

Piotr Frąckiewicz\*

orcid.org/0000-0001-7539-8074

Krzysztof Raszczuk\*\*

orcid.org/0000-0002-0121-0670

Jerzy Jasieńko\*\*\*

orcid.org/0000-0002-8574-6121

## Obszary zastosowań georadaru w diagnostyce historycznych konstrukcji murowanych

## Areas of GPR Application in Researches of Historical Masonry Structures

**Słowa kluczowe:** GPR, NDT, diagnostyka nieniszcząca, konstrukcje murowane, konstrukcje zabytkowe

**Keywords:** GPR, NDT, non-destructive testing, masonry, historical structures

### Wprowadzenie

Metoda badawcza wykorzystująca georadar, w skrócie GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*), jest praktycznie równie długo znana jak radar. Pierwsze badania górotworów były prowadzone jeszcze przed II wojną światową. Jednak dopiero na przełomie lat 80. i 90. wskutek rozwoju elektroniki, komputerów i oprogramowania możliwe stało się stworzenie urządzeń na tyle przystępnych i użytecznych, by zaoferować je większej grupie odbiorców. O ile metody georadarowe zostały bardzo szybko zaadoptowane do cywilnych zastosowań w inżynierii lądowej oraz archeologii, o tyle zastosowanie metody w inżynierii budowlanej wymagało dalszego postępu technologicznego i miniaturyzacji urządzeń pomiarowych. Pojawienie się ręcznych georadarów umożliwiło ich zastosowanie wewnątrz budynków. Ze względu na podstawę badań georadarowych, czyli pomiar prędkości przebiegu fali elektromagnetycznej odbitej od intruzji w badanym ośrodku, metoda daje najlepsze rezultaty przy sondowaniu matryc o dużym kontraście stałych dielektrycznych występujących

### Introduction

The geo-radar method, or ground-penetrating radar (GPR), has been known since the inception of radar. Initial rock mass surveys occurred before the Second World War. However, advances in electronics, computers, and software in the 1980s and 1990s made GPR devices more affordable and accessible. GPR was quickly adopted for horizontal engineering and archaeology, but its application in structural engineering needed further technological improvements and equipment miniaturization. The development of handheld GPR enabled its indoor use. GPR is most effective when measuring electromagnetic wave speed reflected from materials with high dielectric contrast, making it ideal for studying reinforced concrete elements.

In the late 1990's there was a great intensification of research work on low-destructive and non-destructive methods for masonry structures, exemplified by the formation of Technical Committee No. 127 under the aegis of Rilem [Binda 1997, 2001], and later also Committee No. 177 [Binda 2005]. The researchers

\* mgr inż., Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Konstrukcji Budowlanych

\*\* dr inż., Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Konstrukcji Budowlanych

\*\*\*prof. dr hab. inż., Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Konstrukcji Budowlanych

\* *M.Sc. Eng., Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Chair of Building Structures*

\*\* *Ph.D. Eng., Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Chair of Building Structures*

\*\*\**Prof. D.Sc. Ph.D. Eng., Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Chair of Building Structures*

w nich materiałów. Dlatego jest powszechnie stosowana w badaniu elementów żelbetowych.

Pod koniec lat 90. nastąpiła duża intensyfikacja prac badawczych nad metodami mało niszczącymi i nieniszczącymi obiektów murowanych, czego przykładem może być powstanie komitetu technicznego nr 127 pod egidą Rilem [Binda 1997; Binda 2001], a później również komitetu nr 177 [Binda 2005]. Badacze dużo uwagi poświęcali metodom radarowym, a w zasadzie rozpoznaniu ich użyteczności w badaniu konstrukcji murowanych oraz wysuwaniu podstawowych wniosków w ich kontekście [McCann, Forde 2001]. Przy czym należy w tym miejscu wyraźnie zaznaczyć różnicę pomiędzy badaniem georadarowym murowanych mostów, które jest często wykonywane [Lubowiecka et al. 2009; Solla et al. 2011; Alani et al. 2020; Biscarini et al. 2020; Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008; Solla et al. 2012], od badań pozostałych zabytkowych obiektów, takich jak elementy budynków, składowe architektury krajobrazu, a także rzeźby.

