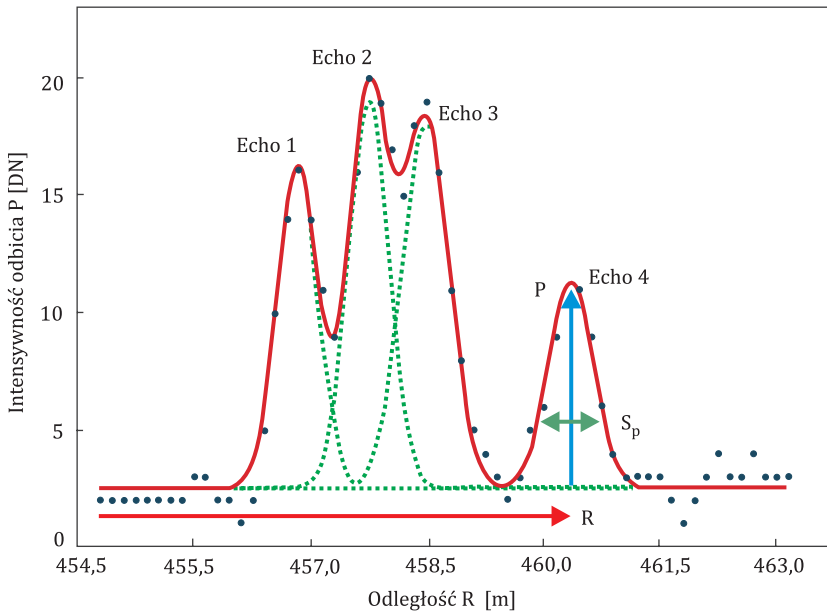


Ryc. 3.11. Wielokrotne echa impulsu laserowego i pełny kształt fali powracającego sygnału: a) – dyskretne echa, b) – ciągły kształt powracającego sygnału, c) – zdigitalizowany powracający sygnał (źródło: Vosselman, Mass, 2010)



Ryc. 3.12. Analiza pełnego kształtu fali sygnału odbitego: u góry – etap pozyskiwania danych, u dołu – etap rekonstrukcji pełnego kształtu fali sygnału (źródło: [www.rieggl.com](http://www.rieggl.com))

Analiza pełnego kształtu fali odbitej znajduje zastosowanie w leśnictwie, rolnictwie, inwentaryzacji terenów zurbanizowanych i obiektów „korytarzowych”, opracowaniu precyzyjnego NMT obszarów zagrożonych powodzią, planowaniu przestrzennym i innych. Analiza ta wymaga specjalistycznego oprogramowania. Jest to technika nowa, w fazie rozwoju, stąd można oczekiwać, iż znajdzie ona nowe zastosowania.



Ryc. 3.13. Analiza pełnego kształtu fali odbitej, pozwalająca wyróżnić kilka ech i określić ich charakterystykę (amplituda odbicia, odległość, szerokość echa) (źródło: Mandlbürger, 2009)

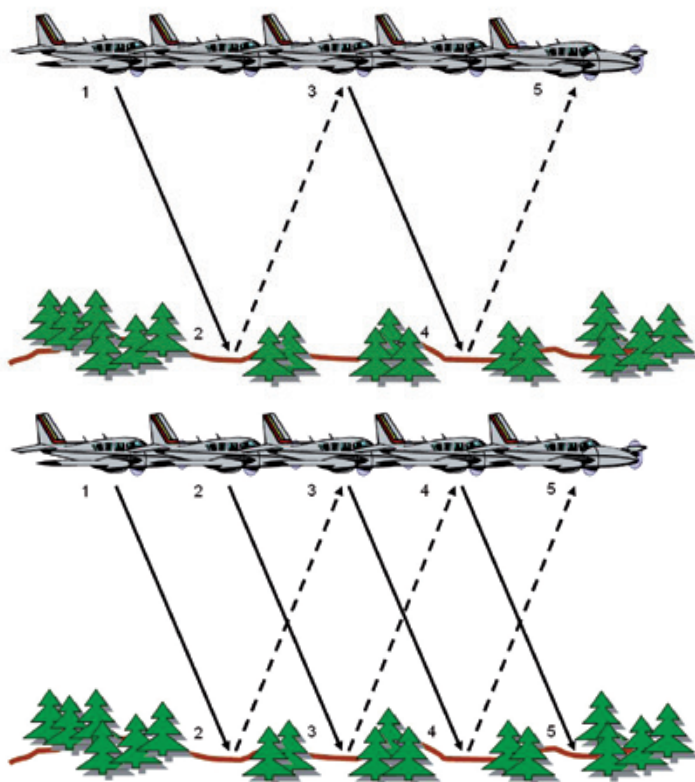
### 3.5. Technologia „wielokrotnych impulsów laserowych w powietrzu”

Rozwój systemów ALS zmierza w kierunku zwiększenia częstotliwości generowania impulsów laserowych, co sprzyja lepszej wydajności takich systemów, wyrażającej się zwiększeniem gęstości chmury punktów ALS na jednostkę powierzchni lub zwiększeniem szerokości obrazowanego pasa przez zwiększenie wysokości lotu.

Wzrost częstotliwości generowania impulsów napotyka jednak na ograniczenie wynikające z prędkości światła. W rozwiązaniu tradycyjnym system emituje impuls laserowy (ryc. 3.14, samolot w położeniu 1). Impuls dociera do powierzchni terenu (punkt 2), odbija się i powraca do samolotu. System odbiera impuls odbity i następnie wysyła kolejny impuls (położenie 3) itd.

W tym rozwiązaniu, w powietrzu, w danej chwili, znajduje się jeden impuls. Ogranicza to możliwą do zastosowania większą częstotliwość impulsów laserowych. Ma tu oczywiście również znaczenie wysokość lotu (większa wysokość wymusza mniejszą częstotliwość).

W dążeniu do przezwycięzenia tego problemu w ostatnich latach stosuje się technikę tzw. wielokrotnych impulsów laserowych w powietrzu – MPiA (ang. *MultiplePulses in Air*). W literaturze spotyka się również określenie MTA (ang. *Multiple-time-around*). Pokazano to na ryc. 3.14 (dolna część). System, nie czekając na powrót impulsu wysłanego w położeniu 1, wysyła następny impuls (położenie 2). W położeniu 3 odbiera impuls wysłany w położeniu 1, w tym czasie impuls wysłany z położenia 2 jest nadal w powietrzu itd.



Ryc. 3.14. Technologia „wielokrotnych impulsów laserowych w powietrzu” – MPiA (*Multiple Pulses in Air*). U góry – rozwiązanie tradycyjne (jeden impuls w powietrzu), u dołu – wielokrotne impulsy w powietrzu

Oznacza to, że w danym momencie w powietrzu są dwa, a nawet więcej impulsów laserowych. Tą drogą można znacznie zwiększyć częstotliwość generowania impulsów laserowych. Pojawia się jednak problem nieoznaczoności, nie wiadomo z którym momentem emisji impulsu należy skojarzyć impuls odebrany w danym momencie. Oczy-

wisty wpływ ma tu wysokość lotu oraz deniwelacje terenu. Aby uniknąć nieoznaczoności, strefy odbić powinny być odseparowane od siebie wysokościowo. Wynika z tego uzależnienie częstotliwości generowania impulsów i dopuszczalnej wysokości lotu.

### 3.6. Dobór parametrów lotu i pracy systemu ALS dla osiągnięcia zadanej gęstości chmury punktów

Z punktu widzenia użytkownika systemu skanowania laserowego i użytkownika wynikowych danych najważniejszym parametrem jest gęstość chmury punktów na powierzchni terenu. Drugi ważny parametr to szerokość obrazowanego pasa.

Można mówić o gęstości (odległości) linii skanowania i gęstości punktów ALS w linii. Oba te parametry kształtują różne czynniki. Na odległość linii skanowania wpływ mają:

- optyczny układ skanujący (ryc. 3.5),
- częstotliwość skanowania,
- prędkość lotu samolotu.

Gęstość punktów ALS w linii zależy od:

- optycznego układu skanującego (ryc. 3.5),
- kąta skanowania,
- częstotliwości generowania impulsów,
- wysokości lotu i deniwelacji terenu.

Rozkład punktów ALS na powierzchni terenu jest dodatkowo zaburzony przez zmiany kątów nachylenia platformy. Zwykle nakłada się warunek, aby gęstość chmury punktów na powierzchni terenu była (w przybliżeniu) równomierna.

Biorąc pod uwagę powyższe warunki, tak dobiera się parametry lotu (wysokość i prędkość), aby – dla danego systemu skanowania – otrzymać pożądaną gęstość chmury punktów ALS. Obok wymienionych powyżej wymogów należy również uwzględnić:

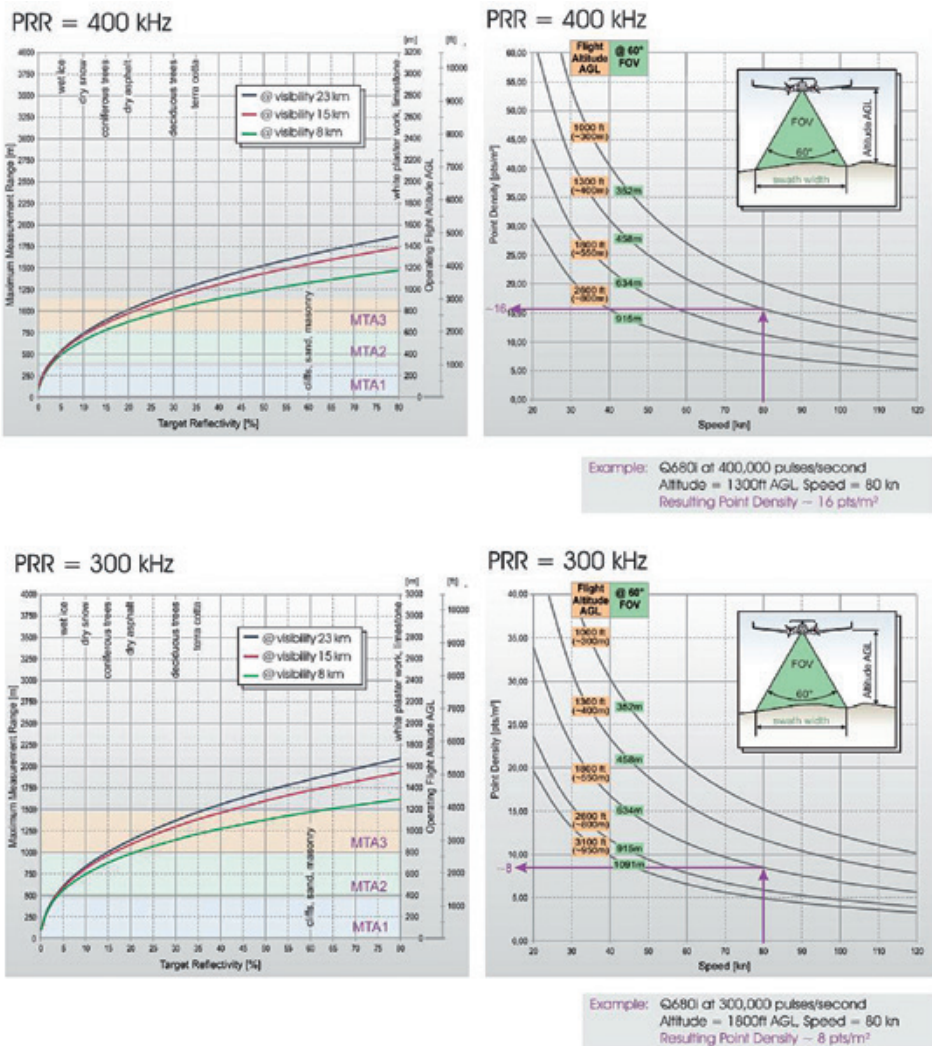
- ograniczenia maksymalnego zasięgu pomiaru (a więc i wysokości lotu) od:
  - warunków meteorologicznych (widoczności), warunkujących możliwość penetracji wiązki lasera,
  - właściwości odbiciowych obiektów terenowych,
- powiązania częstotliwości generowania impulsów laserowych z wysokością lotu wynikających z zastosowanej techniki MPA.

W rezultacie uzyskujemy dość złożony i wieloraki wpływ parametrów systemu i parametrów lotu na użytkowe parametry otrzymanej chmury punktów ALS.

Na ryc. 3.15 zilustrowano przykładowy związek tych parametrów dla systemu Riegl LMS-Q680i w formie diagramów przydatnych do planowania misji ALS. Poszczególne części ryciny przedstawiają współzależność między:

- parametrami pracy systemu: częstotliwość generowania impulsów (PPR),
- warunkami lotu: wysokość lotu, prędkość lotu,

- warunkami meteorologicznymi: widzialność (*visibility*: 23 km, 15 km, 8 km),
  - właściwościami odbiciowymi obiektów naziemnych (*Target Reflectivity [%]*);
- a parametrami użytkowymi systemu, tj.:
- maksymalnym zasięgiem pomiaru (ang. *Measurement Range, Max*),
  - operacyjną wysokością lotu nad poziomem gruntu (ang. *Operating Flight Altitude AGL*),
  - szerokością obrazowanego pasa (dla kąta skanowania FOV = 60°),
  - gęstością chmury punktów na powierzchni terenu przy założonej prędkości lotu.

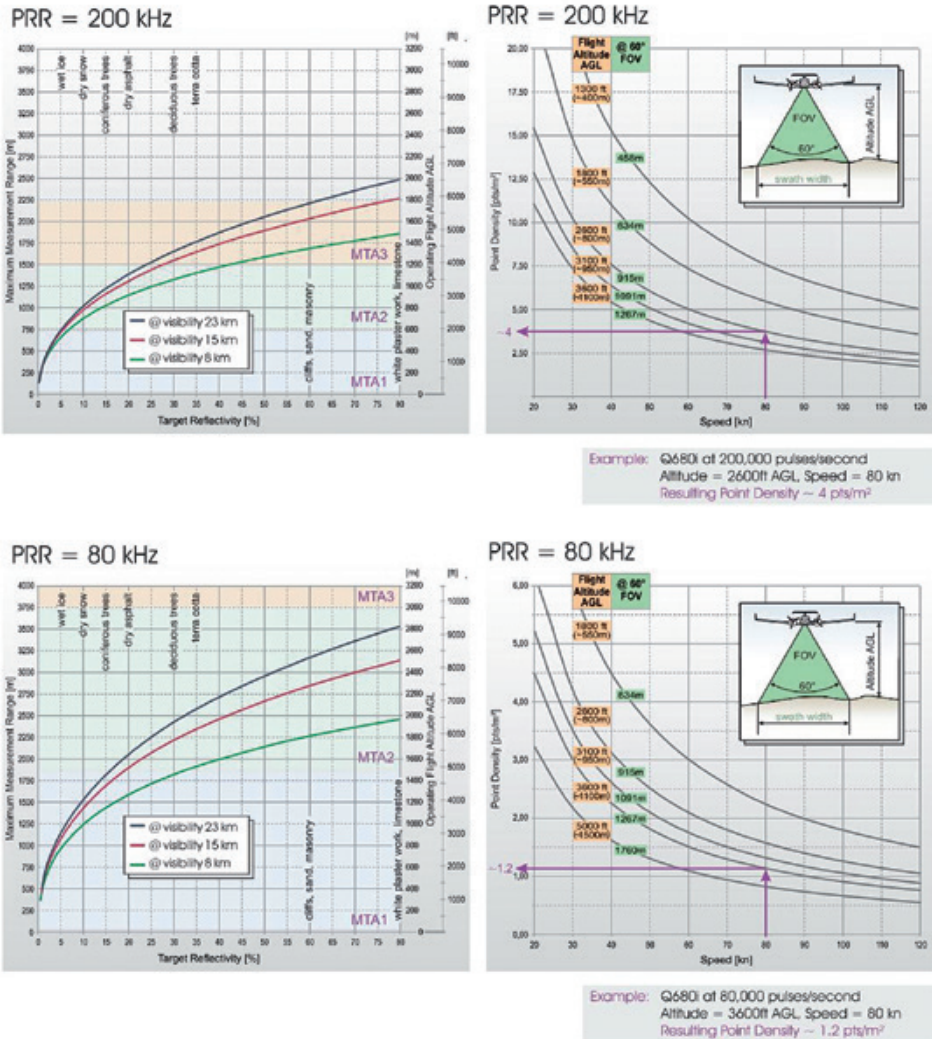
Ryc. 3.15. Parametry pracy systemu Riegl LMS Q680i (źródło: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))



Na rycinach zaznaczono strefy: MTA1 – bez nieoznaczoności (jeden impuls w powietrzu), MTA2 – 2 impulsy w powietrzu, MTA3 – 3 impulsy w powietrzu.

Przykład:

Dla częstotliwości generowania impulsów PPR = 200 kHz, wysokości lotu AGL = 2600 ft (ok. 800 m), prędkości lotu 80 kn (ok. 150 km/godz.), z wykresu otrzymamy: szerokość obrazowanego pasa 915 m i wynikową gęstość chmury punktów 4 pkt/m<sup>2</sup>.



Ryc. 3.15. cd. Parametry pracy systemu Riegl LMS Q680i (źródło: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))

### 3.7. Blokowe wyrównanie szeregów ALS

Większy obszar opracowania, tzw. Blok LiDAR, pokrywa się równoległymi szeregami ALS o częściowym wzajemnym pokryciu szeregów sąsiednich. Zgodnie z przedstawioną wcześniej zasadą działania systemu ALS, pozyskane chmury punktów są wyrażone w przyjętym terenowym układzie współrzędnych, dzięki ciągłej rejestracji elementów orientacji zewnętrznej przez zintegrowany system GNSS/INS oraz rejestrację GNSS na naziemnej stacji referencyjnej o znanym położeniu. Jest tu więc realizowana idea georeferencji wprost.

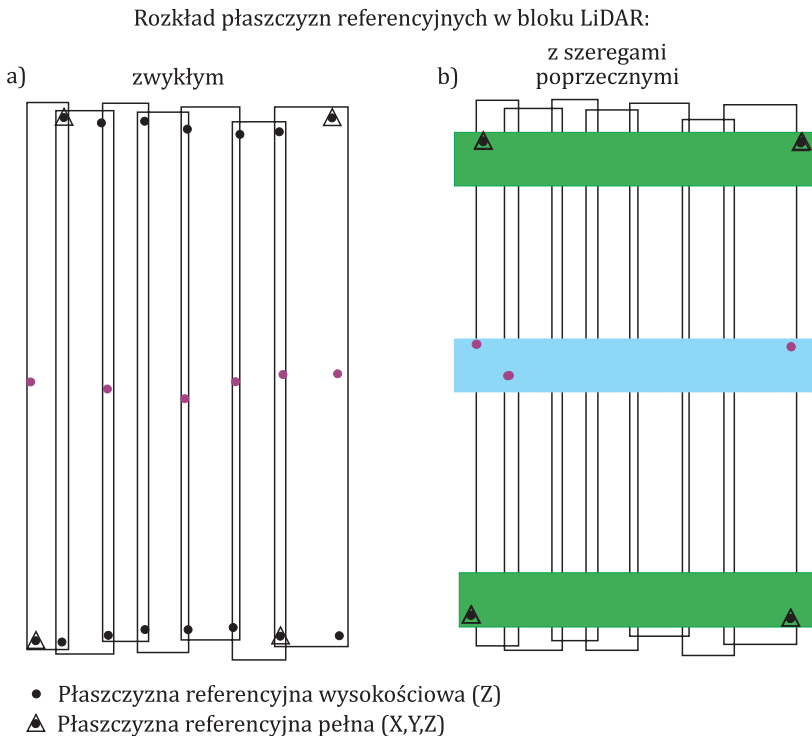
Tak uzyskane dowiązanie szeregu danych ALS do układu terenowego dla wielu zastosowań można uznać za wystarczające. Ponieważ jednak większy obszar pokrywa się równoległymi szeregami ALS z niewielkim wzajemnym pokryciem, można tak uzyskany blok poddać wtórnemu wyrównaniu, wykorzystując wzajemne powiązania między szeregami w bloku, w pasach wzajemnego pokrycia między szeregami oraz wykorzystując dodatkowo płaszczyzny referencyjne pomierzone w terenie.

W ten sposób łączy się po kilka/kilkanaście (i więcej) wzajemnie pokrywających się szeregów w tzw. Blok LiDAR. Stosowane jest pokrycie poprzeczne szeregów rzędu 20–30%. Długość szeregów jest zwykle ograniczona. Wynika to z narastających w czasie błędów systemu INS. Ogranicza to długość szeregów do kilkunastu minut lotu, co odpowiada długości do 50 km. Tak zbudowane bloki mogą mieć powierzchnię do 1000 km<sup>2</sup>.

Taki blok ALS wzmacnia się **płaszczyznami referencyjnymi** o pomierzonym położeniu (X, Y, H) lub płaszczyznami referencyjnymi wysokościowymi o pomierzonej jedynie wysokości H. Przykłady rozkładu płaszczyzn referencyjnych w bloku ALS zilustrowano na ryc. 3.16a. Stosowaną praktyką jest wzmacnianie bloku dwoma/trzema szeregami poprzecznymi. Pozwala to usztywnić geometrycznie blok i zmniejszyć zapotrzebowanie na pomiar płaszczyzn referencyjnych (ryc. 3.16b).

Płaszczyznami referencyjnymi są dające się zidentyfikować na chmurze punktów płaszczyzny poziome, o pomierzonej w terenie wysokości, np. korty tenisowe, boiska sportowe, parkingi czy fragmenty asfaltowej jezdni. Dobrą i stosowaną formą płaszczyzn referencyjnych są połączenie dachów dwuspadowych, o krawędziach (kalenicach) zorientowanych równoległe i prostopadle do kierunku lotu. Takie płaszczyzny pozwalają dowiązać szeregi ALS do układu terenowego zarówno wysokościowo, jak i sytuacyjnie (ryc. 3.17–3.19).

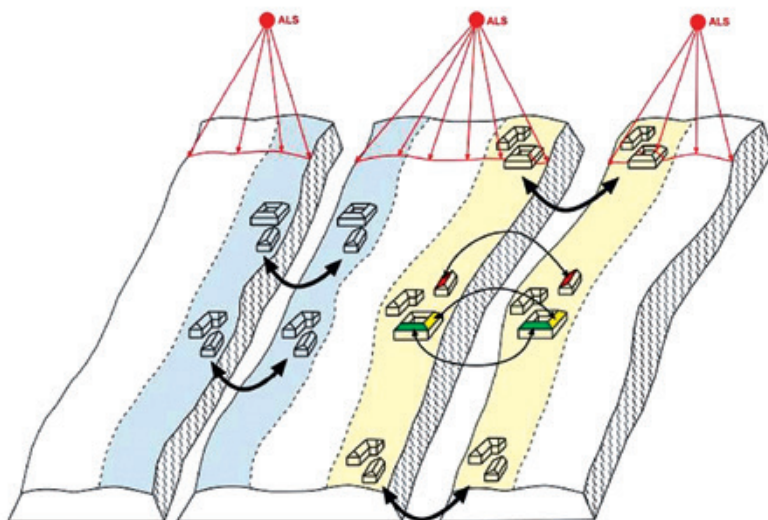
W jednoczesnym procesie wyrównania wzajemnego szeregów wiąże się wszystkie szeregi w jeden, spójny geometrycznie blok, wyrażony w zewnętrznym układzie współrzędnych przez płaszczyzny referencyjne. W procesie tym szeregi są dodatkowo powiązane ze sobą przestrzennie przez tzw. płaszczyzny przejściowe, tj. płaszczyzny znajdujące się w strefach wzajemnego pokrycia sąsiadujących szeregów. Obecnie, zwykle zaawansowane oprogramowanie automatycznie „wyszukuje” w pasach wzajemnego pokrycia odpowiadające sobie fragmenty danych ALS na obu szeregach, w których punkty lotniczego skanowania laserowego spełniają założone kryteria współpłaszczyznowości.



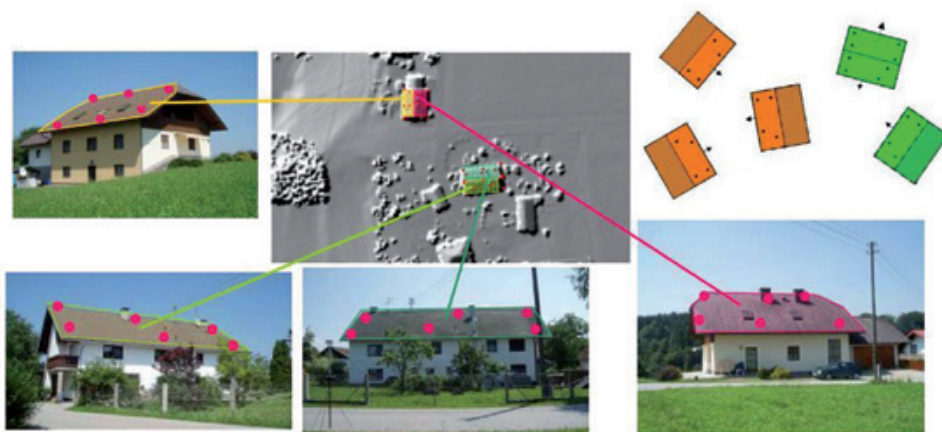
Ryc. 3.16. Blok szeregów ALS i rozkład płaszczyzn referencyjnych w bloku: a) przypadek zwykły (bez szeregów poprzecznych), b) przypadek z szeregami poprzecznymi (źródło: Pfeifer, 2008)

Podsumowując proces georeferencji bloku danych ALS, można w tym procesie wyróżnić następujące główne etapy:

1. Wyznaczenie trajektorii samolotu względem terenowych stacji referencyjnych.
2. Wyrównanie pozycji i elementów orientacji systemu skanującego.
3. Wyznaczenie pozycji i orientacji urządzenia skanującego (centrum propagacji sygnału w systemie ALS). W obliczeniach orientacji skanera uwzględnia się dane kalibracji systemu, w tym niezbędne redukcje mimośrodków położenia anteny GNSS i urządzenia skanującego względem czujnika IMU systemu INS.
4. Wzajemne wpasowanie i georeferencja szeregów ALS w oparciu o powierzchnie wiążące oraz powierzchnie referencyjne.



Ryc. 3.17. Idea blokowego wyrównania szeregów ALS (źródło: Pfeifer, 2008)



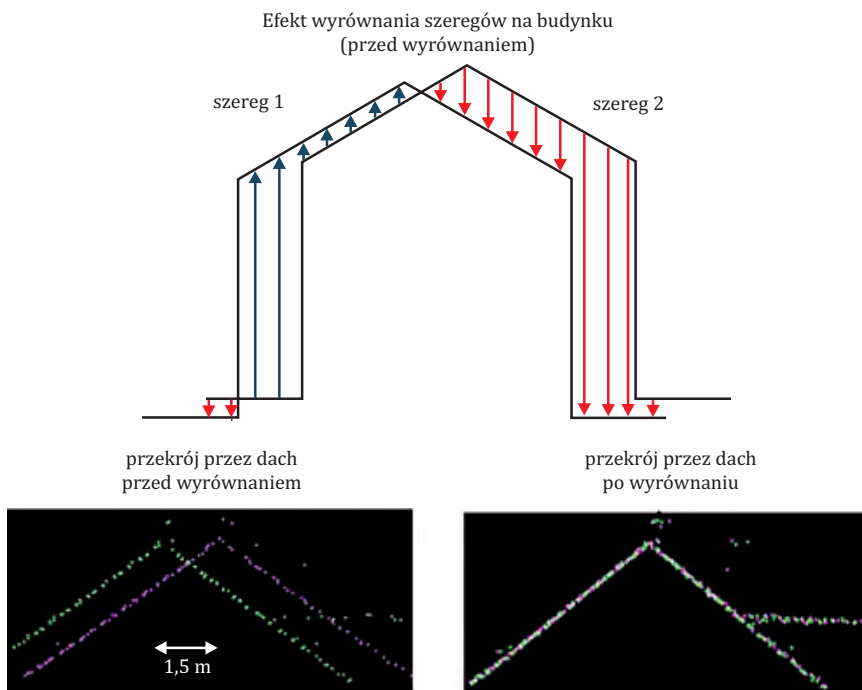
Ryc. 3.18. Przykład wykorzystania dachów dwuspadowych jako płaszczyzn kontrolnych. Taką ekwiwalentną płaszczyznę stanowią dwa/trzy budynki z dachami dwuspadowymi. Dachy muszą mieć różną orientacją (patrz przykłady w prawym górnym rogu ryciny: trzy budynki brązowe lub dwa zielone). Płaszczyznę dachu definiują min. 4 punkty na połaci dachu pomierzone w terenie (źródło: Pfeifer, 2008)

Na podstawie płaszczyzn referencyjnych i płaszczyzn przejściowych, traktowanych w procesie wyrównawczym jak obserwacje, dopasowuje się szeregi wzajemnie wg kryterium minimalizacji sumy kwadratów rozbieżności sytuacyjnych i wysokościowych na

tych płaszczyznach. Same szeregi podlegają w tym procesie korekcy położenia wg przyjętego modelu wyrównawczego. Mogą to być:

- korekty wysokości poszczególnych szeregów (przesunięcia  $\Delta H$  każdego szeregu),
- korekty położenia poszczególnych szeregów (przesunięcia  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta H$  każdego szeregu),
- korekty położenia wraz „z korektami” orientacji kątowej (przesunięcia  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta H$  oraz obroty  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  każdego szeregu),
- dodatkowa korekta skali w liniach skanowania, modelująca błędy oscylacji lustra skanującego.

W pierwszych trzech przypadkach każdy szereg traktowany jest jako „sztywna” konstrukcja, poddawana transformacji przez podobieństwo (szereg podlega przesunięciu i obrotom, ale nie jest deformowany jego kształt). Dobór modelu w procesie wyrównawczym (inaczej: dobór stopni swobody opisywanych niewiadomymi) zależy od jakości danych ALS, w tym jakości kalibracji systemu, jakości wstępnej georeferencji w locie, jakości osnowy terenowej, kształtu bloku i innych czynników. Na ryc. 3.19 pokazano efekt wyrównania na przykładzie dachu odwzorowanego w strefie wzajemnego pokrycia dwóch szeregów.



Ryc. 3.19. Wpasowanie sąsiednich szeregów widoczne na dachu budynku odwzorowanego na obu szeregach – widoczne rozbieżności chmury punktów na płaszczyznach dachu przed i po wyrównaniu (źródło: Pfeifer, 2008)

Takie wyrównanie bloku danych ALS pozwala dodatkowo zmniejszyć wpływ błędów kalibracji systemu na platformie samolotowej (błędy mimośrodu i niezgodności orientacji kątowej samego skanera względem jednostki IMU oraz anteny GNSS) i uzyskać dokładności (sytuacyjne i wysokościowe) nieosiągalne tylko na podstawie georeferencji wprost, tj. pomiarów GNSS/INS w locie, dowiązanych do stacji referencyjnej GNSS.

W opisanym procesie wyrównania bloku danych ALS łatwo dostrzec analogię do aerotriangulacji zdjęć lotniczych o pomierzonych w locie elementach orientacji zewnętrznej (dzięki integracji GNSS/INS), które jednak poddaje się wyrównaniu, wykorzystując wzajemne powiązania zdjęć (punkty przejściowe w strefach wzajemnych pokryć zdjęć w szeregu i szeregów między sobą) oraz fotopunkty o współrzędnych pomierzonych w terenie. Płaszczyzny referencyjne i płaszczyzny przejściowe w bloku ALS są odpowiednikiem fotopunktów i punktów przejściowych w aerotriangulacji.

W wyniku wyrównania otrzymuje się chmurę punktów obejmującą cały blok. Przed dalszym opracowaniem, ze względów praktycznych, dzieli się ją zwykle na umowne moduły obszarowe (moduły archiwizacji) zapisane w odpowiednim formacie.

mgr inż. Edyta Stojek  
mgr Mateusz Maślanka  
mgr inż. Magdalena Słota

## 3.8. Klasyfikacja chmury punktów ALS

### 3.8.1. Zasady klasyfikacji chmury punktów ALS

Jednym z podstawowych procesów przetwarzania chmury punktów pochodzącej z lotniczego skanowania laserowego jest jej klasyfikacja. Polega ona na przypisaniu każdemu punktowi z chmury ALS właściwego atrybutu związanego z obiektem, na jakim promień lasera uległ odbiciu. W ten sposób można z całego zbioru odbić, wydzielić punkty leżące na gruncie, reprezentujące roślinność niską, średnią i wysoką, budynki oraz inne klasy, które zdefiniowano dla danego projektu (ryc. 3.20).

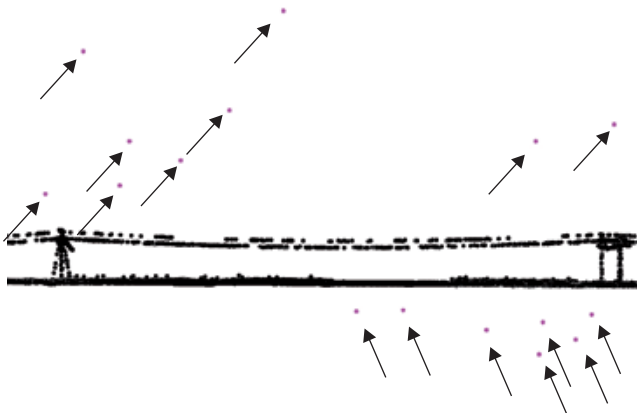
Procesem wykonywanym na początku każdej klasyfikacji chmury punktów ALS jest automatyczna filtracja punktów nienależących do modelowanej powierzchni – tzw. punktów położonych poniżej powierzchni terenu (ang. *low point*). Ich selekcja oparta jest na analizie punktów nieposiadających najbliższego sąsiedztwa. W trakcie klasyfikacji poszukiwania tych punktów definiuje się pojedyncze jak i całe grupy punktów znajdujących się pod aproksymowaną powierzchnią terenu w odpowiedniej zdefiniowanej przez użytkownika odległości. Podobny algorytm wykorzystuje się również do klasyfikacji innych klas punktów izolowanych, występujących np. w powietrzu (ang. *airpoint*; ryc. 3.21).

Po znalezieniu wszystkich błędnych punktów (ang. *low point*) rozpoczyna się jeden z najważniejszych etapów klasyfikacji polegający na wyselekcjonowaniu z chmury ALS tych punktów, które leżą bezpośrednio na gruncie (ang. *ground*). Najczęściej spotykane algorytmy losowo wybierają punkty i poszukują wokół nich sąsiadów spełniających od-

powiednie kryteria (odległości oraz kąta nachylenia). Po wyselekcjonowaniu i przypisaniu atrybutu „grunt” do punktów, najczęściej przechodzi się do klasyfikacji roślinności. Na podstawie wysokości względnej (klasa grunt musi istnieć) dokonuje się klasyfikacji roślinności niskiej (ang. *low vegetation*), średniej (ang. *medium vegetation*) i wysokiej (ang. *high vegetation*). Klasyfikację budynków (ang. *building*) przeprowadza się najczęściej z klasy istniejącej już roślinności (wysokiej i średniej). Niektóre specjalistyczne programy komputerowe oferują również automatyczną detekcję innych klas, takich jak np. linie energetyczne.



Ryc. 3.20. Sklasyfikowana chmura punktów ALS (ISOK) – kolorowanie po atrybucie klasy (pomarańczowy – grunt; czerwony – budynki; zielone odcienie – roślinność; białe – niesklasyfikowane)



Ryc. 3.21. Przekrój przez chmurę punktów ALS – strzałkami zaznaczono automatycznie wykryte, błędnie zarejestrowane punkty pod terenem, jak również punkty izolowane w powietrzu

Procesy filtracji i klasyfikacji są niemal całkowicie zautomatyzowane, ponieważ opierają się na zdefiniowanych filtrach oraz algorytmach. Ich parametry często można dobrać dostosowując je do charakteru opracowywanego terenu. Zautomatyzowanie post-processingu danych ALS jest niezbędne do przeprowadzenia szybkiej klasyfikacji rozległych powierzchniowo obszarów.

### 3.8.2. Procedury automatycznej klasyfikacji punktów

Do najczęściej spotykanych procedur automatycznej klasyfikacji chmury punktów pochodzącej z lotniczego skanowania laserowego należą:

- klasyfikacja punktów niskich – procedura ta porównuje wysokość każdego punktu z punktami sąsiadującymi, znajdującymi się w danej odległości xy. Jeżeli punkt centralny jest położony znacznie niżej od pozostałych punktów, zostaje on zaklasyfikowany do klasy *low points*,
- klasyfikacja punktów izolowanych – procedura bazuje na analizie sąsiedztwa airpoints w przestrzeni trójwymiarowej. Wyszukiwane są punkty o niewielkiej liczbie sąsiadów w zadanym promieniu odległości poszukiwania od analizowanego punktu,
- klasyfikacja punktów reprezentujących grunt – procedura wykorzystywana do selekcjonowania punktów odbitych od powierzchni terenu (np. poprzez iteracyjne generowanie modelu TIN),
- klasyfikacja punktów znajdujących się poniżej poziomu terenu – procedura stosowana do klasyfikacji punktów, które są położone pod powierzchnią gruntu. Procedura ta może być przeprowadzona po wyodrębnieniu punktów leżących na gruncie,
- klasyfikacja punktów na podstawie wysokości względnej (nad terenem) – procedura, za pomocą której klasyfikowane są punkty znajdujące się ponad gruntem w zadanym zakresie (np. roślinność niska 0–0,40 m),
- klasyfikacja punktów za pomocą funkcji wykrywania budynków – klasyfikacja punktów będących efektem odbicia promienia lasera od powierzchni dachów budynków. Aby punkty zostały przypisane do klasy budynków, muszą znajdować się na wspólnej płaszczyźnie. W przypadku dachów dwuspadowych każda z połaci rozpatrywana jest przez algorytm jako osoba płaszczyzna.

W zależności od stopnia zaawansowania specjalistycznego oprogramowania istnieją dodatkowe funkcje automatycznej klasyfikacji punktów wykorzystujące atrybuty chmury punktów ALS, takie jak: numer kolejnego echa, intensywność odbicia impulsu, czas pozyskania danych, wartość kąta skanowania, kierunek skanowania czy odległość od skanera. Klasyfikacja na podstawie informacji o numerze echa (odbicia) sygnału może dotyczyć np. punktów tylko z pierwszego odbicia (ang. *First Echo*) do wsparcia generowania numerycznego modelu pokrycia terenu. Intensywność odbicia impulsu laserowego uzależniona jest w dużej mierze od materiału tworzącego powierzchnię obiektu, może być więc czasami wykorzystywana do wsparcia klasyfikacji obiektów, np. dróg.

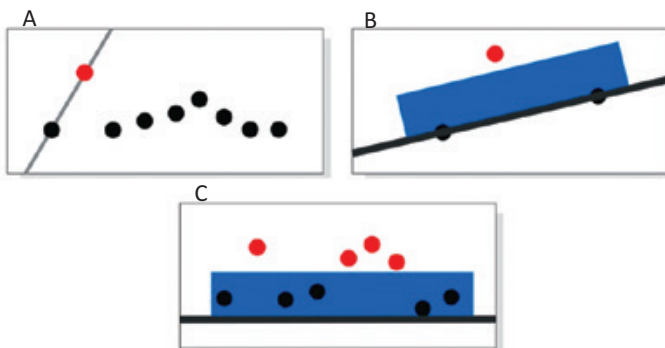
Istnieją również programy umożliwiające realizację automatycznego procesu klasyfikacji chmury punktów ALS z wykorzystaniem makropoleceń, które znacznie przyspie-



szają pracę, szczególnie w przypadku dużych zbiorów danych. Automatyczna klasyfikacja chmury punktów ogranicza się wówczas do zaprojektowania makropolecenia, tj. parametrów wszystkich klas docelowych i uruchomienia go na całym Bloku LiDAR. Rozwiązanie to pozwala na znaczną oszczędność czasu. Projektanci oprogramowania wciąż usprawniają algorytmy przeznaczone do automatycznej klasyfikacji (detekcji) punktów z chmury punktów ALS, jednak procesy te, głównie ze względu na różnorodność obiektów i ukształtowania oraz specyfiki klas pokrycia i użytkowania terenu, bardzo rzadko okazują się bezbłędne. W celu kontroli poprawności procesu klasyfikacji konieczne jest przeprowadzenie przez doświadczonego operatora manualnej edycji błędnie przyporządkowanych punktów.

### 3.8.3. Klasyfikacja punktów leżących na gruncie

Autorzy algorytmów zaprojektowanych do klasyfikacji punktów leżących na gruncie na podstawie nieprzetworzonej chmury punktów ALS posługują się zwykle analizami opartymi na lokalnym sąsiedztwie (ryc. 3.22). W tym przypadku decyzja o przypisaniu konkretnego atrybutu klasy, oparta jest o weryfikację przynależności punktów lub grupy punktów pomiędzy pojedynczym punktem lub wieloma punktami.

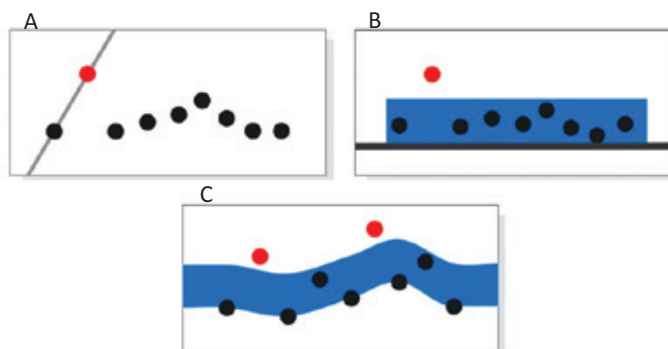


Ryc. 3.22. Przykładowe sytuacje działań na lokalnym sąsiedztwie ze względu na analizowaną liczbę punktów: A) punkt a punkt, B) punkt a punkty, C) punkty a punkty (źródło: Maślanka, 2011)

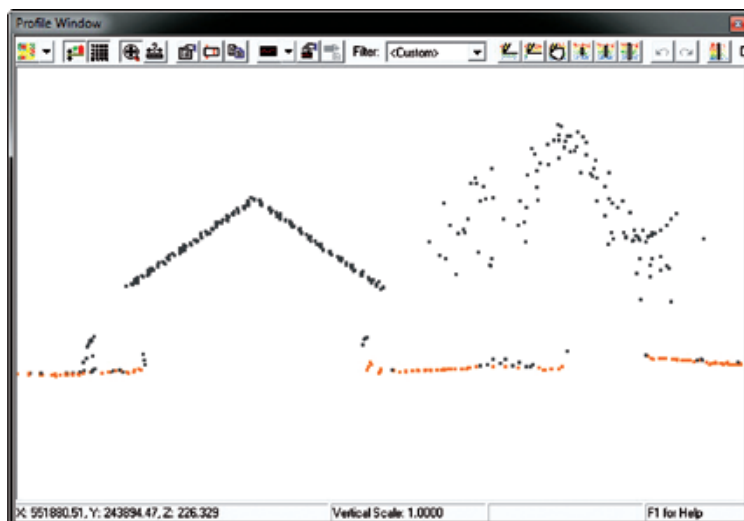
Wszelkie wykonywane obliczenia pomiędzy punktami opierają się na analizie warunków iteracyjnych, takich jak: wartość nachylenia, różnica wysokości czy też odległość danego punktu od powierzchni aproksymowanej uznanej za należącą do klasy punktów leżących na gruncie (ryc. 3.23).

W literaturze wymienia się algorytmy oparte o tzw. próg wysokości, które w początkowej fazie poszukują lokalnych minimum w oknie o zadanej wielkości. Poprzez zdefiniowaną różnicę wysokości między lokalnym minimum a w danym czasie analizowanym punktem, można sklasyfikować punkty należące do klasy punktów leżących na gruncie. Wśród algorytmów pozwalających na klasyfikację punktów leżących na gruncie

wymienia się algorytm korzystający z analizy otoczenia i wyszukujący punkty, które nie spełniają warunków progowych nachylenia między analizowanym punktem a punktem uznanym wcześniej za punkt leżący na gruncie. Kombinacją powyższych algorytmów jest najczęściej używanym i dający bardzo dobre wyniki algorytm aktywnego modelu TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*). Polega on na generowaniu powierzchni TIN pomiędzy lokalnymi minimami znajdującymi się w danym oknie obliczeniowym. Punkty, które nie spełniają określonych parametrów kąta iteracyjnego lub odległości iteracyjnej od powierzchni TIN, są automatycznie odrzucane i nie są sklasyfikowane jako punkty należące do klasy grunt (ryc. 3.24).



Ryc. 3.23. Przykłady działań algorytmów analizujących parametry A) nachylenie, B) różnica wysokości, C) odległość od powierzchni uznawanej za grunt (źródło: Maślanka, 2011)



Ryc. 3.24. Przekrój podłużny przez sklasyfikowaną chmurę punktów. Kolor pomarańczowy oznacza klasę grunt, pozostałe punkty niesklasyfikowane

Spośród różnych rozwiązań stosowanych w wielu programach komputerowych, warto również wymienić algorytm generujący powierzchnię wielomianową z najniższych punktów w zadanym ruchomym oknie obliczeniowym. Punkty, które spełniają warunek minimalnej odległości od krzywej wielomianowej zostają zaklasyfikowane do zbioru tych reprezentujących grunt. Ciekawym rozwiązaniem jest tzw. algorytm morfologiczny korzystający z zasad dylatacji i erozji matematycznej. Jego praca polega na usuwaniu, w stale powiększającym się oknie, punktów nieleżących bezpośrednio na gruncie, dzięki czemu generowana jest powierzchnia, od której stosuje się progi wysokości i nachylenia.

### 3.8.4. Klasyfikacja roślinności oraz budynków

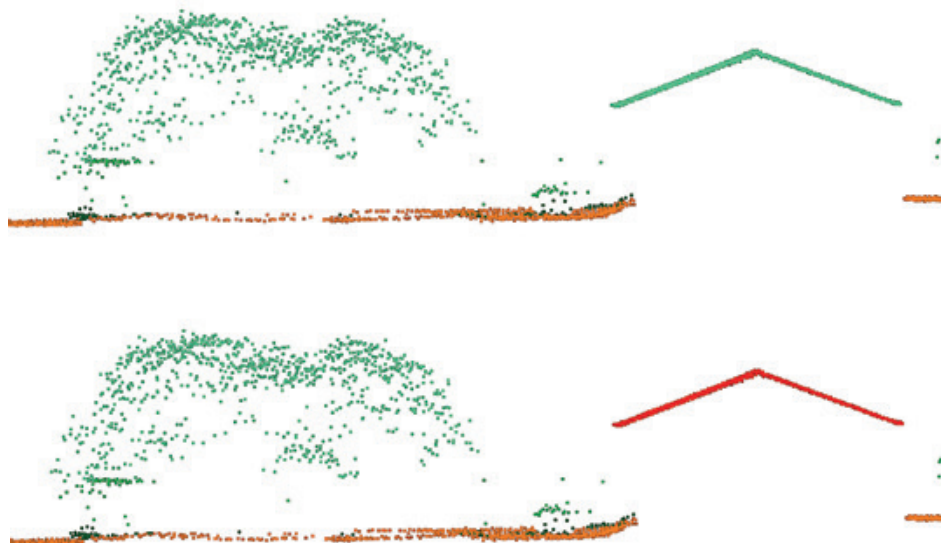
W projektach czy programach do przetwarzania danych ALS roślinność, jaka występuje na analizowanym obszarze, najczęściej klasyfikowana jest do 3 zbiorów. Składają się na nie: roślinność niska, średnia oraz wysoka. Do ich utworzenia przyjmuje się progowanie według wysokości względnej (ang. *by height from ground*) odnoszące się do aproksymowanej powierzchni terenu (tab. 3.4). W związku z tym, to głównie od jakości sklasyfikowanego gruntu zależy poprawność klasyfikacji warstw roślinności. Wartości wysokości względnej są uznaniowe i zależą od lokalnych uwarunkowań przyrodniczych czy też od specyfikacji branży, w jakiej stosuje się taki podział (np. zieleni miejska czy leśnictwo). W sytuacji, w której klasyfikacja roślinności była drugim krokiem (po klasyfikacji gruntu), wszystkie obiekty (w tym budynki) zostają do niej zaklasyfikowane.

Tabela 3.4. Przykładowe przedziały wysokościowe definiujące poszczególne klasy roślinności

Klasa punktów	Wysokość [m]
niska roślinność	0–0,40
średnia roślinność	0,40–2,0
wysoka roślinność	> 2,0

Do automatycznego wykrycia budynków służą algorytmy, które w zależności od stopnia zurbanizowania terenu, mają możliwość adaptacji do rozmiaru najmniejszego elementu dachu ( $m^2$ ) czy też odchyień standardowych punktów na dachach (złożoność dachów, materiału poszycia dachu, występowania anten, regularnych kształtów itd.) Algorytm poszukuje płaszczyzn planarnych dachów spełniających ustaloną minimalną powierzchnię (ryc. 3.25). Zaawansowane programy do przetwarzania danych z lotniczego skanowania laserowego umożliwiają również włączenie do procesu klasyfikacji informacji o numerze echa sygnału. Promień lasera, odbijając się od dachu, generuje zazwyczaj punkt z jednym echem (*first = last*), natomiast chmury punktów będące reprezentacją roślinności (zazwyczaj wysokiej), charakteryzują się kilkoma kolejnymi echemi (ang. *intermediate return*). Dzięki wykorzystaniu tej informacji o wielokrotności odbić

tego samego promienia lasera, algorytm poszukujący budynków stosunkowo łatwo znajduje te o pojedynczym echu w klasie roślinności powyżej określonego progu wysokości (zakładamy, że dachy budynków wznoszą się np. ponad 2 m).



Ryc. 3.25. Automatyczne poszukiwanie budynków wykonywane w klasie „wysoka roślinność” (u góry dach w kolorze zielonym) prowadzące do prawidłowego ich zaklasyfikowania (u dołu kolor czerwony)

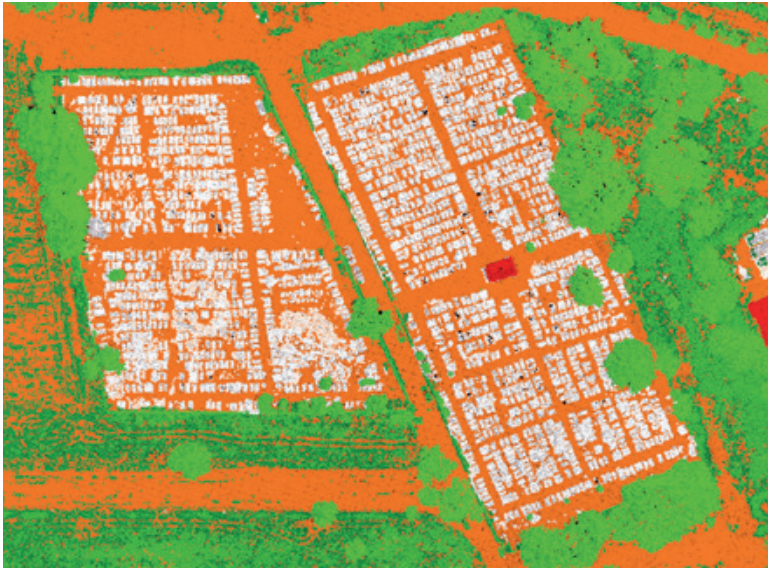
### 3.8.5. Pozostałe klasy w chmurze punktów ALS

W zależności od specyfiki projektów, klasyfikacja chmury punktów ALS, poza wymienionymi powyżej zbiorami: grunt, roślinność niska, średnia, wysoka, budynki – wymaga prawidłowego wyselekcjonowania i przypisania atrybutu klasy pozostałym punktom. W związku z tym pojawiają się takie klasy, jak (ryc. 3.26):

- punkty przetwarzane, ale niesklasyfikowane (ang. *created, never classified*),
- szum, błędne punkty (ang. *low point, ghost points*),
- punkty reprezentujące obszary pod wodami (ang. *water*),
- punkty z obszarów wielokrotnego pokrycia, np. z nakładających się na siebie szeregów (ang. *overlap points*),
- punkty szkieletowe modelu NMT (ang. *key points*) .

Do wykrycia części z nich można wykorzystać algorytmy do automatycznej ekstrakcji obiektów do określonej klasy. Dotyczy to głównie: słupów i linii energetycznych, przemysłowych linii napowietrznych czy obiektów przypominających swym kształtem budynki (np. kontenery, wagony itp.). Pozostałe obiekty sklasyfikowane są najczęściej na

drodze manualnej edycji i reklasyfikacji chmury punktów przy wykorzystaniu wiedzy operatora i pewnych związków logicznych (np. braku punktów pod zaparkowanymi samochodami).



Ryc. 3.26. Prawidłowa klasyfikacja nagrobków na cmentarzach (kolory: biały – klasa punktów przetwarzanych, ale niesklasyfikowanych; pomarańczowy – grunt; czerwony – budynki; zielone odcienie – roślinność)

Klasa szumu (ang. *low point*) określa zazwyczaj punkty znajdujące się omyłkowo pod powierzchnią aproksymowanego terenu. Jak już wcześniej wspomniano, do wykrycia i klasyfikacji punktów omyłkowych służą głównie algorytmy automatycznej klasyfikacji. Po ich zaimplementowaniu szczególną uwagę należy zwrócić na linie energetyczne, ponieważ zdarza się, że z uwagi na ich położenie (od kilku do kilkudziesięciu metrów nad terenem) automatyczny algorytm może je uznać jako klasę szumu.

Woda zazwyczaj całkowicie pochłania promieniowanie lasera (szczególnie w zakresie bliskiej podczerwieni następuje pełna absorpcja energii; skanery batymetryczne wykorzystują światło zielone). Wykrywanie punktów na obszarze wód, które zostały jednak zarejestrowane (odbicia od pływających na powierzchni przedmiotów czy roślinności wodnej lub zwisającej nad wodą), wspomóc można wykorzystaniem atrybutu intensywność.

Do sklasyfikowania punktów występujących na obszarach wielokrotnego pokrycia służą automatyczne algorytmy, które przenoszą je do klasy *overlap points*. Po ich wykryciu stosować można proces wycinania punktów (ang. *cut overlaps*) w celu pozostawienia na pasie (szeregu) skanowania tylko tych punktów, które są najbardziej dokładne. Klasyfikację wielokrotnego pokrycia przeprowadza się również w przypadku szeregów poprzecznych (tzw. wiążących) stosowanych w procesie wyrównania danych ALS.

Klasyfikacja punktów szkieletowych (ang. *key points*) stosowana jest głównie w celu rozrzedzenia (usunięcia nadmiarowości informacji) klasy gruntu, jednak przy zachowaniu głównych, kluczowych z punktu widzenia aproksymacji punktów. Proces ten przeprowadza się automatycznie, a pozyskane w ten sposób dane służą głównie generowaniu produktów pochodnych, jakimi są modele wysokościowe.

### 3.8.6. Sposoby manualnej klasyfikacji punktów

Po dokładnej analizie wyników automatycznej klasyfikacji chmur punktów ALS obserwuje się różne rodzaje błędów generowanych w wyniku nieodpowiednio dobranych parametrów dla specyfiki danego obszaru. Najczęściej spotykane błędy automatycznych klasyfikacji chmury punktów to sytuacje, gdy:

- do klasy punktów reprezentujących grunt włączane są punkty leżące pod terenem, co powoduje niepotrzebne lokalne obniżenia,
- do klasy grunt włącza się punkty reprezentujące niską roślinność,
- ściany budynków zostają zaklasyfikowane do klasy roślinności,
- niektóre dachy budynków pozostają w klasie wysokiej roślinności (najczęściej dotyczy to budynków położonych pod okapem koron drzew oraz budowli o bardzo nietypowych kształtach),
- mosty pozostają w klasie grunt lub w klasach roślinności.

Producenci oprogramowania dedykowanego do pracy z chmurą punktów z lotniczego skanowania laserowego oferują w swoich aplikacjach wiele narzędzi umożliwiających manualną edycję czy rekłasyfikację. Korekta polega na „przeniesieniu” błędnie zaklasyfikowanych przez automatyczny algorytm właściwie zdefiniowanych w projekcie klas. W procesie tym możliwa jest edycja zarówno pojedynczych punktów, jak całych grup. Najczęściej występujące narzędzia edycji manualnej to:

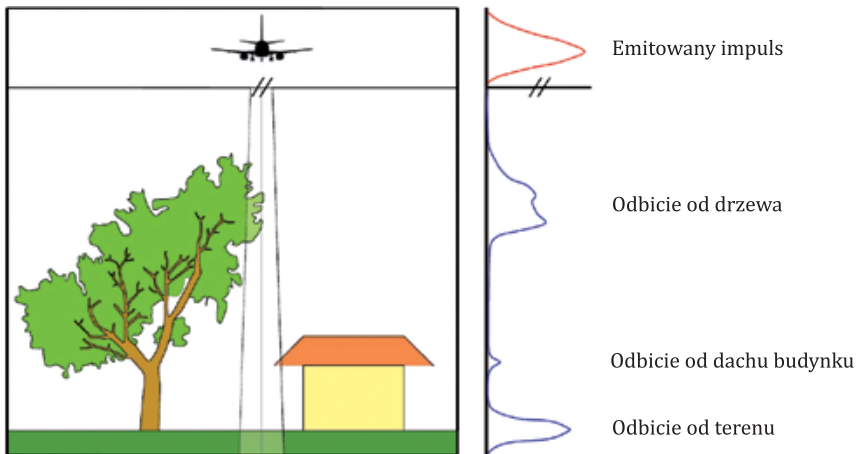
- korekta pojedynczych punktów,
- korekta punktów wewnątrz okręgu/prostokąta o zadanej wielkości,
- korekta punktów znajdujących się pod lub ponad zadaną płaszczyzną,
- korekta punktów znajdujących się pomiędzy dwoma zadanymi liniami (powierzchniami),
- korekta punktów znajdujących się wewnątrz lub na zewnątrz zdefiniowanego obszaru.

W procesie kontroli sklasyfikowanej chmury punktów ALS i jej ewentualnej edycji (poprawy) manualnej warto korzystać z dodatkowych atrybutów zapisanych w chmurze punktów ALS, takich jak intensywność odbicia czy atrybut RGB. W celu właściwej interpretacji edytowanych klas proces ten może być wspomagany cyfrową ortofotomapą.

### 3.8.7. Wspomaganie procesu klasyfikacji chmury punktów na obszarach zurbanizowanych przy wykorzystaniu skanerów typu *full-waveform*

W przypadku obszarów zurbanizowanych fundamentalnym celem klasyfikacji jest rozróżnienie obiektów infrastruktury (budynki mieszkalne, handlowe, inne) od obszarów pokrytych roślinnością wysoką. Powszechnie stosowane podejście klasyfikacji danych chmury punktów ALS opiera się na analizie zależności geometrycznych, takich jak wysokość (Z) punktu czy współpłaszczyznowość. Niestety w celu wyznaczenia atrybutów geometrycznych często niezbędna jest analiza zależności geometrycznych pomiędzy sąsiednimi punktami ALS. Punkty w zbiorze danych ALS są rozmieszczone zwykle nieregularnie. Wyznaczenie parametrów geometrycznych wiąże się z przeszukiwaniem całej chmury w celu znalezienia sąsiadów, co przy bardzo dużych plikach prowadzi do niezwykle czasochłonnnych obliczeń.

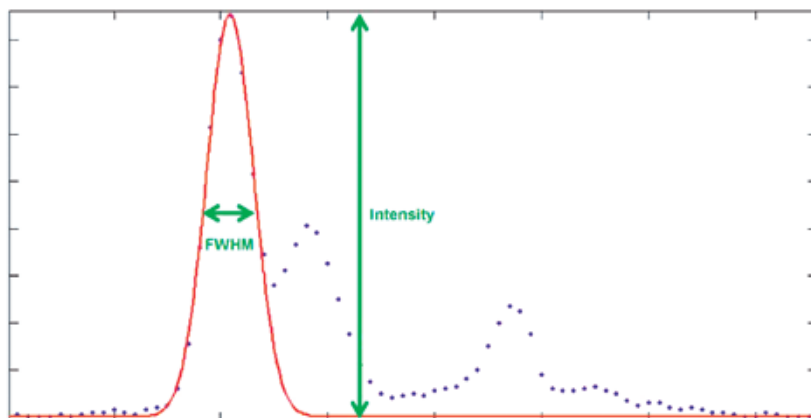
Najłatwiejszą metodą byłoby bezpośrednio wykorzystanie dostępnych danych bez konieczności obliczania dodatkowych atrybutów bazujących na analizach sąsiedztwa. W tym zagadnieniu pomocne okazuje się lotnicze skanowanie laserowe typu pełnej fali (ang. *full-waveform*). W tej technologii rejestrowane są nie tylko pojedyncze echa sygnału (X, Y, Z) reprezentujące obiekty, lecz pełne profile odbitej energii lasera (ryc. 3.27).



Ryc. 3.27. Zasada działania skanerów *full-waveform* (źródło: Słota, 2014)

Na podstawie analizy tych profili, oprócz intensywności (ang. *intensity*), wyodrębnić można dodatkowy atrybut dla każdego echa, tj. szerokość odbicia (szerokość połowkowa, FWHM – ang. *Full Width Half Maximum*; ryc. 3.28). Intensywność odbicia sygnału, pozyskiwana również przez klasyczne systemy skanujące (tzw. pulsacyjne; TOF – ang. *Time-Of-Flight*), charakteryzuje moc odbitego sygnału. Wielkość ta jest silnie zależna od współczynnika odbicia i geometrii danego obiektu. Atrybut intensywności jest dosko-

nałym wskaźnikiem, pozwalającym na separację obiektów zbudowanych z różnych materiałów (np. dachy budynków, asfalt). Szerokość odbicia sugeruje natomiast jak długo impuls lasera miał kontakt z obiektem. Wzrost wielkości tego parametru obserwowany jest na punktach ALS, dla których kąt pomiędzy osią wiązki a powierzchnią odbijającą jest mały oraz gdy w obrębie plamki lasera znalazło się kilka obiektów w niewielkiej względem siebie odległości wertykalnej lub horyzontalnej (mniejszej niż długość emitowanego impulsu laserowego), np. liście i konary drzewa.



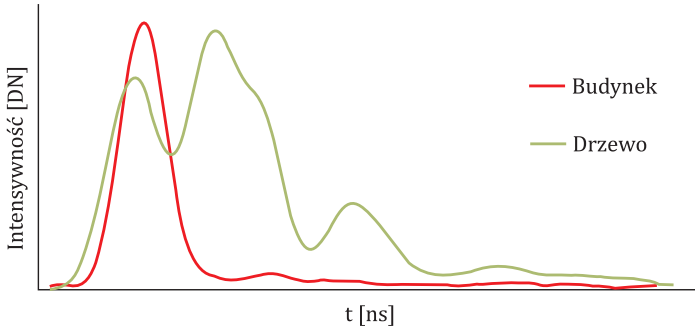
Ryc. 3.28. Atrybuty wyznaczone na podstawie danych *full-waveform*

Dane ALS typu *full-waveform* pozwalają na wspomaganie procesu klasyfikacji zwłaszcza w miejscach, gdzie intensywność odbicia nie pozwala na jednoznaczną separację pomiędzy docelowymi klasami. Poniżej zaprezentowano dwa przykłady wykorzystania atrybutu FWHM (źródło: AGH, Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska). Pierwszy przykład dotyczy wyodrębnienia obiektów antropogenicznych, charakteryzujących się stosunkowo regularnymi i gładkimi powierzchniami, od średniej i wysokiej roślinności. Problem, który można rozwiązać z wykorzystaniem danych ALS typu *full-waveform*, dotyczy klasyfikacji budynków znajdujących się w pobliżu wysokich drzew, a zwłaszcza budynków, dla których intensywność odbicia jest zbliżona do wartości intensywności punktów generowanych w koronach drzew. Impuls laserowy penetrujący korony drzew ulega rozproszeniu, dzięki czemu szerokość echa w rejestrowanych profilach wzrasta w stosunku do odbić od powierzchni gładkich. Atrybut szerokości echa, uwzględniony w procesie klasyfikacji budynków, pozwoli na usunięcie punktów położonych w koronach drzew. Należy pamiętać, że im bardziej zwarta jest struktura korony drzewa tym odbicie będzie mocniejsze, szerokość echa mniejsza, a co z tym się wiąże, maleć będzie stopień przydatności tego parametru w procesie filtracji roślinności wysokiej od zabudowy. Przykładowe profile zarejestrowanej energii dla impulsu odbitego od budynku i korony drzewa zamieszczone zostały na rycinie 3.29.

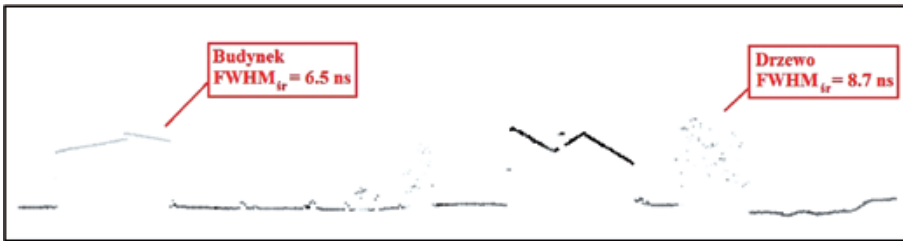
Poniższa rycina (ryc. 3.30) przedstawia profil poprzeczny przez chmurę punktów ALS. Zaznaczony budynek oraz drzewo charakteryzują się podobnymi wartościami intensywno-



ności i wysokości ponad terenem, natomiast obliczone średnie parametry szerokości echa (FWHM) znacznie się od siebie różnią (6.5 ns dla budynku i 8.7 ns dla drzewa). Możliwa jest zatem automatyczna klasyfikacja tych obiektów, bez konieczności wyznaczania dodatkowych atrybutów, takich jak np. odchylenie standardowe czy liczba odbić.



Ryc. 3.29. Profil rozchodzenia się sygnału odbitego typu *full-waveform* od budynku i drzewa

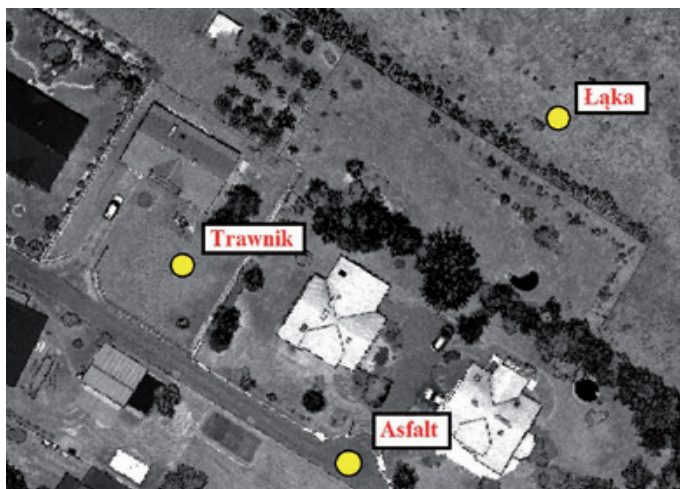


Ryc. 3.30. Profil poprzeczny przez chmurę punktów ALS, rozróżnienie kolorystyczne względem atrybutu intensywność

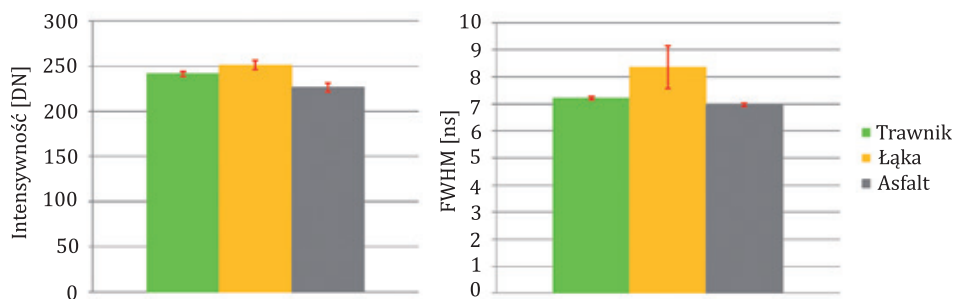
Następny przykład wspomaganie procesu klasyfikacji chmur punktów ALS dotyczy separacji pomiędzy potencjalnymi punktami wyznaczającymi aproksymowaną powierzchnię numerycznego modelu terenu. Bardzo często NMT generowany jest na podstawie błędnie zaklasyfikowanych punktów, reprezentujących w rzeczywistości niską roślinność. Wykorzystanie szerokości echa może służyć do weryfikacji punktów należących do gruntu. W przykładzie obrazującym niniejsze zagadnienie wybrano 3 pola testowe, reprezentujące trzy różne klasy pokrycia terenu, tj.: trawnik (dobrze utrzymany), naturalną łąkę oraz drogę z nawierzchnią asfaltową. Jak widać na rycinie 3.31 oraz 3.32 intensywność odbicia, zwłaszcza trawnika i łąki, jest bardzo podobna, natomiast szerokość echa (ryc. 3.32) pozwala na lepszą segmentację tych obszarów.

Podsumowując, dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego typu *full-waveform* mogą w znacznym stopniu poprawić dokładność klasyfikacji chmur punktów w obszarach zurbanizowanych. Parametrem dobrze różnicującym klasę obiektów antropogenicznych od wysokiej roślinności jest szerokość odbicia. Atrybut ten może być

również wykorzystany do rozróżnienia wewnątrz klasy „niskiej roślinności”, co potencjalnie wpłynie na poprawę dokładności generowanych na podstawie chmury punktów modeli terenu.



Ryc. 3.31. Obszary testowe: Trawnik, Łąka i Asfalt na tle obrazu intensywności odbicia



Ryc. 3.32. Średnie wartości intensywności (po lewej) i szerokości odbicia (po prawej) dla 3 obszarów testowych: Trawnik, Łąka, Asfalt

Lotnicze skanowanie laserowe typu *full-waveform* jest stosunkowo nowym narzędziem pozyskiwania informacji 3D i jego możliwości nie zostały jeszcze w pełni zbadane. Niewątpliwie dane te posiadają ogromny potencjał i w najbliższej przyszłości znajdują wiele zastosowań.

dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW

### 3.9. Nadawanie atrybutów koloru chmurze punktów LiDAR

Chmura punktów ALS po nadaniu jej właściwej georeferencji stanowi bardzo interesujący produkt końcowy. Może również stanowić produkt pośredni, wyjściowy do dalszego opracowania w celu wytworzenia różnorodnych zaawansowanych produktów finalnych.

Sama chmura punktów stanowi quasi-ciągły, przestrzenny, metryczny model terenu, wraz z obiektami położonymi na i nad powierzchnią gruntu. Model taki, za pomocą stosunkowo prostych w użyciu i łatwo dostępnych narzędzi programowych, można wizualizować na ekranie, oglądać z różnej perspektywy, wykonywać „przeloty” nad terenem oraz proste pomiary.

Dla zwiększenia efektu wizualnego chmurom punktów przypisuje się właściwy kolor w formie składowych RGB, tj. kolor powierzchni terenowej, od której odbił się promień laserowy. Aby uzyskać taki efekt, wraz z rejestracją skanerem laserowym, wykorzystuje się równoległe fotografowanie, np. kadrową kamerą cyfrową czy skanerem linijkowym CCD. Kamera taka jest zwykle zintegrowana z platformą skanującą i poddana kalibracji wraz z całym systemem rejestracji zainstalowanym na pokładzie samolotu. Oznacza to, że wykonane kolorowe zdjęcia kadrowe mają pomierzone w locie elementy orientacji zewnętrznej (tj. położenie środka rzutów i kąty nachylenia). Na podstawie matematycznej zależności między współrzędnymi terenowymi punktu  $(X, Y, H)$  i położeniem jego obrazu na zdjęciu (współrzędne płowe  $x, y$ ) można określić położenie każdego punktu chmury o współrzędnych przestrzennych  $(X, Y, H)$  na zdjęciu  $(x, y)$  i pobrać z tego miejsca informacje o kolorze w formie składowych  $(R, G, B)$ . Wyjaśniono to na ryc. 3.33.

Dla każdego punktu ALS o współrzędnych  $(X, Y, H)$  należy określić na podstawie tzw. warunku kolinearności położenie (współrzędne płowe  $x, y$ ) obrazu tego punktu na zdjęciu:

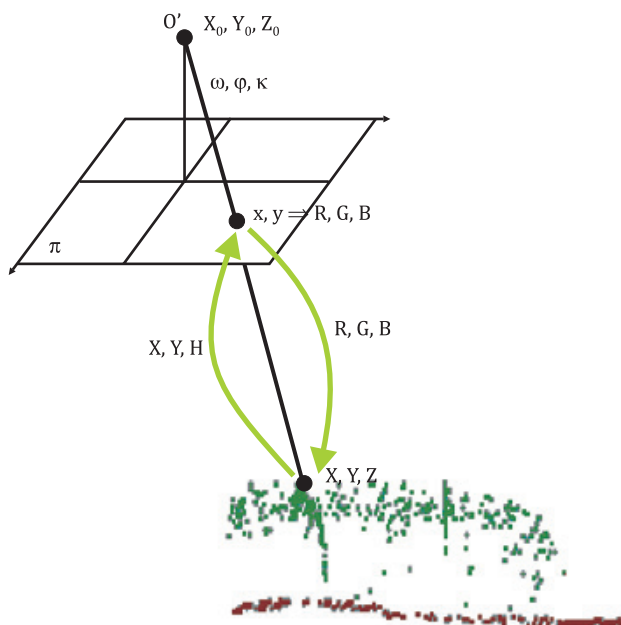
$$x = F_x(X, Y, H, \text{elementy orientacji wewnętrznej}, \text{elementy orientacji zewnętrznej})$$

$$y = F_y(X, Y, H, \text{elementy orientacji wewnętrznej}, \text{elementy orientacji zewnętrznej})$$

oraz

1. Pobrać z tego położenia składowe  $(RGB)$ .
2. Przypisać te składowe, w formie atrybutów, do punktu ALS.

Matematyczną podstawą tego algorytmu jest tzw. warunek kolinearności, łączący współrzędne terenowe punktu  $(X, Y, H)$  z położeniem jego obrazu na zdjęciu (współrzędne płowe  $x, y$ ) przez znane elementy orientacji wewnętrznej i zewnętrznej zdjęcia. W wyniku tego działania otrzymuje się kolorową chmurę punktów, znacznie zwiększającą efekt wizualny i możliwości interpretacyjne. Taka chmura daje quasi-ciągły obraz terenu, zbliżony do rzeczywistego, przy dużym zbliżeniu do szczegółów, obraz traci jednak ciągłość i poszczególne punkty chmury punktów ALS stają się widoczne. Kolorowa chmura punktów może być oglądana jednak z różnych perspektyw.



Ryc. 3.33. Kolorowanie chmury punktów ALS na podstawie rejestracji fotograficznej

dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW  
 dr hab. inż. Piotr Wężyk  
 mgr inż. Paweł Hawryło  
 mgr inż. Edyta Stojek  
 mgr Mateusz Maślanka

## 3.10. Standardy i formaty wymiany danych LiDAR

### 3.10.1. LAS (ASPRS)

Format LAS (*LASer File Format*) jest publicznym formatem obsługi i wymiany między użytkownikami chmur punktów 3D. Chociaż został opracowany do obsługi chmury punktów ze skanowania laserowego, to format ten może obsługiwać również dowolne inne zbiory danych przestrzennych, np. chmury punktów powstałych w wyniku automatycznego dopasowania obrazów (ang. *image matching*).

Format LAS został opracowany przez Amerykańskie Towarzystwo Fotogrametrii i Teledetekcji – ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) w roku

2003, jako LAS 1.0 Format Standard i stał się światowym standardem w zakresie obsługi danych skanowania laserowego, akceptowanym przez producentów sprzętu (skanerów) oraz oprogramowania do obróbki danych ze skanowania laserowego i samych użytkowników. Od tego czasu opublikowano kolejne, oficjalne wersje tego formatu, nadszające za rozwojem sprzętu i oprogramowania, tj.: LAS 1.1 – 2003 r., LAS 1.2 – 2005 r., LAS 1.3 – 2010 r. oraz LAS 1.4 – 2011 r. Obecnie trwają prace nad wersją LAS 2.0.

Oprócz oficjalnych wersji, wydawanych przez ASPRS, pojawiają się inne propozycje tego formatu, uwzględniające specyficzne potrzeby użytkowników, np. zapisu i obróbki danych ze skanowania laserowego linii przesyłowych.

Główną składową formatu LAS jest format zapisu właściwych danych ze skanowania laserowego, tj. chmury punktów: *Point Data Record Format*. Występuje kilka takich formatów (np. Format 0, 1, 2, 3 lub 4) różniących się ilością przechowywanych informacji (tab. 3.5). Stanowią je rekordy danych przypisanych do każdego punktu z chmury ALS. Taki rekord zawiera m.in. współrzędne (X, Y, Z) punktu, wartość intensywności, numer odbicia (echa), liczbę odbić (ech), kierunek skanowania, krawędź linii skanowania, zdefiniowaną klasę punktów, kąt skanowania, dane użytkownika oraz źródło danych. Pełna specyfikacja formatów LAS jest dostępna na stronie *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* ([www.asprs.org](http://www.asprs.org)).

Tabela 3.5. Poszczególne formaty danych w standardzie LAS (ASPRS)

Item	Point Data Record Format						
	0	1	2	3	4	5	6-10
X	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Y	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Z	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Intensity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Return Number	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Number of Returns (given pulse)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Scan Direction Flag	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Edge of Flight Line	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Classification	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Scan Angle Rank	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
User Data	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Point Source ID	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
R			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
G			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
B			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
GPS Time		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
'Waveform Packet Information'					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Classification Flag							<input checked="" type="checkbox"/>
Scanner Channel							<input checked="" type="checkbox"/>
Scan Angle							<input checked="" type="checkbox"/>

Poniżej przedstawiono specyfikację formatu: LAS w wersji 1.2 Point Data Record Format 3, który zastosowano do zapisu i obsługi danych ALS w projekcie ISOK.

### LAS, wersja 1.2. Point Data Record Format 3

Format zawiera dane binarne, składające się z:

1. bloku nagłówkowego (*PUBLIC HEADER BLOCK*) – ogólne informacje o zbiorze (pliku) danych, m.in.:
  - oznaczenie formatu zapisu czasu GPS (*Global Encoding*),
  - numer wersji formatu LAS (*Version Major, Version Minor*),
  - informacja o skanerze (*System Identifier*),
  - informacja o oprogramowaniu (*Generating Software*),
  - dzień roku utworzenia (*File Creation Day of Year*),
  - rok utworzenia zbioru (*File Creation Year*),
  - rozmiar nagłówka (*Header Size*),
  - liczba rekordów ze zmienną długością (*Number of Variable Length Records*),
  - numer formatu danych (*Point Data Format ID*),
  - liczba rekordów z danymi (*Number of point records*),
  - skala współrzędnych (X,Y,Z) (*X scale factor, Y scale factor, Z scale factor*),
  - przesunięcie początku układu współrzędnych (X,Y,Z) (*X offset, Y offset, Z offset*),
  - maksymalne i minimalne wartości (X,Y,Z) (*Max X, Min X, Max Y, Min Y, Max Z, Min Z*).
2. rekordów ze zmienną długością (*VARIABLE LENGTH RECORDS*);
3. rekordów z danymi o punktach ALS (*POINT DATA RECORDS*), gdzie do każdego punktu przypisany jest rekord danych:
  - (X, Y, Z) – współrzędne przestrzenne punktu,
  - *Intensity* – intensywność (wartość odbicia),
  - *Return Number* – kolejne odbicie (echo) danego impulsu laserowego (pierwsze odbicie posiada nr 1, drugie nr 2 itd.),
  - *Number of Returns (given pulse)* – łączna liczba odbić (ech) danego impulsu laserowego,
  - *Scan Direction Flag* – kierunek skanowania, zależy od kierunku obrotu lustra w momencie emisji impulsu, wartość = 1 oznacza kierunek dodatni (od lewej do prawej strony), wartość = 0 – kierunek ujemny,
  - *Edge of Flight Line* – wartość = 1 oznacza punkt skrajny w linii (ostatni punkt przed zmianą kierunku skanowania),
  - *Classification* – przynależność danego punktu do klasy (tab. 3.6),
  - *Scan Angle Rank (-90 to +90)* – *Left side* – kąt, pod którym skaner wyemitował impuls, z uwzględnieniem kąta omega samolotu. Dokładność kąta ok. 1°. Dla nadiru kąt jest równy zero, kąt jest ujemny dla wychylenia układu na lewo (od kierunku lotu),
  - *User Data* – pole definiowane przez użytkownika,
  - *Point Source ID* – oznaczenie zbioru, z którego pochodzi punkt (np. numer szeregu),

- *GPS Time* – format zapisu czasu GPS: tygodniowy (*GPS Week Time*) lub absolutny (*Absolute GPS Time*),
- *Red, Green, Blue* – składowe barw RGB punktu (pochodzące z danych zewnętrznych, zwykle kamery cyfrowej).

Tabela 3.6. Klasyfikacja chmury punktów zgodnie z ASPRS (*ASPRS Standard LiDAR Point Classes*) dla *Point Data Record Format 0–5*

Wartość klasyfikacji (bity 0:4)	Znaczenie	Tłumaczenie
0	Created, never classified	punkty utworzone, nigdy nie klasyfikowane
1	Unclassified	punkty niesklasyfikowane
2	Ground	punkty leżące na gruncie
3	Low Vegetation	punkty reprezentujące niską roślinność
4	Medium Vegetation	punkty reprezentujące średnią roślinność
5	High Vegetation	punkty reprezentujące wysoką roślinność
6	Building	punkty reprezentujące budynki
7	Low Point (noise)	szum (punkty omyłkowe)
8	Model Key-point (mass point)	punkty kluczowe
9	Water	punkty reprezentujące obszary pod wodami
10	Reserved for ASPRS Definition	zarezerwowane dla przyszłych definicji ASPRS
11	Reserved for ASPRS Definition	zarezerwowane dla przyszłych definicji ASPRS
12	Overlap Points	punkty z obszarów wielokrotnego pokrycia
13–31	Reserved for ASPRS Definition	zarezerwowane dla przyszłych definicji ASPRS

### 3.10.2. ASCII

Zapis chmury punktów do postaci ASCII (ang. *American Standard Code for Information Interchange*), czyli stosowanie 7-bitowego kodu przyporządkowującego liczby z zakresu 0-127: literom (alfabetu angielskiego), cyfrom, znakom przestankowym i innym symbolom oraz poleceniom sterującym – o ile jest bardzo proste i czytelne dla użytkownika – to jednak jest mało wydajne.

Poszczególne wartości atrybutów dla pól: X, Y, Z, intensywność itd. według standardu LAS (ASPRS), rozdzielane określonym znakiem (np. spacja, tabulator, średnik), tworzą wiersze dla każdego punktu z chmury ALS. Tego typu zapis chmury punktów ALS danego obszaru jest kilka razy większy niż zapis binarny. Przykładowo reprezentacja liczby 65535 zajmuje w zapisie binarnym 2 bajty, a w zapisie ASCII (tekstowym) zajmuje aż 5 bajtów. Poza tym dane binarne wczytują się znacznie szybciej, ponieważ nie wymagają konwersji, tak jak ma to miejsce w przypadku wczytywania

danych ASCII. Przykładowy arkusz chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego został zapisany w różnych formatach danych w celu porównania ich wielkości (tab. 3.7).

Tabela 3.7. Wielkości przykładowego pliku LAS w różnych formatach zapisu danych

Liczba punktów	Format zapisu danych (MB)				
	LAS	LAZ	FBI	BIN	ASCII
23.834.505	772	140	704	636	1751

O ile jeszcze 10 lat temu dostawa chmur punktów do użytkownika końcowego, w postaci skompresowanych plików tekstowych (ASCII plik tekstowy TXT lub w formie skompresowanej ZIP lub RAR) nie była dla niego wielkim zaskoczeniem, tak obecnie, dostawcy danych przekazują je najczęściej w formacie LAS (ASPRS) lub nawet LAZ (rapidlasso), czyli w skompresowanej postaci.

### 3.10.3. LAZ (rapidlasso GmbH)

Martin Isenburg, twórca oprogramowania LAStools (obecnie dystrybucja poprzez firmę rapidlasso GmbH), kilka lat temu zaproponował innowacyjną metodę kompresji chmur punktów LiDAR o nazwie LASzip. Tradycyjne metody kompresji, takie jak WinZIP czy WinRAR są niestety zbyt mało wydajne w przypadku chmur punktów ALS, ponieważ nie mają one dostępu do wewnętrznej struktury pliku LAS (ASPRS). Kolejnym problemem, w przypadku wymienionych metod kompresji jest fakt, iż by umożliwić dostęp do zawartości pliku, musi on zostać uprzednio zdekompresowany. Algorytmy użyte w LASzip pozwalają na bezstratną kompresję danych w formacie LAS w wersjach od 1.0 do 1.3 oraz danych tekstowych.

W pakietach oprogramowania do przetwarzania chmur punktów LiDAR, takich jak: LAStools czy FUSION, możliwe jest prowadzenie wszystkich analiz bezpośrednio na plikach w formacie LAZ, bez konieczności ich tymczasowego nawet rozpakowywania. Jest to metoda bardzo wydajna w kontekście wykorzystywania pamięci komputera. Aby rozpocząć proces kompresji lub dekompresji pliku metodą LASzip konieczne jest wczytanie do pamięci komputera jedynie pewnej niewielkiej części pliku wejściowego. W przypadku metod tzw. non-streaming, aby rozpocząć proces kompresji, wszystkie punkty muszą zostać wcześniej wczytane do pamięci komputera, co w oczywisty sposób zwiększa wymagania sprzętowe i czas procesu. Kompresor LASzip nie modyfikuje nagłówka pliku LAS, który jest po prostu kopiowany w niezmienionej postaci do pliku LAZ. W rzeczywistości kompresja pliku LAS wykonywana jest przez pięć różnych kompresorów odpowiedzialnych za kompresję konkretnych właściwości punktów pogrupowanych w następujące moduły: POINT10, GPSTIME10, RGB12, WAVEPACKET13, BYTE. Oznacza to, że za kompresję takich informacji jak współrzędne: XYZ, intensywności odbicia, nr klasy, nr odbicia itd., które należą do grupy cech tzw. POINT10, odpowiada inny kompresor niż za kompresję informacji o czasie dokonanej pomiaru (GPSTIME10). Me-



todo LASzip pozwala zmniejszyć rozmiar pliku do około 7–25 % rozmiaru oryginalnego. W przypadku chmur punktów LiDAR z projektu ISOK wskaźnik kompresji przyjmuje wartość ok. 6.3 : 1.

Kod źródłowy opisanej kompresji LASzip został udostępniony na licencji LGPL oraz zaimplementowany w otwartych bibliotekach LASlib pakietu LAStools oraz libLAS. Używając pakietu oprogramowania rapidlasso ([rapidlasso.com](http://rapidlasso.com)), możliwa jest praca z plikami LAZ w trybie okienkowym bądź w linii komend, co znacząco wpływa na optymalizację przetwarzania dużych zbiorów danych. Nowy format danych LAZ jest już wykorzystany w kilku innych pakietach oprogramowania, takich jak: FME 2012, TopoDOT, VoyagerGIS, LAStools i innych. Format LAZ znalazł uznanie takich firm jak USACE, Certainty3D, Watershed Sciences, RIEGL i wielu innych.

#### 3.10.4. MG4 (LizardTech)

Firma LizardTech, znana z kompresji falkowej obrazu – MrSID, opracowała aplikację LiDAR Compressor przeznaczoną dla chmur punktów LiDAR zapisanych w formacie LAS (ASPRS) lub ASCII. Bezstratna kompresja powoduje zmniejszenie rozmiarów plików nawet o 75%, przy zachowaniu wszystkich punktów i dokładności ich położenia do formatu MG4. W sytuacjach krytycznych, rozmiar można zmniejszyć nawet o 90%, ale już przy stosowaniu kompresji stratnej. Program obsługuje dane w formacie LAS 1.0, 1.1 oraz 1.2, w tym wszystkich typów tzw. „Point Data Record” a także MrSID (MG4). Produktem kompresji są dane w formacie MG4, który jest obsługiwany m.in. przez: Global Mapper i ArcGIS Esri (3D Analyst). Interfejs oprogramowania umożliwia planowanie kolejki prac (kompresji) oraz podgląd chmury punktów z możliwością zmiany skali. Oprogramowanie wymaga systemu operacyjnego Microsoft Windows: XP 32-bit SP3, XP 64-bit SP2, Vista 32-bit SP1, Vista 64-bit SP1 oraz Windows 7 32- lub 64-bit. Przedstawiciele firmy LizardTech zasiadają w Komitecie Technicznym Open Geospatial Consortium (OGC).

#### 3.10.5. zLAS (Esri)

Firma Esri Inc. w 2014 roku zaproponowała format kompresji chmur punktów LiDAR pod nazwą zLAS, który umożliwia niezmiernie szybki i wydajny dostęp do struktury chmury punktów w formacie LAS (ASPRS). Jest on obsługiwany zarówno przez aplikacje desktopowe, jak również nadaje się do przechowywania i dystrybucji danych LiDAR na serwerach. Kompresja do formatu zLAS wykonywana jest przy pomocy bezpłatnego narzędzia Esri LAS Optimizer, które nie wymaga dostępu do oprogramowania ArcGIS. Użytkownicy oprogramowania ArcGIS 10.2.1 mogą pracować z plikami zLAS bez konieczności ich rozpakowywania. W procesie kompresji chmury punktów, statystyki oraz indeksy przestrzenne dodawane są do skompresowanego pliku (LASX). Dzięki temu plik wynikowy jest łatwiejszy w użyciu, a dostęp do danych przez zapytania przestrzenne i tematyczne został znacząco usprawniony. Narzędzie LAS Optimizer buduje indeksy przestrzenne korzystając ze średnich odstępów pomiędzy poszczególnymi punktami

chmury LiDAR. Plik LASX jest jedynie plikiem pomocniczym, który zawiera statystyki oraz indeksy przestrzenne. Użytkownik ma możliwość skorzystania z opcji automatycznego skanowania plików i uśredniania wartości odstępów pomiędzy punktami, wskazania pliku nagłówkowego, z którego odczytana jest informacja o odstępach lub samodzielnie wpisania wartości, o ile jest ona jemu znana. Po przeprowadzeniu kompresji do formatu zLAS generowany jest dodatkowy plik tekstowy, tzw. raport, który zawiera m.in. informacje o: plikach, czasie trwania procesu, wartości odstępów pomiędzy punktami LiDAR oraz wartości współczynnika kompresji. Przykładowy plik LAS pochodzący z projektu ISOK poddany kompresji zLAS, przed spakowaniem posiada rozmiar 215 MB, a po skompresowaniu zaledwie 28 MB (współczynnik 7,2 : 1). Średnia odległość między punktami obliczona została na 0.22 m.

### 3.10.6. SHP (Esri)

Dane LiDAR mogą być przechowywane i przetwarzane w standardowym formacie danych wektorowych – pliku SHP. Oprócz współrzędnych X i Y, plik SHP zawierający dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego posiada wartości wysokości współrzędnej Z. Ponadto wartość ta może być przechowywana równoległe w tabeli atrybutów wraz z innymi atrybutami dostępnymi w źródłowej chmurze punktów ALS (ryc. 3.34).

ID	Shape	X	Y	Z	RITH	CLS	PSH	RETRUM	NUMPTS	SCHAULE	PORTNUM	THIRSTEP	DEL	GDEH	BLUE
0	Point ZM	620115.62	172313.41	808.44	23	2	62	4	4	32	0	34628888.187448	1945	2099	1768
1	Point ZM	620116.95	172331.98	799.76	15	4	62	3	4	14	1	34628888.061928	1920	1920	1868
2	Point ZM	620116.74	172332.37	797.88	6	2	62	4	4	14	2	34628888.081928	1920	1845	1817
3	Point ZM	620116.89	172331.75	798.82	10	4	62	0	6	14	3	34628888.081928	1920	1820	1868
4	Point ZM	620117.05	172338.18	805.21	19	2	62	0	6	13	4	34628888.081928	1945	2022	1898
5	Point ZM	620118.21	172322.58	801.83	27	3	62	3	3	13	5	34628888.082219	2018	2080	2045
6	Point ZM	620118.04	172319.58	802.7	22	3	62	4	4	13	6	34628888.082240	2073	2073	1945
7	Point ZM	620119.01	172317.32	803.94	13	3	62	3	3	13	7	34628888.082260	1817	1945	1768
8	Point ZM	620119.00	172315.86	804.15	20	2	62	5	5	13	8	34628888.082272	1894	1990	1768
9	Point ZM	620119.15	172315.41	804.41	41	2	62	4	4	13	9	34628888.082277	2073	2099	1845
10	Point ZM	620119.82	172314.17	808.87	79	2	62	3	3	12	10	34628888.082287	1920	2045	1894
11	Point ZM	620119.61	172313.7	808.98	12	3	62	3	3	12	11	34628888.082192	2022	2178	1998
12	Point ZM	620116.88	172331.88	805.6	30	5	62	2	2	14	12	34628888.092822	1920	1945	1817
13	Point ZM	620116.91	172331.48	804.42	25	5	62	4	4	14	13	34628888.092827	1998	1971	1920
14	Point ZM	620116.97	172331.03	804.58	40	5	62	1	3	14	14	34628888.092831	2201	2150	2178
15	Point ZM	620116.82	172331.34	805.28	32	5	62	2	3	14	15	34628888.092831	1971	1945	1894
16	Point ZM	620116.2	172332.58	798.04	30	2	62	3	3	14	16	34628888.092831	1971	1998	1868

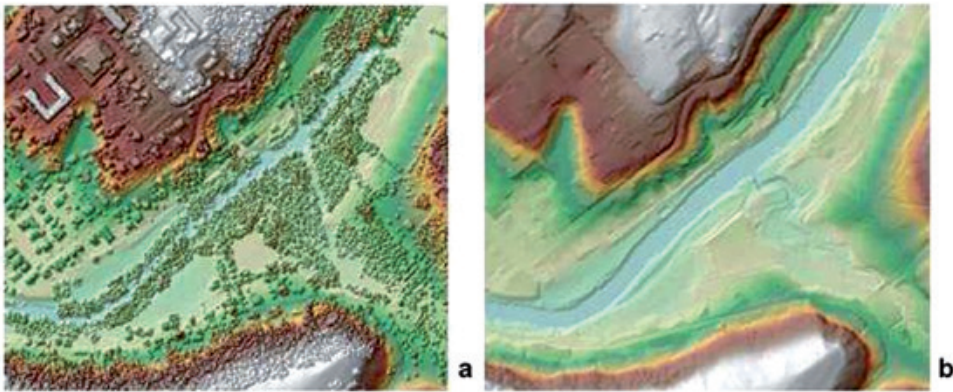
Ryc. 3.34. Tabela atrybutów chmury punktów w formacie SHP

Wykorzystanie danych LiDAR w formacie SHP może sprawić wiele problemów związanych przede wszystkim z wydajnością przeglądania, przetwarzania i przechowywania danych o znacznych rozmiarach względem nieskompresowanej chmury punktów w formacie LAS.

dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW

### 3.11. Ocena technologii ALS oraz podstawowych produktów pochodnych

Przestrzenne chmury punktów ALS po nadaniu im georeferencji stanowią zwykle produkt pośredni, a zarazem wejściowy do procesu opracowania właściwych produktów końcowych. Wśród takich produktów, w pierwszej kolejności, należy wymienić modele wysokościowe, w budowie których lotnicze skanowanie laserowe wypiera tradycyjne opracowania bazujące na zdjęciach lotniczych (ryc. 3.35).



