

Monika Zielińska^a

orcid.org/0000-0002-0923-6664

Magdalena Rucka^b

orcid.org/0000-0001-7870-281X

Erwin Wojtczak^c

orcid.org/0000-0002-4362-7896

Tomasz Ciborowski^dMichał Steffens^e

Diagnostyka nieniszcząca posadzki w gdańskim Żurawiu z zastosowaniem metody georadarowej

Non-destructive Diagnostics of the Floor in the Gdańsk Crane Using Ground Penetrating Radar

Słowa kluczowe: obiekty zabytkowe, badania nieniszczące, georadar, defekty podłoża

Keywords: historical buildings, non-destructive testing, ground penetrating radar (GPR), ground defects

Wprowadzenie

Obiekty zabytkowe są ważnym źródłem informacji historycznej dla obecnych i przyszłych pokoleń. Wiele zabytków skrywa tajemnice skłaniające do przemyśleń i zachęcające do prowadzenia badań w celu ich odkrycia. Niejednokrotnie największe sekrety obiektów dziedzictwa kulturowego ukryte są pod powierzchnią ziemi. Wszelkie odkrycia o wartości historycznej, poczynając od najmniejszych artefaktów stanowiących elementy codziennego użytku, takich jak naczynia czy biżuteria, kończąc na wielkich konstrukcjach, przybliżają nas do rekonstrukcji ówczesnego świata. Relikty, mury fundamentowe, zasypane pomieszczenia czy inne – z pozoru nieistotne – konstrukcje, mogą nam dostarczyć wielu informacji na temat życia poprzednich pokoleń. Badania prowadzące do odnalezienia artefaktów pod ziemią są domeną archeologów, którzy na podstawie znalezisk starają się dostarczyć jak najwięcej informacji. Dzięki badaniom archeologicznym mo-

Introduction

Heritage sites are an important source of historical information for present and future generations. Many monuments hold secrets that are thought-provoking and encourage exploration to uncover them. Often the greatest secrets of heritage sites lie beneath the surface. Every discovery of historical value, from the smallest artefacts, which are everyday objects such as pottery or jewelry, to large structures, brings us closer to reconstructing the world of the past. Relics, foundation walls, buried rooms or other—seemingly insignificant—structures can provide us with a wealth of information about the lives of past generations. The research that leads to the discovery of artefacts underground is the domain of archaeologists, who try to provide as much information as possible from their findings. Through archaeological research, we can learn about the community living in an area and find answers about the level of development of science, art,

^a dr inż., Wydział Architektury Politechniki Gdańskiej

^b prof. dr hab. inż., Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, Centrum EkoTech

^c dr inż., Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

^d inż., Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

^e inż., Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

^a *Ph.D. Eng., Faculty of Architecture, Gdańsk University of Technology*

^b *Prof. D.Sc. Ph.D. Eng., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdańsk University of Technology, EkoTech Center*

^c *Ph.D. Eng., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdańsk University of Technology*

^d *Eng., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdańsk University of Technology*

^e *Eng., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdańsk University of Technology*

Cytowanie / Citation: Zielińska M., Rucka M., Wojtczak E., Ciborowski T., Steffens M. Non-destructive Diagnostics of the Floor in the Gdańsk Crane Using Ground Penetrating Radar. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2023, 76:129–140

Otrzymano / Received: 6.01.2023 • **Zaakceptowano / Accepted:** 19.09.2023

doi: 10.48234/WK76CRANE

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews



a



b

Ryc. 1. Żuraw w Gdańsku; a – elewacja wschodnia, widok od strony Motławy, b – elewacja zachodnia, widok od strony ul. Szerokiej, 2022; fot. M. Zielińska

Fig. 1. The Gdańsk Crane; a – eastern facade, view from the Motława River, b – western facade, view from Szeroka Street, 2022; photos by M. Zielińska

żemy poznać społeczność zamieszkującą dany obszar oraz znaleźć odpowiedzi na temat poziomu rozwoju nauki, sztuki, codziennego życia czy też toczących się na danym obszarze wojen. Przykładem tego typu odkryć znajdujących się pod budynkiem są piece hipokaustyczne stanowiące system ogrzewania w klasztorach Małopolski opisane przez Bojęś-Białasik [2019a, s. 73–82; 2019b, s. 33–43]. Kołodziejczyk i Przygodzki [2021, s. 156–171] opisują odkrycia kolegiaty w Wiślicy, wskazując na dużą rolę Kościoła i wiary w tym regionie. Bajno i Ojdana [2021, s. 129–142] dokonują opisu odkrytej studni stanowiącej niegdyś źródło wody dla mieszkańców. Stojak [2020, s. 117–132] wskazuje na dużą wartość historyczną zespołu funeralnego złożonego z krypt w podziemiach bazyliki archikatedralnej w Przemyślu. Każdy z tych przykładów poszerza wiedzę na temat historii zamieszkiwanego regionu, dlatego warto pokusić się o odkrywanie takich informacji zawsze, gdy to tylko możliwe.

Możliwości poznania tajemnic, jakie kryją się w obiektach zabytkowych, są zazwyczaj ograniczone. Duża wartość historyczna budynków zawęża bowiem zasadność wykonywania odkrywek w postaci wykopów czy odwiertów. Bardzo pomocne stają się tu metody nieniszczące, a wśród nich wykorzystanie techniki georadarowej (ang. GPR – *ground penetrating radar*). Zalety, ograniczenia i przykłady wykorzystania tej metody zostały szeroko omówione w literaturze. W obiektach zabytkowych georadar znajduje zastosowanie w analizie występowania pustek powietrznych pod płytami posadzki oraz w badaniu jednorodności podłoża [Rucka *et al.* 2020, s. 1–24]. Johnston *et al.* [2018, s. 117–123]

daily life or wars fought in an area. One example of this type of discovery beneath the building is the hypocaust that constitutes the heating system in the monasteries of Lesser Poland described by Bojęś-Białasik [2019a, pp. 73–82; 2019b, pp. 33–43]. Kołodziejczyk and Przygodzki [2021, pp. 156–171] describe the discoveries of a collegiate church in Wiślica, indicating the great role of the Church and faith in this region. Bajno and Ojdana [2021, pp. 129–142] present an uncovered well that was once a source of water. Stojak [2020, pp. 117–132] points to the great historical value of a funerary complex that consists of crypts in the basement of the Cathedral Basilica in Przemyśl. Each of these examples broadens the knowledge of the history of the inhabited region, so it is worth the temptation to discover such information whenever possible.

The possibilities for uncovering the secrets of historical buildings are usually limited. The high historical value of the buildings restricts the advisability of excavation in the form of trenches or boreholes. Non-destructive methods, including the use of ground penetrating radar (GPR), are very helpful here. The advantages, limitations and examples of the use of this method have been widely discussed in the literature. In historical buildings, GPR is used to detect the occurrence of air voids under floor slabs and to investigate the homogeneity of the subsoil [Rucka *et al.* 2020, pp. 1–24]. Johnston *et al.* [2018, pp. 117–123] proved that GPR works well for uneven stone surfaces to analyze the presence of voids. Rucka *et al.* [2020, pp. 1–12] demonstrated that GPR can be used to detect linear inclusions in the form of reinforcement or floor heat-

udowadniają, że georadar sprawdza się w przypadku nierównych, kamiennych powierzchni do analizy występowania pustych przestrzeni. Rucka *et al.* [2020, s. 1–12] dowodzą, że GPR może być wykorzystany do wykrycia inkluzji liniowych w postaci zbrojenia czy ogrzewania podłogowego oraz objętościowych w postaci zejść do krypt. Böniger i Tronicke [2010, s. 360–367] używają metody GPR do odnalezienia grobowców. Georadar stosowany jest również z powodzeniem do oceny zastosowanych rozwiązań wzmacniających ściany i filary obiektów zabytkowych [Rucka *et al.* 2016, s. 94–102; Lachowicz *et al.* 2019, s. 1223–1233].

