

Marcin Jaskulski*

orcid.org/0000-0002-7741-2594

Wiktoria Pachulska**

Rekonstrukcja przebiegu linii obronnych z kampanii wrześniowej 1939 r. w powiecie bełchatowskim z wykorzystaniem narzędzi geoinformacyjnych

Reconstruction of the Defense Lines from the September 1939 Campaign in Bełchatów County Using Geoinformatics Tools

Słowa kluczowe: kampania wrześniowa 1939, linie obrony, NMT, Numeryczny Model Terenu, detekcja umocnień, krajobraz militarny, dziedzictwo kulturowe regionu

Keywords: September 1939 Campaign, defense lines, DTM, Digital Terrain Model, fortification detection, military landscape, cultural heritage of the region

Wprowadzenie

Badania nad relikami militarnymi z okresu II wojny światowej zyskują coraz większe znaczenie w kontekście zarówno ochrony dziedzictwa kulturowego, jak i analizy przemian przestrzeni geograficznej [Franczak, Jucha 2015]. Jednym z istotnych zagadnień w tym zakresie jest identyfikacja i analiza rozmieszczenia dawnych linii obronnych, których materialne ślady wciąż są obecne w krajobrazie. Celem niniejszego opracowania jest lokalizacja oraz rekonstrukcja przebiegu linii obronnych Armii „Łódź” na obszarze powiatu bełchatowskiego (ryc. 1), z uwzględnieniem ich powiązań z uwarunkowaniami terenowymi. Zintegrowanie danych geoinformacyjnych z wiedzą historyczną i geomorfologiczną umożliwia przeprowadzenie analizy o dużym stopniu wiarygodności. Uzyskane wyniki stanowią nie tylko wkład w badania nad regionalną historią militarną, lecz także potwierdzają użyteczność narzędzi GIS w identyfikacji i dokumentowaniu relików konfliktów zbrojnych.

Introduction

Research on military relics from the Second World War is gaining increasing importance in the context of both cultural heritage protection and the analysis of geographical transformations [Franczak, Jucha 2015]. One of the key issues in this area is the identification and analysis of the locations of former defensive lines, whose material traces remain in the landscape. The aim of this study is to locate and reconstruct the course of the defensive lines of the “Łódź” Army in Bełchatów County (Fig. 1), taking into account their connections with terrain conditions. Integrating geoinformation data with historical and geomorphological knowledge enables a highly reliable analysis. The obtained results not only contribute to research on regional military history but also confirm the usefulness of GIS tools in identifying and documenting relics of armed conflicts.

The research utilized a Digital Terrain Model (DTM) and geoinformation tools enabling precise terrain analysis. This data allows for surface visualization

* dr, Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

** mgr, Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

* *Ph.D., University of Lodz, Faculty of Geographical Sciences, Institute of Urban Geography, Tourism Studies and Geoinformation*

** *M.Sc., University of Lodz, Faculty of Geographical Sciences, Institute of Urban Geography, Tourism Studies and Geoinformation*

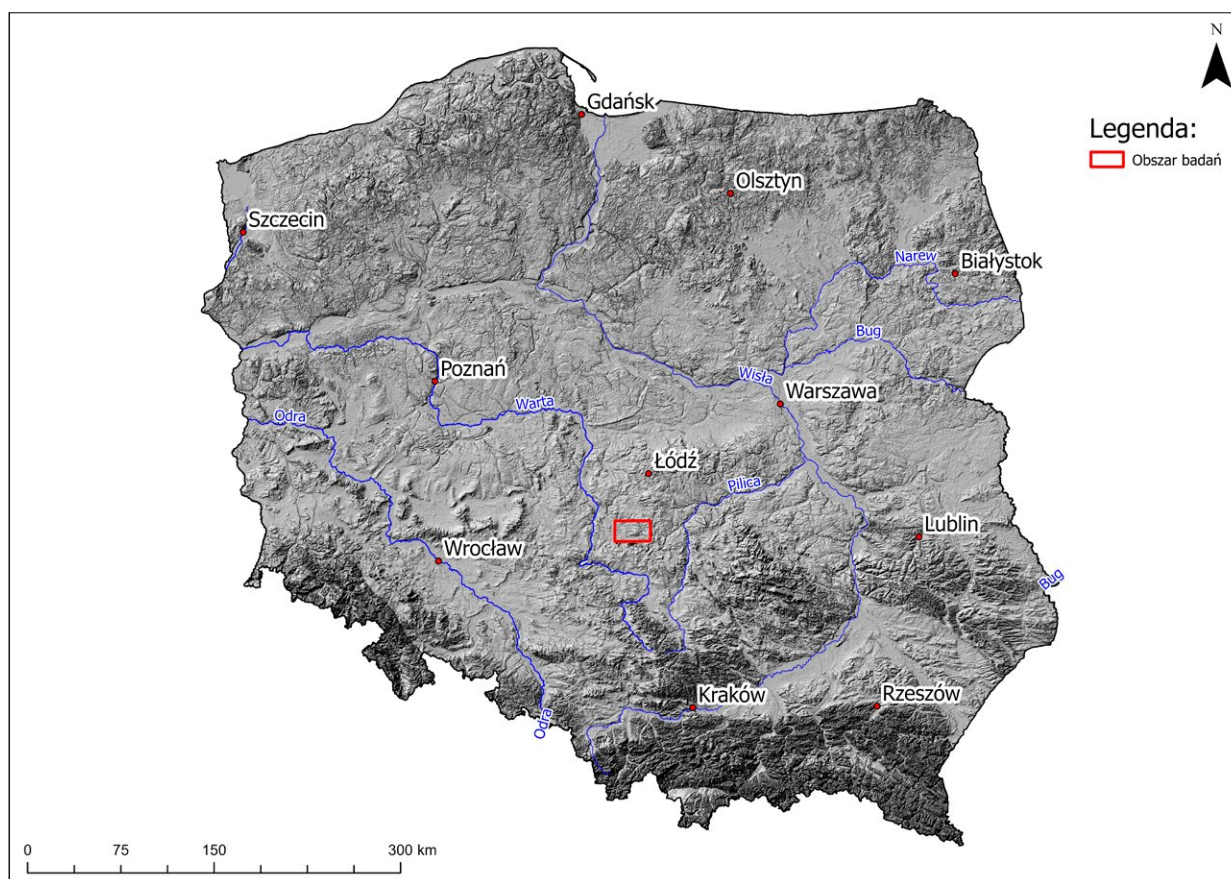
Cytowanie / Citation: Jaskulski M., Pachulska W. Reconstruction of the Defense Lines from the September 1939 Campaign in Bełchatów County Using Geoinformatics Tools. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2026, 85:140–157

Otrzymano / Received: 28.07.2025 • **Zaakceptowano / Accepted:** 6.02.2026

doi: 10.48234/WK85TOOLS

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews



Ryc. 1. Umieszczenie obszaru badań na terenie Polski; źródło: opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego – BDOT10k i NMT oraz podkładu mapowego Esri, 2025

Fig. 1. Location of the research area in Poland; source: prepared based on data from the National Geodetic and Cartographic Resource – BDOT10k and DTM, and Esri map base, 2025

W badaniach zastosowano Numeryczny Model Terenu (NMT) oraz narzędzia geoinformacyjne umożliwiające precyzyjną analizę rzeźby terenu. Dane te pozwalają na wizualizację powierzchni oraz identyfikację form terenowych takich jak okopy, rowy przeciwczołgowe, ziemianki i inne elementy umocnień polowych. W artykule zwrócono również uwagę na ukształtowanie terenu oraz obecność naturalnych barier – rzek, cieków wodnych i wydm – które mogły wspierać funkcję obronną w czasie kampanii wrześniowej 1939 r.

W okresie poprzedzającym wybuch II wojny światowej na terenie powiatu bełchatowskiego prowadzono intensywne prace fortyfikacyjne, stanowiące element szerszego systemu przygotowań obronnych II Rzeczypospolitej. Realizowano je w ramach linii obronnej opartej na dolinach Warty i Widawki, której zachowany odcinek liczy 104 km [Musiaka, Stasiak 2019]. Zagadnienia te wpisują się w tradycję badań nad krajobrazem obronnym i militarnym, opisywaną w polskiej literaturze m.in. przez prof. Janusza Bogdanowskiego, który podkreślał znaczenie relacji między formami fortyfikacyjnymi a uwarunkowaniami środowiska naturalnego i kulturowego [Bogdanowski 1993, 1996]. W ujęciu tym krajobraz warowny postrzegany jest jako dynamiczny układ przestrzenny,

and the identification of terrain features such as trenches, anti-tank ditches, dugouts, and other field fortifications. The article also highlights the terrain and the presence of natural barriers—rivers, watercourses, and dunes—that may have supported the defense function during the September Campaign of 1939.

In the period preceding the outbreak of the Second World War, intensive fortification work was carried out in Bełchatów County, as part of a broader system of defensive preparations of the Second Polish Republic. These works were carried out within a defensive line based on the Warta and Widawka river valleys, a preserved section of which is 104 km long [Musiaka, Stasiak 2019]. These issues are consistent with the tradition of research on defensive and military landscapes, described in Polish literature by, among others, Professor Janusz Bogdanowski, who emphasized the importance of the relationship between fortification forms and the conditions of the natural and cultural environment [Bogdanowski 1993, 1996]. In this approach, the fortified landscape is perceived as a dynamic spatial arrangement, shaped by both military needs and local terrain conditions.

Defense plans for the entire country were developed in February 1939, but large-scale earthworks

kształtowany zarówno przez potrzeby militarne, jak i lokalne warunki terenowe.

Plany obrony kraju, obejmujące obszar całej Polski, zaczęły powstawać już w lutym 1939 r., jednak prace ziemne i budowlane na szeroką skalę rozpoczęto dopiero pod koniec czerwca tego samego roku. Opóźnienia te wynikały przede wszystkim z niedoborów kadrowych i materiałowych oraz trudności logistycznych [Kozłowski 1981; Wesołowski 2006; Kuszneruk, Ciszewski 2011]. Zgodnie z ówczesnymi założeniami strategicznymi zasadniczym celem budowanych umocnień było spowolnienie marszu wojsk niemieckich i uzyskanie czasu na przegrupowanie sił własnych, zwłaszcza w razie zagrożenia ważnych ośrodków komunikacyjnych i administracyjnych, takich jak Piotrków Trybunalski i Łódź.

Niemieckie dowództwo wojskowe zdawało sobie sprawę z faktu, że Polska przygotowuje się do prowadzenia wojny obronnej, podejmowane działania nie były jednak przez nie postrzegane jako realne zagrożenie. Polskie umocnienia polowe oceniano jako rozwiązania prowizoryczne, realizowane z opóźnieniem i charakteryzujące się ograniczoną wartością bojową, co prowadziło do ich niedoceniań w niemieckim planowaniu operacyjnym [Wesołowski 2006]. Jednocześnie Niemcy uwzględniali polityczne zobowiązania innych państw. W marcu 1939 r. Anglia i Francja złożyły Polsce deklaracje, w których zobowiązywały się do udzielenia pomocy wojskowej w razie niemieckiego ataku. Niemieckie dowództwo nie uznawało jednak tych deklaracji za czynnik istotnie zmieniający równowagę sił, szczególnie w kontekście potencjalnego porozumienia ze Związkiem Radzieckim [Maier et al. 2015].