Ryc. 3.35. Modele wysokościowe wygenerowane z chmury punktów ALS: a – pierwsze odbicia tworzą NMPT, b – po odfiltrowaniu odbić od obiektów wystających ponad grunt (budynki, roślinność) tworzą one NMT

Chmura punktów może stanowić także dane wejściowe do tworzenia opracowań wektorowych, a w tym generowania przestrzennych modeli budynków i miast (tzw. modele miast 3D), przydatnych do wielu dalszych aplikacji. Chmura może być również źródłem opracowania przestrzennych map wektorowych, np. szlaków kolejowych, linii energetycznych, stref przybrzeżnych itd.

Obecnie obserwowany jest szybki rozwój oprogramowania do automatycznego opracowania danych ze skanowania laserowego, a lotnicze skanowanie laserowe staje się alternatywną techniką pozyskiwania danych przestrzennych w stosunku do zdjęć lotniczych i ich tradycyjnego fotogrametrycznego opracowania. W tabeli 3.8 zawarto porównanie obu tych technik.

Tabela 3.8. Zestawienie techniki lotniczego skanowania laserowego oraz klasycznej fotogrametrii

Kryterium	Technologia lotniczego skanowania laserowego	Technologia fotogrametrycznego opracowania zdjęć lotniczych
pora dnia obrazowania	dzień lub noc	tylko dzień
zależność od warunków atmosferycznych	mała	duża
zależność obrazowania od pory roku (sezonu)	mała	średnia (dla zdjęć wielkoskalowych duża)
forma danych	dyskretna, pracochłonne przejście na wektorową postać wyników typu CAD	ciągła (obraz tonalny), stosunkowo łatwe przejście na wektorową postać wyników typu CAD
dostęp danych na powierzchniach homogenicznych	praktycznie nie zależy od rodzaju powierzchni (dostępna informacja na powierzchniach homogenicznych, poza powierzchniami absorbującymi promieniowanie)	trudność opracowania na powierzchniach homogenicznych (brak tekstury obrazu)
dostępność danych przestrzennych	pozyskiwane bezpośrednio	po złożonym opracowaniu danych źródłowych
dokładność danych źródłowych	bardzo wysoka dokładność wysokościowa, gorsza dokładność sytuacyjna	zależy od skali zdjęć. Dla zdjęć wielkoskalowych wysoka dokładność sytuacyjna i gorsza dokładność wysokościowa
ekstrakcja informacji semantycznej	trudna z chmury punktów, łatwiejsza z obrazu intensywności	dane bogate w informację semantyczną
detekcja i pomiar linii nieciągłości terenu	brak bezpośredniej możliwości	możliwa
czas opracowania	krótki	średni (zależy od stopnia automatyzacji procesów technologicznych)
objętość danych	bardzo duża	duża
penetracja szaty roślinnej	dość duża	bardzo ograniczona
podatność na automatyzację procesów opracowania	duża	średnia (zróżnicowana dla różnych technologii)
potencjał dalszego rozwoju	duży	umiarkowany
koszt pozyskania danych	wysoki, szczególnie dla mniejszych obszarów	umiarkowany (silnie zależy od skali zdjęć)

### 3.11.1. Dokładność skanowania lotniczego

Dokładność sytuacyjna i wysokościowa chmury punktów ALS determinowana jest przez precyzję trzech składowych komponentów aparatury, tj.:

- dalmierza laserowego,
- inercyjnego systemu nawigacyjnego INS określającego orientację kątową kierunku impulsu,
- systemu GNSS określającego pozycję, z której wysłano impuls.

Błąd pomiaru odległości ocenia się w przedziale 0,02–0,03 m. Błąd pomiaru pozycji techniką dGNSS ocenia się pomiędzy 0,05–0,07 m. Oba te błędy praktycznie nie zależą od wysokości lotu. Błąd wnoszony przez system INS zależy od wysokości lotu (ten sam błąd kątowy spowoduje większy błąd liniowy punktu ALS z większej wysokości). Sumując te wartości, po wyeliminowaniu błędów systematycznych aparatury, można stwierdzić, iż lotnicze skanowanie laserowe dostarcza danych o dokładności wysokościowej (H) na poziomie 0,15 m. Dla lotów na niskiej wysokości (np. podczas lotów helikoptrem) błąd ten można zredukować do 0,10 m. Dokładność sytuacyjną punktów (X, Y) ALS ocenia się w przedziale 0,4–0,5 m.

### 3.11.2. Zalety i ograniczenia lotniczego skanowania laserowego

Technika skanowania laserowego ma wiele istotnych zalet, wyróżniających ją spośród innych technik pomiarowych:

1. Skaner laserowy jest systemem aktywnym (ma własne źródło „oświetlenia”), co czyni go całkowicie niezależnym od warunków oświetleniowych. Pora nocna obrazowania jest nawet korzystniejsza, z uwagi na mniejsze turbulencje powietrza (ale nocą nie jest możliwa rejestracja kamerą cyfrową RGB).
2. Obrazowanie tą techniką jest możliwe nawet przy pełnym zachmurzeniu, o ile podstawa chmur jest wyższa od wysokości lotu. Tylko silny deszcz i mgła, tj. warunki ograniczające penetrację promienia laserowego, stanowią przeszkodę. Oznacza to, że w krajowych warunkach klimatycznych prawie połowa dni w roku to dni „lotne”. Stanowi to istotną przewagę nad zdjęciami lotniczymi.
3. Unikatową cechą lotniczego skanera laserowego jest możliwość penetracji przez warstwę roślinności. Przy dużej gęstości próbkowania jest stosunkowo łatwo – na etapie obróbki danych – odróżnić i wyeliminować odbicia od koron drzew od odbić od gruntu. Trudności mogą wystąpić w zwartym młodniku świerkowym. Właściwość ta czyni technikę skanowania laserowego przydatną na obszarach zalesionych, gdzie tradycyjne zdjęcia nie sprawdzają się.
4. Możliwość rejestracji wielu odbić (ech sygnału).
5. Bezpośrednia rejestracja danych przestrzennych.
6. Krótki cykl opracowania danych i wytworzenia produktów finalnych.
7. Bardzo wysoka dokładność wysokościowa danych pomiarowych.

Wśród ograniczeń skanowania laserowego można wymienić:

1. Brak ciągłego obrazu tonalnego i słabą jakością obrazu intensywności.
2. Brak odbić od powierzchni wody, co utrudnia lokalizację linii brzegowej.
3. Trudności określenia linii szkieletowych i linii nieciągłości terenu.
4. Dokładność sytuacyjna gorsza od dokładności wysokościowej.
5. Duża objętość danych.
6. Stosunkowo wysoki koszt pozyskania i opracowania danych.

Przy porównaniu techniki lotniczego skanowania laserowego z fotogrametrią bazującą na tradycyjnych zdjęciach lotniczych należy wziąć pod uwagę, że porównywalne – pod względem dokładności – wyniki mogą być osiągnięte z opracowania zdjęć wielkoskalowych, w skali około 1 : 8000. Analiza kosztów wykazuje, że jeżeli produktem końcowym ma być precyzyjny NMT, to skanowanie laserowe pod względem kosztów i wydajności ma przewagę nad tradycyjnym opracowaniem fotogrametrycznym. Jeżeli oprócz NMT przewiduje się również inne produkty pochodne z przetwarzania zdjęć, (takie jak ortofotomapa), to przewaga ta nie jest już tak oczywista i wymaga bardziej szczegółowej analizy konkretnej sytuacji. Perspektywicznym (i już coraz częściej stosowanym) rozwiązaniem jest łączenie obrazowania skanowania laserowego z obrazowaniem kamerą cyfrową. W przyszłości nastąpi prawdopodobnie połączenie tych dwóch systemów w jeden.

Technika lotniczego skanowania laserowego dynamicznie się rozwija. Dotyczy to zarówno sprzętu, jak i metod opracowania. Powoduje to jednocześnie wzrost wydajności i spadek kosztów. Nadal jednak technika ta ustępuje wykonawstwu zdjęć lotniczych i fotogrametrycznemu ich opracowaniu. Technika lotniczego skanowania laserowego nie jest opłacalna dla małych obszarów. Jeśli celem obrazowania ALS jest opracowanie precyzyjnego NMT, co jest typowym zastosowaniem, to przy bardzo dużym obszarze opracowania (np. projekt ISOK) koszt produktu w Polsce można oszacować na około 400 zł/km<sup>2</sup>, z czego około połowę stanowią same koszty nalotu ALS.

## Literatura

- Antonarakis A. S., Richards K. S., Brasington J., 2008. *Object-based land cover classification using airborne LiDAR*. Remote Sensing of Environment 112 (2008): 2988–2998.
- Axelsson P., 2000. *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing: 110–117.
- Będkowski K., Wężyk P., 2010. *Geomatyka w lasach państwowych*. Część I. Podstawy: 326–343.
- Chen S. C., Shyu W. D., Mei-Ling, Yan J., Zhang C., Zhang K., 2003. *A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing: 872–882.
- Cui Z., Zhang K., 2007. *Airborne LiDAR Data Processing and Analysis Tools*. National Center for Airborne Laser Mapping, Miami.
- Kraus K., 2007. *Photogrammetry. Geometry and Laser Scans (Second Edition)*. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Kraus K., Rieger W., 1999. *Processing of laser scanning data for wooded areas*. Photogrammetric Week '99, Heidelberg, Wichmann.

- Kurczyński Z., 2014. *Fotogrametria*. PWN, Warszawa.
- Liu X., 2008. *Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues*. Progress in Physical Geography, 31–49.
- Mandlbürger G., 2009. *DTM generation from ALS data for flood extent mapping*. Presentation in Terrasolid Users Event.
- Maślanka M., 2011. *Ocena dokładności numerycznego modelu terenu utworzonego z danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego*.
- Pfeifer N., 2008. *Strip Adjustment and DSM Computation*. International School on LiDAR Technology 2008 IIT Kanpur, India.
- Quadros N. D., Collier P. A., Fraser C. S., 2008. *Integration of Bathymetric and Topographic LiDAR: A Preliminary Investigation*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B8, Beijing.
- Renslow M. S., 2014. *Manual of Airborne Topographic LiDAR*.
- Sithole G., Vosselman G., 2003. ISPRS comparison of filters.
- Ślota M., 2008. *Decomposition Techniques for full-waveform Airborne Laser Scanning Data*. *Geomatics and Environmental Engineering*. Vol. 8/1, 61–74.
- Toth Ch. K., 2011. *LiDAR Waveform in Mobile Mapping*. Tutorial at 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Kraków, Poland.
- Vosselman G., Mass H-G., 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, UK.
- Whitman D., Zhang K., 2005. *Comparison of Three Algorithms for Filtering Airborne LiDAR Data*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 313–324.

## Strony internetowe

- [www.asprs.org](http://www.asprs.org)  
[www.codgik.gov.pl](http://www.codgik.gov.pl)  
[www.lizardtech.com/products/lidar](http://www.lizardtech.com/products/lidar)  
[www.rapidlasso.com](http://www.rapidlasso.com)  
[www.riegl.com](http://www.riegl.com)

## 4. Numeryczne modele wysokościowe i produkty pochodne

### 4.1. Numeryczny model terenu

#### 4.1.1. Definicja i sposoby organizacji danych w NMT

Numeryczny model terenu (NMT, ang. *Digital Terrain Model; DTM*) stanowi uporządkowany zbiór punktów reprezentujących wysokości topograficzne powierzchni terenu wraz z algorytmami interpolacyjnymi pozwalającymi na odtworzenie (interpolację) tej powierzchni w dowolnym miejscu. Algorytm interpolacyjny pozwala na określenie wartości wysokości ( $H$ ) dowolnego punktu na podstawie jego współrzędnych płaskich ( $X$ ,  $Y$ ). Numeryczne modele terenu, oprócz punktów wysokościowych, mogą zawierać również informacje geomorfologiczne.

Dane w NMT mogą być zorganizowane na trzy sposoby (ryc. 4.1). Najprostszy model organizacji danych oparty jest na siatce kwadratów, przy czym każdemu węzłowi tej siatki przypisana jest wysokość ( $H$ ). W modelu tym dane mogą być przechowywane w postaci tablicy (macierzy) i dlatego, z racji prostoty i łatwości realizacji, model ten stosowany jest najczęściej. W programach komputerowych, a w szczególności w systemach GIS, model ten występuje pod nazwą GRID. Wadą tego modelu jest jednak brak możliwości wiernego odzwierciedlenia przebiegu linii strukturalnych powierzchni terenu, np. linii krawędziowych na skarpach. Ponadto model GRID wymaga zawsze interpolacji wyjściowej chmury punktów ze skanowania laserowego do regularnej struktury.

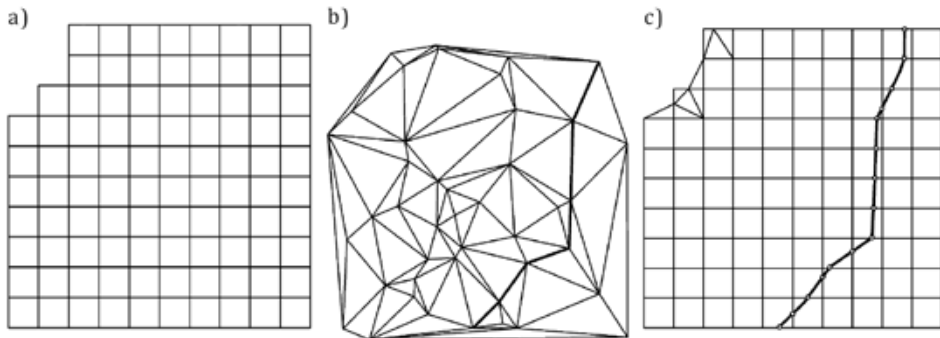
Pewnym wariantem modelu GRID jest model rastrowy: na podstawie wysokości w punktach siatki generowany jest obraz (zdjęcie), w którym poszczególnym pikselom (a więc obszarowi) przyporządkowano wysokości punktów siatki.

Drugi stosowany model organizacji danych NMT oparty jest na nieregularnej siatce trójkątów, która tworzona jest na podstawie oryginalnych danych ALS, bez jakiegokolwiek ich interpolacji. Sieć trójkątów tworzona jest zgodnie z ustalonymi kryteriami matematycznymi (geometrycznymi), najczęściej jako tzw. triangulacja *Delaunay*. W programach komputerowych model ten występuje pod nazwą TIN (ang.



*Triangular Irregular Network*). Zaletą tego modelu jest możliwość uwzględnienia linii strukturalnych powierzchni, jeśli ich przebieg jest znany (pomierzony). Położenie linii strukturalnych powierzchni wprowadzane jest wtedy jako wymuszone połączenie w sieci trójkątów (ryc. 4.1b). Wadą modelu TIN jest skomplikowana w stosunku do modelu GRID struktura topologiczna, wymuszająca konieczność zapamiętania wielu dodatkowych informacji (lista trójkątów, lista trójkątów sąsiednich, numery węzłów i inne). Ponadto należy zwrócić uwagę, że trójkątowanie dla zadanej chmury punktów prowadzi zawsze do utworzenia otoczki wypukłej (por. ryc. 4.1). Dla obszarów o nieregularnych kształtach mogą pojawić się na obrzeżu niepożądane defekty. W takiej sytuacji rozwiązaniem jest wprowadzenie krawędzi obszaru opracowania jako linii poligonowej (ang. *border line*). Większość programów GIS oferuje taką możliwość. W przypadku modelu GRID obszar opracowania ograniczony jest zasięgiem siatki kwadratów (ryc. 4.1a).

Modelem łączącym zalety omawianych powyżej dwóch podstawowych NMT jest model hybrydowy organizacji danych (ryc. 4.1c). Model ten ma strukturę warstwową, gdzie warstwę podstawową stanowi siatka kwadratów z wysokościami (GRID). Na kolejnych warstwach mogą być zapamiętane, w postaci wektorowej, linie strukturalne powierzchni czy też elementy nieregularnej sieci TIN. Struktura modeli hybrydowych pozwala uwzględnić znacznie więcej różnorodnych informacji, jednak w przypadku zasilania NMT danymi ALS wystarczające są wysokości na regularnej siatce oraz linie krawędziowe powierzchni. Poszczególne warstwy integrowane są ze sobą na etapie wizualizacji NMT czy generowania produktów pochodnych NMT. Model hybrydowy organizacji danych występuje w zaawansowanych, dedykowanych NMT, realizacjach komputerowych.



Ryc. 4.1. Organizacja danych w NMT: a) model typu GRID, b) TIN, c) model hybrydowy

### 4.1.2. Źródłowe dane wysokościowe

Dane do NMT mogą być pozyskiwane z wykorzystaniem różnych technologii pomiarowych, również na podstawie dostępnych materiałów kartograficznych. W szczególności źródłem danych dla NMT może być:

1. Bezpośredni pomiar terenowy metodami geodezyjnymi. Jest to sposób bardzo dokładny, ale tylko w punktach pomiarowych; zagęszczenie punktów pomiarowych jest stosunkowo niewielkie, uwarunkowane geomorfologią terenu. Metoda ta stosowana jest do budowy lokalnych, precyzyjnych NMT, na ogół do realizacji przedsięwzięć inżynierskich.
2. Pomiar fotogrametryczny stereomodelu utworzonego na podstawie zdjęć lotniczych. W metodzie tej możliwe jest bardzo duże zagęszczenie powierzchni terenu punktami pomiarowymi. Pomiarowi na stereomodelu podlegają punkty rozproszone regularnie lub nieregularnie oraz wszelkie punkty charakterystyczne, np. na liniach nieciągłości. Pomiar może być realizowany w trybie ręcznym lub automatycznym z wykorzystaniem korelacji obrazu. W przypadku pomiaru automatycznego możliwy jest dobór optymalnej, w zależności od ukształtowania powierzchni terenu, wielkości siatki pomiarowej. Wysokości pomierzone w tym trybie wymagają na ogół filtracji.
3. Pomiar stereomodelu utworzonego na podstawie zdjęć satelitarnych. Opracowanie zdjęć satelitarnych jest zbliżone do opracowania zdjęć lotniczych; dotyczy to również NMT.
4. Digitalizacja istniejących materiałów kartograficznych. Digitalizacji podlegają linie warstwicowe oraz inne elementy rzeźby terenu (np. punkty wysokościowe) zobrazowane na mapach topograficznych. Jest to metoda stosunkowo tania, ale mało dokładna.
5. Interferometria radarowa (InSAR). Metoda ta polega na obrazowaniu powierzchni terenu z wykorzystaniem radaru (zakres mikrofalowy) z pułapu lotniczego, a najczęściej satelitarnego. W wyniku odpowiedniego przetwarzania danych, na podstawie przesunięcia fazowego wyznaczane są wysokości punktów. Wysokości te wymagają na ogół filtracji. Technologia InSAR stosowana jest do budowy modeli globalnych obejmujących bardzo duże obszary.
6. Skanowanie laserowe z pułapu lotniczego, a dla niewielkich obszarów również z powierzchni terenu (naziemne skanowanie laserowe).

Technologia lotniczego skanowania laserowego stała się w ostatnich latach podstawowym źródłem danych dla NMT i niemal całkowicie wyeliminowała inne metody pomiarowe w zakresie budowy wysokorozdzielczych, precyzyjnych NMT.

Wynikiem skanowania laserowego jest chmura punktów o współrzędnych  $(X, Y, H)$  – formalnie nieregularny zbiór punktów w przestrzeni trójwymiarowej (3D). Na podstawie chmury punktów interpolowane są wysokości NMT, najczęściej w postaci zależności funkcyjnej  $H = H(X, Y)$ . Tego typu NMT nazywane są modelami 2,5D. Zapis ten jest odzwierciedleniem niepełnej trójwymiarowości modelu. W modelu tym dobrze reprezentowane są jedynie takie powierzchnie, dla których jednej parze współrzęd-

nych X i Y odpowiada dokładnie jedna wysokość na powierzchni terenu, ale nie dopuszczają sytuacji, kiedy jednej parze współrzędnych planarnych odpowiada więcej niż jedna wysokość. Taka sytuacja może zdarzyć się w przypadku pionowych ścian czy nawisów skalnych. Pełne modele 3D dostępne są raczej w obszarze badań i eksperymentów naukowych. W zastosowaniach praktycznych dominują modele 2,5D z racji ich prostoty.

Podstawą budowy NMT jest sklasyfikowana chmura punktów ze skanowania laserowego, z której wykorzystuje się zazwyczaj tylko klasę punktów leżących na gruncie. Alternatywnie, zamiast klasyfikacji, na potrzeby budowy NMT można przeprowadzić tzw. filtrację chmury punktów, która polega na wydzieleniu punktów będących odbiciami impulsu laserowego od powierzchni terenu i odrzuceniu pozostałych punktów z chmury. Proces klasyfikacji bądź filtracji chmury punktów realizowany jest na ogół automatycznie, a jego skuteczność zależy od zastosowanych algorytmów, ale przede wszystkim od kategorii terenu, jego ukształtowania i zagospodarowania. Niemal bez wyjątku, klasyfikacja nie jest jednak w 100% poprawna, a wygenerowany NMT na podstawie sklasyfikowanej chmury wymaga na ogół dodatkowej edycji manualnej bądź edycję taką należy wykonać wcześniej na sklasyfikowanej chmurze punktów.

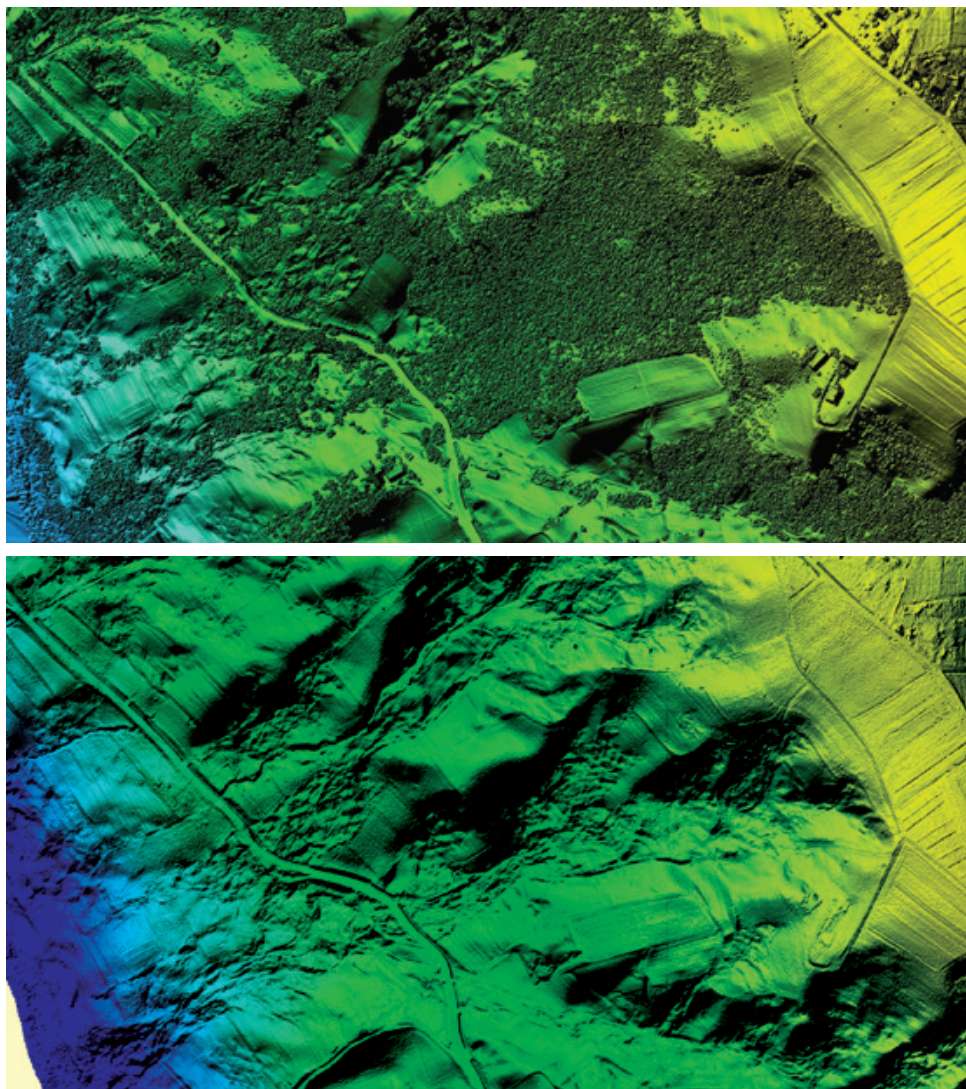
Na podstawie chmur punktów ALS generowane są najczęściej NMT oparte na modelu typu GRID. Wartości wysokości w węzłach siatki kwadratów muszą być zatem interpolowane. Paleta metod interpolacyjnych możliwych do wykorzystania jest bogata. Również w programach do obsługi NMT, a zwłaszcza w systemach typu GIS, użytkownik ma do wyboru wiele metod interpolacyjnych. Ogólnie metody te można podzielić na lokalne i globalne. Metody lokalne charakteryzują się tym, że do obliczenia wartości w punkcie interpolowanym brane są pod uwagę tylko punkty z bezpośredniego sąsiedztwa, natomiast w przypadku metod globalnych brane są pod uwagę punkty z dalszego otoczenia, w szczególności z całego obszaru opracowania. Klasycznym przykładem metody lokalnej jest interpolacja liniowa (lub dwuliniowa), natomiast przykładem metody globalnej jest tzw. *kriging* (metoda geostatystyczna dostępna w większości pakietów GIS) czy alternatywnie interpolacja metodą najmniejszych kwadratów (predykcja liniowa). Wybór metody interpolacji nie ma pozornie większego znaczenia, gdyż zagęszczenie punktów chmury ALS jest zazwyczaj tak duże, że można by przypisać węzłom siatki wysokości najbliższych punktów z chmury. W rzeczywistości wybór metody interpolacji ma wpływ na jakość prezentacji powierzchni terenu w NMT. Dokładność danych ALS jest ograniczona dokładnością samej techniki pomiarowej oraz szorstkością powierzchni terenu. Na etapie budowy NMT dąży się na ogół do zminimalizowania (filtracji) błędów wynikających z błędów pomiaru i szorstkości powierzchni terenu. Do tego celu nadają się dobrze metody globalne interpolacji posiadające właściwości wygładzające. Na ogół stopień wygładzenia można określić stosownie do wielkości błędów pomiarowych oraz szorstkości terenu. Wybór właściwej metody interpolacyjnej pozwoli również częściowo zmniejszyć defekty w prezentacji powierzchni terenu spowodowane błędami klasyfikacji chmury punktów, zwłaszcza w zakresie klasy „niska roślinność”. Stosując metodę lokalną (np. interpolację liniową), która nie ma właściwości wygładzających, można wygene-

rować np. powierzchnię terenu odzwierciedlającą strukturę zbiegów agrotechnicznych, która oczywiście do NMT nie należy, jest tylko stanem chwilowym powierzchni terenu. Rozpatrywany jest tutaj NMT jako produkt uniwersalny o wysokiej jakości, wykorzystywany do różnych celów. W praktyce generowane są czasem dedykowane NMT, przeznaczone do określonego, zawężonego zastosowania. Dobrym przykładem może być monitorowanie zjawiska erozji z wykorzystaniem skanowania laserowego. Aby uchwycić zmiany erozyjne na powierzchni terenu, na podstawie NMT z poszczególnych epok pomiarowych, tworzone są modele różnicowe NMT. W takim przypadku należy maksymalnie ograniczyć efekt wygładzania powierzchni podczas generowania NMT, natomiast błędy pomiarowe będą częściowo zredukowane w wyniku tworzenia modeli różnicowych NMT.

Przed przystąpieniem do generowania NMT należy ustalić wielkość boku siatki kwadratów, na której interpolowany będzie numeryczny model terenu. W odniesieniu do innych metod pozyskiwania danych istnieją metody określenia optymalnej wielkości boku siatki. W przypadku NMT generowanych na podstawie map warstwicznych (topograficznych) wielkość tę można obliczyć na podstawie ścisłych zależności matematycznych. W przypadku NMT generowanego na podstawie opracowania stereomodelu zdjęć lotniczych, odpowiednie algorytmy zaimplementowane są już w oprogramowaniu stacji fotogrametrycznej. Metody te bazują na tak zwanym twierdzeniu o próbkowaniu i pozwalają ustalić optymalną wielkość siatki; optymalną to znaczy taką, która zapewnia wierne odwzorowanie terenu, a jednocześnie nie generuje informacji nadmiarowej. W odniesieniu do danych ALS nie są znane dedykowane metody określenia wielkości optymalnego rozmiaru siatki, gdyż problem ten jest prawdopodobnie mniej istotny, co wynika z bardzo dużej gęstości skanowania. Można tutaj wykorzystać algorytmy bazujące na twierdzeniu o próbkowaniu. Rozsądnym rozwiązaniem jest przyjmowanie wielkości boku siatki na poziomie zbliżonym do średniej odległości planarnej punktów reprezentujących powierzchnię terenu (punktów klasy „grunt”). Oczywiście, wielkość ta zależy przede wszystkim od ukształtowania powierzchni terenu i należy mieć świadomość, że zbytne zagęszczanie siatki kwadratów prowadzi do gromadzenia niepotrzebnej informacji redundantnej (nadmiarowej).

Paleta zastosowań NMT jest bardzo szeroka. Modele wykorzystywane są m.in. do różnorodnych analiz przestrzennych, projektowania czy modelowania zjawisk bądź procesów. Zbyt wielka ilość danych, które nie wnoszą żadnej dodatkowej informacji jest problemem w tego typu zastosowaniach. Dobrym przykładem w tym zakresie może być modelowanie hydrodynamiczne przepływów w dolinach rzek. Dlatego też w literaturze przedmiotu rozważa się również problem rozrzedzenia czy też redukcji danych ALS. Przed interpolacją NMT z chmury punktów ALS usuwane są punkty nadmiarowe (redundancja), to znaczy te, które nie mają znaczenia dla prawidłowego opisu powierzchni terenu (stanowią informację powtórzoną). Po takiej operacji gęstość punktów skanowania laserowego, w stosunku do danych oryginalnych, jest dużo mniejsza na obszarach płaskich bądź powierzchniach o stałym kącie nachylenia (spadku).

Na podstawie NMT generowane są różne produkty pochodne oraz możliwe są różne formy prezentacji powierzchni terenu. Jeden z przykładów prezentacji pokazano na ryc. 4.2.



Ryc. 4.2. Przykładowa wizualizacja numerycznego modelu pokrycia terenu (górną rycina) i numerycznego modelu terenu (dolną rycina) dla tego samego obszaru

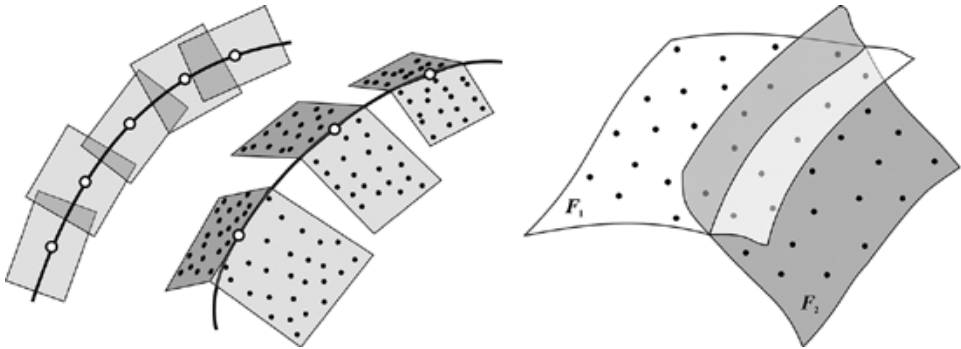
### 4.1.3. Modelowanie linii krawędziowych

Analityczne metody interpolacyjne stosowane podczas generowania NMT produkują mniej lub bardziej gładką, ciągłą powierzchnię. W rzeczywistości gładkie fragmenty powierzchni terenu przecinane są licznymi liniami strukturalnymi bądź tzw. liniami

nieciągłości powierzchni. Z matematycznego punktu widzenia jest to nieciągłość pochodnej, a na naturalnej powierzchni terenu są to wszelkiego rodzaju linie krawędziowe, np. na skarpach. Uwzględnienie tego typu elementów na etapie modelowania ma istotne znaczenie dla jakości NMT. Linie nieciągłości wprowadzane są bezpośrednio do NMT jako elementy wektorowe (patrz struktura hybrydowa NMT), stanowią również barierę dla metod interpolacyjnych – dzielą obszar opracowania na podobszary, na których interpolacja wykonywana jest niezależnie. W pewnych obszarach zastosowań linie krawędziowe są kluczowe, np. do analizy zagrożenia powodziowego niezbędna jest znajomość położenia linii krawędziowych wyznaczających obwałowania przeciwpowodziowe. Mówiąc o znajomości położenia linii krawędziowych, mamy na myśli położenie przestrzenne opisane za pomocą danych wektorowych  $\{X_1, Y_1, H_1; X_2, Y_2, H_2; \dots; X_n, Y_n, H_n\}$ . Informacje takie bezpośrednio w chmurze punktów z lotniczego skanowania laserowego nie występują. Wraz ze wzrostem gęstości skanowania, będzie rosła liczba punktów leżących w pobliżu linii krawędziowej, ale punkty te mogą wyznaczyć jej przebieg tylko w dużym przybliżeniu. Na podstawie punktów klasy „grunt” z otoczenia linii krawędziowej można jednak wymodelować jej przebieg. Stosowane w tym celu metody można podzielić na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią metody bazujące na cyfrowym przetwarzaniu obrazów. W pierwszym kroku chmura punktów klasy „grunt” interpolowana jest na regularny raster (model rastrowy NMT) o niewielkiej wartości boku siatki. Następnie poszczególnym wysokościami przypisywane są stopnie szarości obrazu. Powstały w ten sposób obraz powierzchni terenu poddawany jest detekcji krawędzi z wykorzystaniem standardowych narzędzi (np. filtr *Laplace’a*) z zakresu cyfrowego przetwarzania obrazów. W ten sposób otrzymuje się położenie planarne (w płaszczyźnie XY) linii krawędziowej. Trzecią współrzędną (H) linii oblicza się na podstawie interpolacji NMT lub bezpośrednio chmury punktów. Dokładność wyznaczonych w ten sposób linii krawędziowych zbliżona jest do dokładności stereodigitalizacji zdjęć lotniczych w skali 1 : 4000 (przy porównywalnej gęstości skanowania ALS = 7 pkt/m<sup>2</sup>).

Drugą grupę stanowią metody polegające na modelowaniu linii krawędziowych bezpośrednio na podstawie oryginalnych danych ALS (tylko na podstawie punktów z klasy „grunt”). Opracowany w Instytucie Fotogrametrii Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu algorytm, przedstawiony schematycznie na ryc. 4.3 (lewa strona), traktuje krawędź określoną metodami cyfrowego przetwarzania obrazów, według przedstawionej powyżej metodologii, jako pierwsze przybliżenie. Przybliżenie to pozwala podzielić zbiór punktów ze skanowania laserowego na dwa podzbiory: punkty leżące po lewej i punkty leżące po prawej stronie krawędzi. Ponadto każdy z podzbiorów dzielony jest na niewielkie nakładające się na siebie płyty (podobszary). W kolejnym kroku punkty na sąsiadujących ze sobą płytach po obu stronach krawędzi aproksymowane są płaszczyznami z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Prosta, w przestrzeni 3D, wzdłuż której przecinają się te płaszczyzny, jest jednocześnie styczną do poszukiwanej krawędzi. Jako punkt styczności wybierany jest punkt środkowy odcinka (krawędzi), ograniczonego zasięgiem sąsiadujących ze sobą podobszarów (ryc. 4.3). Ostatecznie punkty styczności z poszczególnych przecięć łączone są ze sobą za pomocą funkcji sklepanych. Algorytm może być realizowany iteracyjnie,

przy czym w poszczególnych krokach iteracji poprawiana jest klasyfikacja punktów na leżące po lewej i prawej stronie krawędzi, a w konsekwencji poprawiane modelowanie krawędzi.



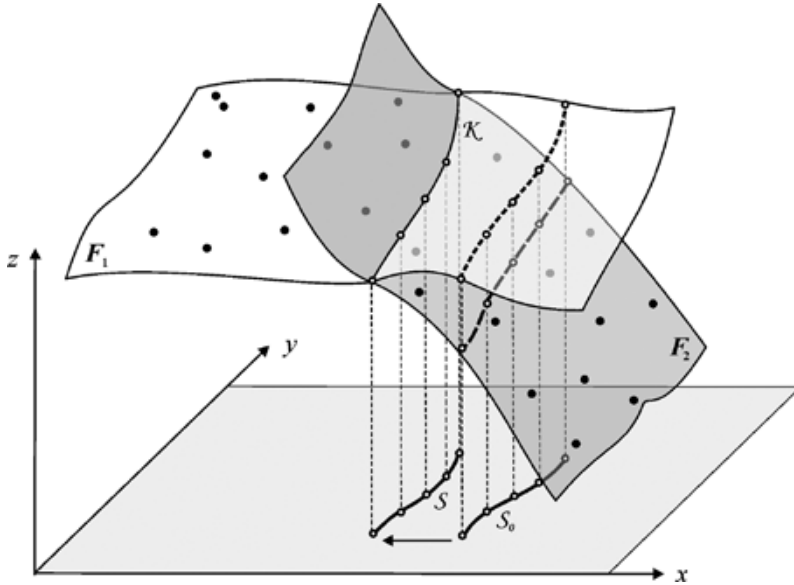
Ryc. 4.3. Modelowanie 3D krawędzi jako linii przecięcia płaszczyzn w przestrzeni trójwymiarowej (po lewej) oraz jako linii przecięcia powierzchni (po prawej)

Pewnym uogólnieniem powyższego algorytmu jest metoda opracowana w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. W metodzie tej punkty po lewej i prawej stronie krawędzi (bez podziału na podobszary) aproksymowane są dowolnym modelem funkcyjnym. W omawianej realizacji zastosowano funkcje sklepane minimalnej krzywizny (ang. *thin plate spline*). Ideę metody przedstawiono schematycznie na ryc. 4.3 (prawa strona). Linie krawędziową otrzymuje się jako linię przecięcia obydwu powierzchni  $F_1$  i  $F_2$ . Zadanie wyznaczenia przestrzennego położenia krzywej  $[x(s), y(s), z(s)]$  ( $s$  jest parametrem bieżącym wzdłuż krzywej) sprowadzić można do wyznaczenie rzutu tej krzywej na płaszczyznę  $xy$ . Trzecią współrzędną wyznaczyć można, wstawiając zrzutowaną krzywą do któregoś z równań powierzchni  $z(s) = f_1(x(s), y(s)) = f_2(x(s), y(s))$ . Zadanie sprowadza się zatem do rozwiązania równania:

$$f_2(x(s), y(s)) - f_1(x(s), y(s)) = 0$$

Równanie to można zapisać w postaci odpowiedniego równania różniczkowego, które po wyborze punktu początkowego rozwiązuje się numerycznie, znajdując kolejne punkty załamania linii krawędziowej.

Alternatywnym podejściem jest wyznaczenie położenia rzutu planarnego linii krawędziowej za pomocą algorytmu aktywnych konturów (*snake*). Energię zewnętrzną aktywnego konturu definiuje się wtedy jako proporcjonalną do odległości pomiędzy powierzchniami  $F_1$  i  $F_2$ . Wychodząc z dowolnego położenia początkowego  $S_0$ , położenie aktywnego konturu zmienia się iteracyjnie, aż do momentu, kiedy różnica współrzędnych  $z(s)$  aktywnego konturu pomiędzy obydwo powierzchniami będzie równa zero (ryc. 4.4).



Ryc. 4.4. Graficzna reprezentacja modelowania 3D krawędzi jako linii przecięcia powierzchni z wykorzystaniem algorytmu aktywnych konturów

Algorytm realizowany jest iteracyjnie. Na początku trzeba wskazać po minimum trzy punkty po lewej i prawej stronie krawędzi. Od tego momentu modelowanie krawędzi przebiega w sposób automatyczny. W kolejnych krokach procesu iteracyjnego wykonywany jest podział punktów na podobszary oraz poprawiane jest położenie modelowanej linii krawędziowej.

Dokładność w ten sposób wymodelowanych krawędzi zależy od wielu czynników, m.in. od rodzaju krawędzi i jednoznaczności jej identyfikacji, od kąta przecięcia powierzchni, od dokładności danych ALS i od gęstości skanowania. Liczne eksperymenty numeryczne pokazały, że dokładność modelowania waha się od kilku do kilkudziesięciu centymetrów. Dotyczy to zarówno położenia planarnego, jak i współrzędnej wysokościowej.

#### 4.1.4. Dokładność NMT

Dokładność NMT rozważana jest tradycyjnie w dwóch aspektach: dokładności wewnętrznej i dokładności zewnętrznej i odnosi się do współrzędnej wysokościowej. Dokładność wewnętrzna wyznaczana na podstawie różnic pomiędzy wysokościami w punktach pomiarowych (np. punktach klasy „grunt” z chmury punktów ALS) a wysokościami obliczonymi na podstawie NMT, w tych samych punktach wyrażana jest w postaci błędu średniego (RMSE). Błąd ten jest w zasadzie miarą poprawności i dokładności generowania NMT. Dla danych pozyskiwanych z dużym zagęszczeniem punktów pomiarowych



na jednostkę powierzchni (np. dane ALS, pomiar fotogrametryczny na stereomodelu) oraz wielkości siatki GRID zbliżonej do średniej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi, błąd ten powinien być marginalny. Do wyznaczenia dokładności wewnętrznej wystarczy wyjściowy zbiór danych pomiarowych, natomiast do wyznaczenia dokładności zewnętrznej potrzebne są niezależne dane referencyjne.

Dokładność zewnętrzna NMT wyznaczana jest bowiem na podstawie niezależnych pomiarów innymi technikami, najczęściej geodezyjnymi, o wyższej dokładności. Miarą tej dokładności jest również błąd średni, ale liczony na podstawie różnic pomiędzy wysokościami punktów danych referencyjnych a wysokościami tych samych punktów obliczonymi z NMT. Dokładność zewnętrzna jest odzwierciedleniem zarówno jakości danych, jak i procesu generowania NMT.

Na dokładność interpolacji wysokości w punktach siatki GRID ma wpływ wiele czynników:

- liczba i konfiguracja oryginalnych punktów pomiarowych (np. chmury punktów ALS), przy czym odległość do odpowiedniego punktu siatki GRID jest decydująca,
- krzywizna powierzchni terenu (ukształtowanie) w otoczeniu interpolowanego punktu GRID,
- dokładność wysokościowa danych oryginalnych, wykorzystanych do budowy NMT.

Dokładność danych wykorzystanych do interpolacji NMT jest oczywiście kluczowa, a ta zależy od metody pozyskiwania danych źródłowych.

Najwyższą dokładność mają bezpośrednie pomiary terenowe realizowane metodami geodezyjnymi. W zasadzie dokładność wysokościowa punktów pomiarowych ograniczona jest w tym przypadku tylko szorstkością powierzchni terenu. Rozmieszczając właściwie punkty pomiarowe, w charakterystycznych punktach powierzchni terenu, można osiągnąć dokładność NMT na poziomie kilku centymetrów.

Dokładność NMT zbudowanego na podstawie danych fotogrametrycznych zależy przede wszystkim od wysokości lotu i waha się od dwóch do trzech promili wysokości fotografowania, co oznacza w praktyce dokładność od kilku do kilkunastu decymetrów. Zmniejszenie wysokości fotografowania, np. z wykorzystaniem dronów, pozwala na istotne podniesienie dokładności NMT, natomiast istotnego spadku dokładności należy się spodziewać w przypadku wykorzystania obrazów satelitarnych.

Niewielkiej dokładności należy się spodziewać w przypadku NMT generowanego na podstawie źródłowych materiałów kartograficznych. Dokładność w tym przypadku zależy od skali digitalizowanej mapy oraz jakości przedstawienia rzeźby terenu. Należy przy tym wspomnieć, że rzeźba terenu przedstawiana jest na mapach w postaci zgeneralizowanej. Dla danych pozyskanych z mapy topograficznej w skali 1 : 10 000 średni błąd wysokości mieści się w przedziale od 0,8 do 2,0 m.

Dane pozyskiwane z pułapu satelitarnego służą częściej do budowy numerycznych modeli pokrycia terenu, dlatego więcej szczegółów podano w rozdziale 4.2.3.

Ocena dokładności NMT generowanych na podstawie danych ALS była przedmiotem licznych badań. Dla terenów utwardzonych (np. drogi asfaltowe) możliwe jest osiągnięcie dokładności na poziomie około 3 cm, dla powierzchni naturalnych, ale wolnych od roślin-

ności, RMSE rośnie do około 10 cm, natomiast dla terenów pokrytych roślinnością, RMSE kształtuje się na poziomie około 20 cm. W przypadku bardzo gęstej pokrywy roślinnej (głównie tzw. niska roślinność, jak gęsta trawa, szuwały) błąd ten może osiągać wartości na poziomie 50 cm i więcej. Ogólnie, pozyskiwanie danych w okresie wegetacji pełnego okresu fenologicznego wpływa negatywnie na dokładność NMT na obszarach pokrytych bujną roślinnością. Eksperymenty przeprowadzone w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu pokazały, że w tym przypadku błędy mogą wzrosnąć trzykrotnie w porównaniu ze skanowaniem w okresie przedwegetacyjnym, kiedy po zejściu pokrywy śnieżnej szata roślinna (pozostałość) jest przygnieciona do powierzchni ziemi i ma istotnie mniejszy wpływ na dokładność skanowania. Z drugiej strony uzyskanie wysokiej dokładności NMT wymaga bardzo dobrej georeferencji oraz precyzyjnego wpasowania poszczególnych pasów (szeregów) skanowania. Stosowane obecnie algorytmy i metody pozwalają zrealizować to zadanie z dokładnością do kilku centymetrów.

Do oceny dokładności NMT zbudowanego na podstawie danych ALS można wykorzystać następującą empiryczną zależność:

$$RMSE_z [cm] = 6/\sqrt{n} + 30 \tan(\alpha)$$

w której  $n$  oznacza gęstość skanowania, a  $\alpha$  jest kątem nachylenia terenu. Zależność ta nie uwzględnia obecności pokrywy roślinnej. Zauważono, że jej występowanie (tzw. niska roślinność) „podnosi” NMT do góry od kilku do kilkunastu centymetrów. Oznacza to, że NMT wygenerowany na podstawie chmury punktów ALS przebiega nieznacznie powyżej rzeczywistej powierzchni terenu. Efekt ten jest bardziej widoczny w przypadku skanerów impulsowych starszego typu i mniej widoczny w skanerach typu fali pełnej (ang. *full-waveform*). Na koniec należy zauważyć, że powyższa, empiryczna zależność występuje w literaturze z różnymi wartościami współczynników. Podana tutaj odnosi się do tzw. skanerów o małej wielkości plamki na powierzchni terenu (ang. *small footprint scanner*), wykorzystywanych podczas realizacji projektu ISOK.

#### 4.1.5. Standardy i formaty wymiany danych

Format LAS został powszechnie zaakceptowany jako format wymiany danych ALS, natomiast w zakresie formatów wymiany NMT panuje większa różnorodność; nierzadko producenci oprogramowania proponują własne rozwiązania. Do wymiany danych NMT stosowane są najczęściej następujące formaty:

- ASCII TBD – format ten nie jest ściśle formatem wymiany danych NMT, a raczej formatem zapisu danych pozyskanych z mapy topograficznej w skali 1:10 000, stanowi jednak podstawę dla innych formatów wymiany danych NMT. Pliki tekstowe zorganizowane są w dziewięciu oddzielnych warstwach zawierających: punkty siatki, obszary planarne, ciekі, punkty wysokościowe, obiekty inżynieryjne, punkty na obszarach wydzielonych, linie nieciągłości, linie nieciągłości w obszarach wydzieleni oraz obszary wydzielone o obniżonej dokładności, np. lasy. Przykładowa zawartość pliku:

```

Start
654195.19 676895.52 115.94
654218.44 676895.52 115.94
654226.22 676899.26 115.94
654229.74 676900.25 115.94
654234.20 676900.81 115.94
...

```

- ESRI TIN – na podstawie danych pomiarowych tworzone są pliki zgodne ze standardem firmy ESRI, w których rozproszone punkty połączone są w nieregularną sieć trójkątów wyznaczającą ukształtowanie powierzchni terenu (ryc. 4.5).
- Intergraph TTN – na podstawie danych pomiarowych tworzone są pliki zgodne ze standardem firmy Intergraph, w których rozproszone punkty połączone są w nieregularną sieć trójkątów (*Topological Triangle Network*) wyznaczającą ukształtowanie powierzchni terenu (ryc. 4.5).



Ryc. 4.5. Wygląd modelu TIN

- ASCII (XYZ) – plik tekstowy z rozszerzeniem XYZ. W kolejnych wierszach pliku zapisane są współrzędne (X, Y, Z) dla poszczególnych punktów siatki GRID. Przykładowa zawartość pliku:

```

123545.000 123545.000 45.015
123545.000 123546.000 47.455
123545.000 123547.000 35.012
123546.000 123545.000 47.115
123547.000 123545.000 45.016
...

```

- Esri GRID (ArcInfo ASCII GRID) – plik tekstowy z rozszerzeniem ASC. Jest to format rastrowy. Składa się z nagłówka opisującego właściwości rastra (rozmiar piksela, liczbę kolumn i wierszy, współrzędne XY początku układu rastra) oraz wykazu współrzędnych wysokości zapisanych wiersz po wierszu. Struktura pliku:

```

NCOLS xxx
NROWS xxx
XLLCENTER xxx | XLLCORNER xxx
YLLCENTER xxx | YLLCORNER xxx
CELLSIZE xxx
NODATA_VALUE xxx
row 1
row 2
...
row n

```

- FLT (*Floating point raster file*) – binarny format wymiany danych, w którym wartości zapisywane są w wierszach z północy na południe. Format zawiera również oddzielny plik nagłówka z rozszerzeniem HDR, w którym zawarte są informacje o pliku oraz georeferencji. Struktura pliku:

```

.hdr file:

ncols 321
nrows 468
xllcorner 387570.0
yllcorner 5289240.0
cellsize 30.0
nodata_value-32767
byteorder LSBFIRST

386.1 393.0 393.4 392.8 392.6 itd.
387.0 394.5 396.4 396.3 393.9 itd.
:
itd.

```

- INGR – format rastrowy danych zgodny ze standardem firmy Intergraph (*Intergraph Raster File Format*). Format ten zawiera elementy zwiększające wydajność oprogramowania firmy Intergraph. Struktura pliku:

**Header Block 1:**

```

WORD HeaderTypeCode
WORD WordsToFollow
WORD DataTypeCode
WORD ApplicationType
DOUBLE XViewOrigin
DOUBLE YViewOrigin
DOUBLE ZViewOrigin
DOUBLE XViewExtent
DOUBLE YViewExtent
DOUBLE ZViewExtent
DOUBLE TransformMatrix[16]
DWORD PixelsPerLine
DWORD NumberOfLines
SHORT DeviceResolution
BYTE ScanlineOrient
BYTE ScannableFlag
DOUBLE RotationAngle
DOUBLE SkewAngle
WORD DataTypeModifier
BYTE DesignFile[66]
BYTE DatabaseFile[66]
BYTE ParentGridFile[66]
BYTE FileDescription[80]
union _MinValue
{
  BYTE MinValue1
  WORD MinValue2
  DWORD MinValue4
  FLOAT MinValueR4
  DOUBLE MinValueR8
} MinValue;
union _MaxValue
{
  BYTE MaxValue1
  WORD MaxValue2
  DWORD MaxValue4
  FLOAT MaxValueR4
  DOUBLE MaxValueR8
} MaxValue;
BYTE Reserved[3]
BYTE GridFileVersion

```

**Header Block 2:**

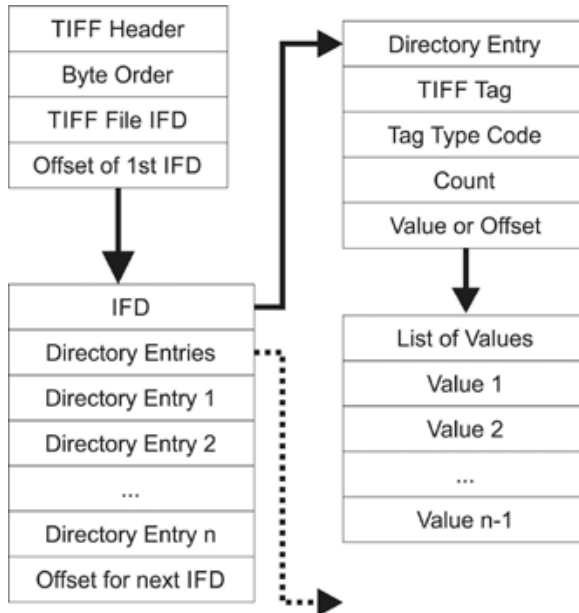
```

BYTE Gain
BYTE OffsetThreshold
BYTE ViewScreen1
BYTE ViewScreen2
BYTE ViewNumber
BYTE Reserved1
WORD Reserved2
DOUBLE AspectRatio
DWORD NextImageOffset
WORD ColorTableType
WORD Reserved3
DWORD ColorTableEntries
DWORD StartOfAppPacket
DWORD LenOfDataPackets
WORD Reserved[110]
WORD ApplicationData[128]

```

**Raster Data**

- GeoTIFF – format rastrowy TIFF (*Tagged Image File Format*) zawierający nagłówek z informacją o lokalizacji rastra w przestrzeni. Dane georeferencyjne mogą zawierać współrzędne oraz parametry układu odniesienia, parametry (informacje) odzorowania oraz inne zależnie od potrzeb (ryc. 4.6).



Ryc. 4.6. Struktura pliku TIFF

## 4.2. Numeryczny model pokrycia terenu

### 4.2.1. Definicja i sposoby organizacji danych w NMPT

Oprócz NMT, na podstawie chmury punktów ALS bądź innych danych wysokościowych, generowane są często numeryczne modele pokrycia terenu (NMPT, ang. *Digital Surface Model*; DSM), wykorzystywane głównie do celów wizualizacji. NMPT jest obrazem powierzchni terenu (gruntu) z uwzględnieniem występującej na nim pokrywy roślinnej, zabudowy, infrastruktury, czyli obiektów trwale związanych z powierzchnią terenu. Przykładowy NMPT zobrazowano na ryc. 4.2, w zestawieniu z NMT.

NMPT mogą być zorganizowane na siatce TIN lub GRID, przy czym ten ostatni model dominuje w praktyce. Również te same metody interpolacyjne, co w przypadku NMT, mogą być wykorzystane do generowania NMPT. Istnieje jednak jedna podstawowa różnica: o ile w przypadku NMT staramy się odfiltrować błędy pomia-

rowe (w efekcie otrzymujemy powierzchnię wygładzoną), o tyle w przypadku NMPT staramy się uniknąć efektu wygładzania, aby możliwie wiernie przedstawić obiekty o jednoznacznych krawędziach, np. budynki. Z tego względu, w przypadku interpolacji NMPT, należy preferować metody lokalne, w szczególności interpolację liniową (dwuliniową).

#### 4.2.2. Źródłowe dane wysokościowe

Dane do NMPT pozyskiwane są głównie za pomocą technik zdalnych wymienionych w rozdziale 4.1.2, a w szczególności źródłem danych może być:

1. Pomiar fotogrametryczny stereomodelu utworzonego na podstawie zdjęć lotniczych. Pomiar wykonany w trybie automatycznym nie wymaga dodatkowej filtracji, natomiast w trybie manualnym możliwy jest pomiar bezpośrednio punktów na obiektach pokrycia terenu.
2. Pomiar stereomodelu utworzonego na podstawie zdjęć satelitarnych. Pomiar bezpośrednio NMPT realizowany jest w trybie automatycznym. Obrazy satelitarne dostępne są z różnych systemów, np. LANDSAT, SPOT, IKONOS, QuickBird o rozdzielczości (wielkość piksela) od 120 m do 0,6 m.
3. Interferometria radarowa (InSAR). Technologia stosowana do budowy modeli wysokościowych obejmujących znaczne obszary Ziemi. Powszechnie dostępne są dane modelu SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), obejmujące około 80% lądów Ziemi, pozyskane w ramach wspólnego przedsięwzięcia agencji kosmicznych USA, Niemiec i Włoch. Modele, w zależności od wykorzystanego pasma mikrofalowego, dostępne są jako SRTM-X lub SRTM-C z rozdzielczością kątową od 1 do 30 sekund. Obecnie, w trakcie realizacji jest NMPT pozyskiwany przez Niemiecką Agencję Kosmiczną (DLR) w ramach misji TanDEM-X, czyli pary satelitów radarowych TerraSAR-X. WorldDEM opracowywany podczas tej misji ma rozdzielczość (wielkość piksela) na poziomie 12 m.
4. Skanowanie laserowe z pułapu lotniczego.

Najwyższą jakość, zarówno rozdzielczość jak i dokładność, ma NMPT budowane na podstawie danych skanowania laserowego. Do wygenerowania NMPT nie jest konieczna klasyfikacja czy filtracja danych ALS, bowiem model ten interpolowany jest najczęściej na podstawie wszystkich punktów będących pierwszym echem (odbiciem od obiektu) z poszczególnych impulsów lasera. Jeśli zależy nam na wysokiej jakości NMPT, chmura punktów składająca się z punktów będących pierwszym odbiciem wymaga edycji manualnej. W zbiorze tym mogą się bowiem znaleźć punkty położone nienaturalnie wysoko bądź nienaturalnie nisko (efekt zjawiska wielotorowości), ale również odbicia od obiektów, które znalazły się chwilowo w obszarze skanowania (np. samochody, ludzie, ptaki w powietrzu). W pełni automatyczne metody filtracji tego typu punktów do budowy NMPT są wciąż w fazie rozwoju.

### 4.2.3. Dokładność NMPT

W zakresie oceny dokładności NMPT można powtórzyć, niemal w całości, te same argumenty i rozważania, które podano we wcześniejszym rozdziale 4.1.4, w odniesieniu do NMT. Oczywiście głównym czynnikiem determinującym dokładność NMPT jest metoda pozyskiwania danych. Najniższą dokładność mają NMPT pozyskiwane na podstawie obrazów satelitarnych oraz interferometrycznych. Dla przykładu, dla danych systemu IKONOS dokładność kształtuje się na poziomie około 1,5 m, a dla danych SRTM nominalna dokładność wynosi od 6,0 do 9,0 m. Dla danych TanDEM-X należy spodziewać się dokładności nie gorszej niż 2,0 m.

W przypadku NMPT, generowanego na podstawie danych ALS, trzeba się spodziewać większej niehomogeniczności w rozkładzie błędów dla poszczególnych klas pokrycia terenu niż w przypadku NMT. W obszarze objętym NMPT można wydzielić dwa podobszary. Jeden podobszar będzie stanowić powierzchnia terenu wolna od jakichkolwiek obiektów i roślinności. Na tych obszarach NMPT pokrywa się z NMT i również dokładność NMPT powinna być taka sama jak NMT; ewentualne różnice mogą wynikać tylko z różnych metod interpolacji. Na pozostałych obszarach, gdzie występują obiekty pokrycia terenu można spodziewać się spadku dokładności NMPT w stosunku do NMT. Największe różnice pomiędzy rzeczywistą wysokością obiektu a wysokością w NMPT wystąpią na obiektach typu korony drzew czy krawędzie budynków. W NMPT krawędzie (ściany) budynków będą zerodowane i w tych miejscach błędy NMPT mogą dochodzić do kilku metrów, dlatego pozyskując z NMPT wysokości (zarówno terenu, jak i obiektów) należy punkty pomiarowe lokalizować z dala od krawędzi obiektu. Z powyższych rozważań wynika, że spośród wymienionych czynników mających wpływ na dokładność, kluczowa dla dobrego odwzorowania obiektów w NMPT jest gęstość skanowania.

Oprócz dokładności wysokościowej w NMPT można również rozpatrywać dokładność sytuacyjną. W odniesieniu do NMT dokładność sytuacyjna jest na ogół trudna do oszacowania, w przypadku NMPT występowanie obiektów (np. budynki) daje taką możliwość.

### 4.2.4 Standardy i formaty wymiany danych

Do zapisu i wymiany danych NMPT stosowane są te same formaty i standardy co w przypadku NMT. Standardy te zostały scharakteryzowane w rozdziale 4.1.5. Należy dodać, że w odniesieniu do NMPT o zasięgu regionalnym czy globalnym stosowane są niemal wyłącznie formaty rastrowe, np. GeoTIFF.

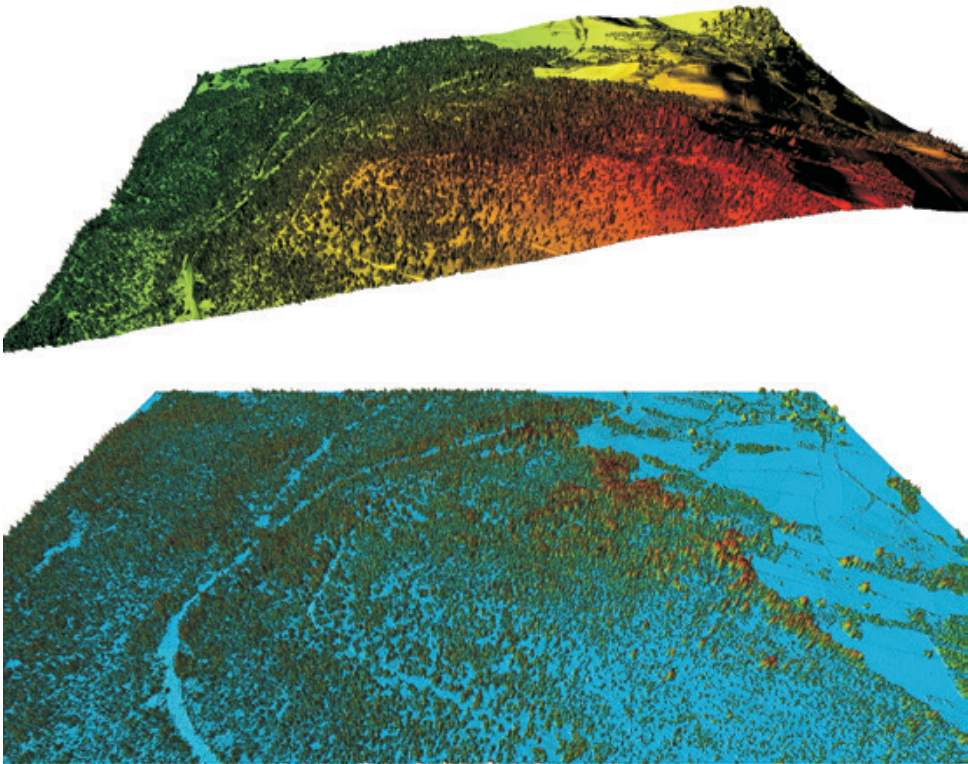


### 4.3. Inne numeryczne modele wysokościowe

Pewnym wariantem NMPT jest zNMPT – znormalizowany numeryczny model pokrycia terenu (ang. *normalised Digital Surface Model; nDSM*). Model ten otrzymuje się jako różnicę pomiędzy NMPT i NMT:

$$\text{zNMPT} = \text{NMPT} - \text{NMT}$$

Podczas gdy NMPT obrazuje ukształtowanie powierzchni terenu i obiektów znajdujących się na niej, zNMPT obrazuje wysokości względne obiektów ponad płaszczyznę reprezentującą powierzchnię terenu. Przykładowy model znormalizowany w porównaniu z NMPT tego samego obszaru pokazano na ryc. 4.7.

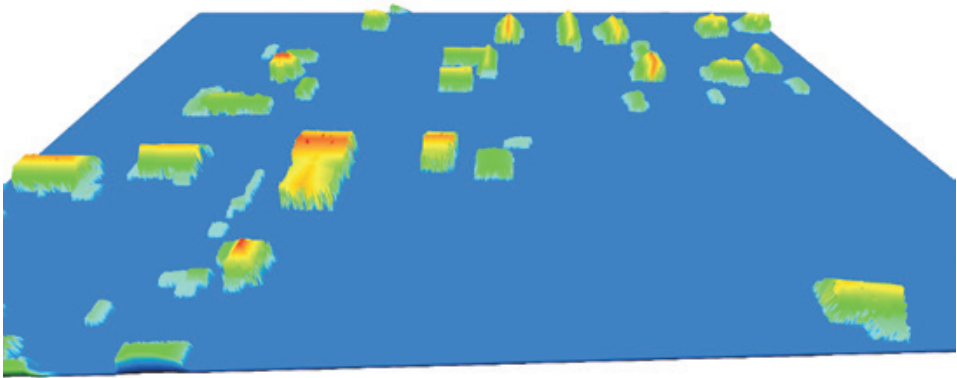


Ryc. 4.7. Numeryczny model pokrycia terenu (górna część) i znormalizowany numeryczny model pokrycia terenu (dolna część) tego samego obszaru, w rzucie perspektywnym

Zaletą zNMPT jest m.in. możliwość bezpośredniego pomiaru wysokości obiektów, np. budynków, drzew.

Zarówno na numeryczne modele terenu, jak i na numeryczne modele pokrycia terenu mogą być nakładane tekstury, tzn. zrzutowane zdjęcia lotnicze lub ortofotomapa cyfrowa. Zabieg ten ma na celu uatrakcyjnienie prezentacji danego modelu.

Numeryczne modele pokrycia terenu (znormalizowane lub nie) mogą być generowane dla określonych klas obiektów (pokrycia terenu). W tym przypadku oryginalna chmura punktów ALS musi być poddana wcześniej klasyfikacji. Jeśli wygenerujemy numeryczny model oparty na punktach klasy grunt i klasy budynki, otrzymamy numeryczny model zabudowy, a po ewentualnym odjęciu wartości NMT – znormalizowany numeryczny model zabudowy. Należy zauważyć, że model znormalizowany zabudowy nie może być wygenerowany tylko na podstawie punktów klasy „budynki”. Znormalizowane modele zabudowy wykorzystywane są m.in. do ekstrakcji budynków z chmury punktów ALS jako jeden ze wstępnych etapów złożonego procesu modelowania 3D budynków. Przykładowy numeryczny model zabudowy dla obszarów wiejskich pokazano na ryc. 4.8.



Ryc. 4.8. Znormalizowany numeryczny model zabudowy (przykład zabudowy wiejskiej – okolice Wrocławia)

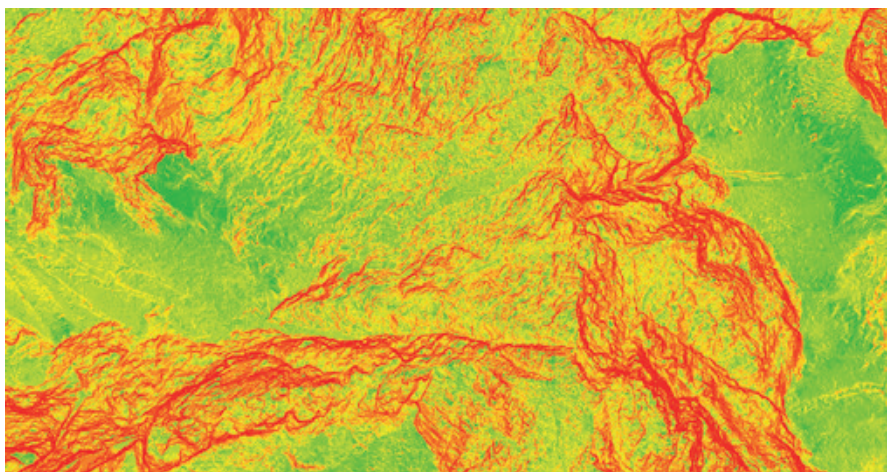
Innym przykładem NMPT dla określonej klasy pokrycia terenu są numeryczne modele koron drzew (MKD) (ang. *Canopy Height Model; CHM*). Modele takie generowane są w oparciu o klasę punktów leżących na gruncie w połączeniu z punktami klasy wysokiej roślinności i są również znormalizowane względem NMT. Modele MKD wykorzystywane są do określania różnych parametrów drzewostanu bądź pojedynczych drzew.

Na podobnej zasadzie mogą być generowane numeryczne modele pokrycia terenu (znormalizowane lub nie) dla dowolnej, wybranej klasy czy określonych obiektów.

## 4.4. Inne produkty pochodne

Numeryczne modele wysokościowe znajdują zastosowanie w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień inżynierskich, projektowych czy wizualizacyjnych. Modele te są podstawą do uzyskania różnych informacji oraz generowania produktów pochodnych (informacji pochodnej):

- Obliczenia wysokości w dowolnym punkcie, różnic wysokości, obliczenia objętości. Wielkości te oblicza się z wykorzystaniem algorytmów interpolacyjnych będących immanentną częścią NMT.
- Generowanie profili terenowych (profilów wysokościowych, przekrojów) do zastosowań inżynierskich.
- Wizualizacja w postaci modelu warstwicowego (mapa warstwicowa). Jest to najbardziej tradycyjna forma przedstawienia rzeźby terenu. Linie warstwicowe, o zadanym cięciu warstwicowym, generowane są na podstawie NMT z wykorzystaniem algorytmów interpolacyjnych, najczęściej interpolacji liniowej.
- Mapa cieniowanej rzeźby terenu. Efekt cieniowania, mający na celu uplastycznienie rzeźby terenu, uzyskuje się poprzez odpowiednie uciszenie źródła światła. Efekt cieniowania zastosowano na rycinie 4.2.
- Mapa spadków terenu obrazująca nachylenia. Na podstawie wysokości regularnej siatki NMT obliczana jest numerycznie pierwsza pochodna powierzchni terenu. W dalszej kolejności możliwe jest wyznaczanie obszarów o zadanych klasach spadku terenu, wyznaczenie linii jednakowego bądź zadanego spadku (ryc. 4.9).



Ryc. 4.9. Mapa spadków terenu dla fragmentu Tatr (okolice szczytu Rysy)

- Mapa krzywizny powierzchni terenu. Analogicznie do mapy spadków terenu, obliczana jest numerycznie druga pochodna powierzchni terenu.

- Mapa ekspozycji pokazująca orientację stoków (ekspozycję) względem stron świata. Wariantowo może być wykonana mapa klas ekspozycji stoków.
- Mapa widoczności pokazująca widoczność powierzchni terenu bądź powierzchni terenu wraz z pokryciem z określonego punktu przestrzeni. Możliwa jest również analiza widoczności pomiędzy zadanymi punktami w przestrzeni.
- Wizualizacje trójwymiarowe, w szczególności ortoprojekcje, przecinanie i przenikanie się obiektów, wykonywane z wykorzystaniem algorytmów geometrii obliczeniowej.
- Modele 3D miast, w tym modele 3D budynków. Modelowanie 3D może być przeprowadzone na różnym poziomie szczegółowości i dokładności. Poziomy te definiuje standard CityGML ([www.citygml.org](http://www.citygml.org)). Ryc. 4.10 przedstawia model realistyczny budynku 3D wykonany na poziomie LOD 4 z nałożonymi teksturami ze zdjęć cyfrowych.



Ryc. 4.10. Model 3D Zamku w Brzegu wykonany na podstawie danych skanowania laserowego, umieszczony na NMT (na który nałożono ortofotomapę cyfrową) z zachowaniem georeferencji

## Literatura

- Borkowski A., 2004. *Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 575, München, 91.
- Borkowski A., 2007. *Modelowanie linii krawędziowych powierzchni na podstawie danych skaningu laserowego*. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. vol. 17, 73–82.

- Borkowski A., Keller W., 2005. *Global and local method for tracking the intersection curve between two surfaces*. Journal of Geodesy vol. 79, 1–10.
- Borkowski A., Meier S., 1994. *Ein Verfahren zur Schätzung der Rasterweite für digitale Höhenmodelle aus topographischen Karten*. Geo-Information-Systeme, H 1, 2–5.
- Borkowski A., Ziemba E., 2006. *Surface breaklines interpolation on the basis of terrestrial laser scanning data*. Reports on Geodesy, No 2(77), 95–102.
- Briese C., 2004. *Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data*. ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12–23 July, Commision3.
- Briese C., 2004. *Breakline modeling from airborne laser scanner data*. Dissertation TU, Wien.
- Brügelmann R., 2000. *Automatic breaklines detection from airborne laser scanner data*. Int. Arch. Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII(B3), 109–116.
- Gołuch P., Borkowski A., Józków G., 2008. *Badanie dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS*. Acta Scientiarum Polonorum seria Geodesia et Dercriptio Terrarum, (7)2, 37–47.
- GUGiK, 2009. *Warunki techniczne na pozyskanie danych wysokościowych w technologii LiDAR oraz opracowanie produktów pochodnych. Załącznik nr 1 do SIWZ – Szczegółowy Opis Przedmiotu Zamówienia wraz z załącznikami – Warunki techniczne*.
- Kraus K., Karel W., Briese C., Mandlburger G., 2006. *Local accuracy measure for digital terrain models*. Photogrammetric Record 2(116), 342–354.
- Kraus K., Pfeifer N., 1998. *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53, 193–203.
- Kurczyński Z., 2014. *Fotogrametria*. PWN, 695.
- Mandelburger G., Briese C., Pfeifer N., 2007. *Progress in LiDAR sensor technology – chance and challenge for DTM generation and data administration*. Proceedings of 51th Photogrammetric Week, 3–7 September 2007. Stuttgart Germany, 159–169.
- Poon J., Fraser C., Zhang C., 2007. *Digital Surface Models from High Resolution Satellite Imagery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73, 1225–1231
- Vosselman, G., Maas, H.-G., 2010. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath.
- Wężyk P., Borowiec N., Szombara S., Wańczyk R., 2008. *Generowanie numerycznych modeli powierzchni oraz terenu w Tatrach na podstawie chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS)*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol 18, 651–661.

## Strony internetowe

[www.citygml.org](http://www.citygml.org)

mgr inż. Anna Machnik-Kłusek  
mgr inż. Edyta Stojek  
mgr inż. Agnieszka Ujczak  
mgr inż. Dorota Zugaj-Marcinek

## 5. Kontrola jakości danych referencyjnych

### 5.1. Organizacja kontroli produktów LiDAR w projekcie ISOK

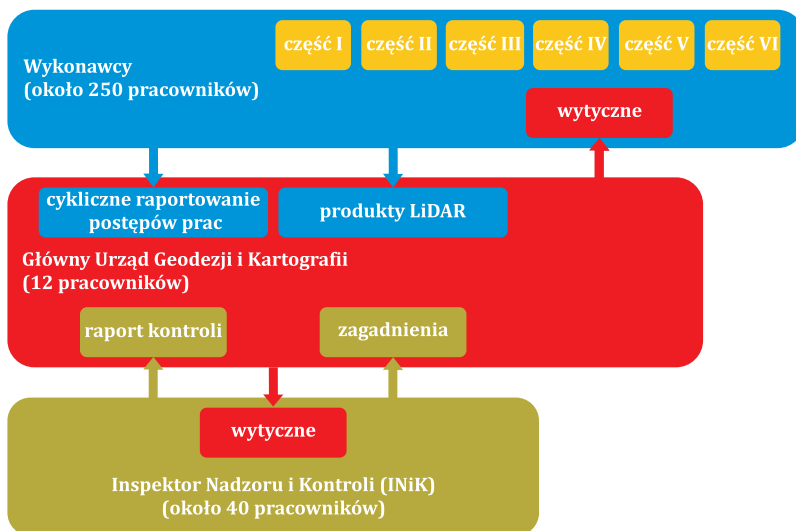
Celem procesu kontroli jest zapewnienie produktom LiDAR odpowiedniej jakości, przez co rozumie się spełnienie wymogów ustalonej wcześniej specyfikacji.

W projekcie ISOK przyjęto trójstopniowy system kontroli danych i produktów pochodnych (ryc. 5.1 oraz ryc. 5.2). Pierwszy etap kontroli przeprowadzany jest przez wyłonionego Wykonawcę. Jego zadaniem jest zaplanowanie nalotów, pozyskanie danych, opracowanie produktów, przeprowadzenie wewnętrznej kontroli potwierdzającej oczekiwaną jakość danych oraz dostarczenie wynikowych produktów w formie Bloku LiDAR do Zamawiającego (GUGiK). Drugi etap kontroli realizuje w imieniu Zamawiającego Inspektor Nadzoru i Kontroli (INiK) jako niezależny kontroler danych. Do jego zadań należy kontrola ilościowa i jakościowa produktów LiDAR oraz weryfikacja sposobu realizacji prac. Wyniki z przeprowadzonej kontroli przedstawia on w formie Raportu kontroli dla każdego Bloku LiDAR. Trzeci etap procesu kontroli to weryfikacja dostarczonych produktów przez wyspecjalizowany zespół techniczny GUGiK.

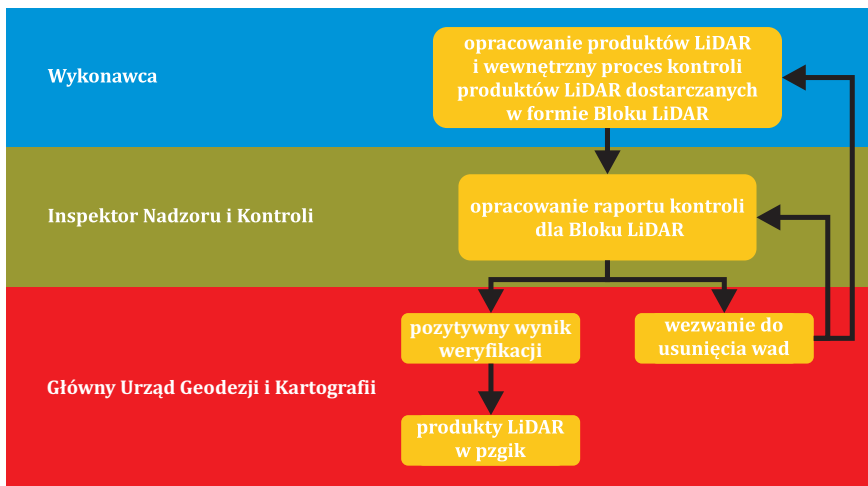
Kontrola ilościowa obejmuje:

- skontrolowanie kompletności oraz zgodności obszarowej produktów LiDAR,
- skontrolowanie możliwości poprawnego odczytania zapisanych danych,
- sprawdzenie poprawności nazw plików i katalogów,
- zweryfikowanie poprawności struktury katalogowania,
- kontrolę formatu i struktury treści plików,
- ocenę poprawności cięcia arkuszowego.

Kontrola jakościowa polega na sprawdzeniu zgodności opracowanych produktów LiDAR z wymaganiami jakościowymi zdefiniowanymi przez Zamawiającego w warunkach technicznych poszczególnych zamówień: WT LiDAR 2011/2012, WT LiDAR 2013/2014, WT INiK 2011/2012 oraz WT INiK 2013/2014.



Ryc. 5.1. Schemat organizacyjny kontroli produktów LiDAR



Ryc. 5.2. Schemat procesu weryfikacji jakości produktów LiDAR

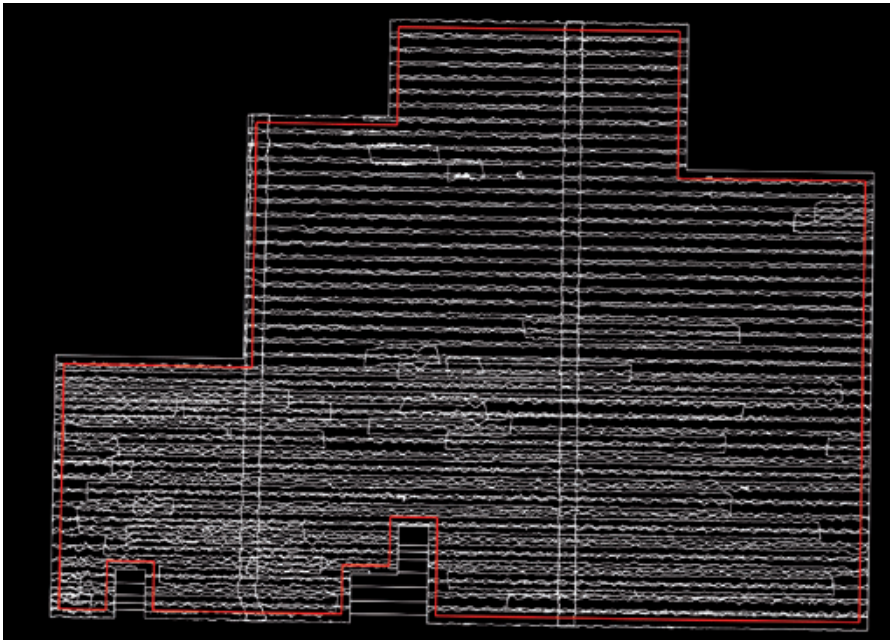
## 5.2. Kontrola jakościowa danych pomiarowych ALS

### 5.2.1. Kontrola kompletności danych ALS

W ramach kontroli kompletności danych ALS sprawdza się, czy w Bloku LiDAR występuje pełne kompletne pokrycie danymi LiDAR, tj. czy nie istnieją miejsca z brakiem danych. Dopuszczalnym wyjątkiem są miejsca o słabym odbiciu, jak np. zbiorniki wodne.

Dane ALS pozyskiwane są dla obszaru Bloku LiDAR wraz z tzw. niezbędnym marginesem danych LiDAR wychodzącym poza granice obszaru Bloku LiDAR. W ramach kontroli kompletności danych ALS weryfikowany jest warunek minimalnej szerokości marginesu (np. min. 200 m), porównując zakres Bloku LiDAR z zasięgiem danych LiDAR. Margines Bloku LiDAR wykorzystywany jest do uzgadniania styku Bloków LiDAR.

Kolejnym wymaganiem weryfikowanym w trakcie tego procesu kontroli jest wzajemne pokrycie pomiędzy szeregami. Na podstawie dostarczonych wszystkich plików chmury punktów ALS generuje się obrysy szeregów w formie wektorowej (ryc. 5.3), a następnie wyznacza się szerokość wzajemnego pokrycia szeregów, odnosząc te wartości do zdefiniowanych wymagań (np. minimalna szerokość nie mniejsza niż 100 m, maksymalne pokrycie nie większe niż 30%).



Ryc. 5.3. Wygenerowane obrysy szeregów z danych ALS. Kolor czerwony – zasięg Bloku LiDAR



Kontroli podlega także nadanie przez Wykonawcę unikatowych numerów szeregom w ramach Bloku LiDAR oraz dublowanie współrzędnych (X, Y, Z) punktów. Kolejne parametry, które podlegają weryfikacji, to kąt poprzeczny skanowania, z jakim zostały pozyskane dane LiDAR (np. maksymalny kąt poprzeczny skanowania  $\pm 25^\circ$ ) oraz średnica plamki promienia lasera na powierzchni terenu (wartość nie większa niż 0,50 m). Wartości te są przeglądane na podstawie analizy danych zapisanych w plikach LAS (format zapisu danych LiDAR) oraz dodatkowych informacji, np. trajektorii nalotu czy parametrów skanera.

Oprócz automatycznych procesów kontroli przeprowadzana jest również wizualna ocena kompletności danych LiDAR. Dokonuje się przeglądu zgodności treści danych pomiarowych LiDAR z treścią zdjęć lotniczych obejmującymi obszar badanego Bloku LiDAR, co pozwala na wykrycie obszarów, na których występują m.in. braki danych, braki rejestracji elementów topograficznych, błędy rejestracji intensywności odbitych sygnałów, niezgodna liczba ech w obszarach pokrytych wysoką roślinnością.

W trakcie kontroli kompletności danych ALS weryfikacji podlega także termin wykonania nalotu LiDAR pod kątem wyznaczonego okna lotniczego, warunków hydrologicznych i meteorologicznych. Termin nalotu odczytywany jest na podstawie informacji zawartych w plikach LAS.

Blok LiDAR spełnia wymagania w zakresie kompletności danych ALS, w przypadku gdy wszystkie wymagania zdefiniowane w warunkach technicznych otrzymają pozytywny wynik kontroli.

### 5.2.2. Kontrola gęstości danych ALS

Kontroli gęstości danych podlega cały zakres danych ALS. Do analizy gęstości chmury punktów ALS brane są pod uwagę punkty pochodzące z ostatniego odbicia (ang. *last return*) oraz punkty z jedynym odbiciem (pierwsze odbicie = ostatnie odbicie) (ang. *first and last return*). Do oszacowania jakości danych LiDAR w tym zakresie stosuje się próbki danych (ryc. 5.4). Dla każdej próbki wyznaczana jest średnia gęstość chmury punktów LiDAR liczona jako stosunek liczby punktów do powierzchni próbki. Próbki niespełniające kryterium gęstości weryfikowane są pod kątem m.in. występowania obszarów o słabym odbiciu (np. zbiorniki wodne) i na tej podstawie klauzula próbki jest zatwierdzana bądź zmieniana.

W przypadku zamówień WT INiK 2011/2012 weryfikacji podlegają pojedyncze szeregi danych LiDAR, gdzie stosuje się próbkę o szerokości równej szerokości szeregu i długości równej podwójnej szerokości danego szeregu. Kontrola kończy się wynikiem pozytywnym, jeśli 95% próbek w Bloku LiDAR oraz średnia gęstość w każdym szeregu spełniła kryterium gęstości zdefiniowane odpowiednio dla Standardu I (4-6 pkt/m<sup>2</sup>) i Standardu II (12 pkt/m<sup>2</sup> w pojedynczym szeregu).

W przypadku zamówień WT INiK 2013/2014 weryfikacji podlegają pojedyncze moduły archiwizacji danych LiDAR, gdzie zastosowano próbkę o wielkości 25 x 25 m, przy czym z kontroli gęstości danych LiDAR wyłączone zostały ponadto punkty z wielokrotnego odbicia i punkty wynikające z błędu rejestracji skanera. Kontrola otrzymuje wynik pozytywny, jeśli 95% próbek w każdym module archiwizacji danych LiDAR oraz średnia gęstość w każdym module archiwizacji danych LiDAR spełnia kryterium gęstości zdefiniowane dla Standardu I (4 pkt/m<sup>2</sup>).

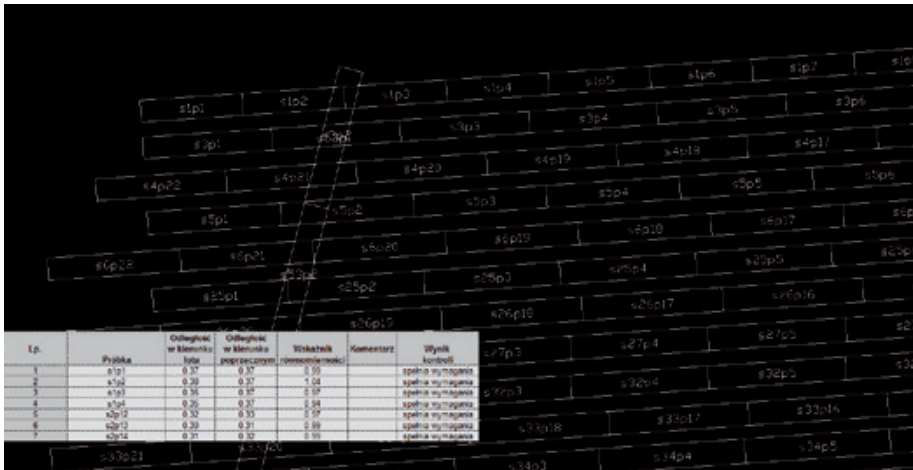


Ryc. 5.4. Przykładowy rozkład próbek do kontroli gęstości danych ALS, kolorami wyróżniono poszczególne szeregi w Bloku LiDAR

### 5.2.3. Kontrola równomierności gęstości danych ALS

Kontrola równomierności gęstości danych LiDAR ma na celu sprawdzenie równomiernego rozkładu punktów pomiarowych. Weryfikowany jest warunek stosunku średniej odległości punktów w kierunku lotu (odstęp pomiędzy sąsiednimi liniami skanowania) do średniej odległości punktów w kierunku poprzecznym do kierunku lotu (odstęp punktów w linii skanowania). Analiza dotyczy pojedynczych szeregów, uwzględniając punkty pochodzące z ostatniego odbicia (ang. *last return*) oraz punkty z jedynym odbiciem (pierwsze odbicie = ostatnie odbicie) (ang. *first and last return*). Analogicznie do kontroli gęstości danych LiDAR, proces kontroli przeprowadzany jest na próbkach (ryc. 5.5). Próbkę stanowi prostokąt o wymiarach 1/3 szerokości szeregu i długości równej podwójnej szerokości danego szeregu zlokalizowany w centralnej części szeregu. Dla każdego punktu chmury ALS wyszukiwany jest najbliższy położony punkt w kierunku lotu oraz w kierunku poprzecznym. Na podstawie tych wartości obliczana jest średnia odległość pomiędzy wszystkimi punktami w próbce w obu kierunkach i na tej podstawie wyliczany jest wskaźnik jakości. Próbki niespełniające kryterium weryfikowane są pod kątem m.in. występowania obszarów o słabym odbiciu (np. zbiorniki wodne) i na tej podstawie jest zatwierdzana bądź zmieniana klauzula próbki.

W przypadku zamówień WT INiK 2011/2012 kontrola kończy się wynikiem pozytywnym, jeśli 95% obszaru każdego szeregu spełnia zdefiniowane kryterium równomierności gęstości danych, tj. wyznaczony wskaźnik zawiera się przedziale 1:1,5 do 1,5:1. W przypadku zamówień WT INiK 2013/2014, aby uzyskać wynik pozytywny z kontroli, 100% próbek musi spełni kryterium równomierności gęstości danych LiDAR.



Ryc. 5.5 . Przykładowy rozkład próbek do kontroli równomierności gęstości danych ALS oraz fragment generowanego raportu z wynikiem kontroli

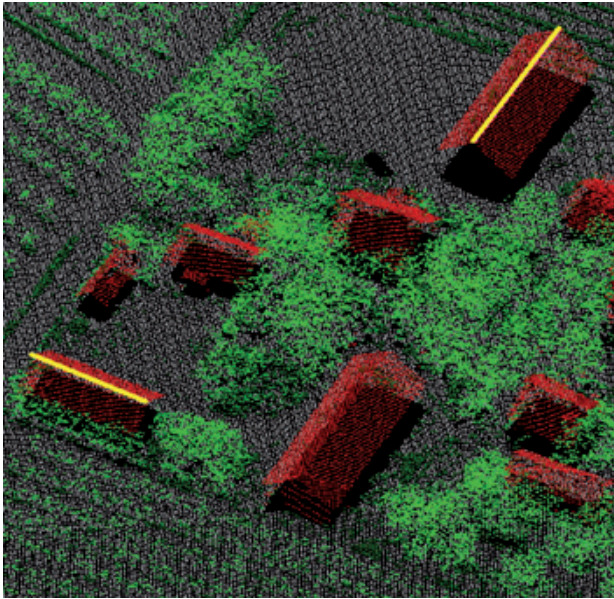
#### 5.2.4. Kontrola georeferencji względnej Bloku LiDAR

Dla każdego weryfikowanego Bloku LiDAR przeprowadzana jest kontrola wzajemnego położenia szeregów skanowania. Kontrola tzw. georeferencji względnej wykonywana jest dla całej powierzchni Bloku LiDAR wraz z jego marginesem.

Weryfikację dla każdego Bloku LiDAR wykonuje się na podstawie oceny położenia sytuacyjnego i przesunięcia wysokościowego obiektów kontrolnych w obszarze pokrycia poprzecznego pomiędzy sąsiednimi szeregami. Wyboru obiektów kontrolnych dokonuje się tak, by pokrywały one równomiernie obszar całego Bloku LiDAR, biorąc pod uwagę zdefiniowaną maksymalną odległość pomiędzy sąsiednimi obiektami (WT INiK 2013/2014, WT LiDAR 2011/2012 – nie rzadziej niż co 4 km) lub określoną minimalną liczbę obiektów kontrolnych na długość pasa pokrycia poprzecznego szeregów (WT INiK 2011/2012 – Standard I: co najmniej dwa obiekty w każdym pasie pokrycia poprzecznego szeregów o długości powyżej 20 km lub jeden obiekt w każdym pasie pokrycia poprzecznego szeregów o długości poniżej 20 km).