Od pierwszych zastosowań i wnioskowań na temat wykorzystania badań GPR w analizie struktur murowanych minęło dużo czasu. Obecnie próby badań georadarowych są stosunkowo często podejmowane w wypadku murów, w szczególności jeśli chodzi o konstrukcje zabytkowe. Po upływie ponad trzech dekad możliwe jest częściowe podsumowanie dotychczas przeprowadzonych studiów przypadków i dokładniejsze określenie skutecznych obszarów zastosowań georadarów w badaniu wspomnianych konstrukcji. W tym celu zbudowano również specjalny model badawczy, na którym autorzy przetestowali efektywność zastosowania ręcznego georadaru w obszarach najczęściej omawianych w literaturze. Szerokie stadium dotyczące zastosowania georadarów w innych dziedzinach przedstawiono w artykule *A Review of Ground Penetrating Radar Application in Civil Engineering* [Lai, Dérobert, Annan 2018].

### **Obszary zastosowania georadaru w konstrukcjach zabytkowych**

Przed przystąpieniem do właściwych testów konieczna jest kalibracja urządzenia. W celu dokładniejszej interpretacji radargramów i wnioskowania dotyczącego wymiarów badanych elementów konieczne jest ustalenie stałej dielektrycznej badanego medium. Podczas gdy parametr ten dla wysoce homogenicznych ośrodków, takich jak żelbet i lity kamień, jest stosunkowo dobrze przebadany i opisany [Benedetto, Benedetto 2014], to w wypadku murów musi zostać określony każdorazowo w trakcie badań. W badaniach GPR wykorzystywane są przeważnie dwie metody określania stałej dielektrycznej: dopasowanie hiperboli oraz kalibracja na podstawie położenia znanego obiektu na ustalonej głębokości [Carrick Utsi 2017]. Przy okazji badań w zabytkowym kościele Jacek Lachowicz i Magdalena Rucka [2019] zaproponowali procedurę ustalania stałej dielektrycznej badanego ośrodka, odbywającą się na etapie post-processingu, polegającą na iteracyjnym

paid a lot of attention to radar methods, and in fact to identifying their usefulness in the testing of masonry structures and to making basic conclusions in their context [McCann, Forde 2001]. At this point, it is important to clarify the difference between the GPR survey of masonry bridges, which is often performed [Lubowiecka et al. 2009; Solla et al. 2011; Alani et al. 2020; Biscarini et al. 2020; Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008; Solla et al. 2012], and the survey of other historic structures such as building components, landscape architecture, and sculptures.

A long time has passed since the first applications and conclusions about the use of GPR surveys in the investigation of masonry structures. Nowadays, GPR tests are relatively often attempted in the context of masonry, in particular when it comes to historic structures. After more than three decades, it is possible to partially summarize the research carried out so far and to identify more precisely the effective areas of GPR applications in the field of masonry structures. For this purpose, a specific research model was also created, on which the authors experimentally tested the effectiveness of hand-held GPR surveys in the areas most exploited in the literature. A broad summary of the application areas of GPR in various fields is presented in [Lai, Dérobert, Annan 2018].

### **Areas of GPR application in historical structures**

Before proceeding to the actual tests, it is important to calibrate the device. In order to make accurate interpretation of radargrams and conclusions about the dimensions of tested elements, it is necessary to determine the dielectric constant of the analyzed medium. While this constant in the case of strongly homogeneous media—such as reinforced concrete or stone—is relatively well described and studied [Benedetto, Benedetto 2014], in the case of masonry structures it practically always needs to be determined. There are two main methods of determining the dielectric constant during GPR surveys: curve fitting and layer of object at known depth [Carrick Utsi 2017]. On the occasion of an investigation in a historic church Jacek Lachowicz and Magdalena Rucka [2019] proposed a procedure for determining the dielectric constant of the medium being studied, which is carried out at the post-processing stage and consists of iteratively fitting a hyperbola to the image obtained on a radargram. In the course of some studies, there is no possibility, or no need at all, to determine the dielectric constant. Significant inferences can be derived solely from the alteration of wave velocity at the depth of the element in examination. A noteworthy illustration of this procedure is the examination of the Hagia Sophia dome in Istanbul [Duppel 2010], where experts were able to validate that individual fragments of the dome originate from distinct historical eras based solely on disparities in wave velocities measured in multiple areas of the structure.

dopasowaniu hiperboli do obrazu uzyskanego na radargramie. W trakcie niektórych badań nie ma możliwości lub nie ma w ogóle potrzeby oznaczania stałej dielektrycznej. Dużo wniosków można wyciągnąć już na podstawie samych prędkości fali zmieniającej się na głębokości rozpatrywanego elementu. Dobrym przykładem takiego toku postępowania są badania kopuły Hagia Sophia w Stambule [Duppel 2010], gdzie badacze tylko na podstawie różnic w prędkościach fal zmierzonych w wielu miejscach płaszcza kopuły byli w stanie potwierdzić, że jej poszczególne fragmenty pochodzą z różnych okresów historycznych.

