
Integracja wielosensorowych danych TLS i GPR dla trójwymiarowej rekonstrukcji form polodowcowych z wykorzystaniem AI

Julia Leszczyńska ¹, Maria Błońska ^{2,*}, Magdalena Idzikowska ³

Instytut Geodezji i Budownictwa, Katedra Geoinformacji i Kartografii
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn
julia.leszczynska.1@student.uwm.edu.pl ¹; magdalena.idzikowska@uwm.edu.pl ³
* Autor do korespondencji: maria.blonska@student.uwm.edu.pl²

Abstrakt: Obserwacje pochodzące z naziemnego skaningu laserowego (TLS) oraz bezinwazyjnych pomiarów georadarowych (GPR) są wykorzystywane nie tylko w badaniach geologicznych czy inwentaryzacjach infrastruktury podziemnej. Coraz częściej wskazane rozwiązania znajdują zastosowanie w inwestycjach drogowych, ochronie dziedzictwa kulturowego oraz analizach geoprzestrzennych związanych przykładowo ze złodowaceniami. Celem badań jest opracowanie koncepcji integracji danych pozyskanych z pomiarów TLS i GPR, a następnie trójwymiarowa rekonstrukcja jednej z form polodowcowych. Obiektem badań jest głąz narzutowy, zlokalizowany we wsi Tatary (powiat nidzicki, woj. warmińsko- mazurskie). Badania obejmują: pomiary terenowe, integrację hybrydowych zbiorów danych oraz wizualizację głązu narzutowego w wirtualnej płaszczyźnie trójwymiarowej. Uzyskane echogramy otrzymane z pomiarów GPR przefiltrowano z wykorzystaniem oprogramowania MALÅ Vision, a za pomocą sztucznej inteligencji wyznaczono położenie podziemnych punktów charakterystycznych, które mogą wskazywać na głębokość posadowienia głązu. Otrzymany model precyzyjnie odzwierciedla geometrię obiektu. Sztuczna inteligencja wykazała równomierne rozmieszczenie punktów charakterystycznych na głębokości powyżej 5 m. Pozostałe przeszkody zarejestrowane na mniejszych głębokościach świadczą o istniejących przeszkodach podziemnych takich jak otoczaki, korzenie drzew czy fragmenty podłoża skalnego. Otrzymane wyniki stanowią podstawę w analizach porównawczych metod inwazyjnych i bezinwazyjnych oraz innych kompleksowych analizach informacji powierzchniowych i podpowierzchniowych.

Słowa kluczowe: naziemny skaningu laserowy; georadar; AI; Kamień Tatarski

1. Wprowadzenie

Naziemny skaningu laserowy TLS to system pomiarowy, skanujący otoczenie za pomocą technologii LiDAR, umożliwiającej pomiar odległości i precyzyjnych pomiarów kątowych. Mechanizmy skanowania TLS umożliwiają przechwytywanie bardzo gęstych pomiarów w stosunkowo krótkim czasie [1]. Technologia TLS pozwala na szybkie pozyskanie szczegółowych danych w postaci chmury punktów o dokładności nawet 1 mm [2]. TLS to jedna z najczęściej stosowanych metod inwentaryzacji powykonawczych [3] [4]. Chmury punktów posiadają szerokie spektrum zastosowań – w archeologii [5], geodezji i budownictwie, medycynie, batymetrii, turystyce i leśnictwie.

Pierwsze sondowania gruntu z wykorzystaniem fal radiowych miały miejsce w latach 50 XX w. [6]. Radar penetrujący grunt GPR to bezinwazyjny system pomiarowy, dostarczający informacji o obecności, sposobie i głębokości usytuowania obiektów podziemnych. Antena nadawcza georadaru emituje impulsy elektromagnetyczne z określoną częstotliwością, która pada pionowo na każdą podziemną warstwę strukturalną [7]. Pomiary GPR można wykorzystać w budownictwie, górnictwie, geologii, hydroekologii, ochronie środowiska i archeologii. Integracja danych TLS i GPR cieszy się coraz większym zainteresowaniem chociażby w testach budowlanych i

drogowych [8] czy badaniach objętości i masy ciał lodowcowych [9], dlatego głównym celem niniejszej pracy jest opracowanie koncepcji integracji danych pozyskanych z pomiarów GPR i TLS, a następnie trójwymiarowa rekonstrukcja głazu narzutowego z wykorzystaniem rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji.