Podczas kontroli jakości preferuje się obiekty sytuacyjno-wysokościowe, wyznaczone niezależnie dla każdego pasa wzajemnego pokrycia szeregów, na które składają się dwie kalenice dachów o prostej konstrukcji (dwuspadowe o przeciwstawnych połąciach dachowych), położonych blisko siebie, których układ względem siebie jest zbliżony do prostokątnego (ryc. 5.6). Ma to na celu wyznaczanie składowych przesunięcia sytuacyjnego w układzie lokalnym, tj. odchyłka na jednym obiekcie odnoszona jest względem osi X, a na drugim względem osi Y. Jeśli na danym obszarze nie występują odpowiednie budynki, analizę sytuacyjną przeprowadza się na szczegółach terenowych, które można jednoznacznie wyodrębnić na podstawie obrazu intensywności danych LiDAR (np. krawędzie jezdni; ryc. 5.7), zaś analizę wysokościową realizuje się na siatce punktów (np. co

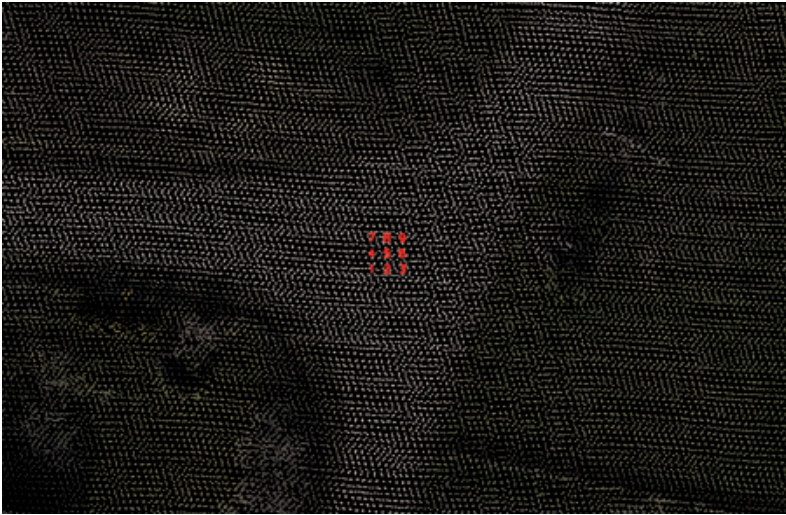
najmniej 3 x 3 punkty o rozmiarze oczka siatki wynoszącym 1 m) zlokalizowanej na równej płaskiej powierzchni (ryc. 5.8).



Ryc. 5.6. Obiekt sytuacyjno-wysokościowy stosowany w procesie kontroli jakości składający się z dwóch prostopadłych kalenic (żółte linie) na budynkach o prostej konstrukcji dachów dwuspadowych



Ryc. 5.7. Obiekt sytuacyjny stosowany w procesie kontroli jakości, wyodrębniony na podstawie szczegółów terenowych (krawędzie jezdni) wizualizowanych na obrazie intensywności



Ryc. 5.8. Przykładowa siatka wysokościowa stosowana w procesie kontroli jakości

Blok LiDAR jest poprawny w zakresie względnej georeferencji danych LiDAR, jeśli błąd średni na obiektach kontrolnych spełnia ustalone wymagania (tab. 5.1).

Tabela 5.1. Dopuszczalne wartości błędów średnich ( $m$ ) georeferencji względnej

Dokładność chmury punktów ALS	Standard I [m]	Standard II [m]
sytuacyjna (XY)	$m_p \leq 0,75$	$m_p \leq 0,60$
wysokościowa (H)	$m_h \leq 0,22$	$m_h \leq 0,15$

Dodatkowo wymaga się, aby:

- rozbieżności na 68% pomierzonych obiektach kontrolnych były mniejsze od wartości błędu średniego,
- rozbieżności na 95% pomierzonych obiektach kontrolnych były mniejsze od podwójnej wartości błędu średniego,
- rozbieżności na żadnym z pomierzonych obiektów kontrolnych nie przekroczyły potrójnej wartości błędu średniego.

### 5.2.5. Kontrola bezwzględnej georeferencji Bloku LiDAR

Chmurze punktów ALS nadaje się georeferencję, czyli odniesienie do obowiązującego układu współrzędnych: sytuacyjnego PL-1992 oraz wysokościowego PL-KRON86-NH.

W celu oszacowania dokładności georeferencji bezwzględnej danych LiDAR projektowane są płaszczyzny kontrolne wysokościowe oraz sytuacyjno-wysokościowe, a następnie przeprowadzany jest ich geodezyjny pomiar w terenie.

Minimalna liczba lokalizacji płaszczyzn kontrolnych dla Bloku LiDAR zdefiniowana w WT LiDAR 2011/2012 wynosi: 6 lokalizacji płaszczyzn dla kontroli wysokościowej oraz 4 lokalizacje płaszczyzn dla kontroli sytuacyjnej. W ramach WT INiK 2011/2012 Inspektor Nadzoru i Kontroli wykonuje pomiar terenowy dla co najmniej jednej płaszczyzny referencyjnej Wykonawcy oraz projektuje co najmniej dwie płaszczyzny kontrolne dla kontroli wysokościowej i sytuacyjnej dla Bloku LiDAR. Liczba płaszczyzn kontrolnych zdefiniowana w WT LiDAR 2013/2014 jest zależna od powierzchni danego Bloku LiDAR (tab. 5.2).

Tabela 5.2. Minimalna liczba płaszczyzn kontrolnych – WT LiDAR 2013/2014

Minimalna liczba lokalizacji płaszczyzn dla:	Powierzchnia Bloku LiDAR		
	< 400 km <sup>2</sup>	≥ 400 km <sup>2</sup> < 1000 km <sup>2</sup>	≥ 1000 km <sup>2</sup>
kontroli wysokościowej	5	8	10
kontroli sytuacyjnej	3	5	7

Projektowanie rozmieszczenia płaszczyzn kontrolnych odbywa się z wykorzystaniem danych ALS oraz cyfrowych zdjęć lotniczych lub innego podkładu rastrowego. Płaszczyzny kontrolne powinny być rozmieszczone równomiernie w obszarze kontrolowanego Bloku LiDAR oraz w odpowiedniej odległości od płaszczyzn/punktów referencyjnych stosowanych przy wyrównaniu i nawiązaniu danych LiDAR.

Pomiar terenowy zaprojektowanych płaszczyzn kontrolnych wykonywany jest metodą tachymetryczną, natomiast współrzędne stanowiska pomiarowego wyznacza się metodą GPS-RTK w nawiązaniu do osnowy wysokościowej I lub II klasy. W zależności od doboru obiektu i jego pomiaru wyróżnia się płaszczyznę kontrolną sytuacyjno-wysokościową, płaszczyznę kontrolną wysokościową lub płaszczyznę kontrolną sytuacyjną.

Rozbieżności na każdej płaszczyźnie kontrolnej uzyskuje się, porównując wyniki pomiaru terenowego z pomiarem na danych LiDAR.

Dane spełniają wymagania w zakresie bezwzględnej georeferencji Bloku LiDAR, jeżeli uzyskane wyniki osiągnęły kryterium akceptacji zdefiniowane w warunkach technicznych. Z uwagi na różny dobór i typ płaszczyzn kontrolnych, metodyki wyznaczenia rozbieżności oraz liczby płaszczyzn kontrolnych w Bloku LiDAR, stosowane przez Wykonawców i INiK kryterium ulegało uspojnieniu, co przedstawia poniższa tabela (tab. 5.3).

Tabela 5.3. Kryteria akceptacji georeferencji bezwzględnej chmury punktów ALS

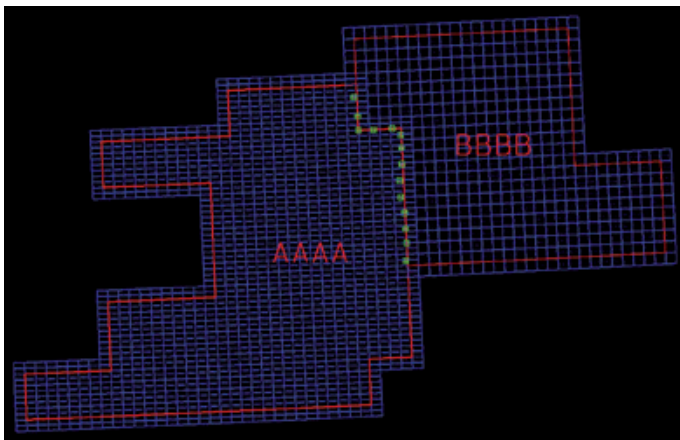
Dokładność chmury punktów ALS	WT LiDAR 2011/2012	WT INiK 2011/2012	WT LiDAR 2013/2014 WT INiK 2013/2014
<b>Standard I</b>			
sytuacyjna (XY)	$m_p \leq 0,50m^*$	$\Delta p \leq 0,80m$ $\Delta p_{ref} \leq 0,40m$	$m_p \leq 0,50m$ $\Delta p \leq 1,00m$
wysokościowa (H)	$m_h \leq 0,15m^*$	$\Delta h \leq 0,27m$ $\Delta h_{ref} \leq 0,20m$	$m_h \leq 0,15m$ $\Delta h \leq 0,30m$
<b>Standard II</b>			
sytuacyjna (XY)	$m_p \leq 0,40m^*$	$\Delta p \leq 0,70m$ $\Delta p_{ref} \leq 0,40m$	---
wysokościowa (H)	$m_h \leq 0,10m^*$	$\Delta h \leq 0,17m$ $\Delta h_{ref} \leq 0,20m$	

\* Dodatkowo wymaga się, aby:

- rozbieżności na 68% pomierzonych obiektach kontrolnych były mniejsze od wartości błędu średniego,
- rozbieżności na 95% pomierzonych obiektach kontrolnych były mniejsze od podwójnej wartości błędu średniego,
- rozbieżności na żadnym z pomierzonych obiektów kontrolnych nie przekroczyły potrójnej wartości błędu średniego.

### 5.2.6. Kontrola styków Bloków LiDAR

Na styku każdego Bloku LiDAR przeprowadza się kontrolę sytuacyjną i wysokościową z danymi pochodzącymi z sąsiednich Bloków LiDAR (ryc. 5.9). Warunkiem przeprowadzenia kontroli jest poprawność nadania względnej i bezwzględnej georeferencji weryfikowanego Bloku LiDAR.



Ryc. 5.9. Przykładowe rozmieszczenie obiektów kontrolnych na styku Bloków LiDAR AAAA oraz BBBB

Przy doborze obiektów kontrolnych stosuje się zasadę równomiernego rozkładu obiektów oraz zdefiniowanej maksymalnej odległości pomiędzy sąsiednimi obiektami (WT INiK 2011/2012 – jeden obiekt na każde rozpoczęte 5 km prostoliniowego odcinka styku; WT LiDAR 2011/2012, WT LiDAR 2013/2014, WT INiK 2013/2014 – nie rzadziej niż co 1–2 km styku Bloków LiDAR w zależności od standardu danych).

Kontrola styków Bloku LiDAR przebiega analogicznie do kontroli georeferencji względnej. Różnica polega na porównaniu danych z sąsiednich Bloków LiDAR posiadających wspólny margines pokrycia zamiast analizy nakładających się szeregów.

Weryfikowany Blok LiDAR spełnia wymagania w aspekcie styków, jeśli błędy średnie na obiektach kontrolnych dla każdego styku z sąsiednimi Blokami LiDAR oraz uzyskane rozbieżności na poszczególnych obiektach kontrolnych nie przekraczają wartości (tab. 5.4) ustalonych w warunkach technicznych.

Tabela 5.4. Kryteria akceptacji styku Bloków LiDAR

Dokładność	WT LiDAR 2011/2012 WT INiK 2011/2012	WT LiDAR 2013/2014 WT INiK 2013/2014
<b>Standard I</b>		
sytuacyjna (XY)	$m_p \leq 0,75\text{m}^*$	$m_p \leq 0,75\text{m}$ $\Delta p \leq 1,50\text{m}$
wysokościowa (H)	$m_h \leq 0,22\text{m}^*$	$m_h \leq 0,22\text{m}$ $\Delta h \leq 0,44\text{m}$
<b>Standard II</b>		
sytuacyjna (XY)	$m_p \leq 0,60\text{m}^*$	---
wysokościowa (H)	$m_h \leq 0,15\text{m}^*$	

\* Dodatkowo wymaga się, aby:

- rozbieżności na 68% pomierzonych obiektach kontrolnych były mniejsze od wartości błędu średniego,
- rozbieżności na 95% pomierzonych obiektach kontrolnych były mniejsze od podwójnej wartości błędu średniego,
- rozbieżności na żadnym z pomierzonych obiektów kontrolnych nie przekroczyły potrójnej wartości błędu średniego.

### 5.2.7. Kontrola jakości klasyfikacji chmury punktów ALS

W projekcie ISOK ustalono dziewięć klas dla chmury punktów ALS, zgodnych ze standardem opracowanym przez *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS).

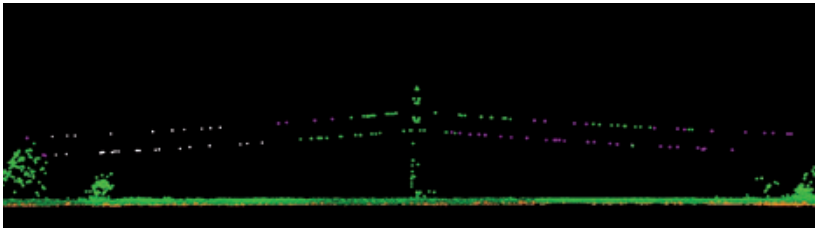
Kontrola jakości klasyfikacji chmury punktów ALS w zamówieniu WT INiK 2013/2014 składa się z dwóch części, tj.: etapu kontroli wizualnej oraz etapu weryfikacji poprawności klasyfikacji dla losowej próbki danych.

Kontrola wizualna przeprowadzana jest dla 100% powierzchni każdego Bloku LiDAR. W jej wyniku identyfikowane są tzw. błędy grube oraz systematyczne klasyfikacji danych



LiDAR. Ponadto istotne z punktu widzenia kontroli jest wskazanie błędów odwzorowania form terenowych kluczowych dla rozchodzenia się fali powodziowej oraz błędów związanych z przypisaniem punktów do odpowiednich klas mających wpływ na poprawność generowania modeli: NMT oraz NMPT.

Weryfikacja dokładności procesu klasyfikacji danych przeprowadzana jest na losowej, kilkuprocentowej próbce modułów Bloku LiDAR (np. 6% modułów archiwizacji), przy czym nie mniej niż 1/3 z nich musi obejmować obszary prewencji powodziowej. W celu określenia poprawności klasyfikacji wykonywana jest reklasyfikacja próbki danych w taki sposób, aby zidentyfikowane zostały wszystkie brakujące oraz nadmiarowe punkty danej klasy. Na ryc. 5.10 i 5.11 przedstawiono przykładowe błędy klasyfikacji.



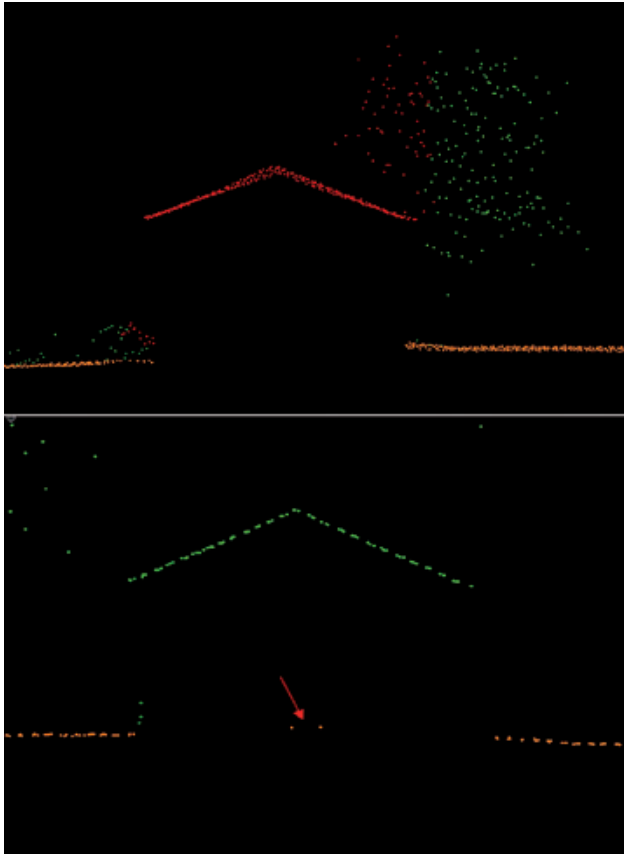
Ryc. 5.10. Błędy klasyfikacji – punkty reprezentujące linię energetyczną zaklasyfikowane jako punkty wysokiej roślinności (klasa 5; kolor zielony) oraz szum (klasa 7; kolor fioletowy)

Przeklasyfikowane przez INiK moduły danych porównywane są następnie z danymi oryginalnymi. Dla każdego punktu w chmurze sprawdzana jest przynależność do klasy, przed i po ewentualnej reklasyfikacji. Na tej podstawie określana jest dokładność procentowa klasyfikacji poszczególnych kontrolowanych modułów, a także całej próbki Bloku LiDAR w podziale na poszczególne klasy. Procent błędnie zaklasyfikowanych punktów liczony jest na podstawie:

- liczby wszystkich punktów błędnie sklasyfikowanych, które nie powinny należeć do danej klasy,
- liczby wszystkich punktów błędnie sklasyfikowanych, które powinny należeć do danej klasy,
- liczby punktów prawidłowo zaklasyfikowanych do danej klasy.

Aby dokładność klasyfikacji spełniała kryteria zdefiniowane w WT LiDAR 2013/2014, dopuszcza się nie więcej niż 1% punktów błędnie zaklasyfikowanych do klasy grunt (klasa 2) oraz 5% punktów błędnie zaklasyfikowanych dla każdej z pozostałych klas. Dodatkowo, dla klasy punktów leżących na gruncie oraz reprezentujących obszary pod wodami, żaden z błędnie zaklasyfikowanych punktów nie może być odległy od terenu/powierzchni wody o więcej niż 0,40 m.

Przyjmuje się, że dane spełniają wymagania w zakresie klasyfikacji, kiedy dokładność klasyfikacji dla każdej z klas spełnia opisane powyżej kryteria oraz gdy kontrola wizualna nie wykaże błędów grubych i systematycznych, a także gdy formy terenowe, kluczowe dla rozchodzenia fali powodziowej, są odwzorowane poprawnie.



Ryc. 5.11. Błędy klasyfikacji – punkty reprezentujące wysoką roślinność (klasa 5; kolor zielony) zaklasyfikowane jako budynek (klasa 6) (u góry) oraz punkty na dachu i ścianie budynku zaklasyfikowane jako wysoka roślinność (klasa 5; kolor zielony) (u dołu), dodatkowo strzałką wskazano błąd dla punktów „grunt”, przekraczający 0,40 m

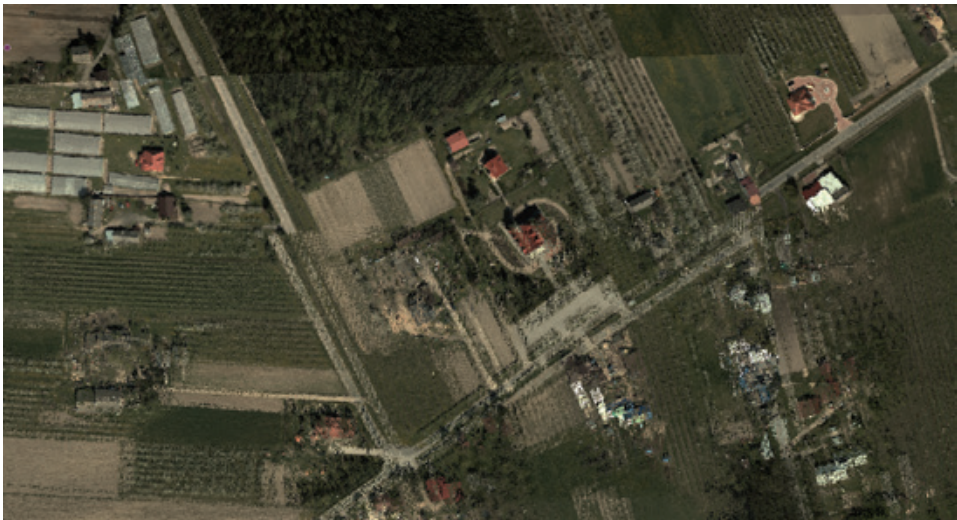
### 5.2.8. Kontrola nadania atrybutów RGB

Chmurze punktów ALS w projekcie ISOK nadawane są dodatkowo atrybuty RGB w procesie tzw. kolorowania z wykorzystaniem cyfrowych zdjęć lotniczych. Kontrola atrybutów RGB chmury punktów ALS w zamówieniu WT INiK 2013/2014 składa się z dwóch etapów:

- kontroli wizualnej,
- weryfikacji poprawności kolorowania na wybranych obiektach kontrolnych.

W ramach kontroli wizualnej, przeprowadzanej dla 100% powierzchni każdego Bloku LiDAR, porównywana jest treść ortofotomapy cyfrowej oraz chmury punktów ALS (wizualizowanej wartościami atrybutów RGB). Sprawdza się czy nadane atrybuty RGB odpowiadają sytuacji w terenie oraz czy nie występują inne błędy kolorowania. Na ryc. 5.12 przedstawiono przykładowy błąd nadania atrybutów RGB chmurze punktów ALS.

Weryfikacja geometrycznej poprawności kolorowania RGB przeprowadzana jest na próbie co najmniej 10 modułów archiwizacji danych LiDAR i obejmuje co najmniej 150 obiektów kontrolnych. Kontrolowane obiekty muszą charakteryzować się widocznymi krawędziami, na których występuje jednocześnie zmiana wysokości i koloru (np. dachy budynków). W ramach kontroli wykonywane są pomiary odległości pomiędzy krawędzią widoczną na podstawie atrybutów RGB a krawędzią wynikającą ze zmiany wysokości obiektu. Ocena dokładności kolorowania chmury ALS wykonywana jest na podstawie błędu średniego oraz maksymalnej rozbieżności. Przyjmuje się, że kolorowanie RGB zostało przeprowadzone poprawnie, jeżeli dokładność geometryczna spełni wymagania (tab. 5.5), oraz jeżeli kontrola wizualna potwierdzi brak wad nadania atrybutów RGB.



Ryc. 5.12. Błąd nadania atrybutów RGB. Nadane atrybuty RGB nie odpowiadają rzeczywistemu obrazowi terenu

Tabela 5.5. Kryterium weryfikacji nadania atrybutów RGB na obiektach kontrolnych

Dokładność kolorowania chmury punktów ALS	WT INiK 2013/2014
błąd średni kolorowania RGB	$m_p \leq 0,75\text{m}$
maksymalna rozbieżność	$\Delta p \leq 2,0\text{ m}$

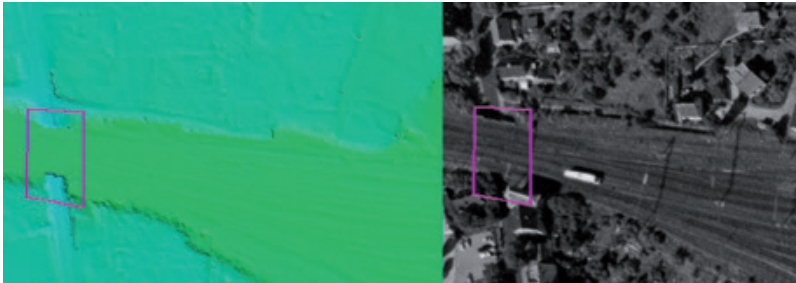
### 5.3. Kontrola numerycznego modelu terenu (NMT)

Kontrola wizualna jakości numerycznego modelu terenu obejmuje weryfikację pod kątem m.in.:

- błędnej klasyfikacji punktów LiDAR użytych do generowania NMT,
- nieusunięcia obiektów wystających ponad powierzchnię terenu,
- braku ciągłości obszarowej danych NMT,
- niepoprawności odwzorowania NMT,
- błędów generowania.

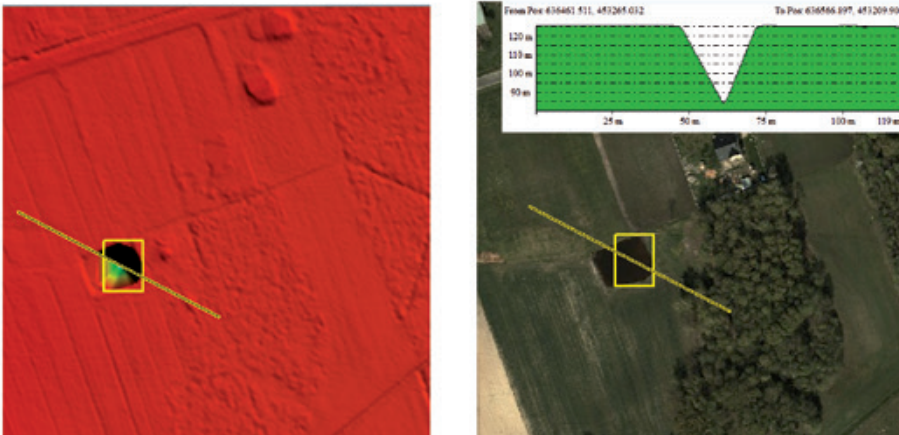
Przykładowe wady NMT przedstawiają poniższe ryciny:

- 1) obiekty inżynieryjne włączone do generowania NMT (np. mosty, wiadukty, budynki; ryc. 5.13);



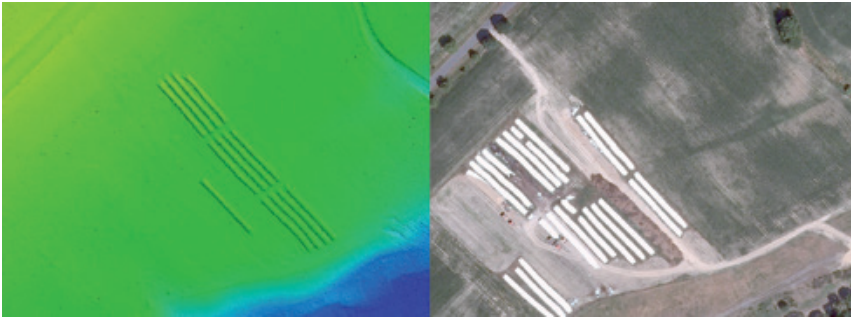
Ryc. 5.13. Błąd włączenia wiaduktu do modelu NMT. Lewa strona – cieniowana rzeźba NMT, prawa strona – ortofotomapa cyfrowa

- 2) piki wysokościowe wynikające z błędnej klasyfikacji punktów LiDAR (ryc. 5.14);



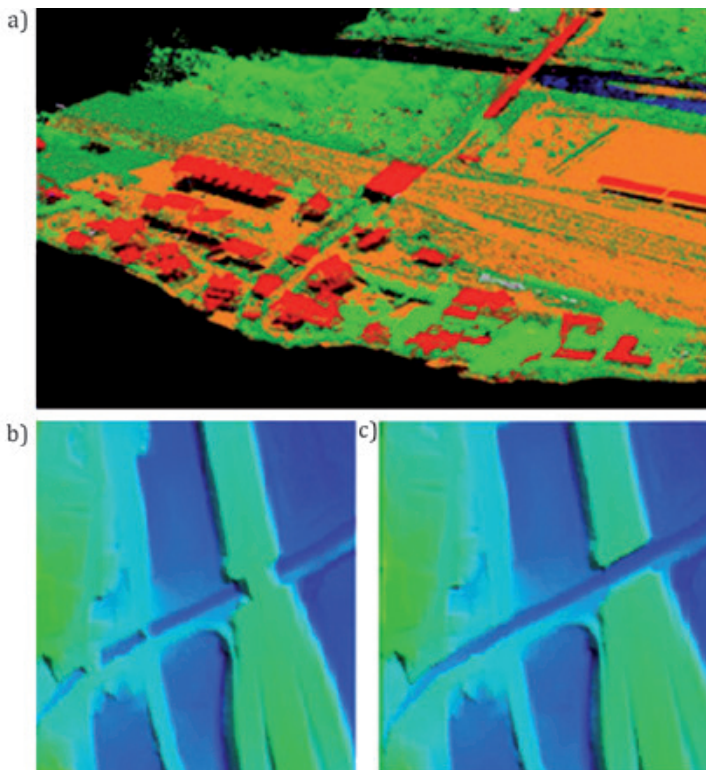
Ryc. 5.14. Pik wysokościowy generujący zagłębienie na NMT (po lewej) oraz to samo miejsce ukazane na ortofotomapie cyfrowej i profilu podłużnym (po prawej)

- 3) obiekty nietrwałe (np. stogi słomy, przyzmy) włączone do NMT (ryc. 5.15);



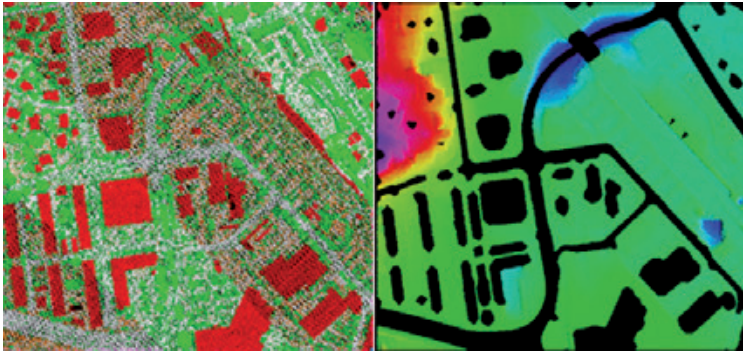
Ryc. 5.15. Obiekty nietrwałe włączone do generowania NMT (po lewej) oraz widok tego samego miejsca na ortofotomapie cyfrowej (po prawej)

- 4) niepoprawne odwzorowanie NMT (np. po usunięciu obiektów inżynierskich; ryc. 5.16);



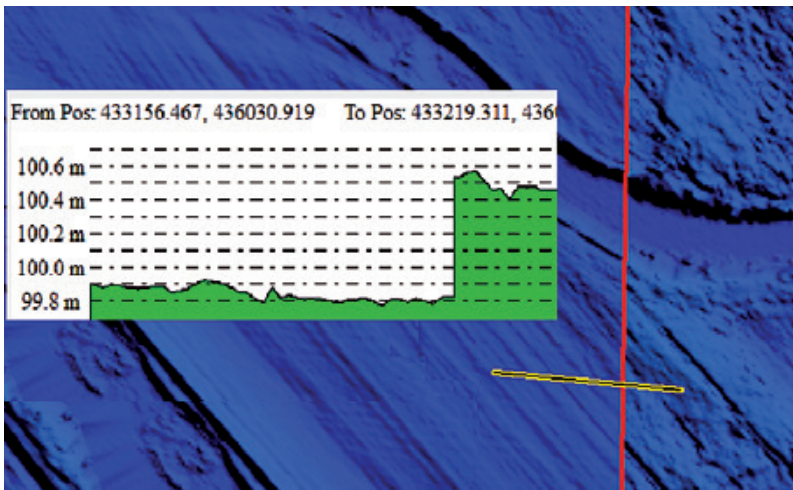
Ryc. 5.16. Przykładowy błąd odwzorowania NMT po wycięciu mostu: a) poprawna klasyfikacja danych ALS; b) błąd NMT, c) poprawny NMT

- 5) brak uzupełnienia NMT o zinterpolowane obszary w miejscach braku danych ALS (np. pod budynkami; ryc. 5.17);



Ryc. 5.17. Sklasyfikowana chmura punktów ALS (po lewej) oraz błędnie wygenerowany NMT (po prawej)

- 6) nieciągłość obszarowa (na stykach arkuszy) wynikająca z błędnej klasyfikacji danych LiDAR na styku Bloków LiDAR (ryc. 5.18).



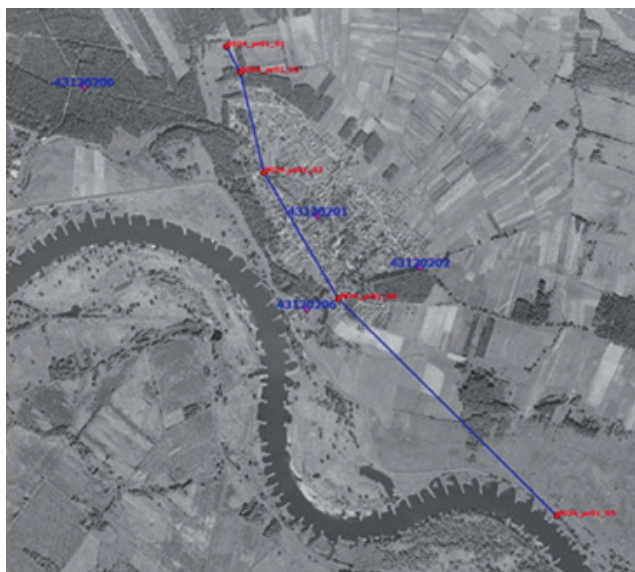
Ryc. 5.18. Różnice NMT na styku sąsiednich Bloków LiDAR

Oprócz kontroli wizualnej, w ramach zamówienia WT INiK 2013/2014, przeprowadza się także kontrolę spójności pomiędzy chmurą punktów ALS a dostarczonymi modelami NMT. W tym celu wybiera się losowo 4% modułów archiwizacji NMT Bloku LiDAR, dla których generowane są numeryczne modele terenu z danych LiDAR. Następnie sprawdzana jest różnica wysokościowa pomiędzy wygenerowanymi modelami a produktem dostarczonym przez Wykonawcę.

Produkt NMT weryfikowany jest także pod kątem dokładności bezwzględnej. W tym celu wykonywane są pomiary terenowe w formie profili terenowych (WT INiK 2011/2012) (ryc. 5.19) oraz siatek punktów (WT INiK 2013/2014). Dla Bloku LiDAR projektuje się nie mniej niż dwa profile terenowe równomiernie rozmieszczone w Bloku LiDAR o łącznej długości uzależnionej od powierzchni Bloku LiDAR. Pojedynczy profil nie powinien być krótszy niż 300 m. Profile podłużne powinny być nachylone pod kątem  $\geq 25$  stopni od osi szeregów nalotu ALS, a odległość pomiędzy punktami pomiarowymi na profilu powinna wynosić 10 m. Siatki wysokościowe punktów do kontroli modeli powinny składać się z co najmniej 36 punktów o oczku co najmniej 1,0 m, a ich liczba w Bloku LiDAR jest uzależniona od powierzchni Bloku LiDAR. Profile i siatki punktów powinny być zaprojektowane tak, aby w miarę możliwości znajdowały się w sąsiedztwie koryt rzek, najlepiej w międzywałach i obejmowały różnorodną charakterystykę terenu, tj.: teren zabudowany, płaski odkryty oraz porośnięty roślinnością. Na podstawie wyników pomiarów terenowych oblicza się odchyłki pomiędzy terenowymi punktami kontrolnymi a wysokością wyinterpolowaną na podstawie NMT oraz błąd średni liczony ze wszystkich obserwacji. Poniższa tabela (tab. 5.6) przedstawia kryterium weryfikacji dokładności bezwzględnej NMT.

Tabela 5.6. Kryterium weryfikacji dokładności bezwzględnej NMT

Dokładność NMT	WT INiK 2013/2014 WT LiDAR 2013/2014
błąd średni	$m_h \leq 0,20\text{m}$
maksymalna rozbieżność	$\Delta h \leq 0,60\text{m}$



Ryc. 5.19. Przykładowy profil terenowy wykonany w celu kontroli poprawności NMT na tle cyfrowej ortofotomapy

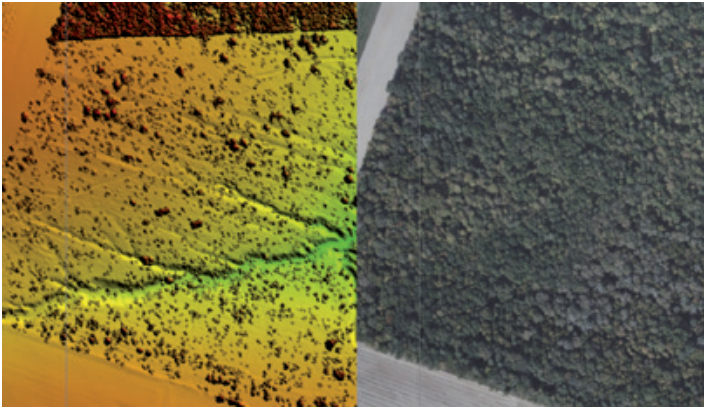
## 5.4. Kontrola numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT)

Kontrola wizualna numerycznego modelu pokrycia terenu obejmuje sprawdzenie poprawności arkuszy danych w zakresie, m.in.:

- błędnej klasyfikacji punktów LiDAR użytych do generowania NMPT,
- braku ciągłości obszarowej danych NMPT,
- błędów generowania.

Przykładowe wady NMPT przedstawiają poniższe rysunki:

1) występowania błędów generowania NMPT (ryc. 5.20);



Ryc. 5.20. Błąd generowania NMPT

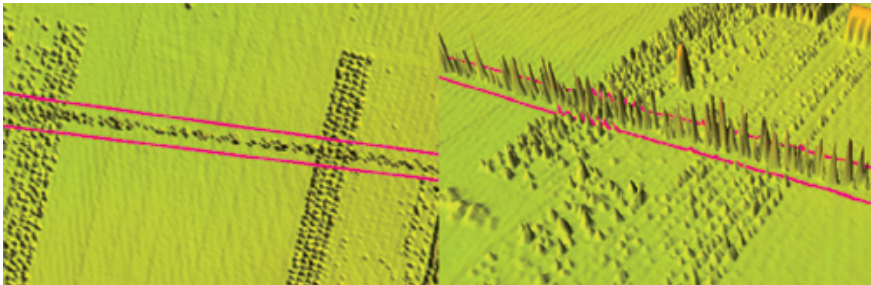
2) pików wysokościowych (ryc. 5.21);



Ryc. 5.21. Piki wysokościowe na NMPT „w górę” (od lewej: widok NMPT, widok na podkładzie ortofotomapy cyfrowej oraz NMPT – widok izometryczny)



3) występowania tzw. kurtyn wysokościowych (ryc. 5.22).



Ryc. 5.22. Kurtyny wysokościowe na NMPT powstałe w wyniku zakwalifikowania linii energetycznej do form pokrycia terenu (po lewej widok z góry, po prawej widok izometryczny)

Kolejnym etapem kontroli numerycznego modelu pokrycia terenu w ramach zamówienia WT INiK 2013/2014 jest sprawdzenie spójności pomiędzy chmurą punktów ALS a dostarczonymi przez Wykonawcę modelami NMPT. Ocena spójności ma analogiczny przebieg do kontroli przeprowadzanej podczas weryfikacji numerycznego modelu terenu.

Końcowym etapem weryfikacji poprawności modeli jest tzw. kontrola przesunięć wysokościowych i sytuacyjnych pomiędzy produktami NMPT a NMT oraz pomiędzy NMPT a chmurą punktów ALS. W ramach kontroli przesunięć wysokościowych Bloku LiDAR wyznacza się po minimum 200 punktów położonych na utwardzonych płaskich powierzchniach terenu, na co najmniej 10% wszystkich kontrolowanych arkuszy NMPT. Dla każdego punktu kontrolnego interpolowana jest różnica wysokości pomiędzy produktami NMPT a NMT oraz pomiędzy NMPT a danymi LiDAR. Natomiast do kontroli sytuacyjnej wybiera się minimum 100 punktów kontrolnych reprezentujących położenie sytuacyjne szczegółów terenowych, na co najmniej 5% wszystkich arkuszy NMPT. Przesunięcia sytuacyjne obliczane są na podstawie porównania położenia obiektów na NMPT i chmurze punktów ALS oraz na NMT i NMPT. Kontrola przesunięć wysokościowych i sytuacyjnych spełnia wymagania, jeśli rozbieżność na wszystkich punktach kontrolnych nie przekracza poniższych wartości zdefiniowanych w zamówieniu WT LiDAR 2013/2014, tj.:

- różnicy wysokościowej  $\Delta h \leq 0,15$  m,
- różnicy sytuacyjnej  $\Delta p \leq 1,00$  m.

## 5.5. Kontrola dokumentacji

W ramach tej kontroli weryfikacji podlega sporządzana przez wykonawcę dokumentacja, stanowiąca załączniki w formie cyfrowej do przekazywanych produktów.

Dokumentację Bloku LiDAR stanowi Raport dostawy, którego szczegółowa zawartość różni się pomiędzy zamówieniami: WT LiDAR 2011/2012 a WT LiDAR 2013/2014,

a zatem i zakres kontroli przeprowadzanej przez Inspektora Nadzoru i Kontroli. Celem kontroli Raportu dostawy jest weryfikacja przebiegu prac i ich zgodności z obowiązującymi wymaganiami. Podczas kontroli poprawności Raportu dostawy weryfikacji podlega: forma i treść Raportu dostawy oraz zakres informacji wynikający z przyjętego szablonu dokumentu oraz wymaganych załączników.

Kontroli podlegają również pliki metadanych dla całego Bloku LiDAR. W ramach kontroli plików metadanych (WT INiK 2013/2014) sprawdzana jest:

- kompletność plików metadanych Bloku LiDAR;
- zgodność plików metadanych ze schematem XSD;
- zawartość merytoryczna poszczególnych elementów metadanych wynikających z Profilu metadanych Bloku LiDAR oraz wytycznych Zamawiającego.

Ponadto weryfikacji podlegają cyfrowe zdjęcia lotnicze wykonane przez Wykonawcę wraz z dokumentacją. Kontrola dotyczy kompletnego pokrycia Bloku LiDAR cyfrowymi zdjęciami lotniczymi zgodnie z przyjętymi uwarunkowaniami, parametrów tj.: wartość piksela, zastosowana kompresja czy radiometria zdjęć. Przeglądowi poddawany jest także wykaz elementów orientacji zewnętrznej zdjęć zgodnie z przyjętą formą i strukturą zapisu.

## 5.6. Kontrola cyfrowej ortofotomapy lotniczej

W ramach kontroli produktów ISOK dokonuje się również weryfikacji cyfrowych ortofotomap lotniczych dla obszarów miast w kompozycji barw rzeczywistych (RGB), o wielkości piksela terenowego 0,10 m. Cyfrowe ortofotomapy lotnicze generuje się z wykorzystaniem zweryfikowanych i zaktualizowanych danych wysokościowych udostępnionych z pzgik (pozyskanych także dla celów projektu ISOK). W ramach projektu ISOK wykonano cyfrowe zdjęcia lotnicze oraz cyfrowe ortofotomapy lotnicze dla 203 miast w Polsce.

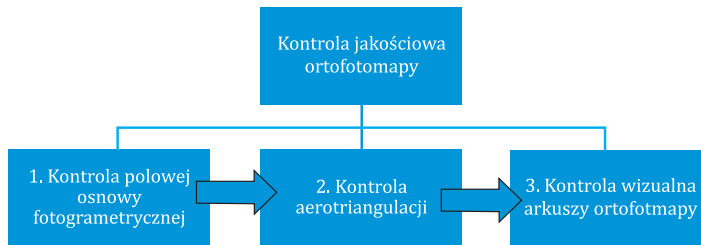
Wykonane cyfrowe ortofotomapy lotnicze przed przyjęciem do pzgik poddawane są kontroli wizualnej zarówno geometrycznej jak i radiometrycznej. Sprawdza się także poprawność przebiegu linii mozaikowania, wzdłuż których sąsiednie zdjęcia, łączone są w jeden arkusz ortofotomapy.

Realizację kontroli poprawności ortofotomap lotniczych można podzielić na dwa etapy, tj.: kontrolę ilościową oraz kontrolę jakościową.

W ramach kontroli ilościowej dokonywana jest weryfikacja zasięgu bloku ortofotomapy i jego zgodności z planem nalotu, kontrola zgodności ilości wymaganych plików z planem etapu i planem nalotu, kontrola poprawności zapisu plików, ich rozszerzeń oraz możliwość ich odczytu, a także kontrola poprawności nazw katalogów i plików oraz ich struktury. Kontroli podlega również poprawność wypełnienia nagłówka z informacją o georeferencji oraz poprawność kodowania plików ASCII i ich zgodność z wymaganą strukturą. Arkusze cyfrowej ortofotomapy lotniczej podlegają natomiast kontroli w zakresie wielkości piksela, kompresji, zastosowanej metody *overview* obrazów, poprawności cięcia arkuszowego.

W sytuacji, gdy kontrola ilościowa nie spełnia wymagań (jeden z powyższych warunków nie jest spełniony), kontrola jakościowa nie jest przeprowadzana, aż do momentu uzyskania poprawnych danych spełniających etap kontroli ilościowej.

W przypadku pozytywnego wyniku kontroli ilościowej produkt ten podlega dalszej części, tj. kontroli jakościowej. Proces ten obejmuje 3 kolejne etapy przedstawione poniżej (ryc. 5.23).



Ryc. 5.23. Schemat kontroli jakościowej ortofotomapy w ramach projektu ISOK

W ramach kontroli polowej osnowy fotogrametrycznej weryfikuje się liczbę i rozmieszczenie fotopunktów (ang. GCP), ich wybór i identyfikację oraz błędy wyznaczenia ich współrzędnych (X, Y, H). Weryfikacja etapu aerotriangulacji obejmuje wykonanie pomiarów wybranych punktów reprezentujących szczegóły terenowe, jak np. studzienki kanalizacyjne, pasy na jezdni (co najmniej 2 punkty/100 km<sup>2</sup> i nie mniej niż 6 punktów dla całego Bloku LiDAR), a następnie wprowadzenie ich do modelu stereoskopowego, uzyskanego z projektu fotogrametrycznego opartego na danych z aerotriangulacji zdjęć lotniczych. Błędy średnie pomiaru na punktach nie mogą przekroczyć wartości granicznych przedstawionych poniżej (tab. 5.7).

Tabela 5.7 Wartości dopuszczalnych wartości błędów średnich aerotriangulacji

Dokładność aerotriangulacji	
sytuacyjna (XY)	$m_p \leq 0,10$ m
wysokościowa (H)	$m_h \leq 0,15$ m

Kontrola aerotriangulacji obejmuje także weryfikację dokumentacji przekazywanej w jej ramach oraz weryfikację wyników aerotriangulacji uzyskanych przez Wykonawcę.

Kontroli dokumentacji podlegają takie elementy, jak: sprawozdanie techniczne z wykonania aerotriangulacji, projekt fotogrametryczny aerotriangulacji, metryka kalibracji kamery, raport kalibracji anten odbiorników GPS, wykaz współrzędnych fotopunktów, wykaz współrzędnych punktów kontrolnych, wykaz elementów orientacji zewnętrznej zdjęć przed i po wyrównaniu czy wykaz współrzędnych tłowych zdjęć.

Merytorycznej ocenie podlegają wyniki uzyskane w ramach wyrównania bloku zdjęć, takie jak błędy średnie wpasowania bloku ortofotomapy na połowę osnowę fotogrametryczną, błędy średnie wpasowania bloku na punkty kontrolne oraz dokładność wyrównania bloku (tab. 5.8).

Wizualna kontrola arkuszy obejmuje poprawność radiometryczną i tonalną 100% arkuszy ortofotomapy w danym Bloku LiDAR, a także poprawność geometryczną. Geometria weryfikowana jest dodatkowo przez porównanie współrzędnych terenowych (X, Y) fotopunktów i punktów kontrolnych, które Wykonawca wykorzystał do aerotriangulacji zdjęć, jak również punktów pomierzonych w terenie przez INiK. Maksymalna różnica wartości współrzędnych (X, Y) nie może przekroczyć podwójnej wartości dopuszczalnego błędu średniego lokalizacji piksela, który wynosi  $m_{xy} = 0,25$  m.

Tabela 5.8. Wartości dopuszczalnych błędów średnich wpasowania bloku ortofotomapy

Rodzaj błędu	Dopuszczalne wartości
Błąd średni wpasowania bloku na fotopunkty	RMSxy $\leq 0,08$ m RMSz $\leq 0,10$ m
Błąd średni wpasowania bloku na punkty kontrolne	RMSxy $\leq 0,12$ m RMSz $\leq 0,15$ m
Błąd średni obserwacji po wyrównaniu – dokładność wyrównania bloku ortofotomapy	$\sigma_0 \leq 3\mu\text{m}$

W ramach tej kontroli dokonywana jest także weryfikacja dokumentacji dotyczącej ortofotomapy, tj. sprawozdania wykonania cyfrowej ortofotomapy lotniczej, mapy przeglądowej z podziałem na moduły, osobnej dla każdego układu współrzędnych, w którym generowana jest ortofotomapa. Kontroli podlegają także: plik wektorowy z wykorzystanymi liniami mozaikowania, plik zawierający wszelkie wprowadzone zmiany na danych wysokościowych wykorzystanych do opracowania ortofotomapy oraz plik metadanych modułów ortofotomapy.

Przykładowe błędy występujące na cyfrowych ortofotomapach lotniczych zaprezentowano poniżej (ryc. 5.24–5.28):

- 1) geometryczne,



Ryc. 5.24. Budynki o poprawnej geometrii na zdjęciu lotniczym (po lewej) oraz zniekształcenia geometryczne budynków na cyfrowej ortofotomapie lotniczej (po prawej)



Ryc. 5.25. Poprawna geometria na zdjęciu lotniczym (po lewej), zniekształcenia geometryczne występujące na cyfrowej ortofotomapie (po prawej)

2) radiometryczne,



Ryc. 5.26. Błąd radiometrii występujący na cyfrowej ortofotomapie lotniczej

## 3) błędy linii mozaikowania,



Ryc. 5.27. Zdjęcie lotnicze w miejscu przebiegu linii mozaikowania (po lewej), błąd ortofotomapy powstały w miejscu przebiegu linii mozaikowania (po prawej)



Ryc. 5.28. Błąd wyrównania tonalnego na cyfrowej ortofotomapie lotniczej w miejscu przebiegu linii łączenia sąsiednich zdjęć

Kontrola jakościowa ortofotomap wykonywana jest w kilku iteracjach w celu eliminacji wszystkich występujących błędów, a wolne od wad bloki ortofotomapy przyjmowane są do pzgik.

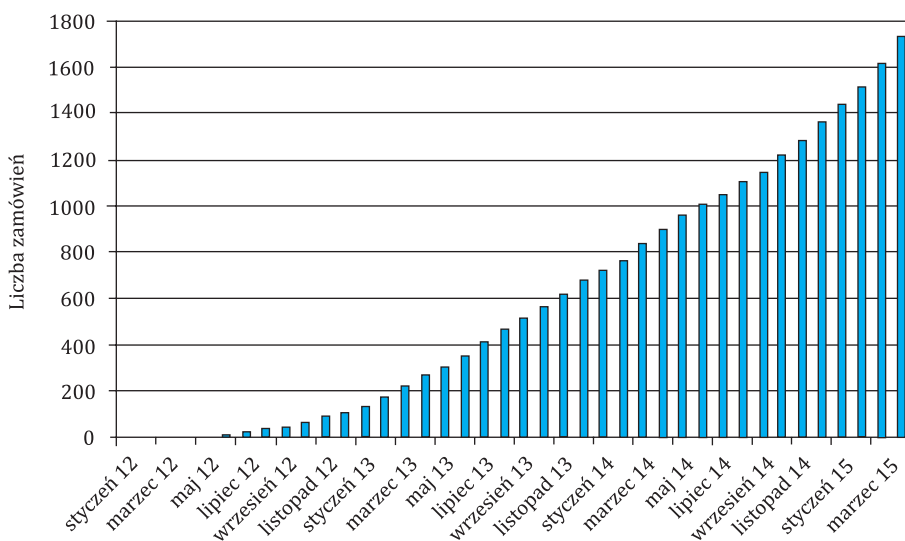
## Literatura

- GUGiK, 2011. Warunki techniczne na wykonanie lotniczego skaningu laserowego (LiDAR) oraz opracowanie produktów pochodnych. Załącznik nr 1 do SIWZ – Warunki techniczne.
- GUGiK, 2011. Warunki techniczne na realizację usługi polegającej na wykonaniu zadań wsparcia i zadań kontroli dotyczących zamówień realizowanych przez Wykonawców ISOK w ramach zamówienia „Usługa weryfikacji danych i koordynacji działań w ramach projektu ISOK”. Załącznik nr 1 do SIWZ – Warunki techniczne INiK.
- GUGiK, 2013. Warunki techniczne na pozyskanie danych wysokościowych w technologii LiDAR oraz opracowanie produktów pochodnych. Załącznik nr 1 do SIWZ – Szczegółowy Opis Przedmiotu Zamówienia wraz z załącznikami – Warunki techniczne.
- GUGiK, 2013. Warunki techniczne na realizację usługi weryfikacji danych w ramach projektu ISOK – INiK3. Załącznik nr 1 do SIWZ – Szczegółowy Opis Przedmiotu Zamówienia – WT INiK3.

## 6. Wykorzystanie danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego

### 6.1. Wykorzystanie danych wysokościowych opracowanych w projekcie ISOK

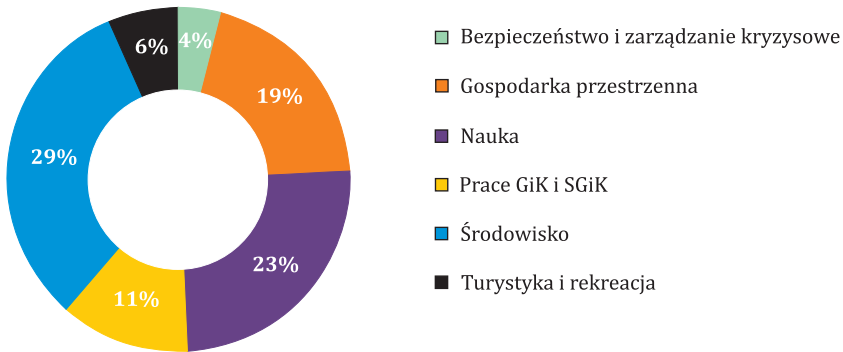
Do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego cyklicznie trafiają aktualne i precyzyjne dane wysokościowe pozyskane w technologii lotniczego skanowania laserowego (chmura ALS, NMT, NMPT), które docelowo w ramach realizacji projektu ISOK zostaną opracowane dla 92% powierzchni kraju. Z możliwości wykorzystania tak wartościowego materiału od początku 2012 roku do maja 2015 roku skorzystało w naszym kraju już ponad 897 instytucji administracji publicznej, firm prywatnych i osób fizycznych składając łącznie 1748 zamówień (ryc. 6.1).



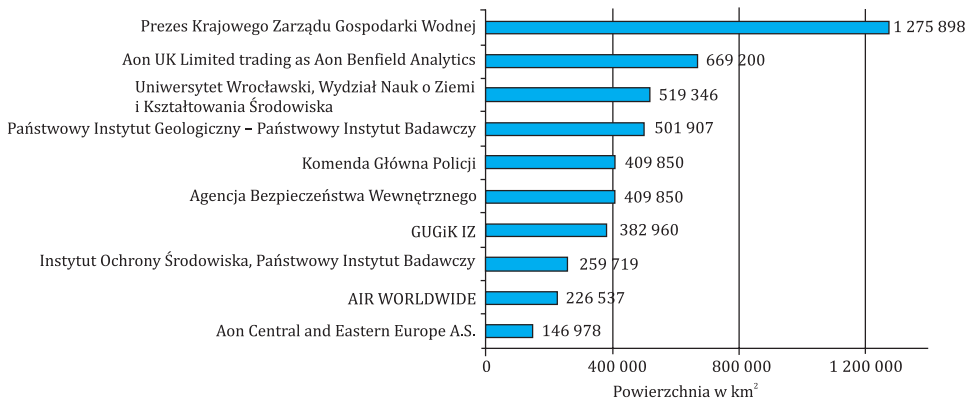
Ryc. 6.1. Liczba zamówień w przeliczeniu na dane ALS, NMT, NMPT w okresie styczeń 2012 – kwiecień 2015 r.



Dane te znajdują szerokie zastosowanie w wielu sektorach gospodarki (ryc. 6.2). W sektorze bezpieczeństwa i zarządzania kryzysowego są między innymi kluczowym elementem opracowywanych przez Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej w ramach projektu ISOK map zagrożenia i ryzyka powodziowego, a ponadto wspierają realizację statutowych zadań m.in. Policji i Agencji Bezpieczeństwa Wewnętrznego (ryc. 6.3).



Ryc. 6.2. Procentowy udział sektorów gospodarki w liczbie 1748 zamówień na dane ALS, NMT, NMPT z pzgik

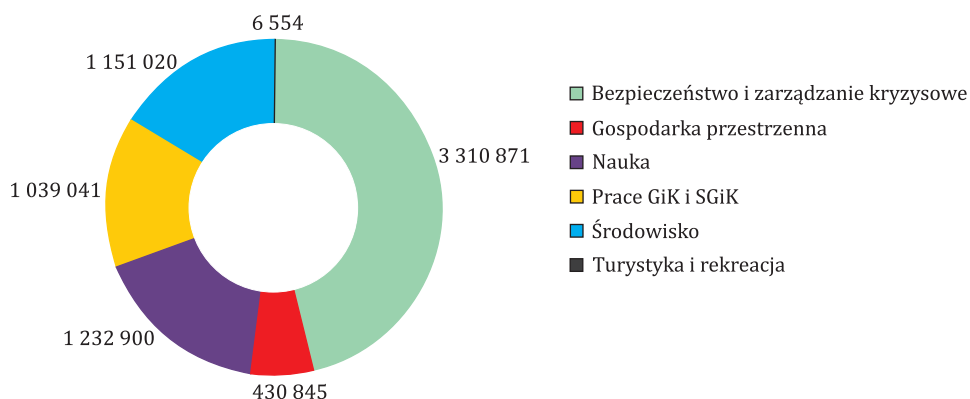


Ryc. 6.3. Zestawienie dziesięciu instytucji pobierających najwięcej danych ALS, NMT, NMPT z pzgik [km<sup>2</sup>]

W sektorze gospodarki przestrzennej dane ALS, NMT, NMPT stanowią istotny element procesu tworzenia miejscowych planów zagospodarowania, studiów uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, projektowania i modernizacji zbiorników wodnych, obwałowań, dróg oraz linii kolejowych. Korzyści z wykorzystania danych w tych obszarach czerpią już między innymi: Biuro Rozwoju Gdańska, Wojewoda Małopolski czy Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy. Dzięki

danym wysokościowym jednostki samorządu terytorialnego mają możliwość zapewnienia ładu przestrzennego, promocji walorów środowiskowych, przyrodniczych i historycznych swojego regionu. Dane wspierają również działania mające na celu uzyskiwanie decyzji środowiskowych, prowadzenie monitoringu środowiska i przygotowywanie różnego rodzaju planów ochrony. Na uwagę zasługuje również wykorzystanie danych w badaniach archeologicznych. Umożliwiają one wstępną identyfikację lokalizacji potencjalnych pozostałości archeologicznych oraz geologicznych poprzez monitoring osuwisk i wyrobisk górniczych. W szerokim zakresie są one wykorzystywane m.in. przez Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, Zespół Parków Krajobrazowych Województwa Małopolskiego oraz Regionalną Dyрекcję Lasów Państwowych. Dane ALS, NMT i NMPT znajdują w naszym kraju również zastosowanie w analizach hałasu, potencjału solarnego oraz projektowaniu lokalizacji farm wiatrowych. Ciekawym zastosowaniem danych pochodzących z projektu ISOK jest ich wykorzystanie do sporządzania dokładnych map wykorzystywanych przy biegach na orientację przez takie organizacje jak np. Polski Związek Orientacji Sportowej.

Odzwiedcieniem możliwości i potrzeb wykorzystania danych wysokościowych jest nieustająco rosnąca liczba zamówień, ale również i liczba zamawianych plików. Od początku 2012 roku udostępniono dane ALS, NMT i NMPT dla łącznej powierzchni 7 171 231 km<sup>2</sup> (ryc. 6.4).



Ryc. 6.4. Powierzchnia udostępnionych danych ALS, NMT, NMPT w podziale na sektory gospodarki [km<sup>2</sup>]

Najwięcej danych wykorzystuje administracja państwowa do realizacji szeregu zadań publicznych oraz inicjatyw, które wpływają na poprawę bezpieczeństwa i jakości życia całego społeczeństwa. Należy zauważyć znaczący udział sektora nauki w liczbie wszystkich zamówień (23% całości) oraz liczbie instytucji wykorzystujących dane ALS, NMT, NMPT na cele naukowe (242 z 897 instytucji – 27%). Możliwość dostępu do innowacyjnych danych przestrzennych jest również impulsem do rozwoju biznesu, otwie-

rając możliwości realizacji w kraju nowatorskich i zaawansowanych technologicznie przedsięwzięć.

Rozpowszechnianie wiedzy na temat możliwości pozyskania danych oraz dobrych praktyk ich wykorzystania sprawia, że coraz więcej instytucji sięga po te dane w celu optymalizacji realizowanych zadań i podejmowania lepszych decyzji. W sposób bezpośredni przekłada się to na wzrost wydajności i jakości świadczonych usług zarówno przez firmy prywatne, jednostki naukowe czy instytucje państwowe, z korzyścią dla obywatela.

Mając na względzie powyższe korzyści, GUGiK we współpracy z użytkownikami danych ALS, NMT NMPT opracowuje m.in. tzw. karty zastosowań, które w kompleksowej formie przedstawiają dobre praktyki wykorzystania przedmiotowych danych na konkretnych przypadkach w naszym kraju.

Podsumowując, na przestrzeni najbliższych miesięcy i lat prognozuje się dalszy dynamiczny wzrost wykorzystania danych ALS, NMT, NMPT opracowanych w ramach projektu ISOK we wszystkich sektorach gospodarki.

mgr Marcin Szwagrzyk  
mgr Mateusz Kramarczyk  
mgr inż. Michał Szczyński

## 6.2. Opracowanie map zagrożenia i ryzyka powodziowego

### 6.2.1. Informacja o podstawie prawnej

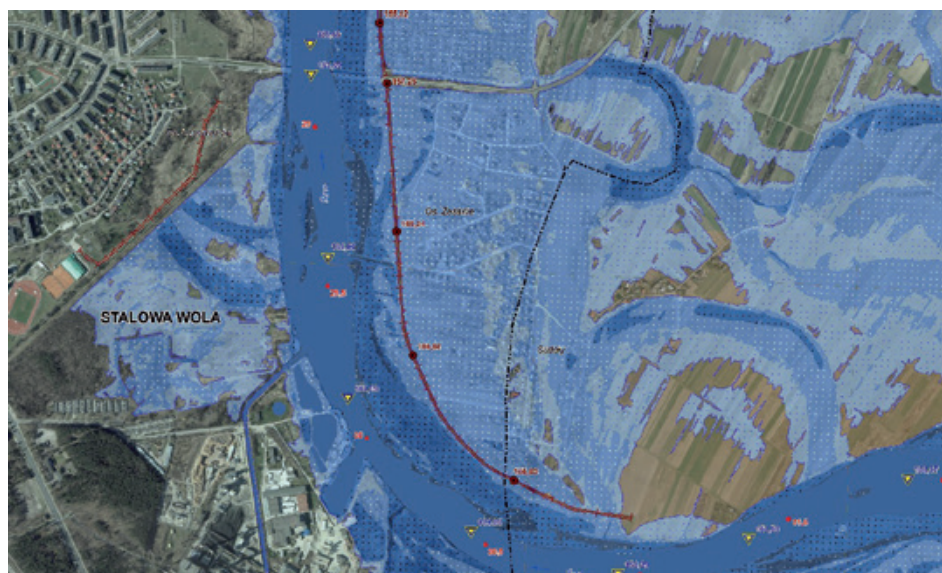
Podstawą prawną regulującą kwestie opracowania i wdrożenia map zagrożenia powodziowego (MZP) oraz map ryzyka powodziowego (MRP) jest ustawa Prawo wodne z dnia 18 lipca 2001 r. (Dz.U. z 2001 r. Nr 115 poz. 1229 z późn. zm.) oraz rozporządzenie Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego (Dz.U. z 2013 r. poz. 104). Wspomniana ustawa i rozporządzenie realizują zapisy Dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowej i zarządzania nim (Dz.U. L 288 z 06.11.2007, str. 27–34), potocznie zwanej Dyrektywą Powodziową.

Opracowane, zgodnie z tymi przepisami, mapy zagrożenia powodziowego (MZP; ryc. 6.5) przedstawiają obszary narażone na wystąpienie powodzi z określonym prawdopodobieństwem  $p = 0,2\%$  (raz na 500 lat),  $p = 1\%$  (raz na 100 lat) i  $p = 10\%$  (raz na 10 lat). Dodatkowo MZP prezentują obszary zagrożone zalaniem wskutek przerwania wałów przeciwpowodziowych. Wyznaczone na MZP obszary, na których zagrożenie powodziowe jest średnie i wysokie (odpowiednio  $p = 1\%$  i  $p = 10\%$ ) stanowią tereny szczególnie zagrożone i są podstawą do ustanowienia zakazu zabudowy.

Mapy ryzyka powodziowego (MRP), stanowiące uzupełnienie MZP, określają wartość potencjalnych strat powodziowych oraz prezentują obiekty zagrożone zalaniem. Opracowania MRP pozwalają na ocenę ryzyka powodziowego dla: zdrowia i życia ludzi, środowiska, dziedzictwa kulturowego i działalności gospodarczej.

Wyznaczone i prezentowane na MZP obszary są podstawą dla planowania zagospodarowania przestrzennego na różnych poziomach, które uwzględnia się w:

- koncepcji przestrzennego zagospodarowania kraju,
- planach zagospodarowania przestrzennego województw,
- miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego,
- decyzjach o ustaleniu lokalizacji inwestycji celu publicznego lub decyzjach o warunkach zabudowy.



Ryc. 6.5. Fragment mapy zagrożenia powodziowego z przedstawioną strefą Sanu z okolic Stalowej Woli (źródło: [www.mapy.isok.gov.pl](http://www.mapy.isok.gov.pl))

### 6.2.2. Opis modeli stosowanych w procesie tworzenia MZP i MRP

Zgodnie z rozporządzeniem, MZP i MRP opracowywane są na podstawie wyników modelowania hydraulicznego jednowymiarowego (1D) oraz dwuwymiarowego (2D). Jedno- i dwuwymiarowe modelowanie bazuje na metodzie hydraulicznej znanej pod nazwą „metody fali dynamicznej”. Metoda ta opisana jest pełnymi, jednowymiarowymi równaniami Saint-Venanta, które wyrażane są w postaci równania zachowania masy oraz równania zachowania pędu.

W modelowaniu jednowymiarowym (1D) ciek upraszczany jest do geometrii przekrojów poprzecznych i profilu podłużnego. Derywaty tych geometrii, takie jak np. powierzchnia przekroju, promień hydrauliczny czy też spadek ciek między przekrojami, podstawiane są jako zmienne w równaniach obliczeniowych. Natomiast w modelowaniu 2D obliczenia wykonywane są na siatce elementów w dwuwymiarowej przestrzeni XY.

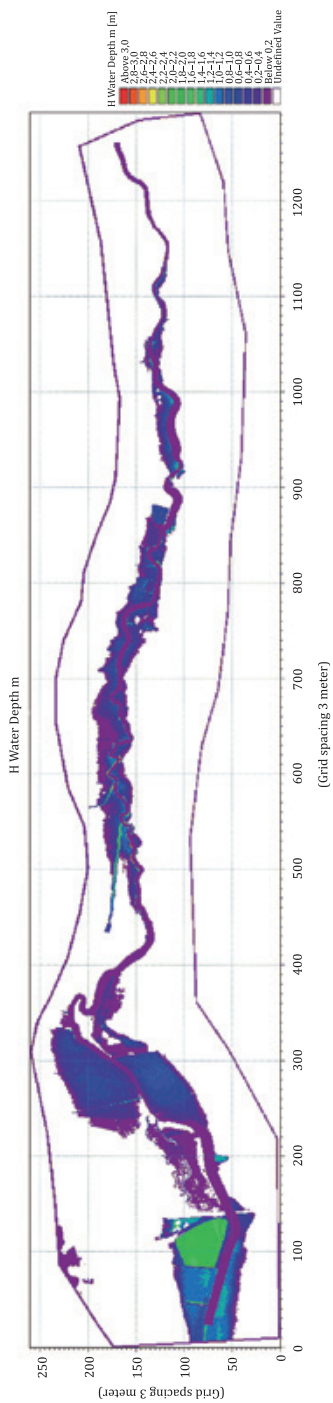
Hydrauliczny model jednowymiarowy zawiera następujące elementy składowe: przekroje poprzeczne koryta modelowanego cieku, współczynniki szorstkości punktów przekrojów poprzecznych, schemat sieci rzecznej, odwzorowane obiekty mostowe oraz warunki brzegowe (wielkości przepływów wygenerowane na podstawie obliczeń hydrologicznych).

Modelowanie jednowymiarowe dostarcza informacji o rzędnych zwierciadła wody, wielkościach przepływu oraz prędkościach płynięcia wody. Wszystkie te dane ograniczone są jednak do przekrojów obliczeniowych. Wyznaczenie zasięgu strefy zalewowej na podstawie wyników modelowania 1D wymaga interpolacji rzędnej zwierciadła wody na odcinkach pomiędzy modelowanymi przekrojami oraz analiz przestrzennych, z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu (NMT).

Modelowanie dwuwymiarowe (2D) odbywa się bezpośrednio na siatce obliczeniowej wygenerowanej na podstawie NMT i przez to bezpośrednio dostarczane są informacje o zasięgu i głębokości strefy zalewowej, bez konieczności przeprowadzania dodatkowych analiz przestrzennych (ryc. 6.6). Ponadto, wynikami obliczeń dwuwymiarowych są informacje o prędkości i kierunku przemieszczania się wody w każdym z punktów modelowanego obszaru. Modelowanie dwuwymiarowe (w przeciwieństwie do modelowania 1D) stosuje się również na obszarach, gdzie możliwy jest ruch wody w kierunku prostopadłym do koryta cieku. Z tego powodu modelowanie 2D stosowane jest w przypadkach symulowania zdarzeń przerwania obwałowań przeciwpowodziowych.

Przygotowanie dwuwymiarowego modelu jest jednak dużo bardziej czasochłonne, a czas przeliczenia symulacji znacznie dłuższy, niż w przypadku modelu 1D. Z tego względu modelowaniem 2D zostały objęte jedynie miasta powyżej 100 000 mieszkańców, dla których przygotowuje się MZP i MRP.

W ramach opracowywanych MZP i MRP w Polsce do jednowymiarowych obliczeń hydraulicznych wykorzystywany jest program MIKE11, natomiast modele 2D wykonywane są w oprogramowaniu MIKE21. Oba pakiety stworzone zostały przez Duński Instytut Hydrauliki (DHI).



2000-01-01 14:00:00, Time step: 60, Layer: 0

Ryc. 6.6. Przykładowe wyniki modelowania hydraulicznego 2D – głębokość wody i zasięg strefy zalewowej

### 6.2.3. ALS jako źródło danych wejściowych do modelowania 1D

Dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego stanowią, obok danych z bezpośrednich pomiarów geodezyjnych, podstawowe dane wejściowe do modelowania hydraulicznego 1D. Dostarczają one bowiem charakterystyki geometrii przekrojów poprzecznych dla modelowanego cieku. Ze względu na charakterystykę zastosowanej technologii ALS, a więc brak możliwości skanowania pod wodą, koryto cieku znajdujące się poniżej lustra wody (tzw. mokre przekroje) mierzy się w terenie za pomocą tachimetru (płytkie cieki), odbiornika GNSS albo pomiarami batymetrycznymi. Pikiety z bezpośrednich pomiarów uzupełniane są następnie danymi ALS przedstawiającymi geometrię przekroju poprzecznego na terasie zalewowej. Optymalny przebieg dolinowych przekrojów poprzecznych, prostopadły do przebiegu poziomicy w dolinie rzeki i reprezentatywny dla charakteru doliny, wyznacza się w programach typu GIS.

Dokładność NMT ma bardzo duże znaczenie przy odzwierciedlaniu geometrii przekrojów poprzecznych. Dotyczy to zwłaszcza wysokości takich elementów rzeźby, jak: ciągnące się wzdłuż rzeki drogi lub naturalne obwałowania, które nie zostały zmierzone geodezyjnie w terenie. Wysokość tego typu obiektów ma wpływ na prawdopodobieństwo, z jakim woda może wystąpić z koryta modelowanej rzeki. Warto zaznaczyć, że przewyższenie rzędnej obwałowań przez rzędną zwierciadła wody zaledwie o kilka centymetrów może doprowadzić do zalania rozległych obszarów. Wykorzystywany w przeszłości NMT, zrealizowany w ramach programu LPIS (System Identyfikacji Działek Rolnych), na podstawie fotogrametrycznego opracowania zdjęć lotniczych, z racji niewystarczającej dokładności pionowej (błąd średni  $m_z > 1,0$  m), mógł prowadzić do wyznaczania niewiarygodnego zasięgu strefy zalewowej. Dokładność NMT pozyskiwanego metodą ALS (błąd średni  $m_z < 0,15$  m) pozwala na znaczne zwiększenie wiarygodności wyznaczanych obszarów zalewowych.

Wszelkie obiekty mostowe i hydrotechniczne znajdujące się w korycie rzeki mają bardzo duże znaczenie dla kształtowania przepływu w rzece.

Najczęściej dane pozyskane w technologii lotniczego skanowania laserowego nie dostarczają informacji o pełnej charakterystyce obiektów mostowych i inżynierskich w korycie rzeki, zwłaszcza informacji o prześwicie tych obiektów. Niemniej jednak chmura punktów ALS ułatwia lokalizację obiektów do pomiarów w terenie, a także – po porównaniu z innymi źródłami danych – identyfikację obiektów nowych i zmodernizowanych, które wymagają aktualizacji pomiarów.

W przypadku modelowania 2D podstawowym elementem modelu jest powierzchnia reprezentująca ukształtowanie terenu (uzupełniona o informacje o współczynnikach szorstkości). Do jej generowania wykorzystuje się rastry (regularne sieci kwadratów) będące pochodną danych ALS, uzupełnione o dane dotyczące zabudowy oraz dane z pomiarów geodezyjnych obiektów kubaturowych, np. obwałowań przeciwpowodziowych. Czas obliczeń modelu dwuwymiarowego jest stosunkowo długi i zależy od wielkości rastra, a przede wszystkim od liczby komórek zalewanych. Przykładowo, dla rastra o wielkości 3500 x 3000 pikseli (piksel 3 x 3 m) i około 10% komórek zalewanych, czas obliczeń na standardowym komputerze PC może wynosić nawet kilka tygodni.

Innym podejściem do generowania powierzchni obliczeniowych dla modelowania 2D jest opracowywanie modelu terenu w postaci siatki trójkątów o nieregularnej wielkości (ang. TIN). Stworzenie takiej siatki na podstawie danych ALS wymaga przetwarzania chmury punktów i identyfikacji istotnych, z punktu widzenia modelowania, linii strukturalnych, odzwierciedlających wszelkie naturalne i antropogeniczne formy terenu. Taka siatka TIN umożliwia ograniczenie objętości zbioru danych, przy zachowaniu szczegółowości, co bezpośrednio przekłada się na czas obliczeń dwuwymiarowych.

Zarówno w modelowaniu 1D, jak i 2D, ważnym parametrem modelu jest tzw. współczynnik szorstkości, zależny od pokrycia terenu. W modelowaniu 1D współczynniki szorstkości przypisane są poszczególnym punktom przekrojów poprzecznych, podczas gdy w modelowaniu 2D wartość szorstkości przyporządkowana jest każdej komórce siatki obliczeniowej. Dane ALS i zaawansowane metody klasyfikowania pokrycia terenu na podstawie chmury punktów są bardzo przydatne przy precyzyjnym wyznaczaniu klas terenu ze względu na zróżnicowanie współczynników szorstkości. Przykładowo, współczynnik szorstkości Manninga dla drogi asfaltowej (gładka powierzchnia) wynosi 0,02, dla lasu (szorstka powierzchnia) – 0,06, a dla gęstych zarośli (bardzo szorstka powierzchnia) aż 0,15. Wykorzystanie chmury punktów jest pomocne m.in. przy rozróżnianiu pomiędzy klasą lasu a zarośli, które to – pomimo znacznego zróżnicowania współczynnika szorstkości – nieraz cechują się bardzo podobnym odwzorowaniem na ortofotomapie.

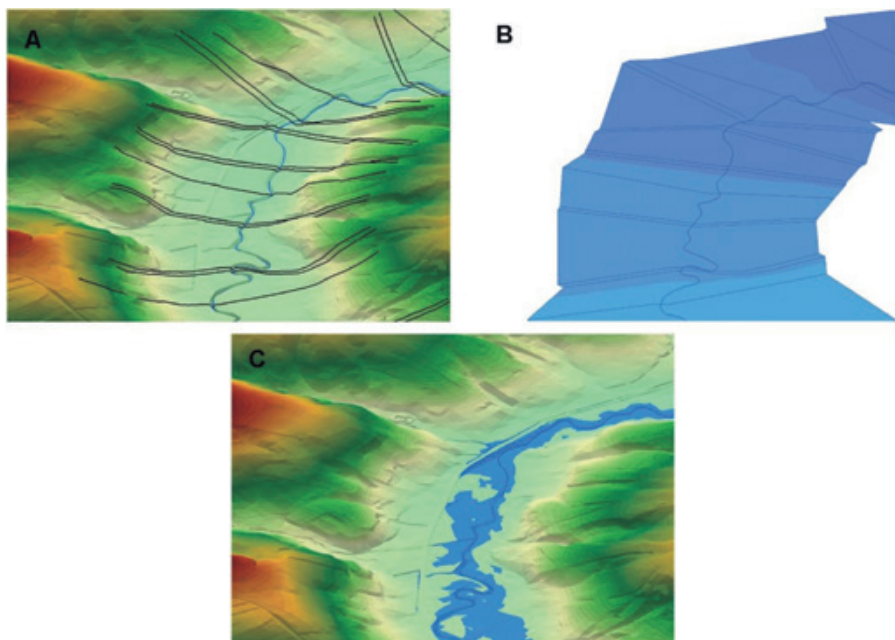
#### 6.2.4. Generowanie stref zagrożenia na podstawie wyników modeli hydrodynamicznych

Wyniki modelowania hydraulicznego 1D – rzędne zwierciadła wody w przekroju obliczeniowym – przetwarzane są w programach typu GIS, co umożliwia wygenerowanie informacji o zasięgach strefy zalewowej i głębokościach wody.

Na podstawie rzędnych zwierciadła wody, które przypisane są do geometrii przebiegu przekrojów poprzecznych, generuje się numeryczny model powierzchni wody (NMPW). Za pomocą algebry map dokonuje się następnie odejmowania wartości wysokości z NMT od wartości wysokości z NMPW, uzyskując warstwę głębokości wody zalewowej. Na podstawie modelu różnicowego ww. powierzchni generuje się zasięg strefy zalewowej i weryfikuje się go, opierając się na pomocniczych danych i analizach przestrzennych, uwzględniając np. różnicę rzędnej zwierciadła wody w korycie głównym cieku w stosunku do zwierciadła wody na terasach zalewowych (ryc. 6.7).

Strefa zalewowa, wraz z informacjami o głębokościach wody, stanowi podstawę do obliczeń i analizy ryzyka powodziowego. Analizy przestrzenne wykorzystujące głębokości strefy zalewowej, razem z informacją o pokryciu terenu – i przypisanej do danej klasy pokrycia terenu wartości majątkowej – umożliwiają obliczenie szacunkowej wielkości strat powodziowych.





Ryc. 6.7. Proces wyznaczania strefy zalewowej: A – numeryczny model terenu z przekrojami poprzecznymi, B – wyinterpolowana powierzchnia zwierciadła wody, C – zasięg strefy zalewowej

### 6.2.5. Podsumowanie

Dane z lotniczego skanowania laserowego stanowią podstawowy komponent wejściowy do modelowania hydrodynamicznego, dostarczając informacji o geometrii tras zalewowych oraz współczynnikach szorstkości. Dane ALS poprawiają dokładność modelowania i wiarygodność uzyskiwanych wyników, w porównaniu z innymi źródłami, takimi jak mapy topograficzne lub numeryczne modele terenu generowane metodą fotogrametrycznego opracowania zdjęć lotniczych. Ponadto, zastosowanie danych ALS ułatwia i zapewnia bardzo wysoką dokładność wyznaczania zasięgów i głębokości stref zalewowych, a co za tym idzie, szacowanych wielkości strat powodziowych.

### Literatura

Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (Dz.U. L 288 z 06.11.2007, str. 27–34).

Kurczyński Z., Bakuła K., 2013. *Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. Wydanie specjalne: Monografia: „Geodezyjne Technologie Pomiarowe”, s. 97–108, Warszawa.

Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (Dz.U. z 2001 r. Nr 115 poz. 1229 z późn. zm.).

Rozporządzenie Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego (Dz.U. z 2013 r. poz. 104).

dr Zbigniew Perski  
dr Tomasz Wojciechowski

### 6.3. Monitorowanie ruchów masowych (osuwiska, spływy, zerwy)

#### 6.3.1. Badania prowadzone w Polsce

Ruchy masowe można zdefiniować jako przemieszczenia materiału skalnego (w tym osadów, zwierzelin, a także gleby) skierowane w dół stoku wywołane siłą ciężkości. Ruchy masowe (transport materiału po stoku) mogą się odbywać zarówno z dużą prędkością, nagle i gwałtownie, jak również w bardzo wolnym tempie, trudnym do bezpośredniego zaobserwowania w terenie bez odpowiedniego opomiarowania.

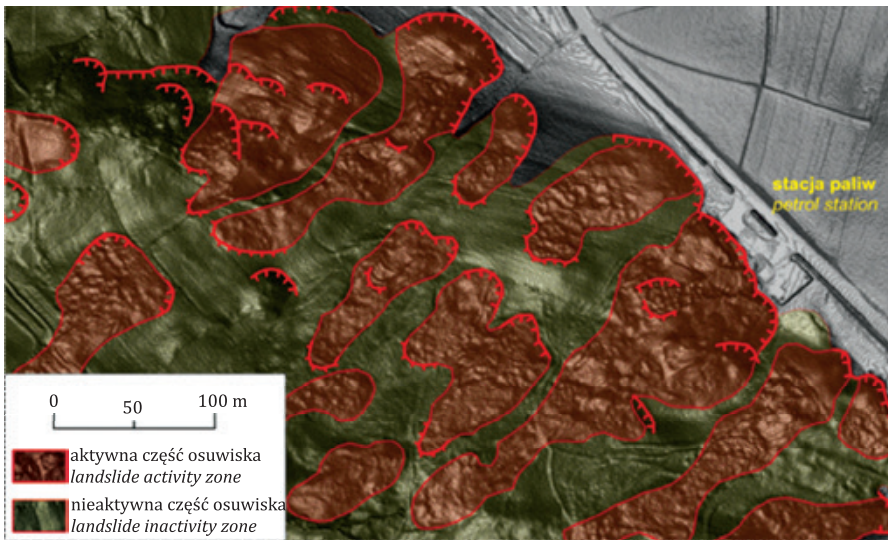
Obecnie w Polsce, w ramach programu SOPO (System Osłony Przeciwosuwiskowej), Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) prowadzi prace kartograficzne, polegające na identyfikacji i inwentaryzacji osuwisk w granicach administracyjnych gmin i powiatów. W ramach projektu prowadzony jest również stały monitoring instrumentalny (powierzchniowy i wgłębny) 60 osuwisk w Karpatach. W obu zadaniach wykorzystywane są dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego.

#### 6.3.2. Dane wykorzystywane w badaniach oraz metody ich opracowania

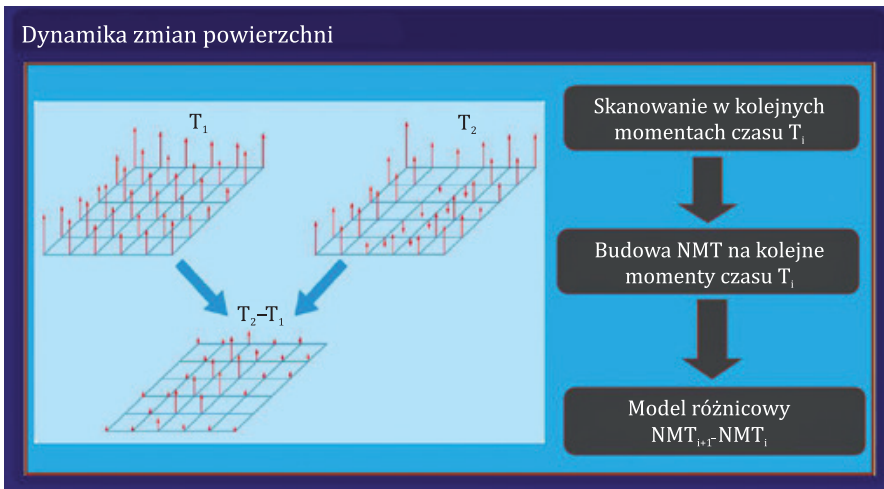
Technologia ALS dostarcza bardzo szczegółowych danych o kształcie aproksymowanej powierzchni przebiegu terenu, dlatego też technika ta dobrze nadaje się do rozpoznawania form osuwiskowych. Lokalne zróżnicowanie „szorstkości” powierzchni terenu na obszarze osuwiska może informować o stopniu jego współczesnej aktywności (ryc. 6.8). Jest to bardzo cenna informacja w kontekście inwentaryzacji osuwisk, jednak nie pozwala ona na określenie czasu i wielkości przemieszczeń.

Danych ilościowych dotyczących wielkości powierzchniowych ruchów masowych mogą dostarczyć modele różnicowe, obliczane na podstawie wielokrotnego lotniczego skanowania laserowego tego samego obszaru w różnych odstępach czasu. Na podstawie chmur punktów ALS zarejestrowanych dla określonych momentów  $T_i$  generuje się numeryczne modele terenu, które po odjęciu od siebie pozwalają określić ilościowe zmiany wysokościowe (składowa Z), jakie zaszły w czasie pomiędzy kolejnymi okresami skanowania

(ryc. 6.9). Model różnicowy wykonany na podstawie danych ALS umożliwia bardzo szczegółowe określenie zmian pionowych powierzchni terenu. Poniżej (ryc. 6.10) zaprezentowano model różnicowy niewielkiego osuwiska o charakterze spływu, w Woli Kurowskiej (gmina Gródek nad Dunajcem), zlokalizowanego w terenie leśnym.

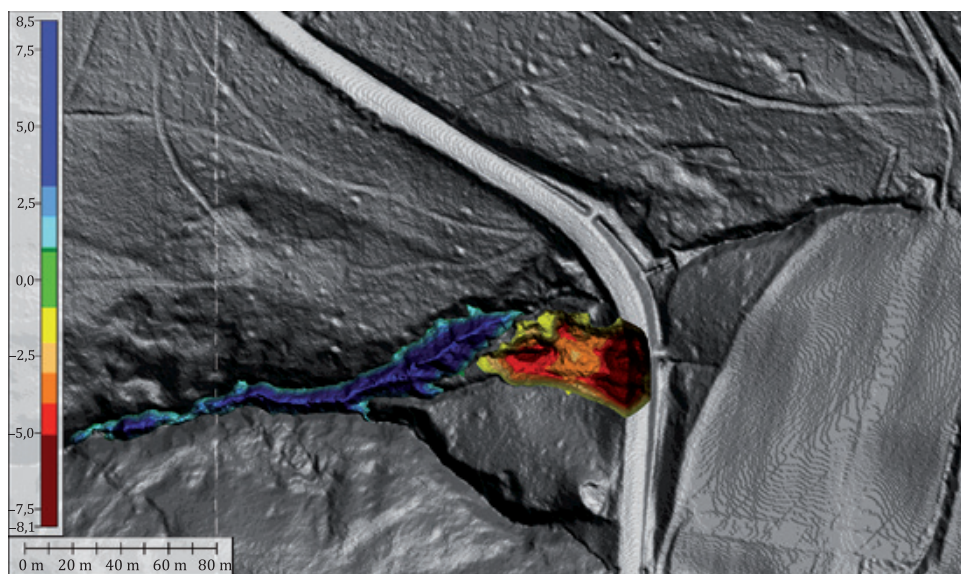


Ryc. 6.8. Określanie stopnia zróżnicowania aktywności osuwiska na podstawie szorstkości powierzchni gruntu. Osuwisko w Zbyszycach (źródło: Wojciechowski i in., 2012)



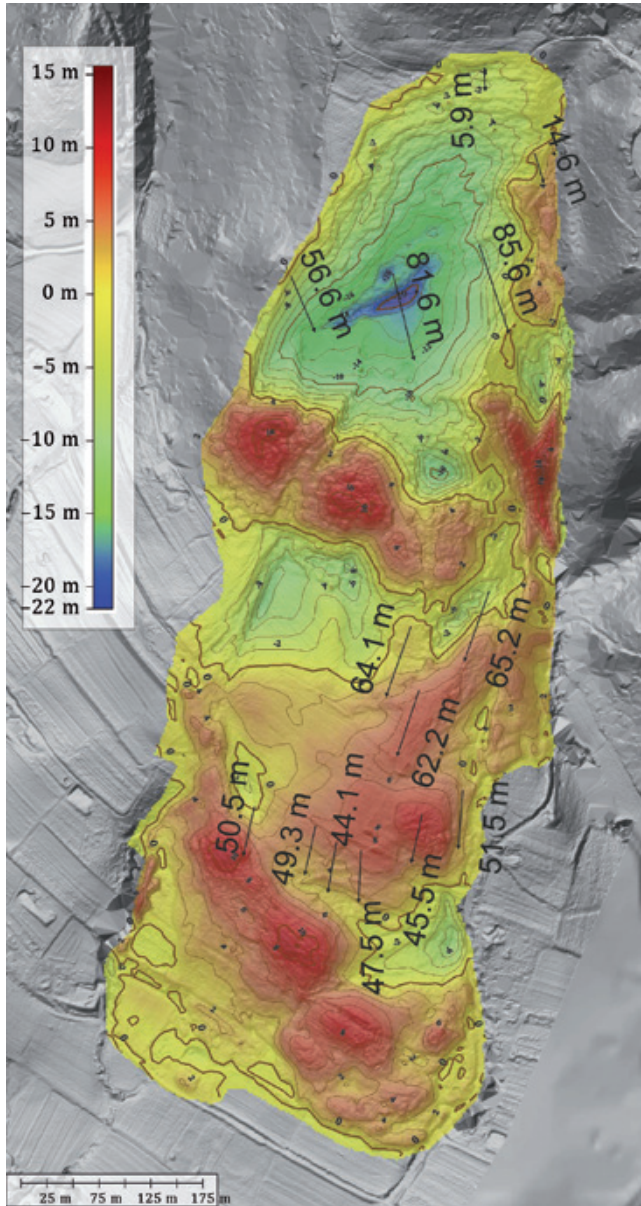
Ryc. 6.9. Schemat ideowy tworzenia modeli różnicowych na podstawie powtarzalnego lotniczego skanowania laserowego (źródło: Borkowski i in., 2012)

Tworzenie modeli różnicowych jest procesem, w którym mogą być stosowane modele terenu pozyskane różnymi metodami, np. z pomiarów fotogrametrycznych czy map warstwicznych. W takim przypadku należy jednak liczyć się ze znacznie mniejszą dokładnością i wiarygodnością modeli różnicowych, gdyż ta uzależniona jest od jakości użytych danych wejściowych. W przypadku dużych przemieszczeń, jak np. osuwisko w Kłodnem koło Limanowej, porównanie NMT pochodzącego z projektu LPIS z 2009 r. (błąd średni  $m_z > 2$  m na obszarach zalesionych) z danymi ALS zarejestrowanymi miesiąc po wystąpieniu głównych przemieszczeń w lipcu 2010 r. (ryc. 6.11) okazało się wystarczające do badań, gdyż deformacje spowodowane osuwiskiem osiągnęły wartość aż kilkudziesięciu metrów.



Ryc. 6.10. Model różnicowy osuwiska w Woli Kurowskiej (na tle cieniowanego modelu rzeźby terenu) obliczony na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego; kwiecień–lipiec 2010 (źródło: Chowaniec i in., 2012)

Metoda modeli różnicowych umożliwia bardzo dokładne określenie wielkości przemieszczeń, głównie pionowych. W przypadku osuwisk, gdzie przemieszczenia zachodzą wzdłuż powierzchni stoku, duże znaczenie ma określenie poziomego wektora przemieszczeń. Tego rodzaju danych może dostarczyć analiza chmur punktów ALS lub zdjęć lotniczych, na podstawie której można wyznaczyć wektory przemieszczeń pomiędzy poszczególnymi obiektami terenowymi.