Analizowany obszar znajdował się w strefie operacyjnej Armii „Łódź”, której zadaniem było osłanianie zachodniej granicy państwa. Szczególne znaczenie strategiczne tego odcinka wynikało z niewielkiej odległości od granicy niemieckiej, przebiegającej zaledwie ok. 60 km na zachód, co stwarzało realne zagrożenie szybkiego i głębokiego uderzenia przez wojska przeciwnika [Bandurka 1974]. Tego rodzaju uwarunkowania sprzyjały tworzeniu improwizowanych, polowych systemów obronnych, typowych dla krajobrazu militarnego końca lat 30. XX w.

System umocnień, mimo swojego prowizorycznego i doraźnego charakteru, stanowił istotny element polskiej myśli obronnej. Na jego strukturę składały się przede wszystkim okopy strzeleckie, rowy przeciwczołgowe, stanowiska broni maszynowej oraz schrony bojowe wznoszone w szybkim tempie i z wykorzystaniem materiałów dostępnych lokalnie [Musiaka, Stasiak 2019]. Zbliżony charakter rozwiązań fortyfikacyjnych obserwowany jest również na innych odcinkach polowych umocnień z okresu II wojny światowej analizowanych przy użyciu nowoczesnych narzędzi badawczych, takich jak lotnicze skanowanie laserowe (ALS) czy archiwalne zdjęcia lotnicze [Jucha, Franczak, Sadowski 2021; Kastelik, Jucha, Rosiek 2013].

Istotną rolę w lokalizacji i przebiegu umocnień odgrywały warunki środowiska naturalnego. Piaszczyste

and construction did not begin until the end of June of the same year. These delays were primarily due to personnel and material shortages, and logistical difficulties [Kozłowski 1981; Wesołowski 2006; Kuszneruk, Ciszewski 2011]. According to the strategic assumptions of the time, the primary goal of the fortifications was to slow the advance of German troops and gain time to regroup their own forces, especially in the event of a threat to important communication and administrative centers such as Piotrków Trybunalski and Łódź.

The German military command was aware that Poland was preparing to wage a defensive war, but they did not perceive the actions taken as a real threat. Polish field fortifications were considered makeshift solutions, implemented with delays, and had limited combat value, leading to their underestimation in German operational planning [Wesołowski 2006]. At the same time, Germany took into account the political commitments of other countries. In March 1939, England and France submitted declarations to Poland, committing to provide military assistance in the event of a German attack. However, the German command did not consider these declarations to be a factor that would significantly change the balance of power, especially in the context of a potential agreement with the Soviet Union [Maier et al. 2015].

The analyzed area was located within the operational zone of the “Łódź” Army, tasked with protecting the country’s western border. The particular strategic importance of this section stemmed from its proximity to the German border, which lay only approximately 60 km to the west, posing a real threat of a rapid, deep attack by enemy forces [Bandurka 1974]. Such conditions favored the creation of improvised, field defense systems, typical of the military landscape of the late 1930s.

The fortification system, despite its makeshift and ad hoc nature, was a crucial element of Polish defense thought. Its structure consisted primarily of trenches, anti-tank ditches, machine-gun emplacements, and combat shelters, constructed rapidly with locally available materials [Musiaka, Stasiak 2019]. A similar nature of fortification solutions is also observed in other sections of field fortifications from the Second World War period, analyzed using modern research tools, such as airborne laser scanning (ALS) or archival aerial photos [Jucha, Franczak, Sadowski 2021; Kastelik, Jucha, Rosiek 2013].

Natural environmental conditions played a significant role in the location and layout of the fortifications. Sandy dunes facilitated rapid earthworks and concealed positions, while natural hydrographic barriers, particularly the Warta and Widawka rivers, constituted a crucial element of the defense system, potentially hindering enemy maneuvers. This use of the environment was consistent with the defense planning concepts of the 1930s, which assumed close integration of military operations with the ter-

wydmny sprzyjały szybkiemu wykonywaniu prac ziemnych i maskowaniu pozycji, zaś naturalne bariery hydrograficzne, w szczególności rzeki Warta i Widawka, stanowiły ważny element systemu obronnego, potencjalnie utrudniający manewry wojsk przeciwnika. Takie wykorzystanie środowiska było zgodne z obowiązującymi w latach 30. XX w. koncepcjami planowania obronnego, zakładającymi ścisłą integrację działań militarnych z ukształtowaniem terenu i istniejącymi elementami krajobrazu [Wojtaszek 2020; Kupiec, Olejniczak 2020].

Mimo istotnej roli umocnień w wojnie obronnej Polski w 1939 r. do chwili obecnej nie zachowała się dokumentacja dotycząca ich dokładnego przebiegu i lokalizacji; autorom nie jest również znana informacja, czy tego rodzaju dokumentacja kiedykolwiek istniała. Okoliczność ta podkreśla zasadność wykorzystania współczesnych metod analizy antropogenicznych form rzeźby terenu pochodzenia militarnego, które umożliwiają identyfikację relikwów fortyfikacji polowych oraz ich interpretację w szerszym kontekście historyczno-przestrzennym.

Upływ czasu nie doprowadził jednak do całkowitego zatarcia śladów tych struktur – część z nich pozostaje nadal czytelna w krajobrazie. Ich rozpoznanie i analiza mogą być prowadzone z zastosowaniem nowoczesnych narzędzi geoinformatycznych, takich jak teledetekcja, systemy informacji geograficznej (GIS) czy lotnicze skanowanie laserowe (LiDAR). Wykorzystanie tych metod umożliwia rekonstrukcję dawnych układów obronnych oraz ich zestawienie z danymi źródłowymi, co sprzyja bardziej kompleksowym badaniom przebiegu działań wojennych na analizowanym obszarze.

Materiały i metody

Dane LiDAR i Numeryczny Model Terenu

W badaniach zastosowano metody geoinformatyczne, umożliwiające analizę ukształtowania terenu oraz identyfikację potencjalnych umocnień wojskowych. W tym celu wykorzystano dane z 2023 r. udostępnione przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii na portalu Geoportal (<https://www.geoportal.gov.pl>, dostęp: 3.06.2025). Chmura punktów LiDAR powstaje na podstawie impulsów laserowych wysyłanych z samolotu lub bezzałogowego statku powietrznego (UAV). Technologia LiDAR (Light Detection and Ranging) polega na pomiarze czasu powrotu impulsu laserowego odbitego od powierzchni terenu lub obiektów znajdujących się na jego powierzchni. W wyniku tych pomiarów powstaje trójwymiarowa chmura punktów, zawierająca informacje o położeniu (X, Y, Z) każdego punktu, a często także o intensywności sygnału czy klasie odbicia (np. ziemia, roślinność, budynek) [Harrap, Lato 2010]. Dopiero na podstawie tych danych generowany jest Numeryczny Model Terenu (NMT) będący cyfrową reprezentacją modelu rzeźby powierzchni.

Precyzja pozyskanych danych odgrywa bardzo ważną rolę w rekonstrukcji struktur terenowych oraz modelowaniu historycznych linii obronnych. W niniejszym badaniu zastosowano kafelki opracowane na podstawie siatki punktów LiDAR o rozdzielczości 1×1 m,

rain and existing landscape features [Wojtaszek 2020; Kupiec, Olejniczak 2020].

Despite the significant role of the fortifications in Poland's defensive war of 1939, no documentation regarding their precise layout and location has survived to this day; nor do the authors know whether such documentation ever existed. This fact underscores the importance of using modern methods to analyze anthropogenic landforms of military origin, enabling the identification of relics of field fortifications and their interpretation within a broader historical and spatial context.

However, the passage of time has not completely erased the traces of these structures—some of them still remain visible in the landscape. Their identification and analysis can be conducted using modern geoinformatics tools such as remote sensing, geographic information systems (GIS), and airborne laser scanning (LiDAR). These methods enable the reconstruction of former defensive structures and their comparison with source data, facilitating more comprehensive research on the course of military operations in the analyzed area.

Materials and methods

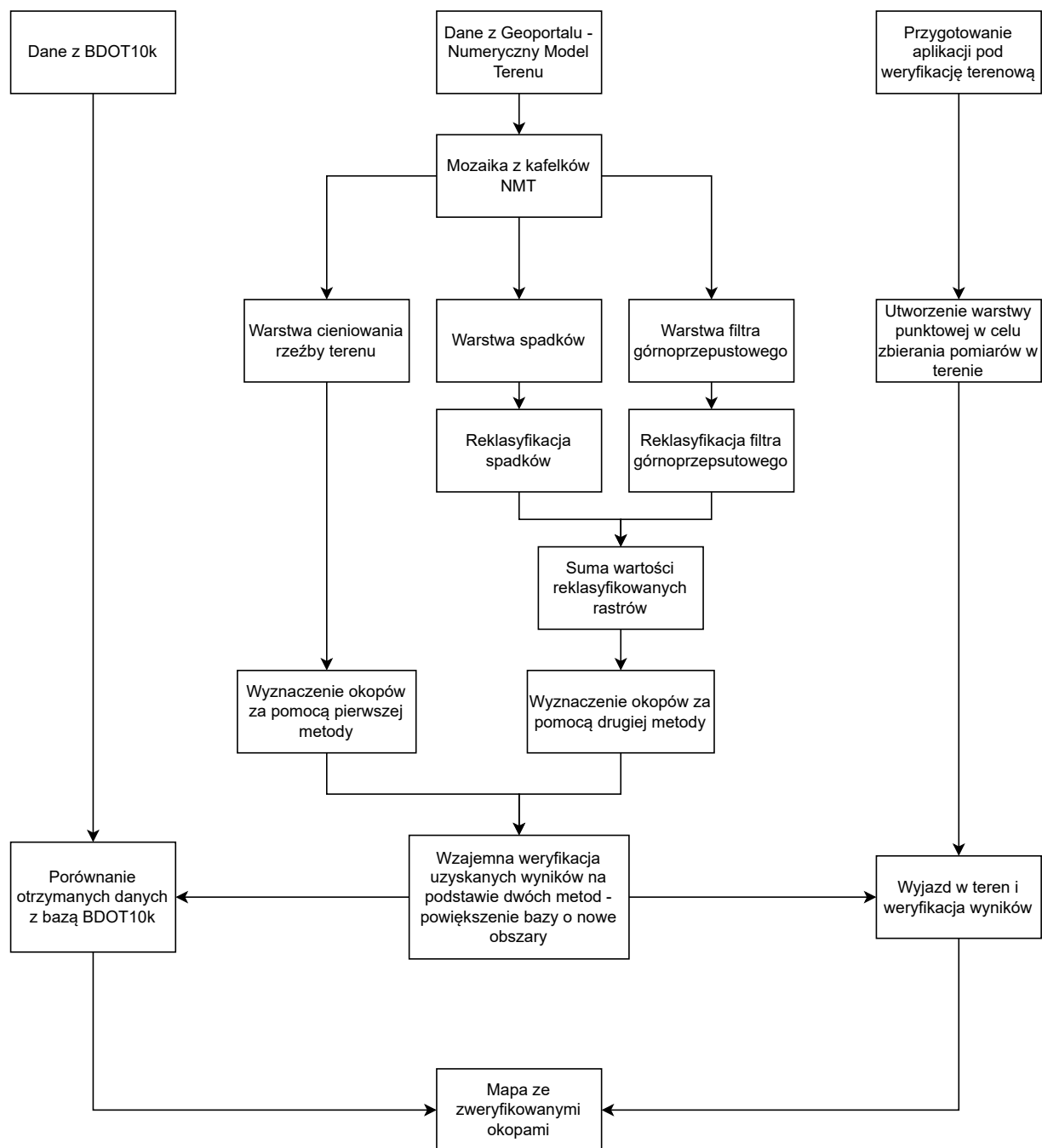
LiDAR Data and Digital Terrain Model

The study employed geoinformatics methods to analyze terrain and identify potential military fortifications. Data from 2023, made available by the Head Office of Geodesy and Cartography on the Geoportal portal (<https://www.geoportal.gov.pl>, accessed: June 3, 2025), were used for this purpose. A LiDAR point cloud is created based on laser pulses sent from an aircraft or unmanned aerial vehicle (UAV). LiDAR (Light Detection and Ranging) technology involves measuring the return time of a laser pulse reflected from the ground surface or objects on it. These measurements result in a three-dimensional point cloud containing information about the position (X, Y, Z) of each point, and often also about the signal intensity and reflectance class (e.g., ground, vegetation, building) [Harrap, Lato 2010]. Only then, based on this data, is a Digital Terrain Model (DTM) generated, which is a digital representation of the surface relief model.