Pierwszą i podstawową cechą badanego obiektu, którą da się stosunkowo łatwo określić w trakcie badań georadarem, jest jego grubość, ponieważ granica pomiędzy powietrzem a badanym ośrodkiem jest zazwyczaj wyraźnie zarysowana na radargramach. W zasadzie we wszystkich zestawionych w tabelach 1 i 2 studiach przypadków analiza wymiarów przekroju była przeprowadzana. W większości testów odpowiedni dobór rodzaju anten i ich częstotliwości pozwalał na całkowitą penetrację badanego obiektu przez fale. Przykładowo, w trakcie badań w katedrze Santa Maria del Fiore dzięki przejściu fali elektromagnetycznej przez całą grubość kopuły Brunelleschiego udało się odkryć jej warstwową konstrukcję, a także ustalić grubość każdej z tych powłok [Corazzi, Conti 2011].

Inną często identyfikowaną kwestią podczas badań GPR jest obecność metalowych intruzji. Mogą to być nieduże łączniki mechaniczne, tak jak w wypadku metalowych trzpieni łączących kamienne elementy rozety okiennej [Nuzzo et al. 2010], lub zbrojenie betonowej belki wbudowanej w zabytkowy mur [Bosiljkov et al. 2010]. Ponieważ stałe dielektryczne metali i muru znacznie się różnią, przy odpowiednio zagęszczonych pomiarach i prawidłowo skalibrowanym urządzeniu możliwe jest uzyskanie na etapie post-processingu dokładnej tomografii elementu metalowego znajdującego się wewnątrz konstrukcji murowanej [Santos-Assunção et al. 2014]. Warto tutaj wspomnieć, że elementy metalowe obecne w strukturze są chętnie wykorzystywane do kalibracji metodą położenia obiektu na ustalonej głębokości.

Ważnym aspektem badań georadarowych konstrukcji murowanych jest możliwość wykrywania pustek powietrznych wewnątrz ich struktury. Podobnie jak w wypadku metalowych wtrąceń również powietrze znacznie różni się od struktury muru pod względem właściwości dielektrycznych, dlatego jego obecność na radarogramach jest bardzo wyraźna. Potwierdzenie istnienia pustek powietrznych może dostarczyć badaczom przydatnych informacji do jakościowej oceny stanu technicznego zabytkowych budynków [Kadioglu, Kadioglu 2010]. Gdy konieczne jest uwzględnienie ilościowego opisu pustek wewnątrzstrukturalnych, na przykład w modelu numerycznym, badania GPR mogą być stosowane tylko w połączeniu z innymi metodami NDT lub metodami małoszczątkowymi [Catapano et al. 2018]. Obiecujące badania zostały przeprowadzone na Uniwersytecie w Salento, gdzie naukowcy skupili się na

The initial and fundamental characteristic of the object under scrutiny that can be readily identified during GPR surveys is its thickness. This is due to the border between the air and the surveyed medium being clearly delineated on the radargrams. In essence, all of the case studies outlined in Tables 1 and 2 included an analysis of section size. In most tests, selecting the appropriate antennas and frequencies enabled waves to fully penetrate the tested objects. The research conducted at Cathedral of Santa Maria del Fiore resulted in complete wave penetration through Brunelleschi's dome, allowing researchers to uncover its stratified structure and determine the thickness of each layer [Corazzi, Conti 2011].

Another widely recognized issue during GPR surveys is the presence of metal inclusions. These may be small fasteners, as in the case of metal pins holding the stone elements of a window rosette [Nuzzo et al. 2010], or reinforcement of a concrete beam incorporated into historic masonry [Bosiljkov et al. 2010]. Since the dielectric constants of metals and masonry differ significantly, with appropriately dense measurements and a correctly calibrated device, it is possible to obtain at the post-processing stage an accurate tomography of the metal element located inside the masonry structure [Santos-Assunção et al. 2014]. It is worth mentioning here that metal elements present in the structure are willingly used for calibration with the "object at known depth" method.