Ryc. 6.11. Wartości przemieszczeń pionowych (w kolorze) osuwiska w Kłodnem otrzymane na podstawie porównania modeli NMT LPIS (dana źródłowe z 2009) z modelem NMT z lotniczego skanowania laserowego (dane źródłowe: lipiec 2011). Wektory przemieszczeń poziomych określono na podstawie ortofotomap lotniczych (źródło: Wojciechowski i in., 2013; Perski i in., 2014)

### 6.3.3. Podsumowanie

Lotnicze skanowanie laserowe jest bardzo pomocną metodą w monitorowaniu osuwisk. Pozwala ono na wyznaczenie obszarów aktywnych, a w przypadku wykonania kolejnych skanowań tego samego obszaru umożliwia obliczenie wielkości przemieszczeń pionowych. Jeśli dostępne są dane w postaci chmur punktów, można określić również wartości przemieszczeń poziomych. Interwał pomiędzy wykonywaniem kolejnych nalołów ALS powinien być uzależniony od dynamiki zachodzących zjawisk. W polskich warunkach, wystarczające wydaje się powtarzanie skanowania w interwałach rocznych. Warto pamiętać, by dane zbierane były w okresach spoczynkowych wegetacji – np. wczesną wiosną, ze względu na utrudnienia w penetracji roślinności przez promień lasera, jakie zachodzą w okresie letnim.

### Literatura

- Borkowski A., Perski Z., Wojciechowski T., Wójcik A., 2012. *LiDAR and SAR Data Application for Landslide Study In Carpathians Region (Southern Poland)*. Proceedings of the XXII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Melbourne, 25 August – 1 September 2012.
- Chowaniec J. Wójcik A., Mrozek T., Rączkowski W., Nescieruk P., Perski Z., Wojciechowski T., Marciniak P., Zimnal Z., Granoszewski W., 2012. *Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas – przewodnik*, Wydawnictwo Kartograficzne Compass, Kraków, 144.
- Perski Z., Wojciechowski T., Wójcik A., Borkowski A., 2014. *Monitoring of landslide dynamics with LiDAR, SAR interferometry and photogrammetry. Case study of Kłodne landslide (Southern Poland)*, Proceedings of World Landslide Forum 3, Beijing, 2–6 June 2014.
- Wojciechowski T., Perski Z., Wójcik A., Nescieruk P., Borkowski A., 2013. *Monitoring of Landslide Dynamics with SAR Interferometry and LiDAR. Case Study of Kłodne Landslide (Southern Poland)*, Living Planet Symposium, Edinburgh, 9–13 September 2013.
- Wojciechowski T., Borkowski A., Perski Z., Wójcik A., 2012. *Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne)*. Przegląd Geologiczny, 60: 95-102.

dr Tomasz Wojciechowski  
dr Zbigniew Perski

## 6.4. Badania geologiczne i geomorfologiczne

### 6.4.1. Dane ALS wykorzystywane w badaniach

Numeryczne modele terenu mają szerokie zastosowanie w badaniach geologicznych i geomorfologicznych, a ich znaczenie rośnie wraz z rozwojem metod pozyskiwania danych i ich interpretacji. Zupełnie nową jakość w tych badaniach wprowadziły dane

pochodzące z lotniczego skanowania laserowego. Po pierwsze, bardzo wysoka rozdzielczość przestrzenna modeli generowanych na podstawie danych ALS umożliwiła uszczegółowienie stanu wiedzy o budowie geologicznej, zwłaszcza w pracach kartograficznych wykonywanych w dużej skali. Po drugie, możliwość odseparowania z chmury punktów ALS obiektów stanowiących pokrycie terenu (roślinność, zabudowa) sprawiła, że geolog może obserwować rzeczywistą rzeźbę terenu na znacznym obszarze, co do tej pory nie było możliwe. Zaletę tę, szczególnie docenia się w obszarach zalesionych, gdzie w pracach terenowych przy ograniczonej widoczności trudno jest wyróżnić wszystkie formy, zwłaszcza w odniesieniu do większego obszaru.

W geologicznych i geomorfologicznych analizach danych ALS zwraca się szczególną uwagę na zmienną szorstkość powierzchni oraz kształty form terenu. Istotne jest zwracanie uwagi na wzajemne współwystępowanie poszczególnych elementów, gdyż najczęściej ich wzajemna interakcja świadczy o danym zjawisku czy strukturze. Przykładowo, obniżenia terenu na stokach górskich o kształcie cylindrycznym mogą stanowić lej źródłowy dla płynącego poniżej potoku. Jeśli natomiast takie obniżenie znajduje się ponad zdeformowaną powierzchnią terenu, z pagórami, progami i obniżeniami bezodpływowymi, mamy wówczas do czynienia z osuwiskiem. W interpretacji geologicznej należy również uważać na formy pochodzenia antropogenicznego. Ich kształt może być mylony z naturalnymi zjawiskami przyrodniczymi (ryc. 6.12). Do analiz danych ALS należy zatem mieć tradycyjne kartograficzne podejście.



Ryc. 6.12. Forma terenu przypominająca osuwisko. Antropogeniczne zmiany rzeźby terenu pod kątem budowlanym. Wizualizacja danych opracowanych w ramach projektu ISOK

## 6.4.2. Metody opracowania danych ALS

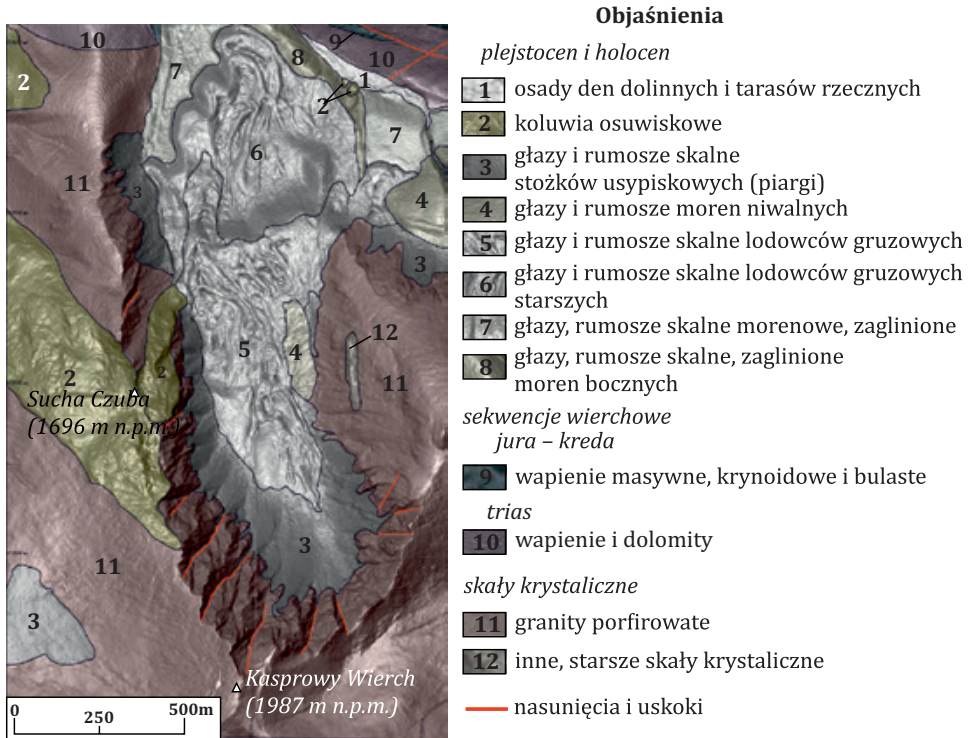
Aby wykryć lub podkreślić dany element geomorfologiczny, stosuje się wiele technik wizualizacyjnych i obliczeniowych. Nie ma tu norm i zasad, a obecny stan rozwoju oprogramowania i sprzętu komputerowego nie stwarza żadnych ograniczeń. Najpopularniejszymi metodami w geologicznych badaniach danych ALS są: zmienne podświetlanie NMT, przewyższanie, stosowanie różnego skalowania barw i projekcje trójwymiarowe. Coraz częściej wykorzystuje się analizy spadków, kształtów czy ekspozycji, a także bada ich wzajemne relacje pod kątem geologicznym. Dobór metod uzależniony jest głównie od deniwelacji terenu oraz wielkości stromizn. Szczególne znaczenie w analizach geologicznych ma zmienne podświetlenie NMT (ang. *hillshade*). Padające światło, które jest ściśle określone parametrami azymutu i kąta pionowego, wytwarza w obrazie NMT strefy zacienienia za poszczególnymi elementami rzeźby terenu, powodując ich podkreślenie. Każda zmiana ustawień oświetlenia sprawia, że widoczne mogą być nowe formy, w zależności od ich kształtu i orientacji. NMT poddany oświetleniu często nazywany jest reliefem cieniowanym lub cieniowanym modelem rzeźby terenu.

Dobrym przykładem znaczenia danych z lotniczego skanowania laserowego w ich geologicznej interpretacji, mogą być badania przeprowadzone w rejonie Kasprowego Wierchu w Tatrach (ryc. 6.13). Po odfiltrowaniu roślinności, numeryczny model terenu został poddany szczegółowej analizie, której wyniki miejscami różniły się od dotychczasowego stanu wiedzy. Wykorzystanie danych ALS umożliwiło m.in. wykrycie dużych osuwisk skalnych, zlokalizowanych na stokach Suchej Czuby (1696 m n.p.m.), które jak dotąd nie zostały przez nikogo rozpoznane. Uszczegółowione zostały zasięgi występowania poszczególnych typów osadów polodowcowych, a także możliwe okazało się wyznaczenie granic litologicznych skał starszego podłoża. Ponadto określono przebiegi głównych, zaznaczających się w morfologii terenu, nasunięć i uskóków. Wizualizacja rzeźby terenu rejonu wysokogórskiego po raz pierwszy wykazała tak duże zróżnicowanie form morfologicznych. Z wysoką szczegółowością można było wyznaczyć wszystkie elementy pozytywne (wypukłe – progi, stożki itp.) i negatywne (wklęsłe – kanały rozprowadzające, leje sufozyjne, doliny itp.).

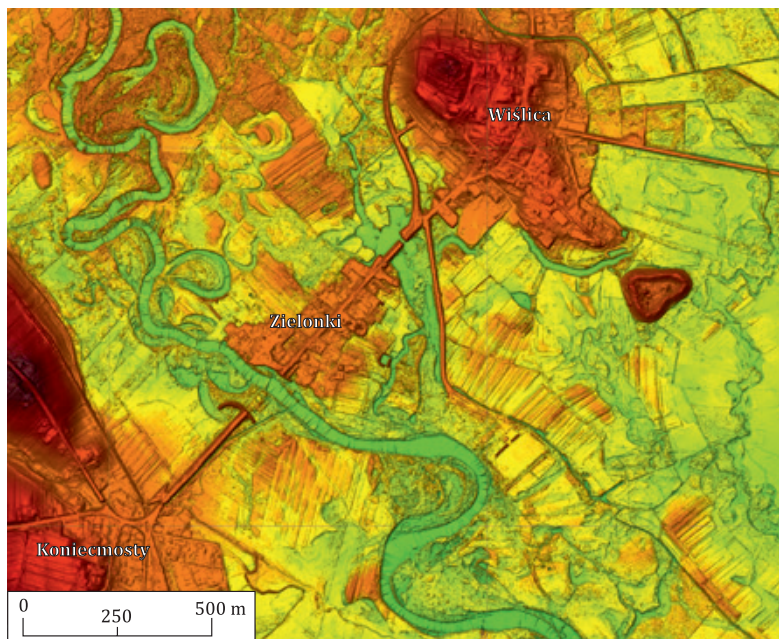
Dane LiDAR pozyskane z pułapu lotniczego wydają się idealne do interpretacji młodej i współcześnie kształtującej się budowy geologicznej (ryc. 6.14 i 6.15). Wysoka rozdzielczość pozioma i pionowa danych ALS umożliwia wizualizowanie nawet najmniejszej zmienności wysokościowej. Analizy osadów tworzących się w holocenie stają się coraz powszechniejsze i prawdopodobnie w najbliższej przyszłości będą szeroko wykorzystywane w kartografii geologicznej. W przypadku ruchów masowych lotnicze skanowanie laserowe jest już z powodzeniem stosowane w pracach kartograficznych i interwencyjnych (ryc. 6.15). Zdeformowana powierzchnia jeziorów osuwiskowych jest bardzo wiarygodnie odzwierciedlona na NMT, co jest dużą zaletą, zwłaszcza w obszarach leśnych. Możliwe okazuje się wyznaczenie zasięgu osuwisk, form wewnątrzosuwiskowych, a nawet określenie stopnia ich aktywności.



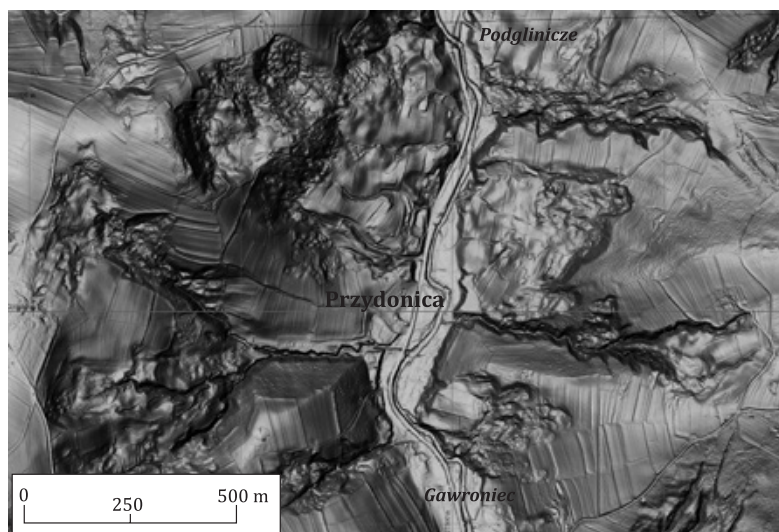
Z geologicznego punktu widzenia dane ALS mają również duże znaczenie w badaniach strukturalnych, gdyż bardzo często rzeźba powierzchni terenu jest pochodną uwarunkowań tektonicznych (ryc. 6.16). Oprócz wyznaczania stref uskokowych, możliwe jest określenie przebiegu osi fałdów oraz granic litologicznych.



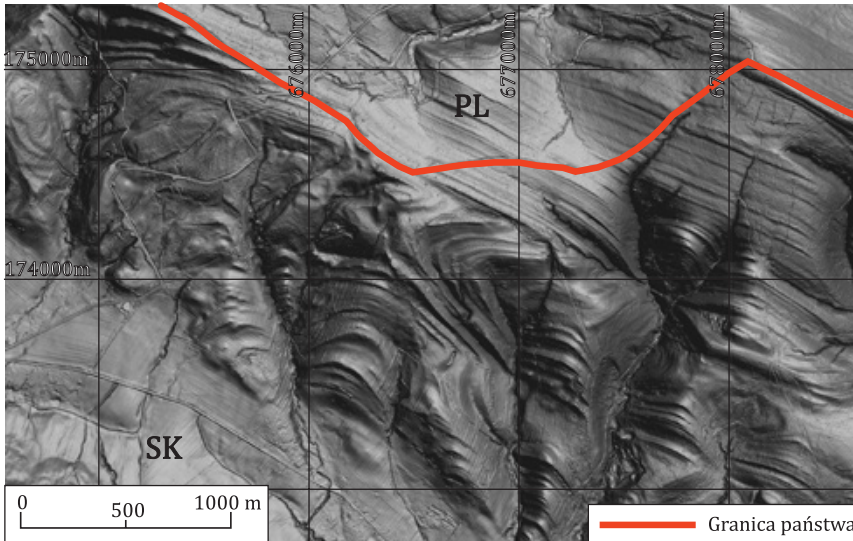
Ryc. 6.13. Geologiczna interpretacja numerycznego modelu terenu pochodzącego z lotniczego skanowania laserowego obejmująca rejon Doliny Suchej Kasprowej (Wójcik i in., 2013; Cymerman, 2014; Wojciechowski i in., 2014)



Ryc. 6.14. Wizualizacja danych ALS (ISOK) pod kątem interpretacji holocenijskich osadów o fluwialnej genezie w Dolinie Nidy. Wyraźnie widoczne jest współczesne, meandrujące koryto, starorzecza, tarasy rzeczne. Wysoczyzny wyznaczają zasięg wychodni gipsów mioceńskich



Ryc. 6.15. Obszar rejonu Przydonicy na Pogórzu Rożnowskim, charakteryzującego się wysoką podatnością osuwiskową. Wizualizacja danych ISOK



Ryc. 6.16. Struktury geologiczne w piaskowcach magurskich budujących obszar w strefie granicznej Polski ze Słowacją, w rejonie Przełęczy Beskid i Czeremchy. Wizualizacja danych ISOK

### 6.4.3. Podsumowanie

Badania geologiczne i geomorfologiczne stosują analizę rozmieszczenia i kształtu bardzo niewielkich form rzeźby terenu i stąd w dużym stopniu zależą od jakości filtracji chmury punktów ALS. Należy brać pod uwagę, że w wyniku błędów klasyfikacji, w skład punktów reprezentujących powierzchnię terenu mogą wchodzić inne elementy związane z pokryciem, np. roślinność. Skutkiem tego, analizowany NMT może przedstawiać fałszywą rzeźbę terenu. W wielu przypadkach tylko oko doświadczonego pracą w terenie badacza może wykryć takie nieprawidłowości. Pomocne w rozwiązywaniu tego typu problemów jest użycie zdjęć lotniczych lub innych materiałów prezentujących pokrycie terenu i formy jego użytkowania oraz samych danych ALS, wykorzystując klasyfikację chmury punktów.

### Literatura

- Borkowski A., Perski Z., Wojciechowski T., Jóźków G., Wójcik A., 2011. *Landslides mapping in Roznow Lake vicinity, Poland using airborne laser scanning data*. Acta Geodyn. Geomater., Vol. 8, No. 3 (163), 325–333.
- Cymerman Z., 2014. *Geologiczna i geomorfologiczna interpretacja danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS) rejonu Kasprowego Wierchu (Tatry) – uwagi polemiczne*. Przegląd Geologiczny, Vol. 62, nr 2, 80–82.

- Wojciechowski T., Wójcik A., Perski Z., 2014. *Geologiczna i geomorfologiczna interpretacja danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS) rejonu Kasprowego Wierchu (Tatry) – odpowiedź*. Przegląd Geologiczny, Vol. 62, nr 2, 83–85.
- Wojciechowski T., Borkowski A., Perski Z., Wojcik A., 2012. *Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne)*. Przegląd Geologiczny, 60, 95–102.
- Wójcik A., Wężyk P., Wojciechowski T., Perski Z., Maczuga S., 2013. *Geologiczna i geomorfologiczna interpretacja danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS) rejonu Kasprowego Wierchu (Tatry)*. Przegląd Geologiczny, Vol. 61, nr 4, 234–242.

mgr inż. Marcin Pierchalski  
dr hab. inż. Piotr Wężyk

## 6.5. Modelowanie erozji wodnej gleb z zastosowaniem NMT generowanego z chmury punktów ALS

### 6.5.1. Model (R)USLE

Erozja gleby definiowana jest jako oderwanie cząstek gleby oraz ich transport przez wiatr lub wodę, czyli jest to w zasadzie naturalny proces powodowany czynnikami fizycznymi. Energia potrzebna do oderwania cząstek gleby i ich transportu pochodzi z wiatru lub wody (zazwyczaj deszczu lub spływu powierzchniowego). Intensywność tych procesów zależy także od właściwości fizykochemicznych gleby, topografii terenu oraz pokrywy roślinnej. Te dwie ostatnie poddawane są częstym wpływom człowieka przez wprowadzenie mechanicznej uprawy gleby, a przede wszystkim zmianę klas pokrycia i użytkowania terenów leśnych na rolne.

Erozja wodna należy do jednej z głównych przyczyn zjawiska degradacji gleb obserwowanego w naszej części Europy. Dotyczy ono także terytorium Polski, występując szczególnie w miejscach silnie zróżnicowanych fizjograficznie na glebach podatnych na erozję. Jednym z najważniejszych czynników powodujących zagrożenie gleb rolniczych erozją jest sama rzeźba terenu, która przez swą charakterystykę morfometryczną, tj. wartość spadku (wyrażana w procentach lub stopniach) oraz długość zbocza ( $L$ ), wpływa bezpośrednio na szybkość (energię) spływu wody opadowej. Drugim czynnikiem są intensywne opady deszczu, szczególnie kiedy gleby pozbawione są osłony ze strony upraw (roślinności). Krople deszczu uderzające w odsonioną powierzchnię gleby mają wystarczająco dużo energii (czynnik  $R$  we wzorze poniżej), aby wyrzucić cząstki gleby lub małe agregaty w powietrze i rozproszyć je. Niszczy to strukturę agregatów, prowadząc do zagęszczenia gleby, zmieniając jej warunki powietrzno-wilgotnościowe. Zwarta pokrywa roślinna ( $C$ ) zmniejsza energię kinetyczną kropli deszczu (lub gradu), ale również ogranicza prędkość strumienia spływającej wody, blokując jej przepływ, a systemy korzeniowe utrzymują cząstki gleby. Odpowiedni sposób upra-

wy mechanicznej gleby (np. orka wzdłuż warstwic) należy do najczęściej stosowanych zabiegów ochronnych ( $P$ ).

Skala problemu dotycząca dużych obszarów rolniczych spowodowała, iż opracowanie modelu opisującego zagrożenie erozją wodną stało się kluczowe. Jednym z najważniejszych osiągnięć XX wieku w zakresie ochrony gleb i wód stało się opracowanie przez amerykańskich naukowców matematycznego modelu **USLE** (*Universal Soil Loss Equation*), który w wyniku modelowania (na podstawie warstw informacyjnych GIS) oblicza ilość gleby (tony) wymywanej w wyniku erozji wodnej na jednostkę powierzchni (ha) w ciągu roku. Zmodyfikowany model stosowany w wielu krajach Europy nosi nazwę (R)USLE, a jego zapis przedstawiono poniżej:

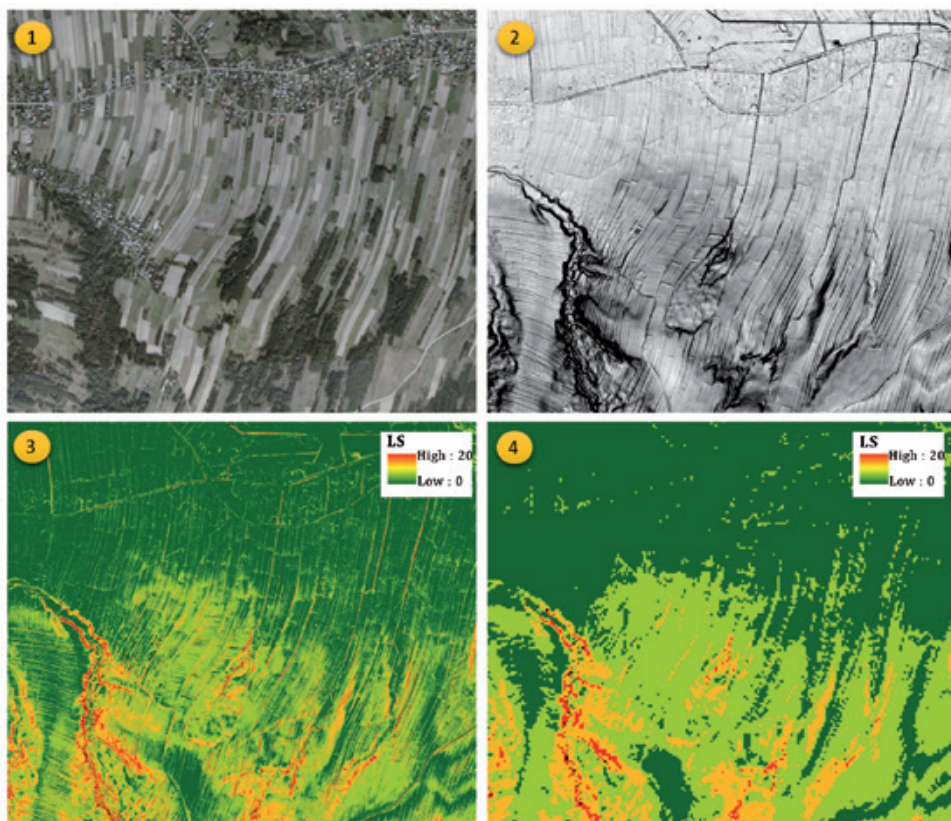
$$E_A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

gdzie:

- $E_A$  – masa gleby erodowanej z jednostki powierzchni w określonym czasie,
- $R$  – czynnik erozji powodowanej przez deszcz,
- $K$  – czynnik podatności gleby na erozję wodną,
- $LS$  – czynnik topograficzny, będący iloczynem długości i nachylenia stoku,
- $C, P$  – czynniki pokrycia i gospodarowania gruntami.

Jednym z parametrów biorących udział w modelu erozji (R)USLE jest współczynnik zdolności transportowania osadu  $LS$  (ang. *sediment transport capacity index*). Jest on iloczynem współczynników długości ( $L$ ) oraz nachylenia ( $S$ ) stoku. Jego wartości oznaczają stosunek straty gleby w określonych warunkach do modelowego stoku, którego nachylenie wynosi 9%, a długość równa jest 22,13 m.

Numeryczny model terenu, wygenerowany na podstawie chmury punktów ALS, charakteryzuje się bardzo wysoką dokładnością pionową oraz może uwzględniać lokalną zmienność powierzchni wynikającą z metody uprawy (orki, zabiegów agrotechnicznych), co pozwala na analizę z niespotykaną jak dotąd dokładnością. Ma to szczególne znaczenie dla analiz wykonywanych dla małych i niewielkich obszarowo zlewni, w których NMT o małej dokładności prowadzą do zbyt dużej generalizacji wyników analizy (R)USLE. W przypadku generowania współczynnika  $LS$ , rozdzielczość przestrzenna numerycznego modelu terenu ma również bardzo duży wpływ na jego rozkład przestrzenny. Przykładowo, porównanie współczynnika  $LS$  wyliczonego na podstawie NMT o rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 1,0 m oraz 10,0 m, wskazuje na różnice wyników dochodzące do 23%. Są one szczególnie istotne na obszarach rolniczych charakteryzujących się o dużymi spadkami (ryc. 6.17), dla których dokładne obliczenie wielkości erozji ma zasadnicze znaczenie przy proponowaniu zabiegów przeciwoerozyjnych.

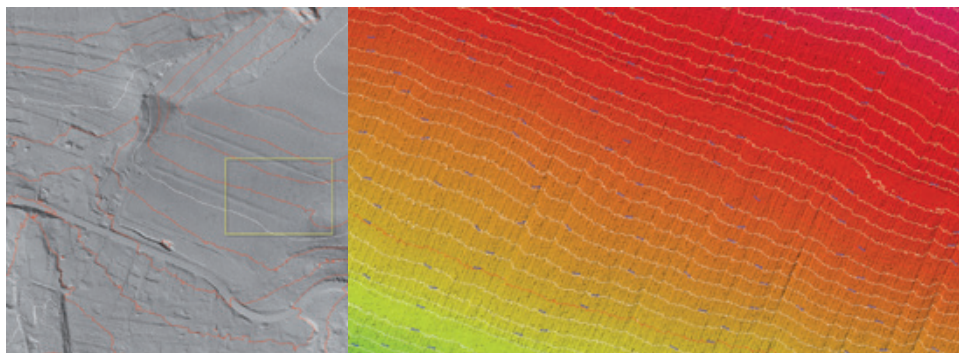


Ryc. 6.17. Analiza wpływu rozdzielczości przestrzennej numerycznego modelu terenu na wynikową warstwę współczynnika transportowania osadu ( $LS$ ). Od góry: 1 – ortofotomapa lotnicza; 2 – cieniowany numeryczny model terenu; 3 – mapa współczynnika  $LS$  wykonana w oparciu o NMT (oczko GRID = 1,0 m); 4 – mapa współczynnika  $LS$  (NMT; oczko GRID = 10,0 m)

## 6.5.2. Podsumowanie

Precyzyjne informacje płynące z referencyjnych modeli NMT są wykorzystywane w modelowaniu zagrożeń erozyjnych dla obszarów rolniczych. Oprócz tego wykorzystuje się informację o wysokości pokrywy roślinnej w procesie detekcji obszarów, na których zaprzestano działalności rolniczej (tereny podlegające wtórnej sukcesji leśnej). Jednocześnie odpowiednia manipulacja kierunkiem i kątem oświetlenia cieniowanego modelu NMT (ang. *hillshade*) lub też stosowanie filtrów krawędziowych stają się pomocne w pozyskaniu informacji dotyczących monitorowania zabiegów agrotechnicznych, tj. kierunku prowadzenia orki gleby (skiby) lub występowania miedz pomiędzy poszczególnymi uprawami (działkami) w terenach o silnym spad-

ku (ryc. 6.18). Na modelu NMT generowanym z danych ALS często obserwuje się ślady zabiegów agrotechnicznych (orki czy podziału działek rolnych) w obecnych obszarach leśnych powstałych na gruntach porolnych (zalesienia). Modele zagrożenia erozyjnego pozwalają na symulowanie strat ponoszonych przez rolników w wyniku działania procesu erozji, jak i monitorowania tych procesów na dużych obszarach dzięki wsparciu systemów GIS, baz danych (zawierających informacje o klaso-użytkach, granicach działek) jak również innych geodanych (np. wielospektralne zobrażenia satelitarne).



Ryc. 6.18. Przykład orki wzdłuż kierunku spadku stoku, która sprzyja erozji wodnej. Po lewej – cieniowany obraz NMT z fragmentem uprawy winorośli. Po prawej – wyraźne rzędy upraw i przygotowanie gleby oraz warstwicze (źródło: pzgik – dane opracowane w ramach projektu ISOK)

## Literatura

- Dehavari A., Heck J. R., 2013. *Effect of LiDAR derived DEM resolution on terrain attributes, stream characterization and watershed delineation*. International Journal of Agriculture and Crop Sciences. IJACS/2013/6-13/949-967.
- Desmet P. J., Govers G., 1996. *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 51 (5).
- Drzewiecki W., Wężyk P., Pierzchalski M., Szafrńska B., 2014. *Quantitative and Qualitative Assessment of Soil Erosion Risk in Małopolska (Poland), Supported by an Object-Based Analysis of High-Resolution Satellite Images*. Pure Appl. Geophys. 171, 867–89.
- Lafren M. J., Moldenhauer C. W., 2003. *Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story*. World Association of Soil and Water Conservation. Special Publication No. 1.
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C., 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, Vol. 703.
- Stone P. R., Hilborn D., 2000. *Universal Soil Loss Equation (USLE)*. Factsheet. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario.
- Urbański J., 2010. *GIS w badaniach przyrodniczych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.

- Wawer R., Nowocień E., Podolski B., 2005. *Real and Calculated K USLE Erodibility Factor for Selected Polish Soils*. Polish Journal of Environmental Studies Vol. 14, No 5, 655–658.
- Wężyk P., Drzewiecki W., Wójtowicz-Nowakowska A., Pierzchański M., Mlost J., Szafrąńska B., 2012. *Mapa zagrożenia erozyjnego gruntów rolnych w Małopolsce na podstawie klasyfikacji OBIA oraz analiz przestrzennych GIS*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 23, 403–420.

dr Joanna Dudzińska-Nowak

## 6.6. Analizy zmian brzegu morskiego

### 6.6.1. Charakterystyka obszaru badań

Brzeg morski stanowi obszar o bezcennych walorach krajobrazowych pod względem turystycznym, jest również atrakcyjny gospodarczo. W wyniku oddziaływania sił przyrody, brzeg morski podlega bardzo dynamicznym zmianom, których skutki mogą stanowić realne zagrożenie dla znajdującej się na jego zapleczu infrastruktury, a nawet życia przebywających w pobliżu osób. Z tego względu bardzo istotny jest systematyczny monitoring polegający na prowadzeniu obserwacji i pomiarów zmian zachodzących w jego obrębie, zarówno w części lądowej, jak i w podwodnej, które pozwolą na rozpoznanie zachodzących tam skomplikowanych procesów i zjawisk. Charakter i niedostępność wybrzeża, szczególnie wysokich klifów, u podnóża których rozpościera się wąska plaża, oraz płytkiego podbrzeża (do głębokości 4 m) stanowi poważne utrudnienie w zastosowaniu tradycyjnych technik geodezyjnych i pomiarów realizowanych ze specjalistycznych statków. W efekcie wymaga to stosowania odrębnych technik pomiarowych o różnej dokładności dla obszarów lądowych i morskich oraz przeprowadzania pomiarów w różnym czasie. Takie podejście pozwala na pozyskanie precyzyjnych danych, ale dla stosunkowo niewielkich obszarów lub też danych o większym zasięgu przestrzennym, ale o mniejszym stopniu szczegółowości. Ze względu na zróżnicowaną dokładność przestrzenną i czasową uzyskiwanych w ten sposób danych niemożliwe jest przeprowadzenie pełnej ich integracji, a co za tym idzie również kompleksowej analizy procesów zachodzących w strefie brzegowej.

### 6.6.2. Wykorzystywane technologie oraz metody badań

Nową jakość badań ilościowych strefy brzegowej zapoczątkował rozwój technologii lotniczego skanowania laserowego (tzw. skanerów batymetrycznych, operujących w zielonym zakresie widma elektromagnetycznego), a w szczególności skonstruowanie zintegrowanych urządzeń pozwalających na równoczesną, szybką i precyzyjną rejestrację rzeźby dna morskiego i przylegającej do niego powierzchni lądu,



których przykładem mogą być urządzenia: SHOALS (*Scanning Hydrographic Operational Airborne LiDAR Survey* – OPTECH) oraz HawkEye II (BLOM). Jednak na znaczne ograniczenie techniki skanowania batymetrycznego mają wpływ właściwości optyczne wody, a w szczególności zawartość cząstek (nieorganicznych, organicznych itp.) powodujących rozpraszanie światła. Wykonanie pomiaru w okresie największej przejrzystości wody i przy sprzyjających warunkach pogodowych uwzględniających siłę wiatru i falowania pozwala na rejestrację dna średnio do trzech głębokości tzw. krążka Secchi'ego, co w wodach oceanicznych umożliwia obrazowanie do głębokości nawet 70 m. W krajach, takich jak Stany Zjednoczone, Wielka Brytania czy Kanada, monitoring zmian podbrzeża wykonywany jest rutynowo właśnie z użyciem skanerów batymetrycznych. W przypadku południowego Bałtyku teoretycznie możliwy jest pomiar rzeźby dna morskiego do głębokości 20 m, jednak w okresie zakwitów fitoplanktonu lub bezpośrednio po sztormie, kiedy w wodzie zawieszona jest znaczna ilość cząstek nieorganicznych, rejestracja dna jest bardzo utrudniona, a czasem wręcz niemożliwa. Ze względu na duże ograniczenia wynikające z właściwości optycznych i hydrodynamiki wód Bałtyku oraz wysoki koszt pomiarów za pomocą skanerów batymetrycznych, do monitoringu brzegów w Polsce używane są tzw. skanery topograficzne, rejestrujące wyłącznie morfologię nadbrzeża, zaś podbrzeże monitorowane jest z jednostek pływających z wykorzystaniem echosondy lub sonaru.

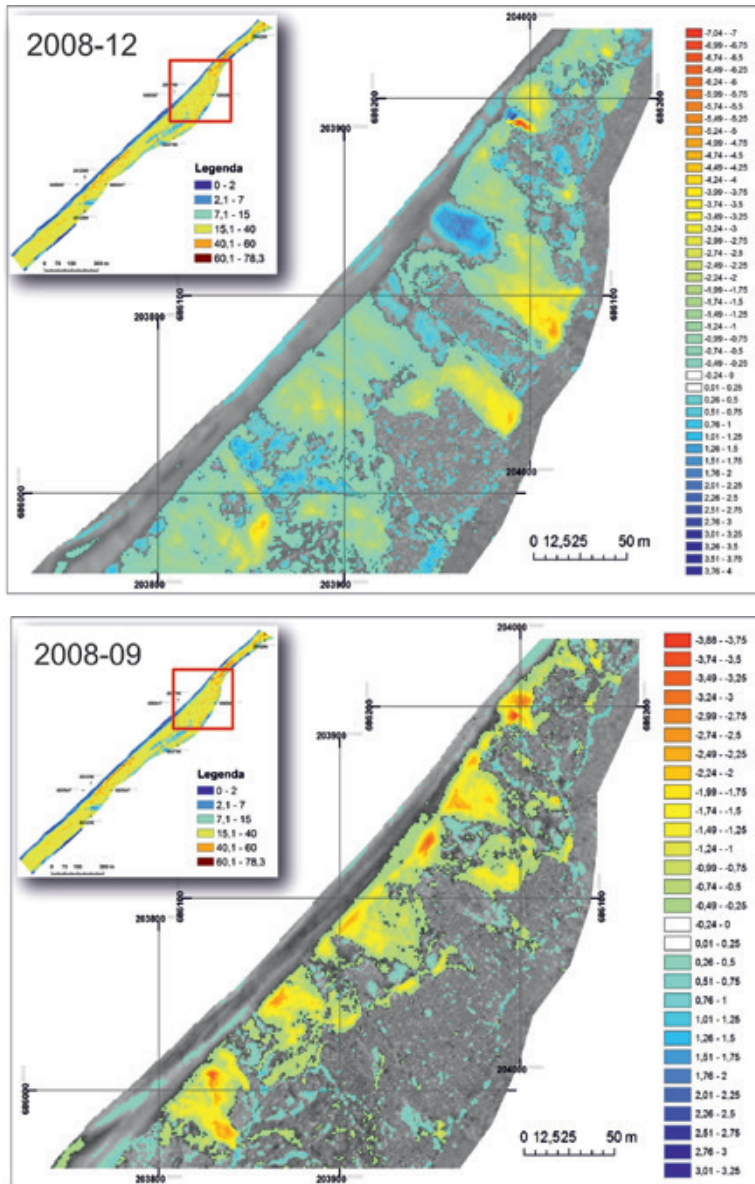
Przydatność technologii lotniczego skanowania laserowego (ALS) do badań różnych typów wybrzeży, w tym rejonów bezpośrednio niedostępnych, jak np. wybrzeża skaliste, do precyzyjnego określania miejsc osuwisk wybrzeży klifowych i przylądków oraz kartowania zmian rzeźby terenu powstałych w wyniku oddziaływania sztormów lub procesów sedymentacyjnych, została potwierdzona w wielu eksperymentach opisanych w literaturze przedstawionej na końcu rozdziału. Duża gęstość pomiaru uzyskiwana dzięki ALS, przekładająca się na wysoką rozdzielczość przestrzenną tworzonych numerycznych modeli terenu, pozwala na badanie zmian morfologii brzegu morskiego w wielu skalach, zarówno bardzo szczegółowych, jak w przypadku pojedynczych, drobnych form oraz bardziej ogólnych, obejmujących duże obszary. NMT reprezentujący rzeźbę plaży, wydmy lub klifu (a w przypadku skanerów batymetrycznych również podbrzeża) wykonany na podstawie chmury punktów ALS pozwala na precyzyjne określenie stanu strefy brzegowej w momencie rejestracji. Powtarzana cyklicznie rejestracja tego samego obszaru w kolejnych latach umożliwia zaś wykonanie analiz pokazujących zróżnicowanie wielkości, przestrzennego rozmieszczenia oraz czasowej zmienności zarówno liniowych, powierzchniowych, jak i objętościowych zmian zachodzących w strefie brzegowej. Pozwala to na dokładne monitorowanie stanu strefy brzegowej przez kartowanie m.in.: wydmy przedniej, wału brzegowego, zmian szerokości i wysokości plaży, przemieszczania ruchomych wydym, ilości akumulowanego i erodowanego materiału czy wielkości zniszczeń sztormowych oraz sukcesji roślinności porastającej wydmy czy zbocza klifu (na podstawie NMPT). W przypadku wykorzystania skanerów batymetrycznych możliwe jest określenie zmienności podbrzeża i wyznaczenie kierunków przemieszczania się rumowiska oraz głębokości zanku transportu materiału (ang. *closure depth*), co przekłada się na możliwość określenia bilansu osadów. Dłuższe serie czasowe danych ALS pozwalają na rozpoznanie ten-

dencji zmian brzegu i wyznaczenie miejsc relatywnie bezpiecznych, niezagrożonych erozją i podtopieniem, oraz miejsc szczególnie zagrożonych, co jest istotne w aspekcie bezpieczeństwa użytkowania brzegu.

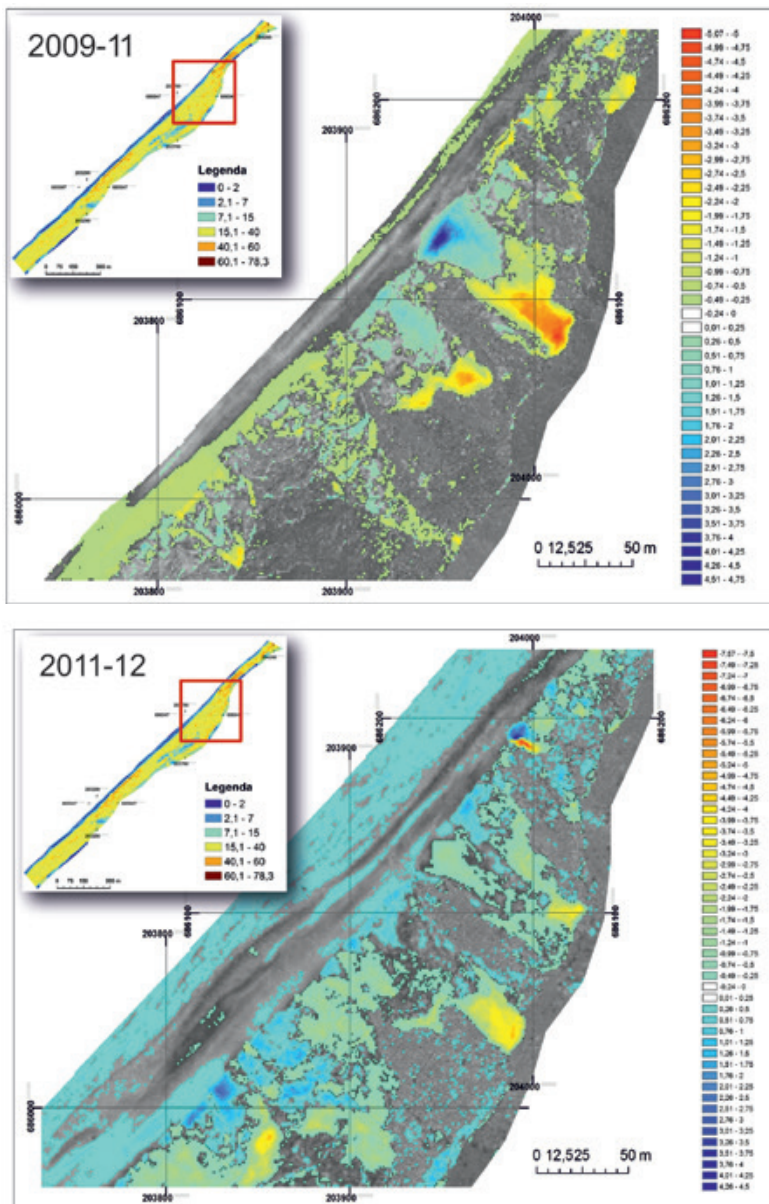
Badania nad zmiennością brzegu południowego Bałtyku z wykorzystaniem danych pochodzących z ALS prowadzone są w Zakładzie Teledetekcji i Kartografii Morskiej, Instytutu Nauk o Morzu Uniwersytetu Szczecińskiego w ramach współpracy z Inspektoratem Ochrony Wybrzeża Urzędu Morskiego w Szczecinie. Na podstawie danych pozyskiwanych przez Urząd Morski w ramach monitoringu przeprowadzane są analizy wielkości i czasowego oraz przestrzennego zróżnicowania wielkości erozyjnych i akumulacyjnych zmian brzegu. Analizy prowadzone są w środowisku GIS i polegają na porównaniu modeli NMT z różnych lat. Pozwala to na bardzo precyzyjne wyznaczenie miejsc, w których nastąpiły zmiany brzegu oraz na określenie ich objętości. Wyniki badań prezentowane są w postaci map przestrzennego rozmieszczenia zmian brzegu morskiego w poszczególnych okresach badań (ryc. 6.19). Analiza uwzględnia uwarunkowania geologiczne i geomorfologiczne oraz panujące w danym okresie warunki hydrometeorologiczne. Uzyskiwane wyniki potwierdzają przydatność danych ALS w badaniach brzegu morskiego. Szczególnie cenna jest możliwość włączenia do tych analiz danych ALS pozyskiwanych w ramach różnych, niezależnych projektów, które mogą być integrowane z istniejącymi zbiorami. Umożliwia to rozszerzenie badań o powtarzalne, jednorodne pomiary i zapewnia obiektywizm interpretacji, dzięki czemu stwarza nieporównanie większe możliwości zrozumienia uwarunkowań i przebiegu zjawisk decydujących o zmianach, jakie obserwujemy w strefie brzegowej, szczególnie w aspekcie wezbrań i powodzi sztormowych, które stanowią realne zagrożenie życia i mienia oraz mogą nieść ze sobą znaczne skutki ekonomiczne.

### 6.6.3. Podsumowanie

Wyniki badań prowadzonych z wykorzystaniem danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego są wykorzystywane przez administrację państwową odpowiedzialną za bezpieczeństwo brzegu w celu doboru odpowiednich metod ochrony brzegu przed erozją, przy bezpiecznym planowaniu inwestycji w pasie nadmorskim i tworzeniu planów zagospodarowania przestrzeni morskiej oraz przez lokalne władze samorządowe przy weryfikacji planów zagospodarowania przestrzennego miejscowości nadmorskich i podejmowaniu rozważnych decyzji w ramach zintegrowanego zarządzania strefą brzegową.



Ryc. 6.19. Czasowe zróżnicowanie i przestrzenne rozmieszczenie erozyjnych oraz akumulacyjnych zmian aktywnej powierzchni klifu i plaży fragmentu wybrzeża Wypły Wolin w obrębie Wolińskiego Parku Narodowego w rejonie Wzgórza Gosań w latach 2008–2012 oraz w latach: 2008–2009, 2009–2011 i 2011–2012 (źródło: Dudzińska-Nowak, Wężyk, 2014)



Ryc. 6.19. cd.

## Literatura

- Brock J. C., Wright W., Jackson J. A., Sallanger A. H., Krabil W., Swift R. N., 2002. *Basis and methods of NASA Airborne Topographic Mapper LiDAR surveys for coastal Studies*. Journal of Coastal Research, 18(1), 1–13.
- Dudzińska-Nowak J., 2007. *Przydatność skanowania laserowego do badań strefy brzegowej południowego Bałtyku (Suitability of laser scanning in the southern Baltic coastal zone research)*, Archiwum Fotogrametrii, Teledetekcji i GIS. Vol.17a, (red.) Kurczyński Z., Kraków, 179–185.
- Dudzińska-Nowak J., Wężyk P., 2006. *Możliwości wykorzystania technologii LiDAR w badaniach strefy brzegowej. ZZOP w Polsce – Stan obecny i perspektywy. Cz. 2, Brzeg Morski Zrównoważony*, (red.) Furmańczyk K., Print Group Daniel Krzanowski, 47–59.
- Dudzińska-Nowak J., Wężyk P., 2014. *Volumetric changes of a soft cliff coast 2008–2012 based on DTM from airborne laser scanning (Wolin Island, southern Baltic Sea)*. Journal of Coastal Research 04/2014, 70(SI), 59–64.
- Finkl C. W., Benedet L., Andrews J. L., 2005. *Interpretation of seabed geomorphology based on spatial analysis of high-density airborne laser bathymetry*. Journal of Coastal Research, 21(3), 501–514.
- Gibeaut J. C., Smyth R. C., Gutierrez R., Hepner T., Jackson J. A., Jackson K. G., 2003. *Surveys for coastal hazards and resource mapping*. Coastal Zone Workshop.
- Sallenger A. H. Jr., Krabil W. B., Swift R. N., Brock J., List J., Hansen M., Holman R. A., Manizade S., Sontag J., Meredith A., Morgan K., Ynkel J. K., Federick E. B., Stockdon H., 2003. *Evaluation of airborne topographic LiDAR for quantifying beach changes*. Journal of Coastal Research, 19(1), 125–133.
- Wozencraft J. M., Lillycrop W. J., 2003. *SHOALS Airborne Coastal Mapping: Past, Present, and Future*. Journal of Coastal Research, Special Issue, 38, 207–215.
- Young A. P., Ashford S. A., 2006. *Application of airborne LiDAR for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions*. Journal of Coastal Research, 22(2), 307–318.

mgr inż. Jarosław Kowalczyk

## 6.7. Opracowanie map akustycznych

### 6.7.1. Mapa akustyczna

Podstawą opracowania map akustycznych w prawodawstwie Unii Europejskiej jest Dyrektywa 2002/49/WE z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku (Dz.U. L 189 z 18.7.2002, str. 12 z późn. zm.). Ustalenia zawarte w dyrektywie zostały przeniesione do przepisów krajowych w postaci zapisów zawartych w ustawie Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 roku (Dz.U. z 2001 r. Nr 62 poz. 627 z późn. zm.). Przez mapę akustyczną rozumie się opracowanie służące całościowej ocenie narażenia ludzi na danym obszarze na hałas pochodzący z różnych źródeł (przemysł, komunikacja). Mapa składa się z części tekstowej oraz graficznej. Część graficzna składa się z szeregu map pokazujących zagrożenie hałasem w różnym ujęciu.

Skutkiem uchwalenia dyrektywy i przepisów krajowych z nią związanych jest obowiązek opracowania, w cyklach 5-letnich, map akustycznych oraz programów ochrony środowiska przed hałasem. Tworzeniem map objęte są tereny aglomeracji o:

- liczbie mieszkańców większej niż 100 tys.,
- dróg, na których natężenie ruchu przekracza 3 000 000 pojazdów w skali roku oraz
- linii kolejowych, gdzie liczba przejeżdżających składów przekracza 30 000 w skali roku.

Starosta Powiatowy może wymagać opracowania map akustycznych także dla innych obszarów, gdzie oddziaływanie akustyczne narusza standardy jakości środowiska. Udostępnione w Internecie mapy akustyczne prezentowane są zasadniczo w postaci tradycyjnych map płaskich (2D), jednak mapa opracowywana jest w przestrzeni trójwymiarowej (3D). Wszelkie dane niezbędne do przeprowadzenia obliczeń mapy akustycznej muszą mieć trzy wymiary bądź też atrybuty pozwalające wygenerować informację przestrzenną z atrybutów zapisanych w bazie danych 2D.

### 6.7.2. Dane przestrzenne niezbędne przy opracowaniu mapy akustycznej

Najistotniejszymi danymi niezbędnymi przy opracowaniu mapy akustycznej, poza samym źródłem hałasu, są te elementy przestrzeni, które wpływają w istotny sposób na propagację dźwięku w środowisku. W pierwszej kolejności należy wymienić budynki oraz inne istotniejsze obiekty budowlane (np. ekrany akustyczne, pełne ogrodzenia). Kolejnym elementem modelu obliczeniowego jest numeryczny model terenu, który pełni dwojaką funkcję. Stanowi poziom odniesienia dla lokalizacji pozostałych elementów modelu oraz modeluje propagację dźwięku w środowisku. Istotne znaczenie dla wyników obliczeń mają także: dane charakteryzujące obszary zwartej zieleni (np.: lasy, zadrzewienia, parki), obszary instalacji przemysłowych, których nie można traktować jako budynki (np. instalacje produkcyjne zakładów chemicznych składające się z reaktorów, elementów przesyłowych itp.) czy też sztuczne formy terenu (np. nasypy, wały ziemne ekrany akustyczne).

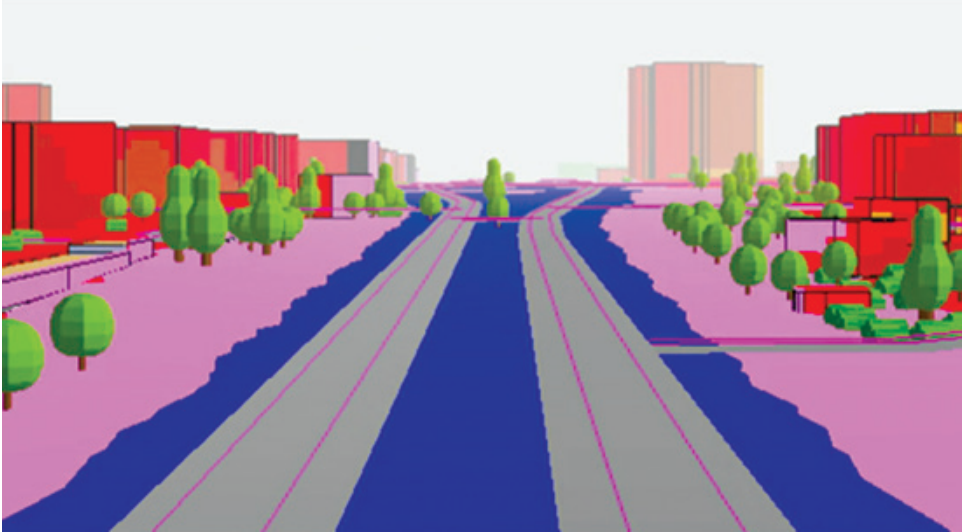
Obecnie stosowane modele propagacji dźwięku nie są jeszcze w stanie wprost bazować na chmurach punktów ALS (np. w formie LAS). Dopiero wygenerowane produkty pochodne, takie jak modele rastrowe: NMT, NMPT, modele 3D: zabudowy i obszarów zieleni wysokiej, opracowane na podstawie danych ALS, mogą być wykorzystane w procesie obliczeniowym.

Technika lotniczego skanowania laserowego oraz techniki ich przetwarzania stwarzają nowe możliwości w zakresie realizacji dokładniejszych i bardziej realistycznych map akustycznych. Bardziej szczegółowe dane, a co za tym idzie dokładniejsze modele obliczeniowe propagacji hałasu pozwalają zwiększyć dokładność opracowywanych statystyk zagrożenia hałasem, a następnie podjąć działania naprawcze.

### 6.7.3. Wizualizacja treści map akustycznych

Opracowanie mapy akustycznej, poza koniecznością opracowania modelu obliczeniowego i przeprowadzenia obliczeń, wiąże się także z wizualizacją uzyskanych wyników. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 1 października 2007 r. w spra-

wie szczegółowego zakresu danych ujętych na mapach akustycznych oraz ich układu i sposobu prezentacji (Dz.U. z 2007 r. Nr 187 poz. 1340) poziom hałasu powinien być prezentowany m.in. w postaci wizualizacji 3D, gdzie ponownie otwiera się możliwość wykorzystania danych przestrzennych tworzonych na bazie danych z lotniczego skanowania laserowego. W szczególności dotyczy to modelu zabudowy 3D oraz numerycznego modelu terenu. W celu zwiększenia atrakcyjności prezentacji przy opracowaniu wizualizacji można wykorzystać także informację o terenach zielonych lub pojedynczych drzewach (ryc. 6.20).



Ryc. 6.20. Przykładowa wizualizacja 3D propagacji hałasu (kadr animacji) w interwałach 10 dB opracowanej w ramach mapy akustycznej miasta Białystok (■ >70, ■ 60–70, ■ 50–60 dB)

#### 6.7.4. Potencjalne możliwości wykorzystania danych ALS w opracowaniu map akustycznych

Metody obliczeniowe wykorzystywane przy opracowaniu map akustycznych stwarzają konieczność posługiwania się ściśle określonym zakresem tematycznym danych oraz ich strukturą. Nie można na przykład wykorzystać informacji o tym, czy zieleń zbudowana jest z gatunków liściastych czy iglastych, ponieważ metody obliczeniowe nie pozwalają określić wpływu rodzaju zieleni na rozprzestrzenianie się dźwięku. W niektórych przypadkach zaleca się wręcz pomijanie terenów zielonych w obliczeniach. Wyjątek stanowią takie obszary leśne, gdzie wykształciły się wszystkie piętra roślinności istotnie ograniczające tłumienie hałasu. Niewątpliwie możliwość oceny „gęstości” roślinności z wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego jest jednym z kierunków rozwoju metod prognozowania rozprzestrzeniania się hałasu.

Mapy akustyczne przedstawiają zagrożenie hałasem na podstawie wskaźników średniorocznych. Z tego względu istotne dane pozyskiwane do opracowania map dotyczą czasów występowania zjawisk akustycznych (np. pracy zakładów przemysłowych czy wręcz poszczególnych urządzeń na ich terenach). Analogicznie do czasu funkcjonowania źródeł hałasu można także uwzględnić zmienność w czasie występowania czynników wpływających na propagację fali akustycznej. Przykładem jest okresowe występowanie hałd węgla w otoczeniu elektrowni. Niewątpliwie informacja o takich uwarunkowaniach może pochodzić z lotniczego skanowania laserowego. Możliwa jest nawet identyfikacja stopnia zapełnienia parkingów wielkopowierzchniowych. Wymagałoby to jednak pozyskania wielu serii pomiarowych w celu uśrednienia w skali roku stopnia zapełnienia parkingu. Z punktu widzenia roli parkingów w kształtowaniu klimatu akustycznego miasta, tak szczegółowe podejście wydaje się być dzisiaj jeszcze nieistotne.

Warto wspomnieć o pracach mających na celu opracowanie metod, które pozwoliłyby na szersze wykorzystanie danych ALS. W szczególności należy tutaj zwrócić uwagę na te elementy środowiska, które wpływają na propagację dźwięku, a które nie są możliwe do uwzględnienia ze względu na brak informacji o nich w tradycyjnych materiałach mapowych (np. mapach zasadniczych czy topograficznych). Można tutaj wymienić pozyskanie informacji (np. dodatkowo technologią MLS) o rodzaju ogrodzeń posesji, które w mniejszym lub większym stopniu „przepuszczają” falę dźwiękową.

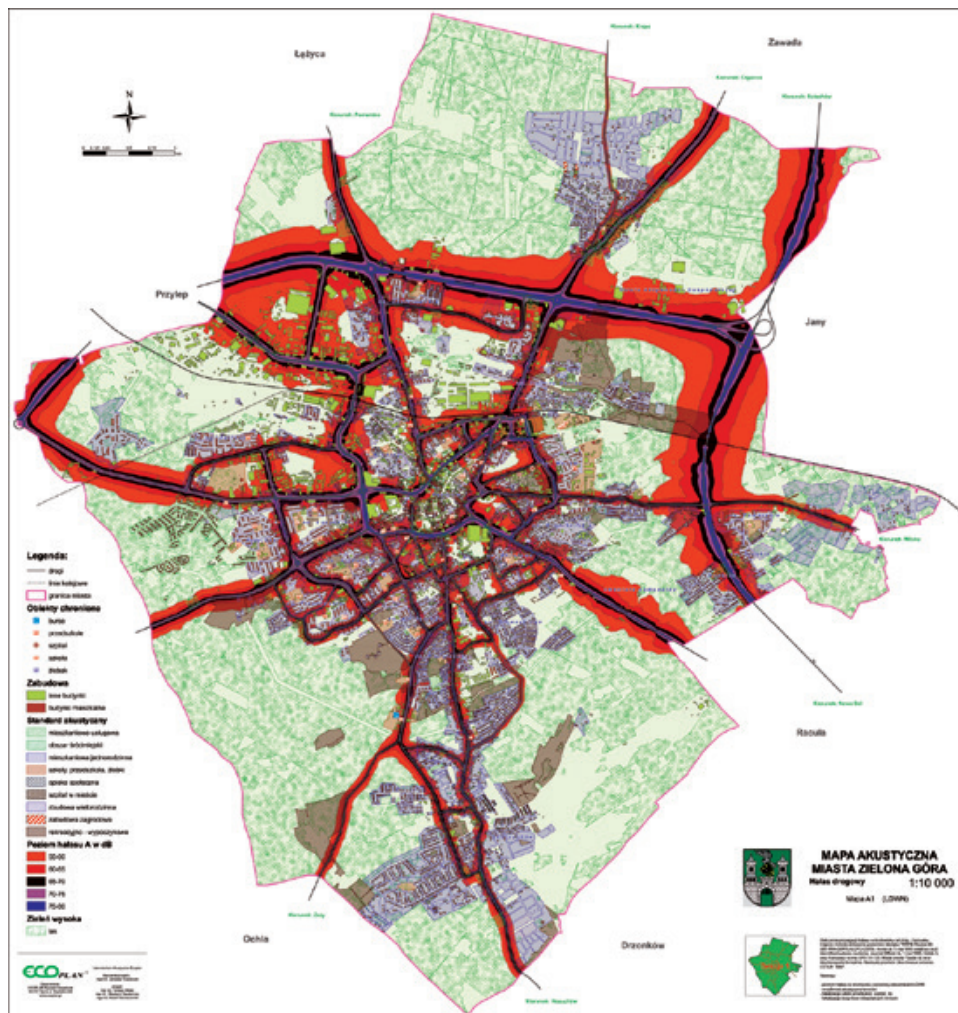
Przykładowa mapa immisyjna hałasu drogowego znajduje się poniżej na rycinie 6.21.

Obecnie prowadzone są prace (w tym finansowane przez Unię Europejską), nad stworzeniem modeli symulacyjnych hałasu, które z jednej strony pozwalają ujednoczyć sposób opracowania map w krajach unijnych, a z drugiej dają szansę na wykorzystanie bardziej szczegółowych danych. Przykładem takiego zastosowania jest uszczegółowienie modeli zabudowy, które obecnie traktowane jako płaskie (LOD 1; CityGML) niewątpliwie obniżają jakość prowadzonych analiz.

### 6.7.5. Podsumowanie

Opracowanie map akustycznych wymaga dostępu do wielu danych przestrzennych, które w sposób precyzyjny charakteryzują najistotniejsze elementy środowiska, w jakich następuje rozprzestrzenianie się fali dźwiękowej. Źródłem takich danych jest niewątpliwie wykorzystywana już obecnie technika lotniczego skanowania laserowego. Stosowane obecnie, silnie uproszczone metodyki obliczeniowe propagacji dźwięku nie pozwalają na wykorzystanie szczegółowych danych przestrzennych, nie mniej jednak nad metodami obliczeniowymi propagacji dźwięku prowadzone są nieustanne prace, których celem jest poprawa ich jakości. Nowe metodyki obliczeniowe pozwolą w bliskiej przyszłości, w jeszcze większym stopniu niż ma to miejsce obecnie, wykorzystać dane o dużym poziomie szczegółowości, w tym dane pozyskane w technologii ALS.



Ryc. 6.21. Mapa immisyjna hałasu drogowego ( $L_{DWN}$ ) dla miasta Zielona Góra

## Literatura

- Biswas S., Lohani B., 2008. *Development of high resolution 3d sound propagation model using LiDAR data and air photo*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science.
- Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku (Dz.U. L 189 z 18.7.2002, str. 12 z późn. zm.).
- European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise, 2011. *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure*.

Jeong C. Seong i in., 2011. *Modeling of road traffic noise and estimated human exposure in Fulton County*. Environment International, Georgia, USA.

PN ISO 9613-2 Akustyka – Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metoda obliczenia.

Praca zespołowa, 2011. *Wytyczne opracowania map akustycznych*. Główny Inspektor Ochrony Środowiska, Warszawa.

Praca zespołowa, 2012. *SoundPlan User Manual*. Braunstein + Berndt GmbH / SoundPLAN International LLC.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2007 r. w sprawie szczegółowego zakresu danych ujętych na mapach akustycznych oraz ich układu i sposobu prezentacji (Dz.U. z 2007 r. Nr 187 poz. 1340).

Ustawa Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 roku (Dz.U. z 2001 r. Nr 62 poz. 627 z późn. zm.).

mgr Łukasz Banaszek

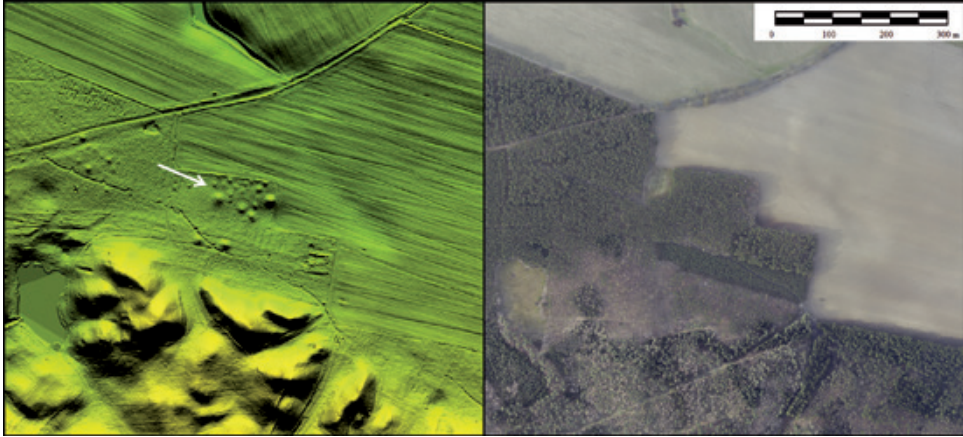
dr hab. Włodzimierz Rączkowski, prof. UAM

## 6.8. Potencjał danych ALS w badaniach archeologicznych

### 6.8.1. Początki wykorzystania danych ALS w archeologii

Prawdopodobnie pierwszą próbą wykorzystania danych ALS w studiach nad przeszłością były badania w rejonie Newton Kyme (UK) przedstawione przez N. Holdena w Lesznie (NATO Advanced Workshop: *Aerial Archaeology – Developing Future Practice*) w 2000 roku. Od tego momentu obserwuje się wzrost zainteresowania możliwościami zastosowania technologii ALS w archeologii, ale zasadniczym punktem zwrotnym stało się wykorzystanie tej metody w pozyskiwaniu informacji o antropogenicznych formach terenowych na obszarach zalesionych (ryc. 6.22). Przykłady badań niemieckich i brytyjskich ugruntowały pozycję lotniczego skanowania laserowego w prospekcji archeologicznej. W ciągu ostatnich kilkunastu lat metoda ta znalazła zastosowanie w licznych projektach na całym świecie (również w lasach tropikalnych). Z kolei jej pierwsza aplikacja w Polsce wiązała się z projektem konserwatorskim i dotyczyła badań prowadzonych w lasach w okolicy Piły w 2008 roku (J. Nowakowski). W dzisiejszej praktyce archeologów wykorzystuje się zarówno numeryczne modele wysokościowe (NMT i NMPT), jak i zobrazowania intensywności odbicia danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego.

Dotychczasowe wykorzystanie lotniczego skanowania laserowego w archeologii pokazało szerokie spektrum zastosowań: prospekcyjne, dokumentacyjne, badawcze, konserwatorskie oraz popularyzacyjne. Ta różnorodność, zwłaszcza wobec ograniczeń poznawczych innych metod, rozbudziła spore oczekiwania wobec danych ALS. Udostępnienie chmur punktów oraz numerycznych modeli wysokościowych w ramach projektu ISOK stało się znaczącym impulsem do szerszej aplikacji metod nieinwazyjnych w polskiej archeologii. W powszechnym zainteresowaniu produktami pochodnymi skanowania archeolodzy często nie dostrzegają istniejących ograniczeń.



Ryc. 6.22. Zestawienie analizy cieniowania NMT i ortofotomapy dla cmentarzyska kurhanowego. Jego „granice” zostały sztucznie stworzone – podążają za dzisiejszymi podziałami działek geodezyjnych. Jedynie kurhany położone w lesie zachowały własną formę terenu

### 6.8.2. Pozyskiwanie danych i klasyfikacji chmury punktów ALS dla celów archeologicznych

Rozpoznanie obiektów archeologicznych w oparciu o dane ALS wymaga spełnienia trzech kluczowych warunków. Po pierwsze, element dziedzictwa musi zostać zarejestrowany w pozyskanych danych. Po drugie, nie może zostać „usunięty” z wytworzonego zbioru danych w czasie opracowywania produktów lotniczego skanowania laserowego (np. wskutek klasyfikacji chmury punktów). Po trzecie, musi zostać zidentyfikowany podczas procesu interpretacji.

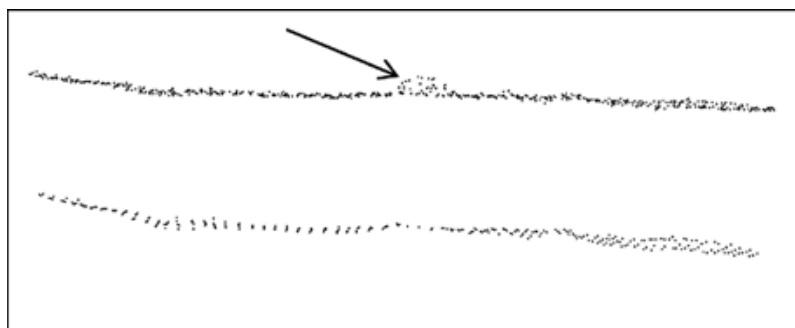
Na potencjał poznawczy metody w archeologii wpływ mają głównie parametry skanowania (np. ustalenie zakładanej gęstości pomiaru), a także możliwości penetracji pokrycia terenu przez wiązki lasera. W dyskusji nad wykorzystaniem ALS w studiach nad przeszłością postuluje się czasem wykonywanie nalotów pod kątem specyficznych, archeologicznych potrzeb, przy sprawowaniu kontroli nad podstawowymi parametrami pomiaru. Opcja ta generuje relatywnie wysokie koszty pozyskania danych.

Możliwe jest także wykorzystanie rezultatów lotniczego skanowania laserowego, które nie jest dedykowane archeologii, czyli przykładowo danych opracowanych w ramach projektu ISOK. Choć w tym wypadku archeolodzy nie mają już wpływu na sposób pozyskiwania danych, to wciąż możliwa jest odpowiednia manipulacja chmurą punktów ALS w celu „wydobycia” informacji archeologicznej. Wymaga to poznania natury danych, zapoznania się z ich subiektywnym charakterem oraz z metodami ich przetwarzania.

Przemysłane podejście do badań pozwala zauważyć, że brak (widocznych w danych) elementów dziedzictwa w wybranym miejscu nie oznacza, iż obiektów tego typu w analizowanej przestrzeni nie ma. Nieujawnianie się ich w posiadanym zasobie może bowiem wynikać z przyjętej procedury skanowania, która uniemożliwiła ich rejestrację.

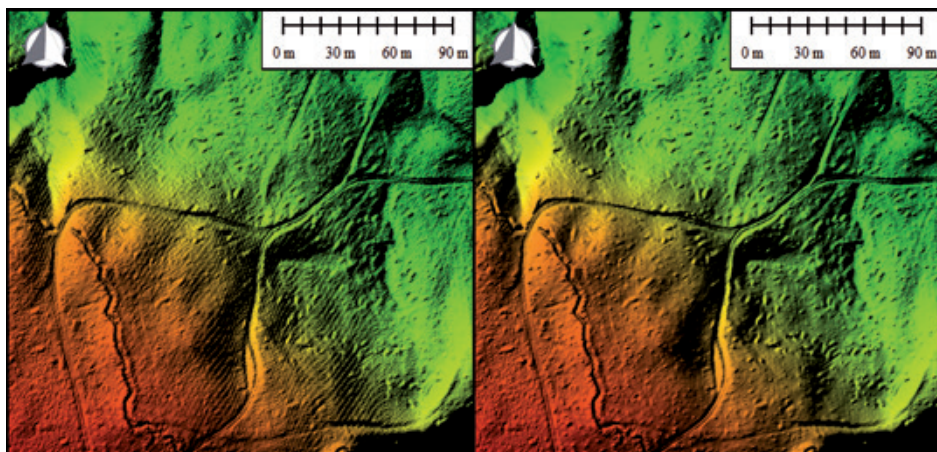
Jedną z podstawowych analiz chmur punktów ALS jest obliczenie rzeczywistej gęstości pomiaru, wykonane po etapie klasyfikacji. Pozwala to uzyskać informacje na temat obszaru badań oraz o faktycznych możliwościach interpretacyjnych. Wyniki tej analizy umożliwiają wyznaczenie obszarów, w których liczba impulsów odbitych od gruntu (a więc klasy kluczowej w studiach nad przeszłością) jest niewystarczająca dla identyfikacji relatywnie niewielkich obiektów archeologicznych.

Klasyfikacja chmury punktów jest istotnym etapem pracy z danymi ALS. Podczas tego procesu może dojść do „wymazania”, czyli niesklasyfikowania subtelnych różnic w terenie, jakimi często charakteryzują się elementy dziedzictwa archeologicznego, jako punktów odbitych od gruntu. Na ryc. 6.23 zaprezentowano wykorzystanie dwóch różnych metod opracowania tej samej chmury punktów. W jednej z nich nastąpiło wyłączenie impulsów odbitych od kurhanu z klasy grunt i jednocześnie włączenie ich do klasy niska roślinność. W konsekwencji wykorzystanie jednej z metod klasyfikacji doprowadziło do nieuwzględnienia tego obiektu jako części składowej wygenerowanego następnie NMT. Tym samym może dojść do przeniesienia interesującej archeologa informacji do klas niestanowiących głównego przedmiotu zainteresowania. Wpływ na to ma m.in. brak zainteresowania takimi formami krajobrazowymi, np. dla celów kartograficznych, jak i ograniczona wiedza klasyfikującego na temat specyfiki obiektów archeologicznych. Na wirtualne „oczyszczenie gruntu” z elementów dziedzictwa najbardziej narażone są obszary zalesione, a więc te tereny, dla których zastosowanie technologii ALS przynosi obecnie najbardziej spektakularne rezultaty. Jest to istotny problem, gdy w swych studiach archeolodzy nie mają do czynienia z chmurami punktów, lecz z gotowymi modelami numerycznymi, powstałymi w nienadzorowany przez nich sposób. Niemożliwe pozostaje wówczas cofnięcie tego typu błędów, gdyż dostępne jest to jedynie z poziomu pracy z chmurą punktów ALS. Aby w pełni wykorzystać potencjał produktów ALS konieczne jest zatem poznanie natury danych oraz znajomość metod ich przetwarzania. Generowanie oraz klasyfikacja chmury punktów wiąże się z licznymi procesami utraty informacji. Dzięki archeologicznemu nadzorowi nad tymi etapami możliwe jest uzyskanie lepszych wyników interpretacji produktów pochodnych skanowania laserowego i istotne ograniczenie tej redukcji dla potrzeb badań nad przeszłością.



Ryc. 6.23. Porównanie wyników klasyfikacji tej samej chmury punktów (widoczne wyłącznie punkty włączone do klasy punktów leżących na gruncie) przeprowadzonej z wykorzystaniem dwóch różnych metod

Wynikowe chmury punktów ALS są rezultatem różnorodnych procesów wstępnego przetwarzania, które mają istotny wpływ na możliwość identyfikacji pozostałości z przeszłości w produktach ALS. Błędy lub niedoskonałości towarzyszące np. wyrównaniu szeregów skanowania mogą spowodować pojawienie się na modelach numerycznych „obiektów”, które będą mogły zostać zinterpretowane jako potencjalnie archeologiczne. Na ryc. 6.24 zaprezentowano liczne linie pozornie wskazujące na obecność pozostałości po uprawie typu terasowego na stokach (NMT z lewej). Znikają one z powierzchni rzeźby terenu wraz ze zmianą algorytmu przetwarzania danych (NMT z prawej). Przykład ten ilustruje, jak dobór algorytmu może doprowadzić do wykreowania nieistniejących obiektów archeologicznych i w konsekwencji wpływać na konstruowanie wiedzy o przeszłości.



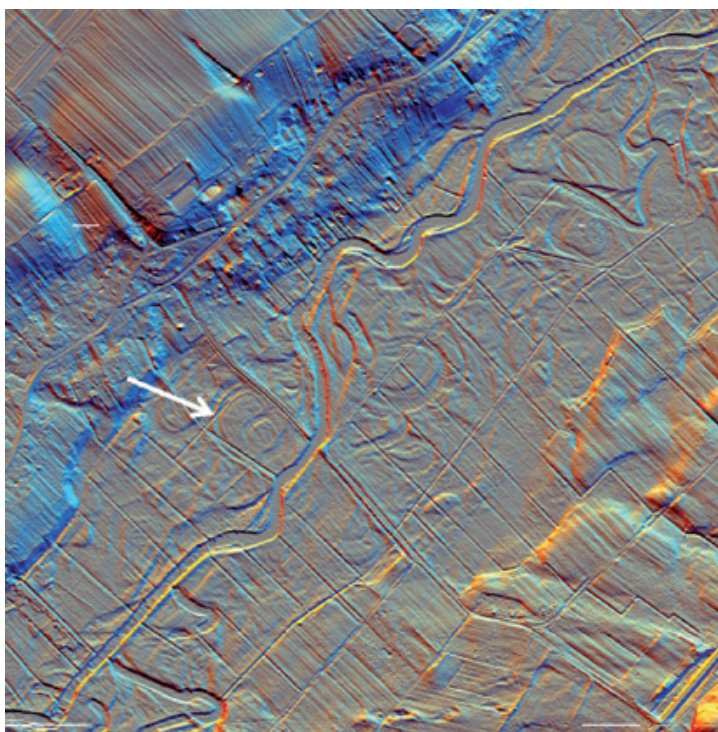
Ryc. 6.24. Obiekty powstałe wskutek „niewłaściwej” obróbki danych. Widoczne na lewym zobrazowaniu potencjalne ślady po uprawie typu terasowego znikają wraz ze zmianą metody filtracji (z prawej)

### 6.8.3. Wizualizacja danych ALS i ich interpretacja

Obiekty archeologiczne zarejestrowane w poprawnie opracowanych danych podlegają procesowi interpretacji. Dopiero gdy te elementy „zapisane” w produktach ALS zostaną rozpoznane, może dojść do włączenia ich w tworzony zasób informacji. Efekty procesu „czytania” zależą od rozmaitych czynników – np. jakości danych czy wykorzystanych sposobów obróbki i wizualizacji. Duży wpływ ma także doświadczenie z zakresu analizowania produktów i obrazów lotniczych. Problem ten doskonale obrazuje przykład wczesnośredniowiecznego grodziska w Sławsku, gmina Sławno (ryc. 6.25). Pomimo, iż jego forma terenowa została zarejestrowana, to z powodu słabego stanu zachowania (niewielkich deniwelacji) oraz kształtu zbliżonego do form naturalnych, trudno odróżnić stanowisko od starych koryt Wieprzy. Opieranie się wyłącznie na danych ALS, nawet dla doświadczonego bada-

cza, mogłoby okazać się zgubne i doprowadzić do niewłączenia grodziska do tworzonej w wyniku interpretacji bazy danych. Choć pojawiają się przykłady zautomatyzowania pewnych etapów procedury przetwarzania danych ALS, a nawet półautomatycznej ekstrakcji obiektów archeologicznych (rozwijanych w celu zwiększenia efektywności pracy z bardzo dużymi zasobami danych), to wciąż nadzór nad tymi procesami jest niezbędny.

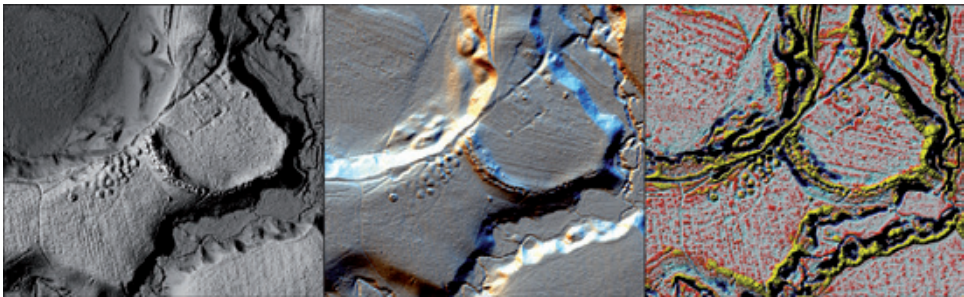
Potrzeba identyfikacji obiektów archeologicznych w oparciu o produkty ALS doprowadziła do stworzenia metod wizualizacji danych przestrzennych dedykowanych specjalnie studiom nad przeszłością. Podstawowym sposobem przedstawienia modeli wysokościowych jest analiza cieniowania. Jednak interpretacja obiektów liniowych (np. umocnień, dróg lub granic pól) o wielokierunkowych przebiegach oraz ich kartowanie przy konieczności nieustannej zmiany oświetlenia jest uciążliwe i może być przyczyną błędów (wynikających z przesunięć cienia interpretowanych obiektów). Ponadto urozmaicona rzeźba terenu może utrudnić rozpoznanie małych form krajobrazowych, gdy nie ma możliwości usunięcia cienia z danego obszaru.



Ryc. 6.25. Analiza cieniowania NMT z 16 kierunków okolic grodziska w Sławsku (gmina Sławno)

Pośród wykorzystywanych w archeologii metod wizualizacji modeli wysokościowych należy zwrócić uwagę przede wszystkim na algorytm *Sky-view Factor* przeliczający zakres hemisfery dostępnej z danego miejsca na analizowanym modelu czy *Principal*

*Component Analysis (PCA)*. PCA pozwala stworzyć barwny obraz trzech najważniejszych komponentów analizy cieniowania przeprowadzonej na 16 kierunkach oświetlenia NMT lub NMPT. Niezwykle przydatna jest również analiza lokalnych deniwelacji terenu (ang. *Local Relief Model* – LRM) zaproponowana przez R. Hesse (2010). Badacze zajmujący się porównywaniem różnych sposobów wizualizacji są zgodni, iż nie ma jednego, idealnego rozwiązania. Na ryc. 6.26 widać różnice pomiędzy różnymi metodami wizualizacji NMT okolic grodziska w Starym Krakowie (gmina Sławno). Podczas gdy kurhany i umocnienia grodu najlepiej widoczne są na środkowym zobrazowaniu, to liczne równoległe linie związane z systemami uprawy najwyraźniej oddają rezultaty LRM. Na wynikach pojedynczej analizy cieniowania dane te nie prezentują się czytelnie i wymagają co najmniej kilku zmian azymutu oświetlenia, aby rozpoznać wszystkie elementy dziedzictwa na tym terenie. Rozmaitość form elementów dziedzictwa osadzonych w zróżnicowanym kontekście geomorfologicznym powoduje, iż zachodzi konieczność wykorzystywania wielu metod. Choć archeolodzy mają swoje „ulubione” sposoby wizualizacji, to wspólnie podkreślają, iż nie można się ograniczać do jednego narzędzia. Efektywność pojedynczej metody zależy bowiem od jakości danych i warunków środowiskowych, w jakich znajdują się elementy dziedzictwa. Ponadto istotna jest wiedza o działaniu poszczególnych algorytmów oraz ich dostępności, co wiąże się z posiadanym oprogramowaniem – komercyjnym lub tzw. *open source*.



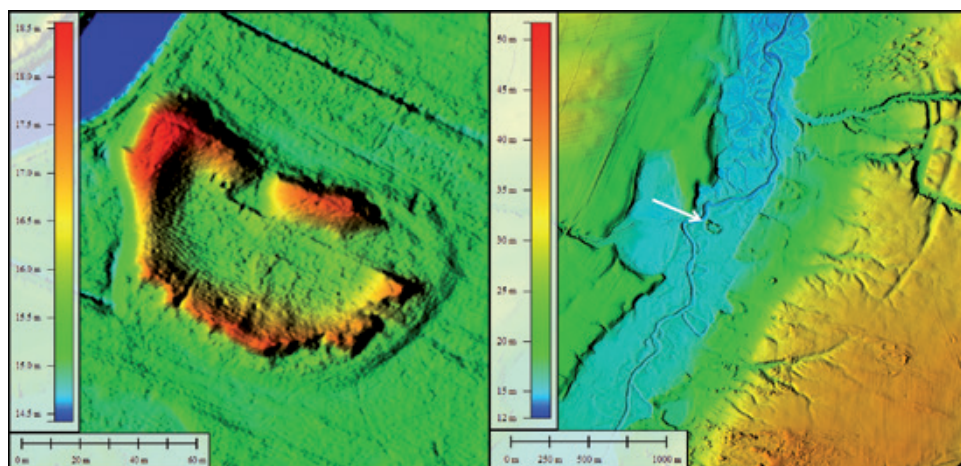
Ryc. 6.26. Porównanie zobrazowań zwykłej analizy cieniowania (z lewej), cieniowania z 16 kierunków (w środku) oraz *Local Relief Model* (z prawej) NMT dla okolic grodziska w Starym Krakowie (gmina Sławno)

#### 6.8.4. Zakresy wykorzystania danych ALS w archeologii

Odkrycie jest potocznie traktowane jako najważniejszy aspekt praktyki badawczej w archeologii. Za pomocą danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego można rozpoznawać stanowiska, które w minimalnym stopniu czytelne są w rzeźbie terenu. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że technologia ALS pozwala na identyfikację: grodzisk, kurhanów, grobowców megalitycznych, sieci historycznych dróg i pól, umocnień, systemów uprawy, pozostałości po działalności górniczej i wydobywczej oraz wielu innych aspektów przeszłego osadnictwa, niemalże ze wszystkich epok. Niezwykłą zaletą danych i produktów ALS jest możliwość prowadzenia rozpoznania na obsza-

rach zalesionych, które są trudno dostępne dla prospekcji naziemnej i dla rekonesansu lotniczego, a identyfikacja niewielkich form terenowych często jest wręcz niemożliwa. Ogromną wartością jest zatem pozyskiwanie informacji o nowych stanowiskach, krajobrazach, w rejonach dotąd słabo spenetrowanych, a także identyfikowanie nowych typów pozostałości osadniczych, które dotąd nie były rejestrowane. Zaletą wykorzystania danych ALS jest możliwość płynnej zmiany skali. Z tego powodu możliwe jest np. zarówno szczegółowe rozpoznanie kształtu, stanu zachowania i najbliższej okolicy obiektów archeologicznych, jak i analizowanie ich w szerszym kontekście krajobrazowym – w odniesieniu do morfologii terenu oraz innych form antropogenicznych (ryc. 6.27). Technologia ALS w istotny sposób wzbogaca wiedzę o materialnych (krajobrazowych) pozostałościach z przeszłości.

Dane ALS pozwalają również na identyfikację obiektów całkowicie zniwelowanych, nieczytelnych w rzeźbie (najczęściej na polach uprawnych). Sytuacja taka może zaistnieć, gdy lotnicze skanowanie laserowe przeprowadzone zostanie w okresie zaawansowanego rozwoju roślinności. Wówczas chmura punktów przedstawia informacje o wysokości i gęstości roślin uprawnych (wyróżniki roślinne w ujęciu archeologii lotniczej). Różnice w charakterystyce roślinności mogą być pośrednim wskaźnikiem obecności obiektów archeologicznych pod powierzchnią ziemi (zjawisko wykorzystywane w archeologii lotniczej). Pewien potencjał pozwalający na pośrednie identyfikowanie obecności pod ziemią obiektów archeologicznych niesie ze sobą analiza intensywności odbicia impulsów laserowych. Problem ten wymaga jednak jeszcze dalszych badań i wnikliwych analiz.



Ryc. 6.27. Grodzisko we Wrześnicy (gmina Sławno) widoczne na NMT w dużej skali (z lewej), jak i w szerokim kontekście krajobrazowym (z prawej)

Odkryte stanowisko archeologiczne wymaga udokumentowania. Oprócz informacji o lokalizacji, archeologów interesuje także stan zachowania, wielkość czy układ przestrzenny. Te wszystkie wymogi dokumentacyjne pozyskuje się przez analizę róż-



nych modeli numerycznych. Z zasady forma i wielkość obiektu nie pozwalają na określenie chronologii, choć często wykorzystuje się metodę wnioskowania przez analogię dla wskazania na wiek obiektu. Oznacza to przyjęcie założenia, że „podobne równa się współczesne”.

Interpretacja rozmaitych modeli numerycznych pozwala na szczegółowy opis obiektu i to często jest głównym celem archeologów. Ponadto otwierają się możliwości przeprowadzania analiz przestrzennych, statystycznych i porównawczych z wykorzystaniem GIS, które często stosowane są w studiach nad przeszłością. Analiza relacji pomiędzy obiektem archeologicznym a jego otoczeniem często pozwala na określenie relacji chronologicznych z innymi wytworami działań ludzkich lub formami naturalnymi. Analizy przestrzenne dają możliwość identyfikacji i wyjaśnienia procesów w przeszłości.

Kontekst (kulturowy i środowiskowy) występowania jest pomocny w interpretacji zjawisk i procesów z przeszłości. W archeologii, w zależności o respektowanych opcji teoretycznych, prowadzi się studia nad osadnictwem (głównie analizy dystrybucji) lub krajobrazem (powiązanie elementów kulturowych i naturalnych z procesami postrzegania i włączania w dyskurs kulturowy).

Ochrona i zarządzanie dziedzictwem archeologicznym jest jednym z najważniejszych problemów współczesnej polityki kulturalnej. Precyzyjne informacje o zasobach dziedzictwa (odkrywanych i dokumentowanych również za pomocą ALS) oraz ocena ich wartości (na podstawie analiz i interpretacji naukowych) pozwalają na podejmowanie działań administracyjnych, w tym: prowadzenie ewidencji, wpis do rejestru, wyznaczanie stref ochronnych, ocenę zagrożeń wynikających z rozwoju gospodarczego czy zjawisk przyrodniczych.

Zwizualizowane dane ALS (m.in. w formie animacji) mogą odegrać bardzo ważną rolę w upowszechnianiu wiedzy o archeologii i promocji dziedzictwa archeologicznego. Tym samym jest to nowe, bardzo perswazyjne narzędzie w komunikacji pomiędzy światem nauki i społeczeństwem. Ogólna dostępność danych ALS jest z pewnością elementem sprzyjającym takiemu wykorzystaniu danych oraz uaktywniania lokalnych społeczności. Przykładem takiego kierunku społecznego wykorzystania NMT jest projekt „Laserowi odkrywcy” ([www.laserwiodkrywcy.pl](http://www.laserwiodkrywcy.pl)).

### 6.8.5. Podsumowanie

Nie ma wątpliwości, że zarówno sama technologia lotniczego skanowania laserowego, jak i produkty ALS mają ogromny potencjał dla archeologów. Praca z danymi pokazuje jednak dużą subiektywność interpretacji rezultatów skanowania, a także konieczność archeologicznej kontroli nad etapami pozyskania i przetwarzania danych. Dopóki jednak archeolodzy nie zaczną eksplorować natury oraz skomplikowanych procesów pracy z danymi ALS, dopóty olbrzymi potencjał poznawczy metody, a także łatwo dostępnych produktów LiDAR będzie wykorzystany jedynie w niewielkim zakresie. Archeolog nie powinien zakładać, że firmy komercyjne zaoferują mu efekty porównywalne do tych, jakie można uzyskać dzięki świadomemu, autorskiemu, krytycznemu przetwarzaniu danych oraz indywidualnemu traktowaniu produktów skanowania. Niezbędne jest stosowanie opracowanych specjalnie dla celów archeologicznych na-

rzędzi analitycznych: metod wizualizacji danych oraz algorytmów przetwarzających chmurę punktów i modele.

Wspomniane aspekty procedury rejestracji, obróbki i interpretacji danych świadczą o wysokiej subiektywności danych ALS. Zwyczajowo są jednak traktowane jako „obiektywny” obraz faktycznej rzeźby terenu, końcowy produkt analiz. Tymczasem nie są one niczym więcej niż jednym z wielu możliwych przedstawień danych przestrzennych, podlegającym regułom generalizacji i reprezentacji oraz ograniczeniom metodycznym.

## Literatura

- Challis K., Forlin P., Kinsey M., 2011. *A Generic Toolkit for the Visualization of Archaeological Features on Airborne LiDAR Elevation Data*. *Archaeological Prospection*, 18 (4), 279–289.
- Challis K., Howard A. J., 2013. *The role of LiDAR intensity data in interpreting environmental and cultural archaeological landscapes*. [in:] R. S. Opitz, D. C. Cowley (red.), *Interpreting Archaeological Topography. 3D Data, Visualisation and Observation*. Oxford, Oakville, Oxbow Books, 161–171.
- Doneus M., Briese C., 2011. *Airborne Laser Scanning in forested areas – potential and limitations of an archaeological prospection technique*. [in:] Cowley D. C. (red.), *Remote sensing for archaeological heritage management*. Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavik, Iceland, 25–27 March 2010, Bruksela: European Archaeologia Concilium, Association Internationale sans But Lucratif, Siége Social, 59–76.
- Hesse R., 2010. *LiDAR-derived Local Relief Models – a new tool for archaeological prospection*. *Archaeological Prospection*, 17 (2), 67–72.
- Holden N., Horne P., Bewley R. H., 2002. *High-resolution digital airborne mapping and archaeology*. [in:] R. H. Bewley, W. Rączkowski (red.), *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*. Amsterdam, IOS Press, 173–180.
- Kokalj Ž., Zakšek K., Oštir K., 2013. *Visualizations of LiDAR derived relief models*. [in:] R. S. Opitz, D. C. Cowley (red.), *Interpreting Archaeological Topography. 3D Data, Visualisation and Observation*. Oxford, Oakville, Oxbow Books, 100–114.
- Nowakowski J., 2010. *Airborne Laser Scanning (ALS) w polskiej archeologii. Próby, doświadczenia, wyniki*. XIX Konferencja Sprawozdawcza. Badania archeologiczne na Nizinie Wielkopolsko-Kujawskiej w latach 2008–2009, Poznań, 26–27.04.2010.
- Opitz R. S., Cowley D. C. (red.), 2013. *Interpreting Archaeological Topography. 3D Data, Visualisation and Observation*. Oxford, Oakville, Oxbow Books.
- Palmer R., Cowley D. C., 2010. *Interpreting Aerial Images – developing best practices*. [in:] M. Forte, S. Campana, C. Liuzza (red.), *Space, Time, Place: Third International Conference on Remote Sensing in Archaeology, 17<sup>th</sup>–21st August 2009, Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India*. Oxford, Archaeopress, 129–135.