The precision of the acquired data plays a crucial role in the reconstruction of terrain structures and the modeling of historical defense lines. This study utilized tiles derived from a 1×1 m LiDAR grid, which provides a high level of detail in the DTM and enables advanced morphometric analyses. An additional advantage of this method is its non-invasive nature, allowing for the study of extensive and difficult-to-access areas, such as forests, without the need to interfere with the terrain structure [Zapłata 2017].

Spatial analyses

Several spatial data processing techniques were employed to perform detailed morphometric analyses



Ryc. 2. Schemat badawczy obejmujący pozyskanie danych NMT, analizę morfometryczną GIS, operacje na rastrach oraz weryfikację terenową; źródło: opracowanie własne, 2026

Fig. 2. Research scheme including DTM data acquisition, GIS morphometric analysis, raster operations, and field verification; source: original work, 2026

co zapewnia wysoką szczegółowość NMT i umożliwia przeprowadzenie zaawansowanych analiz morfometrycznych. Dodatkową zaletą tej metody jest jej nieinwazyjność, co pozwala na badanie rozległych i trudno dostępnych obszarów, takich jak tereny leśne, bez konieczności ingerencji w strukturę terenu [Zapłata 2017].

Analizy przestrzenne

W celu przeprowadzenia szczegółowych analiz morfometrycznych oraz detekcji potencjalnych obiektów

and identify potential anthropogenic features (Fig. 2). One of the key techniques was terrain shading, which helped visualize surface features and detect anomalies that could suggest fortification relics. An equally important method was slope analysis, known as a slope map, which enabled the assessment of the terrain's defensive value and the identification of potential sites for military fortifications [Franczak, Jucha 2015; Zapłata 2017]. Additionally, a high-pass filter was used to remove global topographic trends and isolate local

antropogenicznych zastosowano szereg metod przetwarzania danych przestrzennych (ryc. 2). Jedną z najważniejszych technik było cieniowanie terenu, pozwalające na wizualizację ukształtowania powierzchni i identyfikację anomalii mogących wskazywać na relikty fortyfikacji. Równie ważnym narzędziem była analiza nachylenia stoków, określana jako mapa spadków, umożliwiająca ocenę walorów obronnych terenu oraz wskazanie potencjalnych lokalizacji umocnień wojskowych [Franczak, Jucha 2015; Zapłata 2017]. Dodatkowo zastosowano filtr górnoprzepustowy, którego celem było usunięcie globalnych trendów topograficznych i wyodrębnienie lokalnych anomalii morfologicznych. Technika ta, oparta na algorytmach filtracji częstotliwościowej, pozwala na uwypuklenie subtelnych form terenowych, które mogą świadczyć o antropogenicznych przekształceniach powierzchni, takich jak okopy, stanowiska strzelnicze czy ślady fortyfikacji [Hesse 2010]. Dzięki zastosowaniu tej metody możliwe było precyzyjne rozróżnienie naturalnych struktur geomorfologicznych od potencjalnych reliktyw historycznych, co czyni ją niezwykle użytecznym narzędziem w badaniach archeologicznych oraz analizach militarnych.

W ramach modyfikacji procedury badawczej autorzy zdecydowali się na integrację dwóch metod analizy danych przestrzennych. Pierwszym etapem było przeprowadzenie klasyfikacji na podstawie rastrowych map spadków terenu oraz wyników zastosowania filtra górnoprzepustowego, co pozwoliło na wydobywanie istotnych anomalii morfologicznych. Wartości rastra spadków zostały zreklasyfikowane do trzech klas: 0–2° przypisano wartość 1, 2–10° przypisano wartość 2, a 10–20° przypisano wartość 3. Podobną reklasyfikację zastosowano na warstwie rastrowej z wartościami filtra górnoprzepustowego. W tym wypadku wartości pikseli w przedziale od –1 do –0,6 otrzymały wartość 2, pikselom o wartościach od –3 do –2 nadano wartość 1, a pozostałe, o wartości 0, uznane zostały za nieistotne dla tej analizy. Następnie uzyskane wyniki klasyfikacji posłużyły do przeprowadzenia operacji algebraicznej sumowania na powstałych, reklasyfikowanych rastрах w narzędziu „Kalkulator rastrowy”, umożliwiając stworzenie zintegrowanej warstwy analitycznej (ryc. 3), zawierającej skumulowane informacje o cechach terenowych istotnych z perspektywy identyfikacji struktur antropogenicznych.

Weryfikacja terenowa

Do przeprowadzenia weryfikacji terenowej wykorzystano środowisko ArcGIS Online oraz aplikację mobilną ArcGIS Field Maps, która pozwala na pracę z danymi przestrzennymi w terenie. Pierwszym etapem było udostępnienie wyników analiz – z wcześniej przygotowanej warstwy wektorowej – w formie warstwy internetowej. Operację tę wykonano z poziomu programu ArcGIS Pro, korzystając z wbudowanej funkcji „Udostępnij jako warstwę internetową”. Dzięki temu możliwy był ich zdalny podgląd i dalsze wykorzystanie na urządzeniach mobilnych.

morphological anomalies. This technique, based on frequency filtering algorithms, highlights subtle terrain features that may indicate anthropogenic surface transformations, such as trenches, gun emplacements, or traces of fortifications [Hesse 2010]. Thanks to this method, it was possible to precisely distinguish natural geomorphological structures from potential historical relics, making it an extremely useful tool in archaeological research and military analyses.

As part of modifying the research procedure, the authors decided to integrate two spatial data analysis methods. The first stage was to perform classification using raster slope maps and the results of a high-pass filter, enabling the identification of significant morphological anomalies. The slope raster values were reclassified into three classes: 0–2° was assigned a value of 1, 2–10° was assigned a value of 2, and 10–20° was assigned a value of 3. A similar reclassification was applied to the raster layer with high-pass filter values. In this case, pixel values in the range of –1 to –0.6 were assigned a value of 2, pixels with values between –3 and –2 were assigned a value of 1, and the remaining pixels, with values of 0, were considered irrelevant for this analysis. Then, the obtained classification results were used to perform an algebraic summation on the reclassified rasters in the “Raster Calculator” tool, enabling the creation of an integrated analytical layer (Fig. 3) containing cumulative information on terrain features important for identifying anthropogenic structures.

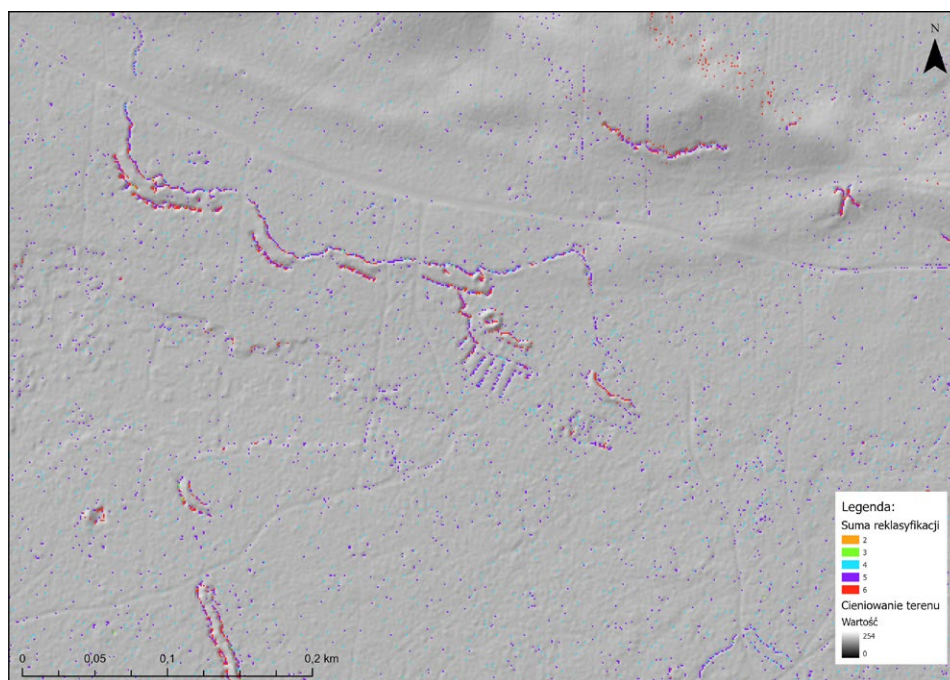
Field Verification

Field verification was performed using ArcGIS Online and the ArcGIS Field Maps mobile app, which allows for working with spatial data in the field. The first step was to share the analysis results—from a previously prepared vector layer—as a web layer. This operation was performed within ArcGIS Pro using the built-in “Share as Web Layer” function. This enabled remote viewing and further use on mobile devices.

Results

Comparison of Obtained Results with BDOT10k Data

Data from the Topographic Object Database (BDOT10k) played a significant role in verifying the results of the conducted analyses. This detailed vector database at a scale of 1:10,000 contains information on natural and anthropogenic structures, making it a valuable source of data for geoinformatics analyses. Due to its high quality and timeliness, BDOT10k is widely used in spatial research. In the research conducted, particular attention was paid to thematic layers related to the hydrographic network and transport infrastructure. Comparing this data with the results of morphometric analyses enabled rapid verification of the correct location of potential linear features. Importantly, no instances of overlap between the initially identified trench marks and road



Ryc. 3. Wynik sumy rekasyfikacji rastrów; źródło: opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego – BDOT10k i NMT, 2025

Fig. 3. Result of the sum of raster reclassification; source: original work based on data from the State Geodetic and Cartographic Resource – BDOT10k and DTM, 2025

Wyniki badań

Porównanie uzyskanych wyników z danymi BDOT10k

W procesie weryfikacji wyników przeprowadzonych analiz istotną rolę odegrało wykorzystanie danych z Bazy Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k). Jest to szczegółowa baza wektorowa w skali 1:10 000, zawierająca informacje o strukturach naturalnych i antropogenicznych, co czyni ją cennym źródłem danych do analiz geoinformatycznych. Ze względu na wysoką jakość oraz aktualność danych, BDOT10k jest szeroko wykorzystywana w badaniach przestrzennych. W ramach prowadzonych badań szczególną uwagę poświęcono warstwowi tematycznemu związanym z siecią hydrograficzną oraz infrastrukturą komunikacyjną. Zestawienie tych danych z wynikami analiz morfometrycznych umożliwiło szybką weryfikację poprawności lokalizacji potencjalnych obiektów o charakterze liniowym. Co istotne, w badanym obszarze nie stwierdzono przypadków nakładania się wstępnie zidentyfikowanych śladów okopów z elementami infrastruktury drogowej czy ciekami wodnymi.