Głównym celem badań opisanych w niniejszym artykule jest ocena możliwości wykrycia anomalii znajdujących się pod posadzką gdańskiego Żurawia, będącego zabytkiem o wysokiej randze historycznej. Badanie przeprowadzono metodami nieniszczącymi, wykorzystując georadar z antenami o częstotliwościach 2 GHz oraz 400/900 MHz. W artykule porównano mapy tomograficzne uzyskane z obu eksperymentów. W związku z obecnie trwającymi pracami konserwacyjnymi i remontowymi w obrębie obu baszt badanego obiektu możliwe było skonfrontowanie otrzymanych wyników z elementami odkrytymi podczas prowadzenia wykopów.

Charakterystyka gdańskiego Żurawia

Żuraw to urządzenie służące do przenoszenia, przesuwania lub wyladowywania ładunku ze statku do portu. Gdański Żuraw (ryc. 1) jest obiektem unikatowym w skali europejskiej. Wybudowany w 1444 roku dzięki pomysłom inżynierów jest cudem zarówno pod względem architektonicznym, jak i konstrukcyjnym.

Żuraw Gdański uznawany jest za najpotężniejszą z gotyckich bram miasta Gdańsk, zamyka wylot ulicy Szerokiej ku rzece Motławie. Konstrukcja Żurawia zmieniała się na przestrzeni lat. Pierwsza utworzona była w systemie dębowych konstrukcji nabrzeża portowego. Niestety budowla ta nie przetrwała pożaru w 1442 roku. Po katastrofie miasto postanowiło odbudować bramę w konstrukcji murowanej z cegieł. Kształt dzisiejszego Żurawia zachowany jest od połowy XV wieku. Styl istniejącej budowli nawiązuje do budownictwa flamandzkiego. Obiekt wznosi się na planie nieregularnego czworoboku, usytuowanego ukośnie do ulicy Szerokiej. Tworzą go dwie masywne ceglane baszty. W XV wieku „król żurawi” mierzył 10 m szerokości oraz 28 m długości. Budynek miał wówczas trzy kondygnacje. Od strony Motławy dominującym elementem budowli jest wysoka konstrukcja drewniana mierząca 30 m. Jej wnętrze zawiera mechanizm wyciągowy dźwigu [Zbierska 1993].

Dzięki bardzo dobrym walorom konstrukcyjnym „król żurawi” był przez długie lata użytecznym obiektem. Jego mechanizm składa się z dwóch par bębnow. Do jednego bębna może wejść czworo ludzi napędzających mechanizm. Robotnicy po wejściu do bębna obrotowego wytwarzają moment siły obracającej koło-

ing and volumetric inclusions in the form of crypt descents. Böniger and Tronicke [2010, pp. 360–367] used GPR to find tombs. GPR has also been successfully used to assess the reinforcement solutions applied to walls and columns of historical buildings [Rucka *et al.* 2016, pp. 94–102; Lachowicz *et al.* 2019, pp. 1223–1233].

The main objective of this study was to assess the possibility of detecting anomalies under the floor of the Gdańsk Crane, a monument of high historical significance. The survey was carried out by non-destructive methods, using GPR with antennas at 2 GHz and 400/900 MHz. The paper compares the tomographic maps obtained from both tests. The maintenance and repair work currently being carried out in the two towers of the building made it possible to compare the results with the elements uncovered during an excavation.

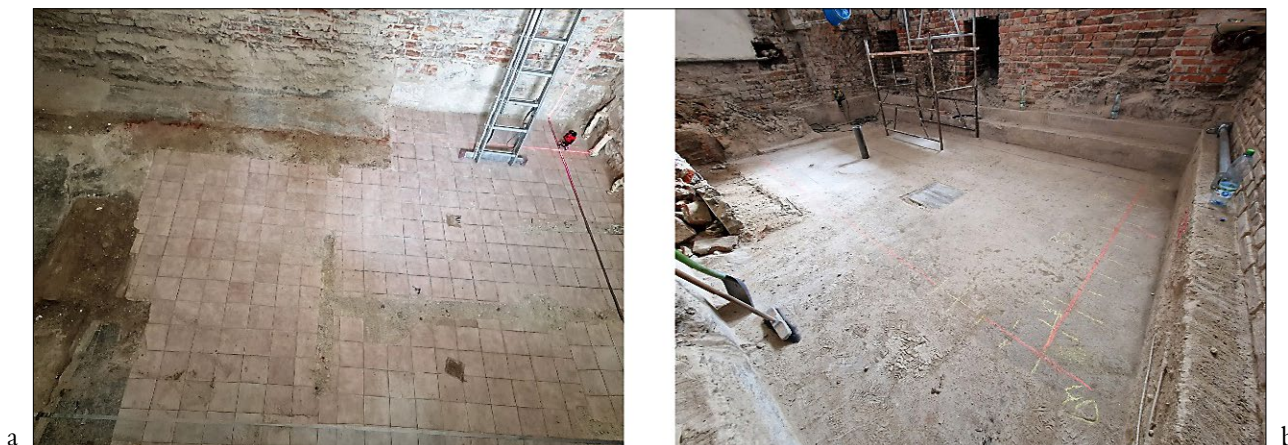
Characteristics of the Gdańsk Crane

A crane is a device used to carry, move or unload cargo from a ship to a port. The Gdańsk Crane (Fig. 1) is a unique structure on a European scale. Built in 1444 thanks to the ingenuity of engineers, it is an architectural and structural marvel.

The Gdańsk Crane is considered the most powerful of the Gothic gates to the city of Gdańsk, closing the exit of Szeroka Street towards the Motława River. The design of the Crane has changed over the years. The first one was formed from a system of oak structures of the port quay. Unfortunately, this structure did not survive the fire of 1442. After the disaster, the city decided to rebuild the gate in brick. The shape of the present Crane has been preserved since the middle of the fifteenth century. The style of the existing building refers to Flemish construction. The building rises on the plan of an irregular quadrilateral, situated diagonally to the Szeroka Street. It is formed by two massive brick towers. In the fifteenth century, the “king of cranes” was 10 m wide and 28 m long. The building had three floors at the time. On the Motława side, the dominant element of the building is a 30 m high wooden structure. Its interior contains the lifting mechanism of the crane [Zbierska 1993].

Thanks to its very good design qualities, the “king of cranes” was a useful structure for many years. Its mechanism consists of two pairs of drums. Four people can enter each drum to operate the mechanism. By entering the rotating drum, the workers generate a moment of force that turns the wheel. One drum can lift 1680 kg [Januszajtis 2010].

In the first half of 2022, renovation work began on the task entitled “Conservation, renovation and modernization of the Gdańsk Crane—a branch of the National Maritime Museum in Gdańsk.” Construction and conservation works are being carried out on the basis of the project documentation entitled “Construction and conservation design of the renovation and reconstruction (involving replacement) of the Gdańsk



Ryc. 2. Widok posadzki w Żurawiu w Gdańsku na poziomie -1; a – baszta południowa, b – baszta północna, 2022; fot. M. Zielińska
 Fig. 2. View of the floor of the Crane in Gdańsk at level -1; a – south tower, b – north tower, 2022; photos by M. Zielińska

wrót. Za pomocą jednego bębna można podnieść 1680 kg [Januszajtis 2010].

