

prof. dr hab. inż. Marek Gosztyła¹⁾

ORCID: 0000-0002-6131-7162

dr inż. Bernadeta Rajchel²⁾

ORCID: 0000-0001-9210-2546

dr inż. Krystian Sikorski¹⁾

ORCID: 0000-0002-4093-0697

dr inż. Rafał Licholai¹⁾

ORCID: 0000-0002-0904-7812

dr hab. inż. Izabela Skrzypczak, prof. uczelni^{1)*)}

ORCID: 0000-0003-0978-3040

Ground-penetrating radar investigations as an example of anthropogenic prospection in an urban space

Badania georadarowe jako przykład prospekcji antropogenicznej w środowisku miejskim

DOI: 10.15199/33.2025.12.12

Abstract: This article presents the results of ground-penetrating radar (GPR) surveys conducted in the area of the former Garncarskiego Square in Rzeszów. The objective was to assess the potential for detecting archaeological structures under challenging soil conditions (clayey loam and clay). A Detector equipped with 250 MHz and 700 MHz antennas was used. The results revealed subsurface anomalies up to a depth of 1.2 meters, with significant attenuation of electromagnetic waves due to the presence of clay, which considerably limited the depth of penetration. The article includes echograms, profile cross-sections, and tabular summaries of detected anomalies. The findings were compared with similar GPR investigations conducted in clayey and agricultural environments.

Keywords: ground-penetrating radar; Rzeszów; Garncarski Square; clay; subsurface anomalies

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań georadarowych (GPR) przeprowadzonych na terenie placu Garncarskiego w Rzeszowie. Celem było określenie możliwości detekcji obiektów archeologicznych w trudnych warunkach gruntowych (gliny zwięzłe oraz ły). Zastosowano georadar wyposażony w anteny o częstotliwościach 250 MHz i 700 MHz. Wyniki wykazały obecność anomalii podpowierzchniowych w zakresie do 1,2 m, przy czym tłumienie fal elektromagnetycznych przez ły znacznie ograniczyło penetrację. Artykuł zawiera echogramy, profile przekrojów oraz tabelaryczne zestawienia anomalii. Wyniki badań porównano z podobnymi badaniami georadarowymi prowadzonymi w środowiskach gliniastych i rolniczych.

Słowa kluczowe: georadar; Rzeszów; plac Garncarski; ły; anomalie podpowierzchniowe.

Nowadays, geophysical methods are increasingly used to identify anthropogenic transformations in the ground in historic urban areas. Their advantage is the possibility of non-invasive examine subsurface changes, which is crucial in urban areas with limited access for excavation research. One of the most effective techniques in this field is the **ground-penetrating radar (GPR)** method, which allows for the identification of anomalies resulting from both past human activity and natural processes [1, 2]. In cities where research space is limited and excavations may be hampered by existing infrastructure, ground-penetrating radar is an important tool for reconstruction former urban layouts and the location of hidden objects [3, 4]. The GPR method allows for precise determination of the density and distribution of archaeological objects below the ground surface. As research shows [5, 6], its use in urban areas contributes to a significant reduction in costs and minimizes disruptions to the daily functioning of cities. Furthermore, the interpretation of echograms in conjunction with historical and cartographic data makes possible the reconstruction of former spatial layouts and the assessment of the degree of preservation of archaeological objects [7]. In the context of cultural heritage protection, this method is particularly important because it allows

Współcześnie metody geofizyczne są coraz częściej stosowane w identyfikacji przeobrażeń antropogenicznych w podłożu gruntowym na historycznych terenach zurbanizowanych. Ich zaletą jest możliwość nieinwazyjnego badania zmian podpowierzchniowych, co jest kluczowe w przestrzeni miejskiej o ograniczonej dostępności dla badań wykopaliskowych. Jedną z najbardziej efektywnych technik w tym zakresie jest metoda **georadarowa (GPR – Ground Penetrating Radar)**, pozwalająca na identyfikację anomalii wynikających zarówno z dawnej aktywności ludzkiej, jak i procesów naturalnych [1, 2]. W miastach, gdzie przestrzeń badawcza jest ograniczona, a prowadzenie wykopalisk może być utrudnione przez istniejącą infrastrukturę, georadar stanowi istotne narzędzie do rekonstrukcji dawnych układów urbanistycznych oraz lokalizacji ukrytych obiektów [3, 4].

Metoda georadarowa pozwala na precyzyjne określenie gęstości oraz rozmieszczenia obiektów archeologicznych pod powierzchnią gruntu. Jak wskazują badania [5, 6], jej zastosowanie w przestrzeni miejskiej przyczynia się do znacznej redukcji kosztów oraz minimalizacji zakłóceń w codziennym funkcjonowaniu miast. Ponadto, interpretacja echogramów w zestawieniu z danymi historycznymi i kartograficznymi umożliwia rekonstrukcję dawnych układów przestrzennych oraz ocenę stopnia zachowania obiektów archeologicznych [7]. W kontekście ochrony dziedzictwa kulturowego metoda ta jest szczególnie ważna, ponieważ pozwala na identyfikację

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

²⁾ PANS Krosno, Instytut Politechniczny

^{*)} Adress for correspondence: izas@prz.edu.pl

for the identification of underground layers and objects, which enables their preservation and inclusion in spatial development planning. As a result, it is possible not only to reduce the risk of destruction of historic cultural layers, but also to effectively manage urban space in an integrated manner with the protection of historical heritage [8, 9]. Research conducted on former urban sites, such as the analyzed area in Rzeszów, can provide valuable information on the location of former buildings, foundations, furnaces, and other structures related to craft and economic activity. Another important aspect is the determination of the geotechnical conditions of the subsoil, which may affect the stability of modern structures and the planning of the revitalization of historic areas [10, 11]. Based on the results obtained, it is also possible to predict future directions of geophysical research and its potential application in other cities with a rich historical heritage [12]. In addition, the ground-penetrating radar method is used not only in archaeology, but also in the assessment of the condition of urban surfaces and the detection of geotechnical anomalies. As indicated by contemporary research [3, 13–15], the use of ground-penetrating radar allows for the assessment of the extent of damage and subsurface changes in urban areas. The ability to conduct a detailed analysis of the condition of the ground without the need for excavation is crucial in investment planning and cultural heritage protection. The article presents the results of georadar surveys conducted at the historic Garncarski Square in Rzeszów, which allowed for the identification of subsurface anomalies that may be related to the former urban infrastructure and craft activities. The analysis of the echograms provided information about the geotechnical conditions of the subsoil and indicated potential objects of unknown origin, which provides a basis for further research. The data obtained may be of significant importance in planning conservation and revitalization works, and may also indicate the need to use additional geophysical methods to expand the scope of research. It should be emphasized that the subject of the research is Garncarski Square in Rzeszów, which is not only important for the history of the city, but also constitutes a scientifically valuable area, as the research conducted may provide information about former economic systems and methods of spatial organization in the historical period. The article evaluates the effectiveness of using the ground-penetrating radar method in subsurface investigations in historical areas with complex geological structures. Particular emphasis is placed on the identification of anomalies related to the presence of underground structures, such as buildings, roads, and underground utilities. on identifying anomalies associated with potential objects infrastructure and the impact of ground conditions on signal propagation georadar. The research results lead to conclusions regarding the possibility of further use of this method in similar research conditions.

Theoretical basis georadar technique

The ground-penetrating radar (GPR) method is based on the emission of electromagnetic waves that pass through various layers of the ground and are reflected back to the surface. The boundary between materials with different physical properties. The transmitting antenna sends a sinusoidal pulse that pen-

podziemnych warstw i obiektów, co umożliwia ich zachowanie oraz uwzględnienie w planowaniu zagospodarowania przestrzennego. W efekcie możliwe jest nie tylko ograniczenie ryzyka destrukcji zabytkowych warstw kulturowych, ale także skuteczne zarządzanie przestrzenią miejską w sposób zintegrowany z ochroną dziedzictwa historycznego [8, 9].