An important aspect of GPR testing of masonry structures is the ability to detect air voids within the structure. Similar to metal inclusions, air also differs significantly from the masonry structure in terms of dielectric properties, which is why its presence on radargrams is so pronounced. Confirmation of the presence of air voids can provide researchers useful information for qualitative assessment of the technical condition of historic buildings [Kadioglu, Kadioglu 2010]. When it is necessary to include a quantitative description of intra-structural voids, for example in the numerical model, GPR studies can only be used associated with other NDT or low-destructive methods [Catapano et al. 2018]. Promising research was recently conducted at the University of Salento, where researchers focused on so-called "sack masonry" and proposed a method to improve the velocity estimation using geometrical optics laws [Negri, Aiello 2021]. By using this method it is possible to estimate more accurately the geometry of the analyzed section, including the thickness of air voids. When examining the phenomenon of delamination, which signifies the detachment of surface layers from the remaining portion of the structure, it is vital to consider the previously mentioned issue of GPR resolution. Detection of small delaminations, e.g., surface reinforcements by means of GPR is not feasible [Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008], while detection of separation of the facing layer of masonry in the historic structure is possible [Ranalli, Scozzafava, Tallini 2004]. As in

<b>Źródło Ref.</b>	<b>Miasto / region (państwo) City / Region</b>	<b>Rodzaj konstrukcji Type of construction</b>	<b>Przedmiot badań Subject of investigation</b>	<b>Rodzaj anteny i częstotliwość Antenna type and frequency</b>	<b>Maksymalna głębokość penetracji fali Max. depth of penetration</b>	<b>Wielkość zidentyfikowanych elementów Size of investigated objects</b>
[Catapano et al. 2018]	Gubbio (Włochy) Gubbio (Italy)	Pałac zbudowany między 1332 a 1349 r. Palace built between 1332 and 1349	Mur kamienny Stone masonry walls	2 GHz z pojedynczym ekranowaniem 2 GHz, single-fold shielded	80 cm	7–71 cm
[Santos-Assunção et al. 2014]	Barcelona (Hiszpania) Barcelona (Spain)	Szpital z 1905 r. Hospital designed in 1905	Murowane kolumny Masonry columns	Antena centralna 1,6 GHz 1.6 GHz center antenna	64 cm (cały przekrój elementu) (entire thickness of the element)	4,8–64 cm
[Solla et al. 2012]	Galicja (Hiszpania) Galicia (Spain)	Mosty Bridges	Liczne mosty z muru kamiennego Numerously stone masonry bridges	Dwie ekranowane centralne anteny 250 i 500 MHz Shielded antennas with center frequencies of 250 and 500 MHz	1000 cm	ok./ca 50–1000 cm
[Bosiljkov et al. 2010]	Žiže (Słowenia) Žiže (Slovenia)	Romańsko-gotycki kościół Romanesque-Gothic church	Częściowo zrekonstruowany mur kamienny Partly reconstructed stone masonry wall	1,5 GHz, 900 i 500 MHz 1.5 GHz, 900 MHz and 500 MHz	200 cm	nd. n/a
[Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008]	Edinburgh (UK) Edinburgh (UK)	Łuk ceglany Masonry arch	Model murowanego sklepienia Masonry arch during another laboratory tests	Antena kokardowa 1,5 GHz 1.5 GHz bow-tie antenna	35 cm (cały przekrój elementu) (entire thickness of the element)	10–35 cm
[Pérez-Gracia et al. 2008]	Walencja (Hiszpania) Valencia (Spain)	Starorzymski teatr Roman theatre	Kamienne murowane ściany i schody Stone masonry walls and tiers	Dwie anteny o środkowym paśmie 900 i 500 MHz Two different center-band antennas 900 MHz and 500 MHz	150 cm	nd. n/a
[Nuzzo et al. 2010]	Apulia (Włochy) Apulia (Italy)	Katedra z XII w. 13th-century Cathedral	Kamienna rozeta okienna Stone rosette window	900 MHz i 1,5 GHz 900 MHz and 1.5 GHz	66 cm	5–66 cm
[Kadioglu, Kadioglu 2010]	Ankara (Turcja) Ankara (Turkey)	Zgrupowanie zabytkowych rzeźb Group of historical statues	Rzeźby z piaskowca Stone bodies of the statues	Ekranowana antena 1,6 GHz 1.6 GHz shielded antenna	72 cm (cały przekrój elementu) (entire thickness of the element)	nd. n/a
[Lachowicz, Rucka 2019]	Gdańsk (Polska) Gdańsk (Poland)	Ceglany kościół gotycki Brick Gothic Catholic church	Murowane kolumny wzmocnione żelbetowymi płaszczami Masonry pillars strengthened by reinforced concrete jacketing	Zestaw dwóch poprzecznie spolaryzowanych anten 2 GHz Two sets of 2 GHz antennas with vertical and horizontal polarizations	75 cm (cały przekrój elementu) (entire thickness of the element)	4–20 cm
[Pérez-Gracia et al. 2013]	Majorka (Hiszpania) Mallorca (Spain)	Katedra w stylu katalońskiego gotyku Catalan Gothic Style Cathedral	Ośmiokątne kolumny z kamienia wapiennego Octagonal columns built with limestone ashlar	1,5 GHz i 900 MHz 1.5 GHz and 900 MHz	165 cm (cały przekrój elementu) (entire thickness of the element)	nd. n/a
[Ranalli, Scozzafava, Tallini 2004]	L'Aquila (Włochy) L'Aquila (Italy)	Średniowieczny kościół Medieval church	Ściana fasadowa z wewnętrznymi i zewnętrznymi okładzinami kamiennymi z rumoszowym rdzeniem The facade wall with inner and outer faces made of stone with coarse-grained rubble core	1,6 GHz i 600 MHz 1.6 GHz and 600 MHz	120 cm (cały przekrój elementu) (entire thickness of the element)	15–30 cm
[Duppel 2010]	Stambuł (Turcja) Stambul (Turkey)	Hagia Sophia Hagia Sophia	Główne żebra kopuły Main dome masonry ribs	1,5 GHz i 900 MHz 1.5 GHz and 900 MHz	nd. n/a	nd. n/a
[Corazzi, Conti 2011; Corazzi, Conti, Marini 2005]	Florencja (Włochy) Florence (Italy)	Katedra Santa Maria del Fiore Cathedral of Santa Maria del Fiore	Ceglana kopuła Masonry dome	1,5 GHz, 900 i 500 MHz 1.5 GHz, 900 MHz and 500 MHz	300 cm	nd. n/a