W pierwszej połowie 2022 roku rozpoczęły się prace remontowe w ramach zadania pt. „Konservacja, remont i modernizacja Żurawia Gdańskiego – oddziału Narodowego Muzeum Morskiego w Gdańsku”. Roboty budowlane i prace konserwatorskie prowadzone są na podstawie dokumentacji projektowej pt. „Projekt budowlano-konserwatorski remontu i przebudowy (polegające na wymianie) Żurawia Gdańskiego” wykonanej przez Tomasza Bobrasa [Bobras 2016], której integralną częścią jest analiza konserwatorska wraz z programem prac konserwatorskich wykonane przez dr Ewę Jachnicką. Celem opracowania konserwatorskiego jest ustalenie stanu technicznego obiektu oraz sformułowanie wytycznych konserwatorskich mających na celu zabezpieczenie substancji zabytkowej oraz podniesienie walorów estetycznych i edukacyjnych związanych z funkcją muzealną obiektu. W opracowaniu autorka bazuje m.in. na dokumentacji projektowej i dokumentacjach prac konserwatorskich wykonanych w 2007 roku [Chmielewski 2007; Sykutera, Graczyk 2007; Szczepkowski 2007]. Dodatkowo jedną z części dokumentacji jest „Analiza historyczno-konserwatorska oraz opis nowych rozwiązań stolarki okiennej i drzwiowej Żurawia” [Darecka 2014]. W ramach przygotowanej w 2016 roku dokumentacji konserwatorskiej przeprowadzono szereg badań, w tym m.in. badania petrograficzne próbki oryginalnej zaprawy wykonane przez dr. Wojciecha Bartzę, badania fizykochemiczne próbek muru czy badania mikologiczne. Przeprowadzone badania stanowiły podstawę do opracowania analizy technologiczno-materiałowej odnoszącej się do ceramicznego muru, spoin, zapraw, detali drewnianych, elementów oryginalnych i wtórnych, które pojawiły się w obiekcie podczas ostatnich remontów.

Prace rozpoczęte w 2022 roku mają na celu kompleksową konserwację, remont i modernizację obiektu Żurawia. Zakres projektowanych prac obejmuje m.in. rozebranie posadzki na poziomie -1 (ryc. 2) w celu wykonania izolacji ścian zewnętrznych obu baszt oraz

Crane” carried out by Tomasz Bobras [Bobras 2016], an integral part of which is the conservation analysis together with the conservation work program prepared by Doctor Ewa Jachnicka. The aim of the conservation study is to determine the technical condition of the structure and to formulate conservation guidelines aimed at safeguarding the historical substance and enhancing the aesthetic and educational value associated with the museum function of the structure. In the study, the author relies, among other things, on the project documentation and the documentation of the conservation work carried out in 2007 [Chmielewski 2007; Sykutera, Graczyk 2007; Szczepkowski 2007]. Another part of the documentation is the “Historical and conservation analysis and description of the new solutions for the Crane window and door frames” [Darecka 2014]. As part of the conservation documentation prepared in 2016, a number of studies were carried out, including petrographic tests of a sample of the original mortar by Doctor Wojciech Bartz, physico-chemical tests of masonry samples or mycological tests. This research formed the basis for the development of a technological and material analysis relating to the ceramic masonry, joints, mortars, wooden details, original and secondary elements that appeared in the building during the recent renovations.

The works that began in 2022 aim to comprehensively maintain, renovate and upgrade the Crane facility. The scope of the planned works includes, among other things, the demolition of the floor at level -1 (Fig. 2) in order to perform insulation of the external walls of the two towers and a sealed foundation sump. This made it possible to evaluate the GPR scans by comparing the results with the elements discovered during the excavation. These elements include pipes and stone formations (Fig. 3).

Theoretical background of GPR

The GPR method is based on the propagation of electromagnetic waves of a specific frequency. The value



Ryc. 3. Widok elementów odkrytych podczas wykonywanych wykopów; a – baszta południowa, b – baszta północna, 2022; fot. M. Zielińska, S. Sojak

Fig. 3. View of elements discovered during excavations; a – southern tower, b – northern tower, 2022; photos by M. Zielińska, S. Sojak

szczelnej wanny fundamentowej. Dzięki temu możliwa była ocena wykonanych skanów georadarowych poprzez porównanie otrzymanych wyników z elementami ujawnionymi podczas wykopów. Elementami tymi są m.in. rury oraz kamienne formacje (ryc. 3).

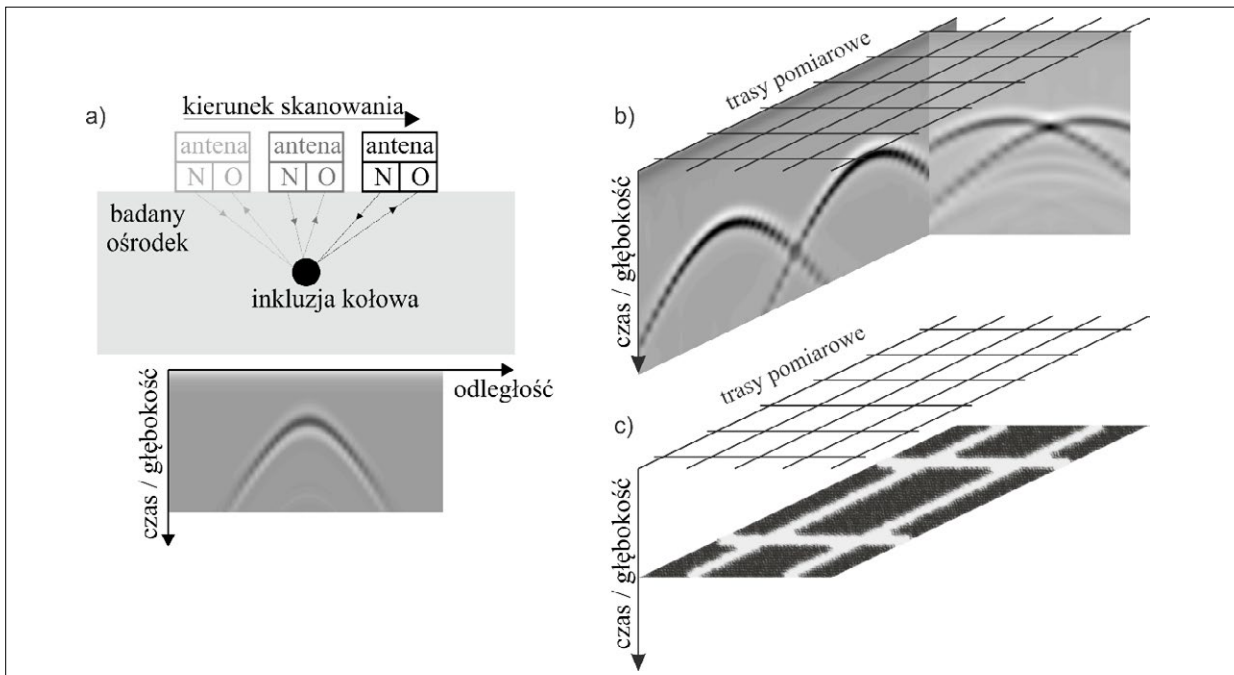
Podstawy teoretyczne GPR

Metoda georadarowa bazuje na wykorzystaniu zjawiska propagacji fal elektromagnetycznych o określonej częstotliwości. Wartość częstotliwości emitowanej fali jest kluczowym parametrem georadaru, decydującym o zasięgu efektywnej głębokości skanowania. Dobór tego parametru zależy od wielkości poszukiwanych obiektów oraz głębokości, na jakiej są zlokalizowane. Wysoka częstotliwość anteny dostarcza zobrazowanie o dużej rozdzielczości, ale o małej głębokości penetracji. Zastosowanie anteny o niższej częstotliwości powoduje zwiększenie głębokości penetracji przy jednoczesnym spadku rozdzielczości. W diagnostyce georadarowej stosuje się anteny o częstotliwościach z zakresu 10 MHz do 3 GHz. Anteny o najniższych częstotliwościach są stosowane w badaniach geologicznych, umożliwiając zasięg zobrazowania do kilkudziesięciu metrów. Natomiast do precyzyjnej inspekcji konstrukcji betonowych i ceglanych stosuje się anteny o częstotliwościach kilku GHz, otrzymując bardzo dokładne zobrazowania do głębokości kilkudziesięciu centymetrów.