Badania prowadzone na dawnych placach miejskich, takich jak analizowany obszar w Rzeszowie, mogą dostarczyć cennych informacji dotyczących rozmieszczenia dawnych budynków, fundamentów, pieców oraz innych konstrukcji związanych z aktywnością rzemieślniczą i gospodarczą. Ważnym aspektem jest także określenie warunków geotechnicznych podłoża, co może mieć wpływ na stabilność współczesnych konstrukcji oraz planowanie rewitalizacji obszarów zabytkowych [10, 11]. Na podstawie uzyskanych wyników można także prognozować przyszłe kierunki badań geofizycznych oraz ich potencjalne zastosowanie w innych miastach posiadających bogate dziedzictwo historyczne [12]. Ponadto, metoda georadarowa znajduje zastosowanie nie tylko w archeologii, ale również w ocenie stanu nawierzchni miejskich oraz detekcji anomalii geotechnicznych. Jak wskazują współczesne badania [3, 13–15], wykorzystanie georadaru pozwala na ocenę zakresu zniszczeń i podpowierzchniowych zmian warstw w obszarach zurbanizowanych. Możliwość przeprowadzenia szczegółowej analizy stanu podłoża bez konieczności prowadzenia badań wykopaliskowych jest kluczowa w planowaniu inwestycji oraz ochronie dziedzictwa kulturowego.

W artykule zaprezentowano wyniki badań georadarowych przeprowadzonych na historycznym placu Garncarskim w Rzeszowie, które pozwoliły na identyfikację podpowierzchniowych anomalii mogących mieć związek z dawną infrastrukturą miejską oraz działalnością rzemieślniczą. Analiza echogramów dostarczyła informacji o warunkach geotechnicznych podłoża oraz wskazała na potencjalne obiekty o nieznanym pochodzeniu, co stanowi podstawę do dalszych badań. Uzyskane dane mogą mieć istotne znaczenie w planowaniu prac konserwatorskich i rewitalizacyjnych, a także wskazywać na konieczność zastosowania dodatkowych metod geofizycznych w celu poszerzenia zakresu badań. Należy podkreślić, że przyjęty przedmiot badań to plac Garncarski w Rzeszowie, który ma istotne znaczenie nie tylko dla historii miasta, ale stanowi obszar cenny naukowo, ponieważ prowadzone badania mogą dostarczyć informacji o dawnych systemach gospodarczych oraz sposobach organizacji przestrzennej w okresie historycznym.

W artykule oceniono skuteczność zastosowania metody georadarowej w badaniach podpowierzchniowych na terenach historycznych o złożonej budowie geologicznej. Szczególny nacisk położono na identyfikację anomalii związanych z potencjalnymi obiektami infrastrukturalnymi oraz wpływ warunków gruntowych na propagację sygnału georadarowego. Wyniki badań pozwalają na sformułowanie wniosków dotyczących możliwości dalszego wykorzystania tej metody w podobnych warunkach badawczych.

Podstawy teoretyczne techniki georadarowej

Metoda georadarowa (GPR) bazuje na emisji fal elektromagnetycznych, które przechodzą przez różne warstwy

etrates the medium under investigation, passing through the boundary between successive materials with different electrical properties (electrical conductivity and electrical permeability). Part of the wave penetrates deep into the medium, while the rest is reflected or scattered. The reflected signal is recorded by the receiving antenna (Figure 1a). During measurements, the GPR is moved along the surface being examined (Figure 1b) and a single GPR scan (known as an A-scan) is performed at each position, as shown in Figure 1c. The basic image in the ground-penetrating radar method is a ground-penetrating radar map, also known as an echogram or waveform (so-called B-scan), consisting of individual time signals recorded at successive points in space forming a time-space plane (Figure 1d). As the GPR approaches an element with electrical properties different from those of the surrounding medium, the time it takes for the wave to return to the receiving antenna decreases. By connecting the points containing data on the distance from the element at specific georadar locations, a parabola is created (Figure 1d), which reflects the searched element on the echogram [2, 13]. The speed of wave propagation in the ground depends on its properties, dielectric properties, including electrical permeability and conductivity. The clayey subsoil, which dominates in the Rzeszów area and the Podkarpackie region, is characterized by a high content of clay particles and a high water retention capacity, which has a significant impact on the attenuation of the GPR signal and limits the penetration depth [1, 2, 13]. Due to their physical and chemical properties, compact clays and loams pose a challenge for GPR applications. The electrical conductivity of clays is much higher than that of sandy or gravelly soils, which leads to a reduction in the propagation speed of electromagnetic waves and an increase in their attenuation [1, 2]. In addition, the presence of moisture and micropores in clays causes significant signal absorption, which makes it difficult to detect deeper archaeological objects (Pasternak, 2015). In areas with clayey subsoil, the appropriate selection of antenna frequency is of great importance. Low-frequency antennas (e.g., 250 MHz) allow for greater penetration depth, but

podłoża i ulegają odbiciu na granicy materiałów o różnych właściwościach fizycznych. Antena nadawcza wysyła impuls sinusoidalny, który przenika przez badany ośrodek, przechodząc przez granicę kolejnych materiałów różniących się właściwościami elektrycznymi (przewodnością elektryczną oraz przenikalnością elektryczną). Część fali przenika w głąb ośrodka, natomiast pozostała część ulega odbiciu bądź rozproszeniu. Sygnał odbity jest rejestrowany przez antenę odbiorczą (rysunek 1a). W trakcie pomiarów georadar jest przesuwany wzdłuż badanej powierzchni (rysunek 1b) i w przypadku każdej pozycji jest dokonywany pomiar pojedynczej trasy georadarowej (tzw. A-scan), jak pokazano na rysunku 1c. Podstawowym obrazem w metodzie georadarowej jest mapa georadarowa zwana także echogramem lub falogramem (tzw. B-scan), składająca się z poszczególnych sygnałów czasowych zarejestrowanych w kolejnych punktach przestrzeni tworzących plan czasowo-przestrzenny (rysunek 1d). Wraz ze zbliżaniem się georadaru do elementu różniącego się właściwościami elektrycznymi od właściwości otaczającego ośrodka maleje czas powrotu fali do anteny odbiorczej. W wyniku połączenia punktów zawierających dane o odległości od elementu w poszczególnych położeniach georadaru powstaje parabola (rysunek 1d), która odzwierciedla poszukiwany element na echogramie [2, 13].

Prędkość propagacji fali w gruncie jest uzależniona od jego właściwości dielektrycznych, w tym przenikalności elektrycznej oraz przewodności. Podłoże ilaste, dominujące na terenie Rzeszowa i regionu podkarpackiego, charakteryzuje się dużą zawartością cząstek ilastych oraz dużą zdolnością retencji wody, co ma istotny wpływ na tłumienie sygnału georadarowego oraz ograniczenie głębokości penetracji [1, 2, 13]. Gliny zwięzłe oraz ły, ze względu na swoje właściwości fizyczne i chemiczne, stanowią wyzwanie w zastosowaniach metody GPR. Przenikalność elektryczna łąw jest znacznie większa niż w przypadku gruntów piaszczystych lub żwirowych, co prowadzi do zmniejszenia prędkości propagacji fal elektromagnetycznych oraz zwiększenia ich tłumienia [1, 2]. Do-