2. Obszar badań

Kamień Tatarski, będący przedmiotem badań to imponujący głaz narzutowy położony we wsi Tatary (woj. warmińsko-mazurskie, powiat nidzicki, gmina Nidzica) – Rys.1. Jest to pozostałość po czwartorzędowym lądolodzie ze Skandynawii, który wycofując się z terenów Polski pozostawił po sobie wiele form polodowcowych. Na skutek działań antropogenicznych, kształt głazu zmienił się i jest nieregularny. Dawniej, lokalna ludność wykorzystywała go jako źródło materiału do produkcji kamieni młyńskich. Nadziemna część tego przeobrażonego granitognejsu ma wymiary: 6.50 m długości, 4 m szerokości i 1.80 m wysokości. Głębokość posadowienia głazu nie została zbadana w żadnych dostępnych opracowaniach. Według ustawy o ochronie przyrody z 16 kwietnia 2004r. Kamień Tatarski został uznany za pomnik przyrody w zarządzie Nadleśnictwa Nidzica - Orzeczenie Prezydium Wojewódzkiej Rady Narodowej w Olsztynie R1b-16/66/52 z dnia 29.12.1952 r.



(a)

(b)

(c)

Rys. 1. Kamień Tatarski (a) historyczne zdjęcie z zasobów Poloniae Amici polska-org.pl; (b),(c) głaz narzutowy w trakcie inwentaryzacji.

3. Dane & Metodologia

3.1. Naziemny skaning laserowy (TLS)

Przed przystąpieniem do pomiarów przeprowadzono wizję terenową i sporządzono szkic rozmieszczenia stanowisk dla skanera oraz tarczki. Do pomiaru wykorzystano skaner impulsowy Leica ScanStation C10 – specyfikację techniczną zamieszczono w Tabeli nr 1.

Parametr	Leica ScanStation C10
Dokładność pojedynczego pomiaru położenie / odległość	6 mm / 4 mm
Dokładność pojedynczego pomiaru kąt poziomy / pionowy	12'' / 12''
Dokładność modelowanej powierzchni	2 mm
Zasięg	300 m przy 90% albedo; 134 m przy 18% albedo,
Minimalny odstęp punktów	1 mm
Szybkość skanowania	do 50,000 pkt/s

Klasa lasera	3R (IEC 60825-1)
Rozmiar plamki lasera	Od 0 – 50 m: 4.5 mm (kryterium FWHH)
Pole widzenia w pionie / w poziomie	270 °/ 360°

Tabela 1. Leica ScanStation C10

73

Pomiar TLS umożliwia precyzyjne odwzorowanie skanowanego obiektu. W badaniu głąz narzutowy został pomierzony z trzech stanowisk, uzupełnionych pomiarami GNSS Trimble R12i. Skaner rejestrował miliony punktów XYZ, tworząc przestrzenną reprezentację obiektu. Surowe dane zaimportowano do oprogramowania Leica Cyclone, gdzie je zintegrowano w jednolity model. Następnie w programie CloudCompare chmura punktów została oczyszczona z zakłóceń. Końcowy etap przeprowadzono w MeshLab, przekształcając chmurę punktów w jednolitą siatkę trójkątów. Wynikiem była dokładna rekonstrukcja głązu, pozwalająca na jego analizę i wizualizację.

74
75
76
77
78
79
80
81
82

3.2. Pomiary georadarowe (GPR)

83

Przed rozpoczęciem pomiarów wykonano szkic obszaru badań, uwzględniający trasy pomiarowe, co zapewniło spójne dane przestrzenne dla głązu narzutowego i jego otoczenia. Pozycje początkowe i końcowe tras wyznaczono za pomocą odbiornika GNSS Trimble R12i, który dzięki czujnikom IMU umożliwił precyzyjne pozycjonowanie nawet w trudnych warunkach. Do pomiarów zastosowano georadar IDS Detector Duo z antenami TR 250 MHz i TR 700 MHz. Przy pomocy aplikacji Detector-DuoFW rozpoczęto rejestrację echogramów. Dodatkowo wykonano pomiary kontrolne sondą inwazyjną dla sprawdzenia głębokości gruntu oraz zamierzono obrys głązu co 10 cm, uzyskując precyzyjną dokumentację badanego obiektu.