Tab. 1. Podsumowanie ważniejszych prac badawczych skupiających się na badaniach GPR konstrukcji murowych  
Tab. 1. Summary of the major research works of GPR examination of the masonry structures

Źródło Ref.	Najważniejsze ustalenia i obserwacje Major findings and remarks
[Catapano et al. 2018]	Małe rysy nie są widoczne. Badanie georadarem pozwoliło oszacować głębokość pęknięć i pustek na wybranym obszarze oraz grubość wewnętrznych warstw kamiennych. <i>Small cracks are not visible. The GPR survey allowed to estimate the depth of cracks and voids in the selected area, and the depth of the inner stone layers.</i>
[Santos-Assunção et al. 2014]	Wewnątrz kolumny wykryto wzmocnienie w postaci metalowej rury w różnych stadiach korozji. Częściowo możliwe było odwzorowanie zakresu korozji. Testy powiązane z innymi badaniami NDT. <i>A reinforcement in the form of a metal tube was detected inside the column, which was in various stages of corrosion. It was partially possible to map the extent of its corrosion. The tests were associated with other NDT tests.</i>
[Solla et al. 2012]	Pozyskano informacje na temat ukrytej geometrii, a także dawnych warstw renowacyjnych, fundamentów mostu, grubości pierścienia kamiennego, zawilgoconych obszarów oraz stanu zasypki mostu. <i>Information about the hidden geometry also previous restoration patterns, bridge foundations, ring stone thickness, moist zones, and fill conditions in masonry bridges.</i>
[Bosiljkov et al. 2010]	Badania ujawniły obecność żelbetowej belki w nowo zrekonstruowanej ścianie. Wskazano również na brak zakotwienia pomiędzy nową ścianą a historyczną konstrukcją. <i>The research revealed the positions of the RC beams in the newly reconstructed wall, and also showed that the new wall is not anchored into the existing (historic) structure.</i>
[Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008]	„Nie można wykryć rozwarstwienia grubości włosa między zaprawą a murem ceglanym [...]”. <i>“Detection of hairline delamination between the mortar and the brick masonry cannot be detected (...)”</i>
[Pérez-Gracia et al. 2008]	Autorzy byli w stanie wykryć różne okresy budowy i następujące po sobie warstwy historyczne. Możliwe było również wykrycie metalowych wzmocnień. <i>Authors were able to detect different construction periods and following conservation patterns. Also, detection of metal reinforcements was possible.</i>
[Nuzzo et al. 2010]	Możliwa była identyfikacja różnych uszkodzeń oraz stalowych łączników, ponadto badacze byli w stanie rozróżnić typy budulca kamiennego. <i>It was possible to identify different fractures and iron bolts, moreover, scientists were able to distinguish between different types of stone.</i>
[Kadioglu, Kadioglu 2010]	Wykryto wypełnione powietrzem pęknięcia i ubytki wewnątrz elementów z trawertynu. Wnioskowanie o ogólnej stabilności elementów. <i>Detection of air-filled fractures and cavities in the travertine. Inference about the general stability of elements.</i>
[Lachowicz, Rucka 2019]	Ustalono grubość pierwszej warstwy cegieł oraz płaszczki żelbetowego. Specjalnie zastosowany algorytm umożliwił precyzyjną wizualizację prętów zbrojeniowych. <i>The thickness of first layer of bricks and of concrete jacket has been established. Especially applied algorithm enabled precise visualization of the rebar.</i>
[Pérez-Gracia et al. 2013]	Dokonano oceny jakościowej poszczególnych elementów obiektu. Wskazana została grubość niektórych warstw konstrukcyjnych. <i>Qualitative assessment of individual elements of the facility. Indicated thicknesses of some construction layers.</i>
[Ranalli, Scozzafava, Tallini 2004]	Grubość muru została precyzyjnie określona w zależności od kondygnacji. Zidentyfikowano kilka stref okładziny marmurowej odspojonej od rumoszewego rdzenia muru. <i>The wall thickness was precisely determined depending on its tier. Couple of zones of the ashlar facing detached from the rubble core has been detected.</i>
[Duppel 2010]	Zostały zmierzone stałe dielektryczne wszystkich żeber kopuły w celu potwierdzenia różnych okresów historycznych ich konstrukcji. <i>The dielectric constants of all the ribs were measured using two methods to confirm the different historical periods of its reconstruction.</i>
[Corazzi, Conti 2011; Corazzi, Conti, Marini 2005]	Przebadano całą grubość przekroju w wybranych miejscach. Autorzy ujawnili warstwową strukturę kopuły. <i>The entire thickness of the section at selected locations has been tested. The authors revealed the layered structure of the dome.</i>