Typowy system georadarowy składa się z jednostki centralnej i dwu anten: nadawczej i odbiorczej, umieszczonych w jednej obudowie. Antena nadawcza emituje do badanego ośrodka impuls, który jest powtarzany z określoną częstotliwością. Wzbudzona w ten sposób fala elektromagnetyczna rozchodzi się w badanym ośrodku, gdzie ulega odbiciu, załamaniu, ugięciu bądź rozproszeniu, przechodząc przez granice kolejnych materiałów charakteryzujących się zmiennymi właściwościami elektrycznymi. Sygnał odbity rejestrowany jest przez antenę odbiorczą jako pojedyncza trasa georadarowa (tzw. A-skan). W trakcie pomiarów

of the frequency of the emitted wave is the key parameter of the GPR technique, and determines the range of the effective scanning depth. The selection of this parameter depends on the size of the target and the depth at which it is located. A high-frequency antenna provides high resolution imaging but low penetration depth. Using a lower-frequency antenna increases the depth of penetration but reduced the resolution. GPR diagnostics use antennas with frequencies ranging from 10 MHz to 3 GHz. Antennas with the lowest frequencies are used in geological surveys, enabling imaging ranges of up to several tens of meters. On the other hand, antennas with frequencies of several GHz are used for precise inspection of concrete and brick structures, providing highly accurate imaging down to depths of several tens of centimeters.

A typical GPR system consists of a central unit and two antennas: a transmitting and a receiving antenna, housed in a single casing element. The transmitting antenna emits a pulse into the medium being investigated, which is repeated at a specific frequency. The electromagnetic wave thus excited propagates in the medium to be measured, where it is reflected, refracted, deflected or dispersed, passing through the boundaries of successive materials characterized by different electrical properties. The reflected signal is recorded by the receiving antenna as a single GPR trajectory (the so-called A-scan). During the survey, the GPR is moved along the surface that is surveyed. The individual GPR trajectories recorded at individual points in space form a typical GPR image, i.e., a space-time plan, also known as an echogram or radargram (so-called B-scan) (Fig. 4). As the GPR approaches an object that differs in electrical properties from the surrounding medium, the wave return time to the receiving antenna decreases. A diffraction is then produced on the echogram reflecting the disturbing element. Depending on the type of the disturbance present in the structure, different images of the diffraction of the electromagnetic wave are obtained. A typical pattern on the echogram is



Ryc. 4. Schemat działania metody georadarowej; a – przykładowy echogram, zobrazowania w metodzie georadarowej; b – echogramy wzdłuż wzajemnie prostopadłych tras, c – tomografia na określonej głębokości; oprac. M. Rucka

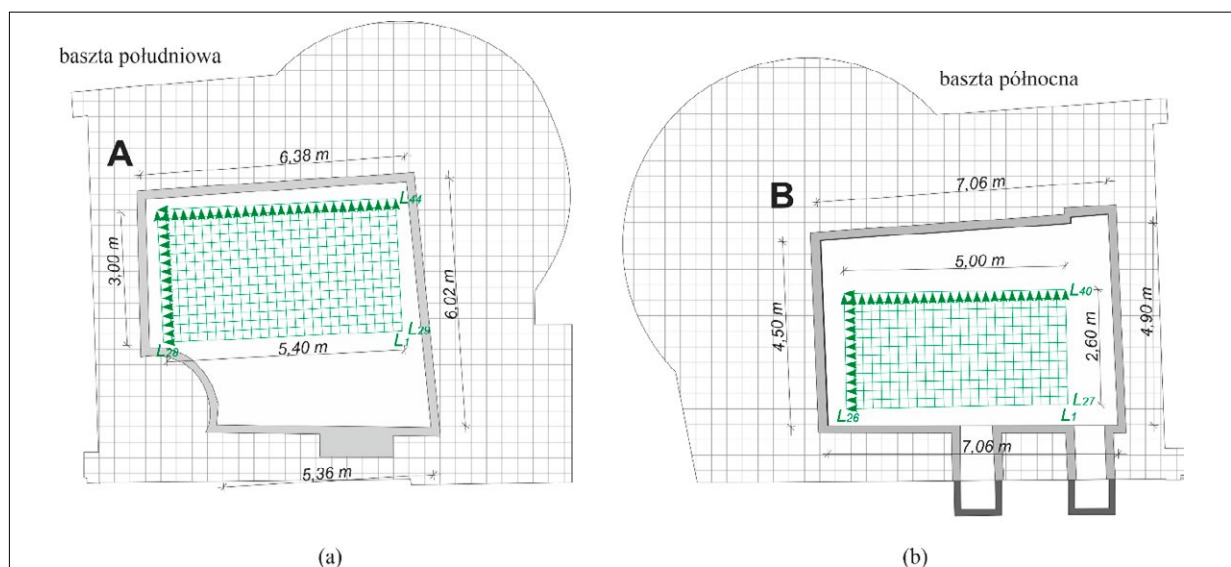
Fig. 4. Scheme of operation of the GPR method; a – example echogram, GPR imaging; b – echograms along mutually perpendicular routes, c – tomography at a specific depth; by M. Rucka

georadar jest przesuwany wzdłuż badanej powierzchni. Pojedyncze trasy georadarowe zarejestrowane w poszczególnych punktach przestrzeni tworzą typowe zobrazowanie georadarowe, czyli plan czasowo-przestrzenny, zwany także echogramem lub radargramem (tzw. B-skan) (ryc. 4). Wraz ze zbliżaniem się georadaru do obiektu różniącego się właściwościami elektrycznymi od otaczającego ośrodka maleje czas powrotu fali do anteny odbiorczej. Na echogramie powstaje wówczas dyfrakcja odzwierciedlająca element zaburzający. W zależności od charakteru zaburzenia występującego w konstrukcji otrzymuje się różne zobrazowania dyfrakcji fali elektromagnetycznej. Typowym zobrazowaniem na echogramie jest hiperbola powstająca na skutek dyfrakcji fali na inkluzji o przekroju kołowym (np. pręt zbrojeniowy). Znając wartość prędkości propagacji fali, można określić, na jakiej głębokości znajduje się zidentyfikowane zaburzenie. Jeżeli pomiary georadarowe zostaną wykonane wzdłuż szeregu tras usytuowanych prostopadłe do siebie (jak np. na ryc. 5a), otrzymamy zbiór echogramów. Interpolacja przestrzenna zgromadzonych w ten sposób danych umożliwi uzyskanie trójwymiarowego obrazu konstrukcji. Z uwagi na trudność wizualizacji wyników jako całości, wynikającą z nakładania się zaburzeń z poszczególnych echogramów, praktyczne jest pokazanie obrazu konstrukcji na określonej głębokości, nazywanego zobrazowaniem tomograficznym. Taki sposób prezentacji wyników pozwala nie tylko na wykrycie poszczególnych zaburzeń, ale także na ustalenie ich wzajemnego położenia celem dokładniejszego określenia ich lokalizacji.

the hyperbola which is a result of a wave that is diffracted on a circular inclusion (e.g., a rebar). By knowing the value of the wave propagation velocity, it is possible to determine the depth at which the detected fault is located. If GPR measurements are taken along a series of routes located perpendicular to each other (such as in Fig. 5a), a set of echograms will be obtained. Spatial interpolation of the data collected in this way makes it possible to obtain a three-dimensional image of the structure. Due to the difficulty of visualizing the results as a whole, resulting from the overlapping of disturbances from the individual echograms, it is practical to show an image of the structure at a certain depth, called tomographic imaging. This way of presenting the results allows not only the individual perturbations to be seen, but also their position relative to each other to determine their location more accurately.