84
85
86
87
88
89
90
91
92

Parametr	IDS Ingegneria dei Sistemi Detector Duo
Częstotliwość anten	250MHz / 700MHz
Szybkość pomiaru	9 km/h
Szerokość pomiaru	0,5m
Interwał próbkowania	2,5 cm
System operacyjny	Windows 2000 Pro/ XP Pro

Tabela 2. IDS Ingegneria dei Sistemi Detector Duo

93

3.3. Przetwarzanie danych

94

Po zakończonych pomiarach GPR uzyskane wyniki zostały zaimportowane do oprogramowania Reflexw. W ramach wstępnej analizy dokonano przeglądu jakości danych. Oceniono widoczność odbić fal elektromagnetycznych oraz określono obecność i charakter zakłóceń w danych oraz szumy generowane przez otoczenie. Echogramy wyeksportowano do formatu (.rad i .rd3) i zaimportowano do platformy MalaVision, która dzięki narzędziom AI automatycznie wykryła markery wskazujące anomalie w strukturze gruntu. W celu poprawy jakości danych zastosowano filtry: DC Offset, AGC i Bg Removal, a także zmieniono kolorystykę echogramów dla lepszego kontrastu. Markery wyznaczone przez AI zostały wyeksportowane w formatach .dxf (odległość od punktu początkowego) i .csv (głębokość markerów). Dzięki trasom pomiarowym georadaru nadano markerom współrzędne płaskie. Aby dodać wysokość nad poziomem morza, wykorzystano Numeryczny Model Terenu (NMT). W QGIS za pomocą funkcji „Próbkowanie wartości rastra” określono wysokości punktów.

95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107

3.4. Integracja danych

108

Dzięki przeprowadzonym pomiarom uzyskaliśmy dwie chmury punktów. Pierwsza przy wykorzystaniu skanera Leica ScanStation C10 prezentuje odwzorowanie naziemnej części głązu. Druga chmura punktów uzyskana przy użyciu IDS DUO jest reprezentacją podziemnej części obiektu. Obie chmury punktów znajdują się w jednakowym układzie współrzędnych, co umożliwiło ich integrację, bez konieczności

109
110
111
112
113

przeprowadzania transformacji. Integracji oraz wizualizacji dokonano w 114
oprogramowaniu CloudCompare. Czynność ta pozwoliła na zobrazowanie głazu w 115
postaci naziemnej części jak i punktów reprezentujących część podziemną. 116