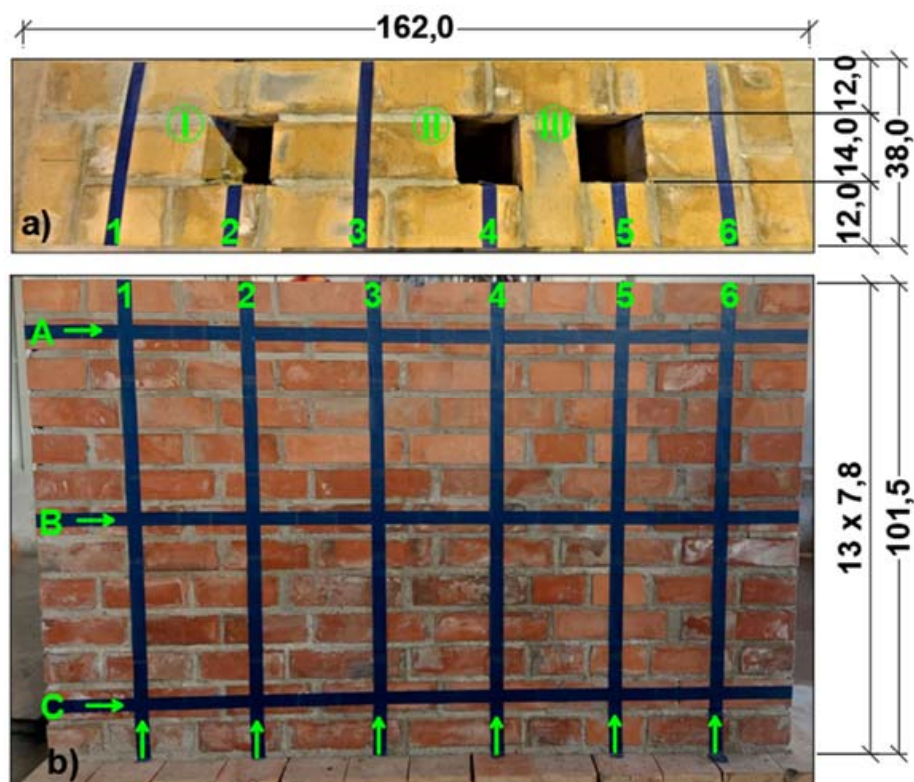
Tab. 2. Podsumowanie wszystkich omówionych badań