Survey in the Crane

The surveys were carried out in two towers of the Gdańsk Crane on the floor of level -1. The measurements were carried out in places where it was possible to freely guide the GPR along the delineated routes. Two rectangular sections of the floor measuring 3.00 m × 5.40 m and 2.60 m × 5.00 m, in the south and north towers respectively, were selected for non-destructive testing. In the south tower, 28 transverse profiles (L1–L28) and 16 longitudinal profiles (L29–L44) were delineated. Similarly, 26 transverse profiles (L1–L26) and 14 longitudinal profiles (L27–L40) were taken in the



Ryc. 5. Obszar badań georadarowych na badanej części posadzki z zaznaczoną siatką prowadzenia pomiarów; a – baszta południowa, b – baszta północna; oprac. M. Zielińska

Fig. 5. GPR survey area on the surveyed part of the floor with the survey grid marked; a – south tower, b – north tower; by M. Zielińska

Badanie przeprowadzone w gdańskim Żurawiu

Badania przeprowadzono w dwóch basztach gdańskiego Żurawia na posadzce poziomu -1. Pomiarów wykonano w miejscach, gdzie możliwe było swobodne poprowadzenie georadaru wzdłuż wytyczonych tras. Do badań nieniszczących wytypowano dwa prostokątne fragmenty posadzki o wymiarach 3,00 m × 5,40 m i 2,60 m × 5,00 m, odpowiednio, w baszcie południowej i północnej. W baszcie południowej wytyczono 28 profili poprzecznych (L1–L28) i 16 profili podłużnych (L29–L44). W baszcie północnej zaś wykonano analogicznie 26 profili poprzecznych (L1–L26) i 14 profili podłużnych (L27–L40). Profile podłużne i poprzeczne wytyczono w rozstawie 20 cm. Fragmenty posadzki poddane badaniom wraz z opisanymi ścieżkami pomiarów georadarowych pokazano na ryc. 5.

Do pomiarów zastosowano system georadarowy Alladin IDS GeoRadar (ryc. 6). Za sterowanie anteną oraz digitalizację danych pomiarowych odpowiadała jednostka sterująca. W badaniach wykorzystano dwie anteny georadarowe. Pierwsza z nich miała częstotliwość 2 GHz, a druga była anteną podwójną, umożliwiającą jednoczesny pomiar z wykorzystaniem częstotliwości 400 MHz i 900 MHz. Zakres czasu rejestracji sygnału wynosił 32 ns dla anteny o częstotliwości 2 GHz, 40 ns dla anteny 900 MHz i 80 ns dla anteny 400 MHz. Odległość pomiędzy kolejnymi trasami (A-skanami) w obrębie każdego profilu wynosiła 1 cm (2 GHz) i 1,76 cm (400/900 MHz). Poszczególne sygnały georadarowe zostały zarejestrowane przy użyciu oprogramowania K2 FastWave, a następnie przetworzone w programie GRED HD. Zastosowano operacje korekcji czasu, filtracji pasmowoprzepustowej (w zakresie 500–3000 MHz dla anteny 2 GHz, 300–2000 MHz dla anteny 900 MHz oraz 100–1000 MHz dla anteny 400 MHz) oraz wzmocnienia [GRED HD Software 2013].

north tower. The longitudinal and transverse profiles were set at 20 cm intervals. The surveyed floor sections, together with the described GPR survey paths, are shown in Fig. 5.

The Alladin IDS georadar system was used to take the measurements (Fig. 6). The control unit was responsible for controlling the antenna and digitizing the measurement data. Two GPR antennas were used in the survey. The first was at 2 GHz and the second was a dual antenna, allowing simultaneous measurements using 400 MHz and 900 MHz frequencies. The signal recording time range was 32 ns for the 2 GHz antenna, 40 ns for the 900 MHz antenna and 80 ns for the 400 MHz antenna. The distance between specific tracks (A-scans) within each profile was 1 cm (2 GHz) and 1.76 cm (400/900 MHz). The individual GPR signals were recorded using K2 FastWave software and then processed in GRED HD software. Time correction, band-pass filtering (in the range 500–3000 MHz for the 2 GHz antenna, 300–2000 MHz for the 900 MHz antenna and 100–1000 MHz for the 400 MHz antenna) and gain operations were applied [GRED HD Software 2013].

Research results

Fig. 7 shows the echograms recorded in the south tower for two sample profiles, L3 and L43. In profile L3 (Fig. 7a), all antennas showed characteristic disturbances in the form of irregular hyperbolas, indicating the former presence of partition walls (removed during the renovation works) in these areas. The disturbances occurred near the surface, but multiple reflections could also be observed repeating deep into the ground. In addition, in the echogram from the 2 GHz antenna, there was a reflection in the form of a half hyperbola, close to the end of the scan (right next to the wall), at a depth of

Rezultaty badań

Na rycinie 7 przedstawione są echogramy zarejestrowane w baszcie południowej dla dwóch przykładowych profili L3 i L43. W profilu L3 (ryc. 7a) wszystkie anteny pokazują charakterystyczne zaburzenia w postaci nieregularnych hiperbol, wskazujących na wcześniejszą obecność w tych miejscach ścian działowych (usuniętych w trakcie prac remontowych). Zaburzenia występują przypowierzchniowo, można jednak zaobserwować także wielokrotne odbicia powtarzające się w głębi posadzki. Ponadto w echogramie z anteny 2 GHz występuje odbicie w postaci połowy hiperboli, blisko końca skanu (tuż przy ścianie), na głębokości około 75 cm. Wskazuje ono na obecność belki drewnianej, ujawnionej podczas prac odkrywkowych (por. ryc. 3a). Występowanie tylko jednego ramienia hiperboli wynika z faktu, że belka nie jest objęta skanem (w trakcie pomiarów znajdowała się poza obszarem trasy). W przypadku profilu 43 (ryc. 7b) widoczne są zaburzenia występujące na głębokości około 50 cm, pośrodku skanu, w odległości 2,5 m. Świadczą one o występowaniu drugiej belki drewnianej, prostopadłej do tej uprzednio odkrytej w echogramach z profilu L3 (por. ryc. 3a).

Ze względu na istotne nierówności posadzki w baszcie południowej interpretacja obrazowań tomograficznych jest znacznie utrudniona. Dotyczy to szczególnie większych głębokości, ponieważ poszczególne A-skany wskazują na różną głębokość tej samej inkluzji (mimo że głębokość jest stała, a różnice wynikają ze zmiany poziomu odniesienia). Na rycinie 8 zaprezentowano przykładowe tomografie dla głębokości 1 cm, blisko powierzchni posadzki. Na wszystkich obrazowaniach widoczne są liniowe zaburzenia wynikające z występowania w tych miejscach ścian działowych, zidentyfikowanych także na przykładowych echogramach.

Na rycinie 9 zaprezentowane zostały echogramy zarejestrowane w baszcie północnej dla profili L11 i L36. W przypadku profilu L11 (ryc. 9a) dla wszystkich anten wyraźnie widoczne jest zaburzenie w postaci hiperboli na długości około 1,6 m i głębokości około 25 cm, świadczące o występowaniu podłużnej inkluzji o przekroju kołowym. Jest to najprawdopodobniej rura okrągła. Poniżej rury można zaobserwować wielokrotne odbicia o nieregularnym rozkładzie. Może to być podbudowa z kamieni, której zadaniem jest wzmocnienie podłoża pod ułożoną rurą. Warto zauważyć, że echogram z anteny 2 GHz, ze względu na ograniczoną głębokość penetracji, wskazuje na zasięg podbudowy do około 1,0 m, podczas gdy anteny 400 i 900 MHz pokazują głębokość około 1,5 m. Warte uwagi jest także zaburzenie w postaci połowy hiperboli, występujące na początku echogramu z anteny 2 GHz. Świadczy ono o obecności belki drewnianej, ujawnionej podczas prac odkrywkowych (por. rys. 3b). Rycina 9b przedstawia echogramy z profilu L36, przebiegającego przez obszar, w którym znajduje się rura zidentyfikowana na skanach z profilu L11. Należy zauważyć, że profil L36 prowadzi