## Strony internetowe

[www.laserowiodkrywcy.pl](http://www.laserowiodkrywcy.pl)

## 6.9. Identyfikacja przeszkód dla ruchu lotniczego

### 6.9.1. Informacja o podstawie prawnej

Ustawa Prawo lotnicze z dnia 3 lipca 2002 roku (Dz.U. z 2002 r. Nr 130 poz. 1112 z późn. zm.) w art. 87.2, stanowi, iż przeszkody lotnicze to *obiekty budowlane i obiekty naturalne stanowiące zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu statków powietrznych (...)*. Prawidłowe zidentyfikowanie przeszkód lotniczych jest bardzo ważne ze względu na bezpieczeństwo lotów statków powietrznych. Pozwala ono na likwidację obiektów stanowiących zagrożenie bądź też na ich odpowiednie oznakowanie świetlne lub kolorystyczno-graficzne w terenie (rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2003 roku w sprawie zgłaszania oraz oznakowania przeszkód lotniczych – Dz.U. z 2003 r. Nr 130 poz. 1193 z późn. zm.). Ujawnienie obiektów stanowiących zagrożenie na specjalnych mapach oraz wykazach ma wpływ na wprowadzenie procedur, które poprawią bezpieczeństwo.

We wspomnianym wcześniej rozporządzeniu w sprawie zgłaszania oraz oznakowania przeszkód lotniczych znajduje się ich precyzyjny opis (§ 2):

1. Zgłoszeniu do Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego, zwanego dalej „Prezesem”, i do właściwego organu nadzoru nad lotnictwem wojskowym i oznakowaniu podlegają przeszkody lotnicze, a w szczególności:
  - 1) stałe lub tymczasowe obiekty budowlane oraz obiekty naturalne lub ich części, o wysokościach przekraczających powierzchnie ograniczające, określone w przepisach w sprawie warunków, jakie powinny spełniać obiekty budowlane oraz naturalne w otoczeniu lotniska,
  - 2) obiekty budowlane o wysokości 100 m i więcej powyżej poziomu otaczającego terenu lub wody, zlokalizowane na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej, w tym na polskich wodach terytorialnych Morza Bałtyckiego,
  - 3) obiekty budowlane oraz obiekty naturalne lub ich części trudno dostrzegalne z powietrza na tle otoczenia z powodu ich barwy, położenia lub konstrukcji oraz inne naziemne obiekty budowlane oraz obiekty naturalne lub ich części, zlokalizowane w strefach do lotu do lotniska i odlotu, szczególnie w terenie pagórkowatym i górskim, uznane przez Prezesa lub przez właściwy organ nadzoru nad lotnictwem wojskowym za przeszkody lotnicze.
2. Zgłoszeniu do właściwego organu nadzoru nad lotnictwem wojskowym, z zastrzeżeniem ust. 1, podlegają wszystkie stałe lub tymczasowe obiekty budowlane o wysokości 50 m i więcej.

Urząd Lotnictwa Cywilnego (ULC w Warszawie) prowadzi Rejestr Lotnisk oraz Rejestr Łądowisk. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 roku w sprawie klasyfikacji lotnisk i rejestru lotnisk (Dz.U. z 2013 r. poz. 810) wskazuje, że informacje dotyczące przeszkód lotniczych winny się znaleźć w Rejestrze Lotnisk. Podobnie w rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 1 lipca 2013 roku w sprawie ewidencji łądowisk znajduje się informacja, aby we wniosku o wpis łądowiska do ewidencji łądowisk (Dz.U. z 2013 r. poz. 795) znalazły się informacje dotyczące przeszkód lotniczych.

## 6.9.2. Identyfikacja przeszkód ruchu lotniczego w oparciu o dane ALS

Celem zarządzającego lotniskiem bądź lądowiskiem jest identyfikacja oraz odpowiednie wyznaczenie parametrów obiektów, które stanowią przeszkody lotnicze. Zazwyczaj w tym celu, zarządzający lotniskiem wynajmują wyspecjalizowane firmy geodezyjne z odpowiednio przeszkolonym personelem. Dotychczasowa technologia opierała się głównie na tradycyjnych pomiarach tachymetrycznych. Geodeci na podstawie posiadanych materiałów (mapy, wykazy, plany) szacowali, które obiekty mogą stanowić potencjalnie przeszkody. Były one mierzone bezpośrednio (ryc. 6.28), a następnie były poddawane analizom.



Ryc. 6.28. Poszukiwacze przeszkód lotniczych w terenie (źródło: G. Majewski – FotoAmigo)

Obecnie coraz częściej, oprócz tradycyjnych metod pomiarowych, wykorzystuje się dane pochodzące z obserwacji stereoskopowej zdjęć lotniczych oraz analizy przestrzenne na danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego.

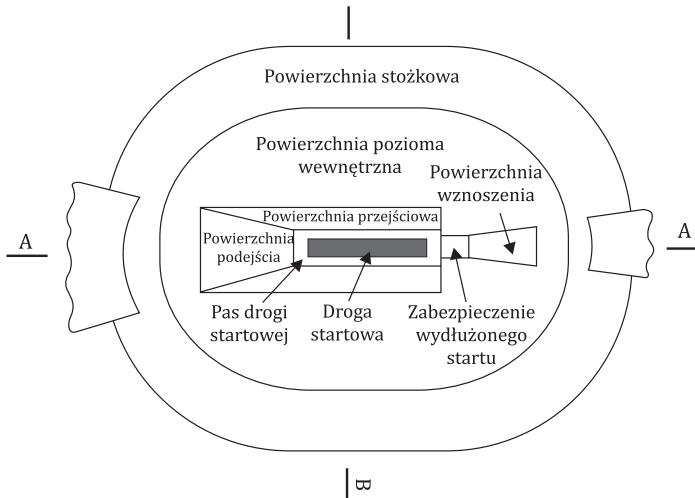
Obiekty, które mogą stanowić przeszkody lotnicze, można podzielić na trzy grupy:

- 1) obiekty przekraczające powierzchnie ograniczające,
- 2) obiekty o wysokości 50 m powyżej powierzchni terenu lub wody,
- 3) obiekty trudno dostrzegalne uznane przez Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego lub właściwy organ nadzoru nad lotnictwem wojskowym za przeszkodę.

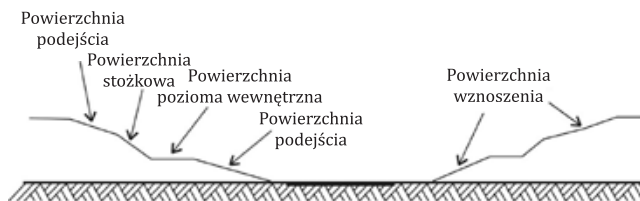
Aby zidentyfikować obiekty z pierwszej grupy, należy w pierwszej kolejności wygenerować powierzchnie ograniczające. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2003 roku w sprawie warunków, jakie powinny spełniać obiekty budowlane oraz naturalne w otoczeniu lotniska (Dz.U. z 2003 r. Nr 130 poz. 1192 z późn. zm.), jednoznacznie definiuje te powierzchnie w zależności od: rodzaju drogi startowej, cyfry kodu referencyjnego oraz rodzaju i kategorii podejścia.

Poniżej zamieszczono schemat (ryc. 6.29) wybranych powierzchni ograniczających dla lotniska cywilnego dla samolotów z drogą startową o sztucznej nawierzchni. Można na nim rozróżnić następujące powierzchnie:

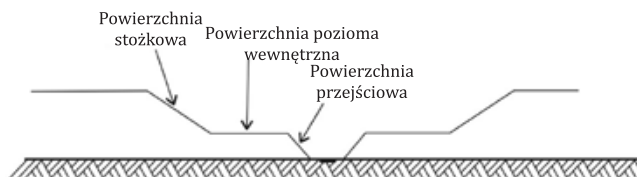
- powierzchnię podejścia,
- powierzchnię wznoszenia,
- powierzchnię przejściową,
- powierzchnię poziomą wewnętrzną,
- powierzchnię stożkową.



PRZEKRÓJ A-A

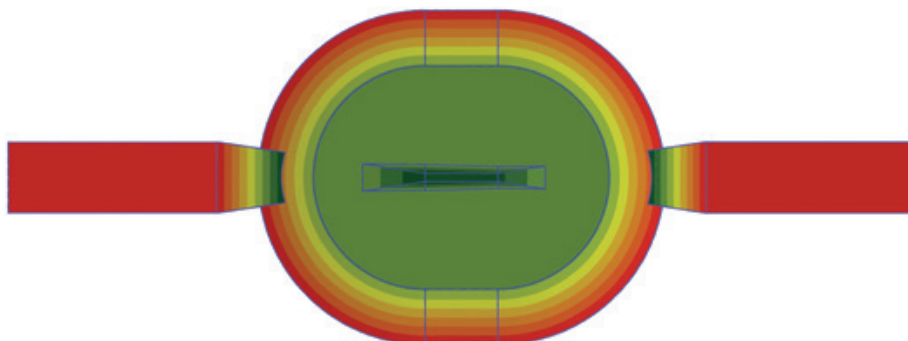


PRZEKRÓJ B-B



Ryc. 6.29. Schemat powierzchni ograniczających dla lotnisk lotnictwa cywilnego dla samolotów z drogą startową o nawierzchni sztucznej (źródło: Dz.U. z 2003 r. Nr 130 poz. 1192 z późn. zm.)

Wymodelowanie odpowiedniej, trójwymiarowej powierzchni wymaga znajomości podstawowych parametrów lotniska bądź lądowiska. Na ich podstawie zostaje wygenerowana stosowna powierzchnia ograniczająca (ryc. 6.30).



Ryc. 6.30. Powierzchnie ograniczające dla lotniska lotnictwa cywilnego dla samolotów z drogą startową o nawierzchni sztucznej wraz z warstwicami wysokości (kolor zielony – teren położony najniżej, czerwony – najwyżej)

Kolejnym etapem jest pozyskanie danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego. Posiadając model powierzchni ograniczających oraz numeryczny model pokrycia terenu (NMPT), można wykonać model różnicowy. Wskazuje on miejsca, w których powierzchnie ograniczające są przekroczone, a także rejony gdzie elementy pokrycia terenu (czasami nawet sam teren) niebezpiecznie się do nich zbliżają.

Aby zidentyfikować obiekty należące do drugiej grupy przeszkód, wystarczy odjąć od NMPT numeryczny model terenu (NMT) w otoczeniu lotniska. Wynikowy model różnicowy wskazuje obiekty, których wysokość nad poziom terenu jest większa lub równa 50 metrom.

Aby zidentyfikować obiekty z trzeciej grupy, należy pozyskać odpowiednie dane od Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego lub właściwego organu nadzoru nad lotnictwem wojskowym. Jednocześnie Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2003 roku w sprawie warunków, jakie powinny spełniać obiekty budowlane oraz naturalne w otoczeniu lotniska stwierdza w § 4, że: *Obiekty trudno dostrzegalne z powietrza, w tym napowietrzne linie, maszty, anteny, usytuowane w zasięgu powierzchni podejścia, o których mowa w § 11 pkt 2, § 20 pkt 2 i § 34 pkt 1, powinny być niższe o co najmniej 10 m od dopuszczalnej wysokości zabudowy wyznaczonej przez powierzchnie ograniczające.* Należy zatem przeprowadzić podobną analizę, jak dla obiektów pierwszej grupy, z tym że powierzchnię podejścia trzeba obniżyć o minimum 10 metrom.

Za każdym razem, po przeprowadzonych procesach wstępnych analiz, otrzymuje się produkt wymagający dalszego przetwarzania. W tym celu należy dokonać:

1. Sprawdzenia stanu aktualności danych – NMT oraz NMPT zostały wykonane w przeszłości. Należy sprawdzić, czy wskazane obiekty nadal istnieją w terenie,

czy nie zmieniły swojej wysokości, czy nie pojawiły się nowe (np. budynki lub wykonane nadbudowy istniejących, drzewa mogą zostać wycięte lub z biegiem czasu mogą urosnąć).

2. Wykonanie pomiarów uzupełniających – NMT oraz NMPT zostały wygenerowane z chmury punktów ALS. Szczególnie w przypadku obiektów smukłych (takich jak: anteny, maszty itp.) istnieje niewielkie prawdopodobieństwo, że plamka lasera trafiła w najwyższy element konstrukcyjny, rejestrując odbicie. Istnieje konieczność weryfikacji wysokościowej poszczególnych obiektów oraz konieczność stwierdzenia, czy któryś z obiektów nie został pominięty.
3. Identyfikacja obiektów – w dokumentacji oprócz podania wysokości przeszkód oraz wartości przekroczenia ponad powierzchnię ograniczającą istnieje obowiązek zidentyfikowania rodzaju obiektu oraz określenia jego dokładnego położenia. Dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego nie zawsze to umożliwiają. Konieczny jest wtedy bezpośredni pomiar lub wywiad terenowy, aby określić np. gatunek drzewa, posiadanie oznakowania dziennego lub nocnego przez obiekt oraz czy jest ono zgodne z rozporządzeniem lub na jakiej działce ewidencyjnej znajduje się obiekt itp.

Oprócz informacji wykorzystywanych przez Urząd Lotnictwa Cywilnego również Polska Agencja Żeglugi Powietrznej wykorzystuje dane dotyczące przeszkód lotniczych. Załącznik 4 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym (Dz.U. z 1959 r. Nr 35 poz. 212 z późn. zm.), Mapy Lotnicze, wydanie jedenaste z lipca 2009 roku, również definiuje pojęcie przeszkody lotniczej. W punkcie 3.8.1 dotyczącym przeszkód lotniczych można przeczytać:

*3.8.1.1 Obiekty znajdujące się w sektorze ścieżki wznoszenia, które wystają powyżej płaskiej powierzchni o nachyleniu 1,2%, mającej zwykle wspólny początek z sektorem ścieżki wznoszenia, uważane będą za przeszkody; wyjątek stanowią obiekty znajdujące się całkowicie poniżej „płaszczyzny cienia” innych przeszkód, zgodnie z zapisem w punkcie 3.8.1.2, które nie muszą być przedstawiane na mapie. Obiekty ruchome (np. łodzie, pociągi, ciężarówki), które mogą wystawać powyżej płaszczyzny o nachyleniu 1,2%, będą uważane za przeszkody, jakkolwiek nie będą uważane za przeszkody mogące stworzyć „płaszczyznę cienia”.*

Znalezienie takich obiektów jest podobne jak odszukiwanie przeszkód z omówionej wcześniej pierwszej grupy. Należy jednak pamiętać o wprowadzeniu odpowiedniego parametru powierzchni ograniczającej oraz o wykonaniu późniejszych analiz wraz z przeprowadzeniem dodatkowej analizy związanej z „płaszczyzną cienia” (płaszczyzna zaczynająca się w linii poziomej, przechodzącej przez wierzchołek przeszkody pod kątem prostym do osi sektora ścieżki wznoszenia – cała definicja znajduje się w Załączniku 4 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym – ICAO).

Dodatkowe wymagania dotyczące danych o terenie i przeszkodach znajdują się w Załączniku 15 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, Służby Informacji lotniczej, wydanie czternaste z lipca 2013 roku. W rozdziale 10 – Elektroniczne Dane o Terenie i Przeszkodach – można znaleźć poszczególne wymagania oraz podział na cztery strefy.

Poniższe tabele (tab. 6.1 i 6.2) potwierdzają, że lotnicze skanowanie laserowe doskonale spełnia zadanie pozyskiwania precyzyjnych danych dotyczących terenu. Dane dotyczące przeszkód należy natomiast uzupełnić o bezpośrednie pomiary prowadzone w terenie.

Tabela 6.1. Wymagania liczbowe dotyczące danych o terenie  
(źródło: Załącznik 15 ICAO – Służby Informacji lotniczej)

	<b>Strefa 1</b>	<b>Strefa 2</b>	<b>Strefa 3</b>	<b>Strefa 4</b>
Rozdzielczość terenów	3 sekundy kątowe (ok. 90 m)	1 sekunda kątowa (ok. 30 m)	0,6 sekundy kątowej (ok. 20 m)	0,3 sekundy kątowej (ok. 9 m)
Dokładność pionowa	30 m	3 m	0,5 m	1 m
Rozdzielczość pionowa	1 m	0,1 m	0,01 m	0,1 m
Dokładność pozioma	50 m	5 m	0,5 m	2,5 m
Poziom pewności (1 $\sigma$ )	90%	90%	90%	90%
Klasyfikacja spójności	zwykła	ważna	ważna	ważna
Częstotliwość aktualizacji	zgodnie z wymaganiami	zgodnie z wymaganiami	zgodnie z wymaganiami	zgodnie z wymaganiami

Tabela 6.2. Wymagania liczbowe dotyczące danych o przeszkodach (źródło: Załącznik 15 ICAO – Służby Informacji lotniczej)

	<b>Strefa 1</b>	<b>Strefa 2</b>	<b>Strefa 3</b>	<b>Strefa 4</b>
Dokładność pionowa	30 m	3 m	0,5 m	1 m
Rozdzielczość pionowa	1 m	0,1 m	0,01 m	0,1 m
Dokładność pozioma	50 m	5 m	0,5 m	2,5 m
Poziom pewności (1 $\sigma$ )	90%	90%	90%	90%
Klasyfikacja spójności	zwykła	ważna	ważna	ważna
Częstotliwość aktualizacji	zgodnie z wymaganiami	zgodnie z wymaganiami	zgodnie z wymaganiami	zgodnie z wymaganiami



### 6.9.3. Podsumowanie

Reasumując, dane ALS są idealnym materiałem wejściowym do przeprowadzenia analizy obiektów mogących potencjalnie stanowić przeszkody lotnicze. Pomagają one wytypować obszary, na których przeszkody te mogą występować. W połączeniu z aktualnymi cyfrowymi ortofotomapami lotniczymi oraz klasycznymi pomiarami geodezyjnymi dają pewność, że żaden obiekt wymagający weryfikacji nie zostanie pominięty. Są idealnym produktem tam, gdzie pomiary bezpośrednie są bardzo utrudnione (np. przy zwartych obszarach leśnych, prywatnych posesjach).

Chmura punktów ALS posiada jednak pewne ograniczenia. Aktualność danych ma istotne znaczenie, a technologia lotniczego skanowania laserowego nie zawsze gwarantuje precyzyjne określenie wysokości niektórych ażurowych i smukłych obiektów w ich najwyższych miejscach. Duże zbiory ALS wymagają też stosowania odpowiedniego sprzętu i oprogramowania, jednak nie powinna to być przeszkoda w ich coraz powszechniejszym wykorzystywaniu na potrzeby branży lotniczej. W połączeniu z pomiarami bezpośrednimi stanowią doskonałe źródło informacji. Rozwój technologii UAV (drony) poprzez miniaturyzację skanerów i możliwość szybkiego pozyskania aktualnych danych dla lotnisk i lądowisk wpływa na coraz częstsze stosowanie technologii ALS w zakresie bezpieczeństwa lotnisk.

### Literatura

- Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, podpisana w Chicago dnia 7 grudnia 1944 r. – Konwencja chicagowska (Dz.U. z 1959 r. Nr 35 poz. 212 z późn. zm.) – wraz z załącznikami.
- Paździoro K., Siedlecki M., Zaborski W., 2009. *Założenia modernizacji sporządzania Planu powierzchni ograniczających wysokość zabudowy oraz obiektów naturalnych w otoczeniu lotniska na podstawie wybranego fragmentu mapy dla lotniska Kraków–Balice*. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, praca dyplomowa, Studia Podyplomowe „Zarządzanie Infrastrukturą Lotniskową”, Kraków.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2003 roku w sprawie zgłaszania oraz oznakowania przeszkód lotniczych (Dz.U. z 2003 r. Nr 130 poz. 1193 z późn. zm.).
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2003 roku w sprawie warunków, jakie powinny spełniać obiekty budowlane oraz naturalne w otoczeniu lotniska (Dz.U. z 2003 r. Nr 130 poz. 1192 z późn. zm.).
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 roku w sprawie klasyfikacji lotnisk i rejestru lotnisk (Dz.U. z 2013 r. poz. 810).
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 1 lipca 2013 roku w sprawie ewidencji lądowisk (Dz.U. z 2013 r. poz. 795).
- Ustawa z dnia 3 lipca 2002 roku Prawo lotnicze (Dz.U. z 2002 r. Nr 130 poz. 1112 z późn. zm.).

dr Paweł Chrustek

## 6.10. Projektowanie nowych szlaków turystycznych oraz identyfikacja potencjalnych zagrożeń na szlakach

Przyjmuje się, że pierwszy znakowany szlak turystyczny na ziemiach polskich, w obecnych granicach, wytyczył w 1887 r. Walery Eliasz Radzikowski – działacz Towarzystwa Tatrzańskiego. Szlak ten prowadził z Toporowej Cyrhli przez Polanę Wakszudzką do Morskiego Oka w Tatrach. W późniejszych latach prace te kontynuowali działacze Polskiego Towarzystwa Tatrzańskiego, Polskiego Towarzystwa Krajoznawczego, a od 1950 r. Polskiego Towarzystwa Turystyczno-Krajoznawczego (PTTK). Początkowo największe zainteresowanie turystyką dotyczyło głównie obszarów górskich, jednak z czasem objęło ono obszary wyżyn i nizin. Do szlaków pieszych dołączyły szlaki turystyczne: wodne i rowerowe, a w latach 90. XX w. wytyczono także pierwsze szlaki turystyki konnej.

Zgodnie z aktualną definicją PTTK, **szlakiem turystycznym** określa się wytyczoną w terenie trasę, służącą odbywaniu wycieczek. Trasa oznakowana jest jednolitymi znakami (symbolami) i wyposażona jest w urządzenia informacyjne, które zapewniają bezpieczne i spokojne jej przebycie turyście o dowolnym poziomie umiejętności i doświadczeniu. Aktywność ta może dotyczyć każdej pory roku i każdych warunków pogodowych, o ile szczegółowe wymagania nie stanowią inaczej (np. okresowe zamykanie szlaków w czasie występowania zagrożeń lub ze względów przyrodniczych na terenach chronionych). Udostępnienie najszerszemu ogółowi społeczeństwa turystycznie atrakcyjnych terenów jest jednym z naczelných zadań PTTK. Cel ten Towarzystwo osiąga przez projektowanie i utrzymywanie sieci znakowanych szlaków turystycznych.

Obecnie powstawanie nowych szlaków turystycznych może być także wynikiem aktywności społeczności lokalnych, porozumień współpracujących samorządów, a także umów pomiędzy współpracującymi państwami. Doskonałym tego przykładem są sieci szlaków turystycznych powstałych w ramach projektów *Greenways* (pl. Zielone szlaki). Są to wielofunkcyjne szlaki służące niezmotoryzowanemu użytkownikom, prowadzące wzdłuż naturalnych korytarzy historycznych, tras handlowych, rzek i kolei.

### 6.10.1. Metodologia projektowania szlaków turystycznych

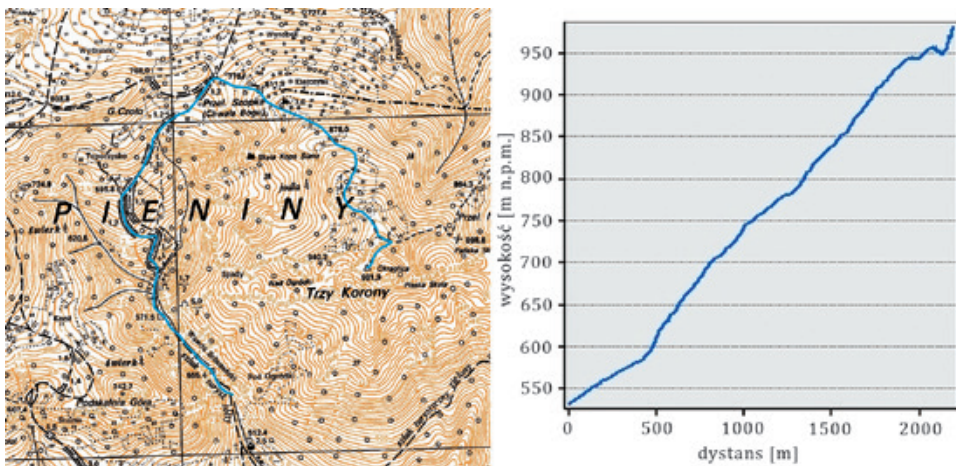
Ze względu na dużą różnorodność szlaków turystycznych opracowanie jednej uniwersalnej metodologii ich projektowania jest sprawą niezwykle trudną. Większość instrukcji za podstawowy krok uznaje jednak ocenę walorów i warunków przyrodniczo-kulturowych oraz topografii potencjalnych szlaków. Tego typu ocena wymaga nie tylko szerokiej wiedzy środowiskowej, ale także narzędzi do przeprowadzenia niezbędnych

analiz przestrzennych. Na szczególną uwagę zasługują tutaj narzędzia GIS umożliwiające otrzymywanie odpowiedzi na złożone zapytania przestrzenne. Zaletą systemów GIS jest także możliwość opracowania wysokiej jakości wizualizacji wyników. Należy jednak mocno podkreślić, że jakość wykonywanych analiz zależy w dużej mierze od jakości i rozdzielczości przestrzennej wykorzystywanych geodanych.

Dane przestrzenne pochodzące z lotniczego skanowania laserowego (ALS) bez wątplenia wprowadzają nową jakość w analizach przestrzennych typu 3D, zwłaszcza w kontekście analiz przyrodniczych i topograficznych. Wynika to z faktu, iż dane ALS charakteryzują się gęstym próbkowaniem obszaru, w wyniku czego pozyskiwana jest chmura punktów o znanych współrzędnych (X, Y, Z). Poniższe przykłady wskazują na kilka podstawowych zastosowań danych ALS w kontekście omówionych potrzeb związanych z turystyką i bezpieczeństwem.

### 6.10.2. Ocena podstawowych parametrów topograficznych analizowanego terenu

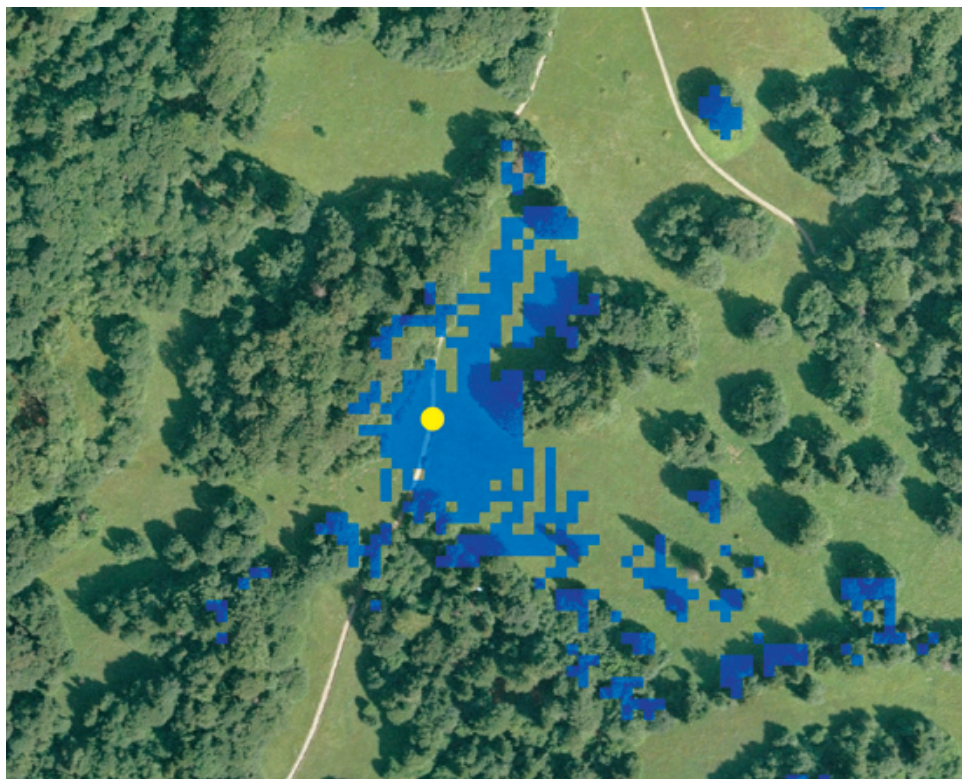
Ocena podstawowych parametrów topograficznych analizowanego obszaru wydaje się być podstawowym kryterium oceny atrakcyjności oraz dostępności danego terenu dla ruchu turystycznego. Do najbardziej popularnych parametrów topograficznych używanych w projektowaniu i utrzymaniu szlaków turystycznych należą: nachylenie (spadek) terenu, wysokość bezwzględna oraz ekspozycja stoków względem kierunków geograficznych. Parametry te najczęściej pomocne są w wyznaczaniu i ocenie profili wysokościowych (ryc. 6.31) oraz analizach nasłonecznienia (potencjału solarnego). Ten ostatni parametr może być wykorzystywany np. w studiach dotyczących czasu zalegania pokrywy śnieżnej na szlakach narciarskich czy zagrożenia lawinowego.



Ryc. 6.31. Szczegółowy profil wysokościowy fragmentu szlaku turystycznego na Trzy Korony w Pieninach wykonany na podstawie danych ALS

Wyznaczenie szlaku turystycznego na terenach o dużym nachyleniu i częstych zmianach w profilu wysokościowym może stanowić dodatkowy atut dla turystyki kwalifikowanej, a jednocześnie trudne do zaakceptowania ograniczenie dla turystyki rowerowej. Dotychczasowe analizy przestrzenne profili wysokościowych wykonywane na numerycznym modelu terenu (NMT) opracowywanych metodami fotogrametrycznymi miały charakter dość poglądowy ze względu na ich stosunkowo niską rozdzielczość przestrzenną. Szczególne utrudnienia dotyczyły obszarów zalesionych, na których metody fotogrametryczne miały bardzo ograniczone możliwości. Dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego wnoszą całkowicie nowe możliwości realizacji analiz przestrzennych ze względu na penetrację roślinności przez wiązkę lasera oraz możliwość klasyfikacji poszczególnych obiektów (np. terenu i roślinności).

Bardziej złożone analizy dotyczące pokrycia terenu z wykorzystaniem danych ALS dają także możliwość wykonania bardziej wiarygodnych analiz widoczności, które często wykorzystuje się w planowaniu punktów widokowych na szlakach turystycznych (ryc. 6.32).



Ryc. 6.32. Przykład analizy widoczności z wykorzystaniem numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT). Żółty punkt identyfikuje obserwatora, a niebieski kolor wskazuje na widoczne przez niego obszary.

### 6.10.3. Wizualizacja analiz przestrzennych 3D z użyciem ALS

Wizualizacja informacji przestrzennej dotyczącej przebiegu szlaków turystycznych daje ogromne możliwości nie tylko na etapie planowania, ale także wspomaga bardziej efektywne promowanie szlaków istniejących (np. poprzez tworzenie atrakcyjnych tablic informacyjnych).

Przygotowanie wizualizacji typu 3D (ryc. 6.33), opartych na wysokorozdzielczych i dokładnych danych ALS oraz ortofotomapach cyfrowych, może też pomóc stworzyć i rozwijać „turystykę wirtualną”, tworzoną na różnego rodzaju turystycznych portalach internetowych. Taka aktywność może być doskonałą alternatywą i szansą na poznawanie nowych przestrzeni, także przez osoby o ograniczonych możliwościach ruchowych. Turystyka wirtualna może przyczynić się również do lepszej edukacji na temat promowanych obszarów turystycznych. Może też istotnie wpływać na bezpieczeństwo turystów, gdyż ułatwia bardziej precyzyjne zaplanowanie tras i wczesne rozpoznanie utrudnień terenowych na nich występujących.

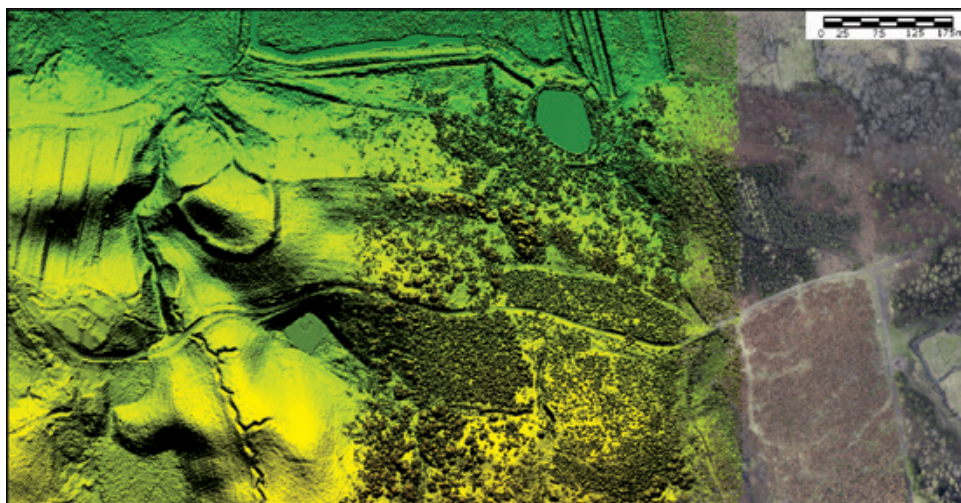


Ryc. 6.33. Wirtualny widok „z lotu ptaka” na Morskie Oko w Tatrach. Wyraźna ostra sylwetka szczytu Mnicha (2068 m n.p.m.)

### 6.10.4. Ocena i odkrywanie walorów historyczno-kulturowych

Na ocenę atrakcyjności potencjalnego szlaku turystycznego wpływają także walory historyczno-kulturowe danego obszaru. Warto pamiętać o tym, że otaczający nas krajobraz jest wynikiem działań pokoleń, które żyły dziesiątki, a nawet setki lat temu. Krajobraz kulturowy tworzą wprowadzone przez człowieka elementy, jego wyobrażenia o świecie, a także istniejące w danym miejscu elementy przyrody. Wszystkie te komponenty tworzą dziedzictwo stanowiące fundament naszej tożsamości kulturowej.

Edukacja historyczno-kulturowa ma więc nie tylko charakter poznawczy, przyczynić się może do lepszego zrozumienia współczesnych procesów społeczno-kulturowych. Technologia lotniczego skanowania laserowego wnosi zupełnie nową wartość w badaniach historycznych, gdyż pozwala w sposób dotychczas niewykorzystywany eksplorować jeszcze nierozpoznane elementy krajobrazu kulturowego. Dzięki wspomnianej możliwości filtracji danych ALS tego typu analizy dotyczyć mogą także obszarów zalesionych (ryc. 6.34).



Ryc. 6.34. Wizualizacja NMT (z lewej), NMPT (w środku) i ortofotomapy (z prawej), zalesionego obszaru średniowiecznego grodziska (pierścieniowata forma po lewej). Model identyfikuje także ukryte transeje w lesie transeje z czasów II wojny światowej (ciemny zygzak po lewej) (źródło: Banaszek 2012)

Ten typ krajobrazu ze względu na ograniczoną dostępność i trudność analizowania go w szerszej perspektywie przestrzennej stanowił istotne ograniczenie w dotychczasowych badaniach historycznych i archeologicznych. Paradoksalnie jednak ograniczenia te zmniejszyły wpływ człowieka na przekształcenia krajobrazu (np. przez rolnictwo) i pozwoliły zachować niezmienną formę krajobrazową relikwów przeszłych kultur.

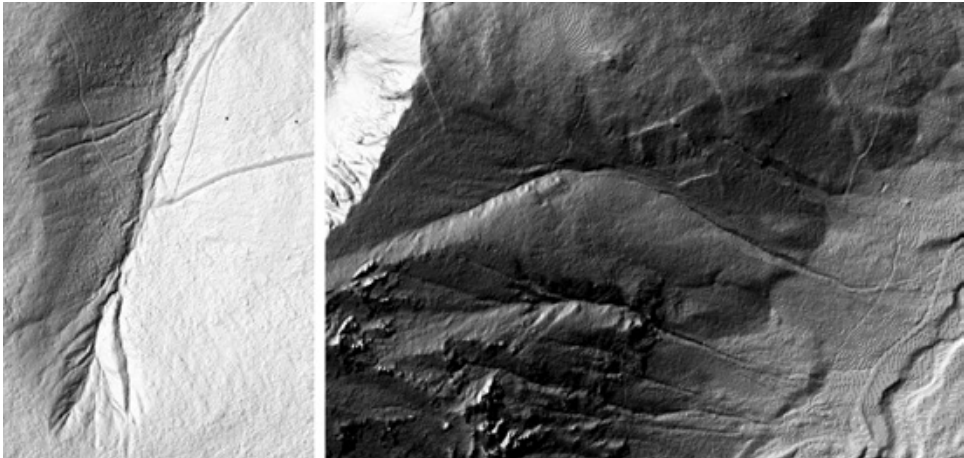
#### 6.10.5. Identyfikacja potencjalnych zagrożeń na szlakach

Analiza potencjalnych zagrożeń występujących na szlakach turystycznych dotyczy najczęściej analiz środowiskowych i lokalizacji potencjalnych zagrożeń naturalnych. Wiedza na temat szczegółowej lokalizacji zagrożenia pozwala na znacznie bardziej efektywną profilaktykę oraz wspomaga proces zarządzania ryzykiem na narażonych obszarach. W kontekście zabezpieczenia szlaków turystycznych analizy takie mogą dotyczyć np. identyfikacji obszarów zagrożenia powodziowego, zagrożenia występowania ruchów

masowych (np. usuwisk, sływów gruzowych, obrywów skalnych) czy też zagrożeń związanych układem przestrzennym i kondycją drzewostanu.

Analiza ryzyka w górach nie może pominąć zagrożenia występowania lawin śnieżnych. W Polsce tematyka zagrożenia lawinami nie dotyczy jedynie obszarów Tatr i Karkonoszy, ale także wielu innych obszarów sudeckich i karpaccich (np. Masywu Śnieżnika, Masywu Piłska, Masywu Babiej Góry, Pienin czy Bieszczadów).

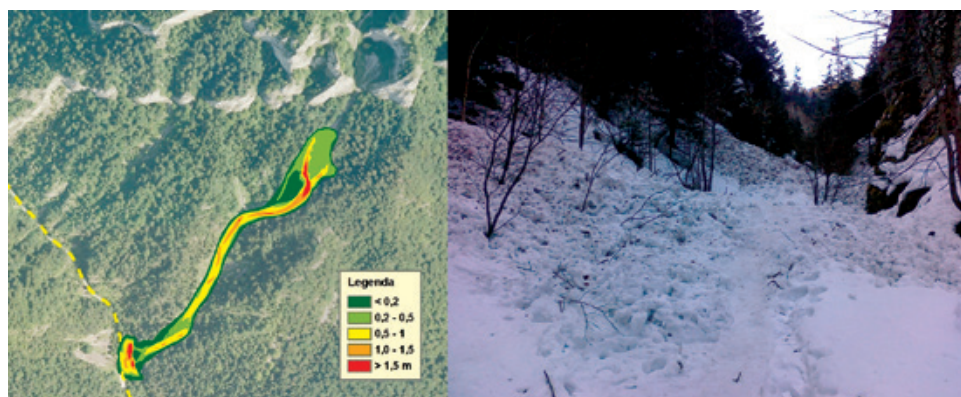
Nowoczesna profilaktyka lawinowa zmusza specjalistów nie tylko do opracowywania efektywnych programów edukacyjnych, tworzenia aparatury przyspieszającej odnalezienie poszkodowanego, ale także do tworzenia specjalistycznych narzędzi pomagających zlokalizować potencjalne zagrożenie w przestrzeni. Tego typu narzędzia opracowano także dla obszarów górskich w Polsce w ramach Zaawansowanej Kartografii Lawinowej ([www.scavalanches.annapasek.org](http://www.scavalanches.annapasek.org)) na podstawie projektu badawczego, wskazując wysoką użyteczność modeli wysokościowych ALS w określaniu potencjalnych zasięgów lawin oraz szczegółowej charakterystyce topograficznej złożonej rzeźby górskiej (ryc. 6.35).



Ryc. 6.35. Wizualizacja cieniowania NMT terenów górskich charakteryzujących się dużą aktywnością lawinową (Biały Jar w Karkonoszach – z lewej, rejon Żlebu Żandarmerii w Tatrach – z prawej)

W przeciwieństwie do wcześniej wykorzystywanych danych fotogrametrycznych, dane ALS pozwalają także na szczegółowe analizowanie zagrożenia związanego z małymi i średnimi lawinami, które statystycznie związane są z największą liczbą wypadków. Przykład takiej analizy w masywie Trzech Koron w Pieninach zaprezentowano na ryc. 6.36. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż lawiny w tym obszarze mogą osiągać wyznaczony szlak turystyczny (ryc. 6.36 – przerywana żółta linia). Tezę tę potwierdzają lawiny zaobserwowane na tym obszarze (ryc. 6.36 – fotografia po prawej). Dzięki zastosowaniu danych ALS możliwa jest nie tylko ocena potencjalnych zasięgów lawin, ale także ocena siły ich oddziaływania.

Do szczególnych zalet danych ALS należy także możliwość analizowania zagrożenia lawinowego w terenach zalesionych. Lawiny wyzwolone w takich obszarach, choć zwykle nie są dużych rozmiarów, także mogą doprowadzić do tragedii. Zagrożeniem w takich przypadkach jest nie tylko całkowite zasypianie uszkodzonego przez masy śniegu, ale także możliwość doznania dotkliwych obrażeń w wyniku zderzenia z naturalnymi przeszkodami (pniami drzew). Szczegółowa analiza danych laserowych pozwala na szczegółową ocenę zwartości drzewostanu, grubości pni pojedynczych drzew, a tym samym na oszacowanie sił oporu działających na spływające masy śniegu. Wspomniane technologie pozwalają także w podobny sposób analizować spływy lawin gruzowych i błotnych, mogących występować w Polsce w ciągu całego roku.



Ryc. 6.36. Przykładowa symulacja potencjalnej lawiny spływającej z częściowo zalesionych stoków Masywu Trzech Koron do Wąwozu Sopczańskiego w Pieninach. Legenda wskazuje maksymalną potencjalną wysokość spływających mas śniegu (opracowanie: P. Chrustek). Na zdjęciu widoczne lawiny występujące na tym obszarze (źródło: zbiory prywatne M. Ogrodowicza)

Analiza lokalizacji i dokładnej geometrii drzewostanu pozwala także ocenić ich potencjalne oddziaływanie w obrębie wyznaczonych szlaków lub istniejącej infrastruktury turystycznej. W związku z tym możliwe jest np. przeanalizowanie ryzyka związanego z upadkiem pojedynczych drzew na szlaki lub koleje narciarskie. Tego typu analizy mogą zapobiec wypadkom oraz dotkliwym stratom finansowym w przypadku uszkodzenia drogiej infrastruktury.

Dokładne odwzorowanie rzeźby terenu na NMT (ryc. 6.35) pozwala na szczegółową analizę spływów wód powierzchniowych. Dzięki temu możliwa jest identyfikacja torów potoków okresowych powstających po nawałnych opadach deszczu, mogących stanowić istotne zagrożenie dla ruchu turystycznego.

### 6.10.6. Podsumowanie

Przedstawione powyżej przykłady zastosowań danych ALS wskazują niewątpliwie na ich ogromny potencjał w monitoringu utrzymywaniu i zarządzaniu nimi, a także ocenie zagrożeń występujących na nich czy też szeroko pojętej promocji nowo wyznaczonych



tras. Działania te ze względu na wysoką rozdzielczość danych wejściowych mogą dotyczyć zarówno małych, jak i dużych obszarów bez utraty dokładności analizowanych danych. Za niezwykle cenną zaletę należy także uznać możliwość zastosowania danych ALS do pozyskiwania dotychczas nieodkrytych zasobów przyrodniczo-kulturowych, a tym samym wykorzystania ich do rozwoju potencjału turystycznego na nowych obszarach.

## Literatura

- Banaszek Ł., 2012. *Lasy przodków. Badania nad przeszłymi krajobrazami okolic Polanowa z wykorzystaniem nieinwazyjnych metod prospekcji archeologicznej*. Dokumentacja konkursu PRELUDIUM, Narodowe Centrum Nauki, Kraków.
- Chrustek P., Marek Ś., Biskupič M., 2013. *Snow avalanche hazard mapping for different frequency scenarios, the case of the Tatra Mts., Western Carpathians*. [In:] Naaim-Bouvet F., Durand Y., Lambert R. (eds), 2013, Conference Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble Chamonix-Mont-Blanc October 7–11, France, 745–749.
- Kijowski A., 2002. *Zapis graficzny krajobrazu ruralistycznego a tworzenie koncepcji zagospodarowania turystycznego okolic Sławna: założenia projektu Parku przyrodniczo-archeologicznego „Wrześnickie Kurhany”*. [W:] Rączkowski W., Sroka J. (red.), *De rebus futuris memento: przyszłość przeszłego krajobrazu kulturowego Ziemi Sławieńskiej*. Fundacja „Dziedzictwo” Sławieński Dom Kultury, Sławno, 125–150.
- Rączkowski W., Banaszek Ł., 2013. *Osadnictwo w rejonie Jarosławianki – problemy badawcze*. [W:] Fronczak J., Florek W. (red.), *Środowisko glebotwórcze i gleby dolin rzecznych*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- ZG PTTK, 2007. *Instrukcja Znakowania Szlaków Turystycznych*, Warszawa.

## Strony internetowe

[www.greenways.pl](http://www.greenways.pl)

[www.scavalanches.annapasek.org](http://www.scavalanches.annapasek.org)

<http://www.annapasek.org/bezpieczna-eksploracja-gorska/aktualnosci/286-kartowanie-ryzykalawinowego-podsumowanie-projektu-naukowego>

dr inż. Ireneusz Jędrychowski

## **6.11. Opracowywanie dokumentów planistycznych – plany zagospodarowania przestrzennego i decyzje o warunkach zabudowy**

### **6.11.1. Informacja o podstawie prawnej**

W rozdziale zaprezentowano przykłady wykorzystania danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego w pracach z zakresu tworzenia miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego oraz przygotowywania decyzji o warunkach zabudowy.

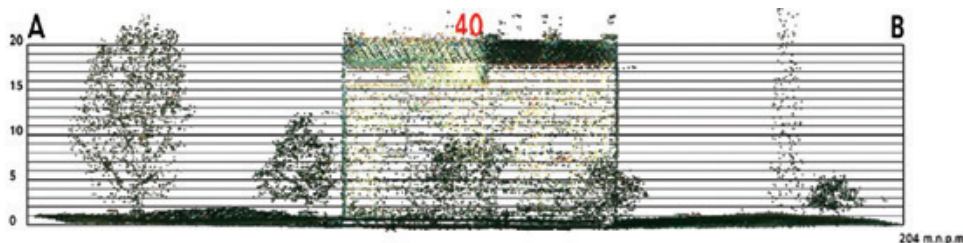
Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. z 2003 r. Nr 80 poz. 717 z późn. zm.) określa:

- 1) zasady kształtowania polityki przestrzennej przez jednostki samorządu terytorialnego i organy administracji rządowej,
- 2) zakres i sposoby postępowania w sprawach przeznaczania terenów na określone cele oraz ustalania zasad ich zagospodarowania i zabudowy.

Artykuł 15 ww. ustawy wskazuje także na zbiór elementów, które mają być obowiązkowo określone w planie miejscowym. Są to m.in.:

- 1) przeznaczenie terenów oraz linie rozgraniczające tereny o różnym przeznaczeniu lub różnych zasadach zagospodarowania, (...)
- 6) zasady kształtowania zabudowy oraz wskaźniki zagospodarowania terenu, maksymalną i minimalną intensywność zabudowy jako wskaźnik powierzchni całkowitej zabudowy w odniesieniu do powierzchni działki budowlanej, minimalny udział procentowy powierzchni biologicznie czynnej w odniesieniu do powierzchni działki budowlanej, maksymalną wysokość zabudowy, minimalną liczbę miejsc do parkowania i sposób ich realizacji oraz linie zabudowy i gabaryty obiektów.

Ustawodawca nakazał więc określić elementy, do wyznaczenia których niezbędna jest informacja o wysokości istniejących obiektów. Produkty lotniczego skanowania laserowego nadają się do tego celu znakomicie. Informacje wysokościowe odczytywane z chmury punktów ALS mogą być podstawowym materiałem używanym do określenia maksymalnej wysokości zabudowy. Oprócz sprawdzenia wysokości pojedynczych punktów z chmury ALS zalecane jest wykonanie przekrojów poprzecznych w zadanych miejscach (ryc. 6.37) oraz utworzenie na ich podstawie map pochodnych (np. hipsometrycznych).



Ryc. 6.37. Przykładowy przekrój przez chmurę punktów wykonywany podczas prac planistycznych (źródło: Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa)

### 6.11.2. Dane ALS wykorzystywane w pracach planistycznych

W celu lepszego dostępu do danych wysokościowych wskazane jest odpowiednie przetworzenie chmury punktów ALS przez wygenerowanie warstw tematycznych zasilających lokalny system informacji przestrzennej (GIS). Do celów planistycznych przydatne są warstwy zawierające obszary zagregowane w określonych przedziałach wysokościowych (ryc. 6.38), a także warstwa budynków, których atrybuty zostały powiększone o informacje wysokościowe (np. minimalna, maksymalna, średnia i mediana wysokości budynku oraz wysokości najczęściej występujące na obszarze dachu; ryc. 6.39). Tak przygotowane dane umożliwiają wykorzystanie informacji wysokościowej także przez osoby, które nie dysponują specjalistycznym oprogramowaniem obsługującym chmurę punktów ALS, a mające dostęp do dotychczas używanego systemu informacji przestrzennej.

W pracach planistycznych bardzo przydatne są wizualizacje chmury punktów z zadanych miejsc obserwacyjnych (punktów widokowych) umożliwiające określenie widoczności określonych obszarów, a także wizualizacje planowanych kubatur łącznie z punktami powstałymi podczas skanowania (ryc. 6.40).

Efekty lotniczego skanowania laserowego mogą być szeroko wykorzystywane także przy różnych analizach przestrzennych badających sylwetę miasta oraz relacje wysokościowe pomiędzy grupami obiektów lub wręcz pojedynczymi budynkami. Chmura punktów ALS jest podstawowym elementem orientującym fotografie wykorzystywane w takich pracach (ryc. 6.41).

Ostatecznym efektem przeprowadzonych analiz są odpowiednie zapisy w planie miejscowym, np.:

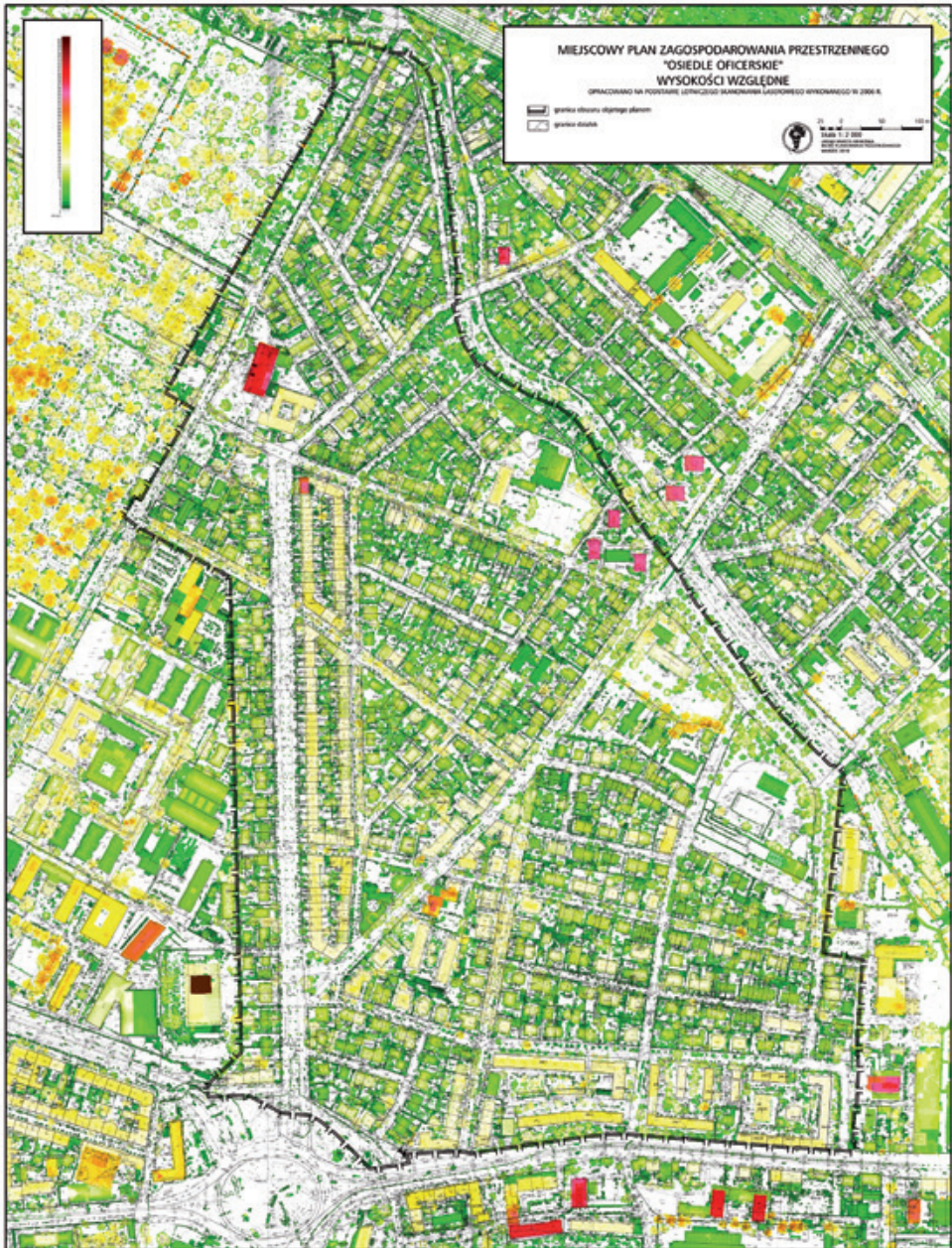
§ 12. 1. Wyznacza się Teren zabudowy mieszkaniowej – oznaczony symbolem MN.1, o podstawowym przeznaczeniu pod zabudowę jednorodziną.

W zakresie zasad kształtowania zabudowy i zagospodarowania terenu ustala się: (...)

3) maksymalną wysokość zabudowy = 9 m,

4) maksymalną wysokość bezwzględną zabudowy = 216 m n.p.m.

(źródło: uchwała nr LXXXVIII/1306/13 Rady Miasta Krakowa z dnia 6 listopada 2013 r. w sprawie uchwalenia miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego obszaru „Stare Podgórze – Kalwaryjska”).



Ryc. 6.38. Mapa wysokości względnych (oryginał w większej skali; źródło: Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa)



Ryc. 6.39. Mapa będąca efektem zapytania do wektorowej bazy budynków zawierającej atrybuty wysokościowe pozyskane z chmury punktów (oryginał w większej skali; źródło: Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa)

Artykuł 61 ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym wskazuje rozporządzenie ministra właściwego do spraw budownictwa, lokalnego planowania i zagospodarowania przestrzennego oraz mieszkalnictwa jako ustalające wymagania dotyczące nowej zabudowy i zagospodarowania terenu w przypadku braku istnienia planu miejscowego. W rozporządzeniu tym określone są wymagania dotyczące ustalania:

- 1) linii zabudowy,
- 2) wielkości powierzchni zabudowy w stosunku do powierzchni działki albo terenu,
- 3) szerokości elewacji frontowej,
- 4) wysokości górnej krawędzi elewacji frontowej, jej gzymsu lub attyki,
- 5) geometrii dachu (kąta nachylenia, wysokości kalenicy i układu połaci dachowych).



Ryc. 6.40. Wizualizacja planowanej zabudowy (wektorowe bryły) z wykorzystaniem chmury punktów oraz wektorowego modelu miasta wygenerowanego z chmury punktów ALS (źródło: Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa)

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 26 sierpnia 2003 r. w sprawie sposobu ustalania wymagań dotyczących nowej zabudowy i zagospodarowania terenu w przypadku braku miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego (Dz.U. z 2003 r. Nr 164 poz. 1588) zawiera następujące zapisy:

- § 7. 1. Wysokość górnej krawędzi elewacji frontowej, jej gzymsu lub attyki wyznacza się dla nowej zabudowy jako przedłużenie tych krawędzi odpowiednio do istniejącej zabudowy na działkach sąsiednich.
2. Wysokość, o której mowa w ust. 1, mierzy się od średniego poziomu terenu przed głównym wejściem do budynku.
  3. Jeżeli wysokość, o której mowa w ust. 1, na działkach sąsiednich przebiega tworząc uskok, wówczas przyjmuje się jej średnią wielkość występującą na obszarze analizowanym.

4. Dopuszcza się wyznaczenie innej wysokości, o której mowa w ust. 1, jeżeli wynika to z analizy, o której mowa w § 3 ust.1.

§ 8. Geometrię dachu (kąąt nachylenia, wysokość głównej kalenicy i układ połączeń dachowych, a także kierunek głównej kalenicy dachu w stosunku do frontu działki) ustala się odpowiednio do geometrii.



Ryc. 6.41. Wykorzystanie chmury punktów ALS do orientacji fotografii z modelem wektorowym planowanej bryły (u góry) oraz efekt końcowy (na dole) (źródło: Urząd Miasta Krakowa)

### 6.11.3. Podsumowanie

Powyższe zapisy wskazują, że w przypadku braku MPZP konieczne jest dysponowanie wiernym trójwymiarowym modelem przestrzeni w celu określenia dopuszczalnej wysokości górnej elewacji frontowej i głównej kalenicy oraz układu połączeń dachowych. W ramach wykonywanych analiz określających warunki i szczegółowe zasady zagospodarowania terenu oraz jego zabudowy jednymi z najważniejszych są przekroje chmury punktów (ryc. 6.37).

W celu wypełnienia wymagań formalnych wykonuje się analizę urbanistyczno-architektoniczną dla wnioskowanego zamierzenia inwestycyjnego. Określa się w niej m.in. cechy istniejącej zabudowy w obszarze analizowanym, np.:

Wysokość górnej krawędzi elewacji frontowej – wysokości bardzo zróżnicowane z uwagi na różnorodne formy budynków w obszarze analizowanym od 7 m do ok. 37 m w obrębie Osiedla ..., 10 m do 18 m okapy oraz 14 m do 21 m kalenicy ulicy ... ok. 25 m hotel X ok. 21 m nowa zabudowa przy ul. ... oraz ok. 19 m do 21 m hotel Y na dz. nr ... . Szczegółowe wysokości zgodnie z zamieszczonymi przekrojami, średnia wysokość w obszarze wynosi ok. 17 m.

Geometria dachu – zdecydowanie przeważają dachy płaskie, często kształtowane z uskokami, dachy połaciowe głównie w pierwotnej zabudowie. Wysokości dachów płaskich 7 m do ok. 37 m, kalenice dachów połaciowych od ok. 8 m do 21 m (źródło: Wydział Architektury i Urbanistyki Urzędu Miasta Krakowa).

W efekcie wykonanych prac wydana zostaje decyzja o warunkach zabudowy ustalająca warunki i szczegółowe zasady zagospodarowania terenu oraz jego zabudowy, np.:

1. Warunki i wymagania ochrony i kształtowania ładu przestrzennego, (...)
  - b. Wysokość górnej krawędzi elewacji frontowej, jej gzymsu lub attyki.

(wysokość górnej krawędzi elewacji frontowej budynków posiadających połączenie dachowe z kalenicą o przebiegu prostym do frontu działki – liczona jest od poziomu terenu do poziomu kalenicy, natomiast wysokość górnej krawędzi elewacji frontowej budynków posiadających połączenie dachowe z kalenicą o przebiegu równoległym do frontu działki – liczona jest od poziomu terenu do poziomu okapu połączenia dachowych; wysokość górnej krawędzi elewacji frontowej budynków posiadających wykształcony gzyms lub attykę – liczona jest od średniego poziomu terenu przed głównym wejściem do budynku do poziomu tego gzymsu lub attyki).

Ustala się wysokość górnej krawędzi elewacji frontowej, jej gzymsu lub attyki od 19 do 21 m. Przy czym wysokość budynku nie może przekroczyć rzędnej 223,45 m n.p.m. (źródło: Wydział Architektury i Urbanistyki Urzędu Miasta Krakowa) (ryc. 6.42).





Ryc. 6.42. Wizualizacja planowanej zabudowy z wykorzystaniem wektorowego modelu 3D miasta powstałego na bazie chmury punktów ALS (źródło: Urząd Miasta Krakowa)

## Literatura

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 26 sierpnia 2003 r. w sprawie sposobu ustalania wymagań dotyczących nowej zabudowy i zagospodarowania terenu w przypadku braku miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego (Dz.U. z 2003 r. Nr 164 poz. 1588).

Uchwała nr LXXXVIII/1306/13 Rady Miasta Krakowa z dnia 6 listopada 2013 r. w sprawie uchwalenia miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego obszaru „Stare Podgórze – Kalwaryjska”.

Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. z 2003 r. Nr 80 poz. 717 z późn. zm.).

dr Łukasz Rejt

## 6.12. Monitoring obszarów sieci Natura 2000

### 6.12.1. Obszary Natura 2000 – podstawy prawne

Polska, przystępując w 2004 roku do Unii Europejskiej, podobnie jak pozostałe kraje członkowskie, została zobligowana do wyznaczenia i objęcia ochroną sieci obszarów Natura 2000. W jej skład wchodzi Obszary Specjalnej Ochrony (OSO) ptaków tworzone w celu wypełnienia zapisów Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/147/WE z dnia 30 listopada 2009 roku, w sprawie ochrony dzikiego ptactwa (Dz.U. L 20 z 26.1.2010, s. 7 z późn. zm.). Wprowadzają one obowiązek zapewnienia właściwej ochrony gatunkom ujętym w załączniku nr 1 dyrektywy, a także regularnie

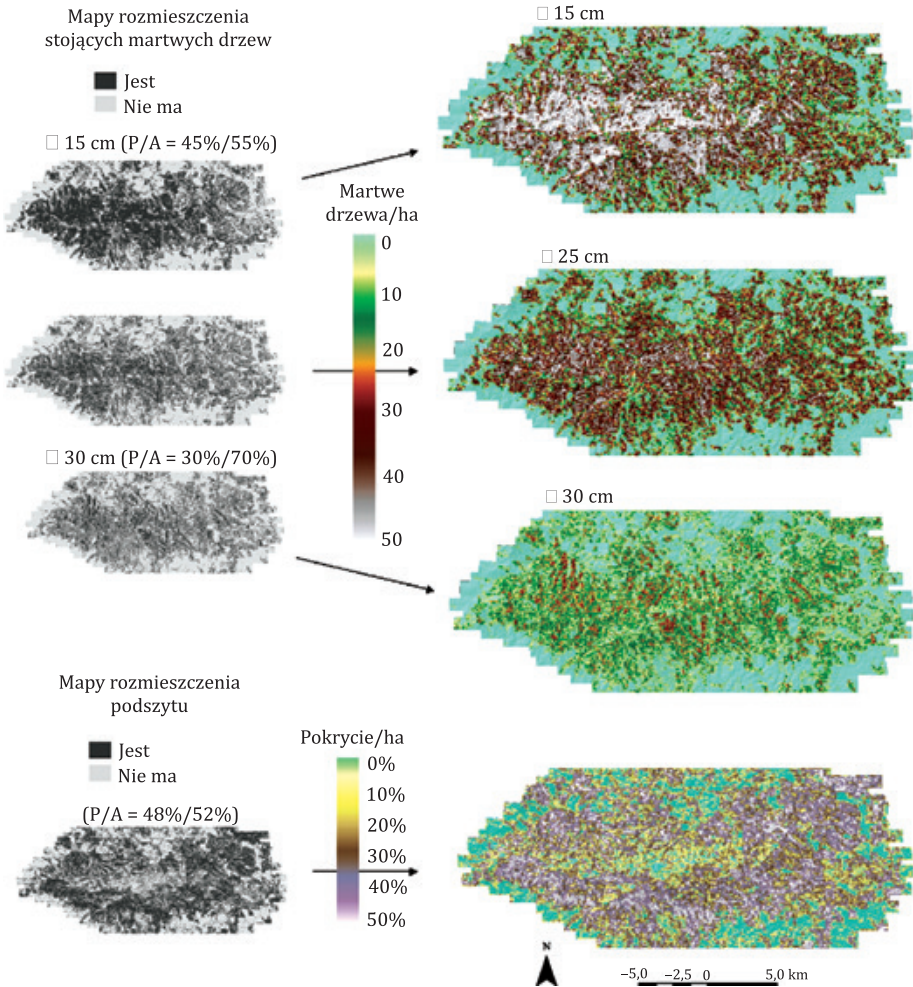
występującym gatunkom migrującym. Drugim elementem sieci są Specjalne Obszary Ochrony (SOO) siedlisk (bądź do momentu powołania rozporządzeniem Ministra Środowiska – obszarów mających znaczenie dla Wspólnoty) utworzone w celu ochrony siedlisk przyrodniczych, gatunków roślin i zwierząt (innych niż ptaki) wymienionych w załącznikach Dyrektywy Rady 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 roku w sprawie ochrony siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory (Dz.U. L 206 z 22.7.1992, str.7 z późn. zm.).

Zgodnie z obowiązującym prawem, sprawujący nadzór nad obszarami Natura 2000 zobowiązany jest do zaplanowania i prowadzenia monitoringu stanu ochrony siedlisk przyrodniczych lub gatunków roślin i zwierząt oraz ich siedlisk, będących przedmiotami ochrony w obszarze (art. 28 ust. 10. oraz art. 29 ust. 8 ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz.U. z 2004 r. Nr 92 poz. 880 z późn. zm.).

### 6.12.2. Monitoring obszarów Natura 2000 i ocena jakości siedlisk

W przypadku gatunków zwierząt i roślin kwestią fundamentalną, warunkującą występowanie gatunku w danym miejscu, jest jakość siedliska. Charakterystyka siedliska, np.: wysokość drzew, obecność i stopień zróżnicowania podszytu, obecność i wielkość martwych oraz zamierających drzew – bezpośrednio rzutują na możliwość występowania danego gatunku, sposób wykorzystywania przez niego danej niszy ekologicznej (żerowisko, miejsce rozrodu), a także na poziom różnorodności biologicznej (ryc. 6.43).

Możliwość rozpoznania siedlisk ważnych dla właściwego funkcjonowania populacji zwierząt oraz umiejętność oceny kierunku zmian zachodzących w miejscach istotnych dla konkretnych gatunków stanowi obecnie jeden z głównych problemów związanych z zarządzaniem Europejską Siecią Ekologiczną Natura 2000. Stanowi to również wyzwanie dla organów administracji sporządzających raporty oparte na wynikach monitoringu na poziomie kraju bądź regionu biogeograficznego. Bez identyfikacji oraz oszacowania stanu zachowania elementów składających się na „obszar funkcjonalny” gatunku, stanowiący sumę siedlisk wykorzystywanych jako miejsca rozrodu, żerowiska, miejsca odpoczynku podczas migracji itp., nie można w konsekwencji zaplanować działań zmierzających do zapewnienia właściwego stanu zachowania przedmiotu ochrony w obszarze. Z punktu widzenia sprawującego nadzór nad obszarem Natura 2000 kluczowe jest zatem określenie, jakie siedliska bądź elementy występujące w środowisku mogą wchodzić w skład „obszaru funkcjonalnego” i jakie cechy siedliska mogą rzutować na zachowanie gatunku w przyszłości. Również dane topograficzne (a także batymetryczne) są niezwykle istotne podczas badań nad strukturą, składem i funkcją systemów ekologicznych. Dysponując wiedzą o tym, co powinno być przedmiotem analiz (wilgotność siedlisk, zagrożenie erozyjne, zróżnicowanie struktury drzewostanu, wiek, zwarcie drzewostanu, obecność martwego drewna, wysokość runa, stopień pofragmentowania itp.), kolejnym problemem staje się wybór metod umożliwiających cykliczne uzyskiwanie potrzebnych danych – powtarzalnych, obiektywnych oraz możliwie mało kosztownych.



Ryc. 6.43. Mapy rozmieszczenia martwego drewna w różnych klasach oraz podszytu opracowane z wykorzystaniem danych ALS (źródło: Martinuzzi S. i in., 2009)

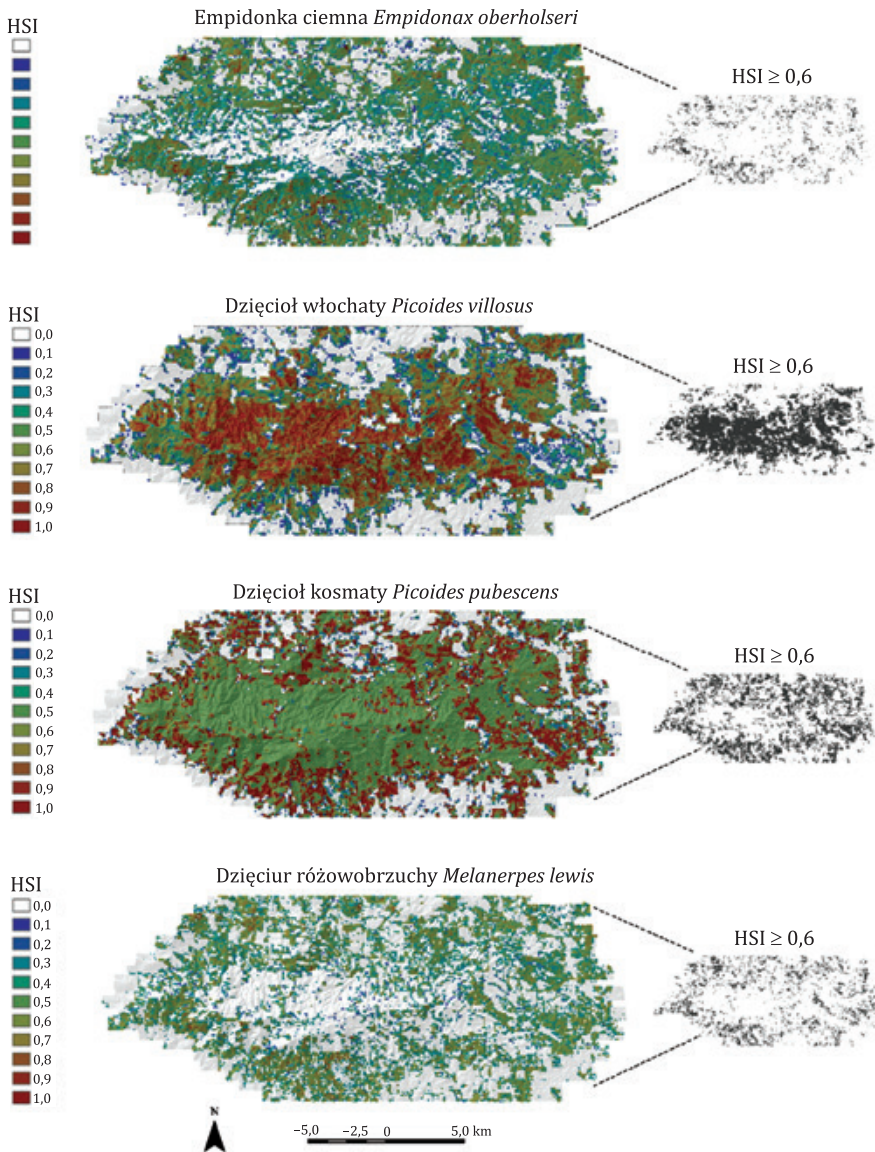
### 6.12.3. Zakres zastosowania lotniczego skanowania laserowego w ochronie przyrody

Tradycyjne metody monitorowania zmian zachodzących na konkretnej powierzchni, polegające na kontrolowaniu przez zespoły badawcze obszaru podczas badań terenowych, są zazwyczaj kosztowne, wymagają znacznych zasobów ludzkich i czasowych oraz mogą być obciążone subiektywizmem wynikającym zarówno z różnego doświadczenia terenowego, jak i poziomu wiedzy eksperckiej osób prowadzących takie badania. Także metody fotogrametryczne oparte na analizach zdjęć lotniczych bądź danych

pochodzących z innych, alternatywnych do bezpośrednich „naziemnych” metod pozyskiwania danych mają swoje ograniczenia. Na terenach leśnych silne zwarcie koron drzew uniemożliwia użycie zdjęć lotniczych do oceny dna lasu. Podobnie w terenach o niewielkim zróżnicowaniu rzeźby terenu (np. terenach podmokłych czy wydmowych) występują ograniczenia pomiarów 3D na stereogramach. W takich przypadkach wykorzystanie technologii lotniczego skanowania laserowego ALS stanowi alternatywę umożliwiającą zgromadzenie nieporównywalnie większej liczby obiektywnych danych, pozyskiwanych na całym obszarze zainteresowania w znacznie krótszym czasie.

Ze względu na wykorzystywanie w technologii ALS wysyłanego promienia laserowego mierzącego odległość między sensorem a obiektem, pomierzone dane są przydatne przy wykrywaniu mikroform krajobrazowych niewidocznych z użyciem innych technik. Mogą do nich należeć np. niewielkie źródła cieków bądź zbiorniki wodne zasłonięte przez drzewa, a także struktury znajdujące się pod powierzchnią wody (użycie skanerów batymetrycznych). Możliwe jest zatem monitorowanie ewentualnych zmian w ekosystemach bez konieczności prowadzenia kosztownych badań terenowych (pomiarów zmian głębokości, przebiegu linii brzegowej itp.). Dane zgromadzone za pomocą tego systemu są również pomocne przy śledzeniu zmian dotyczących tempa i zasięgu sedymentacji oraz erozji, zaniku cieków, zmian w pokryciu roślinnością oraz poziomu i zasięgu presji antropogenicznej. W szczególnych wypadkach technologia ALS jest przydatna i bardzo precyzyjna przy określaniu wysokości drzew, szacowaniu pierśnicy pni, charakterystyk pokrywy roślinnej, biomasy, identyfikacji poszczególnych drzew i rozróżnianiu poszczególnych zbiorowisk czy określaniu indeksu powierzchni aparatu asymilacyjnego (ang. *Leaf Area Index*). Zdolność, którą dają dane ALS, do rozróżniania drzewostanów o różnym składzie gatunkowym oraz oceny parametrów struktury (np. zwarcia koron czy obecność i zasobność podszytu oraz podrostu) umożliwia tworzenie map rozmieszczenia biomasy. W szczególnych przypadkach jest to przydatne, np. do określania zagrożenia pożarowego. Wykorzystanie technologii lotniczego skanowania laserowego jest także pomocne w przypadku znacznie przekształconych i pofragmentowanych zbiorowisk leśnych znajdujących się na zróżnicowanym topograficznie terenie i tworzących, wraz z otaczającymi je innymi typami roślinności, swoistą mozaikę krajobrazową. Prowadzenie prac monitoringowych może być w takich warunkach bardzo utrudnione i kosztowne.

W przypadku wielu gatunków roślin, ich przestrzenna różnorodność jest kluczem do scharakteryzowania siedlisk i może w istotny sposób wpływać na ich jakość. W badaniach Hinsley i in. (2006) nad ptakami leśnymi, dzięki zastosowaniu technologii ALS w określaniu wysokości koron drzew, ustalono zależności pomiędzy warunkami klimatycznymi a zasobnością siedlisk, co rzutowało na stan zachowania populacji. Powszechnie stosowane obecnie metody szacowania jakości strukturalnej terytoriów ptaków leśnych wymagają bezpośredniego dostępu ornitologów do powierzchni próbnych. Są więc pracochłonne i czasochłonne, a często trudne do zintegrowania i ograniczone do niewielkich obszarów. Na tym tle technologia ALS pozwala na uzyskanie precyzyjnych danych, umożliwiając szacowanie jakości siedlisk w skali krajobrazowej. W szczególnych przypadkach ALS jest również przydatny przy rozpoznawaniu cech siedlisk warunkujących występowanie konkretnych gatunków (ryc. 6.44).



Ryc. 6.44. Mapy potencjalnych siedlisk różnych gatunków dzięciołów opracowane z wykorzystaniem danych ALS (źródło: Martinuzzi i in. 2009)

Badania Fortina i in. (2005) wskazują również, iż technologia ALS jest przydatna przy monitorowaniu zmian kaskadowych będących efektem wprowadzenia do środowiska nowego, nieznanego wcześniej elementu, np. przy introdukcji (bądź spontanicznego pojawienia się) dużych drapieżników. Oprócz bezpośredniego oddziaływania na popu-

lację ofiar (eliminacja osobników z populacji), drapieżniki mogą oddziaływać pośrednio przez tzw. miejsca zagrożeń (ang. *landscape of fear*). Badania wskazują, że te pośrednie oddziaływania mają ogromny wpływ na interakcje między roślinożercami a roślinami. W efekcie zmianie ulega zachowanie ofiar, ich wybiórczość środowiskowa oraz rozmieszczenie przestrzenne. Zmiany trudne do uchwycenia za pomocą tradycyjnych metod pomiarów naziemnych mogą mieć znaczący wpływ na funkcjonowanie obszarów chronionych i zachowanie występujących w nich siedlisk we właściwym stanie.

#### 6.12.4. Podsumowanie

Wyniki dotychczasowych zagranicznych badań naukowych (np. w Parku Narodowym Las Bawarski) wskazują, że w wielu przypadkach technologia ALS stanowi wygodne narzędzie do prowadzenia monitoringu stanu zachowania siedlisk przyrodniczych stanowiących przedmiot ochrony w obszarach Natura 2000, parkach narodowych czy rezerwach, a także podczas działań odtworzeniowych. Dane ALS umożliwiają dobre rozpoznanie cech charakterystycznych siedlisk gatunków zwierząt i są używane do monitorowania ich stanu zachowania w obszarach chronionych i poza nimi, w tym również przebiegu i charakterystyki przestrzennej korytarzy ekologicznych oraz innych obszarów zaliczanych do zielonej infrastruktury (ang. *Green Infrastructure*) czy terenów o wysokiej wartości przyrodniczej (ang. *High Nature Value*). Lotnicze skanowanie laserowe znajduje również zastosowanie podczas oceny wpływu powstających morskich elektrowni wiatrowych na środowisko — np. przez ocenę wpływu powstających wokół nich „sztucznych raf” na poziom różnorodności biologicznej. W środowisku wodnym znaczący wpływ na rozmieszczenie i strukturę zgrupowań ryb ma złożoność siedlisk. W badaniach Wedding i in. (2008) wskazano wysoką zgodność danych uzyskanych za pomocą lotniczego skanowania laserowego z danymi zebranymi podczas badań terenowych. W efekcie dane uzyskane za pomocą tej technologii stanowiły dobre predyktory biomasy ryb i wykazywały znaczący związek z wieloma charakterystykami zgrupowań ryb związanych ze środowiskiem raf. Ponadto możliwe było przeprowadzenie pomiarów w krótkim czasie na znaczną skalę (~100 km<sup>2</sup> dziennie). W opinii autora dane ALS mają praktyczne zastosowanie np. przy wyborze optymalnych miejsc ochrony na obszarach morskich oraz zarządzaniu ochroną już istniejących obszarów. Podobne analizy wykonuje się dla obszarów farm wiatrowych na lądzie, przeprowadzając oceny ich oddziaływania na środowisko.

#### Literatura

- Bässler C., Stadler J., Müller J., Förster B., Göttlein A., Brandl R., 2011. LiDAR as a rapid tool to predict forest habitat types in Natura 2000 networks, *Biodiversity and Conservation*, Volume 20, Issue 3, 465–481.
- Fortin D., Beyer H. L., Boyce M. S., Smith D. W., Duchesne T., Mao J. S., 2005. *Wolves influence elk movements: behavior shapes a trophic cascade in Yellowstone National Park*. *Ecology* 86, 1320–1330.
- Hinsley S. A., Hill R. A., Bellamy P. E., Baltzer H., 2006. *The application of LiDAR in woodland bird ecology: climate, canopy structure, and habitat quality*. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72, 1399–1406.

- Koarai M., Nakano T., Sato H. P., Yoshida T., Yamashita A., Nagasawa R., Hioki Y., 2010. *Landscape ecological mapping using LiDAR data for biodiversity evaluation*. Int. Arch. Photogram. Spatial Inf. Sci. 38, 501–507.
- Kuijper D. P. J., de Kleine C., Churski M., van Hooft P., Bubnicki J., Jędrzejewska B., 2013. *Landscape of fear in Europe: wolves affect spatial patterns of ungulate browsing in Białowieża Primeval Forest, Poland*. Ecography 36, 1263–1275.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Parker G. G., Harding D. J., 2002. *LiDAR remote sensing for ecosystem studies*. BioScience 52, 19–30.
- Mackiewicz M., 2010. Praca dyplomowa: *Zastosowanie lotniczego skaningu laserowego w kartowaniu pokrycia terenu projektowanej Ostoi ESE Natura 2000 – „Dębnicko-Tynieckiego obszaru łąkowego” w Krakowie*.
- Martinuzzi S., Vierling L. A., Gould W. A., Falkowski M. J., Evans J. S., Hudak A. T., Vierling K. T., 2009. *Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability*. Remote Sens. Env. 113, 2533–2546.
- Rejt Ł., 2000. *Siedliska ptasie – przedmiot ochrony w obszarach Natura*, [w:] D. Zawadzka, M. Ciach, T. Figarski, Ł. Kajtoch, Ł. Rejt (red.), 2013, *Materiały do wyznaczania i określania stanu zachowania siedlisk ptasich w obszarach specjalnej ochrony ptaków Natura 2000*. GDOŚ, Warszawa, 7–13.
- Swetnam T., Powell B., 2010. *Example of the use of LiDAR for monitoring vegetation characteristics: an example from the Cienega Creek Nature Preserve*. Supplement to the Pima County Ecological Monitoring Program. Phase II Monitoring Plan Summary.
- Wedding L. M., Friedlander A. M., McGranaghan M., Yost R. S., Monaco M. E., 2008. *Using bathymetric LiDAR to define nearshore benthic habitat complexity: Implications for management of reef fish assemblages in Hawaii*. Remote Sens. Env. 112, 4159–4165.
- Zhao K., Popescu S., 2009. *LiDAR-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOB-CARBPN satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA*. Remote Sens. Env. 113, 1628–1645.
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz.U. z 2004 r. Nr 92 poz. 880 z późn. zm.).
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/147/WE z dnia 30 listopada 2009 roku w sprawie ochrony dzikiego ptactwa (Dz.U. L 20 z 26.1.2010, s. 7 z późn. zm.).
- Dyrektywa Rady 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 roku w sprawie ochrony siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory (Dz.U. L 206 z 22.7.1992, str. 7 z późn. zm.).

mgr inż. Piotr Dobrzyński

## 6.13. Poprawa jakości danych gromadzonych w Centralnym Rejestrze Form Ochrony Przyrody za pomocą danych ALS

### 6.13.1. Informacja o podstawie prawnej

W dniu 28 września 2012 roku, po wejściu w życie ustawy o infrastrukturze informacji przestrzennej znowelizowano i dostosowano do wymogów INSPIRE zapisy dotyczące Centralnego Rejestru Form Ochrony Przyrody, tworząc rozporządzenie Ministra Środowiska

wiska z dnia 11 września 2012 r. w sprawie centralnego rejestru form ochrony przyrody (Dz.U. z 2012 r. poz. 1080) określające:

- 1) zakres informacji dotyczący form ochrony przyrody, o których mowa w art. 6 ust. 1 pkt 1–9 ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody, gromadzonych w centralnym rejestrze form ochrony przyrody, zwanym dalej „rejestrem”,
- 2) organizację, tryb i standardy techniczne tworzenia rejestru,
- 3) sposób aktualizacji rejestru oraz udostępniania danych zawartych w rejestrze.

Akronim INSPIRE to skrót od INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe (Infrastruktura Informacji Przestrzennej w Europie). Innymi słowy, jest to zespół środków prawnych, organizacyjnych i technicznych, wraz z powiązаныmi z nimi usługami, oferujący powszechny dostęp do danych przestrzennych na terenie Unii Europejskiej. Ma on wspomagać ustawodawców w podejmowaniu decyzji i działań mogących mieć bezpośredni lub pośredni wpływ na środowisko.

Dyrektywa 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) (Dz.U. L 108 z 25.04.2007, str. 1–14) bazuje na infrastrukturze danych przestrzennych (ang. *Spatial Data Infrastructure*) państw członkowskich UE. Elementem tej infrastruktury stał się Centralny Rejestr Form Ochrony Przyrody (CRFOP) i Geoserwis. Dane przestrzenne podzielone są na grupy tematyczne ujęte w Aneksach dyrektywy.

W ramach wdrażania Dyrektywy INSPIRE, w każdym z państw członkowskich powstają węzły infrastruktury INSPIRE umożliwiające dostęp do odpowiednio zharmonizowanych zasobów danych przestrzennych w formie usług sieciowych, serwisów katalogowych oraz, przede wszystkim, poprzez metadane. W przypadku usług pochodzących z CRFOP są to:

- <http://sdi.gdos.gov.pl/wms> – usługa przeglądania,
- <http://sdi.gdos.gov.pl/wfs> – usługa pobierania,
- <http://sdi.gdos.gov.pl/csw> – usługa wyszukiwania.

Dyrektywa INSPIRE ma na celu usprawnienie i zwiększenie dostępu do zasobów danych przestrzennych, jak również wzmocnienie współpracy między instytucjami w Europie. Dyrektywa bazuje na wymianie danych przestrzennych oraz analizach wykonanych na ich podstawie. W swych założeniach ujednocila zasady przechowywania i udostępniania danych oraz związanych z nimi usług przez organy rządowe i samorządowe, jak również jednostki prywatne, które zdecydują się udostępnić swoje zasoby zgodnie z wytycznymi INSPIRE.

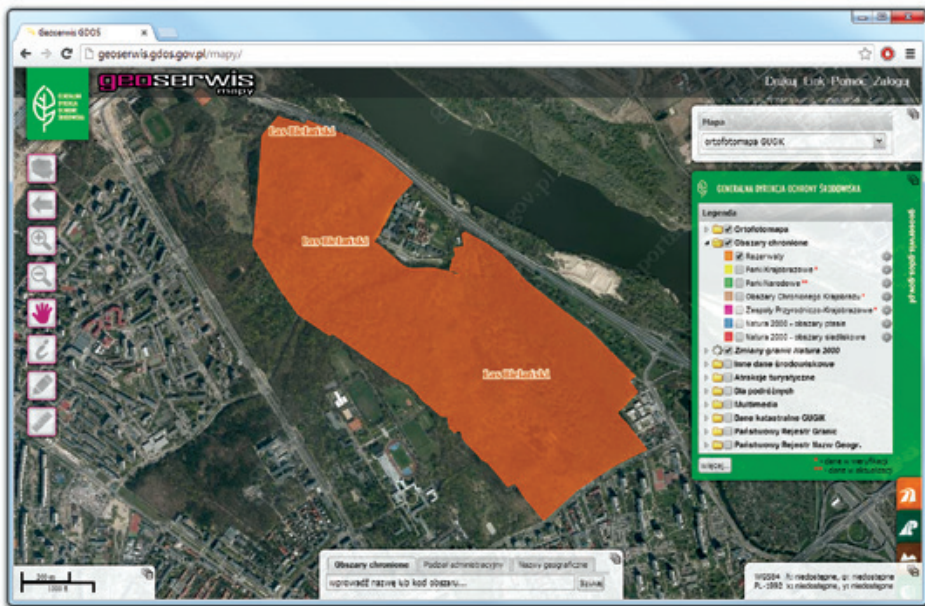
### 6.13.2. Poprawa jakości danych przy użyciu produktów technologii ALS

Geoserwis GDOŚ i Centralny Rejestr Form Ochrony Przyrody jest rejestrem referencyjnym form ochrony przyrody w Polsce, a także węzłem europejskiej infrastruktury INSPIRE. Konieczne zatem jest zapewnienie odpowiedniej jakości i wiarygodności danych. W związku z tym rejestr podlega rygorystycznym normom i specyfikacjom. Granice form ochrony



przyrody prezentowane w geoserwisie oraz informacje zawarte w centralnym rejestrze form ochrony przyrody oparte są na opisie granicy zawartym w akcie powołującym formę ochrony przyrody (ryc. 6.45). Znaczna część z tych opisów jest archiwalna, nie aktualizowana od wielu lat i trudna do precyzyjnego odtworzenia. Poniżej przykładowe opisy granic:

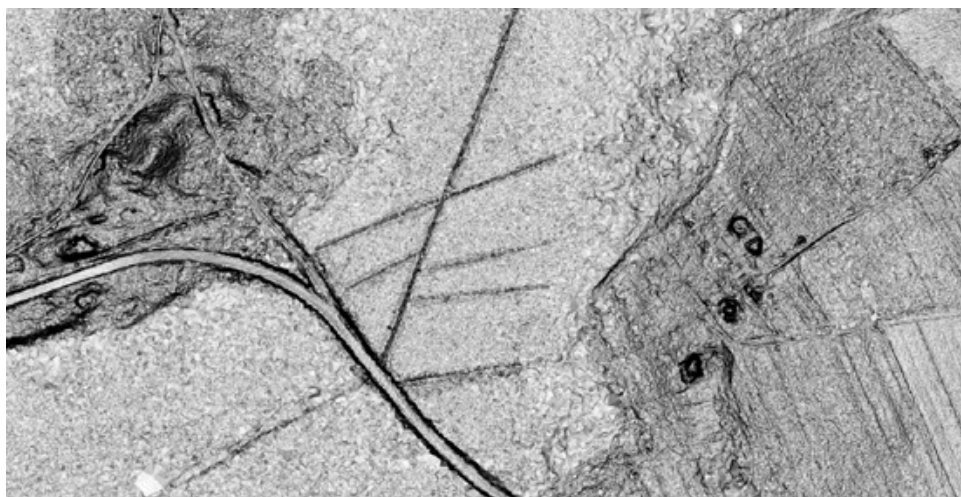
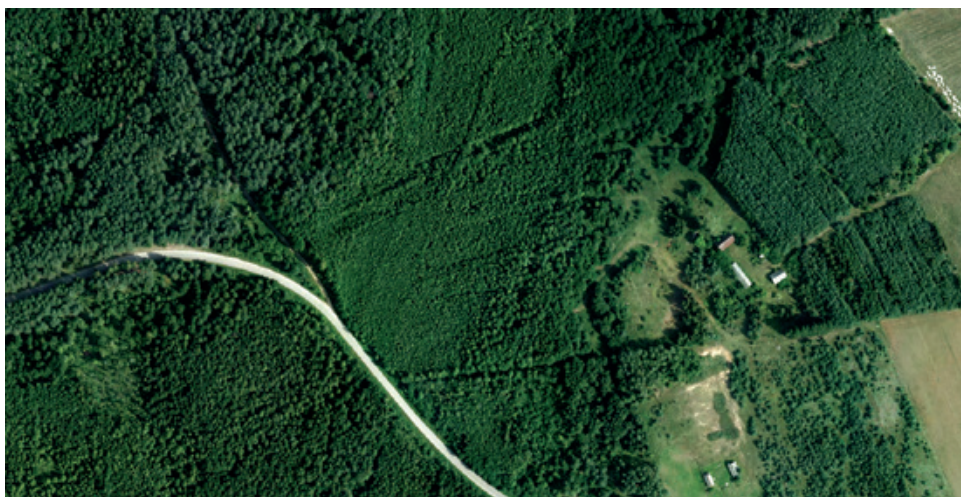
- Nadwieprzański Park Krajobrazowy – Rozporządzenie Nr 2 Wojewody Lubelskiego z dnia 23 marca 2005 r. w sprawie Nadwieprzańskiego Parku Krajobrazowego (Lubel.2005.73.1523): „Od Kol. Ostrówek granica parku biegnie skrajem lasu w kierunku Maryniowa i zachodniej części Białki. Stąd drogą polną pomiędzy podmokłościami i lasem Zastawie do pierwszego od zachodu rowu melioracyjnego na południe od skraju lasu Siostrzytowskiego. Obrzeżeniem lasu na południe, wschód i północ od duktu leśnego biegnącego ku wschodowi między oddziałami lasu nr 48 i 50”;
- Strzelecki Park Krajobrazowy – Rozporządzenie Nr 34 Wojewody Lubelskiego z dnia 12 czerwca 2003 r. w sprawie Strzeleckiego Parku Krajobrazowego (Lubel.2003.86.2261): opis granicy otuliny „Około 1 km przed Teratynem granica skręca na północ biegnąc linią przesyłową wysokiego napięcia, by dojść do drogi wojewódzkiej nr 846 Horodło-Krasnystaw” (linia energetyczna nieistniejąca lub zamieniona na podziemną).



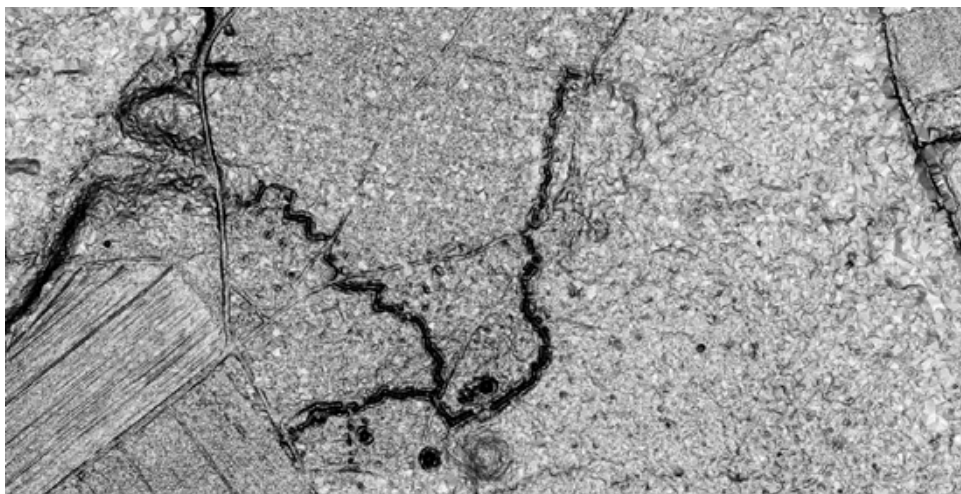
Ryc. 6.45. Granice wybranych form ochrony przyrody na portalu geoserwis GDOŚ

Technologią, która w znaczący sposób ułatwia poprawne zidentyfikowanie przebiegu granicy, a tym samym wpływa na poprawę jakości zgromadzonych danych w rejestrze, jest niewątpliwie lotnicze skanowanie laserowe. Za pomocą odpowiednich narzędzi

dzi, dane ALS pozwalają zorientować się w przebiegu często „zatartego” i niewidocznego w terenie ani na ortofotomapie lotniczej rowu, polnej drogi czy zlikwidowanej linii energetycznej, które często są wykorzystywane jako elementy opisujące przebieg formy ochrony przyrody. Ponadto lotnicze skanowanie laserowe pozwala „zajrzeć” w przeszłość pod okap drzewostanu i umożliwia odtworzenie przebiegu niewidocznych już w terenie rowów oraz granicy rolno-leśnej, która ulega ciągłej zmianie (ryc. 6.46 i 6.47).