3.5. Implementacja danych z wykorzystaniem narzędzi GIS 117

3.5.1. ArcGIS Pro – mapa, szkic i analiza 118

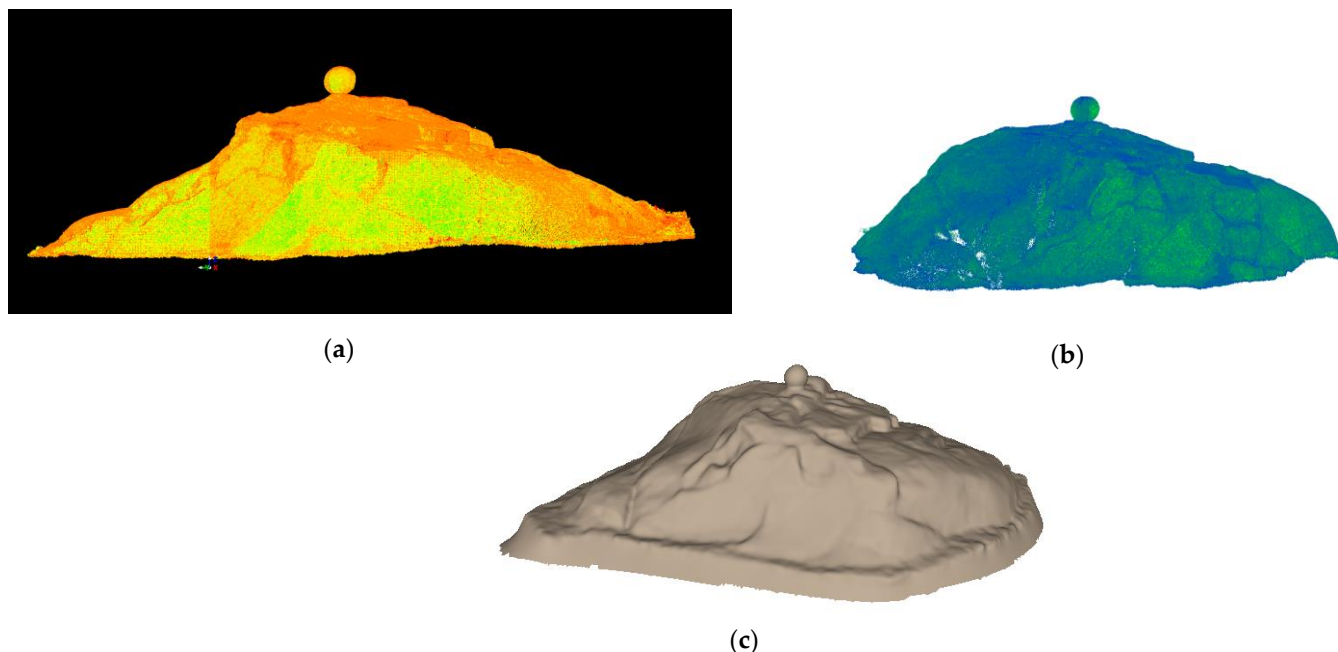
W oprogramowaniu ArcGIS Pro założono projekt i zaimportowano punkty obrysu 119
głazu, co umożliwiło stworzenie jego płaskiej reprezentacji na mapie. Dodano także 120
warstwę z trasami pomiarowymi georadaru, tworząc szkic pomiarowy. Do punktów 121
początkowych tras przypisano zdjęcia echogramów jako załączniki, co pozwoliło na 122
łatwą analizę wyników. Projekt udostępniono jako interaktywną mapę w MapViewer, 123
umożliwiając przeglądanie echogramów z markerami. Dzięki temu narzędziu można 124
analizować wyniki pomiarów georadarowych w kontekście geologicznym oraz 125
udostępnić je innym odbiorcom. 126

3.5.2. ArcGIS Pro – model 3D & dane ALS (Airborne Laser Scanning) 127

Do stworzenia trójwymiarowego modelu przestrzeni, w której znajduje się Kamień 128
Tatarski, pobrano chmurę punktów ALS z zasobów Centralnego Ośrodka Dokumentacji 129
Geodezyjnej i Kartograficznej. Przy użyciu narzędzia „Convert LAS” zdekompresowano 130
plik w formacie LAZ. Następnie przy użyciu „Import 3D Objects” zaimplementowano 131
model stworzony w MeshLab i wyświetlono w miejscu jego faktycznej lokalizacji. 132

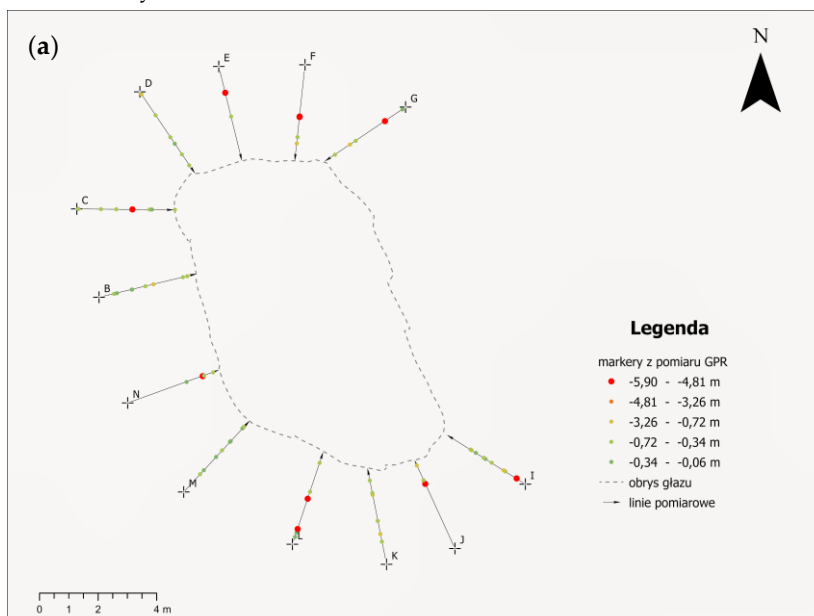
4. Wyniki 133

Po przeprowadzeniu pomiarów TLS, scaleniu skanów i przetworzeniu chmury 134
punktów otrzymano trójwymiarowe modele głazu narzutowego – Rys. 2. 135