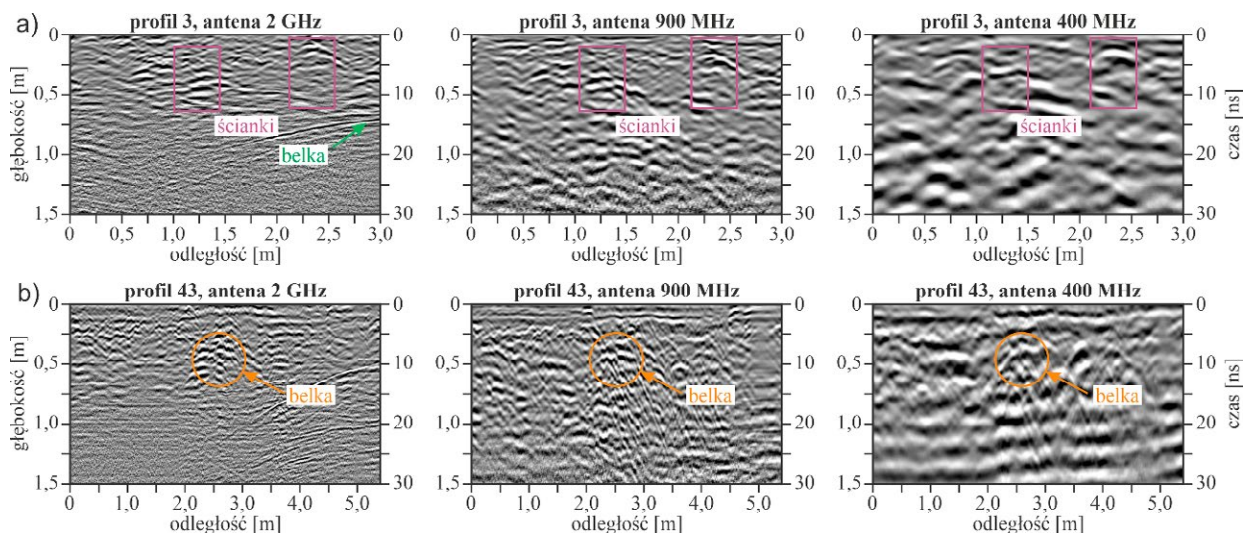
Ryc. 6. Sprzęt georadarowy wykorzystany do badań, 2022; fot. M. Zielińska

Fig. 6. GPR equipment used in the survey, 2022; photo by M. Zielińska

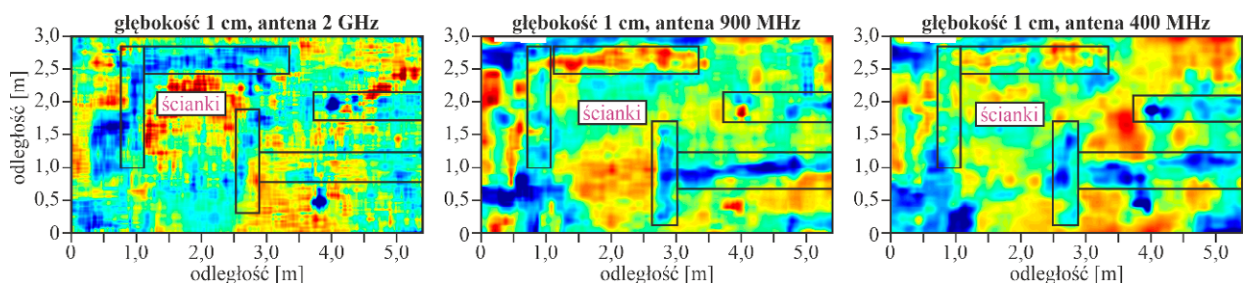
approximately 75 cm. This indicated the presence of a wooden beam, revealed during the excavation work (cf. Fig. 3a). The presence of only one arm of the hyperbola is due to the fact that the beam was not included in the scan (it was outside the route area during the survey). In the case of profile 43 (Fig. 7b), there were visible disturbances occurring at a depth of about 50 cm, in the middle of the scan, at a distance of 2.5 m. These indicated the presence of a second wooden beam, perpendicular to the one previously detected in the echograms from profile L3 (cf. Fig. 3a).

The significant unevenness of the ground in the south tower made interpretation of the tomographic images very difficult. This was particularly true at greater depths, as individual A-scans indicated different depths of the same inclusion (even though the depth was constant and the differences were due to changes in the reference level). Fig. 8 presents example tomographic maps for a depth of 1 cm, close to the floor surface. All images show linear disturbances due to the presence of partitions in these areas, which were also identified in the sample echograms.

Figure 9 presents the echograms recorded in the north tower for profiles L11 and L36. In the case of profile L11 (Fig. 9a), a hyperbola-shaped discontinuity with a length of about 1.6 m and a depth of about 25 cm was clearly visible for all antennas, indicating the presence of a longitudinal inclusion with a circular cross-section. This was most likely a circular pipe. Below the pipe, several inclusions with an irregular distribution could be observed. This could be a bedrock substructure designed to reinforce the ground beneath the buried pipe. It is noteworthy that the echogram from the 2 GHz antenna, due to its limited penetration depth, indicated a range of the substructure to about 1.0 m, while the 400 and 900 MHz antennas showed a depth of about 1.5 m. Also noteworthy is the half-hyperbola disturbance occurring at the beginning of the echogram from the 2 GHz antenna. It indicated



Ryc. 7. Przykładowe echogramy zarejestrowane w baszcie południowej; a – dla profili L3, b – dla profili L43; oprac. M. Rucka, E. Wojtczak
 Fig. 7. Examples of echograms recorded in the southern tower; a – for L3 profiles, b – for L43 profiles; by M. Rucka, E. Wojtczak



Ryc. 8. Przykładowe tomografie uzyskane z pomiarów w baszcie południowej na głębokości 1 cm; oprac. E. Wojtczak
 Fig. 8. Example tomographic maps obtained from measurements in the south tower at a depth of 1 cm; by E. Wojtczak

wzdłuż rury, wobec czego nie jest ona widoczna. Wyraźnie natomiast widać na skanach ze wszystkich anten podbudowę z kamieni (długość pomiędzy 0,2 a 2,0 m). Ponadto można zaobserwować wąż, zlokalizowany przypowierzchniowo na głębokości do około 20 cm i długości około 3,1 m.

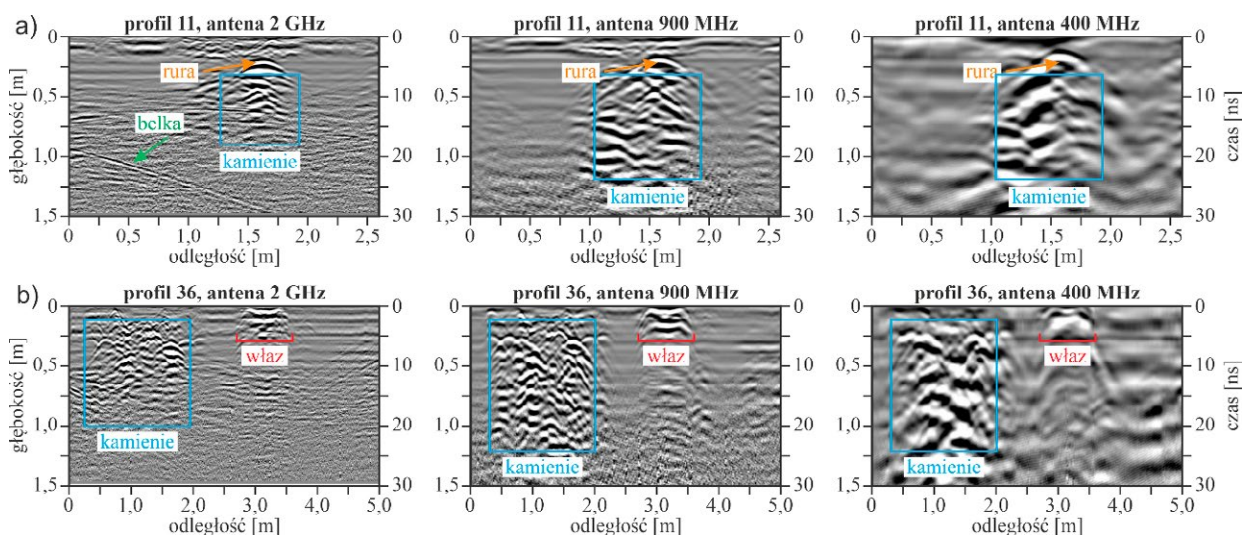
Na rycinie 10 przedstawione zostały przykładowe zobrazowania tomograficzne dla baszty północnej. Na głębokości 20 cm (ryc. 10a) wszystkie tomografie wyraźnie wskazują na obecność rury, zidentyfikowanej podczas analizy echogramów dla profilu L11 (ryc. 9a). Zauważalny jest także zarys wjazdu (por. ryc. 9b) oraz fakt, że rura jest z nim połączona. Na głębokości 40 cm (ryc. 10b) wszystkie anteny wskazują na obecność serii nieregularnie rozłożonych zaburzeń, świadczących o obecności podkładu kamiennego. Na wskazanych tomografiach nie jest natomiast widoczna belka drewniana, której obecność wykryto podczas analizy profilu L11, ponieważ faktycznie jest ona zlokalizowana na większej głębokości, a ponadto znajduje się poza obszarem skanu.