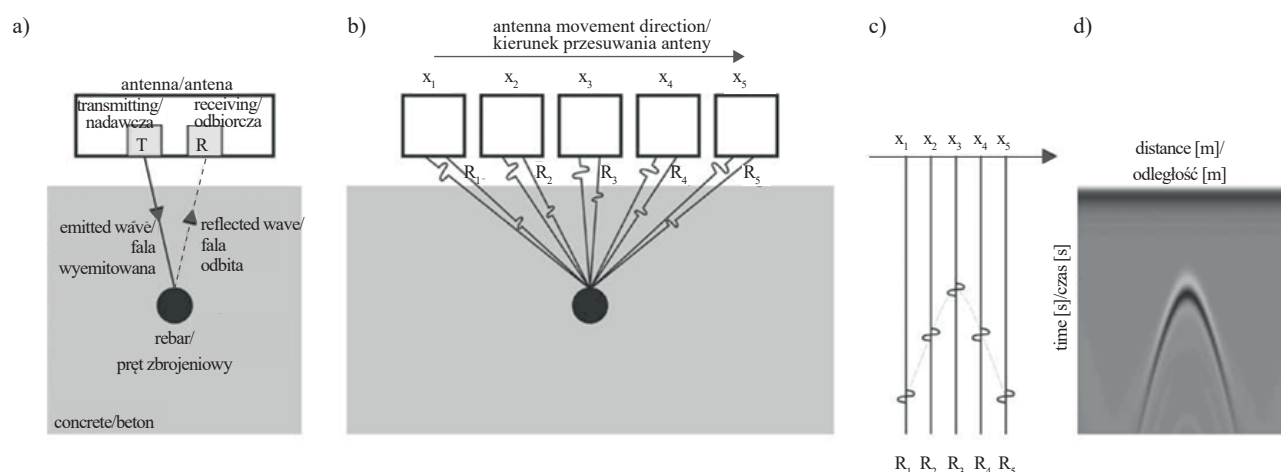


Fig. 1. Schematic diagram of ground-penetrating radar method operation: a) single-point measurement; b) measurements during antenna movement; c) individual traces recorded by the GPR; d) radargram

Rys. 1. Schemat metody georadarowej: a) pomiar pojedynczy; b) pomiary podczas przesuwania anteny; c) poszczególne zapisy zarejestrowane przez georadar; d) echogram

at the expense of image resolution. On the other hand, higher frequency antennas (e.g., 700 MHz) allow for more detailed echograms, but their range is limited [3]. In the case of the area studied in Rzeszów, both types of antennas were used, which allowed for obtaining data on both the subsoil layers and possible archaeological anomalies. Due to the limited ability of ground-penetrating radar to penetrate clay, it is also important to use methods that support the interpretation of results [16]. In practice, advanced signal filtering and processing algorithms (e.g., noise removal and reflection amplification) are also used to improve the quality of the obtained echograms [8]. In the case under consideration, open pits were made.

Experimental studies using GPR

Description of the measuring equipment. A ground-penetrating radar, which is an advanced device designed for non-destructive analysis of the ground, was used for the research. It is equipped with two antennas with frequencies of 250 MHz (the so-called deep antenna) and 700 MHz (the so-called shallow antenna), which allows simultaneous scanning at different depths and obtaining precise data on the subsurface structure. The detector features an ergonomic design, which facilitates its mobility and maneuverability in various terrains. The device is equipped with intuitive software for data acquisition and analysis, enabling fast processing of echograms in real time. The software allows for the generation of longitudinal and transverse scans. It increases the accuracy of result interpretation and enables better visualization of underground layers. Built-in filtering algorithms improve image quality by eliminating interference and enhancing signal contrast. Additionally, the detector allows data to be exported in formats compatible with other GIS tools and geophysical analysis systems [17]. The signal in the ground-penetrating radar is triggered at fixed distance intervals using a measuring wheel, which ensures precise mapping of subsurface layers. All measurement parameters, such as gain, filter selection, and time window, are set automatically. This facilitates operation and minimizes operational errors. Raw data is recorded on a magnetic medium and can be subsequent processing and detailed analysis. The central unit of the ground-penetrating radar is connected to a computer via a 10/100 Mbit/s Ethernet network. This ensures fast data transfer and the possibility of ongoing analysis of the results. The device is powered by a 12V battery, making it mobile and independent of external power sources, enabling long-term field research. The software allows the export of echograms in raster (tiff) and vector (dxf) formats, which enabled their further analysis in a GIS environment [17]. Sample echograms are shown in Figures 2–4. Thanks to the use of dual antenna technology, this ground-penetrating radar is particularly effective in analyzing subsurface layers in difficult soil conditions, such as compact clays and loams, which can cause significant signal attenuation [18, 19]. The detector enables effective identification of geotechnical anomalies, underground layers and archaeological objects, as well as hidden objects. It is an extremely useful tool in research conducted in historic urban areas, such as Garncarski Square in Rzeszów.

datkowo, obecność wilgoci i mikroporów w łożach powoduje znaczne pochłanianie sygnału, co utrudnia detekcję głębiej położonych obiektów archeologicznych (Pasternak, 2015). Na terenach o podłożu ilastym istotne znaczenie ma odpowiedni dobór częstotliwości anteny. Anteny o niskiej częstotliwości (np. 250 MHz) pozwalają na większą głębokość penetracji, ale kosztem rozdzielczości obrazu. Natomiast anteny o wyższej częstotliwości (np. 700 MHz) umożliwiają uzyskanie bardziej szczegółowych echogramów, lecz ich zasięg jest ograniczony [3]. W przypadku badanego obszaru w Rzeszowie zastosowano oba rodzaje anten, co pozwoliło na uzyskanie danych dotyczących zarówno warstw podłoża, jak i ewentualnych anomalii archeologicznych.

Ze względu na ograniczoną zdolność georadaru do penetracji łoż, istotne jest również stosowanie metod wspomagających interpretację wyników [16]. W praktyce, dodatkowo, stosuje się zaawansowane algorytmy filtracji i przetwarzania sygnału (np. usuwania szumu i wzmacniania odbić) pozwalających na poprawę jakości uzyskanych echogramów [8]. W rozważanym przypadku wykonano odkrywkę.

Badania eksperymentalne techniką GPR

Opis sprzętu pomiarowego. Do badań zastosowano georadar, który jest zaawansowanym urządzeniem przeznaczonym do nieniszczącej analizy podłoża. Wyposażony jest w dwie anteny o częstotliwościach 250 MHz (tzw. antena głęboka) i 700 MHz (tzw. antena płytka), co umożliwia jednocześnie skanowanie na różnej głębokości i uzyskanie precyzyjnych danych na temat budowy podpowierzchniowej.

Detector cechuje się ergonomiczną konstrukcją, co ułatwia jego mobilność i manewrowanie na zróżnicowanych terenach. Urządzenie jest wyposażone w intuicyjne oprogramowanie do akwizycji i analizy danych, umożliwiające szybkie przetwarzanie echogramów w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie pozwala na generowanie skanów podłużnych i poprzecznych. Zwiększa dokładność interpretacji wyników oraz umożliwia lepszą wizualizację podziemnych warstw. Wbudowane algorytmy filtrujące poprawiają jakość obrazu, eliminując zakłócenia oraz wzmacniając kontrast sygnału. Dodatkowo, detector pozwala na eksport danych w formatach kompatybilnych z innymi narzędziami GIS i systemami analizy geofizycznej [17]. Wyzwalanie sygnału w georadarze odbywa się w stałych interwałach odległości za pomocą kółka pomiarowego, co zapewnia precyzyjne odwzorowanie warstw podpowierzchniowych. Wszystkie parametry pomiarowe, takie jak wzmocnienie, dobór filtrów i okno czasowe, są ustawiane automatycznie. Ułatwia to obsługę i minimalizuje błędy operacyjne. Zapis danych nieprzetworzonych następuje na nośniku magnetycznym i umożliwia ich późniejszą obróbkę oraz szczegółową analizę.

Jednostka centralna georadaru jest połączona z komputerem za pomocą sieci Ethernet 10/100 Mbit/s. Zapewnia to szybki transfer danych i możliwość bieżącej analizy wyników. Urządzenie jest zasilane z akumulatora 12V, a więc jest mobilne i niezależne od zewnętrznych źródeł energii, umożliwiając długotrwałe badania terenowe. Oprogramowanie umożliwia

Subject of research

Garncarski Square in Rzeszów has undergone a multi-stage spatial and functional transformation over the centuries. Initially, until the 17th century, the area remained undeveloped and was part of the city's defense system on the south-eastern side. In the modern period, the space gradually began to transform into a craft center. Local tradition and

eksport echogramów w formacie rastrowym (tiff) oraz wektorowym (dxf), co pozwalało na ich dalszą analizę w środowisku GIS [17]. Przykładowe echogramy przedstawiono na rysunkach 2÷4.