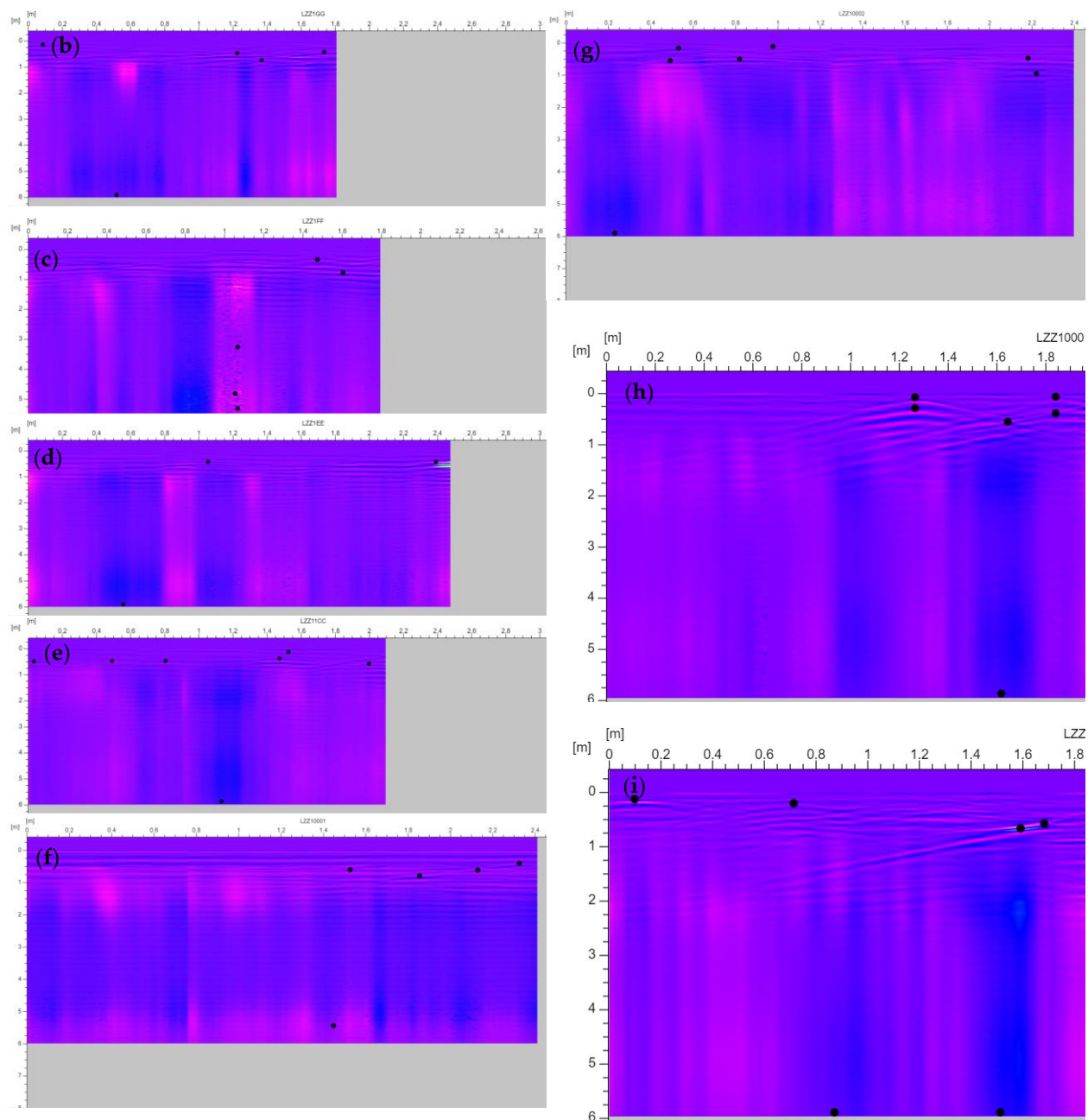


Rys. 2. Kamień Tatarski – modele powierzchni głazu na podstawie pomiaru TLS (a) opro- 136
gramowanie Leica Cyclone, (b) Cloud Compare, (c) MeshLab. 137