Wnioski

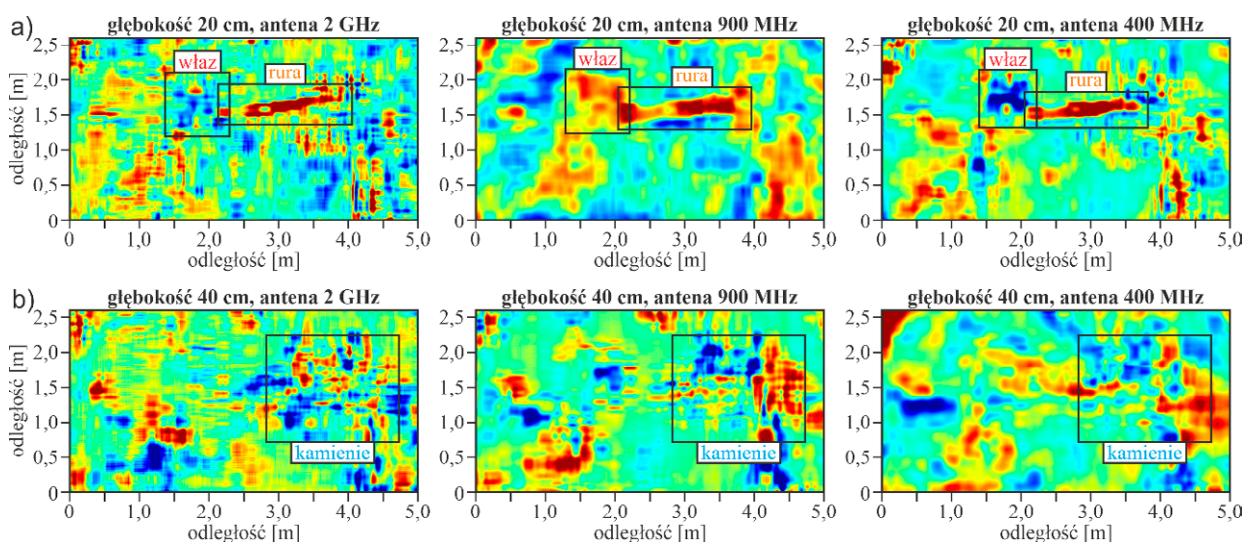
Żuraw gdański jest obiektem zabytkowym o wysokiej randze historycznej. Obiekt powstał w obecnej formie

the presence of a wooden beam, which was discovered during the excavation (cf. Figure 3b). Figure 9b shows echograms of the L36 profile passing through the area where the pipe identified in the L11 profile scans was located. It should be noted that the L36 profile ran alongside the pipe, so that it was not visible. However, a stone substructure (between 0.2 and 2.0 m in length) was clearly visible in the scans from all the antennas. In addition, a manhole could be observed, located close to the surface at a depth of up to approximately 20 cm and a length of approximately 3.1 m.

Figure 10 shows an example of the tomographic images for the northern basin. At a depth of 20 cm (Fig. 10a), all the tomographic maps clearly show the presence of a pipe, identified during the analysis of the echograms for profile L11 (Fig. 9a). The outline of the manhole is also noticeable (cf. Fig. 9b) and that the pipe is connected to it. At a depth of 40 cm (Fig. 10b), all the antennas showed a series of irregularly distributed disturbances, indicating of the presence of a stone foundation. However, the wooden beam detected during the analysis of the L11 profile was not visible in the indicated tomography scans, because it was actually located at a greater depth and was located outside the scan area.



Ryc. 9. Przykładowe echogramy zarejestrowane w baszcie północnej; a – dla profili L11, b – dla profili L36; oprac. M. Rucka, E. Wojtczak
 Fig. 9. Examples of echograms recorded in the northern tower; a – for profiles L11, b – for profiles L36; by M. Rucka, E. Wojtczak



Ryc. 10. Przykładowe tomografie uzyskane z pomiarów w baszcie północnej, a – na głębokości 20 cm, b – na głębokości 40 cm; oprac. E. Wojtczak

Fig. 10. Examples of tomographic maps obtained from measurements in the north tower, a – at a depth of 20 cm, b – at a depth of 40 cm; by E. Wojtczak

w pierwszej połowie XV wieku i uważany jest za cud zarówno architektoniczny, jak i konstrukcyjny. Przez lata pełnił kluczową rolę w transporcie wodnym z innymi miastami oraz państwami. Poznanie tego obiektu poszerza wiedzę na temat ważnych wydarzeń historycznych oraz na temat społeczeństwa zamieszkującego na terenie Gdańska.

W artykule opisano badania nieniszczące prowadzone w Żurawiu. Analizie poddano anomalie znajdujące się w ziemi, pod posadzką najniższej kondygnacji, w baszcie południowej i północnej. Eksperyment przeprowadzono metodą georadarową, wykorzystując anteny o częstotliwości 2 GHz i 400/900 MHz. Wyniki przedstawiono w postaci map tomograficznych oraz echogramów (B-skanów). Trwające obecnie prace polegające na kompleksowym remoncie obiektu pozwoliły na porównanie otrzymanych wyników

Conclusions

The Gdańsk Crane is a historical monument of a great historical significance. Built in its present form in the first half of the fifteenth century, it is considered a marvel of architecture and engineering. Over the years, it has played a key role in water transport with other cities and countries. Getting to know this structure expands knowledge about important historical events and the society living in Gdańsk.

This paper describes the non-destructive investigations carried out in the Crane. Anomalies located in the ground, under the floor in the south and north towers were analyzed. The experiment was carried out using the GPR method, using 2 GHz and 400/900 MHz antennas. The results are presented in the form of tomographic maps and echograms (B-scans). Ongoing

z elementami odkrytymi podczas wykopów. Interpretacja B-skanów dla poszczególnych profili podłużnych i poprzecznych dostarczyła cennych informacji na temat elementów zakopanych pod obiektem. Echogramy ujawniły położenie belek drewnianych, rur, podbudowy z kamieni, włazu oraz ścianek działowych, które zostały rozebrane w pierwszym etapie prac remontowych. Belka drewniana, znajdująca się poza badanym obszarem, została ujawniona na echogramie z anteny o częstotliwości 2 GHz, w postaci połowy hiperboli. Dalsze przetwarzanie sygnałów pozwoliło na uzyskanie map tomograficznych. Obrazy te pokazały położenie i orientację anomalii w płaszczyźnie poziomej, na poszczególnych głębokościach. Na mapach tomograficznych zidentyfikowano położenie ścianek działowych, podsypki kamiennej, włazu oraz rury. W pracy zwrócono uwagę na to, że nierówność posadzki negatywnie wpływa na otrzymane obrazy przekrojowe. Inkluzje wykazują bowiem różną głębokość położenia na poszczególnych A-skanach, wynikającą ze zmiany poziomu odniesienia.