Dzięki zastosowaniu technologii dualnej anteny, georadar ten jest szczególnie efektywny w analizie warstw podpowierzchniowych w trudnych warunkach gruntowych, takich jak gliny

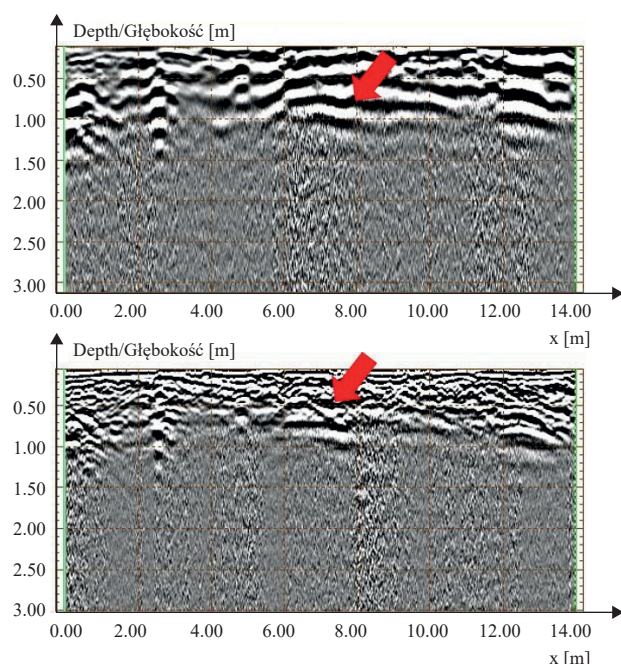


Fig. 2. Radargram of transverse profile no. P8 using 250 MHz and 700 MHz antenna frequencies

Rys. 2. Echogram przekroju poprzecznego nr P8 w przypadku częstotliwości 250 i 700 MHz

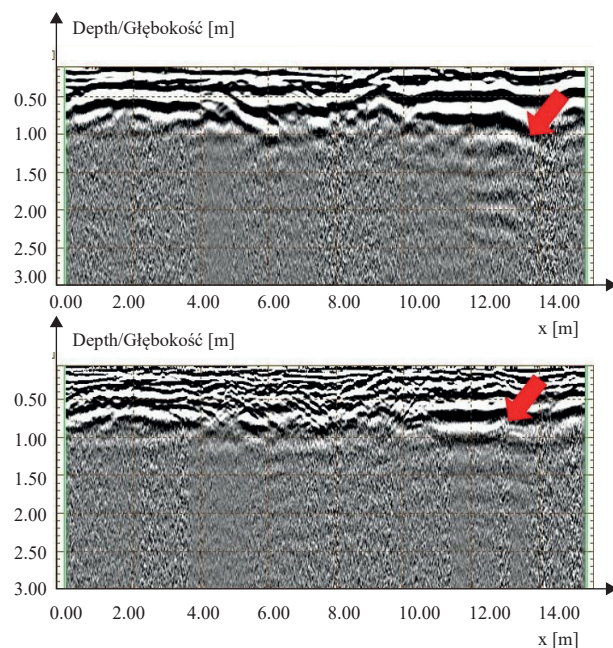


Fig. 3. Radargram of transverse profile no. P12 using 250 MHz and 700 MHz antenna frequencies

Rys. 3. Echogram przekroju poprzecznego nr P12 w przypadku częstotliwości 250 i 700 MHz

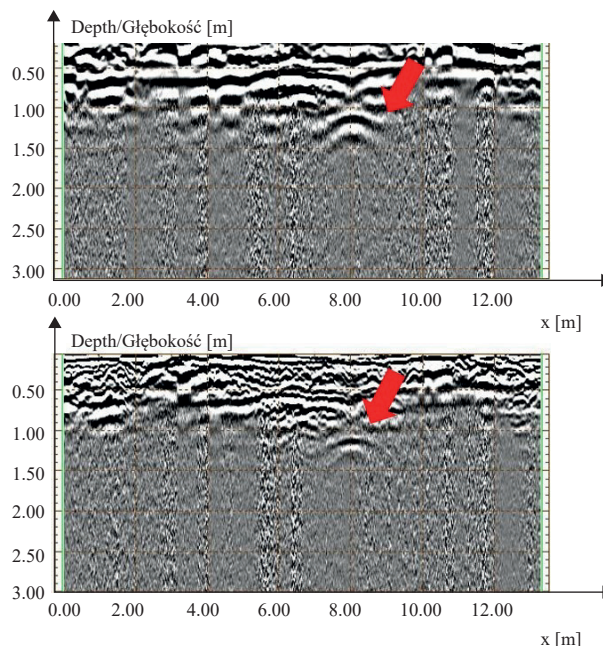


Fig. 4. Radargram of transverse profile no. P9 using 250 MHz and 700 MHz antenna frequencies

Rys. 4. Echogram przekroju poprzecznego nr P9 w przypadku częstotliwości 250 i 700 MHz

zwięzłe oraz ility, które mogą powodować znaczne tłumienie sygnału [18, 19]. Detector umożliwia skuteczną identyfikację anomalii geotechnicznych, podziemnych warstw i obiektów archeologicznych oraz ukrytych obiektów. Jest niezwykle przydatnym narzędziem w badaniach prowadzonych na historycznych terenach miejskich, takich jak plac Garncarski w Rzeszowie.

Przedmiot badań

Plac Garncarski w Rzeszowie przeszedł wieloetapową transformację przestrzenną i funkcjonalną na przestrzeni wieków. Początkowo, aż do XVII wieku, teren ten pozostawał niezabudowany i stanowił część systemu obronnego miasta od strony południowo-wschodniej. W okresie nowożytnym przestrzeń zaczęła stopniowo przekształcać się w zaplecze rzemieślnicze. Tradycja lokalna oraz dane historyczne wskazują, że funkcjonował tu ośrodek garncarstwa miejskiego, stąd wywodzi się nazwa placu. Obszar ten, zlokalizowany poza głównym trzonem zabudowy staromiejskiej, charakteryzował się dostępem do lokalnych surowców ilastych i prawdopodobnie stanowił miejsce produkcji oraz wstępnej obróbki ceramiki, co sugeruje zarówno jego nazewnictwo, jak i morfologia przestrzenna. W XIX wieku rozpoczęła się intensyfikacja urbanizacji, poja-

historical data indicate that a municipal pottery center operated here, hence the name of the square. This area, located outside the main core of the old town, was characterized by access to local clay resources and was probably a place of production and initial processing of ceramics, as suggested by both its name and spatial morphology. In the 19th century, urbanization began to intensify. Irregular wooden buildings appeared, along with a characteristic, loosely shaped square, which was eventually incorporated into the new spatial development plan for the city. Significant changes took place in the 20th century: some streets were closed or rebuilt, buildings fell into disrepair and were gradually demolished [20]. Despite revitalization efforts, including the restoration of the northern frontage of Szpitalna Street, the square still does not serve an important urban function and is in fact mainly used as a parking lot. The area has been included in Conservation Zone II as part of the Study of conditions and directions of spatial development of the city of Rzeszów [21] and is awaiting a coherent development concept that takes into account its historical heritage and proximity to the historic urban fabric. The aim of the research was to resume the search for anthropogenic activity related to the former Rzeszów. It can be assumed that the cellars and corridors in Rzeszów that have been examined and uncovered so far are part of the structures located beneath the surface of the current city center [20, 22]. After studying archival documentation and documenting the testimonies of the oldest employees of the Water Supply and Sewerage Company in Rzeszów, the research team decided to attempt to search for underground structures. An additional motive for conducting the research was, among other things, the accounts of people who, in the 1980s, while participating in infrastructure renovation works, encountered underground corridors. The article discusses research involving a documentary search in the archives of the Municipal Water Supply and Sewerage Company in Rzeszów (MPWiK), the State Archives in Rzeszów, the archives of the Provincial Office for the Protection of Monuments in Rzeszów, the archives of the National Heritage Institute in Rzeszów, and field research [20–22]. On November 2, 2023, georadar measurements were carried out in Rzeszów, in the parking lot within the area of Szpitalna, Wierzyńska, and Żamenhoffa Streets, as it is the area on which the buildings were constructed in the 17th century, and during World War II, the area was part of the Jewish ghetto [22].