Dokumentacja terenowa

Weryfikacja terenowa stanowiła kluczowy etap badań, pozwalający na konfrontację wyników analiz geoinformatycznych z rzeczywistym stanem zagospodarowania przestrzennego oraz formami terenowymi. W miejscach, w których analiza NMT wykazała występowanie potencjalnych struktur o charakterze obronnym,

infrastructure elements or watercourses were found in the study area.

Field Documentation

Field verification was a key stage of the research, enabling comparison of geoinformatics analysis results with the actual state of spatial development and terrain features. Site visits were conducted in locations where the DTM analysis indicated the presence of potential defensive structures. Their goal was to confirm the presence of earthen relics, such as trenches, embankments, and rifle ditches, as well as to assess their preservation and visibility in the landscape. Both anomalies with distinct morphological features and less distinct structures, whose interpretation based on the elevation model was ambiguous, were verified. Photographic documentation was prepared for each selected location, recording both the features themselves and their immediate surroundings. This documentation was performed concurrently with measurements of landmark locations—particularly the ends, bends, and forks of trench lines. A total of thirty-three measurement points were taken using ArcGIS Field Maps, where geographic coordinates were automatically recorded.

The first area where field measurements were conducted was the vicinity of the village of Faustynów and the edges of the Święte Ługi forest in the Żelów commune. Measurements were taken from east to west, ending on the western bank of the reservoir. At one of the points selected based on the results of DTM processing, clearly preserved fragments of former linear



Ryc. 4. Okopy: a) miejsce z rozdrożem okopów, b) płytkie okopy w okolicach młodnika i terenu porośniętego borowiną; źródło: opracowanie własne, 2025

Fig. 4. Trenches: a) place with a crossroads of trenches, b) shallow trenches in the vicinity of young forest and area covered with peat; source: original work, 2025

przeprowadzono wizje lokalne. Ich celem było potwierdzenie obecności reliktywów ziemnych, takich jak okopy, nasypy czy rowy strzeleckie, a także ocena ich stanu zachowania i widoczności w krajobrazie. Weryfikacji poddano zarówno anomalie o wyraźnych cechach morfologicznych, jak i struktury mniej wyraźne, których interpretacja na podstawie modelu wysokościowego była niejednoznaczna. Dla każdej z wybranych lokalizacji sporządzono dokumentację fotograficzną, rejestrującą zarówno same obiekty, jak i ich bezpośrednie otoczenie. Dokumentacja była wykonywana równolegle z pomiarami lokalizacji punktów charakterystycznych – w szczególności zakończeń, załamania i rozwidleń linii okopów. Łącznie wykonano 33 punkty pomiarowe przy użyciu aplikacji ArcGIS Field Maps, w których automatycznie rejestrowano współrzędne geograficzne.

Pierwszym z obszarów, na których prowadzono pomiary terenowe, były okolice miejscowości Faustynów oraz brzegi uroczyska Święte Ługi w gminie Żelów. Pomiary były wykonywane w kierunku ze wschodu na zachód, kończąc na zachodnim brzegu zbiornika wodnego. W jednym z punktów wytypowanych na podstawie wyników przetwarzania NMT natrafiono na wyraźnie zachowane fragmenty dawnych umocnień liniowych (ryc. 4a). Ich forma, przebieg oraz usytuowanie względem ukształtowania terenu jednoznacznie wskazywały na relikty okopów. Struktury te, choć

fortifications were discovered (Fig. 4a). Their form, course, and location relative to the terrain clearly indicated the relics of trenches. These structures, although in places obliterated by natural processes, still retained a clear outline characteristic of Second World War field fortifications. Their depth was shallow—no more than approximately 60 cm—and the outline sometimes proved difficult to discern due to natural erosion processes and vegetation growth. Nevertheless, the overall form retained continuity, allowing for the identification of their function in the field.

The next measurement point was located directly adjacent to a thicket and an area covered with peat. Dense, low vegetation significantly limited the area's visibility, making it difficult to identify potential defensive structures from a distance. Only a detailed field inspection in the immediate vicinity of the selected site allowed the identification of subtle trench relics, invisible from a distance. Their outline was difficult to discern, almost completely blending into the surrounding landscape because the structures' depth did not exceed 40–50 cm (Fig. 4b). An additional difficulty was the dense undergrowth, which masked the relics and visually flattened the terrain. Despite this, the presence of the structures was confirmed.

The most significant results were obtained from the measurements taken at the location closest to the forest site. This site proved particularly valuable for analysis,

miejskami zatarte przez naturalne procesy, zachowały nadal czytelny zarys, charakterystyczny dla fortyfikacji polowych z okresu II wojny światowej. Ich głębokość była niewielka – nie przekraczała ok. 60 cm, a zarys okazał się miejscami trudny do uchwycenia ze względu na naturalne procesy erozyjne oraz rozwój roślinności. Mimo to ogólna forma zachowała ciągłość, co pozwoliło na rozpoznanie jej funkcji w terenie.

Kolejny punkt pomiarowy znajdował się w bezpośrednim sąsiedztwie młodnika oraz obszaru porośniętego borowiną. Gęsta i niska roślinność znacznie ograniczała widoczność terenu, co utrudniało identyfikację potencjalnych struktur obronnych z większej odległości. Dopiero szczegółowa inspekcja terenowa w bezpośrednim sąsiedztwie wytypowanego miejsca umożliwiła rozpoznanie subtelnych reliktyw okopów, niewidocznych z dalszej perspektywy. Ich przebieg był słabo czytelny, niemal całkowicie wtopiony w otaczający krajobraz przez fakt, że głębokość struktur nie przekraczała 40–50 cm (ryc. 4b). Dodatkowym utrudnieniem było gęste runo leśne, które maskowało relikty i optycznie spłaszczało teren. Mimo to obecność struktur udało się potwierdzić.

Najbardziej wyraźne rezultaty przyniosły pomiary wykonane w lokalizacji położonej najbliżej uroczyska. Miejsce to okazało się szczególnie cenne z punktu widzenia analizy, ponieważ zidentyfikowane struktury obronne były najlepiej zachowane spośród wszystkich przebadanych punktów. Okopy miały wyraźnie zarysowane krawędzie, a ich głębokość osiągała ok. 90 cm, co stanowiło wartość znacząco wyższą niż w pozostałych przypadkach (ryc. 5). Uwagę zwracała także ich regularność oraz czytelny przebieg w terenie, co ułatwiało jednoznaczny identyfikację.

Co istotne, w ramach tego samego stanowiska udało się również zlokalizować i rozpoznać relikty stanowisk strzelniczych, rozmieszczonych wzdłuż linii głównych okopów. Ich układ i forma wskazywały na funkcjonalne powiązanie z linią obronną. Tak dobre zachowanie struktur w tym obszarze można przypisać mniejszemu stopniowi ingerencji człowieka oraz sprzyjającym warunkom środowiskowym, które ograniczyły procesy degradacyjne.

Inny obszar, w którym prowadzono pomiary terenowe, choć na pierwszy rzut oka może wydawać się niepozorny, ma istotne znaczenie historyczne. Zlokalizowany jest przy wjeździe do wsi Magdalenów w gminie Szczerców – miejsca, w którym w czasie kampanii wrześniowej 1939 r. doszło do zbrojnych starć pomiędzy oddziałami Wojska Polskiego a nacierającymi siłami niemieckimi [Zawilski 1989]. Obszar ten stanowi ważny punkt odniesienia nie tylko w kontekście analizy terenowej, lecz także jako świadectwo lokalnej pamięci historycznej.

Na terenie tym zachowały się wyraźne fragmenty okopów, potwierdzające wcześniejsze wskazania wynikające z analizy NMT. Ponadto na jego obszarze zlokalizowano schron bojowy (ryc. 6), który pełnił funkcję punktu oporu lub stanowiska obserwacyjnego.



Ryc. 5. Jeden z najlepiej zachowanych okopów w bliskości uroczyska Święte Ługi; źródło: opracowanie własne, 2025

Fig. 5. One of the best-preserved trenches near the Święte Ługi forest; source: original work, 2025

as the identified defensive structures were the best-preserved at all the surveyed sites. The trenches had clearly defined edges and reached a depth of approximately 90 cm, significantly greater than in the other cases (Fig. 5). Their regularity and clear course in the field also attracted attention, which facilitated unambiguous identification.

Importantly, at the same site, researchers also located and identified relics of gun emplacements located along the main trench lines. Their layout and form indicated a functional connection with the defensive line. The good preservation of structures in this area can be attributed to a lower degree of human interference and favorable environmental conditions, which have limited degradation processes.

Another area where field measurements were conducted, although seemingly inconspicuous at first glance, is of significant historical significance. It is located at the entrance to the village of Magdalenów in the Szczerców commune—the site of armed clashes between Polish Army units and advancing German forces during the September Campaign of 1939 [Zawilski 1989]. This area serves as an important reference point not only for field analysis but also as a testament to local historical memory.



Ryc. 6. Schron bojowy w pobliżu wsi Magdalenów; źródło: opracowanie własne, 2025

Fig. 6. Combat bunker near the village of Magdalenów; source: original work, 2025

Obecność tego obiektu znacząco podnosi wartość miejsca jako źródła informacji o przebiegu dawnych linii obronnych. W jego pobliżu znajduje się również kilka drewnianych krzyży, które świadczą o pamięci o poległych w tym miejscu żołnierzach.

Bezpośrednio przy drodze prowadzącej do Magdalenowa znajdują się również dwa pomniki – materialne ślady pamięci lokalnej społeczności o wydarzeniach, które miały tu miejsce w trakcie wojny oraz bezpośrednio po wojnie. Stanowią one istotne uzupełnienie dokumentacji terenowej, potwierdzając, że miejsce to wciąż funkcjonuje w zbiorowej świadomości mieszkańców jako przestrzeń o dużym znaczeniu historycznym.

Ostatnim obszarem objętym pomiarami terenowymi były okolice wsi Żar (ryc. 7), które wyróżniają się największą intensywnością i złożonością przebiegu struktur obronnych spośród wszystkich analizowanych lokalizacji. Sieć okopów w tym miejscu jest wyraźnie zagęszczona, a ich rozmieszczenie świadczy o przemyślanej organizacji przestrzeni obronnej, co może sugerować strategiczne znaczenie tego obszaru w systemie umocnień z września 1939 r.