Tab. 2. Summary of the studies discussed

tw. murze workowym i zaproponowali metodę poprawy szacowania prędkości przebiegu fali elektromagnetycznej przy użyciu praw optyki geometrycznej [Negri, Aiello 2021]. Dzięki zastosowaniu tej metody możliwe jest dokładniejsze oszacowanie wymiarów analizowanego przekroju, w tym głębokości pustek powietrznych. Badając zjawisko delaminacji, czyli oddzielania się warstw licowych od pozostałej części konstrukcji, należy wziąć pod uwagę kwestię rozdzielczości GPR. Wykrywanie małych rozwarstwień, np. wzmocnień powierzchniowych, za pomocą georadaru nie jest możliwe [Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008], podczas gdy wykrycie oddzielenia warstwy licowej zabytkowego muru od jego właściwej konstrukcji zostało przeprowadzone z powodzeniem [Ranalli, Scozzafava, Tallini 2004]. Podobnie jak w wypadku delaminacji kwestia diagnostyki spękanych obszarów muru zależy od szerokości rozwarcia rys. Gdy pęknięcia są małe, nie jest możliwe ich zidentyfikowanie na wykresie radarowym

the case of delamination, the question of diagnosis of cracked areas of masonry depends on the width of the opening cracks. In the case of small fractures, it is not possible to indicate them on a radargram obtained from a survey using a relatively high frequency antenna [Catapano et al. 2018]. Since cracks in masonry structures are usually transverse (running from the face into the depth of the wall), their examination is often possible in a direct manner, especially since GPR makes it possible to detect only cracks of significant dilation [Bavusi, Di Napoli, Soldovieri 2010]. In summary, the use of GPR for diagnosing areas of cracked masonry is currently ineffective and requires improvement.

The historical buildings under examination have often undergone many reconstructions and structural modifications throughout history—individual fragments of the structure come from different historical periods. Architects and architectural histori-



Ryc. 1. Widok modelu z wymiarami (w cm): a) z góry, z oznaczeniami ścieżek i widocznymi kanałami, b) z przodu, z zaznaczonymi ścieżkami i kierunkami, wzdłuż których wykonano przejazdy georadarem; fot. P. Frąckiewicz

Fig. 1. Top view of the model with dimensions [cm]: a) top view with path markings and visible channels, b) front view with marked paths and directions along which GPR runs were made; photos by P. Frąckiewicz

uzyskany z badania, nawet przy użyciu anteny o stosunkowo wysokiej częstotliwości [Catapano et al. 2018]. Ponieważ pęknięcia w konstrukcjach murowych przebiegają zazwyczaj przez cały przekrój ściany, ich badanie jest często możliwe w sposób bezpośredni, zwłaszcza że georadar umożliwia wykrycie tylko pęknięć o znacznym stopniu rozwarcia [Bavusi, Di Napoli, Soldovieri 2010]. Podsumowując, wykorzystanie georadaru do diagnozowania zarysowanych obszarów muru jest obecnie mało skuteczne i wymaga udoskonalenia.

Historyczne budynki poddawane badaniom często na przestrzeni dziejów przechodziły wiele przekształceń i modyfikacji strukturalnych – poszczególne fragmenty konstrukcji mogą pochodzić z różnych okresów historycznych. Architekci i historycy architektury poszukują obszarów wzajemnego przenikania się tych okresów w strukturze budynku. Nakładające się okresy można zidentyfikować dzięki różnicom w materiałach i wątkach ceglanych. Przykładem rozpoznania okresów konstrukcyjnych za pomocą fal radiowych jest badanie kamiennych schodów w starożytnym amfiteatrze [Pérez-Gracia et al. 2008]. Innym przypadkiem takiego zastosowania GPR jest część badan starożytnych kamiennych mostów [Solla et al. 2012], gdzie możliwe było uzyskanie informacji na temat okresów wcześniejszych napraw. Jeśli istnieją różnice materiałowe, można je wykryć przez różnicę we właściwościach dielektrycznych. Kampania pomiarowa

ans seek out areas of overlap between these time periods in the building's structure. These overlaps can be distinguished through variances in materials and differences in brickwork patterns. An example of the identification of structural periods by means of radio waves is the study of stone stairs in an ancient amphitheater [Pérez-Gracia et al. 2008]. Another example of such application of GPR is the survey of stone bridges [Solla et al. 2012], where it was able to obtain information about previous renovations. If material variations exist, then their detection can be achieved through the discrepancy of dielectric properties. A measurement campaign was conducted on the Hagia Sophia dome [Duppel 2010], which demonstrated that the periods of origin of specific fragments of the structure can be determined based on the dielectric constant.