Pomiary GPR zostały przeprowadzone wzdłuż uprzednio zaprojektowanych tras. 138
Otrzymane echogramy zostały przefiltrowane i z wykorzystaniem narzędzi AI 139
przeprowadzono detekcję charakterystycznych markerów o zróżnicowanej głębokości 140
posadowienia – Rys. 3. 141



142

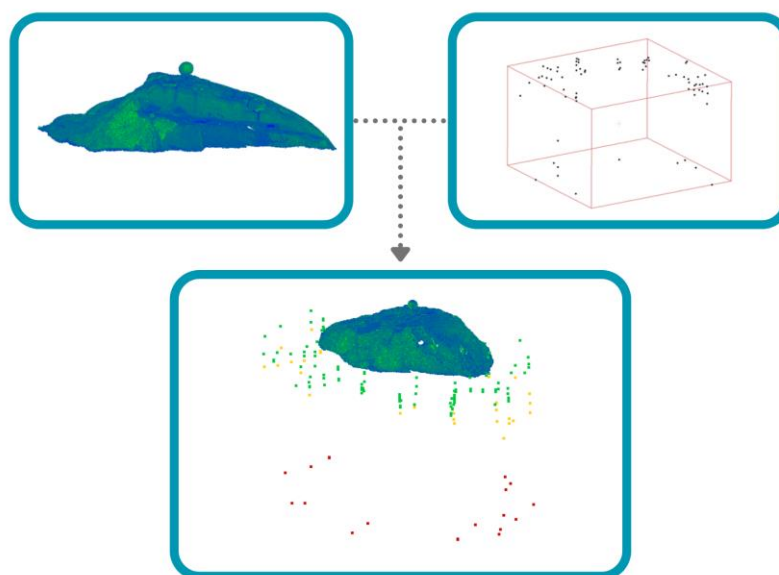


Rys. 3. Szkic tras pomiarowych GPR (a); echogramy i markery na wybranych profilach (b-i)

143
144

Na echogramach można zauważyć punkty zlokalizowane na głębokościach < 5 m. Pozostałe są zlokalizowane do 3-4 m pod powierzchnią gruntu. Po identyfikacji markerów i nadaniu im geolokalizacji zintegrowano je z modelami naziemnej części głazu – Rys. 4.

145
146
147
148



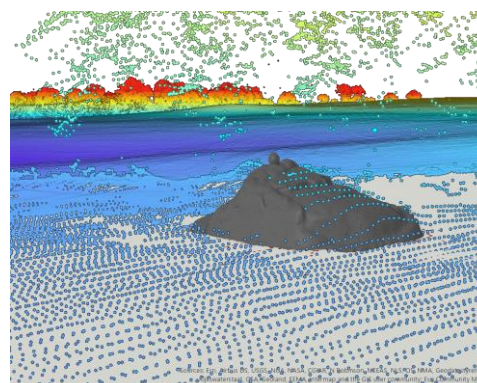
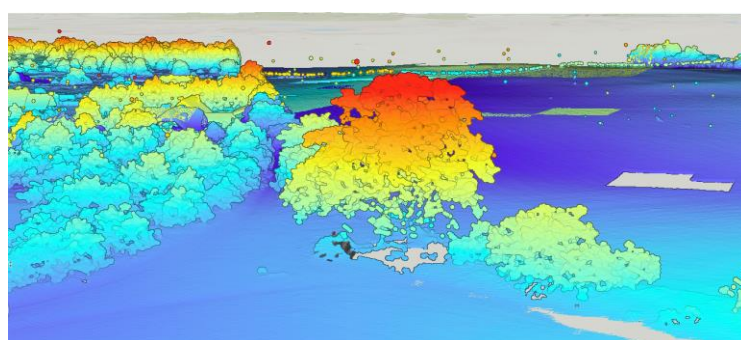
Rys. 4. Integracja wyników z pomiarów TLS i GPR.

149

Integracji poddano również chmurę punktów z pomiarów LIDAR oraz model nadziemny głazu – Rys. 5.