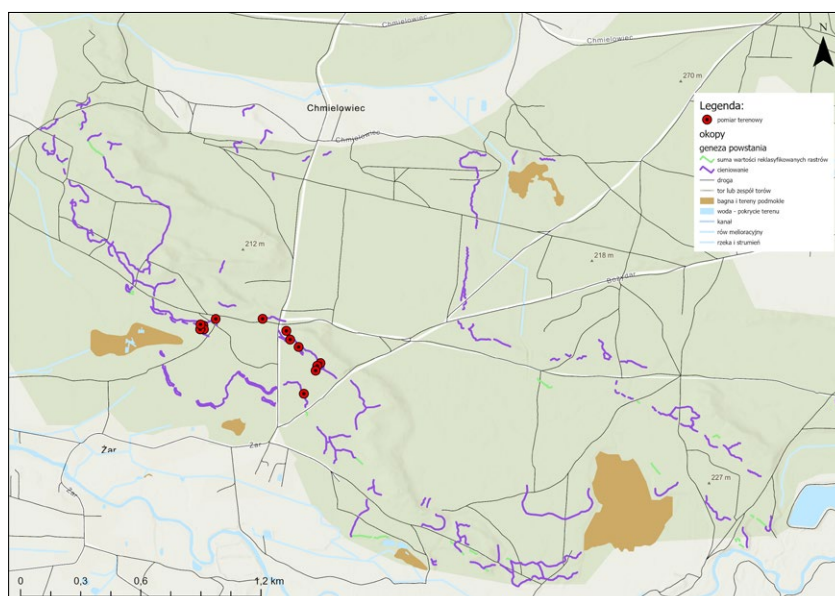
Różnorodność kierunków przebiegu linii okopów oraz występowanie przecinających się odcinków sugerują świadome dopasowanie układu umocnień do lokalnych uwarunkowań terenowych. Ukształtowanie powierzchni, stopień zalesienia oraz obecność elementów naturalnych, takich jak ciek wodny, a także bliskość dróg mogły istotnie wpłynąć na przebieg linii obronnych. Taki sposób rozmieszczenia struktur sprzyjał ich jednoznacznej identyfikacji w terenie – większość formacji była dobrze czytelna, co znacznie ułatwiało poruszanie się w terenie oraz potwierdzanie zgodności obserwacji z wynikami wcześniejszych analiz geoinformatycznych.

Clear fragments of trenches have been preserved in this area, confirming earlier indications from the DTM analysis. Additionally, a combat bunker (Fig. 6) was located within the area, serving as a point of resistance or observation post. The presence of this structure significantly enhances the site's value as a source of information about the former defensive lines. Several wooden crosses also stand nearby, commemorating the soldiers who died there.

Directly on the road leading to Magdalenów, there are also two monuments—tangible traces of the local community's memory of the events that took place here during and immediately after the war. They constitute a significant addition to the field documentation, confirming that this place still exists in the collective consciousness of the residents as a historically significant space.

The final area covered by field measurements was the area around the village of Żar (Fig. 7), which is distinguished by the greatest density and complexity of defensive structures of all the locations analyzed. The network of trenches here is clearly dense, and their arrangement indicates a carefully planned defensive space, which may suggest the strategic importance of this area in the fortification system of September 1939.

The variety of trench line directions and the presence of intersecting sections suggest a deliberate adaptation of the fortification system to local terrain conditions. The terrain, forest cover, and the presence of natural elements such as watercourses, as well as the proximity of roads, could have significantly influenced the defensive lines. This arrangement of structures facilitated their unambiguous identification in the field—most formations were clearly visible, which significantly aided navigation and confirmed the con-



Ryc. 7. Mapa obrazująca wykonane pomiary w okolicy wsi Żar; źródło: opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego – BDOT10k oraz podkładu mapowego Esri, 2025

Fig. 7. Map showing the measurements taken in the vicinity of the village of Żar; source: prepared based on data from the State Geodetic and Cartographic Resource – BDOT10k and Esri map base, 2025

Na szczególną uwagę zasługuje lokalizacja, w której – na podstawie układu terenu oraz charakterystycznych form zagłębień – można przypuszczać, że prowadzono przygotowania do budowy schronu. Wskazuje na to obecność rozległego zagłębienia o regularnych krawędziach, znacznie różniącego się od typowych linii okopów. Forma ta może świadczyć o rozpoczętych pracach ziemnych, przerwanych prawdopodobnie w wyniku zmiany sytuacji frontowej lub decyzji strategicznych. Choć brak zachowanych elementów konstrukcyjnych uniemożliwia jednoznaczną klasyfikację obiektu, jego morfologia oraz lokalizacja w obrębie rozbudowanej sieci okopów sugerują, że mógł on pełnić funkcję obiektu o większym znaczeniu strategicznym lub logistycznym. Poza wspomnianym szczególnym zagłębieniem, w bezpośrednim sąsiedztwie rozciągała się wyjątkowo dobrze zachowana sieć okopów, których głębokość w większości przypadków wynosiła ok. 80–90 cm. Układ ten charakteryzował się dużą spójnością oraz wyraźną czytelnością w terenie, co wskazuje na jego strategiczne znaczenie oraz staranność wykonania. Dobrze zachowane linie okopów (ryc. 8), często powiązane ze sobą krótkimi odcinkami poprzecznymi, sugerują, że mogło to być jedno z głównych miejsc przygotowań obronnych w tym rejonie.

Dyskusja uzyskanych wyników i wnioski

Wyniki

Na podstawie przeprowadzonych analiz geoinformacyjnych, w tym przede wszystkim z wykorzystaniem techniki cieniowania terenu, udało się zidentyfikować łącznie ok. 35,26 km potencjalnych linii okopowych.

sistency of observations with the results of previous geoinformatic analyses.

Particularly noteworthy is the location where—based on the terrain and characteristic depression shapes—preparations for the construction of a shelter were likely underway. This is indicated by the presence of a large depression with regular edges, significantly different from typical trench lines. This shape may indicate that earthworks had begun, likely interrupted by a change in the front situation or strategic decisions. Although the lack of preserved structural elements prevents a clear classification of the structure, its morphology and location within an extensive network of trenches suggest that it may have served a function of greater strategic or logistical importance. Beyond the aforementioned depression, a remarkably well-preserved network of trenches stretched out in the immediate vicinity, most of which were approximately 80–90 cm deep. This system was characterized by high cohesion and clear visibility in the field, indicating its strategic importance and meticulous construction. The well-preserved trench lines (Fig. 8), often interconnected by short cross-sections, suggest that this may have been one of the main defensive preparation sites in the area.

Discussion of the results, conclusions

Results

Based on the conducted geoinformatic analyses, primarily using terrain shading techniques, a total of approximately 35.26 km of potential trench lines were identified. Furthermore, the use of a complementary

Dodatkowo zastosowanie uzupełniającej metody analitycznej, polegającej na sumowaniu wartości re-klasyfikowanych rastrów – map spadków i wyników filtracji górnoprzepustowej – pozwoliło na wykrycie ok. 1,6 km dodatkowych fragmentów. Łącznie daje to wynik 36,86 km odwzorowanych i zarchiwizowanych linii okopów z II wojny światowej w powiecie bełchatowskim (ryc. 9). Uzyskane wyniki wskazują, że na badanym obszarze cieniowanie terenu okazało się najbardziej efektywnym narzędziem w detekcji reliktyw okopów na podstawie Numerycznych Modeli Terenu, natomiast metody oparte na reklasyfikacji i sumowaniu rastrów mogą pełnić jedynie funkcję uzupełniającą, zwiększając kompletność inwentaryzacji.

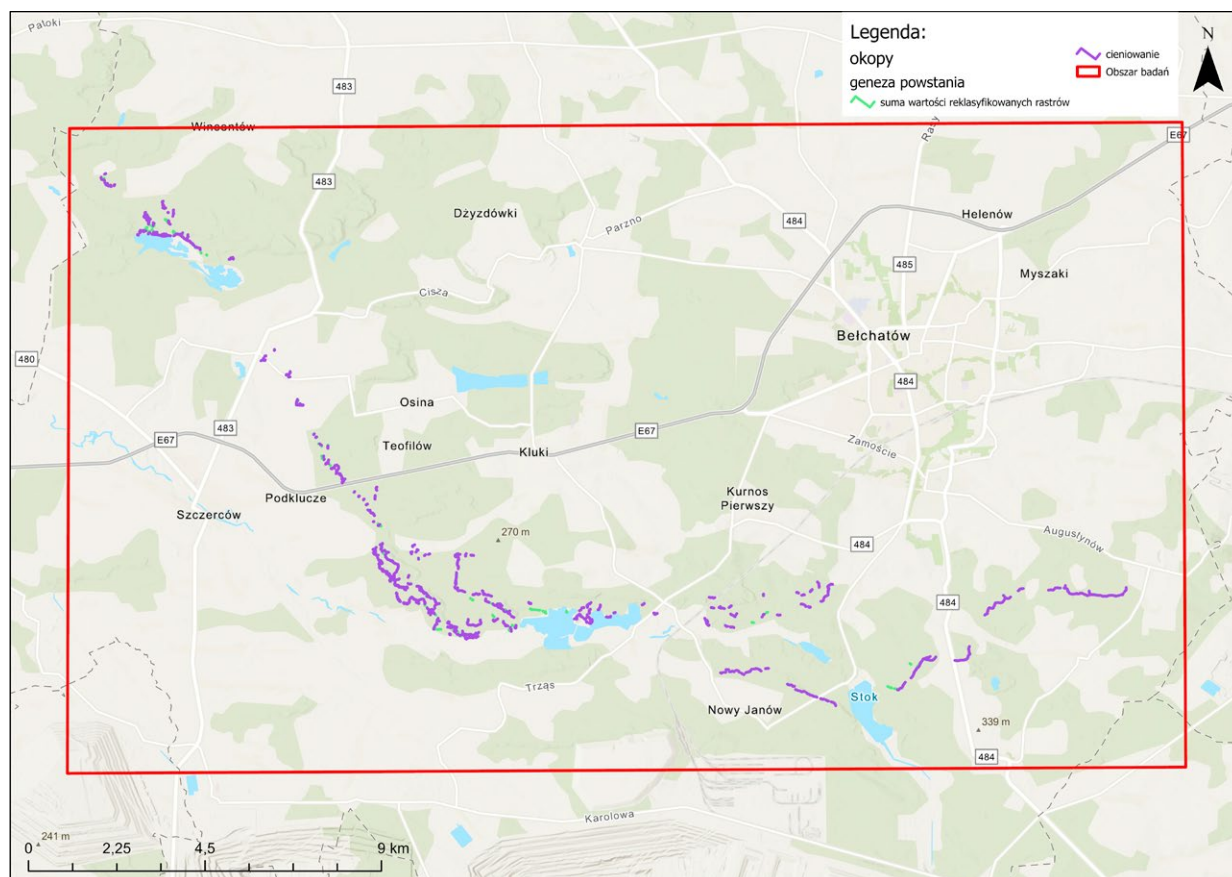
Obiekty militarne zyskują na znaczeniu w kontekście archeologicznym [Pawleta, Zapłata 2015; Zubalík 2020], stąd też zdigitalizowanie prawie 40 km linii okopów może okazać się użyteczne w celu wykonywania dalszych badań i analiz.