Podsumowując, badanie georadarowe jest skuteczną metodą do inspekcji elementów znajdujących się w ziemi, pod obiektami zabytkowymi. Interpretacja otrzymanych wyników wymaga wiedzy i doświadczenia. Analiza danych powinna uwzględniać możliwości wykorzystanej anteny pomiarowej, której głównym atrybutem jest częstotliwość, bezpośrednio powiązana z możliwością precyzyjnej inspekcji oraz efektywną głębokością penetracji.

Podziękowania

Dziękujemy kierownikowi budowy Sebastianowi Sojakowi za pomoc w przeprowadzeniu badań eksperymentalnych.

Finansowanie

Prace badawcze zostały zrealizowane w ramach projektu PLUTONIUM – „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” (nr projektu DEC-2/2022/IDUB/III.4.3/Pu).

work, including a major rehabilitation of the site, has allowed the results to be compared with the elements uncovered during excavation. The interpretation of the B-scans for individual longitudinal and transverse profiles provided valuable information about the elements buried beneath the structure. The echograms revealed the location of wooden beams, pipes, a stone substructure, a manhole and partition walls that had been demolished during the first stage of the renovation works. One wooden beam, located outside the survey area, appeared as half of a hyperbola on the echogram from the 2 GHz antenna. Further signal processing produced tomographic maps. These images showed the position and orientation of the anomaly in the horizontal plane, at specific depths. The tomographic maps identified the position of the partition walls, the stone bedding, the manhole and the pipe. The paper points out that the unevenness of the floor negatively affects the cross-sectional images obtained. This is because the inclusions show a different depth of position on the individual A-scans due to the change in reference level.

In summary, GPR surveying is an effective method for inspecting elements in the ground beneath historical buildings. The interpretation of the results obtained requires knowledge and experience. The analysis of the data should take into account the capabilities of the survey antenna used, whose main characteristic is the frequency, which is directly related to the possibility of precise inspection and the effective penetration depth.

Acknowledgements

We would like to thank site manager Sebastian Sojak for his help with the experimental research.

Funding

Financial support of these studies from Gdańsk University of Technology by the DEC-2/2022/IDUB/III.4.3/Pu grant under the PLUTONIUM – ‘Excellence Initiative – Research University’ program is gratefully acknowledged.

Bibliografia / References

Opracowania / Secondary sources

- Bajno Dariusz, Ojdana Joanna, *Contemporary Fate of a Forgotten Well in Opole, a Unique Monument That Deserves for Protection and Conservation*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2021, nr 67, s. 129–142.
- Bojć-Białasik Anna, *Hypocaust Furnaces in Monasteries in Lesser Poland. Selected Examples of Furnaces and Heating Systems Discovered during Research*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2019, nr 59, s. 73–82.

- Bojć-Białasik Anna, *Hypocaust Furnaces in Monasteries in Lesser Poland. Technological Development of Heating and the Oldest Discovered Heating Systems*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2019, nr 58, s. 33–43, doi:10.17425/WK58HEATING.
- Böniger Urs, Tronicke Jens, *Improving the Interpretability of 3D GPR Data Using Target-Specific Attributes: Application to Tomb Detection*, „Journal of Archaeological Science” 2010, t. 37.
- Januszajtis Andrzej, *Gdański król żurawi*, Gdańsk 2010.

- Johnston Brian, Ruffell Alastair, McKinley Jennifer, Warke, Patricia, *Detecting Voids within a Historical Building Façade: A Comparative Study of Three High Frequency GPR Antenna*, „Journal of Cultural Heritage” 2018, t. 32.
- Kołodziejczyk Katarzyna, Przygodzki Dominik, *Basement of the Collegiate Church in Wislica: Unique Relics of Medieval Architecture-Their Protection, Conservation, and Display*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2021, nr 66, s. 156–171.
- Lachowicz Jacek, Rucka Magdalena, *Diagnostics of Pillars in St. Mary's Church (Gdańsk, Poland) Using the GPR Method*, „International Journal of Architectural Heritage” 2019, t. 13.
- Rucka Magdalena, Lachowicz Jacek, Zielińska Monika, *GPR Investigation of the Strengthening System of a Historic Masonry Tower*, „Journal of Applied Geophysics” 2016, t. 131.
- Rucka Magdalena, Wojtczak Erwin, Zielińska Monika, *Integrated Application of GPR and Ultrasonic Testing in the Diagnostics of a Historical Floor*, „Materials (Basel)” 2020, t. 13.
- Rucka Magdalena, Wojtczak Erwin, Zielińska Monika, *Interpolation Methods in GPR Tomographic Imaging of Linear and Volume Anomalies for Cultural Heritage Diagnostics*, „Measurement” 2020, t. 154.
- Stojak Grażyna, *Cultural Heritage in the Underground Section of the Przemysł Archcathedral Basilica in Light of the Literature and Research*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2020, nr 64, s. 117–132.
- Zbierska Eleonora, *Żuraw gdański*, Gdańsk 1993.

Dokumentacja / Documentation

- Bobras Tomasz, „Projekt budowlano-konserwatorski remontu i przebudowy (polegające na wymianie) Żurawia Gdańskiego”, maszynopis, Gdańsk 2016.
- Chmielewski Dariusz, „Program prac konserwatorsko-restauratorskich”, maszynopis, Gdańsk 2007.
- Darecka Katarzyna, „Analiza historyczno-konserwatorska oraz opis nowych rozwiązań stolarki okiennej i drzwiowej Żurawia”, maszynopis, Gdańsk 2014.
- GRED HD Software. GPR High Definition Data Post Processing. User Manual, Pisa 2013.
- Sykutera Zbigniew, Graczyk Szymon, „Projekt techniczno-roboczy prac remontowych Żurawia gdańskiego”, maszynopis, Gdańsk 2007.
- Szczepkowski M., „Dokumentacja prac konserwatorskich i restauratorskich”, maszynopis, Gdańsk 2007.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań georadarowych (GPR) przeprowadzonych w gdańskim Żurawiu. Badania wykonano na posadzce najniższej kondygnacji baszt południowej i północnej. Celem eksperymentu jest ocena możliwości wykrycia anomalii znajdujących się pod posadzką. Badania przeprowadzono metodami nieniszczącymi, wykorzystując georadar z antenami o częstotliwości 2 GHz oraz 400/900 MHz. W artykule porównano mapy tomograficzne oraz echogramy (B-skany) uzyskane z obu pomiarów. W związku z obecnie trwającymi pracami remontowymi tego obiektu zabytkowego o dużej randze historycznej możliwe było skonfrontowanie otrzymanych wyników z elementami odkrytymi podczas prowadzenia wykopów. W pracy udowodniono efektywność wykorzystania metody GPR do wykrycia w ziemi takich elementów jak belki drewniane, rury, podbudowa kamienna czy właz. Wskazano również wyższość anteny o częstotliwości 2 GHz w przypadku odnalezienia elementów głębiej położonych.

Abstract

This paper presents the results of a ground penetrating radar (GPR) survey carried out at the Crane in Gdańsk. The measurements were conducted on the floor of the southern and northern towers. The aim of the experiment is to assess the possibility of detecting anomalies beneath the floor. The surveys were carried out in a non-destructive manner, using a georadar unit with 2 GHz and 400/900 MHz antennas. This paper compares the tomographic maps and echograms (B-scans) obtained from both measurements. In view of the ongoing renovation of this monument of great historical importance, it was possible to compare the results obtained with the elements uncovered during the excavation. The paper proves the effectiveness of using the GPR method to detect elements such as wooden beams, pipes, stone substructures or manholes in the ground. The superiority of the 2 GHz antenna was also demonstrated for the detection of deeper elements.