Research methodology

On November 2, 2023, georadar measurements were carried out on a designated section of Garncarski Square, indicated by employees of MPWiK Rzeszów as an area of particular importance in terms of potential anthropogenic layers and objects. This area, located within Szpitalna, Wierzyńska, and Żamenhoffa Streets (photos 1 and 2), is currently used as a parking lot. Due to terrain limitations and the scope specified by the client, only part of the square was surveyed. The location was selected based on assumptions regarding the possible presence of relics of for-

wiła się nieregularna zabudowa drewniana i charakterystyczny, luźno ukształtowany plac, który z czasem został włączony w nowy plan zagospodarowania przestrzennego miasta. W XX wieku odnotowano znaczne zmiany: część ulic została zamknięta lub przebudowana, zabudowa uległa degradacji i była sukcesywnie rozbierana [20]. Pomimo podejmowanych działań rewitalizacyjnych, m.in. przez odtworzenie północnej pierzei ulicy Szpitalnej, plac do dziś nie pełni istotnej funkcji miejskiej i w rzeczywistości wykorzystywany jest głównie jako parking. Teren został objęty Strefą Ochrony Konserwatorskiej II w ramach Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Rzeszowa [21] i oczekuje na spójną koncepcję zagospodarowania, uwzględniającą jego dziedzictwo historyczne oraz sąsiedztwo zabytkowej tkanki miejskiej.

Założonym celem badań było wznowienie poszukiwań działalności antropogenicznej związanej z dawnym Rzeszowem. Można założyć, że przebadane i odsłonięte dotychczas ciągi piwnic i korytarzy w Rzeszowie stanowią część budowli pod powierzchnią obecnego terenu centrum miasta [20, 22]. Zespół badawczy po przestudiowaniu dokumentacji archiwalnej oraz udokumentowaniu wypowiedzi najstarszych pracowników Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie zdecydował się na podjęcie próby poszukiwań budowli podziemnych. Dodatkowym motywem do prowadzenia badań były m.in. relacje osób, które w latach osiemdziesiątych XX wieku, uczestnicząc w pracach remontowych infrastruktury, napotykały podziemne korytarze. W artykule omówiono badania obejmujące kwerendę dokumentacyjną w archiwum Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie (MPWiK), Archiwum Państwowego w Rzeszowie, archiwum Wojewódzkiego Urzędu Ochrony Zabytków Delegatury w Rzeszowie, archiwum Narodowego Instytutu Dziedzictwa w Rzeszowie oraz badań terenowych [20–22]. 2 listopada 2023 r. przeprowadzono pomiary georadarowe w Rzeszowie, na terenie parkingu w obrębie ulic Szpitalnej, Wierzyńska i Żamenhoffa, gdyż stanowi teren, na którym formowała się zabudowa w okresie XVII stulecia oraz w czasie II wojny światowej znajdował się na terenie getta żydowskiego [22].

Metodyka badań

2 listopada 2023 r. przeprowadzono pomiary georadarowe na wyznaczonym fragmencie placu Garncarskiego, wskazanym przez pracowników MPWiK Rzeszów jako obszar szczególnie istotny pod względem potencjalnych wystąpień warstw i obiektów antropogenicznych. Teren ten, zlokalizowany w obrębie ulic Szpitalnej, Wierzyńska i Żamenhoffa (fotografie 1 i 2), wykorzystywany jest obecnie jako parking. Ze względu na ograniczenia terenowe oraz zakres określony przez zleceniodawcę, badaniami objęto jedynie część placu. Lokalizacja została wytypowana na podstawie przypuszczeń dotyczących możliwej obecności reliktyw dawnej zabudowy oraz prawdopodobnego przebiegu podziemnych korytarzy, które poddano weryfikacji metodą georadarową.

Do badań, wykorzystano georadar wyposażony w anteny o częstotliwościach 250 MHz i 700 MHz, co umożliwiło rejestrację danych na różnej głębokości. Łącznie wykonano 15 profili



Fot. 1. Obszar badań – widok terenu badań georadarowych
Photo 1. Study area – view of the ground-penetrating radar survey site



Fot. 2. Plan sytuacyjny obszaru badań georadarowych na placu Garncarskim w Rzeszowie wraz z siatką pomiarową i współrzędnymi profili
Photo 2. Site plan of the GPR survey area at Garncarski Square in Rzeszów, including the measurement grid and profile coordinates

mer buildings and the probable course of underground corridors, which were verified using the ground-penetrating radar method. The survey used ground-penetrating radar equipped with 250 MHz and 700 MHz antennas, which enabled data to be recorded at different depths. A total of 15 survey profiles were created, with measurements taken in a grid pattern. The profiles were evenly distributed across the surveyed area. gray, and the scans were performed both longitudinally and transversely. The measurements were taken at regular intervals to ensure uniform coverage of the surveyed area. The data were recorded. They were processed in real time and recorded on magnetic media for later analysis. During processing, filtering algorithms were used to reduce noise and enhance the contrast of reflections, which allowed for better interpretation of the echograms. The analysis of the results included a comparison of the obtained echograms with available cartographic data and previous archaeological research results. The final analysis of the results allowed for the identification of subsurface anomalies that could indicate the presence of ancient layers and objects related to pottery production. The measurement results were used to develop cross-sections of the Pottery Square with marked anomalies, enabling further planning of archaeological and conservation work.

Analysis and discussion of measurement data

After the field measurements were completed, the recorded echograms were subjected to digital signal processing and appropriate visualization (using a time domain filter, environmental filter, and GAIN amplitude filter) using Gres Win software. The results of the GPR measurements revealed a lot of interesting data, which was difficult to interpret unambiguously. They allowed for the identification of subsurface anomalies that could indicate the presence of ancient layers and objects related to pottery production. Figures 2÷4 show sample echograms with comments on the interpretation of the image. Characteristics of echograms obtained from measurements:

badawczych, prowadząc pomiary w układzie siatkowym. Profile zostały rozmieszczone równomiernie na badanym obszarze, a skany wykonywano zarówno w kierunku podłużnym, jak i poprzecznym. Pomiary prowadzono w stałych interwałach, aby zapewnić jednolite pokrycie badanego terenu. Dane rejestrowano w trybie rzeczywistym i zapisywano na nośnikach magnetycznych w celu późniejszej analizy. W procesie ich obróbki zastosowano algorytmy filtrujące redukujące szumy oraz wzmacniające kontrast odbić, co pozwoliło na lepszą interpretację echogramów. Analiza wyników obejmowała porównanie uzyskanych echogramów z dostępnymi danymi kartograficznymi oraz wcześniejszymi wynikami badań archeologicznych. Ostateczne opracowanie wyników pozwoliło na identyfikację anomalii podpowierzchniowych, które mogły świadczyć o obecności dawnych warstw i obiektów związanych z działalnością garncarską. Wyniki pomiarów posłużyły do opracowania linii przekrojów placu Garncarskiego z naniesionymi anomaliami, umożliwiającymi dalsze planowanie prac archeologicznych i konserwatorskich.

Analiza i dyskusja danych pomiarowych

Po wykonaniu pomiarów w terenie, zarejestrowane echogramy zostały poddane procedurze cyfrowego przetwarzania sygnałów i odpowiedniej wizualizacji (zastosowanie filtru w domenie czasu, filtru środowiskowego, filtru amplitudowego typu „GAIN”) za pomocą oprogramowania Gres Win. Wyniki pomiarów georadarowych wykazały wiele ciekawych danych, a zarazem trudnych do ich jednoznacznej interpretacji. Pozwoliły na identyfikację anomalii podpowierzchniowych, które mogły świadczyć o obecności dawnych warstw i obiektów związanych z działalnością garncarską. Na rysunkach 2÷4 przedstawiono przykładowe echogramy wraz z naniesionym komentarzem dotyczącym interpretacji obrazu.

Charakterystyka echogramów uzyskanych z pomiarów:

- **warstwa przypowierzchniowa (0,00–0,50 m)** – pierwsza warstwa wykazuje dużą refleksyjność, co jest charakterystyczne w przypadku materiałów o wysokiej przenikalności elektromagnetycznej, takich jak asfalt, beton lub bruk [23].