Choć wkład uzupełniającej metody analitycznej w ostateczny wynik był niewielki, należy podkreślić, że pełniła ona funkcję komplementarną wobec głównej techniki analitycznej. Dzięki temu udało się uzyskać pełniejszy obraz rozmieszczenia oraz charakterystyki potencjalnych linii obronnych, szczególnie w kontekście tzw. drugiej linii obrony w przededniu wybuchu wojny. Cieniowanie terenu okazało się szczególnie efektywne



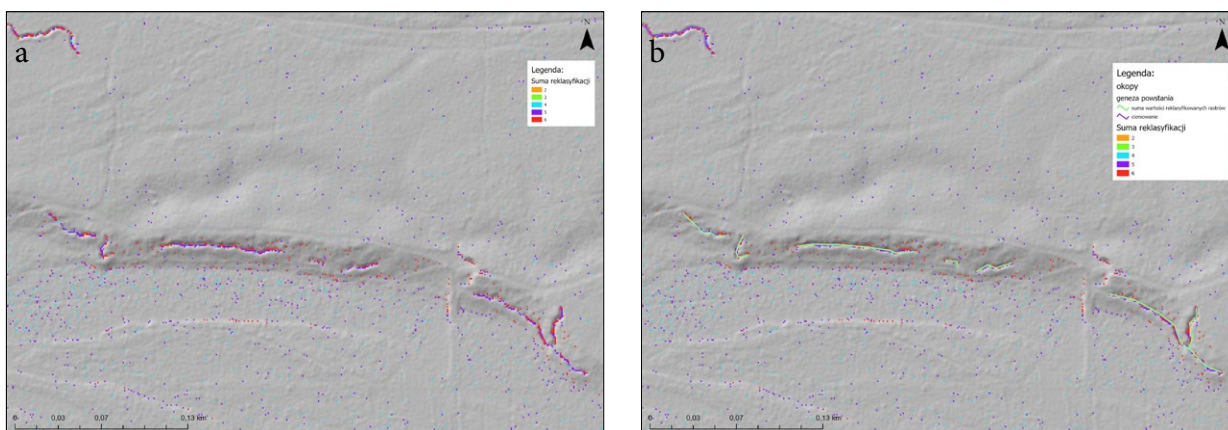
Ryc. 8. Bardzo dobrze zachowany fragment łamanej linii okopów; źródło: opracowanie własne, 2025

Fig. 8. A very well-preserved fragment of the broken trench line; source: original work, 2025



Ryc. 9. Zdigitalizowane linie okopów z II wojny światowej w powiecie bełchatowskim; źródło: opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego – NMT oraz podkład, 2025

Fig. 9. Digitized trench lines from the Second World War in Bełchatów County; source: prepared based on data from the State Geodetic and Cartographic Resource – DTM and base map, 2025



Ryc. 10. Przykład zastosowania i interpretacji opracowanej metody: a) stworzona warstwa rastrowa z połączonych metod spadków i filtra górnoprzepustowego, które zostały poddane rekasyfikacji, a następnie sumowaniu wartości rastrow; obszar znajduje się na zachód od Słupii; b) zaznaczone okopy na podstawie opisanej łączonej metody; źródło: opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego – NMT, 2025

Fig. 10. An example of the use and interpretation of the developed method: a) a raster layer created from the combined slope and high-pass filter methods, which were reclassified and then summed up by raster values; the area is located west of Słupia; b) trenches marked on the basis of the described combined method; source: original work based on data from the National Geodetic and Cartographic Resource – NMT, 2025

w obszarach leśnych o dobrze zachowanym reliefie, gdzie mikroformy terenowe takie jak pozostałości okopów były dobrze widoczne na tle otoczenia. W miejscach o mniejszej czytelności rzeźby, np. w wyniku zarośnięcia lub zatarcia struktur, zastosowanie dodatkowych metod przyniosło wymierne efekty, pozwalając na identyfikację mniej oczywistych form terenowych.

Uzyskany wynik łącznie 36,86 km zachowanych fragmentów linii obronnych wskazuje na dużą gęstość i rozległość sieci fortyfikacyjnej w badanym obszarze. Wyniki te stanowią istotną podstawę do dalszych analiz przestrzennych oraz interpretacji historyczno-wojskowych, a także do ewentualnej ochrony i popularyzacji zachowanych struktur jako świadectwa dziedzictwa kulturowego regionu.

Zastosowanie złożonych operacji rastrowych, takich jak suma wartości rekasyfikowanych z filtracji górnoprzepustowej oraz analiz spadków, umożliwiło wydobycie potencjalnych śladów antropogenicznych w krajobrazie, które mogłyby umknąć tradycyjnej analizie wizualnej NMT.

Na pierwszym zestawie ilustracji (ryc. 10), obrazującym obszar położony na zachód od Słupii, widoczne są efekty przetworzenia danych przestrzennych. Mapa w części (a) przedstawia wynikową mapę wartości, uzyskaną przez nałożenie i rekasyfikację rastrow. Z kolei część (b) zawiera interpretację graficzną w postaci wskazanych linii mogących odpowiadać okopom. Układ tych form ma charakter liniowy i zgodny jest z kierunkami terenu, co sugeruje możliwą adaptację fortyfikacji do lokalnych uwarunkowań topograficznych.

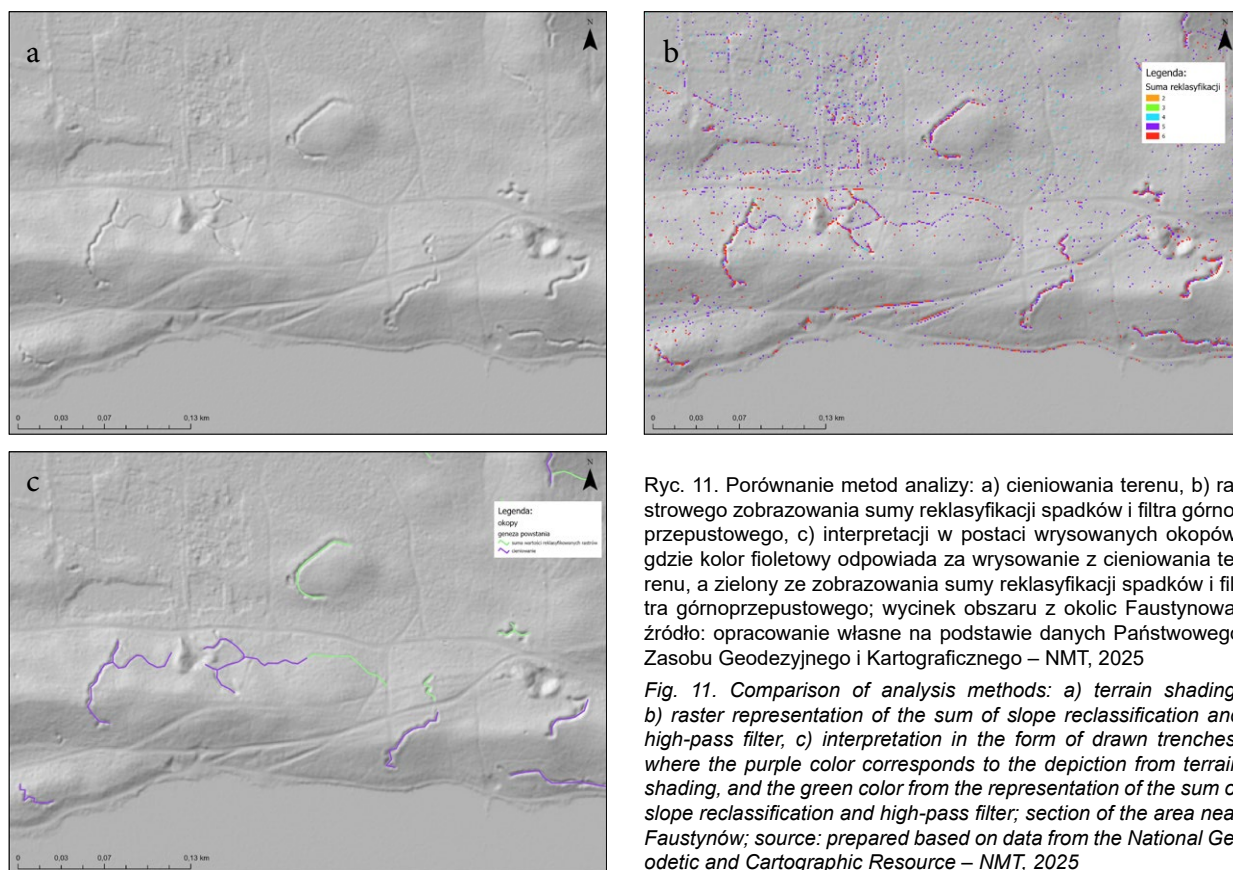
Następne porównanie przedstawia analogiczny zabieg przeprowadzony dla terenu położonego na południe od Faustynowa. W tym przypadku również widoczna jest zgodność między kierunkiem potencjalnych struktur a układem naturalnych przeszkód terenowych.

analytical method, which involved summing the values of reclassified rasters—slope maps and high-pass filtering results—allowed the detection of approximately 1.6 km of additional fragments. This totals 36.86 km of mapped and archived Second-World-War trench lines in Bełchatów County (Fig. 9). The obtained results indicate that in the study area, terrain shading proved to be the most effective tool in detecting trench relics based on Digital Terrain Models, while methods based on reclassification and raster summing can only serve a supplementary role, increasing the completeness of the inventory.

Military objects are gaining importance in the archaeological context [Pawleta, Zapłata 2015; Zubalik 2020]. Therefore, digitizing almost 40 km of trench lines may prove useful for further research and analysis.

Although the contribution of the supplementary analytical method to the final result was minor, it should be emphasized that it served a complementary function to the main analytical technique. This allowed us to obtain a more comprehensive picture of the layout and characteristics of potential defensive lines, especially in the context of the so-called second line of defense on the eve of the war. Terrain shading proved particularly effective in forested areas with well-preserved relief, where microforms of the terrain, such as trench remains, were clearly visible against the surrounding background. In areas with less pronounced relief, for example, due to overgrowth or obliteration of structures, the use of additional methods yielded measurable results, allowing the identification of less obvious terrain features.

The resulting total of 36.86 km of preserved fragments of defensive lines indicates the high density and extent of the fortification network in the study area. These results provide an important basis for further



Ryc. 11. Porównanie metod analizy: a) cieniowania terenu, b) rastrowego zobrazowania sumy rekasyfikacji spadków i filtra górno-przepustowego, c) interpretacji w postaci rysowanych okopów, gdzie kolor fioletowy odpowiada za rysowanie z cieniowania terenu, a zielony ze zobrazowania sumy rekasyfikacji spadków i filtra górno-przepustowego; wycinek obszaru z okolic Faustynowa; źródło: opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego – NMT, 2025

Fig. 11. Comparison of analysis methods: a) terrain shading, b) raster representation of the sum of slope reclassification and high-pass filter, c) interpretation in the form of drawn trenches, where the purple color corresponds to the depiction from terrain shading, and the green color from the representation of the sum of slope reclassification and high-pass filter; section of the area near Faustynów; source: prepared based on data from the National Geodetic and Cartographic Resource – NMT, 2025

Obie ryciny pokazują, że metoda ta może służyć nie tylko jako narzędzie pomocnicze, ale też jako niezależne źródło informacji o rozmieszczeniu form terenowych mogących odpowiadać liniom obronnym. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest wykrywanie obiektów również w obszarach mniej jednoznacznych, np. porośniętych roślinnością lub zniwelowanych w wyniku działalności człowieka.