Ryc. 6.46. Przykład odwzorowania przebiegu rowu całkowicie nieczytelnego na ortofotomapie lotniczej, a możliwego do wektoryzacji na modelu cieniowanego reliefu NMT (źródło: MGGP Aero sp. z o.o.)



Ryc. 6.47. Przykład odwzorowania przebiegu drogi i cieku niewidocznych na ortofotomapie lotniczej, możliwych do wektoryzacji na modelu cieniowanego reliefu NMT (źródło: MGGP Aero sp. z o.o.)

### 6.13.3. Podsumowanie

Dostęp do szczegółowych opracowań na podstawie danych ALS wpływa na podniesienie jakości danych gromadzonych w rejestrze i budowie jego wiarygodności, co bezpośrednio przekłada się na jakość podejmowanych decyzji administracyjnych.

W najbliższym czasie GDOŚ planuje zrealizować projekt: „Weryfikacja i aktualizacja informacji przestrzennej i opisowej o pomnikach przyrody i użytkach ekologicznych na

terenie Polski zgodnie z wytycznymi zawartymi w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 11 września 2012 r. w sprawie centralnego rejestru form ochrony przyrody (Dz.U. z 2012 r. poz. 1080)”. W projekcie dane z lotniczego skanowania laserowego zostaną wykorzystane do weryfikacji położenia pomników przyrody oraz weryfikacji pomiarów wysokości drzew pomnikowych, przyczyniając się do podniesienia jakości danych przestrzennych pozyskanych w ramach projektu.

## Literatura

- Bässler C., Stadler J., Müller J., Förster B., Göttlein A., Brandl R., 2011. *LiDAR as a rapid tool to predict forest habitat types in Natura 2000 networks, Biodiversity and Conservation*. Volume 20, Issue 3, 465–481.
- Dyrektywa 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) (Dz.U. L 108 z 25.04.2007, s. 1–14).
- Mackiewicz M., 2010. Praca dyplomowa: *Zastosowanie lotniczego skaningu laserowego w kartowaniu pokrycia terenu projektowanej Ostoi ESE Natura 2000 – „Dębnicko-Tynieckiego obszaru łąkowego” w Krakowie*.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 września 2012 r. w sprawie centralnego rejestru form ochrony przyrody (Dz.U. z 2012 r. poz. 1080).
- Vierling K., Vierling L., Gould W., Martinuzzi S., Clawges R., 2008. *LiDAR: shedding new light on habitat characterization and modeling*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 90–98.

dr inż. Piotr Tompański  
dr hab. inż. Piotr Wężyk

## 6.14. Analizy struktury 2D i 3D roślinności drzewiastej

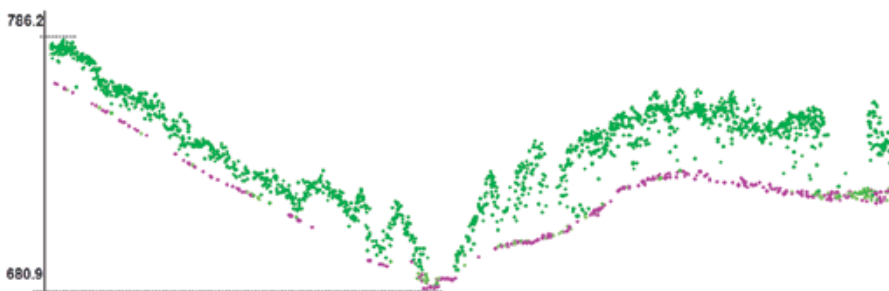
### 6.14.1. Historia ALS w badaniach w leśnictwie

Za początki technologii skanowania laserowego w leśnictwie można uznać rok 1965, kiedy to użyto półprzewodnikowego gazowego laserowego „profilera” do ciągłego pomiaru odległości terenu od samolotu. Prowadziło to do generowania profili podłużnych wzdłuż osi lotu samolotu, z wysokości względnej około 300–1000 m. Dokładność pionowa profilu wynosiła około 1,5 m w pionie. Zastosowano laser typu fali ciągłej o modulowanej częstotliwości fali, który następnie zintegrowano z kamerą wykonującą zdjęcia szeregowe. Przełomowym momentem w rozwoju technologii ALS była możliwość nadania chmurze punktów ALS georeferencji dzięki wykorzystaniu systemu nawigacyjnego NAVSTAR-GPS. Dodanie kolejnego podsystemu IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*) i zintegrowanie go z odbiornikiem GPS pozwoliło osiągnąć dokładność położenia skanera w przestrzeni na poziomie 4–7 cm. Kluczowa w dalszym rozwoju skanerów lotniczych była możliwość odchylenia wiązki lasera od pionu

(ang. *nadir-off*) poprzecznie do kierunku nalotu, uzyskując znacznie większe obszary złożone z nakładających się na siebie szeregow. Współcześnie najczęściej stosowane systemy LiDAR ALS w leśnictwie charakteryzują się skanowaniem w zakresie 20–30 stopni od pionu.

### 6.14.2. Charakterystyka ALS a specyfika środowiska leśnego

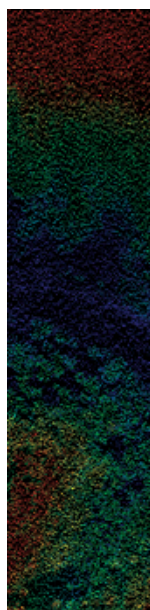
W przypadku wykorzystania lotniczego skanowania laserowego do pomiarów drzew, zadrzewień i drzewostanów bardzo istotną cechą jest zdolność wiązki laserowej do penetracji koron drzew i warstwy krzewów (podszytu i podrostu). Rezultatem jest rejestracja odbić (echa sygnału; zarejestrowane punkty) zarówno w obrębie szczytowych partii koron, jak i pod ich okapem. Skanery stosowane współcześnie są zdolne do rejestracji kilku odbić z każdej wysłanej wiązki (np. do 4 systemów impulsowych czy do bardzo wielu w przypadku skanerów typu pełnej fali – *full-waveform*) od poszczególnych warstw drzewostanu oraz gruntu. Realizowane projekty wykazały, iż nawet w drzewostanach liściastych w okresie pełnej wegetacji około 15–20% promieni lasera dociera do gruntu. Wartość ta znacząco wzrasta, kiedy drzewa pozbawione są liści. W drzewostanach iglastych pora roku ma jedynie znacznie ze względu na występowanie podszytu lub podrostów liściastych i bogatego runa (np. zwartych traw osłaniających grunt). W obszarach o bardzo dużych spadkach czy w przypadku koron „zwisających” nad głębokimi dolinami czy jarami (ryc. 6.48) mamy do czynienia z przeszacowaniem wysokości względnych drzew w procesie normalizacji. Proces ten pozwala na transformację chmury punktów ALS rzędnej wysokości bezwzględnych (n.p.m.) do wartości wysokości względnych (nad gruntem, który otrzymuje wartości zero; ryc. 6.49). Generowanie numerycznych modeli pokrycia terenu oraz numerycznych modeli terenu (ryc. 6.50–6.52) prowadzi jednak najczęściej do zaniżenia wysokości względnych drzew z powodu stosowania opcji wygładzania modeli z występujących pojedynczych pików w koronach i zagłębień w gruncie oraz problemy trafienia plamki lasera na wierzchołek drzewa w przypadku gatunków iglastych (ryc. 6.53).



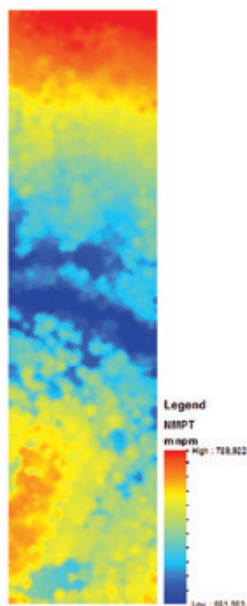
Ryc. 6.48. Profil przez chmurę punktów ALS z wysokościami bezwzględnymi n.p.m.



Ryc. 6.49. Profil przez chmurę punktów ALS z wysokościami względnymi (0,0–40,1 m) po normalizacji



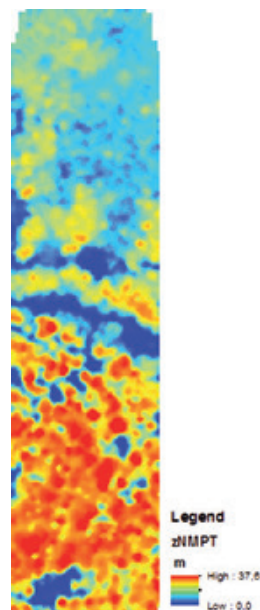
Ryc. 6.50. Chmura punktów ALS (wysokości bezwzględne)



Ryc. 6.51. Rastrowy NMPT (oczko GRID 1,0 m; wysokości bezwzględne)



Ryc. 6.52. Cieniowany NMT (TIN; wysokości bezwzględne)



Ryc. 6.53. Rastrowy zNMPT (oczko GRID 1,0 m; wysokości względne po normalizacji)

### 6.14.3. Inwentaryzacja zasobów leśnych a metody ALS

Realizacja zrównoważonej gospodarki leśnej wiąże się z koniecznością posiadania precyzyjnych danych na temat m.in.: składu gatunkowego, struktury poziomej i piętrowej drzewostanów, wybranych parametrów i cech taksacyjnych drzew, przewidywanych sortymentów oraz zasobności i zapasu, czyli szeroko rozumianej biomasy. W wielu krajach europejskich inwentaryzacja obszarów leśnych oparta była na wypracowanych przez bardzo wiele dziesięcioleci, tradycyjnych naziemnych metodach pomiarowych lub rzadziej fotogrametrycznych. Określenie wybranych cech taksacyjnych drzew

i drzewostanów, a w efekcie zasobności i zapasu, sprowadza się zazwyczaj do pomiaru drzew na tzw. powierzchniach kołowych, rozlokowanych najczęściej w regularnej sieci. Czynności pomiarowe ograniczają się więc do pozyskania informacji o gatunku drzewa, pierśnicy (średnicy pnia na wysokości 1,3 m nad gruntem), wysokości wierzchołka (H) kilku drzew oraz o liczbie drzew (parametr zagęszczenia). Na stałych kołowych powierzchniach obserwacyjnych lokalizacja drzewa (najczęściej pomiar biegunowy) stanowi bardzo ważną informację, ze względu na możliwość monitorowania zmian następujących w drzewostanach w czasie (sekwestracja węgla, zmiany klimatyczne, monitoring stanu zdrowotnego, integracja z innymi danymi teledetekcyjnymi). Przewodzenie prac z zakresu inwentaryzacji lasu jest bardzo czasochłonne, a tym samym kosztowne przy obserwowanym ciągłym wzroście kosztów pracy. Pozyskiwanie danych o charakterze 3D dla rozległych obszarów leśnych daje szansę na obiektywne ich analizowanie i uniknięcie wielu niedogodności związanych z ograniczeniami metod tradycyjnych bazujących na powierzchniach kołowych. Wykorzystanie danych ALS w aplikacjach z zakresu leśnictwa podzielić można na dwa podejścia. Sposób pierwszy bazuje na wykorzystywaniu informacji geometrycznych zawartych w chmurze punktów ALS, tj. ich rozkładu przestrzennego 3D (przed i po normalizacji), czyli podejście do obliczeń na pojedynczych punktach o współrzędnych (X,Y,Z) (dalej nazwane podejściem wektorowym). Sposób drugi (dalej: podejście rastrowe) bazuje na generowaniu modeli wysokościowych, czyli aproksymowanych powierzchni tworzonych przez korony drzew (NMPT; MKD – Model Koron Drzew) lub grunt (NMT). Bardzo istotnym rastrowym modelem wysokościowym, w przypadku inwentaryzacji zasobów leśnych, jest znormalizowany numeryczny model pokrycia terenu (zNMPT), który przedstawia wysokości względne okapu drzewostanu i pozwala na bezpośredni pomiar wysokości drzew, a także delinearację pojedynczych koron. W niektórych zastosowaniach w leśnictwie stosowane jest podejście hybrydowe wykorzystujące zarówno podejście wektorowe (punkty) i rastrowe (piksele).

Metody analiz chmur punktów ALS w kontekście inwentaryzacji lasu dzieli się także ze względu na ich skalę. Wyróżnia się metody, w których podstawowym obiektem analiz są pojedyncze drzewa (ang. *individual tree-based approach*) oraz takie, w których analizy przeprowadza się na wybranej powierzchni (ang. ABA – *area-based approach*) obejmującej homogeniczne fragmenty drzewostanu lub piksele o wielkości wynoszącej zwykle  $20 \times 20$  m lub  $25 \times 25$  m. Każdy z wymienionych sposobów inwentaryzacji ma swoje zalety i wady. Pierwsza metoda wymaga zwykle bardzo dużej gęstości punktów pierwszych i ostatnich odbić (w zależności od typu skanera, typu drzewostanu, gęstość pkt. min.  $> 6$  pkt  $m^2$ ), co powoduje podniesienie kosztów nalotu i czasu przetwarzania danych. Analizy przeprowadzane są na poziomie pojedynczych koron drzew i w związku z tym są one bardzo szczegółowe.

Metody oparte na powierzchniach (ang. ABA) charakteryzują się większą prostotą i mniejszą szczegółowością. Poszczególne cechy drzewostanów analizowane są w obrębie pikseli o wymiarach kilkudziesięciu metrów. Umożliwia to większą generalizację wyników, która jednak wciąż pozwala zaobserwować zmienność cech drzewostanów nawet w obrębie wydzieleń. Metody bazują na takich parametrach, jak rozkład przestrzenny odbić (wysokości znormalizowane), współczynnikach kolejnych odbić wzglę-

dem wszystkich czy zwarciu koron (z odpowiednio zastosowanym progowaniem). Parametry mogą być wykorzystane w modelowaniu statystycznym jako zmienne niezależne.

Niezależnie od zastosowanego podejścia, niektóre z cech taksacyjnych określane są pośrednio w wyniku modelowania statystycznego chmury punktów ALS. Zaliczyć można do nich m.in.: średnicę drzewa (aproksymowaną na podstawie wysokości i ich zagęszczenia drzew), pole pierścnicowego przekroju (g) oraz miąższość. Do ich określenia wykorzystuje się zależności z pionowym rozkładem odbici wiązki laserowej, takie jak np. 95-ty percentyl wysokości względnej punktów, odchylenie standardowe wysokości lub odsetek punktów powyżej określonej wartości progowej.

#### 6.14.4. Cechy taksacyjne określane na podstawie analiz danych ALS

Bezpośrednie wykorzystanie chmur punktów ALS w przypadku drzew i drzewostanów pozwala przede wszystkim na dokładny pomiar ich wysokości. Przy zachowaniu odpowiedniej gęstości skanowania, kształtuje się ona poniżej kilkudziesięciu cm i tylko nieznacznie jest zaniżana w stosunku do wysokości rzeczywistej. Zdarza się to szczególnie w przypadku gatunków drzew iglastych o bardzo wyraźnie wykształconym wierzchołku (świerk, jodła). Związane jest to z faktem, iż wiązka lasera nie zawsze natrafia na niewielki pęd szczytowy w koronie drzewa, przez co pierwsze odbicie następuje w niższej partii korony.

Szczegółowość, z jaką chmury punktów odzwierciedlają górną powierzchnię drzewostanu pozwala na automatyczną detekcję pojedynczych koron drzew, a tym samym pozwala określić ich liczbę i zagęszczenie. Stosowane w tym celu algorytmy w pierwszym kroku lokalizują wierzchołek drzewa, a następnie dokonują segmentacji koron. Dzięki temu określa się rozmiar koron (ich średnicę i powierzchnię) oraz ich kształtu. Bazując na obrysie korony drzewa, w dalszych krokach określa się inne cechy drzewa na podstawie znormalizowanej chmury punktów. Do tych cech zalicza się: wysokość podstawy korony (służy często do określania objętości koron i ich biomasy czy też dla potrzeb modeli palności lasu), długość pnia wolnego od gałęzi (np. szacunków brakariskich), średnicę pnia (przez jej aproksymację na podstawie korelacji wysokości, zagęszczenia czy innych informacji, jak wiek, z baz danych opisowych zawartych w tabelach Systemu Informatycznego Lasów Państwowych; SILP), miąższość drewna (zasobność drzewostanu) oraz biomasa. Cechy te wymagają stworzenia lokalnych modeli regresji na podstawie zwykle niedużej liczby powierzchni stratyfikacyjnych (referencyjnych), posługując się narzędziami statystycznymi.

Przy odpowiedniej gęstości chmury punktów ALS oraz rozkładzie ech sygnału uzależnionych w dużej mierze od fazy rozwoju aparatu asymilacyjnego (głównie gatunki liściaste i modrzew) można określać typ drzewostanu czy nawet przybliżony skład gatunkowy (szczególnie w sytuacji posiadania atrybutów RGB w chmurze punktów). Idealnym rozwiązaniem byłoby posiadanie chmur punktów ALS z okresu przed rozwojem liści (dobra penetracja do gruntu i precyzyjne NMT) i w czasie pełnej fazy fenologicznej (dobrej jakości model NMPT/zNMPT). Dodatkowo fakt penetracji drzewostanu przez promień lasera umożliwia analizę struktury pionowej, czyli budowy pięterowej drzewo-



stanu. Jednocześnie przy słabym zwarciu duża część impulsów odbija się od podszytu i podrostu, dzięki czemu możliwe jest ich kartowanie. Zwarcie koron drzew określa się na podstawie stosunku liczby punktów powyżej określonej wysokości nad gruntem (zwykle 2 m) do całkowitej liczby punktów na danym obszarze lub w obrębie pikseli. Niekiedy stosuje się także odwrotność zwarcia – tzw. penetrację, pozwalającą na badania nad bioróżnorodnością w miejscach, w których więcej promieni słonecznych dochodzi do niższych warstw drzewostanu i do gleby.

Szczegółowość, z jaką chmury punktów ALS odzwierciedlają zarówno górną powierzchnię koron drzew, jak i ich budowę przestrzenną pozwala na charakteryzowanie jej za pomocą wskaźników i obserwowanie zmienności w obrębie całych kompleksów leśnych. Do wskaźników tych zalicza się np. indeks zfałdowania (ang. *rumple*), który wyraża stosunek 3D do 2D powierzchni koron. W przypadku drzewostanów jednopiętrowych przyjmuje on niewielkie wartości, natomiast w przypadku drzewostanów wielopiętrowych lub tych o skomplikowanej budowie pionowej wartości te są większe. Rozkład pionowy punktów ALS (wyrażony histogramem) jest także doskonałym źródłem informacji o strukturze drzewostanu, charakteryzując go pod kątem budowy piętrowej, obecności podszytu oraz wysokości podstawy korony. Na podstawie histogramu wysokości względnych punktów z chmury ALS możliwa jest także kategoryzacja drzewostanów pod kątem fazy rozwojowej.

Agregacja punktów z chmury ALS do tzw. voxelów (piksel 3D) umożliwia określenie objętości pojedynczych koron drzew (po uprzedniej segmentacji) lub całego drzewostanu. Wielkość voxelów (długość boku sześcianu) ustala się zwykle na poziomie 0,5–1,0 m, a liczba punktów znajdujących się w obrębie każdego voxelu może być wykorzystana w procesie filtracji. Alternatywną metodą określania objętości drzew jest stosowanie otoczek typu 2D lub 3D. W pierwszym wariantcie otoczki generowane są w oparciu o skrajne punkty na płaszczyźnie, na danej wysokości względnej i co określony przedział wysokości. Objętość jest następnie obliczana przez sumowanie iloczynów pól przekroju otoczek i ustalonego przedziału wysokościowego. W wariantcie otoczek 3D są one generowane wokół całego fragmentu chmury punktów ALS, prezentującej pojedynczą koronę drzewa.

Podobnie jak w przypadku wieloczasowych serii zobrazowań satelitarnych lub lotniczych, także chmury punktów ALS pozyskane kilkakrotnie na danym obszarze pozwalają na monitoring zachodzących zmian na obszarach leśnych. Dotyczy on zarówno poziomu drzewostanu (zręby, wiatrolomy, pożary), jak i pojedynczych drzew (np. ubytki). Chmury punktów ALS pozyskane w różnych okresach umożliwiają monitoring przyrostu drzewostanu na wysokość (zmiany biomasy), jego struktury, dynamiki tworzenia się luk, a także ukształtowania terenu (np. osuwiska).

Jedne z pierwszych w Polsce projektów badawczych wykorzystujących dane ALS w Polsce (2006–2007) wykonywane były na zlecenie Generalnej Dyrekcji Lasów Państwowych na obszarach Nadleśnictw: Chojna (RDLP Szczecin) oraz Milicz (RDLP Wrocław). Osiągnięte wyniki udowodniły wysoką przydatność lotniczego skanowania laserowego do oceny wybranych cech taksacyjnych drzewostanów. Przykładowo różnica (wartość bezwzględna ważona powierzchnią) pomiędzy tradycyjną naziemną metodą określania wysokości drzewostanu (dane z SILP) a znormalizowaną chmurą punktów

ALS sięgała w przypadku wszystkich drzewostanów sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) około 1,34 m w Nadleśnictwie Chojna oraz 2,23 m w Nadleśnictwie Milicz. Szczegółowe analizy wykonane na powierzchniach kołowych, na których pomiary prowadzono w roku nalotów ALS wykazywały mniejsze różnice w zakresie od 0,7 do 1,37 m.

### 6.14.5. Podsumowanie

Technologia ALS otworzyła nowy rozdział dla prac z zakresu inwentaryzacji, urządzania i monitoringu obszarów leśnych, stwarzając niespotykane do tej pory możliwości automatyzacji przetwarzania danych i określania wybranych parametrów taksacyjnych. Metody oparte na wykorzystaniu danych ALS wymagają stosowania bardzo niewielkiej ilości powierzchni kołowych do skalibrowania modeli matematycznych biomasy bazujących na relacjach pomiędzy wysokością drzew, liczbą drzew na jednostce powierzchni, wielkością korony, gatunkiem drzewa i innymi zmiennymi a zasobnością drzewostanu (określanego najczęściej z lokalnych tabel). Koszty tego typu inwentaryzacji lasów wykonywane na podstawie danych ALS spadły w całej Skandynawii, USA czy Kanadzie wielokrotnie, co potwierdza ogromny potencjał tej technologii pomiarowej.

### Literatura

- Hyypä J., Hyypä H., Leckie D., Gougeon F., Yu X., Maltamo M., 2008. *Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 29(5), 1339–1366.
- Szostak M., Wężyk P., Tompalski P., 2014. *Aerial Orthophoto and Airborne Laser Scanning as Monitoring Tools for Land Cover Dynamics: A Case Study from the Milicz Forest District (Poland)*. Pure Appl. Geophys. 171 (2014), 857–866.
- Tompalski P., Wężyk P., 2011. *Kartowanie pokrycia terenów zurbanizowanych przy zastosowaniu klasyfikacji obiektowej zintegrowanych geodanych lotniczego skanowania laserowego oraz zobrażeń GeoEye-1*. Roczniki Geomatyki, 9, 2(46), 121–132.
- Tompalski P., Wężyk P., de Kok R., Kukawski M., 2009. *Determining tree number in pine stands using airborne laser scanning data and orthophotos*. Annals of Geomatics, 7(2), 133–141.
- Weidenbach M., Wężyk P., Tompalski P., Hoffman K., Martens S., 2012. *Erfassung von Einzelbaumparametern mit Airborne-Laser-Scanning-Daten*. AFZ DerWald – Allgemeine Forst Zeitschrift für Wald und Umweltvorsorge, 2012-12, Fernerkundung, 12–15.
- Wężyk P., 2008. *Modelowanie chmury punktów ze skaningu laserowego w obszarze koron drzew*, [w:] *Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 18 b, 685–695.
- Wężyk P., 2012. *The integration of the Terrestrial and Airborne Laser Scanning technologies in the semi-automated process of retrieving selected trees and forest stand parameters*. Ambiencia, Vol. 8. 4, Unicentro, Parana, Brasil, 533–548.
- Wężyk P., Szostak M., Tompalski P., 2010. *Aktualizacja baz danych SILP oraz LMN w oparciu o dane lotniczego skaningu laserowego*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. XVII Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe „Nowoczesne metody pozyskiwania i modelowania danych w fotogrametrii i teledetekcji”. 80 Lat Polskiego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji. Wrocław, 21, 437–446.

- Wężyk, P., Szostak M., Tompalski P., 2010. *Opracowanie metody zautomatyzowanego określania wysokości drzewostanów na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego oraz jej weryfikacja w Nadleśnictwie Milicz*. Roczniki Geomatyki, 8, 7(43), 73–83.
- Yu X., Hyypä J., Vastaranta M., Holopainen M., Viitala R., 2011. *Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on random forest technique*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66, 28–37.

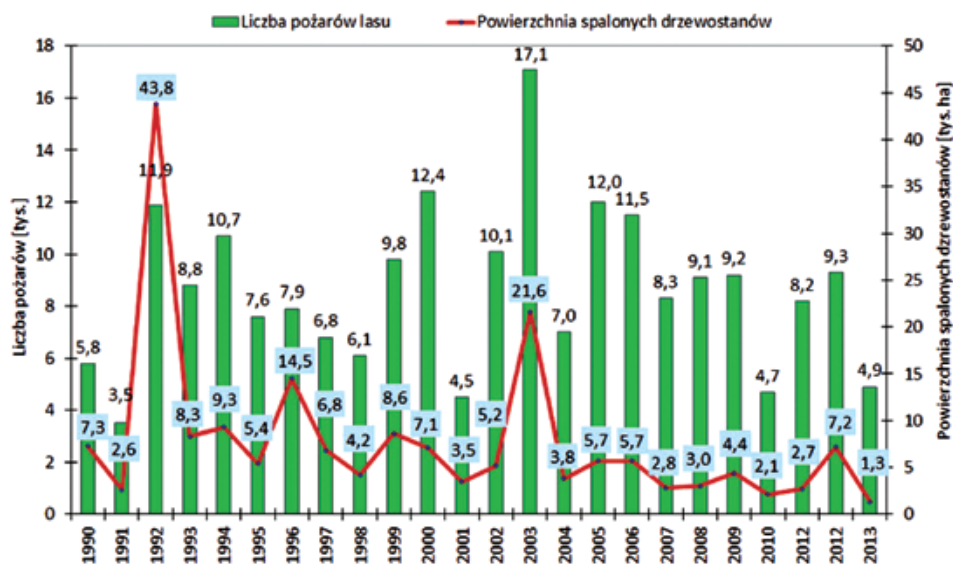
dr hab. inż. Piotr Wężyk

## 6.15. Wykorzystanie danych ALS w modelowaniu zagrożenia pożarowego lasów

### 6.15.1. Pożary lasów w Polsce

Lasy w Polsce pokrywają około 29,3% (9,1 mln ha) powierzchni kraju, z czego aż 83% (ok. 7,5 mln ha) drzewostanów zagrożone jest pożarami leśnymi. Największy pożar ostatnich dziesięcioleci w polskich lasach wydarzył się w sierpniu 1992 roku na terenie Nadleśnictwa Rudy Raciborskie. Zniszczył on niemal 9000 ha lasów, głównie drzewostanów sosnowych (w Polsce udział sosny zwyczajnej w drzewostanach wynosi około 71%). Ogólnie w 1992 roku spłonęło niemal 44 000 ha lasów w niemal 12 tys. pożarów. Kolejnym bardzo trudnym rokiem suszy i upałów był 1993 rok. Ogień zniszczył wtedy prawie 22 000 ha lasów w 17 tys. pożarów (ryc. 6.54). W 2013 roku zarejestrowano w Polsce 4883 pożarów lasu, przy czym spaliło się 1289 ha drzewostanów. Najwięcej pożarów wystąpiło na obszarze województwa mazowieckiego (ok. 23%), natomiast najmniej w województwach opolskim i warmińsko-mazurskim. W 2013 roku w Lasach Państwowych wybuchł tylko jeden duży pożar (> 10 ha), w wyniku którego spłonęło 16,7 ha lasu (RDLP Katowice, ponownie Nadleśnictwo Rudy Raciborskie). Na terenach użytkowanych przez wojsko w 2013 roku zanotowano 31 pożarów, które objęły powierzchnię 25 ha (w 2012 roku było ich 51; 391 ha). Głównymi przyczynami pożarów w Lasach Państwowych były podpalenia (41%) oraz nieostrożność ludzi (25%). W wyniku przerzutów ognia z gruntów nieleśnych powstało 4% pożarów. Znaczny procent (25%) stanowią pożary, których przyczyn nie ustalono.

W polskich lasach zakumulowane jest około 750 mln ton węgla, z czego około 560 milionów ton w nadziemnej części biomasy drzewostanów, 183 mln ton w obszarze podziemnej części biomasy, a 7 mln ton w samym drewnie martwym. Te ogromne wartości cennego węgla często używane w statystykach i politykach różnych szczebli mogą w przypadku pożarów ulec szybkim stratom. Stąd niezwykle ważne jest monitorowanie i modelowanie obszarów leśnych na podstawie aktualnych geodanych, informacji meteorologicznych, właściwości siedlisk oraz struktury przestrzennej 3D drzewostanów i za drzewień.



Ryc. 6.54. Liczba pożarów lasu i powierzchnia spalonych drzewostanów w Polsce w latach 1990–2013 (źródło: Raport o Lasach 2013; PGLP Lasy Państwowe)

### 6.15.2. Modelowanie zagrożenia pożarowego w oparciu o dane ALS

Jednym z kierunków nowoczesnego modelowania ilości tzw. paliwa (ang. *fuel fire*) dostępnego dla pożaru leśnego, a tym samym zagrożenia od ognia i wielkości strat materialnych, są modele matematyczne bazujące na statystyce chmury punktów pochodzącej z lotniczego skanowania laserowego (ALS). Modele te opierają się na współczynnikach i estymatorach określanych na podstawie analizy struktury rozkładu przestrzennego 3D punktów w chmurze oraz informacjach dodatkowych (np. z systemów GIS; bazy atrybutowe opisujące skład gatunkowy, siedlisko).

Jednym z praktycznych przykładów wykorzystania informacji z chmury ALS do oceny zagrożenia pożarami i wielkości strat jest algorytm CFE (USDA; Forest Service). Oblicza on na podstawie danych ALS zmienne dla modelu, takie jak: zwarcie koron drzew (ryc. 6.55), maksimum wysokości drzewostanów, średnią wysokość drzew, współczynnik zmienności, odchylenie standardowe dla wysokości górnej drzewostanu (ryc. 6.56), kwantyle wysokości, percentyle wysokości względnej drzewostanu ( $p_{10}$ ,  $p_{25}$ ,  $p_{50}$ ,  $p_{75}$  oraz  $p_{90}$ ) oraz gęstość odbić poszczególnych ech sygnału na różnych przedziałach wysokościowych drzewostanu. Algorytm CFE pozwala oszacować następujące parametry:

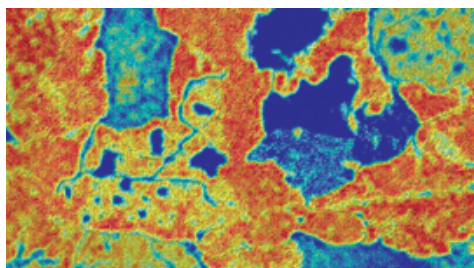
- wagę „paliwa” w koronach (ang. *Canopy Fuel Weight*; CFW) – czyli całkowitą masę: drewna, igieł, gałęzi, jakie może strawić pożar, wyrażoną w kg/ha (ryc. 6.57),

- współczynnik gęstości rozmieszczenia paliwa (ang. CBD – *Canopy Bulk Density*) opisywany jako: masa igieł, małych gałęzi i konarów dostępna dla pożaru w koronach drzew w przeliczeniu na  $1 \text{ m}^3$  (ryc. 6.58),
- minimalną wartość wysokości podstawy koron drzew, powyżej której współczynnik CBD przekracza  $0,011 \text{ kg/m}^3$ ,
- maksymalną wysokość koron drzew, poniżej której współczynnik CBD ma wartość  $0,011 \text{ kg/m}^3$ .

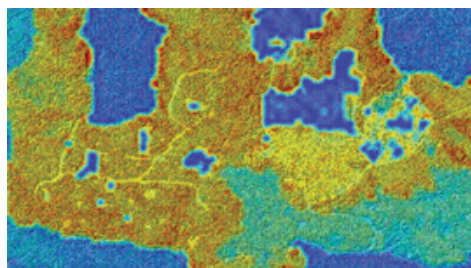
Modele CFE, choć mają lokalne zastosowanie (np. dla lasów zachodniego wybrzeża USA) to mogą być dostosowywane do warunków lokalnych na podstawie badań terenowych. Przykład modeli matematycznych dla daglezi na zachodnim wybrzeżu USA podano poniżej. We wzorach podano percentyle wysokości (np.  $h_{25}$ ) oraz wartość zwarcia drzewostanu ( $D$ ; parametr w zakresie  $0,0-1,0$ ) określaną na podstawie proporcji pierwszych odbić plamki lasera do wszystkich odbić.

$$\text{Canopy fuel weight (kg/ha)} = (22,7 + 2,9 h_{25} - 1,7 h_{90}) + 106,6 D)^2$$

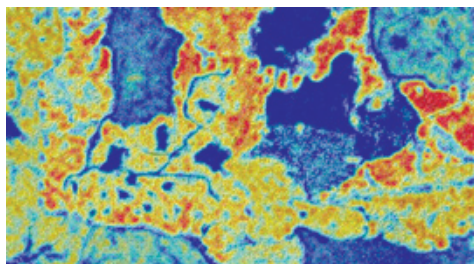
$$\text{canopy bulk density (kg/m}^3\text{)} = e^{(-4,3 + 3,2 h_{cv} + 0,2 h_{10} + 0,13 h_{25} - 0,12 h_{90} + 2,4 D)} \cdot 1,037$$



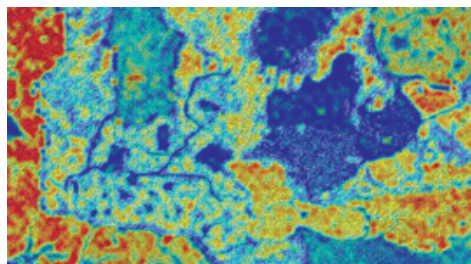
Ryc. 6.55. Zwarcie drzewostanu (czerwony = 100% – niebieski 0%)



Ryc. 6.56. Wysokość drzewostanów (niebieski = 0,0 m; czerwony = 60 m)



Ryc. 6.57. Waga paliwa (CFW; niebieski = 0,0 kg/ha; czerwony = 27 kg/ha)



Ryc. 6.58. Gęstość paliwa (CBD; niebieski = 0,0  $\text{kg/m}^3$ ; czerwony = 0,28  $\text{kg/m}^3$ )

### 6.15.3. Podsumowanie

Pożary wciąż należą do najgroźniejszych kataklizmów zagrażających trwałości lasów. Biomasa zakumulowana w ekosystemach leśnych jest niezmiernie ważna w aspekcie zrównoważonego rozwoju oraz podjętych konwencji międzynarodowych o ograniczeniu emisji CO<sub>2</sub> i tematu sekwestracji węgla w środowisku. Użycie danych ALS do szacowania ryzyka pożarowego w lasach wsparte systemami monitorowania zagrożeń (np. pomiary temperatury, wilgotności ściółki, Leśna Mapa Numeryczna, System Informatyczny Lasów Państwowych itp.) stwarza niedostępne wcześniej możliwości modelowania realnego zagrożenia drzewostanów, jak i kierunków rozprzestrzeniania się ognia, ale przede wszystkim szacowania skutków ekonomicznych i środowiskowych następstw pożarów.

### Literatura

- Andersen H.-E., McGaughey R. J., Reutebuch S. E., 2005. *Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data*. Remote Sensing of Environment. 94(4), 441–449.
- Skowronski N., Clark K., Duveneck M., Hom J., 2011. *Three-dimensional canopy fuel loading predicted using upward and downward sensing LiDAR systems*. Remote Sensing of Environment, Vol. 115 (2), 703–714.
- Skowronski N. S., Clark K. L., Nelson R., Hom J., Patterson M., 2007. *Remotely sensed measurements of forest structure and fuel loads in the Pinelands of New Jersey*. Remote Sensing of Environment, 108, 123–129.

mgr inż. Jarosław Kowalczyk

## 6.16. Oceny Oddziaływania na Środowisko

Realizacja przedsięwzięć mogących wpływać negatywnie na środowisko wiąże się z koniecznością uzyskania odpowiednich decyzji o tzw. środowiskowych uwarunkowaniach. Decyzja ta zostaje wydana m.in. na podstawie zapisów zawartych w tzw. raportach o oddziaływaniu przedsięwzięć na środowisko (raportach OOŚ – Ocen Oddziaływania na Środowisko). Raporty opracowywane są w toku postępowania w sprawie oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko, m.in. dla: planowanych dróg, farm wiatrowych, obiektów biurowych i przemysłowych, nadajników czy też rucociągów (np. gazowych). Pełny katalog przedsięwzięć określony jest rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2010 r. Nr 213 poz. 1397 z późn. zm.).

Warto nadmienić o tzw. Strategicznych Ocenach Oddziaływania na Środowisko (SOOŚ) opracowywanych dla: polityk, planów, programów oraz innych dokumentów o charakterze strategicznym. Także i w tym przypadku zastosowanie danych przestrzennych jest już dzisiaj dość powszechne (np. przy sporządzaniu 10-letnich Planów Urządzenia Lasu).

Prawo Ochrony Środowiska przewiduje także inne dokumenty, w których podstawowymi narzędziami są symulacje zjawisk fizycznych i chemicznych, które w przeważającej mierze wykorzystują dane przestrzenne – w tym dane opracowywane na bazie zbiorów pozyskiwanych technologią lotniczego skanowania laserowego, takie jak: chmura punktów ALS oraz modele wysokościowe.

### 6.16.1. Raporty Ocen Oddziaływania na Środowisko (OOŚ) dla przedsięwzięć

Zakres raportów OOŚ może być zróżnicowany, niemniej jednak identyfikacja zagrożeń dla środowiska odbywa się bardzo często z wykorzystaniem narzędzi do modelowania i symulacji komputerowej. W szczególności należy tutaj wymienić modelowanie rozprzestrzeniania się hałasu w środowisku, modelowanie rozkładów stężeń zanieczyszczeń atmosferycznych, rozkładów pól elektromagnetycznych, zjawisk związanych z gospodarką wodną (np. możliwość występowania podtopień) czy też innych uciążliwości – np. typową uciążliwością dla farm wiatrowych jest zjawisko migotania cienia, wpływ na krajobraz (analiza widoczności) itp.

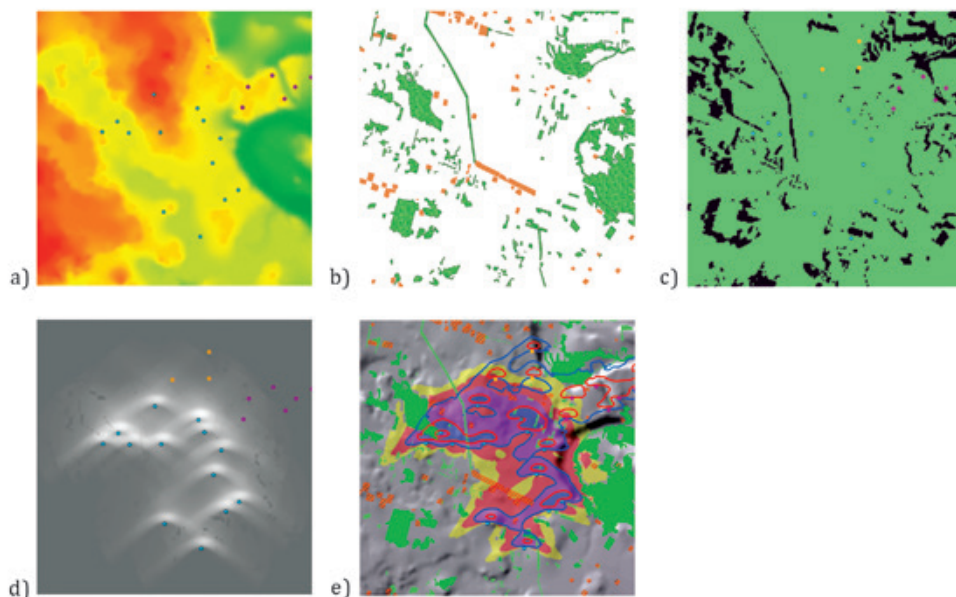
Możliwości wykorzystania danych, których źródłem jest lotnicze skanowanie laserowe w modelowaniu rozprzestrzeniania się hałasu omówione zostały w odrębnym rozdziale. Warto jedynie dodać, iż w przypadku raportów OOŚ szczegółowość prowadzonych analiz akustycznych jest dużo większa niż w przypadku map realizowanych zgodnie z rozporządzeniem w sprawie szczegółowego zakresu danych ujętych na mapach akustycznych oraz ich układu i sposobu prezentacji. Szczegółowe modele przestrzenne 3D do obliczeń akustycznych będą w przypadku ocen środowiskowych mieć większy wpływ na trafność realizowanych prognoz oddziaływania. O ile mapy akustyczne realizowane są w oparciu o dane w skali 1:10 000, o tyle w przypadku analiz akustycznych szczegółowość danych musi odpowiadać skali 1:500 lub większej. Zastosowanie produktów technologii ALS – zwłaszcza przy modelowaniu obiektów nieposiadających dokumentacji budowlanej – pozwala w istotny sposób uszczegółwić modele obliczeniowe i zwiększyć jakość opracowywanych prognoz oddziaływania.

Kolejnym istotnym obszarem zastosowania danych przestrzennych bazujących na danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego jest modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń atmosferycznych. W przypadku bardziej złożonych modeli obliczeniowych wykorzystywane są numeryczne modele terenu, modele zabudowy i wszelkich obiektów kubaturowych, których obecność może wpływać na ruchy powietrza transportującego zanieczyszczenia.

W przypadku raportów OOŚ obiektów będących źródłem pól elektromagnetycznych (np. stacji telefonii komórkowej, stacji rozdzielnych, radarów itp.) kluczowym elementem modelowania jest numeryczny model powierzchni terenu (NMPT).

Wiele oddziaływań wiąże się także z budową i funkcjonowaniem farm wiatrowych. Turbiny wiatrowe, pracując, generują wiele niedogodności, które pomimo że nie charakteryzują się dużą intensywnością, to mogą być w wielu sytuacjach uciążliwe. Poza

oddziaływaniem akustycznym należy także rozpatrywać zjawisko migotania cieni. Modelowanie tego zjawiska wykorzystuje dane przestrzenne, takie jak rzeźba terenu (NMT), NMPT, zasięgi obszarów zieleni wysokiej i terenów zabudowanych (ryc. 6.59). Wszystkie te produkty pozyskuje się za pomocą technologii lotniczego skanowania laserowego.



Ryc. 6.59. W procesie opracowania mapy migotania cieni turbin wiatrowych wykorzystuje się NMT (a), model zieleni wysokiej oraz terenów zabudowanych (b). Dane te stanowią podstawę do opracowania map widoczności turbin (c), a NMT stanowi ponadto podstawę do opracowania map teoretycznych zasięgów występowania cieni turbin (d). Na zdjęciu (e) pokazano finalną mapę częstości migotania cienia turbin wiatrowych, gdzie uciążliwość zjawiska została wyrażona częstotliwością jego pojawiania się

Obecność zieleni, zarówno zwartej w postaci lasów, jak też zadrzewień przy drogach, w istotny sposób może wpłynąć na ocenę zasięgów migotania cieni. W większości przypadków dostępne powszechnie i wykorzystywane dane geodezyjne (nawet w dużych skalach, np. 1 : 500) nie stanowią wystarczających danych do wykonania takich analiz w sposób uwzględniający wszystkie możliwe czynniki determinujące skalę zjawiska.

Numeryczne modele terenu pozyskiwane w wyniku lotniczego skanowania laserowego są kluczowym elementem prognoz opracowywanych dla cieków i zbiorników wodnych. Rzeźba terenu ma istotne znaczenie dla możliwości prognozowania skutków i zasięgów ewentualnej powodzi, stopnia wypełnienia zbiorników retencyjnych i konsekwencji zrzutu wód do cieku po ustaniu zagrożenia. Analiza zalewów ma swoje zastosowanie np. w ocenie wpływu inwestycji na świat przyrody ożywionej. Zatem także i w tym przypadku wykorzystywane są dane przestrzenne.



Dokładności danych przestrzennych (np. NMT, numerycznych modeli zabudowy, modeli terenów zielonych itp.) powstałych na bazie skanowania laserowego najczęściej odpowiadają wymaganiom modeli obliczeniowych stosowanych w praktyce dla ocen oddziaływania na środowisko. Odrębną kwestię stanowi natomiast rozdzielczość przestrzenna. Stopień złożoności algorytmów programów symulujących zjawiska występujące w środowisku (np. rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń atmosferycznych) wymaga dużej generalizacji zbiorów danych, tak aby przeprowadzenie obliczeń w ogóle mogło być zrealizowane w racjonalnym czasie. W przypadku obliczeń akustycznych NMT o dużej rozdzielczości przestrzennej (np. 0,5 m) może zostać przefiltrowany w celu obniżenia ilości zbędnych danych.

### 6.16.2. Strategiczne Oceny Oddziaływania na Środowisko (SOOŚ)

Oceny strategiczne to kolejna kategoria opracowań, dla których źródłem danych mogą być produkty ALS. W zależności od rodzaju dokumentu, dla którego opracowywana jest SOOŚ, zakres wykorzystania danych może być inny. Podobnie jak w przypadku raportów OOŚ, dla dokumentów opracowywanych w większej skali (np. miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego, program ochrony środowiska przed hałasem itp.) analizy przestrzenne mogą obejmować zagadnienia akustyki środowiska (modelowanie rozkładu poziomu hałasu) wymagające dostępności modeli terenu, trójwymiarowych modeli zabudowy oraz innych obiektów topograficznych mogących wpływać na propagację dźwięku. Przykładem jest prognoza opracowywana do projektu miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego obszaru, na jakim planuje się realizację zespołu turbin wiatrowych. W tym przypadku, poza wykorzystaniem danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego do opracowania modeli akustycznych, wykonywane są także analizy migotania cieni, analizy krajobrazowe (w tym widoczności).

Przykładem zastosowania danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego jest „Prognoza oddziaływania na środowisko programu ochrony środowiska przed hałasem dla terenów poza aglomeracjami położonych wzdłuż dróg o natężeniu powyżej 3 milionów pojazdów rocznie i linii kolejowych o natężeniu większym niż 30 tysięcy przejazdów rocznie dla województwa opolskiego na lata 2014–2019”. W prognozie wykorzystano wyniki analiz przestrzennych przeprowadzone za pomocą numerycznego modelu terenu oraz modelu zabudowy 3D.

### 6.16.3. Przeglądy ekologiczne i analizy porealizacyjne

Opracowanie przeglądów ekologicznych, a w szczególności analiz porealizacyjnych wykonywane jest dla różnorodnych obiektów zarówno przemysłowych, jak i komunikacyjnych. Podstawą przeglądu ekologicznego i analizy porealizacyjnej są badania stanu środowiska realizowane w określonych lokalizacjach. Interpolacja pomierzonych wielkości tych oddziaływań prowadzona jest na podstawie modeli obliczeniowych, podobnie jak w przypadku prognoz oddziaływania opracowanych w ramach raportów OOŚ.

W przypadku analiz porealizacyjnych dla dróg powszechne jest wykorzystanie NMT, modeli terenów zielonych oraz modeli zabudowy przy opracowaniu map oddziaływania akustycznego. W przypadku stwierdzenia występowania naruszeń standardów środowiskowych z danych tych korzysta się także przy projektowaniu środków naprawczych.

#### 6.16.4. Podsumowanie

Analizy przestrzenne GIS czy tworzenie opracowań CAD są dziś powszechnymi narzędziami wykorzystywanymi w pracach z zakresu ocen oddziaływania na środowisko, zarówno na etapie przygotowania inwestycji, opracowania nowych planów i programów, jak również na etapie analiz porealizacyjnych. Wymagany rodzaj danych przestrzennych zależy od stosowanych modeli obliczeniowych, ale niewątpliwie technologia lotniczego skanowania laserowego jest ważnym źródłem danych przestrzennych do wykorzystania nie tylko w ramach ocen oddziaływania na środowisko, ale w całej działalności związanej z ochroną środowiska.

#### Literatura

- Anjaneyulu Y., Manickam V., 2011. *Environmental Impact Assessment Methodologies*. CRC Press.
- Chang H.-C., Ge L., Rizos C., 2004. *Environmental Impact Assessment of Mining Subsidence by Using Spaceborne Radar Interferometry*. FIG Regional Conference, Australia.
- Morris P., Therivel R., 1995. *Methods of environmental impact assessment*. UCL Press.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2010 r. Nr 213 poz. 1397 z późn. zm.).

mgr inż. Marcin Pierzchański  
dr hab. inż. Piotr Wężyk

### 6.17. Wsparcie procesu klasyfikacji obrazów lotniczych i satelitarnych w zakresie map pokrycia i użytkowania terenu

#### 6.17.1. Klasyfikacja obrazów teledetekcyjnych

Klasyfikacja obrazów teledetekcyjnych, takich jak: cyfrowych ortofotomap lotniczych, obrazów satelitarnych, zobrazowań UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*) i innych jest jedną z najszerzej wykorzystywanych metod szybkiego pozyskiwania i weryfikacji informacji, np. o klasach pokrycia terenu (ang. LULC; *Land Use Land Cover*). Proces klasyfikacji obrazu polega na grupowaniu jego treści (pojedynczych pikseli) w zdefiniowane przez użytkownika klasy, co prowadzi do stworzenia uproszczonego obrazu rzeczywistości.

Procedury klasyfikacyjne implementowane obecnie w specjalistycznych programach są odpowiedzią na tradycyjną metodę wektoryzacji ekranowej realizowaną manualnie, która – pomimo wysokiej dokładności – jest jednak niezmiernie czasochłonna i kosztowna. Stąd jednym z aktualnych wyzwań współczesnej teledetekcji i rozpoznania obrazowego (np. w medycynie) jest wypracowanie możliwie jak najbardziej dokładnych i automatycznych procedur klasyfikacji dużych zbiorów obrazów (zbiorów: wieloźródłowych, wielkoskalowych i wielorozdzielczych).

### 6.17.2. Obiektowa analiza obrazu (OBIA)

Jedną z bardzo nowatorskich technologii jest niewątpliwie obiektowa analiza obrazu (ang. OBIA; *Object-Based Image Analysis*). Podstawowym założeniem OBIA (lub GEOBIA; *Geographic Object-Based Image Analysis*) jest rozpoznawanie w treści homogenicznych obiektów, zwanych segmentami. Proces ich tworzenia, który rozpoczyna klasyfikację obiektową, nazywamy etapem segmentacji. Może on być przeprowadzony z wykorzystaniem algorytmów dostosowanych do różnych typów danych (np. w zależności od rozdzielczości przestrzennej lub spektralnej) lub celu wykonywania analizy (np. klasyfikacja selektywna lub wstępna). Po wygenerowaniu segmentów na podstawie wartości energii (DN) zapisanej w poszczególnych kanałach spektralnych oraz wielkości, kształtu i tekstury obiektów rejestrowanych na obrazie, każdy z nich jest następnie przyporządkowany do zdefiniowanej wcześniej klasy. Parametry definiujące właściwości przynależności segmentu do klasy tworzą algorytm klasyfikacyjny (ang. *rule-set*), który może być automatycznie powtarzany na innych podobnych obrazach. Klasyfikacja obiektowa w sposobie pracy przypomina proces manualnej wektoryzacji polegającej na rozpoznaniu obrazu w interakcji „oko – mózg” zachodzącej w ludzkim organizmie, oferując przy tym wysoki poziom automatyzacji i powtarzalności całego procesu.

### 6.17.3. Wsparcie klasyfikacji OBIA danymi ALS

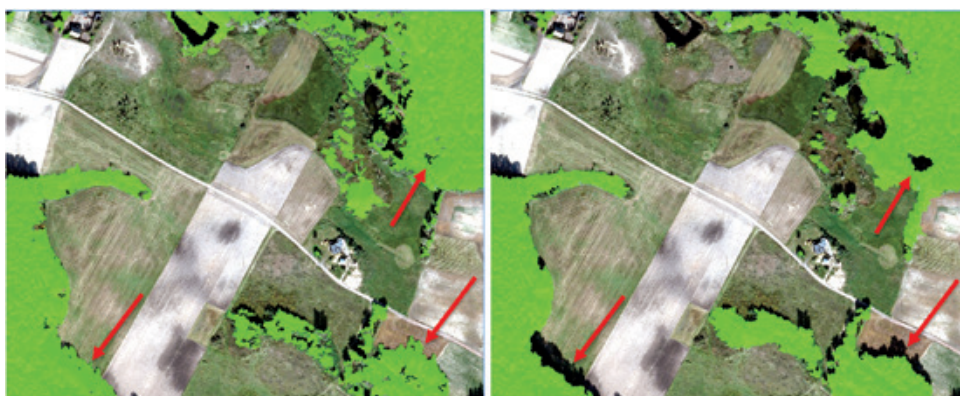
Obiektowe podejście do analizy obrazu pozwala na wykorzystanie danych z wielu źródeł, takich jak: zdjęć satelitarnych, zobrazowań lotniczych, danych z lotniczego skanowania laserowego (ALS) czy warstw GIS (raster, wektor) w jednej przestrzeni projektowej, co znacząco wpływa na jakość i dokładność samej klasyfikacji OBIA. Dane ALS mogą być wykorzystane do wsparcia procesu klasyfikacyjnego w dwojaki sposób.

Pierwszy z nich polega na wykorzystaniu modeli wysokościowych, tj.: NMT, NMPT lub szczególnie zNMPT w postaci rastrowej. Ich wykorzystanie w klasyfikacji GEOBIA pozwala na uzyskiwanie wyższej dokładności prowadzonych analiz, szczególnie w przypadku konieczności rozgraniczenia klas pokrycia i użytkowania terenu zbliżonych do siebie pod kątem wartości spektralnych, jednak różniących się wysokością samych obiektów (np. bujna roślinność zielna o dużej biomacie vs. drzewostany liściaste).

Drugim sposobem na wykorzystanie danych ALS jako wsparcia zautomatyzowanego procesu GEOBIA jest zaimplementowanie w algorytmie klasyfikacyjnym natywnej chmury punktów ALS (np. format LAS 1.2), a także dodatkowo warstw pochodnych (statystyk w formacie rastrowym), takich jak: odchylenie standardowe wysokości poszczególnych

odbić plamki lasera, gęstość skanowania, liczby echa sygnału (ang. *return*), współczynników odbić (np. liczba wszystkich echa sygnału do pierwszego), wartości intensywności odbicia (intensywność) czy atrybut RGB (jeśli zostały przypisane do chmury ALS ze zdjęć lotniczych). Podejście takie pozwala nie tylko na poprawę dokładności klasyfikacji GEOBIA, ale także na wyróżnienie dodatkowych klas lub wręcz podkategorii w tworzonej hierarchii, takich jak roślinność wysoka lub niska czy też zabudowa w aspekcie jej wysokości względnych.

Niezmiernie trudnym do rozwiązania problemem klasyfikacji zobrazowań teledetekcyjnych jest występowanie cienia oraz efekt rzutu środkowego obecnego na zobrazowaniach lotniczych skutkujący przesunięciami radialnymi wysokich obiektów (np. wieżowce, drzewa, wieże telekomunikacyjne, kominy). Wykorzystanie w procesie klasyfikacyjnym chmury punktów ALS pozwala na weryfikację przebiegu granic poszczególnych klas pokrycia i użytkowania terenu, tak aby możliwie poprawnie oddawały one stan rzeczywisty (ryc. 6.60).



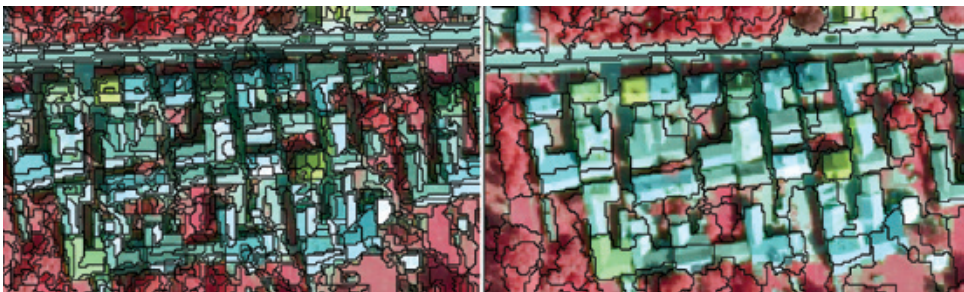
Ryc. 6.60. Klasyfikacja przeprowadzona na ortofotomapie lotniczej (po lewej) oraz automatyczna aktualizacja granic klasy „Las” z wykorzystaniem danych ALS (po prawej)

Włączenie do procesu klasyfikacyjnego chmury punktów ALS umożliwia identyfikację klas, które za pomocą jedynie zobrazowań teledetekcyjnych są niezmiernie trudne do automatycznego rozpoznania, szczególnie w sytuacji analizowania danych tylko z jednego okresu. Przykładem takich obiektów może być napowietrzna infrastruktura energetyczna bądź telekomunikacyjna czy zróżnicowanie wiekowe (wysokościowe) drzewostanów. Oprócz niewątpliwiej wartości dodanej, jaką są dodatkowe klasy lub podklasy pokrycia i użytkowania terenu, użycie danych ALS pozwala na uniknięcie poważnych błędów klasyfikacyjnych podczas procesu decyzyjnego rozpoznawania obiektów w terenach zurbanizowanych. Na nich często występują obiekty, takie jak np. duże parkingi mające wartości spektralne zbliżone do płaskich dachów dużych marketów, co w momencie analizy zobrazowań satelitarnych o niższej rozdzielczości przestrzennej stanowi duże utrudnienie. Wykorzystanie chmury punktów skanowania laserowego ALS pozwala na niemal bezbłędną klasyfikację ww. obiektów

przez wykorzystanie informacji o wysokości względnej obiektów i weryfikacji cienia (wielkość, kierunek).

Przykładem wykorzystania warstwy zNMPT (Model Koron Drzew; MKD) pochodzącej z lotniczego skanowania laserowego w procesie klasyfikacji ortobrazów wielospektralnych (ColorInfraRed; CIR) może być projekt realizowany w Nadleśnictwie Milicz na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych (2006–2008). Opracowany proces segmentacji modeli wysokościowych z wykorzystaniem zintegrowanych danych spektralnych z modelem zNMPT pozwolił zwiększyć poprawność automatycznego określania liczby koron w drzewostanie sosnowym do poziomu 72,6 %, czyli o 5% więcej niż w przypadku samego modelu MKD (metoda odwróconej zlewni; dane ALS).

Warstwy pochodne generowane z chmury punktów ALS mogą być użyte nie tylko podczas samego procesu klasyfikacyjnego. Włączenie ich do algorytmu segmentacyjnego daje szansę na uzyskanie już w pierwszym etapie OBIA dodatkowych segmentów zróżnicowanych wysokościowo czy też pod kątem intensywności odbicia lub odchylenia standardowego wysokości (ryc. 6.61). Tak wygenerowana warstwa obiektów (segmentów) może zostać sklasyfikowana już bez dalszego udziału chmury punktów ALS, jednak wciąż dokładniej niż w przypadku zastosowania wyłącznie samych wielospektralnych zobrazowań lotniczych bądź satelitarnych.



Ryc. 6.61. Porównanie dwóch rodzajów segmentacji; po lewej – segmentacja wykonana wyłącznie na zobrazowaniu CIR; po prawej – segmentacja wykonana wyłącznie na chmurze punktów ALS. W obydwu wariantach parametr skali wynosił 10

#### 6.17.4. Podsumowanie

Obecnie coraz większa liczba wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych (ALS, lotnicza i satelitarna ortofotomapa cyfrowa) pozwala na niespotykaną wcześniej możliwość analizy zintegrowanych danych, czyli poprzez łączenie geodanych wieloźródłowych o różnej charakterystyce w jednym algorytmie analitycznym. Wzrastająca liczba nowo oferowanych systemów teledetekcyjnych, w tym różnych typów sensorów aktywnych (radar) i pasywnych (np. zobrazowania hiperspektralne), wsparta danymi wysokościowymi ALS, wymaga wypracowania nowego – wysoce zautomatyzowanego podejścia do ich przetwarzania. Jest prawie pewne, że metoda GEOBIA, przy swoim wysokim

stopniu obiektywności i automatyzacji procesu, stanie się wkrótce podstawową technologią przetwarzania obrazów w kierunku aktualizacji i weryfikacji danych gromadzonych w bazach referencyjnych (BDOT lub innych tematycznych, np. Bank Danych o Lasach). Już teraz wykorzystywana jest, między innymi, w projekcie „Zrównoważone użytkowanie zlewni zbiorników wodnych” (ang. *Sustainable Land and Water Management of Reservoir Catchments*, akronim SaLMaR).

## Literatura

- Adamczyk J., Będkowski K., 2007. *Metody cyfrowe w teledetekcji*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- De Kok R., Kozioł K., Wężyk P., 2005. *Zastosowanie klasyfikacji obiektowej wysokorozdzielczych obrazów teledetekcyjnych oraz analiz przestrzennych GIS w kartowaniu drzewostanów*. Roczniki Geomatyki, 3 (4).
- Li Y., Lin Z. L., Shimamura H., 2008. *Integrated method of building extraction from Digital Surface Model and imagery*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B3b.
- Rottensteiner F., Trinde J., Clode S., Kubik K., 2005. *Using the Dempster–Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection*. Information Fusion, 6.
- Walter V., 2004. *Object-based classification of remote sensing data for change detection*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58, (3–4).
- Wężyk P., Mlost M., Pierzchalski M., Wójtowicz-Nowakowska A., Szwed O., 2012. *Wzmocnienie procesu klasyfikacji obiektowej wielospektralnych ortofotomap lotniczych danymi z lotniczego skanowania laserowego*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23.
- Wężyk P., Tompalski P., de Kok R., Szostak M., Kukawski M., 2010. *Metoda szacowania liczby drzew w drzewostanie sosnowym z wykorzystaniem danych ALS oraz ortoobrazów*. Sylwan, 154 (11): 773-782, ISSN 0039-7660.

mgr inż. Dorota Zugaj-Marcinek

## 6.18. Generowanie prawdziwej ortofotomapy lotniczej na podstawie zdjęć lotniczych oraz NMPT

### 6.18.1. Ortofotomapa a prawdziwa ortofotomapa

Jednym ze stosunkowo nowych zastosowań danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego jest generowanie prawdziwych ortofotomap lotniczych (ang. *true orthophoto*; ryc. 6.62). Produkt ten zyskujący w ostatnich latach dużą popularność, kiedyś był możliwy do wygenerowania tylko w sposób manualny z wielkoskalowych zdjęć, obecnie dzięki synchronicznym nalotom (dającym możliwość pozyskania w tym samym czasie zdjęć lotniczych oraz chmury punktów ALS), jego wytworzenie zostało znacznie zautomatyzowane. Precyzyjne numeryczne modele pokrycia terenu (NMPT) uzyskane z chmury punktów ALS stanowią doskonały materiał do generowania prawdziwej ortofotomapy.

W celu wykonania prawdziwej ortofotomapy pokrycie poprzeczne i podłużne planowanych zdjęć lotniczych musi wynosić powyżej 60%, a często wykonawcy wykonują pokrycie sięgające 80–90%. Wpływa na to duża wydajność pracy nowoczesnych cyfrowych kamer lotniczych i brak kosztów związanych z wykonywaniem analogowych reprodukcji (jak w przeszłości).



Ryc. 6.62. Prawdziwa ortofotografia lotnicza, wygenerowana na podstawie zdjęć lotniczych z kamery średnioformatowej, chmury punktów ALS oraz automatycznie wygenerowanych obrysów budynków (Yvässkylä, Finlandia)

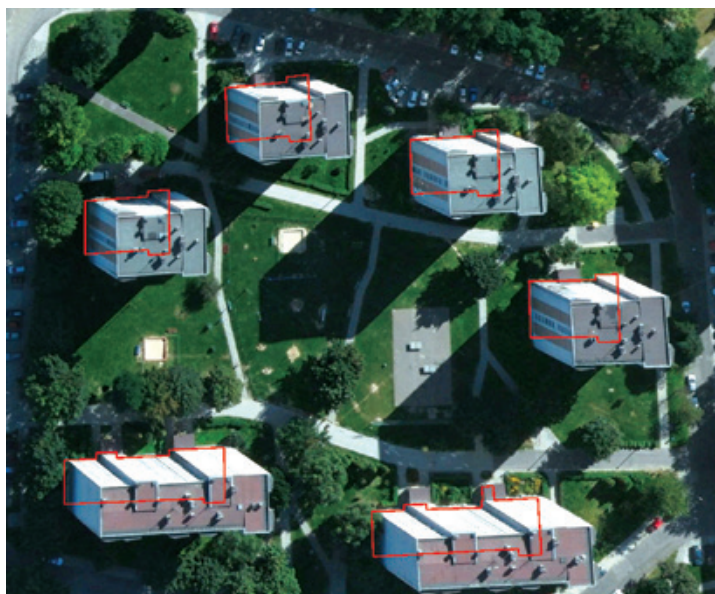
Pod pojęciem **ortofotomapa** rozumie się mozaikę ortoobrazów, czyli zdjęć lotniczych lub satelitarnych przetworzonych w stosunku do płaszczyzny odniesienia z rzutu środkowego na rzut ortogonalny. Proces przetwarzania, którego wynikiem są ortoobrazy jest nazywany ortorektyfikacją. W trakcie przetwarzania zostają usunięte zniekształcenia występujące na obrazach źródłowych, które spowodowane zostały geometrią zdjęć i deniwelacją terenu. Ponadto ortofotomapa powinna charakteryzować się określoną kartometrycznością oraz jakością radiometryczną.

Klasyczną ortofotomapę lotniczą otrzymuje się przez ortorektyfikację zdjęć, gdzie ortogonalną pozycję uzyskują jedynie obiekty leżące bezpośrednio na terenie (ryc. 6.63), a wysokie budynki lub drzewa (w zależności od oddalenia od punktu głównego zdjęcia) podlegają znacznemu przesunięciu radialnemu.

Dysponując pojedynczymi zdjęciami lotniczymi o bardzo dużym pokryciu podłużnym, ich orientacją zewnętrzną (ang. *EO*), np. z procesu aerotriangulacji, oraz numerycznym modelem pokrycia terenu, zrzutuje się do położenia ortogonalnego wszystkie obiekty stanowiące pokrycie terenu, zarówno te bezpośrednio występujące na gruncie (np. trawniki, drogi), jak i te wznoszące się ponad teren (o określonej wysokości względnej – np.: budynki, drzewa, wieże), uzyskując w ten sposób **prawdziwą ortofotomapę**.

## 6.18.2. Sposoby generowania prawdziwej ortofotomapy

W praktyce produkcji prawdziwej ortofotomapy proces ogranicza się zazwyczaj tylko do budynków i istotnych obiektów inżynierskich (mosty, wiadukty), jednak najczęściej z pominięciem roślinności wysokiej. Prawdziwe ortofotomapy tworzone są głównie z myślą o terenach zurbanizowanych, o gęstej i wysokiej zabudowie, gdzie na tradycyjnej ortofotomapie lotniczej widoczne są przesunięcia radialne wysokich obiektów (obecne fragmenty fasad budynków), co powoduje przysłanianie części treści mapy. Z tego powodu ortofotomapa nie może być wykorzystywana jako podkład referencyjny do opracowań kartograficznych czy analiz przestrzennych GIS dla wysokich budynków czy drzewostanów. Głównym celem generowania prawdziwej ortofotomapy lotniczej jest uniknięcie przesunięć radialnych wysokich obiektów, tak aby posiadały swoją rzeczywistą lokalizację (ryc. 6.64).



Ryc. 6.63. Przesunięcia radialne budynków na klasycznej ortofotomapie lotniczej

Jednym ze sposobów uzyskania prawdziwej ortofotomapy jest wykorzystanie NMPT, który jest jednym z produktów pochodnych lotniczego skanowania laserowego. Na podstawie chmury punktów ALS, w sposób często całkowicie automatyczny, generuje się numeryczny model pokrycia terenu w postaci siatki GRID lub TIN. W tym przypadku dokładność uzyskanej prawdziwej ortofotomapy zależy przede wszystkim od gęstości chmury punktów ALS, z której NMPT jest generowany.

Mając do dyspozycji chmurę punktów ALS oraz specjalistyczne oprogramowanie do jej przetwarzania, prawdziwą ortofotomapę lotniczą generuje się także na podstawie ob-



rysów lub modeli brył budynków. Metoda ta zmniejsza efekt powstawania nierównych krawędzi budynków. W tym przypadku na jakość wynikowej ortofotomapy wpływ ma dokładność wygenerowania obrysów budynków pozyskanych w sposób automatyczny z chmury punktów ALS.



Ryc. 6.64. Budynek z fragmentem fasady na klasycznej ortofotomapie (z lewej) oraz w prawidłowym położeniu ortogonalnym na tzw. prawdziwej ortofotomapie lotniczej (z prawej)

Jednym z rozwiązań jest także zastosowanie metody podwójnej ortorektyfikacji. Metoda ta przeznaczona jest głównie dla luźno stojącej niewysokiej zabudowy, gdzie obiekty nie przysłaniają się wzajemnie. Proces ten polega na tym, iż pierwsza ortofotomapa generowana jest z wykorzystaniem modelu NMT (ortorektyfikacji podlegają obiekty znajdujące się bezpośrednio na NMT), a na nią nakłada się drugą ortofotomapę, generowaną w procesie ortorektyfikacji z użyciem NMPT (głównie powierzchni dachów budynków).

Niezależnie od wybranej metody, proces prawdziwej (rzeczywistej) ortorektyfikacji wykonuje się w następujących etapach:

- 1) bazując na elementach orientacji zewnętrznej (EO) zdjęć oraz modelu pokrycia terenu, obrysach czy modelach budynków następuje zmiana położenia piksela zdjęcia,
- 2) przypisanie wartości jasności piksela obrazu wynikowego na podstawie piksela obrazu wejściowego (efekt najmniej poszarpanych krawędzi uzyskuje się, stosując biliniową metodę próbkowania),
- 3) korekcja radiometryczna, edycja linii łączenia, mozaikowanie i wyrównanie tonalne ortooobrazów oraz wypełnienie martwych pól treścią z sąsiednich zdjęć (ryc. 6.65).

Istotnie ważną kwestią w procesie produkcji prawdziwej ortofotografii jest powstawanie tzw. martwych pól (ryc. 6.66 i 6.67), czyli zamaskowanych miejsc, które na zdjęciu lotniczym wykonanym w rzucie środkowym zasłonięte są przez radialnie przesunięte górne fragmenty budynków. Po procesie ortorektyfikacji prowadzącym do właściwego nadania pozycji, brakuje w nich treści obrazu (czarne obszary). Miejsca te muszą zo-

stać wypełnione na podstawie analizy widoczności fragmentami z sąsiednich zdjęć, co bywa utrudnione w przypadku zwartej zabudowy ale przede wszystkim w przypadku braku odpowiedniego pokrycia podłużnego i poprzecznego. Kończącym etapem prac jest korekcja radiometryczna, rozmycie linii mozaikowania i połączenie pojedynczych ortofotografii w końcową prawdziwą ortofotomapę.



Ryc. 6.65. Porównanie dwóch metod generowania prawdziwej ortofotomapy: z wykorzystaniem NMT oraz modeli budynków (po lewej – widoczne martwe pola) oraz z wykorzystaniem NMPT i obrysów budynków pozyskanych w sposób automatyczny z chmury punktów ALS (po prawej – brak martwych pól)



Ryc. 6.66. Martwe pola w zabudowie śródmiejskiej (Bochnia)



Ryc. 6.67. Martwe pola na ortofotografii z zabudową bloków mieszkalnych (Tarnów)

### 6.18.3. Podsumowanie

W celu zapewnienia wypełnienia wszystkich potencjalnych martwych pól nalog fotogrametryczny pod produkcję ortofotomap prawdziwych musi zostać już na początku odpowiednio zaprojektowany. Duże znaczenie dla jakości wynikowej ortofotomapy prawdziwej ma gęstość wykorzystywanej chmury punktów ALS. Na jeden piksel prawdziwej ortofotomapy powinien przypadać wtedy co najmniej 1 punkt.

Generowanie ortofotomap prawdziwych z wykorzystaniem numerycznego modelu pokrycia terenu jest stosunkowo nowym rozwiązaniem, ale dzięki rozwojowi technologii fotogrametrycznych oraz lotniczego skanowania laserowego coraz częściej stosowanym w praktyce.

Ortofotomapy, w tym ortofotomapy prawdziwe mają szerokie zastosowanie, gdyż stanowią zarówno mapę jak i zdjęcie, niosą ze sobą wiele cennych informacji przestrzennych. Szybkie do pozyskania chętnie wykorzystywane są jako podkład do wielu opracowań planistycznych, map sytuacyjnych i wysokościowych, analiz kłęsk żywiolowych, znajdują także zastosowanie w precyzyjnym rolnictwie czy też jako sprawozdania z realizacji inwestycji.

Przykładami zastosowań prawdziwej ortofotomapy jest też inwentaryzacja terenów miejskich i z roślinnością wysoką, zadrzewionych jak lasy czy obszary chronione.

## Literatura

Kurczyński Z., 2014. *Fotogrametria*. PWN S.A, Warszawa, 656–677.

Zabrzaska-Gąsiorek B., Borowiec N., 2007. *Określenie zakresu wykorzystania danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego w procesie generowania prawdziwej ortofotomapy*. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17b, 831–840.

## Strony internetowe

[home.agh.edu.pl/~krisfoto/lib/exe/fetch.php?id=fotocyfrowa&cache=cache&media=fotocyfrowa:true\\_orto.pdf](http://home.agh.edu.pl/~krisfoto/lib/exe/fetch.php?id=fotocyfrowa&cache=cache&media=fotocyfrowa:true_orto.pdf)

dr inż. Artur Warchoń

## 6.19. Pomiary obiektów liniowych

### 6.19.1. Obszary zastosowań danych ALS

Ze względu na charakterystykę lotniczej platformy skanującej (samolot/helikopter) dane ze skanowania laserowego bardzo często znajdują zastosowanie w tzw. pomiarach korytarzowych infrastruktury. Dotyczy to zarówno procesu inwentaryzacji, jak i tworzenia odpowiedniej dokumentacji (map, podkładów) do projektowania nowych inwestycji. Pozyskiwanie danych ALS z pułapu lotniczego jest bardzo szybkie i wystarczająco dokładne do spełnienia powyższych celów. Istotną zaletą stosowania platformy lotniczej ALS jest skanowanie szczególnie w miejscach trudnodostępnych, do których dojazd jest niemożliwy lub utrudniony, a skanowanie naziemne (TLS lub MLS) trwałoby zbyt długo.

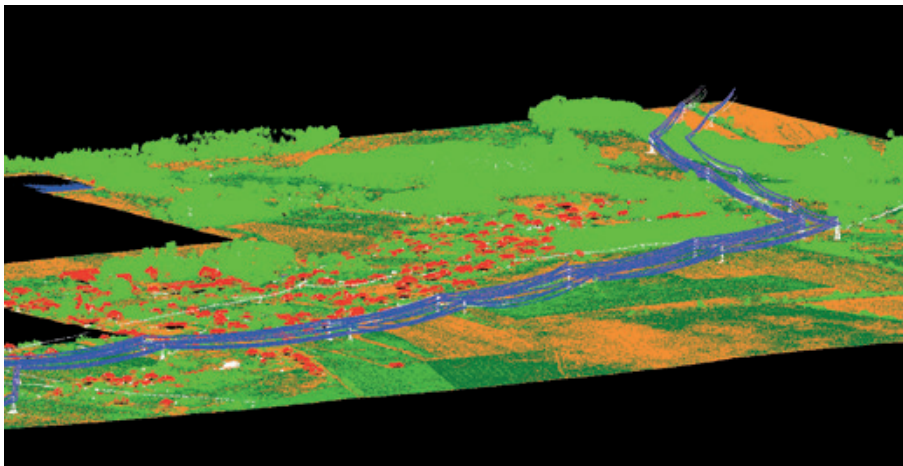
Wśród obiektów liniowych, dla których najczęściej wykonywane jest lotnicze skanowanie laserowe, wymienić można:

- linie energetyczne,
- linie/szlaki kolejowe,
- rurociągi naziemne i nadziemne,
- drogi.

Bezpośrednio chmury punktów ALS mogą służyć m.in. do:

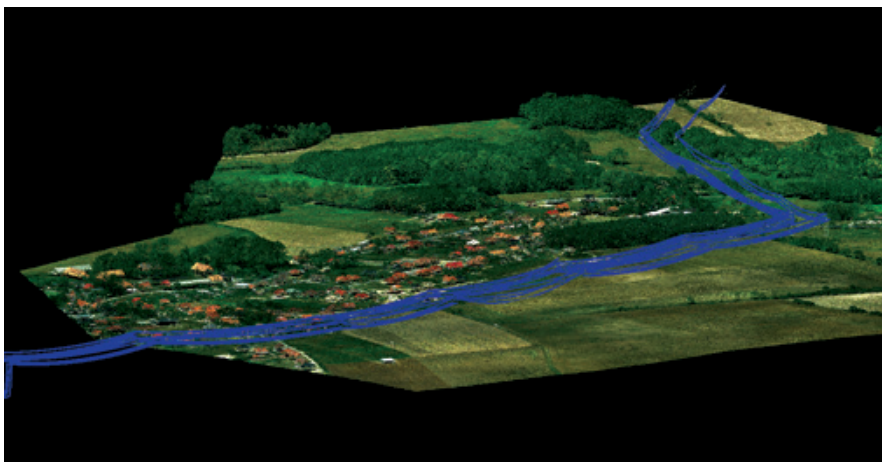
- inwentaryzacji przebiegu linii energetycznych (ryc. 6.68),
- wyznaczenia kolizji linii energetycznych z roślinnością wysoką oraz budynkami,
- kontroli zasięgu roślinności w stosunku do urządzeń przesyłowych,
- paszportyzacji sieci energetycznej,
- inwentaryzacji przebiegu rurociągów,
- inwentaryzacji słupów trakcyjnych sieci kolejowej oraz infrastruktury towarzyszącej,

- tworzenia podkładów do modelowania rozprzestrzeniania się hałasu w okolicach tras komunikacyjnych,
- inwentaryzacji oznakowania poziomego jezdni.



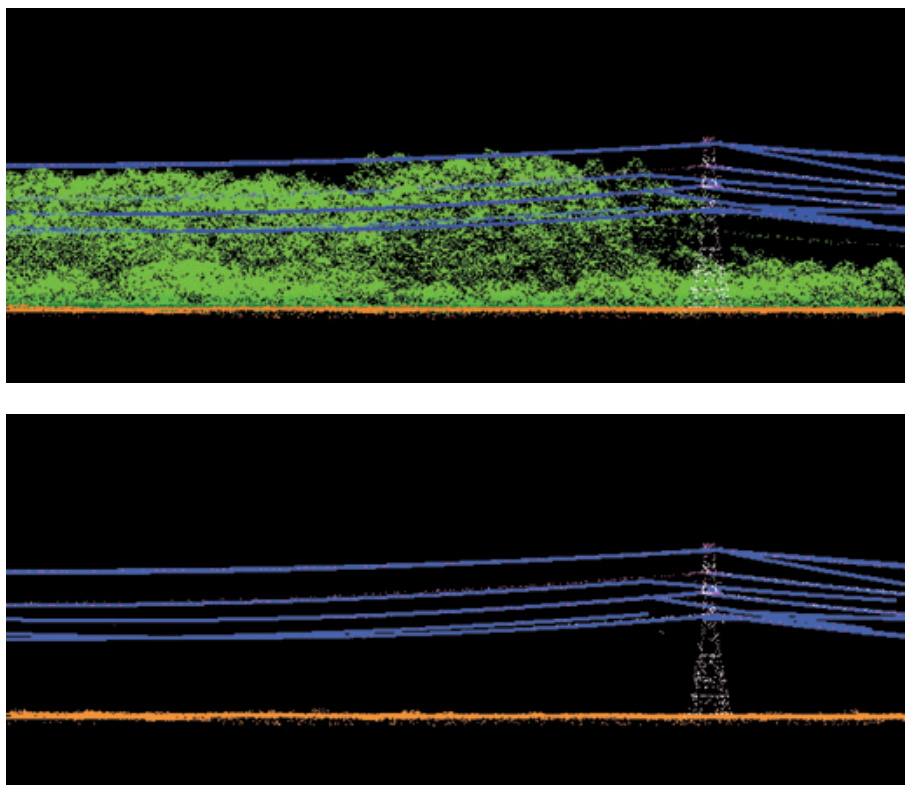
Ryc. 6.68. Sklasyfikowana chmura punktów: grunt (kolor pomarańczowy), zwektoryzowane przewody (kolor niebieski), budynki (kolor czerwony), roślinność (kolory zielone)

Sklasyfikowana chmura punktów ALS, dla której proces segmentacji przebiega w większości etapów automatycznie, pozwala na szybkie generowanie danych wektorowych (ryc. 6.69) lub też na filtrację (usunięcie) wybranych klas, które nie są potrzebne w niektórych opracowaniach (np. roślinności wysokiej czy niskiej; ryc. 6.70).



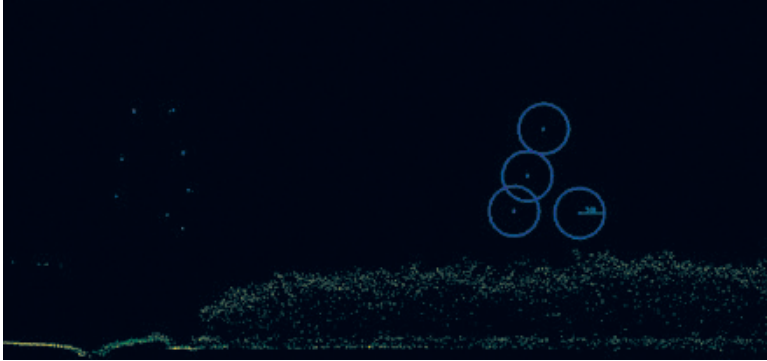
Ryc. 6.69. Chmura punktów pokolorowana wg wartości RGB wraz z linią energetyczną (kolor niebieski)

Generowanie odpowiednich widoków pozwala na pomiar odległości pomiędzy przewodami/słupami a występującą roślinnością lub innymi obiektami (np. domami). Niektóre aplikacje umożliwiają również automatyczną klasyfikację chmury punktów wg kryterium odległości od przewodu energetycznego (po wcześniejszej ich detekcji; ryc. 6.71).



Ryc. 6.70. Sklasyfikowana chmura punktów ALS przed (u góry) oraz po odfiltrowaniu roślinności (u dołu)

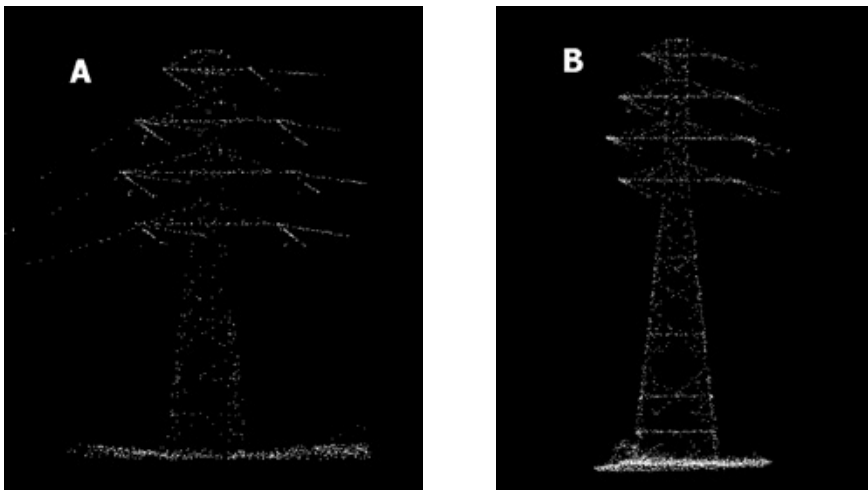
Oprócz kolizji linii energetycznych z roślinnością wysoką, istotnym zagrożeniem, które należy monitorować, jest ryzyko spowodowane zmianami położenia przewodów względem budynków. Pod wpływem temperatury (zmiany do której np. przyczynia się wiatr schładzający kable energetyczne) długość przewodu pomiędzy słupami ulegnie zmianie. W przypadku wyższej temperatury przewód się wydłuży, a więc obniży, natomiast w przypadku niskiej temperatury skurczy się. Istotnym czynnikiem, oprócz temperatury jest również wiatr, który może wywołać kołysanie się przewodu, a w efekcie jego uszkodzenie przez zetknięcie z przeszkodą. Sam przepływ wysokiego napięcia powoduje rozgrzewanie się przewodów i ich obniżanie.



Ryc. 6.71. Widok przekroju sklasyfikowanej chmury punktów ALS z zaznaczonymi na niebiesko obszarami o promieniu 5 m od każdego z wykrytych przewodów (brak kolizji z roślinnością wysoką)

### 6.19.2. Stosowane gęstości chmur punktów ALS

W większości przypadków gęstości danych ALS wymagane dla opracowań korytarzowych wahają się pomiędzy 10–25 pkt/m<sup>2</sup>, w zależności od konkretnego zadania. Dla obiektów rurowych, naziemnych, których średnica jest większa niż 150 mm, wystarcza chmura punktów ALS o gęstości 8 pkt/m<sup>2</sup>, natomiast dla linii energetycznych składających się z przewodów o średnicy 8–25 mm wartości te wynoszą ok. 20 pkt/m<sup>2</sup>. Można się spotkać z opracowaniami, w których korzystano z chmury punktów o gęstości zarówno 2,5 pkt/m<sup>2</sup>, jak i 74 pkt/m<sup>2</sup> dla celów pomiarów (monitoringu, inwentaryzacji) linii energetycznych (ryc. 6.72).



Ryc. 6.72. Słup linii energetycznej zeskanowany z gęstością 4 pkt/m<sup>2</sup> (A – lewa strona) oraz z gęstością 12 pkt/m<sup>2</sup> (B – prawa strona)

W celu uzyskania wysokich wartości gęstości wynikowej chmury punktów stosuje się niski pułap lotu oraz jak najniższą dopuszczalną prędkość lotu. Najlepszymi w tym celu nośnikami platform skanujących są niewątpliwie śmigłowce. Oprócz podstawowego wyposażenia platformy ALS bardzo często montowane są na niej również dodatkowe sensory, np. kamery wideo i/lub kamery termowizyjne (od jednej do kilku sztuk), które pozwalają na wykrywanie uszkodzeń przewodów niewidocznych gołym okiem czy temperaturę izolatorów.

### 6.19.3. Podsumowanie

Istniejące dane o odpowiedniej gęstości nominalnej np. 12 pkt/m<sup>2</sup> mogą być z powodzeniem stosowane do wektoryzacji/modelowania obiektów liniowych (ryc. 6.68, 6.69, 6.72B). Jeżeli istnieje potrzeba wykorzystania danych o dokładności bądź gęstości wyższej, rozwiązaniem pozostaje wykonanie dedykowanego lotniczego skanowania laserowego w formie projektu korytarzowego. Projekty takie są już wykonywane na zlecenie operatorów sieci PGE Dystrybucja SA oraz ENEA Operator.

### Literatura

- Kurczyński Z., Adamek A., Bratuś K., 2012. *Komplementarny dla zdjęć*. Magazyn Geoinformacyjny nr 5 (204).
- McLaughlin R. A., 2006. *Extracting transmission lines from airborne LIDAR LiDAR data*, Geoscience and Remote Sensing Letters. IEEE, Vol. 3, Issue 2, 222–226.
- Melzer T., Briese C., 2004. *Extraction and modeling of power lines from ALS point clouds*. Proceeding of 28th Workshop Austrian Association For Pattern Recognition, 17–18 June 2004, Hagenberg, Austria, 47–54.
- Renslow M., 2012. *Airborne Topographic LiDARdar Manual*. ASPRS.
- Vosselman G., Maas H.-G., 2010. *Airborne and terrestrial Laser Scanning*. CRC Press Taylor & Francis Group.

### Strony internetowe:

- [www.geoforum.pl/?page=news&id=13062&link=pge-zamawia-skanowanie-linii&menu=46879,46880&year=2012&category=41](http://www.geoforum.pl/?page=news&id=13062&link=pge-zamawia-skanowanie-linii&menu=46879,46880&year=2012&category=41)
- [www.operator.enea.pl/news/11/aktulanosci/2011-05-11/smiglowiec-nad-naszymi-liniami-743.html](http://www.operator.enea.pl/news/11/aktulanosci/2011-05-11/smiglowiec-nad-naszymi-liniami-743.html)



## 6.20. Inwentaryzacja infrastruktury technicznej naziemnej – drogi

### 6.20.1. Informacja o podstawie prawnej

Zgodnie z obowiązującymi przepisami dotyczącymi ewidencji dróg (rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 lutego 2005 r. w sprawie sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych, obiektów mostowych, tuneli, przepustów i promów oraz rejestru numerów nadanych drogom, obiektom mostowym i tunelom – Dz.U. z 2005 r. Nr 67 poz. 582) obowiązkiem każdego zarządcy jest posiadanie i utrzymywanie aktualnego zasobu danych opisujących sieć dróg publicznych. Wszelkie dane drogowe powinny być gromadzone w dowiązaniu do przyjętego systemu referencyjnego i przechowywane w utworzonych w tym celu bazach danych. Przebieg dróg należy definiować jako ciąg następujących po sobie punktów referencyjnych i odcinków międzywęzłowych.

Obecnie rynek usług związanych z zarządzaniem drogami oferuje wiele programów komputerowych, z jednej strony zaspokajających indywidualne potrzeby zarządców dróg, a z drugiej – spełniających wymagania rozporządzenia. Niezależnie od wyboru konkretnego programu informatycznego, musi być on zasilony odpowiednimi danymi spełniającymi określone wymogi dokładnościowe.

Ewidencja dróg publicznych i obiektów mostowych obejmuje książki dróg i obiektów mostowych, dzienniki objazdu dróg, karty i wykazy obiektów mostowych oraz mapę techniczno-eksploatacyjną sporządzoną z zastosowaniem znaków umownych określonych w rozporządzeniu.

Mapę techniczno-eksploatacyjną sporządza się i prowadzi w skali 1 : 25 000 lub większej – dla dróg powiatowych oraz wszystkich kategorii dróg publicznych w granicach miast, z wyjątkiem autostrad i dróg ekspresowych, w skali 1 : 100 000 – dla dróg wojewódzkich i krajowych.

Dla celów ewidencyjnych prowadzi się jednolity sposób lokalizacji w ciągu drogi, tj.:

- elementów drogi,
- zmian parametrów drogi,
- drogowych obiektów inżynierskich,
- promów,
- urządzeń technicznych związanych z prowadzeniem i zabezpieczeniem ruchu i innych urządzeń niezwiązanych z funkcjonowaniem drogi.

Dane należy podawać:

- w odniesieniu do szerokości elementów w metrach z dokładnością do 0,1 m,
- w odniesieniu do długości elementu lub odległości pomiędzy sąsiednimi przekrojami charakterystycznymi – w „m” z dokładnością do 1,0 m oraz
- w odniesieniu do powierzchni elementu pomiędzy sąsiednimi przekrojami charakterystycznymi – w „tys. m<sup>2</sup>” z dokładnością do 10 m<sup>2</sup>.

## 6.20.2. Inwentaryzacja dróg z w oparciu o dane ALS

Do sporządzenia lub aktualizacji mapy techniczno-eksploatacyjnej można wykorzystać dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego oraz cyfrową ortofotomapę lotniczą. Chmura punktów ALS zapewnia kartometryczne, niemal ciągle odwzorowanie pasa drogowego. Stanowi ona gotowy produkt do analiz, a dodatkowo można z niej uzyskać wszystkie potrzebne wymiary, model 3D, jak również profile i przekroje.