- **Surface layer (0.00–0.50 m)** – the first layer shows high reflectivity, which is characteristic of materials with high electromagnetic permeability, such as asphalt, concrete, or cobblestones [23]. The literature emphasizes that the thickness of this layer, together with the subbase, is within the standard values for road surfaces in urban areas [24];

- **Zone of point anomalies and disturbances and transitional zone (0.50–1.00 m)** – irregular signals and disturbances occur, suggesting the presence of loose materials, debris, or embankment zones [25]. The attenuation of the GPR signal in this layer may be related to the high clay content in the subsoil, which limits the penetration capacity of the electromagnetic wave and reduces the visibility of deeper layers [26];

- **Linear anomalies (1.00–1.50 m)** – hyperbolic reflections indicating anomalies and objects with geometric cylindrical shapes were observed in both echograms. Such signals are typical for water pipes, gas pipes, or power cables [27]. According to research [28], hyperbolas can be considered a standard indicator of the presence of anomalies and linear infrastructure in the ground.

- **Zone of emptiness and variable soil density (>1.50 m)** – the lower parts of the echogram in the second profile show chaacoustic signals that may be associated with voids, depressions, or geological diversity [29] (Neal, 2004). This type of anomaly often occurs in areas with weakened mechanical properties or in the case of leaky channels

- **Stable subsoil (>2.00 m)** – homogeneous, weakly reflecting signals in deeper layers are consistent with the typical response of native soil with a stable structure, such as clay [23]. The high content of clay minerals in clays affects the mechanical properties of the substrate and its ability to retain water, which may limit the penetration of the GPR signal. According to the literature, the presence of clays can significantly reduce the depth to which the GPR signal reaches, especially at frequencies above 250 MHz [30]. The Rzeszów area is dominated by compact clays and loams, which could have been a local source of raw material for potters. After appropriate processing (e.g., by mixing with other fractions or seasoning), compact clays and loams were used for the production of functional ceramics and building materials. Plac Garncarski probably served as a craft center where local clay raw materials were processed into ceramic products. Interpretation of the georadar results showed that **point anomalies were visible to a depth of approx. 1 m**, even though the 250 MHz antenna normally allows penetration to approx. 6 m. The limited signal range may be due to the high clay content in the subsoil, which has a high electromagnetic wave attenuation coefficient. This phenomenon results in reduced detection capability of deeper layers and the need to use lower antenna frequencies to improve ground penetration. In addition, each profile provided not only a series of cross-sections (example – Figures 3 and 4), but also a summary of signal intensity as a function of depth (Table).

According to the literature, the depth of the detected anomalies is within the typical values for infrastructure networks in urban areas [24]. Disturbance zones in the range of 0.50–1.00 m may result from construction activities or

W literaturze podkreśla się, że grubość tej warstwy wraz z podbudową mieści się w standardowych wartościach nawierzchni drogowych w strefach miejskich [24];

- **strefa anomalii punktowych oraz zakłóceń i przejściowa (0,50–1,00 m)** – występują nieregularne sygnały i zakłócenia, co sugeruje obecność luźnych materiałów, gruzu lub stref nasypowych [25]. Tłumienie sygnału georadarowego w tej warstwie może być związane z dużą zawartością łu w podłożu, co ogranicza zdolność penetracji fali elektromagnetycznej i redukuje widoczność głębszych warstw [26];

- **anomalie liniowe (1,00–1,50 m)** – w obu echogramach zaobserwowano hiperboliczne odbicia wskazujące na anomalie oraz obiekty o geometrycznych kształtach cylindrycznych. Takie sygnały są typowe w przypadku rur wodociągowych, gazowych lub kabli energetycznych [27]. Zgodnie z badaniami [28], hiperbole można uznać za standardowy wskaźnik obecności anomalii oraz infrastruktury liniowej w gruncie.

- **strefa pustki i zmiennej gęstości gruntu (>1,50 m)** – niższe partie echogramu w drugim profilu wykazują chaotyczne sygnały, które mogą być związane z pustkami, zapadlinami lub różnorodnością geologiczną [29] (Neal, 2004). Tego typu anomalia często pojawia się w rejonach o osłabionych właściwościach mechanicznych lub w przypadku nieszczelnych kanałów;

- **stabilne podłoże (>2,00 m)** – jednorodne, słabo odbijające sygnały w głębszych warstwach są zgodne z typową odpowiedzią gruntu rodzimego o stabilnej budowie, jakim jest łu [23]. Duża zawartość minerałów ilastych w iłach wpływa na właściwości mechaniczne podłoża oraz zdolność do zatrzymywania wody, co może ograniczać penetrację sygnału georadarowego. Zgodnie z literaturą, obecność iłów może znacznie zredukować głębokość, na jaką dociera sygnał georadaru, zwłaszcza przy częstotliwościach powyżej 250 MHz [30]. W obszarze Rzeszowa dominują gliny zwięzłe oraz łu, które mogły stanowić lokalne źródło surowca dla rzemieślników zajmujących się garncarstwem. Po odpowiednim przetworzeniu (np. przez mieszanie z innymi frakcjami lub sezonowanie) gliny zwięzłe oraz łu były wykorzystywane do produkcji ceramiki użytkowej oraz materiałów budowlanych. Plac Garncarski prawdopodobnie pełnił funkcję centrum rzemieślniczego, gdzie przetwarzano lokalne surowce ilaste na wyroby ceramiczne.

Interpretacja wyników georadarowych wykazała, że **anomalie punktowe zaznaczały się do głębokości ok. 1 m**, mimo że antena 250 MHz standardowo umożliwia penetrację do ok. 6 m. Ograniczenie zasięgu sygnału może wynikać z dużej zawartości iłów w podłożu, które mają duży współczynnik tłumienia fal elektromagnetycznych. Zjawisko to skutkuje zmniejszoną zdolnością detekcji głębszych warstw i koniecznością stosowania niższych częstotliwości anteny w celu poprawy penetracji gruntu. Dodatkowo, z każdego profilu uzyskano nie tylko serię przekrojów poprzecznych (przykład – rysunki 3 i 4), ale także zestawienie intensywności sygnału w funkcji głębokości (tabela).

Zgodnie z literaturą, głębokość wykrytych anomalii mieści się w typowych wartościach dla sieci infrastrukturalnych w strefach miejskich [24]. Strefy zakłóceń w zakresie 0.50–1.00 m mogą wynikać z działalności budowlanej lub nasy-

Summary of signal depth and intensity depending on antenna frequency at selected points

Zestawienie głębokości i intensywności sygnału w zależności od częstotliwości anteny wybranych punktów

No. Profile/ Nr profilu	Antenna/ Antena	Max. depth/ Max. głębokość [m]	Dominant anomalies/ Dominujące anomalie	Comments/Uwagi
P1	700 MHz	0.6	road base of the parking lot/ podbudowa nawierzchni parkingu	high reflectivity/ silna refleksyjność
P4	250 MHz	1.0	linear interference/ zakłócenia liniowe	signal attenuation/ tłumienie sygnału
P9	700 MHz	1,10	ring-shaped object/ obiekt pierścieniowy	unidentified object/ niezidentyfikowany obiekt

secondary embankments [30]. The identified hyperbola is consistent with typical signals generated by metal or plastic pipes [27]. The measurement results were used to develop schematic cross-sections along the measurement lines with subsurface anomalies marked, enabling the planning of further archaeological and conservation work at the Garnarski Square (Figure 5). The results obtained are consistent with the observations of other authors conducting GPR surveys in cohesive soil conditions [13, 23]. Compared to studies of drainage systems in an agricultural environment (UAV-GPR analysis) [31], the effective penetration depth was lower, but the accuracy of archaeological object detection was sufficient for preliminary prospecting. The inability to detect deeper objects requires the use of low-pass filter corrections and signal averaging over time. In the case under consideration, an additional method was used to assist in the discovery (photo 3). The excavations revealed: a layer of cobblestones and concrete and a highly reflective foundation corresponding to in the 0.0–0.4 m zone on echograms, a distinct layer of brick debris corresponding to the zone of strong signal disturbances, fragments of burnt ceramic materials, and a stone mantle, which may be relics of pottery production. The identified layers and objects are consistent

pów wtórnych [30]. Zidentyfikowana hiperbola jest zgodna z typowymi sygnałami generowanymi przez rury metalowe lub tworzywowe [27].