Porównanie wyników uzyskanych przy użyciu trzech niezależnych metod uwidacznia różnice w precyzji oraz zakresie wykrywania struktur terenowych o potencjalnym znaczeniu militarnym (ryc. 11). W pierwszym ujęciu (a) cieniowanie eksponuje subtelne zakłócenia w rzeźbie terenu, które mogą odpowiadać liniom okopów, jednak ich interpretacja pozostaje w dużej mierze uznaniowa i zależna od doświadczenia analityka. Z kolei drugie podejście (b) ukazuje znacznie gęstszy zbiór punktów i odcinków, co wynika z nakładania się rezultatów różnych kryteriów topograficznych. Choć metoda ta zwiększa liczbę potencjalnych wskazań, może prowadzić również do występowania wyników fałszywie pozytywnych. Najważniejszym elementem zestawienia jest ilustracja, w której zestawiono ze sobą końcowe wyniki identyfikacji (c): linie oznaczone kolorem fioletowym odpowiadają formom zgodnym z interpretacją z klasycznego cieniowania, natomiast linie zielone reprezentują wyniki unikalne dla metody opartej na sumie rekasyfikacji. Współwystępowanie części odcinków w obu zbiorach (nakładające się kolory) świadczy

spatial analyses and historical-military interpretations, as well as for the potential protection and promotion of preserved structures as a testament to the region's cultural heritage.

The use of complex raster operations, such as the sum of reclassified values from high-pass filtering and slope analysis, enabled the discovery of potential anthropogenic traces in the landscape that might otherwise escape traditional visual analysis using a DTM.

The first set of illustrations (Fig. 10), depicting the area west of Słupia, shows the effects of spatial data processing. Part (a) of the map shows the resulting value map, obtained by overlaying and reclassifying the rasters. Part (b) provides a graphical interpretation in the form of indicated lines that may correspond to trenches. The arrangement of these forms is linear and follows the terrain, suggesting the possible adaptation of the fortifications to local topographic conditions.

The next comparison shows a similar procedure performed for the area south of Faustynów. In this case, there is also a clear correspondence between the orientation of potential structures and the arrangement of natural obstacles.

Both figures demonstrate that this method can serve not only as an auxiliary tool but also as an independent source of information on the distribution of terrain features that may correspond to defensive lines. This approach enables the detection of objects even in less clear-cut areas, such as those covered with vegetation or leveled by human activity.

o dużym stopniu zgodności i wzajemnym potwierdzaniu się form, natomiast różnice wskazują na komplementarność obu metod.

Zestawienie to pokazuje, że połączenie klasycznych oraz bardziej złożonych metod analizy rastrowej pozwala nie tylko zwiększyć trafność detekcji, ale też podnieść ogólną wiarygodność wyników.

Określenie stopnia przetrwania pierwotnych form

Działalność człowieka miała znaczący wpływ na stan zachowania dawnych struktur obronnych z okresu II wojny światowej w powiecie bełchatowskim. Przeprowadzone analizy przestrzenne pozwalają wskazać kilka głównych obszarów, w których ingerencja antropogeniczna przyczyniła się do zmian w krajobrazie, a w konsekwencji do zatarcia lub trwałego zniszczenia niektórych elementów dawnej linii obrony. Jednym z najważniejszych czynników wpływających na przekształcanie przestrzeni była rozbudowa infrastruktury, zarówno drogowej, jak i mieszkaniowej. Szczególnie w rejonach wsi i mniejszych miejscowości obserwuje się systematyczne przekształcanie terenów, które przed dekadami mogły stanowić miejsce lokalizacji ziemnych umocnień. Nowe inwestycje drogowe, poszerzanie istniejących ciągów komunikacyjnych czy wznoszenie zabudowy jednorodzinnej bardzo często wiążą się z niwelacją terenu i całkowitym zatarciem jego pierwotnego reliefu. W wielu przypadkach identyfikacja dawnych okopów nie jest już możliwa, ponieważ teren został wyrównany lub przykryty warstwami nowego gruntu, asfaltu czy betonu.

Istotnym czynnikiem wpływającym na układ rzeźby terenu była również działalność Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów. Eksploatacja odkrywkowa prowadzona w skali przemysłowej doprowadziła do zasadniczego przekształcenia znacznych obszarów powiatu [Jaskulski, Nowak 2019] – nie tylko samej nieckiej wyrobiska, lecz także terenów bezpośrednio przylegających, które poddano rekultywacji lub przekształcono w związku z obsługą techniczną kopalni. W efekcie wiele dawnych struktur obronnych, które mogły znajdować się w tym rejonie, uległo bezpowrotnemu zniszczeniu. Zmiany wysokościowe, modyfikacje cieków wodnych i całkowite przesunięcia granic morfologicznych uniemożliwiają dziś nie tylko ich identyfikację w terenie, ale również próbę cyfrowej rekonstrukcji na podstawie dostępnych modeli wysokościowych.

Trzecią, nie mniej ważną kategorią oddziaływań jest bieżące użytkowanie gruntów oraz zmiany związane z działalnością gospodarczą mieszkańców. W szczególności dotyczy to terenów ornych oraz obszarów wykorzystywanych w gospodarce leśnej. Głęboka orka, przygotowanie terenu pod nowe nasadzenia, niwelacje gruntu czy prace związane z usuwaniem podszytu mogą prowadzić do sukcesywnego zacierania mikroform terenu. Często są to procesy trudne do uchwycenia w krótkiej perspektywie czasowej, jednak ich dłu-

A comparison of the results obtained using the three independent methods highlights differences in the precision and range of detection of terrain features of potential military significance (Fig. 11). In the first approach (a), shading highlights subtle distortions in the terrain, which may correspond to trench lines, but their interpretation remains largely discretionary and dependent on the analyst's experience. In the second approach (b), on the other hand, a much denser set of points and segments results from the overlapping results of various topographic criteria. Although this method increases the number of potential indications, it can also lead to false positives. The most important element of the comparison is illustration (c), which compares the final identification results: purple lines correspond to forms consistent with the interpretation from classical shading, while green lines represent results unique to the method based on the sum of reclassifications. The co-occurrence of some segments in both sets (overlapping colors) indicates a high degree of agreement and mutual confirmation of the forms, while differences indicate the complementarity of the two methods.

This comparison demonstrates that combining classical and more complex raster analysis methods not only improves detection accuracy but also enhances the overall reliability of the results.

Determining the degree of survival of original forms

Human activity has had a significant impact on the state of preservation of former Second-World-War defensive structures in Bełchatów County. Spatial analyses conducted allow us to identify several main areas where anthropogenic interference contributed to changes in the landscape, and consequently to the obliteration or permanent destruction of certain elements of the former defense line. One of the most important factors influencing the transformation of the landscape was the expansion of infrastructure, both road and residential. Particularly in rural areas and smaller towns, systematic transformation of areas that decades ago could have been the location of earthen fortifications is observed. New road investments, the widening of existing communication routes, and the construction of single-family houses very often involve leveling the terrain and completely erasing its original relief. In many cases, identifying former trenches is no longer possible, as the terrain has been leveled or covered with layers of new soil, asphalt, or concrete.

The operation of the Bełchatów Lignite Mine was also a significant factor influencing the terrain. Industrial-scale open-pit mining led to the fundamental transformation of significant areas of the district [Jaskulski, Nowak 2019]—not only the pit basin itself, but also the immediately adjacent areas, which were reclaimed or transformed due to the mine's technical maintenance. As a result, many former defensive structures that may have been located in this area were irreversibly destroyed. Elevation changes, modifications to watercourses, and complete shifts in morphological

gofalowy wpływ na zachowanie dawnych struktur jest wyraźny. W wielu przypadkach pozostałości okopów są już dziś na tyle płytkie, że nawet wysokorozdzielczy NMT nie pozwala na ich skuteczną detekcję.

Warto jednak zauważyć, że nie każda ingerencja człowieka musi nieść ze sobą wyłącznie negatywne skutki dla stanu zachowania struktur obronnych. W wypadku rozległych kompleksów leśnych obserwuje się względnie dobry stan zachowania dawnych linii okopów. Ograniczony dostęp do niektórych obszarów, choćby ze względu na wspomnianą wcześniej obecność rezerwatu przyrody, a także brak presji inwestycyjnej czy rolniczej sprzyjały przetrwaniu opisywanych form jedynie nieznacznie zmienionych czy naruszonych. Lasy pokrywające analizowane obszary przyczyniły się do zachowania dawnych struktur, chroniąc je zarówno przed naturalnymi procesami erozyjnymi, jak i przed przekształceniami antropogenicznymi. Dzięki temu możliwa była ich skuteczna identyfikacja zarówno w terenie, jak i na podstawie danych uzyskanych z przetworzenia modelu wysokościowego.

Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania dowiodły, że nowoczesne metody geoinformacyjne, oparte na danych LiDAR i wysokorozdzielczych modelach NMT, stanowią skuteczne narzędzie do detekcji i dokumentacji dawnych struktur obronnych. W oparciu o analizy wykonane w środowisku ArcGIS Pro oraz aplikacji ArcGIS Field Maps udało się zidentyfikować i odwzorować łącznie prawie 37 km linii okopów z okresu kampanii wrześniowej 1939 r. To znaczący wynik, szczególnie biorąc pod uwagę częściowe przekształcenie analizowanego obszaru przez współczesną działalność człowieka.

Badanie wyraźnie pokazuje, że choć podstawowym narzędziem identyfikacji była klasyczna analiza cieniowania terenu, to zastosowanie uzupełniającej metody rastrowej przyczyniło się do zwiększenia zakresu detekcji, szczególnie w trudno dostępnych i silnie zarośniętych fragmentach terenu. Połączenie obu metod pozwoliło nie tylko zwiększyć precyzję, ale również wzajemnie zweryfikować i potwierdzić wyniki.

Warto podkreślić, że Numeryczny Model Terenu o rozdzielczości 1×1 m, powstały na podstawie danych LiDAR, okazał się wyjątkowo skutecznym narzędziem teledetekcyjnym. Jego precyzja umożliwiła nieinwazyjne rozpoznanie reliktywów nawet w zalesionych i trudno dostępnych miejscach, a także pozwoliła na odróżnienie subtelnych form antropogenicznych od naturalnych mikroform terenu. Zastosowanie danych LiDAR okazało się szczególnie przydatne tam, gdzie działalność człowieka znacząco zmieniła układ rzeźby – umożliwiając w niektórych przypadkach rekonstrukcję dawnych linii obronnych mimo współczesnych zmian w ich otoczeniu.

boundaries make it impossible not only to identify them in the field but also to attempt digital reconstruction based on available elevation models.