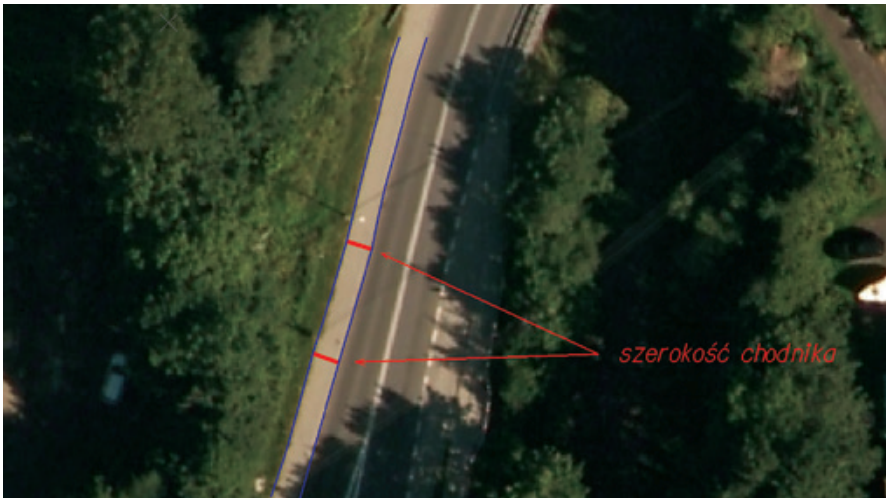
Wspomniany w rozporządzeniu pomiar gabarytów (szerokości) poszczególnych elementów można wykonać z dokładnością 0,1 m, ponieważ chodzi tu o punkty położone względem siebie sytuacyjnie w układzie lokalnym. Jeśli chmura punktów nie jest zniekształcona, warunek będzie spełniony. Dokładność identyfikacji obiektów na chmurze punktów można skontrolować, a w miejscach wątpliwych, także podnieść, korzystając z ortofotomapy lotniczej (ryc. 6.73 i 6.74). Jeśli chodzi o długości elementów, wystarczy zapewnić dokładność 1,0 m. Mapę sporządza się w 2D, więc informacja o wysokości staje się wartością dodaną.



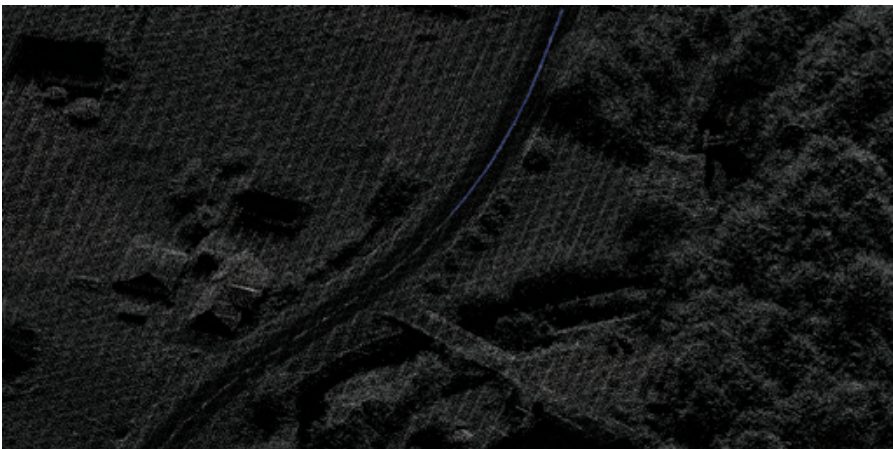
Ryc. 6.73. Wyznaczanie szerokości elementów pasa drogowego na podstawie chmury punktów ALS

Chmurę punktów ALS analizowanego odcinka drogi można wczytać do odpowiedniego specjalistycznego oprogramowania. Korzystając z różnych funkcji wyświetlania chmury punktów ALS, narzędziami wyrysowuje się w widoku z góry interesujące operatora obiekty z pasa drogowego. Elementy powierzchniowe, takie jak: jezdnie, chodniki, pasy zieleni należy zwektoryzować jako polilinie zamknięte, elementy liniowe, np. krawężniki, liniowe oznakowanie poziome, bariery, ekrany – jako polilinie. Elementy,

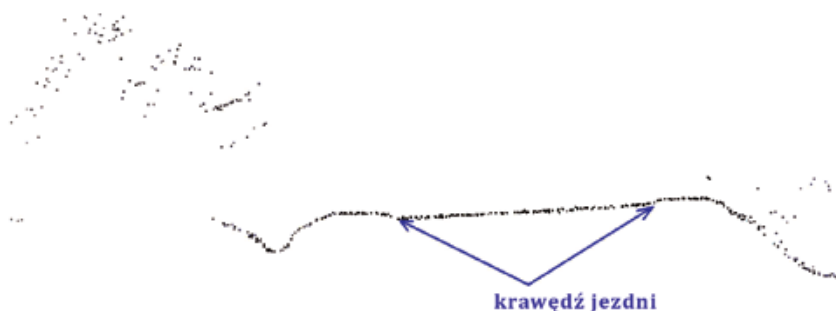
takie jak: studzienki, drzewa, oświetlenie, oznakowanie pionowe – wektoryzuje się jako obiekty punktowe. Obraz intensywności chmury punktów ALS umożliwia szybkie rozpoznanie większości parametrów technicznych, elementów zagospodarowania oraz wyposażenia odcinka drogi (ryc. 6.75). Przy identyfikacji obiektów można wspomóc pracę wyświetlając chmurę punktów według atrybutów RGB. Aby dokładnie wyodrębnić z chmury punktów ALS krawędź jezdni lub krawężniki, warto posługiwać się przekrojami (ryc. 6.76).



Ryc. 6.74. Wyznaczanie szerokości elementów pasa drogowego na podstawie ortofotomapy lotniczej

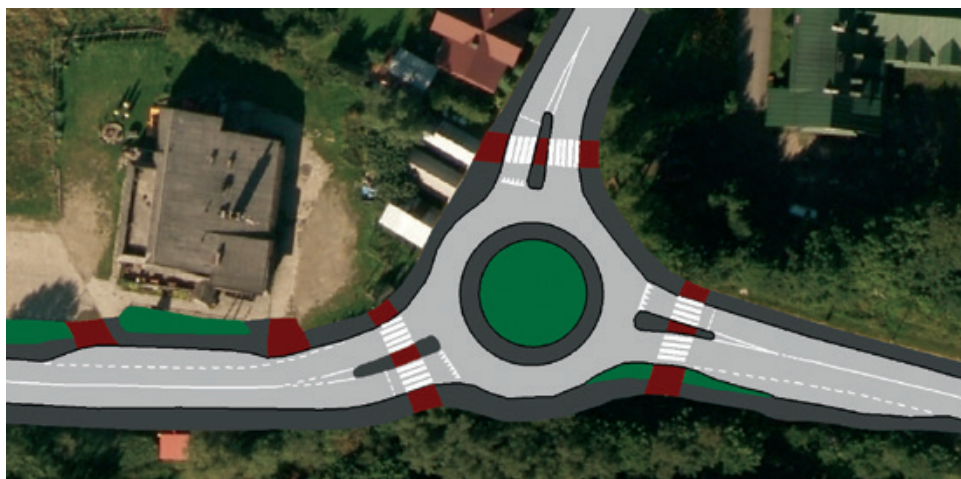


Ryc. 6.75. Wektoryzacja obiektów liniowych (oznakowanie poziome) wykonana w chmurze punktów ALS



Ryc. 6.76. Wektoryzacja krawędzi jezdni na podstawie przekrojów chmury punktów ALS

W efekcie prac na chmurze punktów ALS otrzymuje się mapę 2D pasa drogowego i jego elementów (ryc. 6.77) w formatach np.: DGN, DWG, DXF lub SHP. Jeżeli przedmiotem opracowania ma być również mapa 3D, to na etapie wektoryzacji ekranowej, operator musi przyciągać (ang. *snapping*) tworzone linie w przestrzeni, do odpowiednich punktów ALS w chmurze lub wektory 2D zrzutować na wygenerowany z chmury punktów ALS – numeryczny model terenu (ryc. 6.78).



Ryc. 6.77. Fragment zwektoryzowanego pasa drogowego na tle cyfrowej ortofotomapy lotniczej

Tak otrzymaną mapę drogi należy zaimportować do bazy danych w taki sposób, aby każdemu obiektowi graficznemu można było przypisać odpowiednie wartości atrybutów opisowych. W przypadku chodników są to: długość, szerokość, kilometraż początkowy i końcowy, nawierzchnia itp.

Niektóre elementy, a także atrybuty obiektów należy pozyskać z pomiarów uzupełniających. Można je przeprowadzić technologią mobilnego skanowania laserowego (MLS), pomiaru tradycyjnego, odczytać z mapy zasadniczej lub pozyskać na podstawie dokumentacji z wideo-rejestracji. W tabeli poniżej (tab. 6.3) przedstawiono rodzaje obiektów, jakie można zinwentaryzować, wykorzystując technologię lotniczego skanowania laserowego oraz cyfrową ortofotomapę lotniczą, przy zachowaniu odpowiedniej gęstości skanowania i wielkości piksela. Zaprezentowano w niej również inne metody, jakie powinny być stosowane w celu uzyskania zadowalających wyników.



Ryc. 6.78. Fragment wektoryzowanego pasa drogowego na tle pokolorowanej (RGB) chmury punktów ALS

Tabela 6.3. Elementy zagospodarowania i wyposażenia odcinka drogi

Chmura punktów ALS i ortofotomapa lotnicza	Pomiar uzupełniający (MLS, pomiar tradycyjny, EGIB, wektoryzacja mapy zasadniczej, georadar)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. korona drogi</li> <li>2. jezdnia</li> <li>3. pobocze utwardzone i nieutwardzone</li> <li>4. opaska</li> <li>5. pas awaryjny</li> <li>6. pas dzielący</li> <li>7. chodnik</li> <li>8. pas zieleni</li> <li>9. ścieżka rowerowa</li> <li>10. jezdnia zbierająco-rozprowadzająca</li> <li>11. zatoka autobusowa</li> <li>12. torowisko</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. odwodnienie</li> <li>2. pas drogowy</li> <li>3. uzbrojenie podziemne</li> <li>4. uzbrojenie naziemne</li> <li>5. oznakowanie pionowe</li> <li>6. sygnalizacja świetlna</li> <li>7. oświetlenie</li> <li>8. inne</li> </ol>

Tabela 6.3. cd.

Chmura punktów ALS i ortofotomapa lotnicza	Pomiar uzupełniający (MLS, pomiar tradycyjny, EGIB, wektoryzacja mapy zasadniczej, georadar)
13. peron przystanku 14. skrzyżowania 15. obiekty inżynierskie i promy 16. skrajnia drogowa 17. zjazdy z drogi 18. obiekty przydrożne (np.: parking, hotel, miejsca obsługi pojazdów, stacja paliw) 19. oznakowanie poziome 20. bariery 21. ekrany 22. inne	

### 6.20.3. Podsumowanie

Głównymi zaletami zastosowania danych z lotniczego skanowania laserowego do wykonania lub aktualizacji mapy techniczno-eksploatacyjnej dróg są:

- znaczne skrócenie czasu pomiaru terenowego,
- realizacja prac bez konieczności wstrzymywania ruchu na drodze,
- całkowite bezpieczeństwo pomiaru dróg o dużym natężeniu ruchu,
- możliwość pozyskania wielu produktów pochodnych takich jak: mapy 2D, modele 3D, profile i przekroje na podstawie jednego pomiaru ALS.

### Literatura

- Anjaneyulu Y., Manickam V., 2011. *Environmental Impact Assessment Methodologies*. CRC Press.
- Chang H.-Ch., Ge L., Rizos Ch., 2004. *Environmental Impact Assessment of Mining Subsidence by Using Spaceborne Radar Interferometry*. FIG Regional Conference, Australia.
- Morris P., Therivel R., 1995. *Methods of environmental impact assessment*. UCL Press.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 lutego 2005 r. w sprawie sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych, obiektów mostowych, tuneli, przepustów i promów oraz rejestru numerów nadanych drogom, obiektom mostowym i tunelom (Dz.U. z 2005 r. Nr 67 poz. 582).

## 6.21. Analizy wolumetryczne 3D

### 6.21.1. Wady i zalety technologii stosowanych do pomiaru objętości obiektów

Obliczanie objętości obiektów jest jednym z podstawowych zadań inżynierskich wykonywanych podczas prac realizacyjnych, inwentaryzacji powykonawczych czy też monitoringu. W zależności od charakteru obiektu, którego objętość jest przedmiotem obliczeń, należy dobrać odpowiednią technologię pomiarową. Przy obiektach o niewielkich rozmiarach (kilkanaście/kilkadziesiąt metrów) i stosunkowo łatwej dostępności, najbardziej optymalny jest pomiar bezpośredni, tj. tachimetryczny lub z wykorzystaniem GNSS. W sytuacji wykonywania analiz dla obszarów o zdecydowanie większych powierzchniach (hektary, km<sup>2</sup>) czy dużych deniwelacjach terenu, zbudowanych z materiałów sypkich bądź pokrytych zwartym lasem, najlepszym rozwiązaniem jest niewątpliwie zastosowanie lotniczego skanowania laserowego. Dane zebrane z pułapu lotniczego (samolot/helikopter) mogą być w tym celu bardzo przydatne ze względu na następujące zalety:

- nie wymagają bezpośredniego kontaktu z mierzonym obiektem,
- pozyskanie danych dla dużych obszarów jest stosunkowo szybkie,
- dane mogą być pozyskiwane zarówno w dzień, jak i w nocy (z ograniczeniem wykonania zdjęć w zakresie widzialnym).

Częstotliwość pozyskiwania danych dla tego samego miejsca ograniczona jest jedynie wielkością skanowanego obszaru oraz środkami na sfinansowanie kolejnych nalołów.

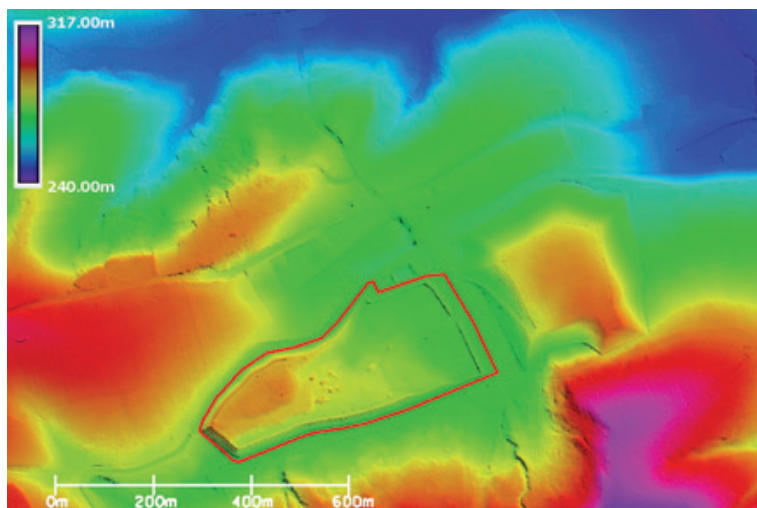
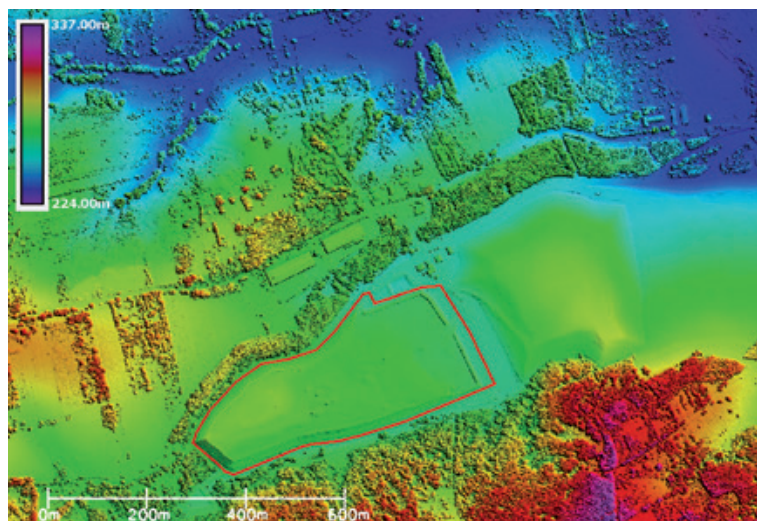
Brak bezpośredniego kontaktu z mierzonym obiektem jest bardzo istotnym czynnikiem podczas pomiaru składowisk materiałów sypkich. Konkurencyjną technologią w tym zakresie mogłaby być wciąż fotogrametria naziemna, jednak wymagałaby wykonywania zdjęć z podwyższenia. Alternatywą jest obecnie wykonywanie zdjęć o dużym pokryciu poprzecznym i podłużnym z pułapu UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*), a następnie zastosowanie metod automatycznego łączenia zdjęć (ang. *stereomatching*) w celu uzyskania zbioru punktów ze zdjęć. Chmury punktów pozyskane w powyższy sposób są zdecydowanie gęstsze, niż uzyskane ze skanowania laserowego.

Bezkonkurencyjna w przypadku terenów pokrytych zwartą roślinnością wysoką, gdzie właściwe rozmieszczenie pikiet stanowiących punkty charakterystyczne jest utrudnione, staje się technologia lotniczego skanowania laserowego. Wykorzystując dane ALS, po przeprowadzeniu klasyfikacji chmury punktów, można „odfiltrować” warstwę roślinności i wykonywać analizy na „odsłoniętym” obiekcie (ryc. 6.79).

Wśród metod pomiaru ukształtowania terenu do obliczania objętości można wyróżnić:

- metodę siatki kwadratów,
- metodę punktów rozproszonych,

- metodę przekrojów podłużnych i poprzecznych,
- metodę fotogrametryczną obserwacji stereogramów 3D,
- laserowe skanowanie naziemne i lotnicze.



Ryc. 6.79. Wizualizacja NMPT (na górze) oraz NMT (na dole) dla tego samego obszaru składowiska odpadów komunalnych

Pierwsze trzy metody, ze względu na charakter pomiaru (mierzone są wybrane punkty charakterystyczne), będą dokonywały uproszczenia form terenu. Podczas pomiaru bezpośredniego wiele zależy od interpretacji rzeźby przez osobę prowadzącą pomiar



i wyboru przez nią punktów najlepiej przedstawiających ukształtowanie terenu. Problemów takich nie ma podczas wykorzystania chmury punktów ALS lub TLS. Przy gęstym nalocie ALS otrzymuje się zbiór punktów na powierzchni terenu, które można traktować jako jego ciągłą reprezentację. Wykorzystując poniższy wzór (Boulassall, 2011), w uproszczony sposób oblicza się przybliżoną, średnią odległość pomiędzy punktami:

$$SR = \frac{1}{\sqrt{d}}$$

gdzie:

- $SR$  – rozdzielczość przestrzenna (ang. *spatial resolution*),
- $d$  – gęstość chmury punktów w pkt/m<sup>2</sup>.

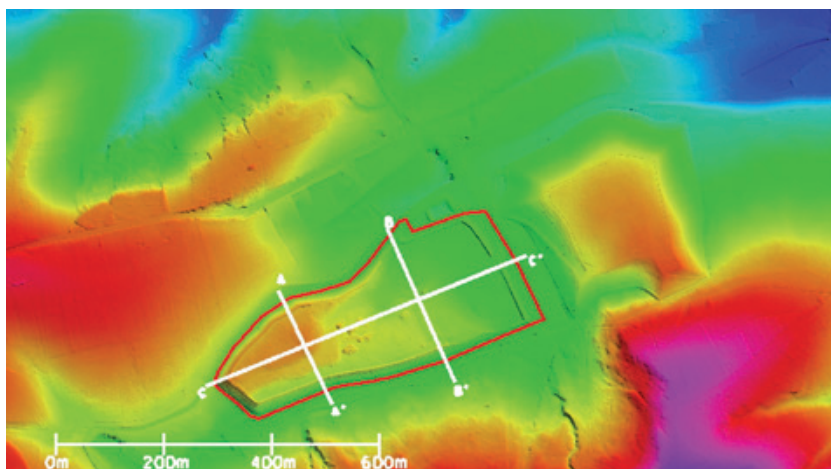
Biorąc pod uwagę założone parametry dla chmur punktów ALS rejestrowanych podczas projektu ISOK, można obliczyć przybliżoną, średnią odległość pomiędzy punktami znajdującymi się na powierzchni terenu przy założeniu całkowitego braku roślinności. Jak przedstawiono w tabeli poniżej (tab. 6.4) niezależnie od standardu produktu (I czy II) chmury punktów z projektu ISOK, odległości te są co najmniej 10 razy, a nawet 100 razy mniejsze niż podczas standardowego pomiaru bezpośredniego.

Tabela 6.4. Przybliżona, średnia odległość pomiędzy punktami znajdującymi się na powierzchni terenu przy założeniu braku roślinności, w zależności od gęstości chmury punktów

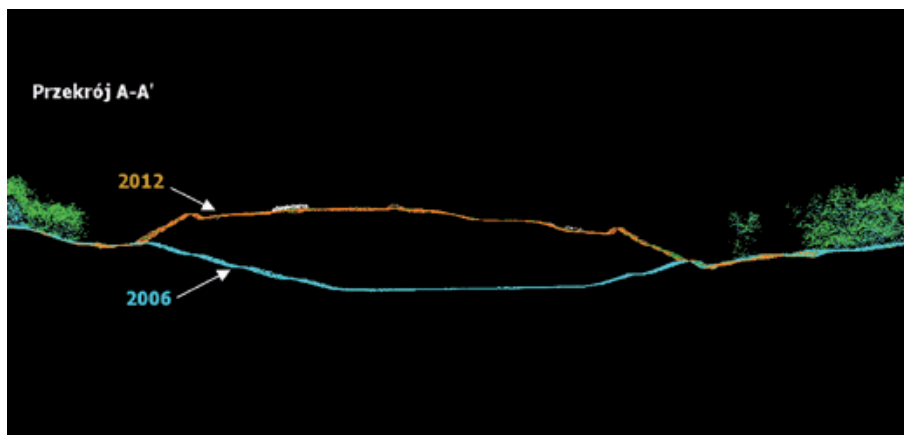
Gęstość chmury punktów [pkt/m <sup>2</sup> ]	Odległości pomiędzy punktami [m]
12	0,29
6	0,41
4	0,50

Oprócz gęstego pomiaru ALS, a co za tym idzie niewielkiemu uproszczeniu kształtu obiektu, istotną zaletą jest również swoboda pracy. Podczas pomiaru tachymetrycznego czy GNSS otrzymywany jest zbiór punktów w geometrii założonej przez metodę pomiaru. Tworzenie profilu w takim przypadku oparte jest przeważnie na modelu, co powoduje, że otrzymany profil będzie różnił się od rzeczywistości. Natomiast w przypadku korzystania z chmury punktów ALS można wygenerować profil w dowolnym miejscu i w dowolnym kierunku, ale oparty na punktach pomiarowych. Przykłady widoków profili przedstawiono na ryc. 6.80. W lewym górnym rogu (kolorowanie według wysokości) wskazano umiejscowienie profili na NMT, natomiast na pozostałych rycinach zwizualizowano profile prowadzone przez obiekt (chmura punktów ALS) wzdłuż zaznaczonych linii (A–A' – ryc. 6.81, B–B' – ryc. 6.82 oraz C–C' – ryc. 6.83) z uwzględnieniem stanu z roku 2006 (kolor niebieski), oraz z roku 2012 (kolor pomarańczowy).

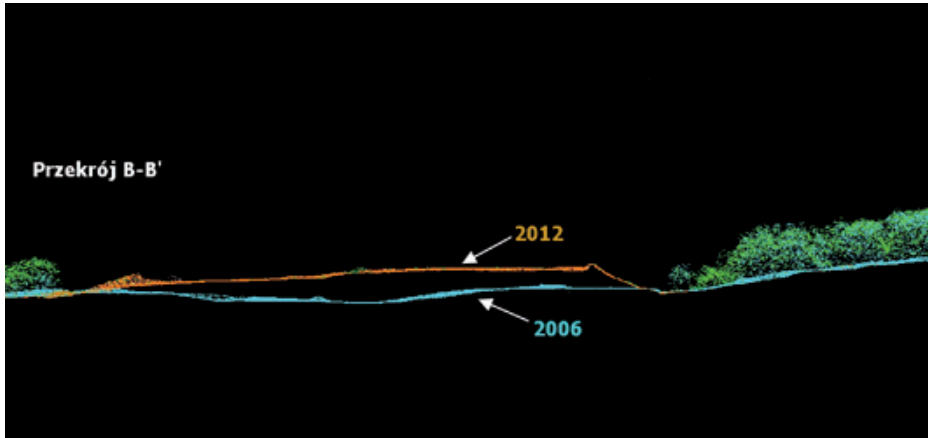
Wymienione powyżej zalety stosowania chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego w dużej mierze dotyczą również obliczania objętości (ryc. 6.84). Już przy wyświetleniu chmur punktów kolorowanych wg wartości wysokości n.p.m. dla nalotów ALS z 2006 oraz z 2012 roku można zaobserwować różnice w ukształtowaniu terenu (ryc. 6.81; biała strzałka).



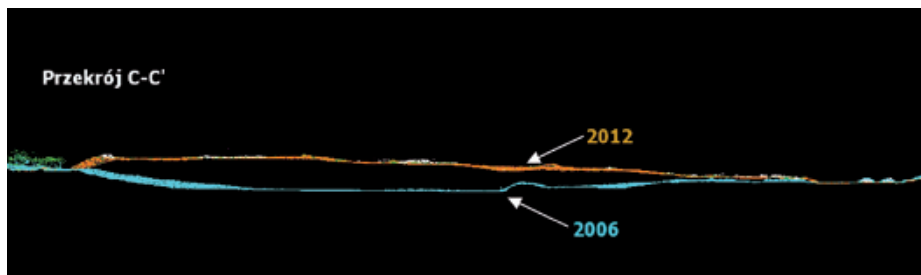
Ryc. 6.80. Szkielet profilu przez obiekt na podkładzie NMT



Ryc. 6.81. Profil A-A' (chmura punktów) dla dwóch momentów – rok 2006 (kolor niebieski) oraz rok 2012 (kolor pomarańczowy)



Ryc. 6.82. Profil B-B' (chmura punktów) dla dwóch momentów – rok 2006 (kolor niebieski) oraz rok 2012 (kolor pomarańczowy)

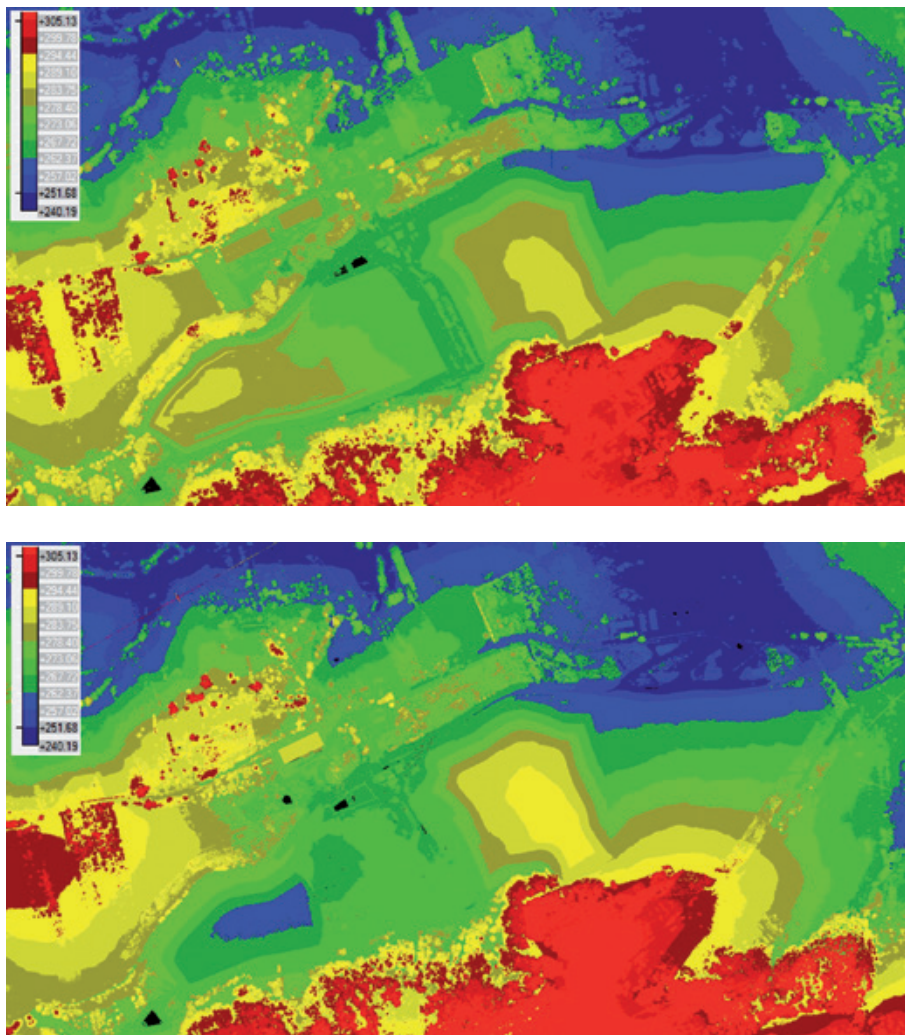


Ryc. 6.83. Profil C-C' (chmura punktów) dla dwóch momentów – rok 2006 (kolor niebieski) oraz rok 2012 (kolor pomarańczowy)

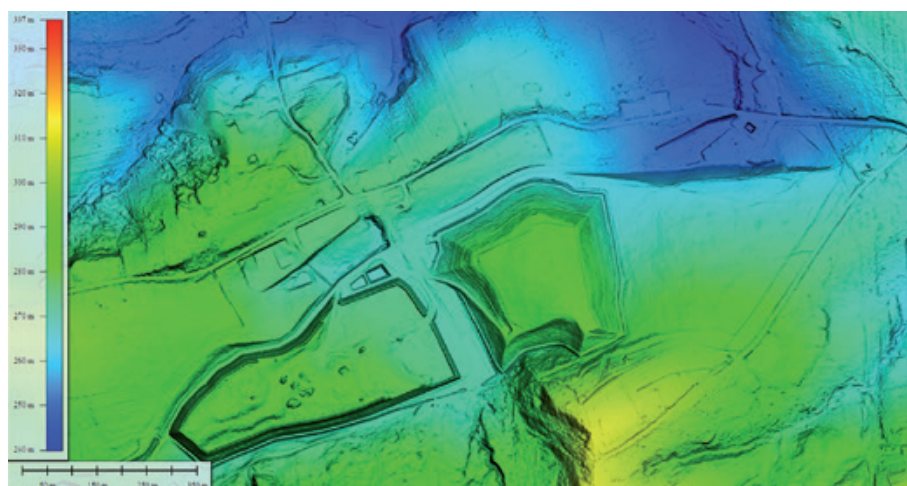
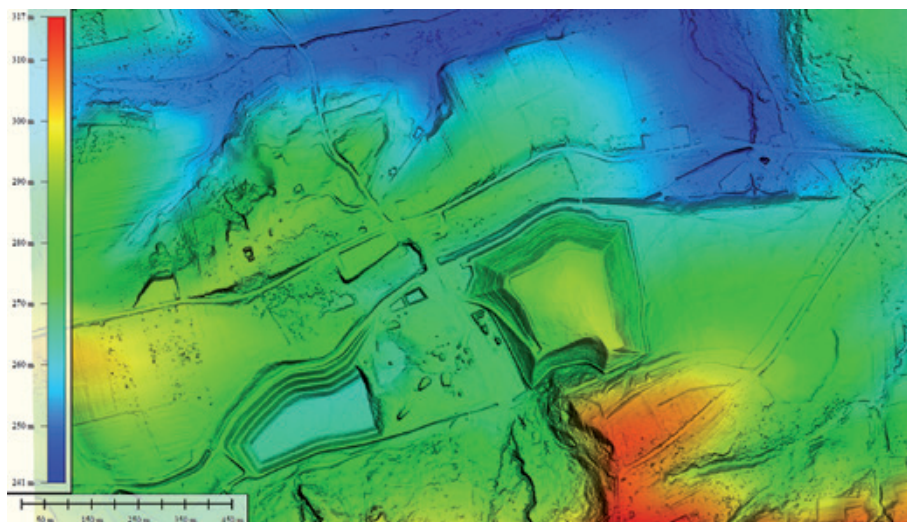
Najbardziej precyzyjną formą aproksymacji ukształtowania terenu jest model TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*). Przy punktach pomiarowych występujących co ok. 0,3–0,5 m błędy powstałe przy zamianie kształtu powierzchni rzeczywistej na jej cyfrową reprezentację są bardzo niewielkie. Aby poznać wartość różnicy w objętości obiektu pomiędzy 2012 i 2006 rokiem, należy wygenerować powierzchnię TIN dla chmury punktów ALS z roku 2006, a następnie dla danych z roku 2012. Różnica pomiędzy tymi dwoma modelami wskazuje na zmianę objętości wysypiska komunalnego, która w okresie 2006–2012 wyniosła 1,175 mln m<sup>3</sup>. Różnice objętości oblicza się zarówno pomiędzy modelami TIN, rastrowymi modelami GRID, jak również pomiędzy nimi, a płaszczyzną o zadanej wartości wysokości.

W przypadku braku specjalistycznego oprogramowania do przetwarzania chmur punktów ALS lub niewydajnego sprzętu komputerowego zalecana jest praca wprost na modelach rastrowych. Modele takie można generować na bazie sklasyfikowanej chmury punktów ALS lub gotowych produktów LiDAR. Przykładowe dane ze składowiska

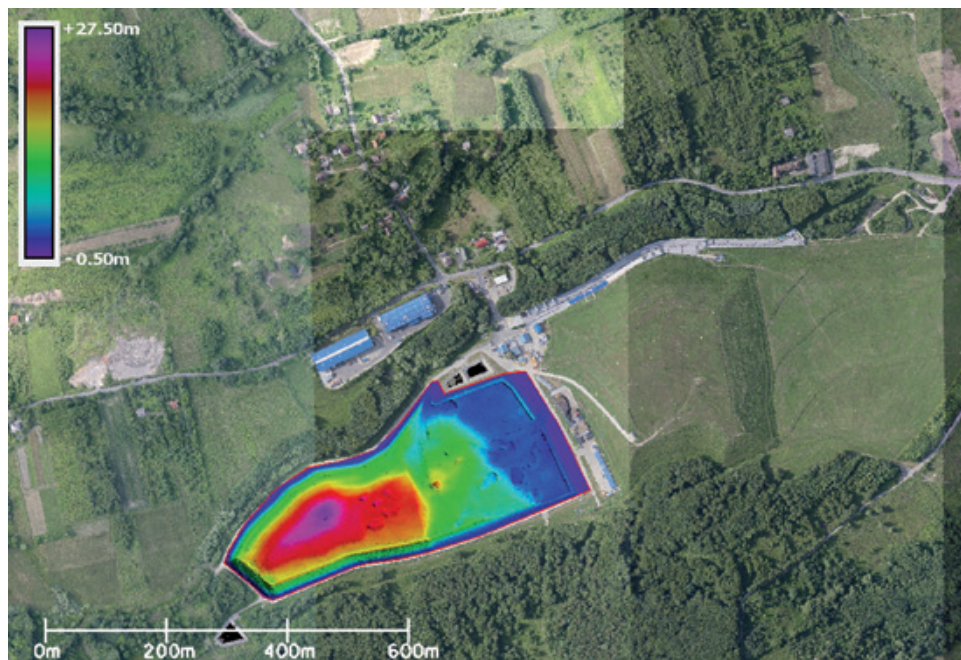
odpadów „Barycz” NMT dla lat 2006 oraz 2012 przedstawiono na ryc. 6.85, natomiast model różnicowy (NMT\_2012 „minus” NMT\_2006) zwizualizowano na ryc. 6.86. W tym przypadku różnica objętości wyniosła 1,183 mln m<sup>3</sup>.



Ryc. 6.84. Chmura punktów ALS pokolorowana wg wysokości n.p.m. – stan w roku 2006 (na górze) oraz w roku 2012 (na dole) dla składowiska odpadów „Barycz”



Ryc. 6.85. Model NMT\_2006 (na górze) oraz NMT\_2012 (na dole) dla obszaru wysypiska komunalnego



Ryc. 6.86. Wizualizacja różnicy przebiegu NMT z roku 2006 oraz 2012 na tle chmury punktów pokolorowanej wg wartości RGB

### 6.21.2. Podsumowanie

Lotnicze skanowanie laserowe (ALS) posiada potencjał i może być wykorzystywane do analiz wolumetrycznych zwłaszcza dla projektów wielkoobszarowych. W zależności od oczekiwanej dokładności wyniku analizy, można stosować różne modele reprezentacji terenu, a także różne algorytmy obliczania objętości. Prostsze modele, dają wynik mniej dokładny ale w krótszym czasie. Natomiast bardziej skomplikowane algorytmy wymagają większej mocy obliczeniowej oraz ilości czasu poświęconej na rozwiązanie zadania, lecz uzyskiwany wynik jest bardziej dokładny.

### Literatura

- Boulaassal H., Landes T., Grussenmeyer P., 2011. *Reconstruction of 3D vector models of buildings by combination of ALS, TLS and VLS data*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16, 2011, ISPRS Trento 2011 Workshop, 2–4 March 2011, Trento, Italy.
- Kurczyński Z., 2014. *Fotogrametria*. PWN S.A, Warszawa, 241–266.
- Woźniak P., 2012. *Bazy danych georeferencyjnych w ISOK – Konferencja – Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK)*. Warszawa.

## Strony internetowe

[www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-5-W16/239/2011/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-239-2011.html](http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-5-W16/239/2011/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-239-2011.html)

[www.isok.gov.pl/dane/web\\_articles\\_files/189/05-p-wozniak-bazy-danych-georeferencyjnych-w-isok.pdf](http://www.isok.gov.pl/dane/web_articles_files/189/05-p-wozniak-bazy-danych-georeferencyjnych-w-isok.pdf)

mgr inż. Martyna Ziółkowska

## 6.22. Generowanie modeli 3D budynków

### 6.22.1. Dane wykorzystywane do tworzenia modeli 3D budynków

Administracja lokalna zarządzająca obszarami miast w swojej codziennej pracy sięga obecnie coraz częściej po najnowsze rozwiązania technologiczne z dziedziny geoinformatyki. Za pomocą niezmiernie realistycznych i bardzo użytecznych wizualizacji urzędnicy starają się ułatwiać komunikację i wymianę informacji z mieszkańcami, a także przyciągać uwagę turystów. Poza samą wizualizacją, dane 3D mogą służyć do rozwiązywania konkretnych problemów i zadań stojących przed urzędnikami, jak choćby wsparcie przy wydawaniu decyzji administracyjnych (np. wysokość zabudowy, kataster słoneczny, ocienienie budynków sąsiednich itd.).

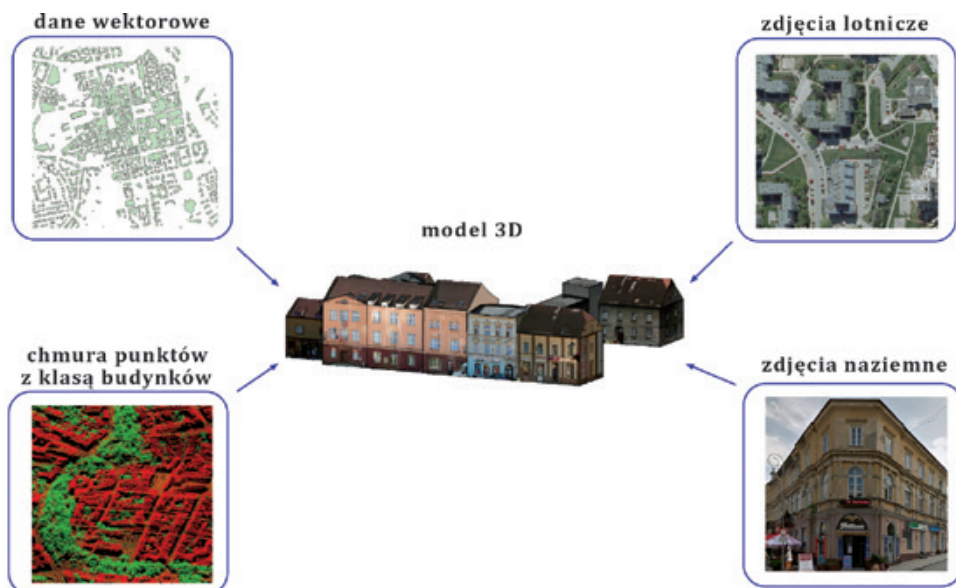
Źródła danych, jakie mogą być wykorzystywane do tworzenia trójwymiarowych (3D) modeli budynków to:

- dane wektorowe (np. dane o charakterze katastralnym, BDOT, EGiB),
- dane pochodzące ze skanowania laserowego (ALS, TLS, MLS),
- opracowania fotogrametryczne naziemne i lotnicze,
- dane satelitarne z zakresu optycznego wykonywane w trybie stereo (np. WorldView-2),
- dane satelitarne radarowe (np. TanDEM-X, TerraSARX).

Przykładowe dane wykorzystane do wygenerowania modeli budynków 3D dla ścisłego centrum w Żorach (woj. śląskie) przedstawiono poniżej (ryc. 6.87).

W ostatnich latach nastąpił wzrost zainteresowania integracją modeli 3D z bazami danych, które można edytować i aktualizować. Umieszczanie modeli budynków na portalach internetowych wpływa na ich dostępność i zwiększa zainteresowanie społeczeństwa stosowaniem danych typu 3D. Aby umożliwić integrację informacji 3D z bazami opisowymi (atrybutowymi), niezbędne było stworzenie uniwersalnego formatu danych, który pozwalałby na korzystanie z różnych programów podczas tworzenia i wizualizacji modeli budynków oraz łączenia ich z bazami danych. Jednym z takich opracowanych formatów jest CityGML, oparty na międzynarodowym formacie wymiany danych i kodowania GML (ang. *Geography Markup Language*). Został on udostępniony w 2008 roku

przez OGC (*Open Geospatial Consortium*). Aktualną wersją tego formatu opublikowaną w 2012 roku jest CityGML 2.0.0 ([www.citygml.org](http://www.citygml.org)).



Ryc. 6.87. Źródła danych wykorzystywane przy modelowaniu budynków

### 6.22.2. Poziomy szczegółowości budynków 3D

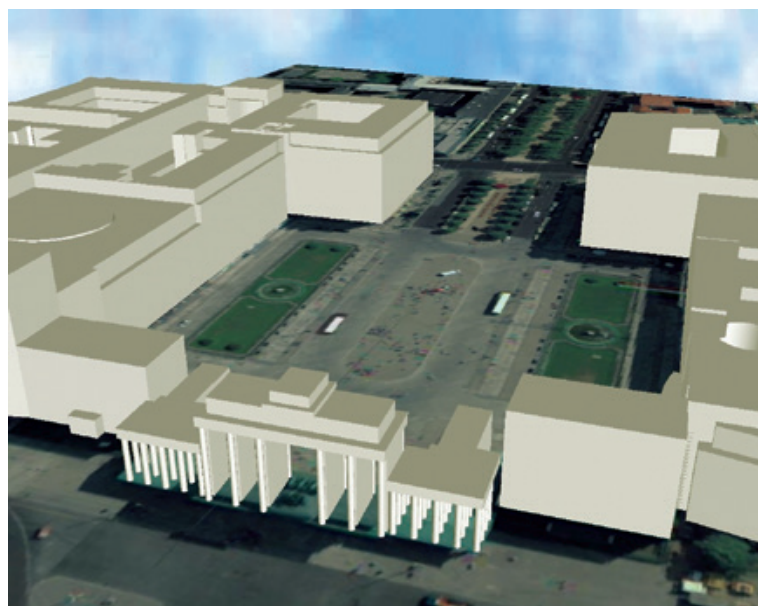
W zależności od celu, w jakim tworzone są obiekty, stosuje się różne poziomy ich szczegółowości (*ang. Level Of Detail – LOD*). LOD to pojęcie mające szerokie zastosowanie w grafice komputerowej. Odnosi się do wszystkich obiektów trójwymiarowych i określa poziom ich złożoności. Przykładowo – standard CityGML definiuje obecnie 5 stopni LOD tworzenia modeli miast 3D, z czego w czterech są informacje określające szczegółowość trójwymiarowych modeli budynków:

- LOD 0 – numeryczny model terenu z nałożoną (*ang. drape*) cyfrową ortofotomają lotniczą lub satelitarną (ryc. 6.88),
- LOD 1 – budynki w postaci prostych brył odzwierciedlających ich ogólny kształt, bez przedstawiania konstrukcji dachowych (wyłącznie płaskie dachy; ryc. 6.89),
- LOD 2 – modele przedstawiające główne struktury dachowe budynków, bez uwzględniania dodatkowych elementów zewnętrznych (ryc. 6.90),
- LOD 3 – model na poziomie LOD 2 wzbogacony o wysokorozdzielcze tekstury i szczegółowe elementy architektoniczne elewacji budynku (np. balkony) i dachów (np. jaskółki dachowe; ryc. 6.91),
- LOD 4 – obejmuje bardzo szczegółowy model architektoniczny pozwalający na wizualizację wnętrza budynków (ryc. 6.92).

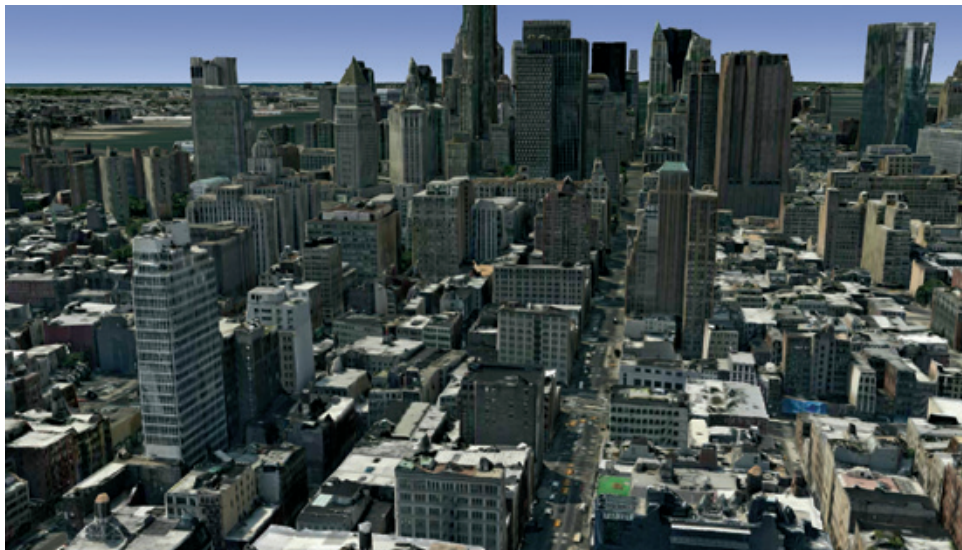




Ryc. 6.88. Level Of Detail 0 – numeryczny model terenu udrapowany cyfrową ortofotomapą – Linkoping (źródło: [kartan.linkoping.se/3d](http://kartan.linkoping.se/3d))



Ryc. 6.89. Level Of Detail 1 – budynki 3D w postaci prostych brył – Berlin (źródło: [www.citygml.org](http://www.citygml.org))



Ryc. 6.90. Level Of Detail 2 – model budynków ze zróżnicowanymi strukturami dachów oraz tekstu-  
rami fasad – Nowy Jork (źródło: [here.com/40.7164472,-74.0042176,17.71,288,74,3d.day](https://here.com/40.7164472,-74.0042176,17.71,288,74,3d.day))



Ryc. 6.91. Level Of Detail 3 – model budynku wzbogacony o szczegółowe elementy architekto-  
niczne – Wiedeń (źródło: [blog Miasta3D](https://blog.miasta3d.com))



Ryc. 6.92. Level Of Detail 4 – bardzo szczegółowy model wnętrza budynku  
(źródło: [www.arbeitsplatz-erde.de/index.php?id=54&L=1](http://www.arbeitsplatz-erde.de/index.php?id=54&L=1))

Do utworzenia modelu na poziomie dokładności LOD 1 z reguły wystarczają informacje pochodzące z danych wektorowych, w postaci obrysów budynków oraz atrybutów o wysokości danego obiektu (zwykle liczbie kondygnacji w referencyjnych bazach danych topograficznych).

Dla poziomu LOD 2, trójwymiarowe, realistyczne modele budynków mogą być tworzone obecnie w sposób niemal całkowicie automatyczny na podstawie chmur punktów ALS. Procedury tworzenia modeli 3D budynków przy odpowiedniej gęstości chmury punktów ALS nie wymagają zwykle dużego nakładu prac przy manualnej edycji obiektów. Do opracowania modeli 3D można wykorzystać chmury punktów ALS lub zdjęcia lotnicze (metoda stereomatchingu), a także zdjęcia lotnicze pionowe (tekstury dachów) i ukośne (do teksturowania fasad budynków).

Powstałe w ten sposób modele budynków, ze względu na małą szczegółowość detali, nie posiadają skomplikowanej geometrii. Mogą przedstawiać duży obszar opracowania (miasto, region), zachowując przy tym jego realistyczny wygląd. W związku z tym doskonale sprawdzają się na portalach mapowych obsługiwanych przez przeglądarki internetowe.

Jeżeli modele LOD 2 wzbogacić o dane uzyskane z pomiarów naziemnych (np. skanowanie naziemne TLS + zdjęcia wykonane kamerami), to można uzyskać bardzo dokładne modele architektoniczne budynków na tzw. poziomie LOD 3. Są one bardziej rozbudowane geometrycznie, dlatego opracowuje się je zwykle dla mniejszych, bardzo cennych obszarów miasta (np. ważna turystycznie lub ekonomicznie dzielnica). Ze

względu na dużą szczegółowość mogą być wykorzystywane przy tworzeniu dokumentacji architektonicznych.

Opracowanie modeli na najwyższym poziomie LOD 4 wymaga bardzo dużego nakładu pracy, która odbywa się często w wyniku skanowania naziemnego czy wykonywania setek lub nawet tysięcy zdjęć i generowania chmur punktów. Wpływa to na czas i koszty opracowania. Model na poziomie LOD 4 wiernie odwzorowuje wygląd elewacji danego obiektu oraz jego pomieszczenia wewnętrzne. Aby realistycznie przedstawić wybrany budynek od wewnątrz, niezbędne jest wykorzystanie dodatkowych danych pomiarowych pochodzących z TLS czy fotogrametrii bliskiego zasięgu. Ze względu na rozbudowaną geometrię, model poziomu LOD 4 wykonuje się tylko dla pojedynczych obiektów. Wykorzystuje się go w celach promocji danego miasta czy regionu, co jest sposobem na zachęcenie turystów do odwiedzenia takiego miejsca.

Dokładne różnice pomiędzy poszczególnymi poziomami LOD przedstawiono poniżej (tab. 6.5).

Tabela 6.5. Levels Of Detail – różnice pomiędzy poszczególnymi poziomami (OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, 2008)

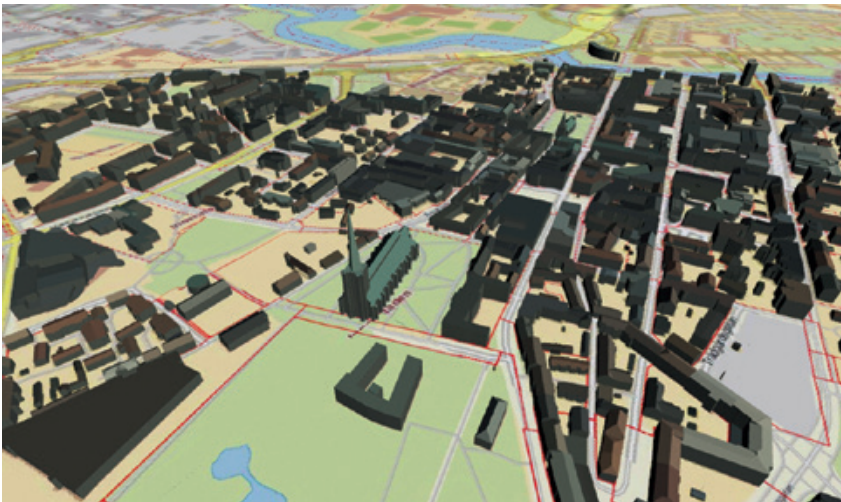
Cecha	LOD 0	LOD 1	LOD 2	LOD 3	LOD 4
<b>Obszar zastosowania</b>	duży obszar, rzeźba terenu	miasto, region	obszar miasta, dzielnica	modele architektoniczne (z zewnątrz), zabytki	modele architektoniczne (zewnętrzne i wewnętrzne)
<b>Klasa dokładności</b>	najniższa	niska	średnia	wysoka	najwyższa
<b>Dokładność XY/Z</b>	niższa niż LOD 1	5/5 m	2/2 m	0,5/0,5 m	0,2/0,2 m
<b>Generalizacja (wymiary generowanych obiektów)</b>	maksymalna generalizacja (tylko model terenu)	proste bryły; > 6 x 6 m/3 m	> 4 c 4 m/2 m	rzeczywiste odwzorowanie elementów; > 2 x 2 m/1 m	dokładne modele dla pojedynczych obiektów
<b>Detale budynków</b>	-	-	-	tylko dla charakterystycznych elementów	rzeczywiste odwzorowanie elementów
<b>Typy dachów</b>	-	płaskie dachy	uproszczone formy	rzeczywiste odwzorowanie elementów	rzeczywiste odwzorowanie elementów
<b>Obiekty małej architektury</b>	-	tylko najważniejsze obiekty	przykładowe modele elementów	rzeczywiste odwzorowanie elementów	rzeczywiste odwzorowanie elementów

Cecha	LOD 0	LOD 1	LOD 2	LOD 3	LOD 4
<b>Pojedyncza roślinność</b>	-	tylko najważniejsze obiekty	przykładowe modele dla obiektów wyższych niż 6 m	przykładowe modele dla obiektów wyższych niż 2 m	przykładowe modele lub rzeczywiste odwzorowanie elementów
<b>Pokrycie roślinnością</b>	-	> 50 x 50 m	> 5 x 5 m	< LOD 2	< LOD 2

### 6.22.3. Wykorzystanie modeli 3D

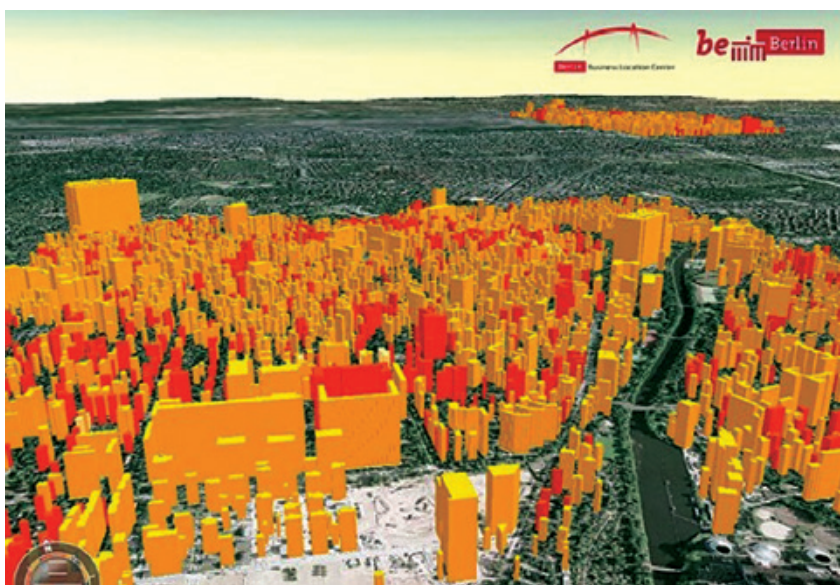
Wraz z rozwojem technik pomiarowych, pozwalających na szybkie pozyskanie danych modelowych 3D obiektów oraz połączenie ich z danymi opisowymi, zwiększa się zainteresowanie tego typu informacjami. Dzięki temu trójwymiarowe modele budynków znajdują coraz to szersze zastosowanie w wielu dziedzinach. Poniżej przedstawiono przykładowe wykorzystanie modeli budynków 3D:

- planowanie przestrzenne (projektowanie inwestycji, Miejscowe Plany Zagospodarowania Przestrzennego, Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego, wydawanie pozwoleń na budowę; ryc. 6.93),



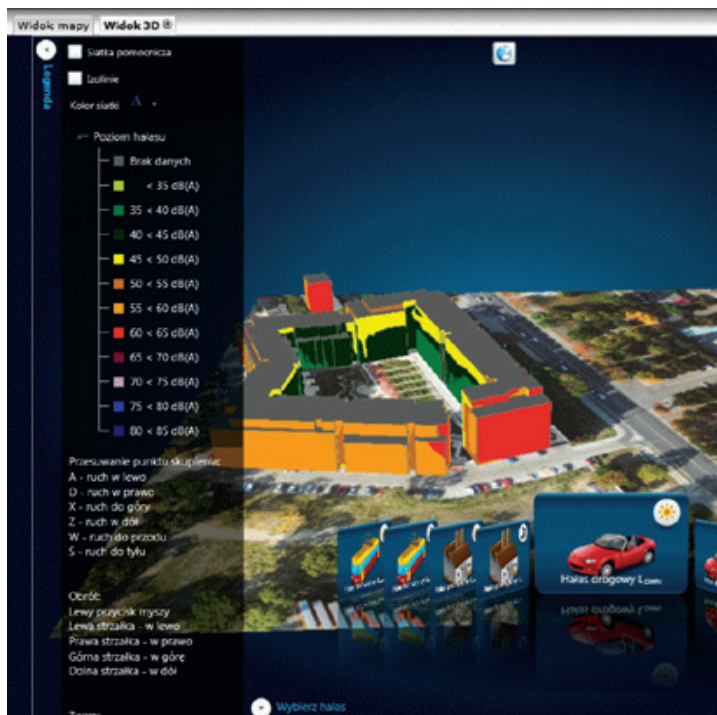
Ryc. 6.93. Modele budynków 3D przedstawione na podkładzie mapowym. Czerwone linie przedstawiają obszary planu miejscowego (źródło: [kartan.linkoping.se/3d](http://kartan.linkoping.se/3d))

- określanie potencjału solarnego dachów i fasad budynków (mapy nasłonecznienia; ryc. 6.94),

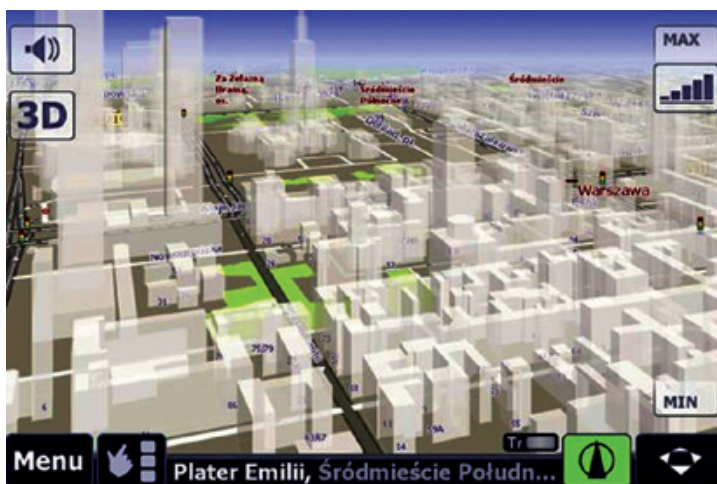


Ryc. 6.94. Mapa potencjału solarnego Berlina  
(źródło: [www.mygmap.net/?p=4202](http://www.mygmap.net/?p=4202))

- mapy nachylenia połaci dachowych (określanie kierunku spływu wód opadowych i wiosennych roztopów, wykorzystywane przy ustalaniu wysokości tzw. podatku deszczowego),
- generowanie map zacienienia (przez budynki, drzewa oraz formy ukształtowania terenu) dla miast i inwestycji specjalnych (np. farm słonecznych),
- tworzenie map akustycznych (przedstawiają umiejscowienie źródeł hałasu i obiektów tłumiących na przestrzeni danego opracowania, przydatne przy planowaniu nowych inwestycji; ryc. 6.95),
- analizy przestrzenne GIS (mapa wysokości budynków, analizy widoczności),
- cele marketingowe (promocja miasta, tworzenie animacji i wizualizacji, przystępna baza danych dla turystów),
- platformy internetowe (ułatwiają kontakt pomiędzy urzędami a mieszkańcami i wpływają na zwiększenie zaangażowania społeczności w sprawy publiczne),
- zarządzanie kryzysowe (tworzenie symulacji i planów ewakuacji w przypadku klęsk żywiołowych, takich jak powódzie, trzęsienia ziemi itp. czy zagrożenia terrorystycznego),
- dokumentacje architektoniczne,
- programy do nawigacji (ryc. 6.96).



Ryc. 6.95. Mapa akustyczna Wrocławia (źródło: [www.geoportal.wroclaw.pl/www/mapa-akustyczna.shtml](http://www.geoportal.wroclaw.pl/www/mapa-akustyczna.shtml))



Ryc. 6.96. Przykład programu do nawigacji z opcją budynków Warszawy 3D – LOD 1 (źródło: [www.miplo.pl/articles/index.php?&art=85](http://www.miplo.pl/articles/index.php?&art=85))

#### 6.22.4. Podsumowanie

Wykorzystanie danych ALS umożliwia wykonanie realistycznych, trójwymiarowych modeli budynków. Na ich podstawie powstają wizualizacje przyciągające uwagę turystów, ułatwiające komunikację, a także wymianę informacji pomiędzy administracją publiczną a mieszkańcami danego regionu.

#### Literatura

Gröger G., Kolbe Th. H., Czerwinski A., Nagel C., 2008. *OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. 9–10.

Kraszewski B., 2013. *Aspekty integracji modeli 3D budynków z bazą danych opisowych*. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 25, 95–105.

#### Strony internetowe

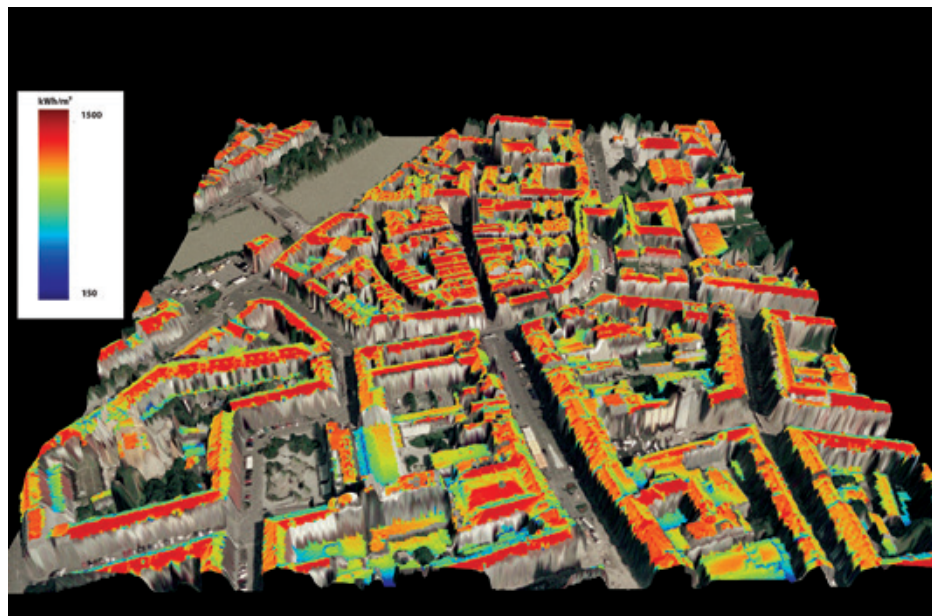
[www.citygml.org](http://www.citygml.org)  
[www.citygmlwiki.org](http://www.citygmlwiki.org)  
[www.progea.pl](http://www.progea.pl)

Dipl. Geogr. Frederic Petrini-Monteferri

### 6.23. Analiza potencjału energii promieniowania słonecznego

Obliczanie potencjału energii promieniowania słonecznego (tzw. mapy nasłonecznienia czy kataster słoneczny) bazuje głównie na numerycznym modelu pokrycia terenu (NMPT) zapisywanym w formacie rastrowym. Jest to usługa niosąca szeroko idące korzyści w dziedzinie analizy danych ALS. Obliczenia obejmują wszystkie elementy pokrycia terenu, lecz dla wielu programów do pracy z katastem słonecznym informacja o elementach pokrycia terenu jest upraszczana do dachów budynków (ryc. 6.97). Coraz częściej wyniki analiz potencjału energii promieniowania słonecznego są bezpłatnie udostępniane na portalach geoinformacyjnych miast lub całych regionów (np. w Austrii). Co więcej, zbiory danych są agregowane przestrzennie i wykorzystywane w planach pod kątem samowystarczalności energetycznej oraz na etapie tworzenia strategii w polityce energetycznej.





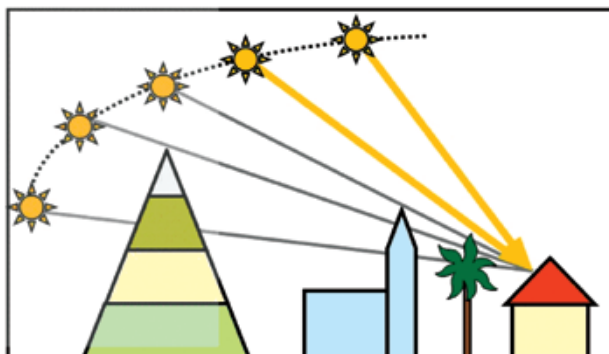
Ryc. 6.97. Roczny potencjał energii promieniowania słonecznego dachów w mieście Innsbruck (Austria) naniesiony na NMPT oraz udrapowaną ortofotomapę lotniczą (źródło: [www.laserdata.at/index\\_en.jsp](http://www.laserdata.at/index_en.jsp))

### 6.23.1. Metody obliczania potencjału energii promieniowania słonecznego

Promieniowanie docierające do obiektów obliczane jest na podstawie algorytmów śledzenia promieni (ryc. 6.98) słonecznych w ciągu roku. Dla każdej komórki numerycznego modelu pokrycia terenu brane są pod uwagę: zacienienie pochodzące bezpośrednio z rzeźby terenu (NMT), zabudowań i roślinności (wysokości względne obiektów) oraz dane o nachyleniu i ekspozycji terenu. Składowe promieniowania bezpośredniego i rozproszonego obliczane są, tak by po ich zsumowaniu otrzymać wartość promieniowania całkowitego (tzw. nasłonecznienia) wyrażoną w kWh/m<sup>2</sup>. Przykładowo, dzienna suma promieniowania słonecznego, mierzona co pół godziny przez 24 h, może być agregowana w wartości miesięczne, sezonowe, półroczne bądź roczne. Określenie czasu całkowitego promieniowania słonecznego (tzw. usłonecznienia) jest bardzo wartościowym źródłem informacji dla firm działających na rynku nieruchomości bądź rynku budowlanym (np. planowanie paneli solarnych, fotowoltanicznych i innych).

### Potencjał energii promieniowania słonecznego z uwzględnieniem geometrii terenu:

- promieniowanie bezpośrednie
- promieniowanie rozproszone
- promieniowanie całkowite
- zacienienie
- duża skala (teren)
- mała skala (zabudowania, roślinność)



Ryc. 6.98. Metodologia obliczeń potencjału energii słonecznej

Poniżej (tab. 6.6) zaprezentowane zostały wybrane parametry niezbędne do obliczenia potencjału energii promieniowania słonecznego.

Tabela 6.6. Parametry potencjału energii promieniowania słonecznego

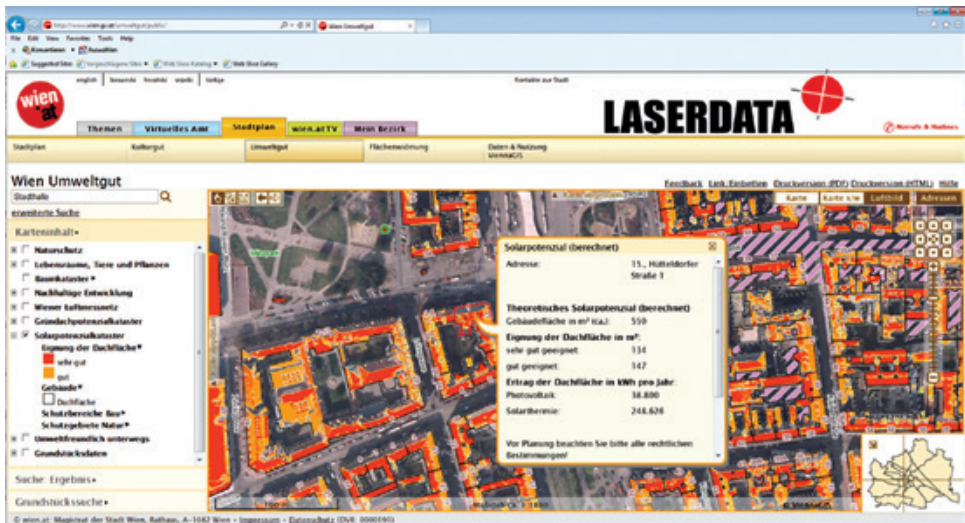
Parametr	Typ/Przykład
warstwa wysokościowa	numeryczny model pokrycia terenu
lokalizacja / analizowany obszar	współrzędne
okres	chwila/dzień/zakres dni
rozdzielczość czasowa	0,5 h
promieniowanie bezpośrednie	kWh/m <sup>2</sup>
promieniowanie rozproszone	kWh/m <sup>2</sup>
promieniowanie całkowite	kWh/m <sup>2</sup>
czas usłonecznienia	h

Analizując tereny górzyste, należy znacznie powiększyć obszar analiz ze względu na zacienienie wynikające z topografii terenu. Co więcej, symulacja wartości promieniowania słonecznego obliczana przez moduły oprogramowania nie bierze pod uwagę promieniowania rozproszonego wynikającego z zachmurzenia lub odbitego od innych obiektów. Jednym ze sposobów na rozwiązanie tego problemu jest naniesienie korekt wartości promieniowania uwzględniających odpowiedni współczynnik redukcji. By tego dokonać, należy porównać długoterminowe pomiary promieniowania całkowitego (np. średnia wartość z 20 lat) wykonywanych na stacjach meteorologicznych (na analizowanym obszarze) z wartościami pochodzącymi z symulacji komputerowej w odpowiednim oprogramowaniu. Inne rozwiązania proponują zintegrowanie danych z sensorów satelitów meteorologicznych lub modeli promieniowania słonecznego.

Aby obliczyć potencjał energii promieniowania słonecznego dla dużych obszarów, należy zastosować tzw. *tiling*, czyli ograniczenie NMPT na mniejsze bloki. Kolejną kwestią wartą szczególnej uwagi jest poprawne nałożenie bloków danych NMPT, tak aby uniknąć artefaktów na granicach, wywołanych przez klasy wysokich budynków lub roślinności wysokiej. Analiza czułości parametrów modułu oprogramowania opierająca się na wyprowadzonym wzorze zacienienia i różnicach promieniowania energii słonecznej może znacznie skrócić czas obliczeń.

## 6.23.2. Zastosowanie analiz solarnych

Roczna suma wartości promieniowania całkowitego energii słonecznej oraz czas promieniowania słonecznego są najczęściej wykorzystywanymi danymi pozyskanymi z analiz potencjału promieniowania energii słonecznej. Wartości klasyfikowane są zgodnie z życzeniami klienta i publikowane na geoportalach (ryc. 6.99). Często z wartości obliczeń energii promieniowania słonecznego pozyskuje się dodatkowe informacje, takie jak wartości słoneczne lub fotowoltaiczne. Dlatego wartości promieniowania obliczane są z użyciem statystyk strefowych dla powierzchni zajmowanej przez budynki i segmenty dachów, analizując informację o promieniowaniu z warstw rastrowych. W katastrze słonecznym statystyki te udostępniane są jako warstwa informacyjna lub zbierane są w jednostkach administracyjnych (np. regionach) w celu tworzenia tzw. planów samowystarczalności energetycznej.



Ryc. 6.99. Kataster słoneczny Wiednia  
(źródło: [www.wien.gv.at/umweltgut/public/grafik.aspx?ThemePage=9](http://www.wien.gv.at/umweltgut/public/grafik.aspx?ThemePage=9))

### 6.23.3. Podsumowanie

W praktyce, zastosowanie wyników analiz nasłonecznienia pod kątem wykorzystania energii odnawialnych w gospodarce, służy budowaniu świadomości społecznej. Uświadamianie społeczeństwa odnośnie potencjału, jaki niesie z sobą energia odnawialna, lepszego rozmieszczenia paneli słonecznych lub ogniw fotowoltaicznych na dachach oraz dokładniejszych prognoz ich wydajności jest bardzo potrzebne. W niektórych przypadkach wyniki używane są także przez organizacje w celu dokonania oceny projektów i wniosków o specjalne dotacje proekologiczne. Już teraz swoje katastry słoneczne posiadają takie miasta jak Wiedeń, Innsbruck czy Berlin.

### Literatura

Redweik P., Catita C., Brito M., 2013. *Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape*. *Solar Energy* 97, 332–341.

### Strony internetowe

[www.lis-lidar.pl](http://www.lis-lidar.pl)

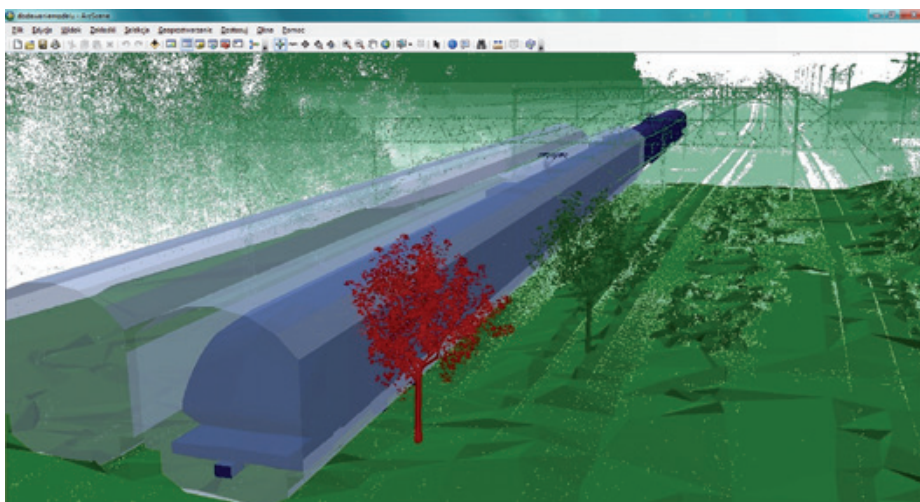
*Tłumaczenie Jakub Żak*

## 7. Oprogramowanie do przetwarzania i wizualizacji danych LiDAR oraz produktów pochodnych

mgr inż. Kamil Sukiennik

### 7.1. ArcGIS

Producentem oprogramowania ArcGIS jest amerykańska firma Esri Inc. W kontekście pracy z danymi LiDAR istotne i niezbędne jest rozszerzenie ArcGIS 3D Analyst. Obsługa, praca i zarządzanie plikami LAS (lub ASCII) odbywa się przez zastosowanie jednego z trzech natywnych formatów (Zestawu danych LAS, Zestawu danych terenu lub Zestawu danych mozaiki), które znacznie rozszerzają możliwości edycji, wizualizacji, analizy i udostępniania danych źródłowych (ryc. 7.1). Wymienione zestawy danych pozwalają na obustronną konwersję do wielu formatów zewnętrznych (rastrowych, wektorowych, tabelarycznych oraz modelu TIN). Oprogramowanie ArcGIS zapewnia obsługę skompresowanych plików w formacie zLAS.



Ryc. 7.1. Praca z chmurą punktów w aplikacji ArcScene

Szczególnie mocną stroną oprogramowania Esri jest jego potencjał analityczny. Produkty pochodne danych LiDAR mogą być przetwarzane przez kilkadziesiąt narzędzi geoprzetwarzania dostępnych ze skrzynki narzędziowej *Toolbox*. Narzędzia dostępne w 3D Analyst pozwalają m.in. na analizę i edycję klasyfikacji danych LiDAR.

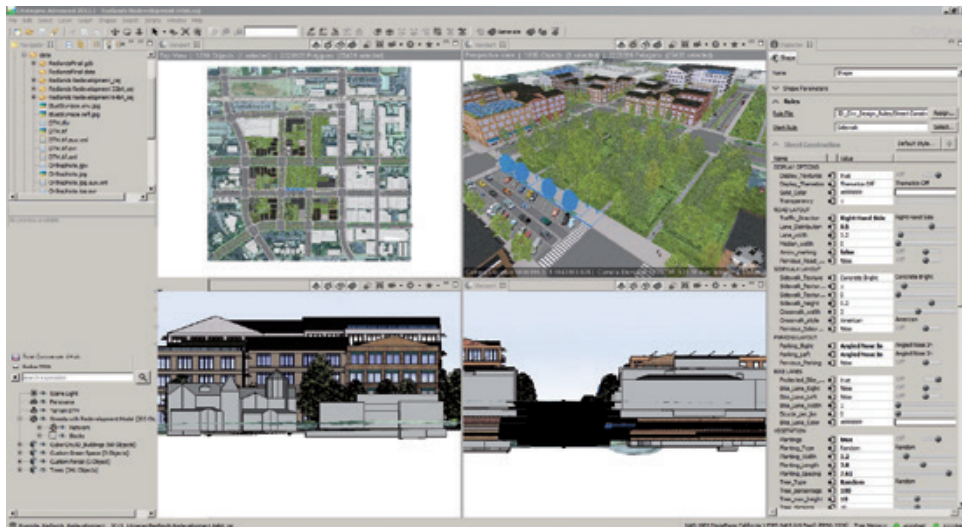
Dodatkowym atutem platformy ArcGIS jest oprogramowanie ArcGIS for Server, umożliwiające udostępnianie danych LiDAR w postaci usługi rastrowej, jak również publikowanie wygenerowanych produktów pochodnych (np. 3D budynków) z użyciem usługi ArcGlobe.

mgr Rafał Perzyna

## 7.2. CityEngine

Aplikacja Esri CityEngine jest produktem firmy Esri Inc. Program wykorzystywany jest w każdej dziedzinie, w której ważne jest odpowiednie zaprezentowanie danych przestrzennych 3D, m.in. w planowaniu przestrzennym, urbanistyce, jak również w grach komputerowych i filmach (ryc. 7.2).

Największą zaletą oprogramowania jest połączenie typowych metod modelowania (gotowe obiekty 3D) z technologią tworzenia proceduralnego. Polega ona na automatyzacji i kodowaniu pewnych zjawisk powtarzających się w konkretnych sytuacjach (np. dobieranie odpowiednich fasad budynków, w zależności od przeznaczenia gruntów lub przeliczanie potrzebnej liczby miejsc parkingowych względem powierzchni budynku).



Ryc. 7.2. Główne okno programu CityEngine

Program umożliwia swobodne importowanie danych z formatów m.in.: OBJ, 3DS, DXF oraz KML. Pozwala również na zaimplementowanie danych GIS (np. sieć uliczna, obrysy budynków) bezpośrednio z OpenStreetMaps.

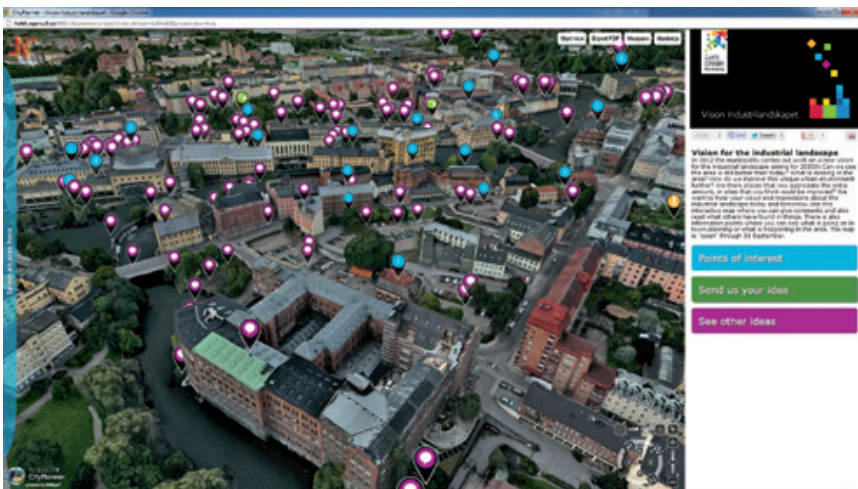
Program jest zintegrowany z plikami SHP oraz geobazami plikowymi, dzięki czemu można swobodnie przenosić dane pomiędzy np. ArcMap a CityEngine. W najwyższej wersji oprogramowania dostępny jest także moduł w języku Python do tworzenia oraz eksportu danych.

Jednym z kluczowych formatów, do których można eksportować wynikowe projekty jest 3D Web Scene (3WS). Gotowy projekt można opublikować do skompresowanego pliku 3WS, a następnie udostępnić go w sieci. Można go otworzyć przez przeglądarkę obsługującą technologię WebGL, zachowując jego dynamiczny, trójwymiarowy charakter.

mgr inż. Piotr Szwed

## 7.3. CityPlanner

Aplikacja CityPlanner szwedzkiej firmy Agency9 to platforma internetowa pozwalająca na udostępnienie i przeglądanie danych 3D na dowolnym urządzeniu stacjonarnym i mobilnym posiadającym dostęp do Internetu oraz przeglądarkę internetową wspierającą WebGL lub Java. Usługa firmy Agency9 oparta jest na rozwiązaniu bazującym na przetwarzaniu danych w tzw. chmurze (ang. *cloud processing*), w której wszystkie dane udostępniane są z zewnętrznych serwerów (ryc. 7.3). Dzięki temu instytucja udostępniająca swoje dane i usługi nie musi posiadać własnej rozbudowanej infrastruktury sieciowej oraz serwerowej.



Ryc. 7.3. Widok na okno aplikacji CityPlanner z zaznaczonymi komentarzami mieszkańców (źródło: [www.cityplanneronline.com](http://www.cityplanneronline.com))

Dzięki aplikacji CityPlanner użytkownik ma możliwość udostępniania: NMT, NMPT, ortofotomapy lotniczej, modeli budynków 3D (import formatów zgodnych z CityGML) generowanych z danych: ALS, MLS lub zdjęć lotniczych metodą stereomatchingu, zdjęć użytkowników, planów zagospodarowania i wiele innych typów danych przestrzennych GIS (warstwy infrastruktury nadziemnej i podziemnej; wektor i raster) w najpopularniejszych formatach.

Niezmiernie ciekawym rozwinięciem usługi CityPlanner jest możliwość prowadzenia dialogu społecznego pomiędzy mieszkańcami a administracją publiczną (np. urzędnikami miejskimi) dzięki udostępnieniu danych przestrzennych w formie łatwej do interpretacji przez obywateli (np. modele 3D nowych budynków, czy obszaru planowanej podziemnej budowy metra), którzy również mogą nanosić swoje uwagi, sugestie i komentarze. Planista podczas prowadzenia dialogu ma możliwość skalowania planowanych budynków i ich posadowienia w przestrzeni 3D miasta.

mgr inż. Paweł Hawryło

Rafał Olejko

mgr inż. Marcin Pierzchalski

dr hab. inż. Piotr Węzyk

## 7.4. DTMaster

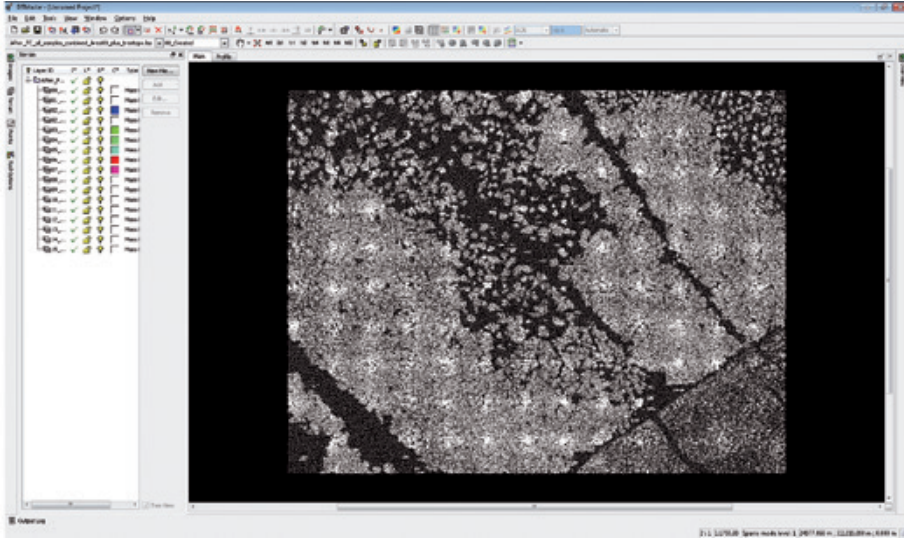
Program DTMaster (ryc. 7.4) pakietu oprogramowania INPHO (Trimble) jest narzędziem służącym do tworzenia i edycji modeli terenu o wysokiej jakości inżynierskiej. Oprogramowanie DTMaster stanowi część cyfrowego systemu fotogrametrycznego INPHO, który zawiera aplikację ApplicationsMaster, służącą do zarządzania projektem. Zapewnia ona kompleksowy zbiór narzędzi do: zdefiniowania, importu/eksportu projektu oraz danych DTM.

Program oferowany jest w dwóch wersjach. Pierwsza z nich, DTMaster (następca edytora numerycznych modeli terenu GVE) to stacja do edycji danych DTM/LIDAR z ich monoskopowym podglądem. Wersja DTMaster, Stereo jest cyfrowym, stereoskopowym środowiskiem pomiarowym do kontroli jakości danych 3D. Program w tej wersji posiada także kompletną funkcjonalność DTMaster.

Atutem oprogramowania DTMaster jest zautomatyzowana modyfikacja danych, między innymi poprzez stosowanie filtracji lokalnych na chmurze punktów LiDAR lub pochodzących z metod fotogrametrycznych MATCH-T (dopasowanie zdjęć lotniczych).

Aplikacja obsługuje formaty: XYZ, DXF, SCOP DTM (import), LAS (ASPRS), MATCH-T XYZ, MATCH-T RAS, pliki ArcGIS ASCII, TIFF, BIL lub FLT. Obsługiwane są także cyfrowe ortofotomapy lotnicze oraz zobrazowania satelitarne (np. IKONOS, QuickBird, SPOT, LANDSAT, IRS C/D lub ASTER).





Ryc. 7.4. Interfejs programu DTMaster (źródło: <http://lbi-archpro.org/als-filtering/lbi-project/reference-data-set>)

mgr inż. Klaudia Bielińska-Płoszka

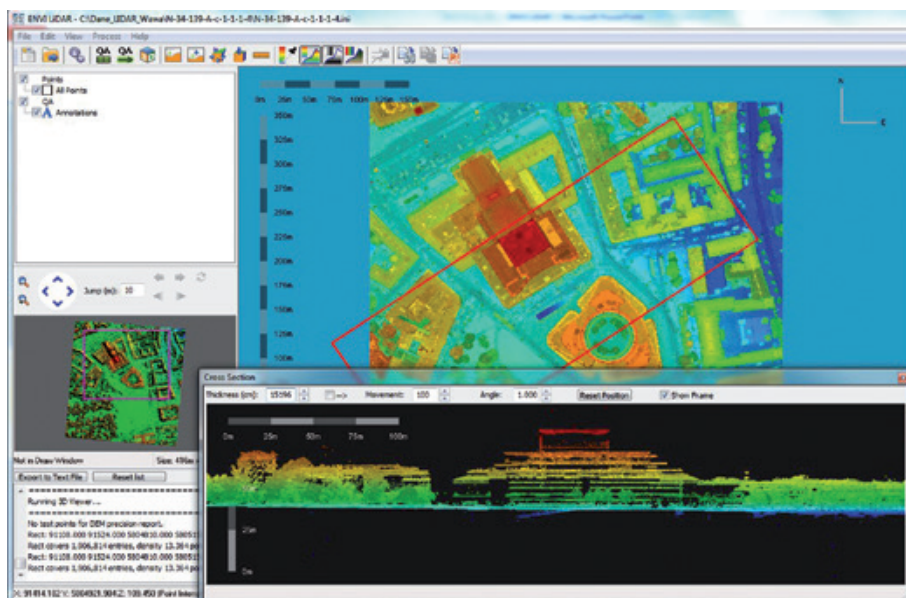
## 7.5. ENVI LiDAR

ENVI LiDAR jest oprogramowaniem amerykańskiej firmy Exelis Visual Information Solutions Inc. Program obsługuje dane LiDAR zapisane w formatach: LAS, LAZ, TXT, NTF oraz BIN (ryc. 7.5).

Oprogramowanie umożliwia zarówno wizualizację chmury punktów (w widoku 2D oraz 3D), jak również przetwarzanie danych i generowanie produktów pochodnych, takich jak numeryczne modele terenu oraz obiekty 3D (drzewa, budynki i linie energetyczne). Produkty pochodne zapisywane są w takich formatach, jak m.in.: SHP, CSV, DXF, ASCII, BIL, DAT, HDR, IMG, TIFF, GMG, GRD, DEM oraz XYZ.

ENVI LiDAR posiada również narzędzia z zakresu kontroli danych, tj. *Quality Assurance* (QA), dzięki którym można wykonywać manualną edycję punktów, obiektów oraz reklasyfikację chmury punktów.

ENVI LiDAR oferuje nie tylko narzędzia służące do tworzenia danych i produktów pochodnych, ale również zestaw algorytmów (skryptów napisanych w języku IDL), dzięki którym można utworzyć mapę gęstości lasu, zaznaczyć najwyższy punkt w chmurze LAS, zmienić jej odwzorowanie, a nawet wykonać analizę widoczności opartą na NMPT.



Ryc. 7.5. Interfejs oprogramowania ENVI LiDAR

mgr inż. Rafał Dąbrowski

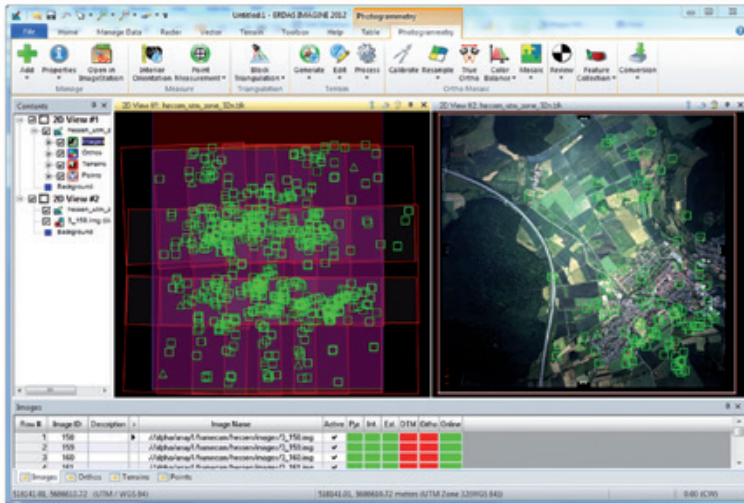
## 7.6. ERDAS IMAGINE

Aplikacja ERDAS IMAGINE firmy Hexagon Geospatial pozwala na podstawowe operacje wyświetlania, analizy i przetwarzania chmur punktów pochodzących ze skanowania laserowego. Wizualizacja chmury punktów LiDAR realizowana jest w standardowej przeglądarce programu, jaką jest Imagine Viewer. Do dyspozycji jest również widok przekroju poprzecznego i podłużnego oraz widok wzdłuż całego profilu.

ERDAS IMAGINE (ryc. 7.6) jest narzędziem umożliwiającym generowanie rastrowych modeli wysokościowych na podstawie danych pochodzących z wielu źródeł (np. skanowanie laserowe, pliki wektorowe, dane punktowe czy rysunek warstwiczny), a następnie wykorzystanie ich do dalszych analiz.

Ważną funkcją ERDAS IMAGINE jest możliwość pokolorowania chmury punktów na podstawie fotogrametrycznych zdjęć lotniczych. IMAGINE AutoDTM rozszerza funkcjonalność ERDAS IMAGINE o wykorzystanie stereoskopowych zobrazowań lotniczych i satelitarnych w celu generowania modeli wysokościowych metodą dopasowania zdjęć (ang. *stereomatching*). Jednym z formatów wyjściowych z procesu dopasowania zdjęć może być chmura punktów w formacie LAS, z nadanymi wartościami atrybutów RGB

w oparciu o wartości pikseli zdjęć/zobrazowań źródłowych. Tak wygenerowana chmura punktów może być uzupełnieniem danych ALS z pewnymi ograniczeniami wynikającymi z użycia obrazów teledetekcyjnych (brak penetracji roślinności, brak zapisu odbić).



Ryc. 7.6. Interfejs oprogramowania ERDAS IMAGINE

Aneta Rzepecka

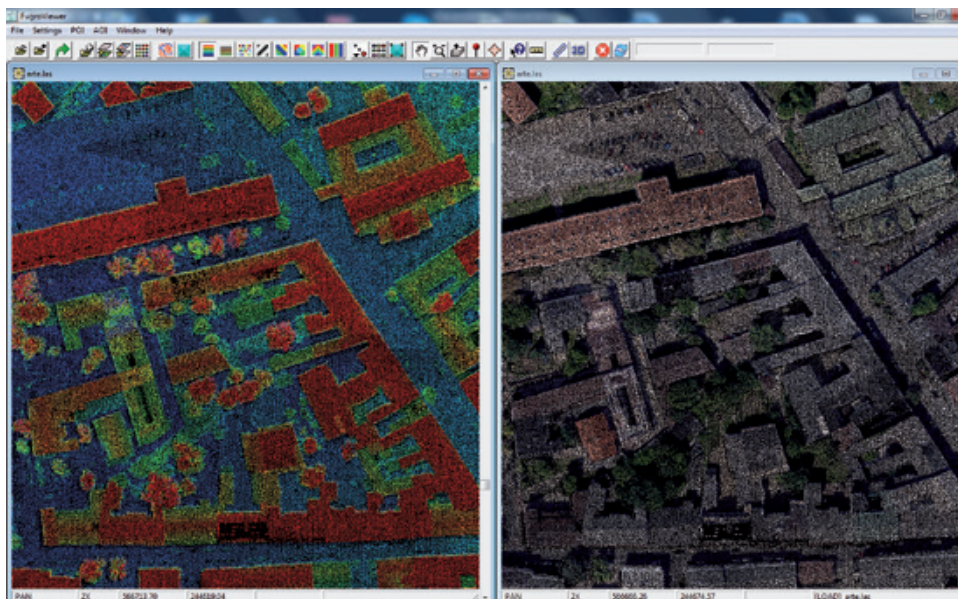
## 7.7. FugroViewer

FugroViewer jest bezpłatnym produktem firmy Fugro Geospatial Services pozwalającym na przeglądanie, analizę, identyfikację i wizualizację chmury punktów. Oprogramowanie FugroViewer obsługuje chmury punktów o rozszerzeniach: LAS, TXT, skompresowane pliki LAZ oraz referencyjne w formatach SHP (2D i 3D) oraz GeoTIFF (zobrazowania fotolotnicze i satelitarne np. IFSAR).