Wyniki pomiarów posłużyły do opracowania schematycznych przekrojów wzdłuż linii pomiarowych z naniesionymi podpowierzchniowymi anomaliami umożliwiającymi planowanie dalszych prac archeologicznych i konserwatorskich placu Garnarskiego (rysunek 5).

Uzyskane wyniki są zgodne z obserwacjami innych autorów prowadzących badania GPR w warunkach gruntów spoistych [13, 23]. W porównaniu z badaniami systemów drenarskich w środowisku rolniczym (analiza UAV-GPR) [31], głębokość skutecznej penetracji

była mniejsza, jednak dokładność detekcji obiektów archeologicznych była wystarczająca do wstępnej prospekcji. Brak możliwości wykrycia głębszych obiektów wymaga zastosowania korekcji filtrami dolnoprzepustowymi oraz uśredniania sygnału w czasie. W rozważanym przypadku, dodatkowo zastosowano jako metodę wspomagającą wykonanie odkrywek (fotografia 3).

W odkrywkach odsłonięto: warstwę brukowo-betonową oraz podbudowę o wysokiej refleksyjności odpowiadającą strefie 0,0–0,4 m na echogramach, wyraźną warstwę gruzu ceglanego odpowiadającą strefie silnych zaburzeń sygnału, fragmenty wypalonych materiałów ceramicznych oraz płaszcz kamienny, które mogą stanowić relikty działalności garncarskiej. Zidentyfikowane warstwy, jak i obiekty są zgodne z historycznymi przekazami dotyczącymi placu Garnarskiego w Rzeszowie. Jak podaje oficjalna strona Urzędu Miasta Rzeszowa [32], plac ten od XVII wieku stanowił centrum handlu wyrobami garncarskimi sprowadzanymi m.in. z Medyni Głogowskiej, Medyni Łańcuckiej i Sokołowa i pełnił funkcję miejskiego targowiska szklenizny. W okresie okupacji został wyrównany i utwardzony cegłą tłuczoną, co jest spójne z obecnością grubych warstw gruzu ceglanego odsłoniętych w odkrywkach (fotografia 3). Tym samym, anomalie georadarowe w strefie 0,5–1,0 m, wyso-

kie tłumienie sygnału spowodowane przez ility i gliny zwięzłe, oraz bezpośrednie obserwacje terenowe (cegła, glina, wypał ceramiczny) pozostają ze sobą spójne pod względem lokalizacji i charakterystyki. Zbieżność danych geofizycznych, geotechnicznych i historycznych sugeruje, że zidentyfikowane anomalie mogą odpowiadać reliktom działalności garncarskiej zarówno w formie historycznych utwardzeń placu, jak i fragmentów ceramicznych pozostałości produkcyjnych lub handlowych.

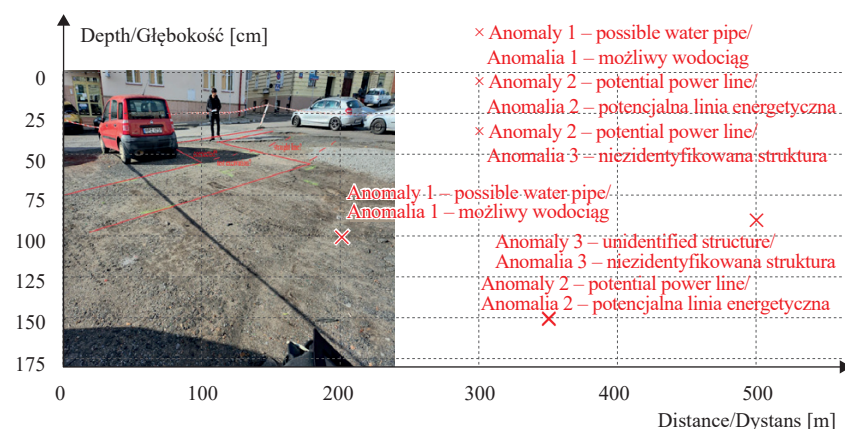


Fig. 5. Section along a selected survey line with subsurface anomalies indicated – supporting material for planning further archaeological and conservation work

Rys. 5. Przekrój wzdłuż wybranej linii pomiarowej z naniesionymi podpowierzchniowymi anomaliami – materiał wspomagający planowanie dalszych prac archeologicznych i konserwatorskich

Podsumowanie

Przeprowadzone badania georadarowe na placu Garnarskim w Rzeszowie dostarczyły cennych informacji na temat podpowierzchniowej konstrukcji badanego te-

with historical accounts of the Pottery Square in Rzeszów. According to the official website of the City of Rzeszów [32], since the 17th century, this square has been the center of trade in pottery products imported from, among others, Medynia Głogowska, Medynia Łańcucka, and Sokołów, and served as the city's glassware market. During the occupation, it was leveled and paved with crushed brick, which is consistent with the presence of thick layers of brick debris exposed in the outcrops (photo 3). Thus, the GPR anomalies in the 0.5–1.0 m zone, high signal attenuation caused by compact clays and loams, and direct field observations (brick, clay, ceramic firing) are consistent in terms of location and characteristics. The convergence of geophysical, geotechnical, and historical data suggests that the identified anomalies may correspond to relics of pottery production, both in the form of historical hardening of the site and fragments of ceramic production or commercial remains.



Photo 3. Excavation at the location of the detected anomaly
Fot. 3. Odkrywka w miejscu występowania anomalii

Photo: author
Fot. autorka

Summary

Georadar surveys conducted at Garncarski Square in Rzeszów provided valuable information about the subsurface structure of the surveyed area. Numerous anomalies were identified, indicating the presence of underground infrastructure, including a water supply network and power lines, as well as objects of unknown origin at a depth of up to approximately 1 m. The use of ground-penetrating radar antennas with frequencies of 250 and 700 MHz allowed for the acquisition of data with varying levels of detail and penetration depth, but signal attenuation by the clayey substrate limited the detection of deeper layers. Analysis of the echograms revealed typical structural layers of urban development, including a reflective layer associated with the paved surface, a zone of disturbance resulting from the presence of debris and embankments, as well as a linear anomaly indicating the possible presence of underground installations. The deeper parts of the profile were characterized by a weakened signal reflection, which is consistent with the properties of clays that dominate the subsoil of Rzeszów and affect the propagation of electromagnetic waves. The results are significant in the context of cultural heritage protection, especially given the historical function of this area as a ceramics production site. The anomalies detected may be related to former craft structures, suggesting the need for further archaeological research to determine the nature of the discovered objects. The GPR method proved to be an effective tool in the study of this area, enabling non-invasive subsurface analysis and preliminary interpretation of terrain transforma-

renu. Zidentyfikowano wiele anomalii wskazujących na obecność infrastruktury podziemnej, w tym sieci wodociągowej i linii energetycznej, a także obiektów o nieokreślonym pochodzeniu na głębokości do ok. 1 m. Zastosowanie anten georadarowych o częstotliwościach 250 i 700 MHz pozwoliło na uzyskanie danych o różnych poziomach szczegółowości i głębokości penetracji, jednak tłumienie sygnału przez podłoże ilaste ograniczyło detekcję głębszych warstw.

Analiza echogramów wykazała typowe warstwy konstrukcyjne miejskiej zabudowy, w tym refleksyjną warstwę przypowierzchniową związaną z utwardzoną nawierzchnią, strefę zakłóceń wynikającą z obecności gruzu i nasypów, a także anomalię liniową wskazującą na możliwą obecność instalacji podziemnych. Głębsze partie profilu charakteryzowały się osłabionym odbiciem sygnału, co jest zgodne z właściwościami ilów, które dominują w podłożu Rzeszowa i mają wpływ na propagację fal elektromagnetycznych.