150

151



Rys.5. Trójwymiarowy model głazu w połączeniu z danymi LIDAR.

152

Produktem końcowym jest mapa interaktywna w aplikacji Map Viewer (dostępna online pod adresem: <https://storymaps.arcgis.com/stories/bc3cee538273447f9ac2927a4d93e642>), która umożliwia przegląd otrzymanych echogramów na pomierzonych punktach wokół głazu

153

154

155

156

5. Wnioski & dyskusja

157

Integracja danych z TLS i GPR umożliwia rekonstrukcję obiektów dziedzictwa historycznego i kulturowego. W badaniu analizowano formę polodowcową będącą atrakcją Warmii i Mazur, ukazując potencjał tej metody także dla bardziej złożonych obiektów, jak drogi i infrastruktura podziemna. Modele wiernie odwzorowują geometrię obiektu, a analiza AI ujawniła równomierne rozmieszczenie punktów na głębokości powyżej 5 m, wskazując na przeszkody podziemne, jak otoczaki czy korzenie, które wymagają dalszej weryfikacji. Badania te, o charakterze empirycznym, będą rozwijane przez Koło Naukowe Geodetów SCITUS. Otrzymane wyniki stanowią znaczący materiał dla badań geologicznych, podstawę do analiz porównawczych metod

158

159

160

161

162

163

164

165

166

inwazyjnych i bezinwazyjnych oraz istotne źródło danych dla kompleksowych analiz geoprzestrzennych. 167
168

Podziękowania: Autorzy dziękują dr. hab. inż. Kamilowi Kowalczykowi, prof. UWM za konstruktywne wsparcie badań i sprawowanie opieki nad działalnością Koła Naukowego Geodetów SCITUS. 169
170
171

Bibliografia 172

1. Liang, X.; Kankare, V.; Hyypää, J.; Wang, Y.; Kukko, A.; Haggrén, H.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F.; et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2016**, *115*, 63–77, doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006. 173
174
175
2. Janicka, J.; Rapinski, J.; Błaszczak-Bąk, W.; Suchocki, C. *Out-Of-Plane Displacements Determination Based on the Analysis of Point Clouds from TLS Using the M-Split Estimation*; 2020; 176
177
3. Błaszczak-Bąk, W.; Janicka, J.; Dumalski, A.; Masiero, A. INTEGRATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING AND SMARTPHONE LIDAR: THE CASE STUDY OF LIDZBARK CASTLE. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2023**, *XLVIII-1/W1-2023*, 51–56, doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-51-2023. 178
179
180
181
4. Błaszczak-Bąk, W.; Suchocki, C.; Kozakiewicz, T.; Janicka, J. Measurement methodology for surface defects inventory of building wall using smartphone with light detection and ranging sensor. *Measurement* **2023**, *219*, 113286, doi:10.1016/j.measurement.2023.113286. 182
183
184
5. Alby, E. *Point cloud vs drawing on archaeological site*; 2015; Vol. XL-5/W7, p. 11;. 185
6. Annan, A.P. Chapter 1 - Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*; Jol, H.M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, 2009; pp. 1–40 ISBN 978-0-444-53348-7. 186
187
7. Lu, Y. The Principle and Application of Ground Penetrating Radar in Highway Engineering. *Scientific Journal of Technology* **2024**, *6*, 95–101, doi:10.54691/pspx5543. 188
189
8. Zhang, D.; Wu, Z.; Shi, D.; Li, J.; Lu, Y. Integration of Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Ground Penetrating Radar (GPR) to Characterize the Three-Dimensional (3D) Geometry of the Maoyaba Segment of the Litang Fault, South-eastern Tibetan Plateau. *Remote Sensing* **2022**, *14*, doi:10.3390/rs14246394. 190
191
192
9. Colucci, R.R.; Forte, E.; Boccali, C.; Dossi, M.; Lanza, L.; Pipan, M.; Guglielmin, M. Evaluation of Internal Structure, Volume and Mass of Glacial Bodies by Integrated LiDAR and Ground Penetrating Radar Surveys: The Case Study of Canin Eastern Glacieret (Julian Alps, Italy). *Surveys in Geophysics* **2015**, *36*, 231–252, doi:10.1007/s10712-014-9311-1. 193
194
195
196