Podstawową funkcjonalnością FugroViewer jest umożliwienie użytkownikowi przeglądania chmury punktów ALS w oknie 2D, 3D i w formie widoku przekrojów (profilu) na tle referencyjnych ortofotomap lotniczych i satelitarnych lub danych wektorowych. Przeglądarka umożliwia generowanie modelu TIN (sieć nieregularnych trójkątów) na podstawie sklasyfikowanej chmury punktów. Oprogramowanie posiada szerokie możliwości doboru palety barw dla generowanego NMT oraz jego oświetlenia (azymut padania promieni słonecznych oraz wysokość słońca nad horyzontem). Użytkownik ma również możliwość zastosowania sztucznego przewyższenia danych (chmury punktów oraz NMT).

FugroViewer umożliwia pracę z chmurą punktów oraz jej wizualizację według atrybutów (ryc. 7.7). Sklasyfikowana chmura punktów ALS pozwala na wizualizację NMT,

a tym samym generowanie warstw w odpowiednim cięciu (bez możliwości zapisu czy eksportu). Przeglądarka FugroViewer daje także użytkownikowi możliwość oznaczenia i skomentowania miejsc interesujących (ang. POI; *Point Of Interest*) lub obszaru poligonu (ang. AOI; *Area of Interest*), który można zapisać do pliku SHP.



Ryc. 7.7. Okna oprogramowania FugroViewer. Z lewej wizualizacja według atrybutu wysokości bezwzględnej, po prawej według atrybutu RGB (fragment Krakowa; ISOK)

mgr Marlena Kycko

## 7.8. FUSION

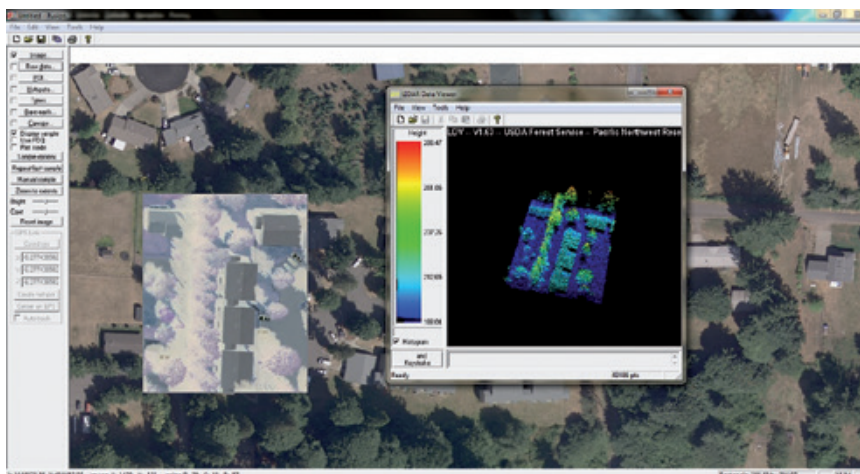
Pakiet oprogramowania FUSION (*USDA Forest Service - Pacific Northwest Research Station; USA*) został stworzony do pracy z danymi LiDAR jako wsparcie analiz dla rozległych obszarów leśnych, pozwalając na m.in. uzyskanie informacji statystycznych ze zbiorów chmury punktów ALS. Statystyki pozwalają m.in. na generowanie map rastrowych o zdefiniowanym rozmiarze siatki reprezentujących wybrane cechy taksacyjne (np. zwarcie), a nawet histogramy struktury pionowej drzewostanów (np. detekcja podrostów). Oprogramowanie FUSION 3.42 (ryc. 7.8) zapewnia wsparcie dla skompresowanych chmur punktów w formacie LAZ.

Program FUSION pozwala na integrację trójwymiarowej powierzchni terenu z danymi dwuwymiarowymi, jak np. lotniczą ortofotomapą cyfrową czy satelitarną lub mapami

topograficznymi. Ponadto program sprawdza się przy generowaniu NMT i NMPT, a także dzięki możliwości normalizacji chmury punktów pozwala na generowanie zNMPT.

Jednym z komponentów pakietu FUSION jest program LDV (LiDAR Data Viewer), który zapewnia środowisko do wizualizacji 3D, w oparciu o OpenGL. Ponadto w pakiecie FUSION dostępna jest przeglądarka PDQ, która zapewnia wydajniejszą pracę z dużymi zbiorami danych LiDAR. Program PDQ odczytuje dane w formatach: LDA (plik indeksujący chmurę punktów), LAS, LAZ oraz DTM (format wewnętrzny FUSION).

Ogromną zaletą pakietu FUSION jest możliwość pracy z wykorzystaniem linii komend oraz tworzenia programów wsadowych (FUSION-LTK-FUSION Toolkit). Pozwala to na znaczne zautomatyzowanie przetwarzania danych.



Ryc. 7.8. Interfejs oprogramowania FUSION

mgr inż. Paweł Hawryło

Rafał Olejko

mgr inż. Marcin Pierzchalski

dr hab. inż. Piotr Wężyk

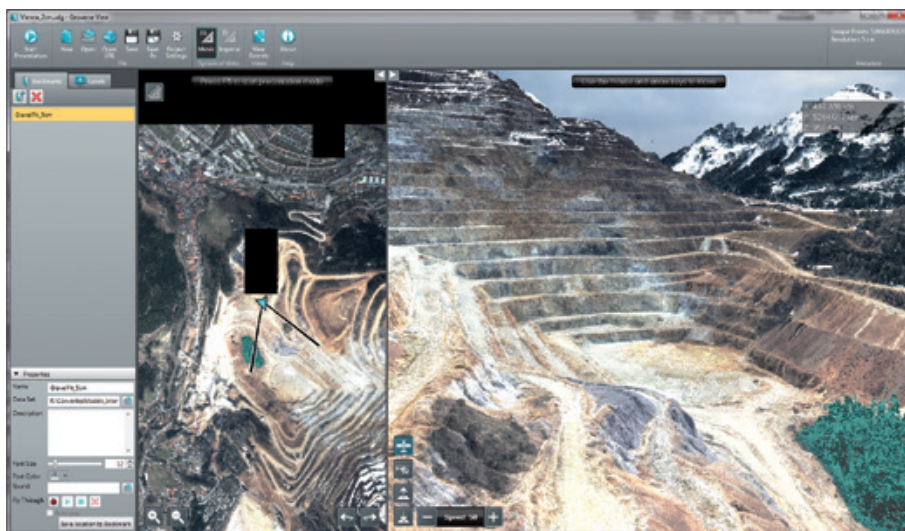
## 7.9. Geoverse™

Geoverse™ jest produktem firmy Euclidean Pty Ltd., pozwalającym na wizualizację danych w postaci chmur punktów pochodzących ze skanowania laserowego, fotogrametrii cyfrowej (metoda stereomatchingu) i innych źródeł.

Renderowanie chmury punktów w aplikacji Geoverse™ opiera się na technologii UD (ang. *Unlimited Detail*) opracowanej przez firmę Euclidean Pty Ltd. Technologia ta

pozwała na pracę z dużymi zbiorami danych, które mogą być przetwarzane z prędkością do 2 milionów punktów na sekundę. Technologia UD wykorzystuje trójwymiarowy algorytm wyszukiwania (ang. *voxel*), pozwalający renderować w czasie rzeczywistym dane LiDAR. Stosując aplikację Geoverse™, dane w formacie LAS są kompresowane w technologii UD, redukując plik do około 5–20% pierwotnego rozmiaru. Kompresja jest bezstratna i nie wpływa w żaden sposób na jakość danych.

Aplikacja Geoverse™ umożliwia wizualizację danych, tworzenie prezentacji multimedialnych, dokonywanie precyzyjnych pomiarów w czasie rzeczywistym. Interfejs oprogramowania pozwala na łatwe przemieszczanie się pomiędzy danymi w ich pełnej rozdzielczości (ryc. 7.9).



Ryc. 7.9. Interfejs Geoverse Viewer (źródło: [www.meixnerimaging.com](http://www.meixnerimaging.com))

mgr inż. Paweł Hawryło  
Rafał Olejko  
mgr inż. Marcin Pierzchalski  
dr hab. inż. Piotr Wężyk

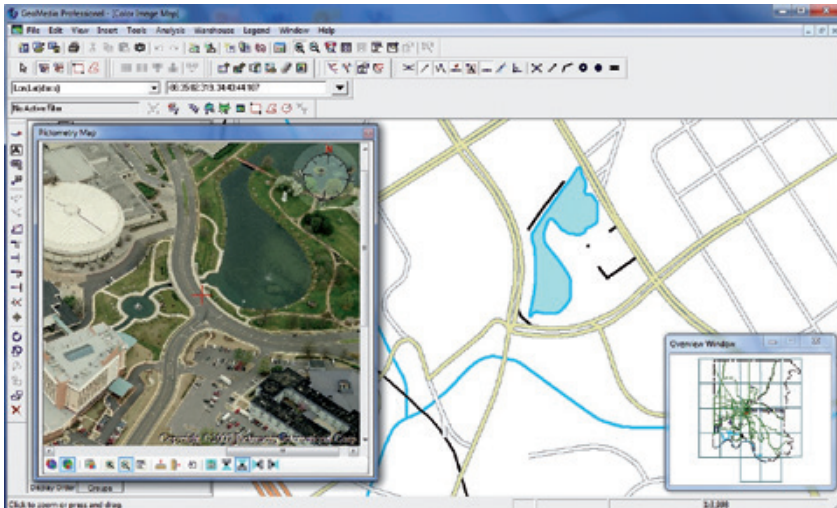
## 7.10. GeoMedia

GeoMedia to produkt firmy Intergraph, umożliwiający przetwarzanie wektorowych i rastrowych formatów danych (ryc. 7.10). Przykładowe formaty danych, które obsługuje oprogramowanie to: MrSID, ECW, USGS DOQ, TIFF, GeoTIFF, JPEG2000 oraz formaty

powszechnie używane przez aplikacje, takie jak: MicroStation, AutoCad, ArcGIS i inne. Aplikacja obsługuje również usługi: WCS, WFS i WMS.

Oprogramowanie GeoMedia pozwala na wykonywanie analiz przestrzennych jak również zapytań atrybutowych. Ponadto stwarza możliwość analizy obrazów rastrowych poprzez generowanie modeli wysokościowych oraz wykonywanie specjalistycznych funkcji. Obiektowa architektura GeoMedia pozwala dostosowywać i rozwijać aplikację, używając standardowych języków, takich jak: MS Visual C++, C#, Visual Basic .Net, PowerBuilder lub Delphi.

W skład aplikacji wchodzi: GeoMedia Viewer (darmowa przeglądarka danych), GeoMedia Pro (zaawansowany pakiet profesjonalny) oraz WebMap (program do tworzenia publikacji w Internecie).



Ryc. 7.10. Interfejs programu GeoMedia (źródło: [www.imagine-it.cl/](http://www.imagine-it.cl/))

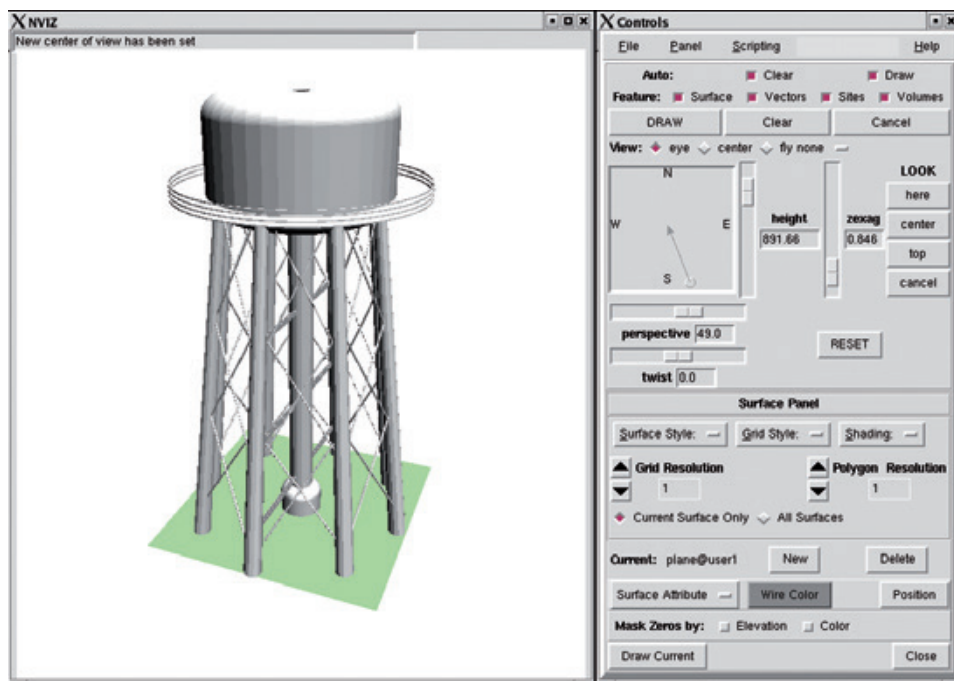
mgr inż. Paweł Hawryło  
Rafał Olejko  
mgr inż. Marcin Pierzchalski  
dr hab. inż. Piotr Wężyk

## 7.11. GRASS GIS

Pakiet oprogramowania GRASS GIS (ang. *Geographic Resources Analysis Support System*) został opublikowany na licencji *GNU General Public License (GPL)* i może być używany na różnych platformach, w tym: MacOS X, Microsoft Windows oraz Linux (pier-

wotnie program działał na systemie UNIX). Użytkownicy mogą korzystać z programu poprzez graficzny interfejs (ang. *Graphical User Interface*; GUI) lub na drodze podłączenia się do bibliotek GRASS poprzez inne oprogramowanie, np. QGIS. Opublikowanie wersji GRASS 6 wprowadziło nowy silnik zarządzający analizą wektorową w 2D/3D oraz wspomaganie analiz sieciowych.

GRASS umożliwia pełną integrację ze środowiskami bazodanowymi opartymi na SQL (PostgreSQL, MySQL, SQLite). System jest w stanie wizualizować, poprzez moduł NVIZ (ryc. 7.11), dane wektorowej grafiki 3D oraz objętości (tzw. *voxels*). Program GRASS obsługuje szeroki wachlarz rastrowych i wektorowych formatów poprzez biblioteki GDAL/OGR, w tym posiada funkcjonalność zdefiniowaną przez OGC (*Open Geospatial Consortium*) w celu zapewnienia interoperacyjności z innymi systemami GIS. Oprogramowanie posiada narzędzia do zarządzania i analizy danych przestrzennych, tworzenia rastrowych produktów pochodnych oraz wizualizacji danych. Na program składa się przeszło 350 funkcji, które zebrano w moduły umożliwiające analizy wektorowe oraz rastrowe, przetwarzanie zobrażeń teledetekcyjnych, analizy 3D jak również wizualizację. Moduły z powodzeniem mogą zostać wykorzystane do przetwarzania oraz analizy chmur punktów LiDAR.



Ryc. 7.11. Interfejs modułu NVIZ do pracy z grafiką wektorową 3D  
(źródło: [grass.osgeo.org](http://grass.osgeo.org))

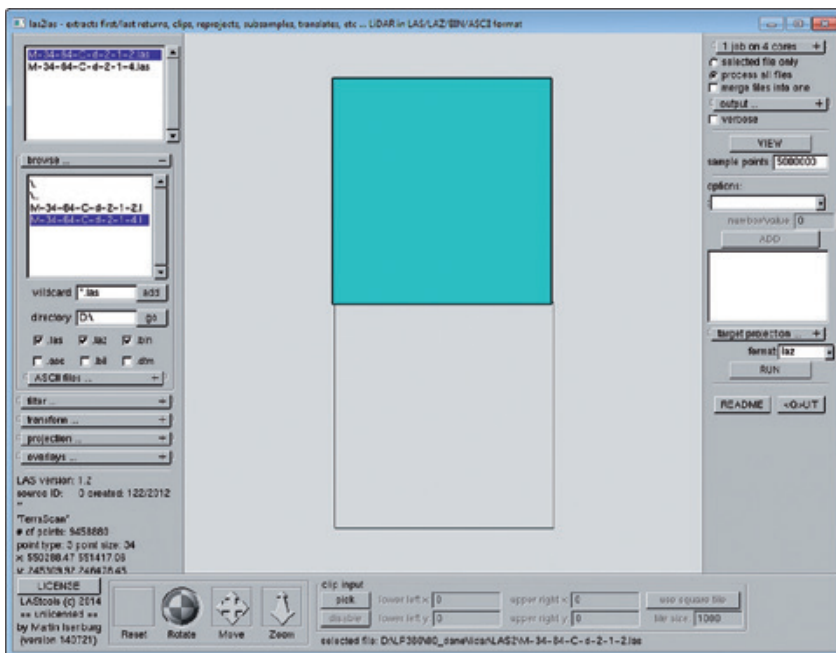


## 7.12. LAStools

LAStools jest pakietem oprogramowania służącym do pracy z chmurami punktów pochodzącymi ze skanowania laserowego (ALS, TLS, MLS). Początkowo całkowicie bezpłatne oprogramowanie, zostało rozwinięte i stało się jednym z konkurencyjnych, bardzo popularnych produktów na rynku oprogramowania LiDAR. Produkt jest dalej rozwijany przez jego twórcę, Martina Isenburga (rapidlasso GmbH), który oferuje komercyjne i akademickie wersje oprogramowania.

Pakiet LAStools składa się z kilkudziesięciu programów (skryptów) przeznaczonych do pracy z chmurami punktów ALS w plikach o formacie LAS (wersje do 1.3). Program obsługuje także pliki z rozszerzeniami BIN, SHP czy ASCII. Pakiet LAStools obsługuje chmury punktów ALS w postaci bezstratnie skompresowanych plików LAZ. Wcześniejsze wersje wymagały od użytkownika stosowania komend w linii poleceń, obecnie został dodany interfejs graficzny z dostępem do poleceń i ustawień (ryc. 7.12).

Poza samodzielną aplikacją LAStools dostępny jest również jako tzw. skrzynka narzędziowa (ang. *toolbox*) dla oprogramowania ArcGIS (Esri) lub jako rozszerzenie funkcji QGIS.



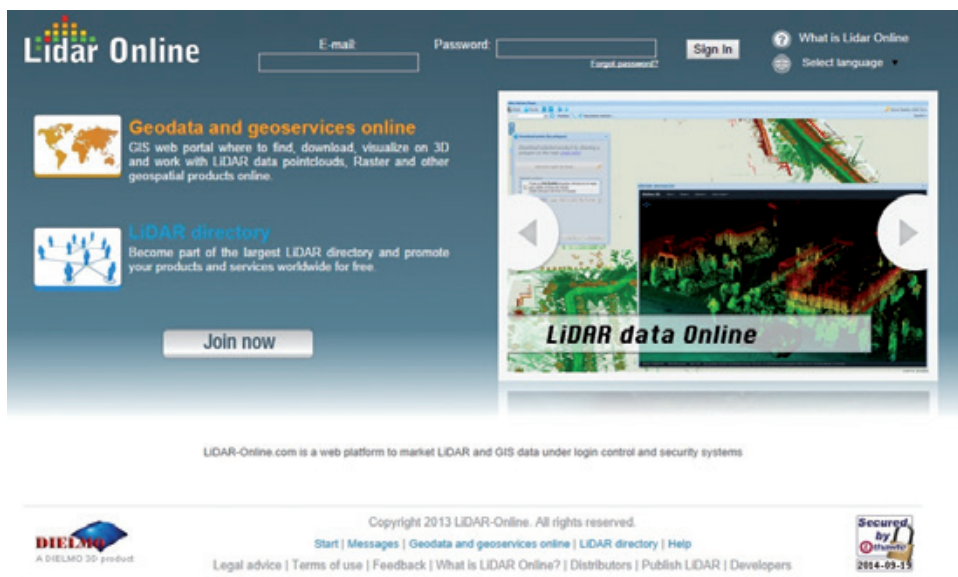
Ryc. 7.12. Okno oprogramowania LAStools modułu *las2las*

mgr inż. Paweł Hawryło  
 Rafał Olejko  
 mgr inż. Marcin Pierzchalski  
 dr hab. inż. Piotr Węzyk

## 7.13. LiDAR Online

LiDAR Online ([www.lidar-online.com](http://www.lidar-online.com)) jest portalem pozwalającym zarejestrowanym organizacjom na zarządzanie swoimi danymi LiDAR, ortofotomapami i innymi danymi przestrzennymi. Aplikacja internetowa działa w technologii Dielmo Server zapewniającej przechowywanie danych na zasadzie sklepu on-line. Poza tym jest platformą pozwalającą użytkownikom wyszukiwać i przeglądać chmury punktów LiDAR w trybie on-line. Aplikacja pozwala na przeglądanie danych w oknie 3D bez konieczności posiadania specjalistycznego oprogramowania. LiDAR Online umożliwia generowanie profili terenowych z możliwością ich pomiarów, edycji, klasyfikacji danych LiDAR. Firmy czy też instytucje udostępniające dane LiDAR mają możliwość ich archiwizowania i udostępniania w postaci plików m.in. w formacie LAS.

Portal LiDAR Online zmierza w stronę portalu społecznościowego, pozwalając swoim użytkownikom i dostawcom publikować, nabywać i zarządzać danymi w sieci (ryc. 7.13). Celem autorów oprogramowania jest uczynienie danych LiDAR szeroko dostępnymi na rynku geoinformatycznym.



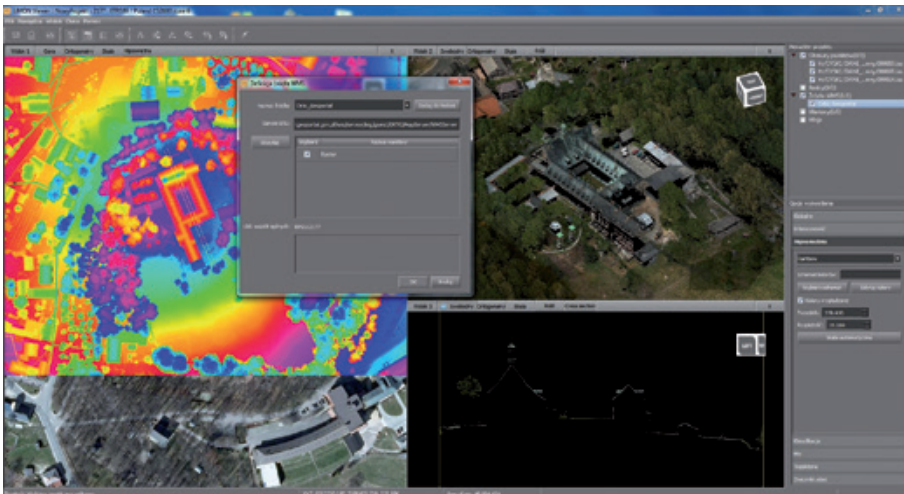
Ryc. 7.13. Portal internetowy [LiDAR Online](http://www.lidar-online.com)

## 7.14. LiMON Point Cloud Tools

LiMON Point Cloud Tools autorstwa krakowskiej firmy Dephos Software jest aplikacją pozwalającą na wizualizację, edycję oraz udostępnianie i przechowywanie danych LiDAR (aplikacje: LiMON Viewer, LiMON Editor, LiMON Server; ryc. 7.14).

Aplikacja LiMON Viewer pozwala na bezpośredni odczyt chmur punktów zapisanych w dziesięciu podstawowych formatach danych, dołączenie danych rastrowych 2D z plików dyskowych lub poprzez usługę WMS, odczyt i zapis punktowych i obszarowych markerów wektorowych. Dane źródłowe są przetwarzane i zapisywane do wewnętrznego formatu dzięki czemu możliwa jest płynna praca na bardzo dużych zbiorach danych. Przeglądarka umożliwia filtrację chmury punktów według zadanych atrybutów, wykonywanie pomiarów 2D i 3D, generowanie statystyk i mapy gęstości, a także synchronizację danych LiDAR z obrazami (również ukośne zdjęcia lotnicze) i plikami wideo. Program pozwala na wizualizację danych także w postaci anaglifów pseudo-trójwymiarowych lub stereoskopowo dzięki implementacji technologii Nvidia 3D Vision. Program posiada polskojęzyczny interfejs użytkownika.

Oprócz LiMON Viewer w ofercie firmy Dephos Software znajdują się również LiMON Editor i LiMON Server, które służą do zaawansowanej edycji i przetwarzania danych LiDAR. LiMON Editor dostarcza narzędzia do klasyfikacji i edycji punktów, tworzenia produktów pochodnych i rysowania obiektów 3D. LiMON Server to silnik obliczeń funkcjonujący w środowisku rozproszonym, wykorzystujący technologię CUDA i służący do automatycznego przetwarzania, udostępniania i edycji danych.

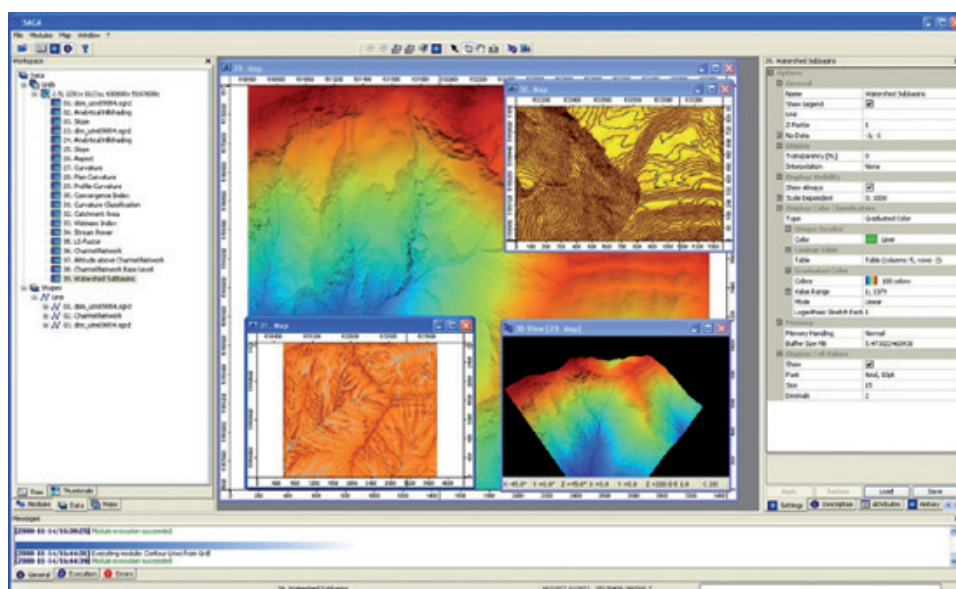


Ryc. 7.14. Wygląd interfejsu graficznego aplikacji Limon Viewer, chmura punktów LiDAR (obiekt Góra Świętej Anny; źródło: Terramap sp. z o.o.)

mgr Mateusz Maślanka

## 7.15. LiS

Oprogramowanie LiS firmy LASERDATA (Austria) jest aplikacją wykorzystywaną do: przetwarzania, wizualizacji, zarządzania, w tym przechowywania danych LiDAR (ALS, TLS, MLS) oraz produktów pochodnych (modeli rastrowych). Aplikacja jest rozszerzeniem dla oprogramowania SAGA – znanego na rynku rozwiązania typu *open source* (ryc. 7.15). Dzięki tej integracji pakiet LiS, oprócz możliwości analizy danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego, umożliwia obsługę i analizę danych rastrowych oraz wektorowych. Niezmiernie istotną zaletą jest też możliwość współpracy LiS z bazą danych PostgreSQL/PostGIS (*open source*), co pozwala na przechowywanie danych LiDAR bezpośrednio w strukturze bazodanowej, a nie w postaci plikowej.



Ryc. 7.15. Interfejs oprogramowania LiS wraz z wczytanymi danymi pochodzącymi z przetwarzania chmur punktów ALS

Na oprogramowanie LiS składają się 4 podstawowe moduły: LiS SERVER, LiS GUI, LiS MOD oraz LiS WEB. Oprogramowanie LiS, oprócz standardowych rozwiązań do przetwarzania danych LiDAR (ALS, TLS, MLS), można stosować w leśnictwie dzięki udostępnieniu takich możliwości, jak np.: wykrywanie zasięgu lasu i pojedynczych drzew, obliczanie szerokości koron drzew, objętości czy też zasobności drzewostanów. Wykorzystując dodatkowe narzędzia w oprogramowaniu LiS, można wykonać analizy szorstkości terenu (np. w celu propagacji hałasu czy fali powodziowej na obszarach zalewowych). Szczególnie interesujące wydają się narzędzia do generowania statystyk chmur punktów

LiDAR, a także ich segmentacji wg zadanych atrybutów. Dzięki wykorzystaniu pakietu oprogramowania LiS połączonego z aplikacją SAGA, w łatwy sposób można wykonać analizy nasłonecznienia czy mapy hałasu.

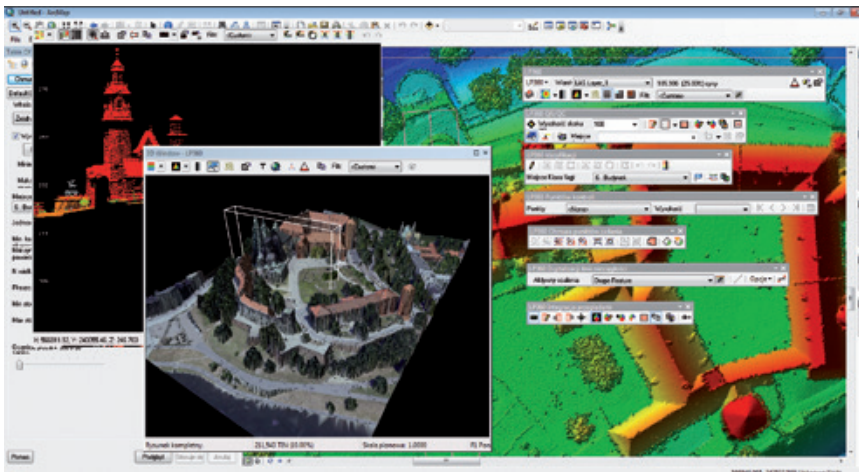
mgr Mateusz Maślanka

## 7.16. LP360

Oprogramowanie LP360 firmy QCohrent jest aplikacją pozwalającą na zaawansowane przetwarzanie oraz wizualizację chmur punktów LiDAR w środowisku Windows (tryb samodzielnej pracy; ang. *standalone*) czy też oprogramowaniu ArcGIS (Esri). Producent oprogramowania LP360 oferuje bezpłatną aplikację Viewer oraz komercyjną, licencjonowaną na trzech poziomach zaawansowania (Basic, Standard, Advanced), dostępną w wersji 32- oraz 64-bitowej (ryc. 7.16).

Oprogramowanie LP360 pozwala na import danych LiDAR z formatów: LAS, TXT, MG4 oraz eksport danych do plików z rozszerzeniami: SHP, TXT, DXF, DGN z zastosowaniem filtracji chmury punktów (np. klasy, intensywność, kolejność odbicia) oraz zadane-go cięcia arkuszowego.

Najważniejszą cechą oprogramowania LP360 jest jego pełna integracja z aplikacją ArcMap (Esri). Wszelkie produkty wygenerowane za pomocą LP360 są kompatybilne z obsługiwanymi formatami przez ArcGIS. Do najciekawszych funkcji aplikacji można zaliczyć: generowanie modeli wysokościowych i warstw, wektoryzację linii nieciągłości terenu wraz z analizą objętości oraz wykonywanie map zasięgów roślinności oraz obrysów budynków w celu generowania miast 3D. Uwagę również zwracają funkcje manualnej i automatycznej klasyfikacji chmury punktów.



Ryc. 7.16. Interfejs aplikacji LP360 w środowisku ArcMap

Oprogramowanie LP360 (QCoherent) obecnie wykorzystywane jest w analizach i monitoringu geozagrożeń dynamicznych, takich jak: osuwiska, obrywy, spływy czy osypiska. Przy użyciu aplikacji LP360 opracowywane są liczne plany działań ochronnych, m.in. w zakresie monitoringu stanu zachowania siedlisk i planowania dalszych działań ochronnych oraz rozpoznawania zagrożeń antropogenicznych. LP360 Advanced wykorzystywane jest również do inwentaryzacji i monitoringu roślinności, automatycznego pozyskiwania wybranych cech taksacyjnych drzewostanów, a także planowania przestrzennego.

mgr inż. Edyta Stojek  
dr inż. Artur Warchoł

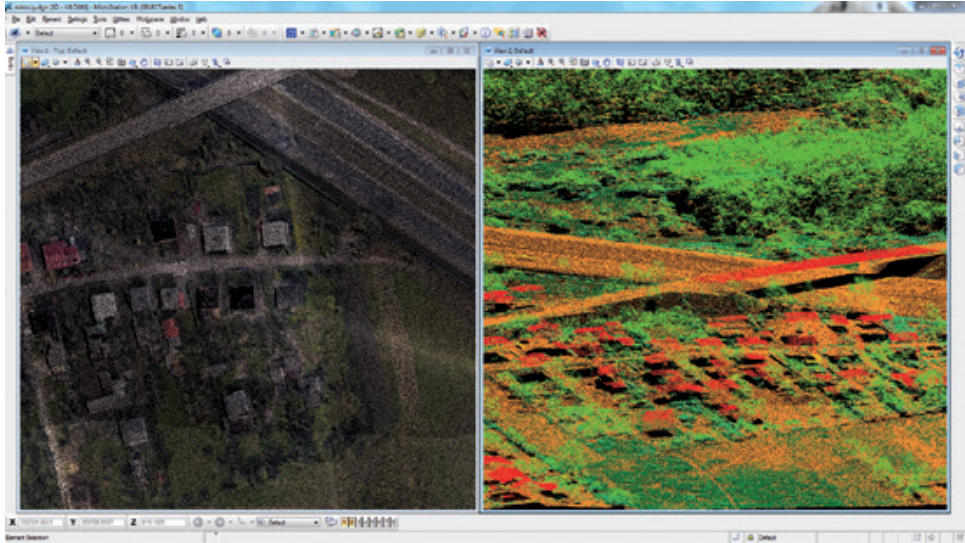
## 7.17. MicroStation V8i

Oprogramowanie MicroStation V8i jest flagowym produktem amerykańskiej firmy Bentley Systems, służącym wspomaganie projektowania komputerowego. Produkt MicroStation V8i służy głównie do tworzenia rysunków CAD w przestrzeni 2D oraz 3D. Kompozycję okna roboczego oraz dostępnych pasków/ikon można dowolnie edytować, dzięki czemu praca z programem staje się wygodna dla operatora.

Do projektowania rysunków wektorowych we własnym formacie DGN (ang. *design*) platforma MicroStation V8i pozwala wykorzystywać dane zapisane w formatach:

- wektorowych – w prawie dwudziestu różnych formatach (np.: DXF, DWG, 3DS, SKP, SHP czy 3DM),
- rastrowych – z plików lokalnych w ponad osiemdziesięciu formatach oraz przez usługi WMS (*Web Map Service*),
- pochodzących ze skanowania laserowego zapisanych w jednym z formatów: BIN, CL3, FLS, FWS, LAS, PTG, PTS, PTX, 3DD, RXP, RSP, XYZ, IXF, E57, POD, TXT.

Za obsługę chmur punktów ze skanowania laserowego (ALS, TLS, MLS) w oprogramowaniu odpowiada jeden z najbardziej wydajnych silników graficznych. Dane LiDAR konwertowane są do formatu POD. Modyfikacja chmury punktów w aplikacji jest w zasadzie ograniczona do zmiany sposobów wyświetlania (ryc. 7.17). Aktualnie w celu edycji chmury punktów LiDAR należy korzystać ze specjalistycznych zewnętrznych aplikacji dodatkowych, przygotowywanych w postaci plików VBA (*Visual Basic for Applications*) lub aplikacji MDL (*MicroStation Development Libraries*).



Ryc. 7.17. Chmura punktów ALS wczytana do MicroStation V8i: Okno 1 (z lewej strony) – wyświetlona według atrybutu RGB (widok z góry); Okno 2 (z prawej strony) – wyświetlona według klasyfikacji (widok izometryczny 2.5D)

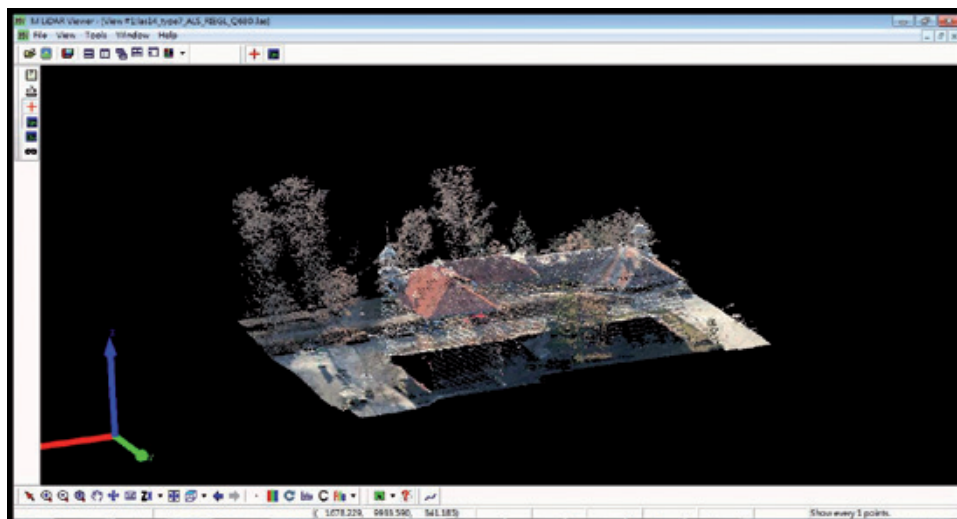
dr hab. inż. Piotr Wężyk

## 7.18. M LiDAR Viewer

Przeglądarka M LiDAR Viewer została stworzona przez Miao Wang (*Department of Geomatics, National Cheng Kung University, Taiwan*) w celu umożliwienia bezpłatnego dostępu szerokiej rzeszy użytkowników LiDAR do wizualizacji chmur punktów pochodzących z lotniczego skanowania laserowego.

Program obsługuje formaty: LAS, ASCII, format binarny BIN (TerraScan) oraz PIF (Optech). Dzięki przyjaznemu w obsłudze graficznemu interfejsowi, użytkownik może synchronizować wiele widoków i zbiorów danych oraz generować profile wzdłuż chmury punktów. M LiDAR Viewer (ryc. 7.18) posiada predefiniowane widoki na chmurę punktów (np. z góry, z lewej, z prawej, itp.), które można zapisać. Wizualizacja punktów może być realizowana według wartości atrybutów: wysokość, intensywność, odległość od skanera, nazwa pliku, numer klasy, RGB, echo, kolejność ech, czas GPS i inne. Program pozwala m.in. na przeprowadzanie podstawowych pomiarów w chmurze punktów LiDAR. Bardzo ciekawą opcją jest możliwość wyselekcjonowania fragmentu chmury punktów wielobokiem regularnym, nieregularnym okręgiem, a także sześcianem przy zdefiniowanej jego głębokości.

Nowatorskim rozwiązaniem jest możliwość pracy z M LiDAR w trybie stereoskopowym, co wymaga jednak posiadania specjalnej karty grafiki (NVIDIA 3D Vision) oraz okularów 3D. Program M LIDAR Viewer posiada również polską wersję językową.



Ryc. 7.18. Interfejs oprogramowania M LiDAR Viewer  
(źródło: [www.iytimg.com](http://www.iytimg.com))

mgr inż. Paweł Hawryło  
Rafał Olejko  
mgr inż. Marcin Pierzchalski  
dr hab. inż. Piotr Węzyk

## 7.19. OPALS

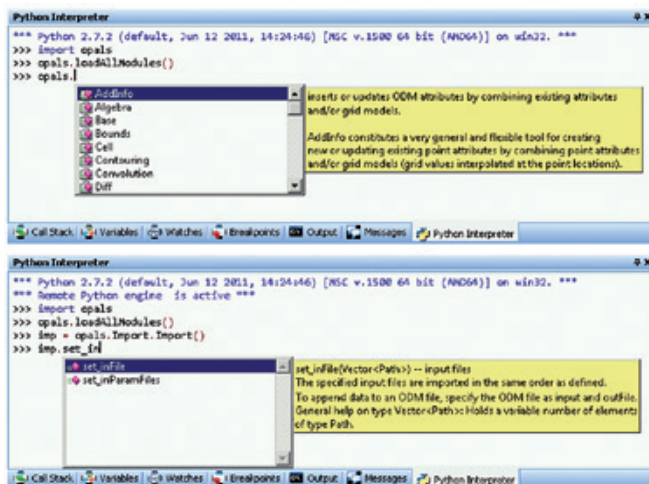
Pakiet oprogramowania OPALS (*Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning*) został opracowany w Instytucie Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu (Austria) w celu przetwarzania danych LiDAR. Pakiet składa się z kilku modułów tematycznych, oferujących różnorodne narzędzia przetwarzania chmur punktów LiDAR, takie jak: nadawanie georeferencji, przeprowadzanie kontroli jakości, klasyfikacja itp. Poza tym OPALS posiada dedykowane narzędzia dla: leśnictwa, hydrologii, modelowania miast i linii energetycznych.

Oprogramowanie bardzo dobrze radzi sobie z kompletnym przetwarzaniem chmury punktów, od danych nieprzetworzonych do produktu końcowego (czy pochodnego), jak np. NMT. Dodatkowo posiada wysoki stopień automatyzacji pracy z dużymi zbiorami danych LiDAR. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu modułów dostępnych z poziomu



linii komend oraz z wykorzystaniem skryptów w języku oprogramowania Python i C++. Oprogramowanie OPLAS zbudowane jest z szeregu narzędzi, które mogą zostać wykorzystane bezpośrednio w środowisku programistycznym (ryc. 7.19). Pakiet OPALS jest podzielony na małe, dobrze zdefiniowane moduły, które mogą być swobodnie łączone, co daje w efekcie elastyczne narzędzia przetwarzania danych. Ponadto stworzono moduł OPALS Data Manager (ODM) do zarządzania zbiorami danych. Zapewnia on realizowanie bardzo wydajnych zapytań przestrzennych dla danych punktowych i liniowych.

Program OPALS wykorzystuje bibliotekę wymiany formatów GDAL. Jest także zgodny ze specyfikacją *Open Geospatial Consortium* (OGC), co zapewnia łatwiejszą wymianę pomiędzy innymi pakietami oprogramowania, jak na przykład GRASS.



Ryc. 7.19. Interfejs oprogramowania OPALS

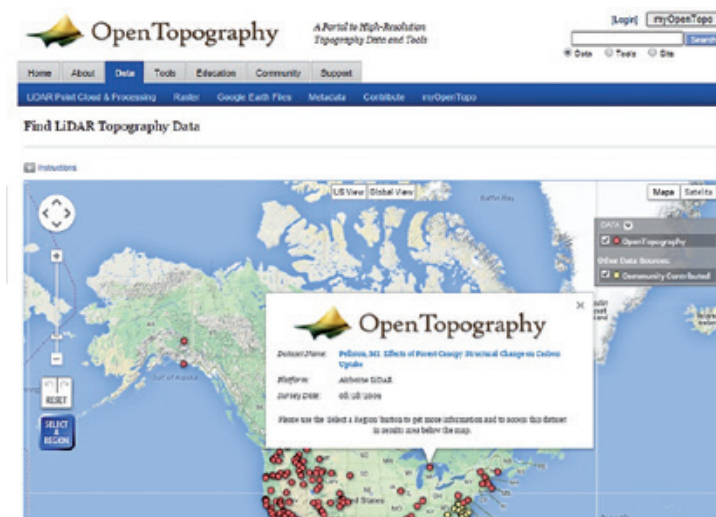
mgr inż. Paweł Hawryło  
mgr inż. Marcin Pierzchalski  
dr hab. inż. Piotr Wężyk

## 7.20. OpenTopography

Open Topography (OT; ryc. 7.20) powstało przy współpracy University of California oraz Arizona State University. Głównym celem projektu jest bezpłatne udostępnianie wysokorozdzielczych danych o topografii powierzchni Ziemi pochodzących ze skanowania laserowego LiDAR oraz innych technologii. Poza udostępnianiem danych, OT stawia sobie za cel uruchomienie serwisów do przetwarzania i analizy gromadzonych

danych. Inicjatywa OT stanowi platformę wymiany informacji na temat dostępności danych oraz narzędzi do ich przetwarzania. Jednocześnie platforma jest miejscem wymiany wiedzy i licznych doświadczeń społeczności użytkowników LiDAR w zakresie badań o Ziemi.

Dane zgromadzone przez OT udostępniane są na trzech poziomach. Pierwszy z nich obejmujący największe grono użytkowników funkcjonuje poprzez przeglądarkę GoogleEarth (Google). Pozwala ona na wizualizację produktów pochodnych przetwarzania danych LiDAR i stanowi cenne narzędzie wykorzystywane dla celów naukowych, edukacyjnych i innych. Drugi poziom udostępniania danych to możliwość pobierania numerycznych modeli terenu w formacie rastrowym dla wybranego obszaru. Trzeci sposób pozwala na pobieranie chmury punktów LiDAR dla wskazanej lokalizacji, a także wykonywanie podstawowych operacji, takich jak generowanie numerycznych modeli terenu. Użytkownik może zdefiniować zakres, rozdzielczość oraz klasy bądź numer odbicia, które zostaną wykorzystane w generowaniu modelu. W kolejnym kroku taki produkt można pobrać na własny dysk twardy bądź dokonać wizualizacji w GoogleEarth lub innej przeglądarce internetowej.



Ryc. 7.20. Wybór danych LiDAR w przeglądarce Open Topography (źródło: [www.opentopography.org](http://www.opentopography.org))

## 7.21. Oracle

W bazie danych Oracle (Oracle z rozszerzeniem Spatial) istnieją dwa modele składowania chmur punktów LiDAR.

Model SDO\_PC pojawił się jako pierwszy i jest dostępny od wersji bazy danych 11g. Dane składowane są w formacie binarnym, dla którego wykorzystywane są dwie struktury tabelaryczne, tj. w pierwszej przechowywane są metadane opisujące chmurę punktów (zasięg, liczba wymiarów itd.), natomiast druga tabela danych typu BLOB (*Binary Large Objects*) przechowuje właściwą chmurę punktów. Pojedyncza chmura punktów LiDAR pojawia się jako jeden wiersz w tabeli z metadanymi i N wierszy w tabeli z danymi; każdy wiersz w tabeli z danymi zawiera wycinek chmury punktów – domyślnie jest to 5000 punktów (można samodzielnie określić wielkość bloku danych dla pojedynczego wiersza tabeli). Każda kolejna chmura punktów generuje jeden wiersz w tabeli metadanych i N wierszy w tabeli danych. Analityka (np.: selekcja podzbioru danych LiDAR) wykonywana jest za pomocą wywoływania funkcji i procedur z pakietu SDO\_PC\_PKG.

Model SDO\_PC\_flat – pojawił się w kolejnych wersjach bazy danych Oracle jako rozwinięcie modelu SDO\_PC. Jest przeznaczony do składowania i przetwarzania danych w oparciu o urządzenie sprzętowe Oracle EXADATA dedykowane bazie danych Oracle. Dane składowane są, podobnie jak w poprzednim modelu, w dwóch strukturach tabelarycznych. Pierwsza zawiera metadane, druga chmurę punktów – lecz nie w formacie binarnym, tylko w formatach prostych (skalarnych): NUMBER, CHAR, DATA. Przejście na takie formaty wynika z funkcjonalności, które automatycznie realizuje EXADATA, takie jak: kompresja połączona z transformacją danych oraz wsparcie dla funkcji filtrowania i indeksowania realizowane już na etapie odczytu danych (*Storage Filter, Storage Index*). Powyższe funkcjonalności realizowane przez inteligentne urządzenia dyskowe przyspieszają przetwarzanie ogromnych zbiorów danych. Ze względu na fakt, iż dane składowane są w formatach prostych, do wykonywania analiz używa się języka SQL, co pozwala w praktycznie dowolny sposób komponować parametry analizy, np.: tworząc bardzo złożone zapytania w oparciu o dane pochodzące z innych tabel/baz. Należy jednak pamiętać, iż jest to model składowania chmury punktów dedykowany urządzeniu Oracle EXADATA i próba użycia na standardowej maszynie spowoduje bardzo wolne wykonywanie zapytań SQL, a czasem wykonanie zapytania w akceptowalnym dla użytkownika czasie będzie wręcz niemożliwe. Do wizualizacji służą bardzo wydajne narzędzia pracujące bezpośrednio na formatach bazy danych, zbudowane w oparciu o standardy OpenGL.

mgr inż. Tomasz Murtaś

## 7.22. PostgreSQL

Obsługa chmury punktów LiDAR oferowana przez bazę PostgreSQL jest możliwa po kompilacji i aktywacji odpowiedniego rozszerzenia o nazwie *pointcloud*. Składowanie chmury punktów LiDAR w bazie PostgreSQL odbywa się na kilka sposobów. Możliwe jest składowanie zarówno pojedynczych punktów (PCPOINT), jak i grup punktów – zapisanych w blokach (PCPATCH). Chmura punktów LiDAR może posiadać różną liczbę zdefiniowanych atrybutów (x, y, z, intensywność, R, G, B itd.). PostgreSQL oferuje użytkownikowi możliwość zdefiniowania, jakie atrybuty są składowane i w jakich formatach. Możliwe jest również składowanie wartości względnych i na podstawie opisu parametrów przechowywania, konwersja „w locie” na wartości bezwzględne, a także kompresja danych. Poprawne użycie oferowanych możliwości w efekcie powoduje mniejsze zapotrzebowanie na dostępną przestrzeń dyskową do przechowania chmury punktów w bazie danych.

Dostępne funkcje bazy danych PostgreSQL z rozszerzeniem *pointcloud* umożliwiają konwersję chmury punktów LiDAR na formaty tekstowe, łączenie bloków danych, sumowanie liczby punktów, selekcję pojedynczych punktów, obliczanie statystyk: średnia, minimum, maksimum czy też filtrowanie wartości atrybutów chmury punktów. Możliwa jest również przestrzenna interakcja chmury punktów LiDAR z obiektami wektorowymi. W tym celu, oprócz rozszerzenia *pointcloud*, należy uaktywnić rozszerzenie *postgis*, które jest odpowiedzialne za obsługę danych wektorowych oraz rozszerzenie *pointcloud\_postgis* – odpowiedzialne za interakcję pomiędzy chmurą punktów a danymi wektorowymi. Przykładowe funkcjonalności, jakie posiada rozszerzenie *pointcloud\_postgis* to m.in.: *PC\_Intersects* – bada ono czy obiekty się przecinają i zwraca wartość logiczną oraz *PC\_Intersection* – które zwraca wynik przecięcia (wycinek) chmury punktów z obiektem wektorowym.

Do procesu tzw. ładowania i wyładowywania chmury punktów LiDAR z bazy danych PostgreSQL służy biblioteka PDAL. Użytkownik może także skorzystać z formatu *Well Known Binary* (WKB) i samodzielnie podjąć trud importu danych LiDAR do bazy danych.

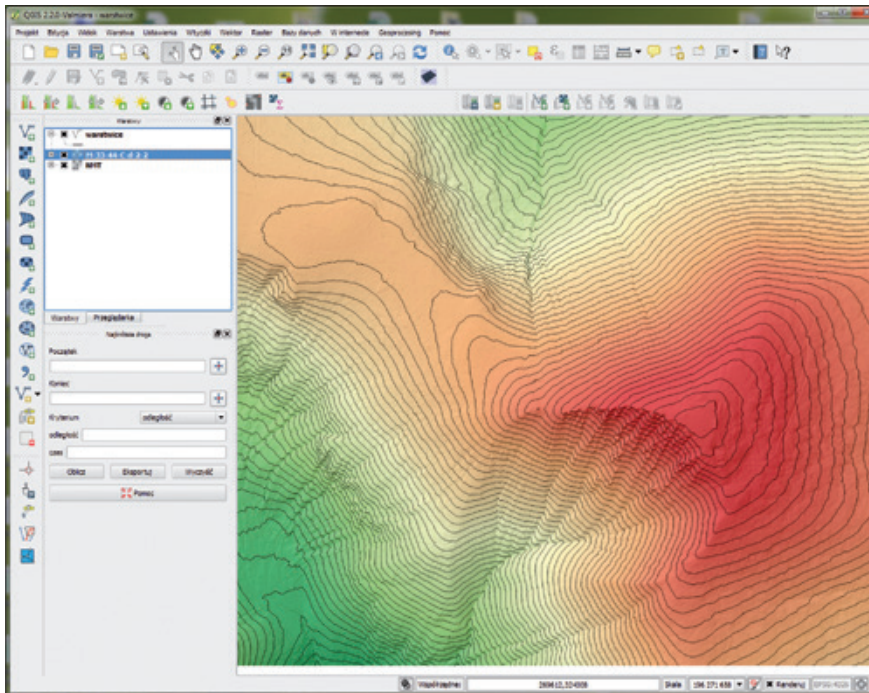
Aneta Rzepecka

## 7.23. QGIS

QGIS (dawniej Quantum GIS) jest projektem Fundacji *Open Source Geospatial* (OSGeo) i należy do grupy programów *open source*, udostępnianego na licencji GNU (ang. *General Public License*). Oprogramowanie QGIS jest dedykowane do przetwarzania danych z zakresu GIS (ryc. 7.21).

Aplikacja obsługuje pliki formatów wektorowych, takich jak: SHP, MapInfo TAB i MIF/MID, SDTS, GML, GPX, KML oraz DXF. Obsługiwane przez QGIS pliki w formatach rastrowych to: TIFF/GeoTIFF, JPEG, PNG, ERDAS IMG, GRASS Raster oraz ASCII i GRID. Program QGIS pracuje z bazami danych: PostgreSQL, SQLite, MySQL oraz Oracle Spatial.

Program obsługuje m.in. biblioteki GDAL/OGR. Aplikacja jest także zintegrowana z PostGIS i UMLMapServer (OSGeo). Oprogramowanie posiada wiele narzędzi do pracy z warstwami rastrowymi, wektorowymi, tabelami atrybutów, a także wizualizacji analiz przestrzennych.



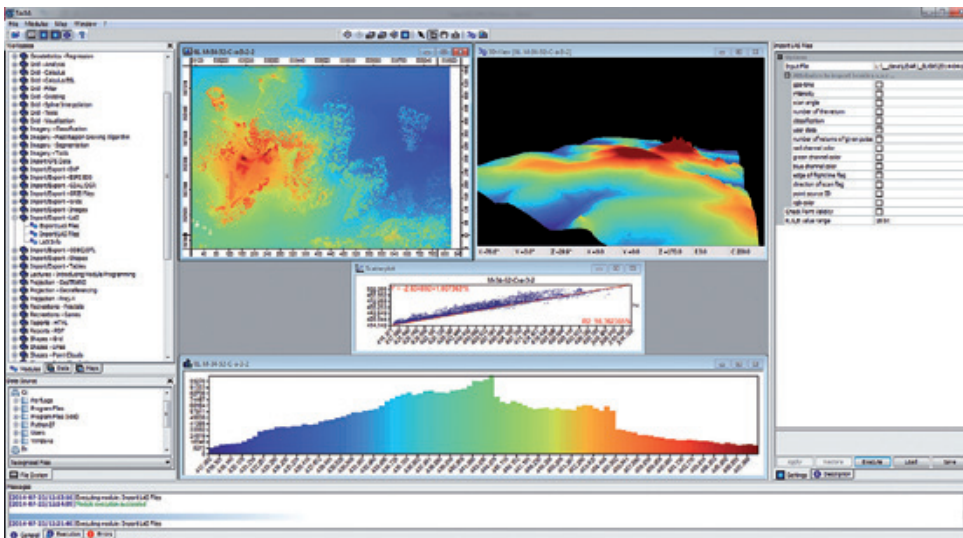
Ryc. 7.21. Wygenerowane warstwy wyświetlane na tle NMT (kompozycja barwna) w oprogramowaniu QGIS (OSGeo)

Szeroka funkcjonalność QGIS opiera się głównie na wtyczkach, wewnętrznych bądź zewnętrznych napisanych w językach oprogramowania: C++ lub Phython. Na zasadzie wtyczki działa m.in. funkcja wizualizacji danych w 3D dostępna w oknie przeglądarki internetowej (Qgis2threejs). QGIS posiada ciekawy moduł Orfeo Toolbox do przetwarzania obrazów teledetekcyjnych.

## 7.24. SAGA

Oprogramowanie SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*) powstało w wyniku działalności niemieckiego zespołu specjalistów z Uniwersytetu w Getyndze (J. Bohner i O. Conrad). Aplikacja zawiera zestaw narzędzi do analiz danych przestrzennych w postaci wektorowej, tabelarycznej, ale przede wszystkim rastrowej (ryc. 7.22). Pakiet SAGA należy do grupy programów z zakresu *open source* (licencja GNU; *General Public License* oraz *GNU Lesser General Public License*). Program SAGA udostępnia ponad 300 modułów w tym z biblioteki GDAL, która obsługuje około 40 różnych formatów plików.

Pakiet SAGA posiada kilka modułów do pracy z chmurą punktów pochodzącej ze skanowania laserowego, zawiera moduły do jej przetwarzania, w tym do importowania plików o rozszerzeniach, takich jak: SHP, ASCII, STL (*Stereo Lithography File*) czy popularnego formatu LAS (ASPRS). Aplikacja SAGA pozwala na wizualizację (używając *Point Cloud Viewer*) oraz konwersję chmury punktów LiDAR z formatu LAS do plików SHP lub SPC.



Ryc. 7.22. Moduł aplikacji SAGA do podstawowego przetwarzania i wizualizacji danych LiDAR

Oprogramowanie posiada także funkcje służące do generowania modeli wysokościowych oraz do przeprowadzenia symulacji ryzyka pożarowego, analiz hydrologicznych czy modelowania oddziaływania człowieka na środowisko, wykorzystując narzędzia z zakresu analiz widoczności licznych z obszaru morfometrii terenu. Oprogramowanie SAGA zostało wykorzystane przez wybrane moduły programu LiS (*LASERDATA*) jako tzw. silnik (ang. *engine*) aplikacji.

mgr inż. Paweł Hawryło  
Rafał Olejko  
mgr inż. Marcin Pierzchalski  
dr hab. inż. Piotr Wężyk

## 7.25. SCOP++

SCOP++ jest programem Instytutu Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu oraz firmy Trimble, który powstał z myślą o przetwarzaniu chmur punktów, pod kątem interpolacji danych pochodzących z opracowań fotogrametrycznych oraz zarządzania zbiorami oraz wizualizacją danych LiDAR. Oprogramowanie SCOP++ zostało napisane z wykorzystaniem technik obiektowych języka C++ z zaimplementowanym interfejsem użytkownika (ryc. 7.23). Gwarantuje to stabilność i dużą szybkość działania aplikacji.

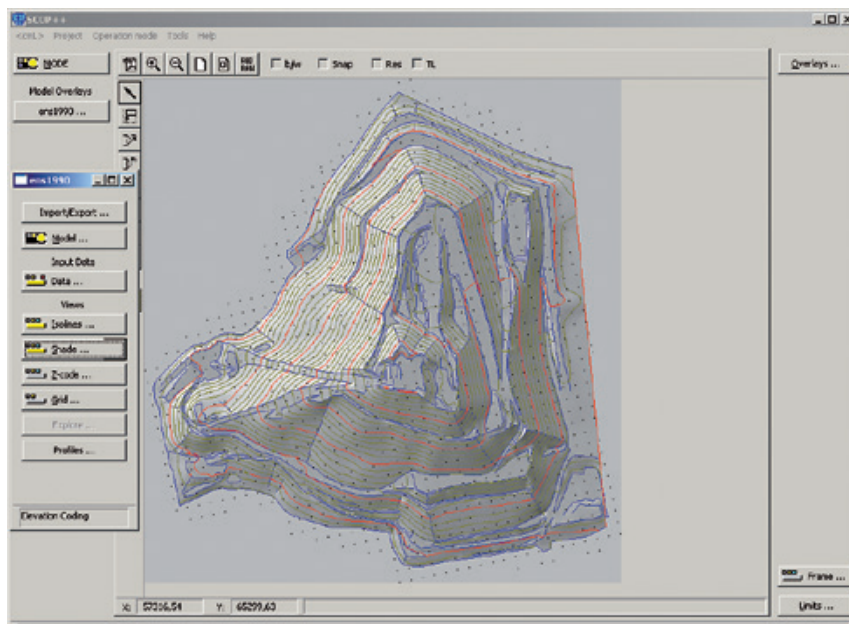
SCOP Kernel to aplikacja bazowa umożliwiająca wykonywanie interpolacji przestrzennych z jednoczesną filtracją danych. Oprogramowanie pozwala także na pełną integrację chmury punktów z danymi wektorowymi i rastrowymi oraz posiada możliwości edycyjne. Program ma możliwość budowania skryptów typu *batch* pozwalających na przetwarzanie wsadowe dużej liczby chmur punktów. Aplikacja obsługuje formaty: LAS, ASCII, Binary XYZ, TIF oraz formaty CAD.

SCOP LIDAR jest modułem przeznaczonym do pracy z formatem LAS (ASPRS) oraz do pracy z danymi naziemnego skanowania laserowego.

SCOP Analizer jest nakładką do generowania przekrojów przez chmurę punktów, widoków oraz modeli różnicowych. Wbudowane funkcje algebry mapowej, możliwości mozaikowania chmur punktów oraz narzędzia analizy wolumetrycznej stanowią podstawowe cechy nakładki.

SCOP Visualizer jest modułem rozszerzającym możliwości wizualizacyjne o zaawansowane metody prezentacji: mapy widoczności wraz ze definiowanymi atrybutami opisowymi, generowanie modeli szkieletowych oraz wizualizację z wykorzystaniem lotniczych lub satelitarnych cyfrowych ortofotomap.

SCOP TopDM to moduł będący systemem bazodanowym przechowującym zarówno chmurę punktów LiDAR jak i produkty pochodne wykonane przy wykorzystaniu innych modułów oprogramowania SCOP++.



Ryc. 7.23. Interfejs oprogramowania SCOP++ (źródło: [www.gtbi.net/scop](http://www.gtbi.net/scop))

mgr inż. Piotr Szwed

## 7.26. Terrasolid

Programy firmy Terrasolid z FinalIndii, to pakiet aplikacji wykorzystywany przez geodetów, inżynierów, projektantów oraz wielu innych specjalistów potrzebujących rozbudowanych możliwości przetwarzania oraz wykorzystania danych z lotniczego i mobilnego skanowania laserowego. Zaletą pakietu aplikacji Terrasolid jest jego działanie w środowisku CAD w programie MicroStation (a także: MapPower oraz MapPower View) firmy Bentley, który daje możliwość korzystania z narzędzi do wizualizacji, manipulacji, digitalizacji.

Pakiet Terrasolid składa się z kilku aplikacji, spośród których najważniejsze w procesie przetwarzania danych ALS to: TerraScan, TerraMatch, TerraModeler, TerraPhoto, TerraSlave oraz TerraStereo.

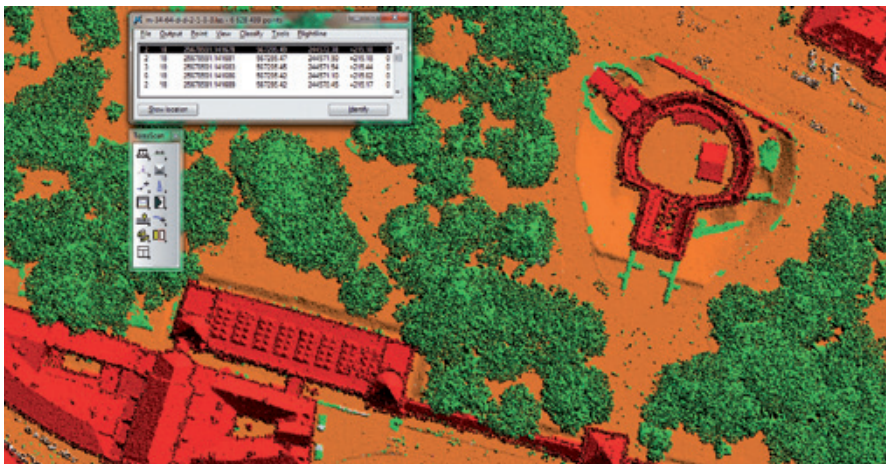
TerraScan jest podstawową aplikacją pakietu Terrasolid służącą do wczytywania, przetwarzania (np. klasyfikacji) oraz eksportu i zapisu danych LiDAR (ryc. 7.24). Aplikacja zawiera kilkanaście wbudowanych automatycznych algorytmów do klasyfikacji chmury punktów ze skanowania laserowego oraz narzędzia do manualnej edycji wyników klasyfikacji. Dodatkowo producent zaimplementował narzędzia służące do analiz linii energetycznych oraz generowania modeli miast 3D. Aplikacją uzupełniającą funkcjo-



nalność TerraScan jest TerraSlave. Służy ona do wykonywania makropoleceń napisanych w TerraScan w tle, nie blokując możliwości dalszej pracy oraz umożliwia wykonywanie obliczeń na kilku stacjach roboczych, na których program jest zainstalowany.

Program TerraModeler oferuje możliwość generowania, edycji (np. linie nieciągłości) oraz zapisu (eksportu) numerycznego modelu terenu, numerycznego modelu pokrycia terenu w postaci GRID lub TIN, jak i również posiada algorytmy służące do generowania linii warstwicznych. Dodatkowo zawiera opcję generowania aktywnego modelu TIN, który ułatwia weryfikację danych LiDAR w aplikacji TerraScan.

Aplikacja TerraPhoto umożliwia przetwarzanie zdjęć cyfrowych (zarówno lotniczych, jak i z platform MLS), generowanie cyfrowej ortofotomapy oraz prawdziwej ortofotomapy (ang. *true orthophoto*). Dodatkowo zawiera funkcje pozwalające na teksturowanie modeli miast 3D ze zdjęć lotniczych wykonanych w nadirze oraz zdjęć ukośnych (ang. *oblique images*). TerraPhoto umożliwia także tzw. kolorowanie, nadawanie atrybutów RGB chmurze punktów ze zdjęć cyfrowych oraz generowanie animacji na podstawie danych powstałych w środowisku Terrasolid i MicroStation (Bentley).



Ryc. 7.24. Okno aplikacji TerraScan

TerraMatch jest zaawansowanym narzędziem umożliwiającym poprawę dokładności i jakości „surowej” chmury punktów ze skanowania lotniczego oraz mobilnego. W procesie wyrównania danych niezbędna jest informacja o trajektorii lotu lub przejazdu. Aplikacja pozwala na pomiar różnic pomiędzy powierzchniami z nakładającymi się na siebie poprzecznie pasów nalotu lub pomiędzy przejazdami ze skanowania mobilnego.

TerraStereo jest najnowszą aplikacją firmy Terrasolid działającą samodzielnie poza środowiskiem firmy Bentley. Aplikacja umożliwia wizualizację bardzo dużych zbiorów chmur punktów ALS i MLS oraz generowanie animacji. Nowością jest możliwość wyświetlenia chmury punktów w trybie pełnego 3D, na komputerach odpowiednio do tego przystosowanych (karta grafiki, monitor 3D i okulary) oraz digitalizacja obiektów na chmurze punktów 3D.

## 8. Przyszłość technologii lotniczego skanowania laserowego

„Zobaczyć to, co niewidoczne” – to jedno z haseł używanych do promowania technologii lotniczego skanowania laserowego, szczególnie w przypadku jej stosowania w obszarach pokrytych zwartą szatą roślinną. Technologia LiDAR w ostatnich 10 latach, ugruntowała swą mocną pozycję wśród różnych oferowanych rozwiązań kartowania dostarczających tzw. danych 3D, takich jak: fotogrametria cyfrowa czy obrazowanie radarowe lub satelitarne (stereoskopowe). Przez swą ekonomiczną konkurencyjność, w tym czasochłonność i dokładność opracowywania produktów (np. NMT obszarów leśnych), technologia ALS stała się poważną alternatywą dla fotogrametrii lotniczej czy tradycyjnej geodezji.

Przyszłość rozwoju technologii lotniczego skanowania laserowego oraz praktycznych zastosowań tego rodzaju danych w różnych gałęziach gospodarki, nauki czy bezpieczeństwa, jest niezmiernie obiecująca, ale jednocześnie dość trudna do zdefiniowania ze względu na wciąż nowe, innowacyjne rozwiązania technologiczne i ich wdrożenia. Trendy rozwoju technologicznego uwarunkowane są stroną techniczną budowy systemów skanujących, ale także platform, na jakich są umieszczane, tj. na: samolotach, śmigłowcach czy bezałogowych statkach powietrznych (UAV; ryc. 8.1). Rozwój ten zmierza w kierunku ciągłego doskonalenia:

- elektroniki (miniaturyzacja urządzeń, wzrost możliwości obliczeniowych procesorów, ilości dostępnej pamięci RAM, zmniejszenia plamki lasera – lepsza penetracja pokrywy roślinnej),
- mechaniki precyzyjnej dla części ruchomych (luster, pryzmatów itp.) urządzenia skanującego (przyspieszenie częstotliwości wysyłania i odbierania impulsów światła, zwiększenia gęstości chmur punktów ALS),
- systemów integracji danych i urządzeń (np. ALS i pozyskiwanych obrazów z wykorzystaniem tej samej trajektorii; nalty synchroniczne),
- systemów inercyjnych (IMU-INS; żyroskopów i akcelerometrów),
- systemów GNSS (pozycjonowania satelitarnego),
- optymalizacji doboru długości fali elektromagnetycznej w przypadku skanowania batymetrycznego (w przyszłości wykorzystania zakresów wielospektralnych),
- algorytmów indeksacji przestrzennej danych i inteligentnego ładowania ogromnych zbiorów danych chmur punktów ALS do ich wizualizacji (np. EUCLIDEON Pty.),

- algorytmów do kompresji danych ALS (np. LASzip – rapidlasso; zLAS – Esri czy MG4 - LizardTech) oraz obrazu (np. ECW – ERDAS, Intergraph),
- wielkości przestrzeni dyskowej do zapisu danych ALS i obrazów (np.: RGB czy NIR), z kamer termalnych czy hiperspektralnych skanerów liniowych (np. SPECIM, Spectral Imaging Ltd.),
- zwiększania udźwigu przez UAV oraz miniaturyzacji skanerów i odbiorników GNSS oraz IMU,
- obniżania minimalnych prędkości przelotowych samolotów przy jednoczesnym zwiększeniu szerokości pozyskiwanego szeregu ALS (dostosowywanie kąta *nadir-off*),
- podnoszenia maksymalnych pułapów nalołów przez zwiększenie technicznych możliwości urządzeń.



Ryc. 8.1. Drone Phoenix AL-2 ze skanerem Velodyne HDL-32E generujący do 700 000 impulsów na sekundę (źródło: Phoenix Aerial System)

Od strony nowych technologii warto na pewno wspomnieć o wprowadzanych na rynek nowych urządzeniach LMS-Q1560 (RIEGL) pracujących z częstotliwością do 800 kHz umożliwiającymi pozyskanie do 530 000 punktów na sekundę (ryc. 8.2). Zastosowane nowoczesne oprogramowanie RiMTA pozwala na zarządzanie 10 impulsami jednocześnie, szczególnie w terenach o bardzo dużych deniwelacjach terenu (np. w górach). Dzięki zastosowaniu technicznych rozwiązań urządzenie jest w stanie skanować do przodu, do tyłu i w nadirze, co daje nowe możliwości w terenach górskich czy miejskich (w przypadku pozyskiwania danych o fasadach budynków). Nowy skaner umożliwia integrację z innymi sensorami, takimi jak: IMU, średnioformatową lotniczą kamerą cyfrową czy nawet drugą kamerą czującą w zakresie NIR.

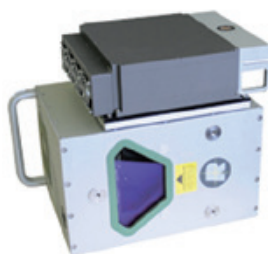
Innym nurtem technologicznym są prace nad sensorami LiDAR umożliwiającymi penetrację wód, mapowanie brzegów i dna rzek czy płytkich zbiorników wodnych, ale przede wszystkim strefy brzegowej morza. Jednymi z ostatnich rozwiązań są skanery

VQ-820-G (RIEGL) czy Chiroptera II (AHAB Leica) dostosowane do montażu w samolotach i śmigłowcach. Są one przygotowane do skanowania zarówno środowiska lądowego (ang. *topographic scanners*), jak i wodnego (ang. *hydrographic scanners*). W skanerze VQ-820-G (ryc. 8.3) zastosowano digitalizację echa sygnału oraz przetwarzanie on-line pełnej fali (ang. *full-waveform*) z możliwością detekcji wielu celów. Skaner ma częstotliwość sięgającą 520 kHz oraz jest w stanie pozyskiwać do 200 linii na sekundę przy kącie wychylenia sięgającym 30° (pole widzenia 60°). W przypadku skanera Chiroptera II (AHAB Leica) można w technologii pełnej fali jednocześnie skanować ląd i infrastrukturę portu, dno morza lub rzeki do głębokości ok. 1,5 krążka Secchiego. Gęstość skanowania laserowego, jaką można uzyskać skanerem Chiroptera II, wynosi około 1,5 pkt/m<sup>2</sup> na dnie zbiornika oraz do 12 pkt/m<sup>2</sup> na lądzie. Dokładność pionowa skanowania batymetrycznego wynosi około 0,15 m. System zintegrowany jest z kamerą średnioformatową Leica RCD30, umożliwiającą rejestrację także w kompozycji CIR.

Ostatnim omawianym trendem rozwoju technologii ALS są urządzenia montowane na coraz bardziej zaawansowanych bezałogowych statkach powietrznych (ang. UAV; *drones*). Przykładem takiego skanera może być VUX-1 (RIEGL; ryc. 8.4) o niezwykle lekkiej konstrukcji oraz kompaktowym kształcie, którego montaż jest możliwy np. na śmigłowcach bezałogowych. Innowacyjnie rozwiązane zasilanie i możliwość zapisu danych (240 GB SSD lub przesył danych w czasie rzeczywistym) oraz wysoka dokładność (około 10 mm), częstotliwość (500 kHz), a także zasięg skanowania ponad 300 m, pole widzenia 330°, stanowią o jego rewolucyjnej konstrukcji. Niewielkie rozmiary (227 × 180 × 125 mm) oraz waga (zaledwie 3,6 kg) sprawiają, że będzie on stanowił uzupełnienie dla usług oferowanych przez firmy fotolotnicze korzystające z samolotów lub śmigłowców. Jego zastosowanie przewiduje się głównie w obszarach kartowania: linii energetycznych, kolejowych, rurociągów, gazociągów (naloty korytarzowe), trudnych obszarów górskich (tzw. *canyon*) czy miejskich, kopalni odkrywkowych, terenów rolniczych i leśnych, stanowisk archeologicznych lub inwestycji (np. konstrukcji budowlanych, infrastruktury itp.).



Ryc. 8.2. Skaner LMS-Q1560  
(źródło: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))



Ryc. 8.3. Skaner VQ-820-G  
(źródło: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))



Ryc. 8.4. Skaner VUX-1  
(źródło: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))

Innym, bardzo liczącym się producentem, rozwijającym technologię laserowego skanowania lotniczego jest firma Leica, oferująca rodzinę produktów ALS70. Obecnie na rynku dostępne są trzy modele: ALS70-CM, Leica ALS70-HP oraz Leica ALS70-HA.

Wszystkie charakteryzują się możliwością generowania do 500 000 impulsów na sekundę, ale przede wszystkim dostosowano je do odrębnych zadań. Użytkownik systemów w zależności od specyfiki skanowanego terenu może wybrać wzór (ang. *pattern*) rozmieszczenia impulsów na gruncie (dostępne wzory: sinusoida, trójkąt oraz raster).

System ALS70-CM (ryc. 8.5) przeznaczony jest do nalotów korytarzowych (linie energetyczne, trakcje kolejowe itp.) realizowanych głównie na niskich pułapach z helikoptera. W ten sposób można osiągnąć bardzo wysoką gęstość chmur punktów ALS. Dodatkowo w skaner wbudowano kamerę XGA o rozdzielczości 1280 × 1024 pikseli, która umożliwia jednoczesną rejestrację obrazu podczas tej samej trajektorii co skanowanie. System ALS70-CM umożliwia zapis danych ALS do 6 godzin lotu i można go przebudować na wyższy, np. na ALS70-HP.



Ryc. 8.5. Skaner ALS70-CM (źródło: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))

System ALS70-HP przeznaczono do większości projektów ALS, jednak na uwagę zasługuje duża maksymalna wysokość względna (3500 m), z jakiej skaner może dokonywać obrazowania (ryc. 8.6). Podobnie jak niższy model, system ma wbudowaną kamerę zintegrowaną ze skanerem. System (-CM oraz -HP) dostosowuje częstotliwość skanowania do zmieniającej się prędkości samolotu (tzw. funkcja AutoScan), by kontrolować zadaną gęstość chmury punktów.

Ostatni produkt z omawianej rodziny to ALS70-HA (ryc. 8.7). Przeznaczono go głównie do zadań związanych ze skanowaniem bardzo dużych obszarów, co realizowane jest dzięki możliwości skanowania szerszych szeregów z wysokości 5000 m nad terenem z użyciem kontrolera SC70. Użytkownik posiadający niższe modele (-CM i -HP) z tej rodziny produktów może je odpowiednio dostosować (ang. *upgrade*) do swych potrzeb.



Ryc. 8.6. Skaner ALS70-HP  
(źródło: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))



Ryc. 8.7. Skaner ALS70-HA  
(źródło: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))

Możliwości zastosowania danych ALS zależą w głównej mierze od technologii ich pozyskiwania oraz przetwarzania, a tym samym związanych z tym kosztów. Obecnie obserwuje się tendencje rozwoju technologii ALS w kierunku:

- doskonalenia procesów obliczeniowych przetwarzania danych, np. ekstrakcji poszczególnych ech sygnału z zapisu fali ciągłej (*full-waveform*),
- automatyzacji metod łączenia i wyrównania poszczególnych szeregów nalogu wraz z oceną dokładności danych,
- wsparcia procesu nadawania georeferencji chmurze punktów ALS,
- automatyzacji procesu klasyfikacji chmur punktów ALS,
- generowania i edycji modeli wysokościowych (np. NMPT),
- inteligentnej filtracji danych i eliminacji nadmiarowej informacji,
- automatycznej ekstrakcji obiektów z chmury punktów (np. budynków, drzew, linii energetycznych, sieci trakcyjnych, samochodów itp.),

- wizualizacji sklasyfikowanej chmury ALS oraz wykrytych obiektów 3D (np. budynki, drzewa) na aplikacjach desktop czy też mobilnych,
- możliwości wizualizacji i przetwarzania chmury punktów ALS w środowisku 3D wraz z możliwościami edycji tworzonych obiektów i pomiarów z wykorzystaniem zaawansowanych kart graficznych i specjalistycznych algorytmów, umożliwiających wczytanie dużej ilości danych ALS,
- wizualizacji z maskowaniem tła (innych obiektów),
- automatyzacji procesów decyzyjnych rozpoznania obiektów (np. autonomicznych systemów lądowania śmigłowców czy sterowania samochodami),
- zastosowań wojskowych (rozpoznanie pola widoczności, odległości, kształtu, obszarów możliwych do sforsowania itp.),
- automatyzacji kolorowania chmur punktów z kamer wielo- i hiperspektralnych a także termalnych.

Aplikacje z wykorzystaniem danych ALS są już dziś szeroko stosowane przez służby geodezyjne, geologiczne, leśne czy też hydrologiczne. Poniżej przedstawiono wybrane obszary i kierunki rozwoju wykorzystania informacji 3D, generowanych z chmur punktów ALS wraz z informacją obrazową (wielospektralną) lub wideo.

Jednym z głównych kierunków przyszłego zastosowania chmur punktów ALS jest generowanie modeli 3D budynków dla aglomeracji miejskich z komplementarnym wykorzystaniem tzw. prawdziwych ortofotomap lotniczych (ang. *true-orthophoto*; renderowanie dachów budynków, wysokich wiaduktów itp.), ukośnych zdjęć lotniczych (do teksturowania fasad budynków) czy nawet sekwencji wideo (kamery w zakresie RGB, NIR, hiperspektralnym lub termalnym). Integracja informacji przestrzennej 3D (chmury punktów ALS; modele geometryczne obiektów) z obrazami teledetekcyjnymi (np. z kamery pracującej w zakresie termalnym) otwiera nowe możliwości w zarządzaniu przestrzenią miasta, np. pod kątem monitorowania tzw. wysp ciepła czy lokalnych zmian mikroklimatycznych. Budynki i roślinność, jako reprezentacja 3D świata rzeczywistego, odgrywają niezmiernie ważną rolę w określaniu np. parametru szorstkości powierzchni, używanego w matematycznym modelowaniu propagacji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych.

W przypadku prawdziwych ortofotomap (generowanych ze zdjęć lotniczych), omówionych już we wcześniejszych rozdziałach, ich rozdzielczość terenowa (ang. GSD) zależna jest od piksela zdjęcia lotniczego. Istnieją już jednak możliwości generowania prawdziwych ortoobrazów, także z chmury punktów ALS przy spełnieniu warunku odpowiedniej ich gęstości nominalnej. Wizualizacja punktu z chmury ALS według atrybutu RGB lub CIR (przypisanym w odpowiedni, fotogrametryczny sposób ze zdjęć lotniczych) daje możliwości wygenerowania kartometrycznego obrazu rastrowego (konwersja z punktu do piksela). Technologia ALS stwarza zatem alternatywę w stosunku do tradycyjnej fotogrametrii cyfrowej.

Miasta 3D staną się niebawem rzeczywistością przestrzennych baz danych wraz z informacjami atrybutowymi (np. liczba mieszkańców, rok budowy, informacje o budynkach publicznych itp.). Jednak sama wizualizacja miast na portalach internetowych czy możliwość współpracy ze społecznościowymi grupami i portalami przez integrację

informacji przestrzennej 3D oraz atrybutowej to nie wszystko. Duży potencjał miast 3D to zarządzanie nimi poprzez ocenę nie tylko ich przestrzennego rozwoju (np. monitorowanie zmian objętości poszczególnych dzielnic miasta) i kształtowania lokalnej przestrzeni (widoczność, zacienienie, mikroklimat), ale także naliczania podatków (np. „podatek deszczowy” od wielkości powierzchni nieprzepuszczalnej, z której odprowadzane są wody opadowe), współczynników objętości budynków do zieleni miejskiej (waloryzacja, jakość życia), określania potencjału solarnego dachów (panele fotowoltaiczne i ogniwa słoneczne) i fasad budynków (np. samowystarczające inteligentne wieżowce). Niewątpliwie ogromny potencjał skanowania laserowego polega na integracji z innymi danymi pozyskiwanymi z powietrza (np. drony; UAV wykonujące zobrazowania fasad) lub z ziemi (systemy mobilnego mapowania MMS – kamery czy Mobilnego Skanowania Laserowego – MLS). Integracja przestrzenna chmur punktów MLS z danymi ALS, a nawet TLS (wewnątrz budynków) stwarza niewiarygodne możliwości wizualizacji 3D przestrzeni miejskiej.

Inne przykłady szerszych niż dotychczas zastosowań danych ALS zmiernają w kierunku wykrywania (monitorowania) zmian przesunięć obiektów, a tym samym często ich objętości z wykorzystaniem chmur punktów z wieloczasowych obserwacji. Służy to celom monitoringu zmian przestrzennych (ang. *change detection*): osuwisk, zapadlisk, erozji, sedymentacji, przemieszczania się wydm, działalności wulkanicznej, działalności silnych sztormów, trzęsień ziemi, powodzi, huraganów, składowisk odpadów, wysypisk, budynków, ale również przyrostu drzew i kompleksów leśnych, ich użytkowania czy też pojawiania się wtórnej sukcesji leśnej na gruntach porolnych. Objętość, jako nowy wskaźnik np. jakości życia w mieście, można obliczać nie tylko między tymi samymi klasami w różnych odstępach czasu, ale także pomiędzy poszczególnymi klasami (np. budynkami a gruntem, roślinnością wysoką a gruntem).

Reasumując, należy stwierdzić, iż wciąż kosztowna technologia lotniczego skanowania laserowego, będąc alternatywą tradycyjnych technologii fotogrametrii lotniczej, jest jednocześnie wspólnym jej uzupełnieniem (np. wykorzystanie ortofotomap lotniczych i zdjęć ukośnych). Wydaje się, że obie techniki będą się szybko rozwijać i wzajemnie integrować. Pojawienie się cyfrowych kamer lotniczych wielkoformatowych oraz algorytmów dopasowania obrazów (ang. *stereomatching*) powoduje, iż z wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych wykonywanych z bardzo dużym pokryciem podłużnym (85–90%) i poprzecznym (50–60%) generowane są chmury punktów o bardzo dużej gęstości (np. przy GSD = 10 cm otrzymujemy 100 pkt/m<sup>2</sup>). Oczywiście ograniczeniem dla technologii fotogrametrycznych jest brak możliwości penetracji szaty roślinnej czy też działania w obszarach cienia (nie wspominając o konieczności pozyskiwania zdjęć przy bardzo dobrym oświetleniu). Kolejnym atutem decydującym o wyższości technologii ALS nad stereomatchingiem jest sposób klasyfikacji chmury punktów. Technologia ALS i odpowiednie oprogramowanie rozwijane jest już od kilkunastu lat i wykorzystuje wszelkie możliwe dostępne informacje dla punktu (np. numer echa, kąt skanowania, intensywność itp.). Wszystko wskazuje na to, że metodami fotogrametrycznymi (inaczej *computer vision*) można generować chmury punktów z tańszych zdjęć lotniczych, ale wciąż pozostaje problem ich klasyfikacji i konieczności posiadania danych ALS w celu precyzyjnego rozpoznania gruntu (szczególnie w obszarach cienia czy zadrzewień). Nie



przesądając o wyższości technologii ALS nad fotogrametrią, należy podkreślić konieczność cyklicznego skanowania ALS obszarów, na których potencjalnie mogą wystąpić kataklizmy, a także terenów zurbanizowanych. Nie bez znaczenia jest także skanowanie obszarów leśnych i rolnych w różnym okresie wegetacji, szczególnie w okresie spoczynkowym, tak, aby NMT mógł być generowany z najmniejszymi błędami. Niebawem, w 2015 roku, obszar pokrycia terytorium Polski danymi ALS osiągnie poziom 92%, co nie oznacza, iż proces pozyskiwania danych referencyjnych zostanie zakończony. Dostępność w przgik tak precyzyjnych danych jak chmury punktów ALS czy modele wysokościowe (NMT, NMPT), przyczynia się w znaczący sposób do ich powszechnego wykorzystania we wszystkich sektorach naszej gospodarki.

Oddziaływanie kataklizmów, takich jak powódzie, pożary czy huragany, nie zakończy się wraz z ukończeniem skanowania lotniczego kraju, a gospodarka i wymogi nowych dyrektyw UE wciąż będą zgłaszały kolejne zapotrzebowanie lub wymagały posiadania precyzyjnych danych 3D dla rozległych obszarów.

Rozwój infrastruktury kraju, w tym budowa zbiorników retencyjnych, obwałowań rzek, autostrad i dróg, linii kolejowych, mostów i wiaduktów, rozwój miast (w wymiarze 2D i 3D), techniczne zabezpieczenia brzegu morskiego, inne inwestycje związane ze zmianami przestrzeni (modeli NMT i NMPT) pociągają za sobą konieczność bieżącej aktualizacji danych referencyjnych w przgik. Procesy związane z erozją gruntów, ruchami masowymi (osuwiska, szkody górnicze) czy eksploatacją kruszyw, surowców i paliw (wzrosty, zwałowiska, hałdy, zbiorniki poflotacyjne i in.) wymagają bieżącej kontroli w przestrzeni 3D, co w dużej mierze zabezpieczyć może stosowanie technologii lotniczego skanowania laserowego. Duże sektory gospodarki, takie jak leśnictwo i rolnictwo, dostrzegają już dziś ogromny potencjał danych ALS w monitorowaniu przestrzeni produkcyjnej i wykorzystanie precyzyjnych danych 3D w celu zmniejszania kosztów tradycyjnych prac i technologii. Aktualizacja zbiorów danych ALS oraz produktów pochodnych jest niewątpliwie ogromnym wyzwaniem logistycznym i musi być należycie przemyślana po przeanalizowaniu wymagań płynących z różnych sektorów gospodarki, urzędów administracji, samorządów czy od podmiotów gospodarczych zainteresowanych ich wykorzystaniem.

Analizując wyniki ankiet przeprowadzonych przez GUGiK w 2014 roku, w ramach realizacji zamówienia dotyczącego „Szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR”, w których odpowiedzi udzieliło 1189 osób reprezentujących 650 instytucji z sektora publicznego, prywatnego i non-profit, dostrzec można jednoznaczne zapotrzebowanie społeczeństwa na częstą aktualizację chmur punktów ALS oraz modeli: NMT i NMPT. Aż 58% udzielonych odpowiedzi określa wymaganą częstotliwość aktualizacji tych danych w przedziale od 1 do 3 lat. Ponadto 65% respondentów jest zainteresowanych możliwością wykorzystywania usług sieciowych umożliwiających wykonywanie analiz i pomiarów na ww. danych, a 35% oczekuje, iż GUGiK w najbliższych latach rozpocznie produkcję i udostępnianie modeli 3D budynków w formacie CityGML charakteryzujących się drugim poziomem szczegółowości (LOD 2). Biorąc powyższe pod uwagę, GUGiK w ramach kolejnej perspektywy finansowej i planowanego uruchomienia Programu Operacyjnego Polska Cyfrowa na lata 2014–2020 ubiega się o realizację m.in. przedsięwzięcia Polska 3D+, którego jednym z założeń jest w jak największym stopniu sprostać oczekiwaniom społeczeństwa, nie

tylko przez rozpoczęcie aktualizacji danych: ALS, NMT i NMPT, ale również wytworzenie nowych zbiorów danych, takich jak modele 3D budynków dla obszaru całego kraju oraz uruchomienie modułu 3D (jako rozwinięcia serwisu [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)) zapewniającego szerokie możliwości analiz oraz pracy z danymi wysokościowymi i modelami 3D przez portale internetowe.

Reasumując należy stwierdzić, iż przed społeczeństwem informacyjnym, jakim powoli się stajemy, tworząc, przetwarzając, upowszechniając i wykorzystując informację przestrzenną, pojawią się niebawem jeszcze większe możliwości, ale również wyzwania związane z umiejętnością efektywnego wykorzystania coraz większych, bardziej precyzyjnych zasobów przestrzennych danych 3D. Przy cyklicznym ich pozyskiwaniu i przetwarzaniu otwierają one przed nami całkowicie nowy wymiar, tj. przestrzeń 4D – dla pomiarów, monitorowania zmian, systemów ostrzegania, prowadzenia badań naukowych i efektywnego zarządzania środowiskiem, w którym żyjemy.

## Literatura

- Heritage G. (Ed.), Large A. (Ed.), 2009. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Renslow M. S., 2014. *Manual of Airborne Topographic LiDAR*. ASPRS. The Imaging & Geospatial Information Society, Maryland, USA.
- Shan J., Toth C. K., 2008. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

## Strony internetowe

- [www.airbornehydro.com](http://www.airbornehydro.com)  
[www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)  
[www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com)  
[www.phoenix-aerial.com](http://www.phoenix-aerial.com)  
[www.riegl.com](http://www.riegl.com)



## **Organizator szkolenia:**

### **Główny Urząd Geodezji i Kartografii**

ul. Wspólna 2  
00-926 Warszawa

Tel.: 22 661 80 17  
Faks: 22 629 18 67  
[www.gugik.gov.pl](http://www.gugik.gov.pl)

## **Wykonawca szkolenia:**

### **ProGea Consulting**

ul. Pachońskiego 9  
31-223 Kraków

Tel.: 12 415 06 41  
Faks: 12 415 73 27  
[www.progea.pl](http://www.progea.pl)

### **Esri Polska sp. z o.o.**

ul. Bonifraterska 17  
00-203 Warszawa

Tel.: 22 390 47 00  
[www.esri.pl](http://www.esri.pl)

### **OPGK w Krakowie sp. z o.o.**

ul. Grzegórzecka 10  
31-530 Kraków

Tel.: 12 421 09 83  
[www.opgk.krakow.pl](http://www.opgk.krakow.pl)

## **Egzemplarz bezpłatny**

**PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO  
W RAMACH PROGRAMU OPERACYJNEGO INNOWACYJNA GOSPODARKA**

**ISBN 978-83-254-2100-7**



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**

NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

**UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO**