A third, equally important category of impacts is current land use and changes related to the economic activities of residents. This particularly applies to arable land and areas used for forestry. Deep plowing, land preparation for new plantings, ground leveling, or undergrowth removal can lead to the gradual obliteration of microforms. These processes are often difficult to capture in the short term, but their long-term impact on the preservation of ancient structures is clear. In many cases, the remains of trenches are already so shallow that even high-resolution DTMs (Digital Metalurgy) cannot effectively detect them.

It is worth noting, however, that not every human intervention has to have only negative consequences for the state of preservation of defensive structures. In the case of extensive forest complexes, relatively good preservation of former trench lines is observed. Limited access to some areas, due to the aforementioned presence of a nature reserve, as well as the lack of investment or agricultural pressure, favored the survival of the described forms, which were only slightly altered or disturbed. The forests covering the analyzed areas contributed to the preservation of ancient structures, protecting them from both natural erosion processes and anthropogenic transformations. Thanks to this, it was possible to effectively identify them both in the field and on the basis of data obtained from processing the elevation model.

Final conclusions

The conducted research demonstrated that modern geoinformatics methods, based on LiDAR data and high-resolution DTM models, are an effective tool for detecting and documenting former defensive structures. Based on analyses conducted in the ArcGIS Pro environment and the ArcGIS Field Maps application, a total of nearly 37 km of trench lines from the September 1939 campaign were identified and mapped. This is a significant result, especially considering the partial transformation of the analyzed area by modern human activity.

The study clearly demonstrates that although the primary identification tool was classic terrain shading analysis, the use of a complementary raster method contributed to an increased detection range, particularly in difficult-to-access and heavily overgrown areas. Combining both methods not only increased precision but also mutually verified and confirmed the results.

It is worth noting that the 1×1 m resolution Digital Terrain Model, created based on LiDAR data, proved to be an exceptionally effective remote sensing tool. Its precision enabled the non-invasive identification of relics even in forested and difficult-to-access areas and also allowed for the distinction of subtle anthropogenic landforms from natural microforms. The use of LiDAR data proved particularly useful where human activity had significantly altered the relief—

Dane przestrzenne pozyskane z wykorzystaniem nowoczesnych metod geoinformacyjnych, takich jak LiDAR, mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w badaniach historyczno-archeologicznych [Themistocleous 2020], lecz także w analizach prowadzonych na potrzeby planowania przestrzennego, edukacji, turystyki kulturowej, a nawet – co warto zaznaczyć – w działaniach wojskowych [Lartey 2024].

Uzyskane wyniki potwierdzają wysoką efektywność integracji nowoczesnych technologii geoinformacyjnych z wiedzą historyczną i geomorfologiczną, wskazując na ich duży potencjał badawczy. Przeprowadzone analizy dowodzą, że możliwe jest skuteczne odtworzenie fragmentów zapomnianych systemów obronnych, a także ich weryfikacja w terenie, co otwiera perspektywę dla dalszych, pogłębionych badań. Co więcej, zgromadzony materiał może stanowić punkt wyjścia do działań konserwatorskich i popularyzatorskich, a także do tworzenia lokalnych ścieżek edukacyjnych, przyczyniających się do pielęgnowania pamięci dziedzictwa historycznego regionu.

in some cases, enabling the reconstruction of former defensive lines despite contemporary changes in their surroundings.

Spatial data acquired using modern geoinformation methods, such as LiDAR, can be used not only in historical and archaeological research [Themistocleous 2020], but also in analyses conducted for spatial planning, education, cultural tourism, and even—notably—in military operations [Lartey 2024].

The obtained results confirm the high effectiveness of integrating modern geoinformation technologies with historical and geomorphological knowledge, indicating their significant research potential. The analyses conducted demonstrate that it is possible to effectively reconstruct fragments of forgotten defensive systems and verify them in the field, opening up prospects for further, in-depth research. Moreover, the collected material can serve as a starting point for conservation and promotion activities, as well as for the creation of local educational paths that help preserve the region's historical heritage.

Bibliografia / References

Opracowania / Secondary sources

- Bandurka Mieczysław, *Zmiany administracyjne i terytorialne ziem województwa łódzkiego w XIX i XX wieku*, Warszawa 1974.
- Bogdanowski Janusz, *Architektura obronna w krajobrazie Polski. Od Biskupina do Westerplatte*, Warszawa 1996.
- Bogdanowski Janusz, *Sztuka obronna*, Kraków 1993.
- Franczak Paweł, Jucha Witold, *Odtworzenie przebiegu linii okopów z II wojny światowej (OKH Stellung b1) w Paśmie Jąłowieckim i Grupie Mędralowej na podstawie numerycznego modelu terenu z danych LiDAR i badań terenowych*, „Acta Universitatis Lodzensis. Folia Geographica Socio-Oeconomica” 2015, nr 22 (styczeń), <https://doi.org/10.18778/1508-1117.22.05>.
- Harrap Rob, Lato Matt, *An Overview of LIDAR: Collection to Applications*, 6.01.2010, https://www.academia.edu/1360215/An_Overview_of_LIDAR_collection_to_applications.
- Hesse Ralf, *LiDAR-derived local relief models—a new tool for archaeological prospection*, „Archaeological Prospection” 2010, nr 17 (2), <https://doi.org/10.1002/arp.374>.
- Jaskulski Marcin, Nowak Tomasz, *Transformations of landscape topography of the Bełchatów coal mine (Central Poland) and the surrounding area based on DEM analysis*, „ISPRS International Journal of Geo-Information” 2019, nr 8 (9), <https://doi.org/10.3390/ijgi8090403>.
- Jucha Witold, Franczak Paweł, Sadowski Piotr, *Detection of World War II field fortifications using ALS and archival aerial images – German OKH Stellung b1 trenches in the south of the Polish Carpathians*, „Archaeological Prospection” 2021, nr 28; <https://doi.org/10.1002/arp.1792>.
- Kastelik Agnieszka, Jucha Witold, Rosiek Jakub, *Fortyfikacje stałe w Węgierskiej Górze w przededniu II wojny światowej – przegląd za pomocą współczesnych narzędzi geograficznych*, „Prace Studenckiego Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie” 2013, t. 2.
- Kozłowski Włodzimierz, *Wojskowe znaczenie ziemi łódzkiej w 1939 r.*, „Acta Universitatis Lodzensis. Folia Historica” 1981, nr 8 (styczeń), <https://doi.org/10.18778/0208-6050.8.06>.
- Kupiec Michał, Olejniczak Magda, *Struktura militarnego krajobrazu pozycji umocnionej z drugiej wojny światowej na przykładzie wybranych odcinków Pozycji Pomorskiej*, „Studia Geohistorica” 2020, nr 8, <http://dx.doi.org/10.12775/SG.2020.02>.
- Kusznerek Maciej, Ciszewski Krzysztof, *Schrony bojowe Wojska Polskiego w okolicach Bełchatowa*, Bełchatów 2011.
- Lartey Solomon, *The Impact of Drones on Modern Warfare and Surveillance: Signatories to Advanced Nations*, Middlesbrough 2024, https://www.researchgate.net/publication/383862496_The_Impact_of_Drones_on_Modern_Warfare_and_Surveillance_Signatories_to_Advanced_Nations.
- Maier Klaus A., Rohde Horst, Stegemann Bernd, Umbreit Hans, *Germany and the Second World War*, vol. II: *Germany's Initial Conquests in Europe*, Oxford 2015.
- Musiaka Łukasz, Stasiak Ewelina, *Polskie schrony bojowe na linii Warty i Widawki. Zapomniane dziedzictwo*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2019 (57), <https://doi.org/10.17425/WK57BUNKERS>.

Pawleta Michał, Zapłata Rafał, *Nieinwazyjne rozpoznanie zasobów dziedzictwa archeologicznego: potencjał i możliwości*, Lublin 2015.

Themistocleous Kyriacos, *The Use of UAVs for Cultural Heritage and Archaeology*, [w:] *The Use of UAVs for Cultural Heritage and Archaeology*, ed. Diofantos G. Hadjimitsis et al., Cham 2020, https://doi.org/10.1007/978-3-030-10979-0_14.

Wesołowski Andrzej, *Szczerców – Góry Borowskie 1939. Walki 30. Poleskiej Dywizji Piechoty i jej sąsiadów w dniach 3–6 września 1939 r.*, Warszawa 2006.

Wojtaszek Andrzej, *Wykorzystanie środowiska naturalnego w polskich planach przyszłej wojny w latach trzydziestych XX w.*, („Oblicza wojny”, t. 1), Łódź 2020.

Zapłata Rafał, *Historyczne założenia obronne, architectura militaris i LiDAR. Wybrane zagadnienia metodyczne z zakresu zastosowania skanowania laserowego w detekcji i inwentaryzacji nowożytnych fortyfikacji*, „Studia Geohistorica” 2017, nr 3, <https://doi.org/10.12775/SG.2015.11>.

Zawilski Apoloniusz, *Bitwy polskiego września*, wyd. 2, Łódź 1989.

Zubalík Jiří, *Field fortifications from the Second World War: Possibilities of archaeological research on post-military landscapes in South Moravia (Czech Republic)*, „Acta Universitatis Carolinae, Geographica” 2020, 55 (1), <https://doi.org/10.14712/23361980.2019.11>.

Streszczenie

Celem pracy było zbadanie przebiegu linii obronnych Armii „Łódź” z okresu kampanii wrześniowej 1939 r. na terenie powiatu bełchatowskiego z wykorzystaniem danych Numerycznego Modelu Terenu (NMT) oraz analizy GIS. Przedmiotem badań były ślady polskich umocnień polowych, których lokalizacja dotychczas nie została w pełni zinwentaryzowana ani zweryfikowana badaniami terenowymi. W pracy wykorzystano dane wysokościowe pozyskane z lotniczego skanowania laserowego (ALS) o rozdzielczości 1 m oraz mapy topograficzne i dokumentację historyczną. Wykorzystując program ArcGIS Pro przeprowadzono analizy przestrzenne, a uzyskane wyniki zestawiono z obserwacjami terenowymi, co pozwoliło na potwierdzenie obecności licznych fragmentów dawnych linii obrony. Efektem pracy badawczej jest rekonstrukcja historycznego układu linii okopów z września 1939 r. Zastosowane metody potwierdziły skuteczność wykorzystania NMT w badaniach nad wojennym dziedzictwem kulturowym. Uzyskane wyniki podkreślają również potrzebę zachowania i ochrony relikwów krajobrazu militarnego jako ważnego elementu tożsamości regionalnej i dziedzictwa kulturowego ziemi bełchatowskiej.

Abstract

The objective of this study was to investigate the course of the “Łódź” Army’s defensive lines during the September 1939 campaign in Bełchatów County using data from the Numerical Terrain Model (NMT) and GIS analysis. The study investigated traces of Polish field fortifications, whose location has thus far not been fully surveyed or verified via field research. The study employed elevation data from airborne laser scans (ALS) with a 1 m resolution, as well as topographic maps and historical documentation. Spatial analysis was conducted in ArcGIS Pro, and the results were compared with field observations, which confirmed the presence of numerous fragments of former defense lines. The study’s result is a reconstruction of the historical layout of defensive trench lines from September 1939. The methods used found the use of NMT effective in the study of war cultural heritage. The findings also underline the need to preserve and protect relics of the military landscape as a significant element of the Bełchatów region’s regional identity and cultural heritage.