Wyniki mają istotne znaczenie w kontekście ochrony dziedzictwa kulturowego, szczególnie ze względu na historyczną funkcję tego terenu jako miejsca produkcji ceramiki. Wykryte anomalie mogą być związane z dawnymi konstrukcjami rzemieślniczymi, co sugeruje konieczność dalszych badań archeologicznych w celu określenia charakteru odkrytych obiektów.

Metoda georadarowa okazała się skutecznym narzędziem w badaniu tego obszaru, umożliwiając nieinwazyjną analizę podpowierzchniową i wstępną interpretację przekształceń terenowych. Ograniczenia wynikające z tłumienia sygnału przez gliny zwięzłe oraz ropy wskazują jednak na potrzebę zastosowania dodatkowych metod geofizycznych, takich jak

tions. However, limitations resulting from signal attenuation by compact clays and loams indicate the need for additional geophysical methods, such as electrical resistivity tomography, to supplement the data. The results of the research can serve as a basis for future conservation and revitalization activities in this historic area.

Received: 25.08.2025

Revised: 30.09.2025

Published: 23.12.2025

tomografia elektrooporowa, w celu uzupełnienia danych. Wyniki badań mogą posłużyć jako podstawa do przyszłych działań konserwatorskich i rewitalizacyjnych na tym historycznym obszarze.

Artykuł wpłynął do redakcji: 25.08.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 30.09.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Pasternak M. Radarowa Penetracja Gruntu GPR. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. 2015.
- [2] Karczewski J, Ortyl Ł, Pasternak M. Zarys Metody Georadarowej. 2nd ed. Wydawnictwo AGH. 2011.
- [3] Konopko M, Wysocka M. E. Przykład oceny antropogenicznych zmian podłoża gruntowego metodą georadarową. Inżynieria i Budownictwo. 2017. 3: 164–165.
- [4] Wysocka M. E. Zastosowanie GPR do ustalania zmian antropogenicznych w podłożu gruntowym. Civil and Environmental Engineering. 2018. 9: 181–186.
- [5] Porsani J. L., Ruy Y. B., Ramos F. P., Yamanouth G. R. B. GPR applied to mapping utilities along the route of the Line 4 (yellow) subway tunnel construction in São Paulo City, Brazil. Journal of Applied Geophysics. 2012; <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.01.001>.
- [6] Barzaghi R, Cazzaniga N. E, Pagliari D, Pinto L. Vision-Based Georeferencing of GPR in Urban Areas. Sensors. 2016; <https://doi.org/10.3390/s16010132>.
- [7] Gomes F. B., Vidros romanos das necrópoles de Alcácer do Sal depositados no Museu Nacional de Arqueologia. In: A Arqueologia em Portugal. 150 Anos. Arnaud J. M., Martins A., Neves C., editors. Associação dos Arqueólogos Portugueses. Lisboa. 2013; <https://doi.org/10.13140/2.1.5178.1924>.
- [8] Perez-Gracia V, Gonzalez-Drigo R, Sala. Ground-penetrating radar resolution in cultural heritage applications. Near Surface Geophysics. 2012; <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2011015>.
- [9] Bianchi A, Sakal F. Between heritage and urban development: challenges for the management of cultural heritage in Qatar. World Heritage Review. 2014. 72; 70–75.
- [10] Francke J, Yelf R. Applications of GPR for Surface Mining. In: Proc. 2nd Int. Workshop on Advanced GPR, Yarovsky A, editor. IEEE. Delft: 2003, pp. 115–119.
- [11] Venkateswarlu B, Chandra Tewari V. Geotechnical Applications of Ground Penetrating Radar (GPR). 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267757343> [Accessed: Mar. 1, 2025].
- [12] Moreno E, Arevalo A. La moneda como reflejo del movimiento de personas y mercancías en las ciudades portuarias de Myrtilis, Balsa y Ossonoba y sus territoria. In: Del Atlántico al Tirreno. Puertos Hispanos e Itálicos. L'Erma di Bretschneider. Huelva. 2021, pp. 249–330. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/236165037_Arevalo_A_y_Moreno_E_2010 [Accessed: Mar. 1, 2025].
- [13] Rucka M, Lachowicz J. Zastosowanie metody georadarowej w badaniach konstrukcji podłogi posadowionej na gruncie. Inżynieria Morska i Geotechnika. 2014. 5: 452–458. [Online]. Available: https://imig.pl/pliki/artykuly/2014-5/2014-5_452-458_Rucka.pdf [Accessed: Mar. 1, 2025].
- [14] Konopko M, Zabielska-Adamska K. Wykorzystanie georadaru w ocenie podłoża gruntowego. Materiały Budowlane. 2018. <https://doi.org/10.15199/33.2018.03.08>.
- [15] Świt G, Kosno Ł. Zastosowanie metody georadarowej do oceny poprawności wykonania konstrukcji gruntowo-powłokowej. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2017. 64 (3/17): 153–164. <https://doi.org/10.7862/rb.2017.111>.
- [16] Gómez-Ortiz D, Martín-Crespo T, Martín-Velázquez S, Martínez-Pagán P, Higuera H, Manzano M. Application of ground penetrating radar (GPR) to delineate clay layers in wetlands. A case study in the Soto Grande and Soto Chico watercourses, Doñana (SW Spain). Journal of Applied Geophysics. 2010. 72(2): 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.07.007>.
- [17] IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A.N. System Detector Duo – Instrukcja obsługi. 2007.
- [18] Rajchel B. Próba wykorzystania georadaru do badań płytkich zmian antropogenicznych w podłożu. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego. 2011. 446: 225–232. [Online]. Available: <https://geojournals.pgi.gov.pl/bp/article/view/29143/0> [Accessed: Mar. 1, 2025].
- [19] Zdeb K, Adamiec J. Wyrzedzające badania georadarowe w rozpoznaniu pozostałości fundamentów budowli historycznych na przykładzie Braniewa. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/366697158_Wyrzedzajace_badania_georadarowe [Accessed: Mar. 1, 2025].
- [20] Potera B. *Opinia konserwatorska oraz wytyczne konserwatorskie Narodowego Instytutu Dziedzictwa w Rzeszowie do opracowania Miejsowego Planu Zagospodarowania Przestrzennego rejonu ul. Szpitalnej w Rzeszowie*. Rzeszów. 2012.
- [21] Rada Miasta Rzeszowa, *Uchwała NR LXXXV/1890/2023 Rady Miasta Rzeszowa z dnia 26 września 2023 r. w sprawie uchwalenia Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Rzeszowa*. Rzeszów. 2023.
- [22] Kotula F. Tamten Rzeszów. Rzeszów: Krajowa Agencja Wydawnicza, 1985.
- [23] Jol H. M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier, 2009.
- [24] Benedetto A, Pajewski L. Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar. Springer; 2015.
- [25] Hugenschmidt J. Railway track inspection using GPR. Journal of Applied Geophysics. 2000; 43(2-4): 147–155. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00054-3).
- [26] Al-Nuaimy W, Huang Y, Nakhkash M, Fang M. T. C, Nguyen V, Eriksen A. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition. J. Appl. Geophys. 2000; 43(2): 157–165. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00055-5).
- [27] Goodman D, Piro S, Nishimura Y. GPR Remote Sensing in Archaeology. Springer; 2011.
- [28] Cassidy N. J. Electrical and electromagnetic borehole measurements: theory, practice and applications. Near Surf. Geophys. 2009; 7(2): 207–229. <https://doi.org/10.1007/BF01901643>.
- [29] Neal A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Sci. Rev. 2004; 66(3–4): 261–330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>.
- [30] Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. London: IET; 2004.
- [31] E3GS Foundation. GPR and UAV Mapping of Agricultural Subsurface Drainage Systems: A Research Overview. FastTIMES. [Online]. Available: <https://fasttimesonline.co/gpr-and-uav-mapping-of-agricultural-subsurface-drainage-systems-a-research>. Accessed: Nov. 2025.
- [32] Historia – Rzeszowskie targowiska, <https://erzeszow.pl/516-historia/8375-rzeszowskie-historie-i-historyjki/8430-rzeszowskie-targowiska-wspomnienie-nostalgiczno-handlowe.html>, Accessed: Dec. 2025.