It has already been mentioned that the dielectric properties of materials, and hence GPR measurements, are strongly dependent on moisture content. There are four methods by which the amount of water contained in a porous medium can be estimated [Benedetto, Benedetto 2014]. Mapping of wet areas in reinforced concrete is a widely recognized field [Laurens et al. 2002; Hugenschmidt, Loser 2008], moisture content can also be successfully imaged in masonry made of aggregate blocks [Leppala, Ham-

przeprowadzona na koptule Hagia Sophia [Duppel 2010] udowodniła dużą skuteczność zastosowania georadaru w określaniu okresu pochodzenia poszczególnych fragmentów kopuły na podstawie stałej dielektrycznej.

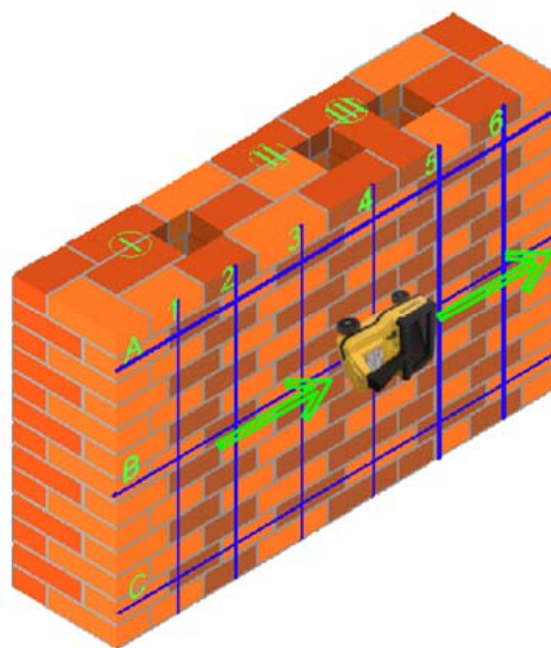
Wspomniano już, że właściwości dielektryczne materiałów, a tym samym wyniki pomiarów GPR, są wysoce zależne od poziomu wilgotności. Istnieją cztery metody szacowania ilości wody zawartej w porowatym ośrodku [Benedetto, Benedetto 2014]. Mapowanie zawilgoconych obszarów w żelbecie jest dobrze rozpoznany zagadnieniem [Laurens et al. 2002; Hugenschmidt, Loser 2008], wilgotność może być również z powodzeniem obrazowana w murach skonstruowanych z silikatów [Leppala, Hamrouche, Saarenketo 2018]. Jeśli chodzi o konstrukcje historyczne, strefy o różnej wilgotności zostały z powodzeniem oznaczone podczas badań kamiennych mostów [Solla et al. 2012] oraz ceglanego sklepienia [Barone, Ferrara 2018].

### Testy doświadczalne na murowanym modelu

Model badawczy stworzony w laboratorium Zakładu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Wrocławskiej (ryc. 2) posłużył do przetestowania, a następnie oceny przydatności ręcznego georadaru do badania konstrukcji murowych. Badania przeprowadzono w obszarach wytypowanych na podstawie wnikliwej analizy opublikowanych prac badawczych. W pracach tych wykazany jest podział na badania wgłębne i przypowierzchniowe. Badania wgłębne obejmują określenie grubości warstw konstrukcyjnych i wykończeniowych, wykrywanie wtrąceń metalowych i pustek powietrznych, badanie historycznych przebudów i połączeń, a także próby określenia parametrów fizycznych. Badania przypowierzchniowe z kolei obejmują testowanie odspojenia warstw wykończeniowych, określanie delaminacji wzmocnień powierzchniowych, testowanie muru w obszarach pęknięć i mapowanie wilgotności. W opisaney kampanii eksperymentalnej autorzy skupili się jedynie na testach wgłębnych. Badania przypowierzchniowe w chwili powstawania artykułu nadal trwają.

Model ceglany składa się z muru o grubości trzech cegieł z trzema kanałami biegnącymi przez całą jego wysokość. Szczegółowe wymiary i geometrię przedstawiono na rycinie 1. Model jest posadowiony na specjalnie wykonanej drewnianej konstrukcji, która umożliwia otwieranie i zamykanie poszczególnych kanałów, pozwalając na wymianę ich zawartości. Między pracami murarskimi a wstępnymi testami GPR minęły ponad trzy miesiące, aby upewnić się, że poziomy wilgotności są jednakowe i stałe w całej konstrukcji.

Badania przeprowadzono przy użyciu ręcznego georadaru C-Thru. Urządzenie zawiera dwa zestawy spolaryzowanych poprzecznie anten nadawczo-odbiorczych pracujących na częstotliwości 2,0 GHz [C-Thru Datasheet b.d.]. Akwizycja danych obejmowała wykonanie trzech poziomych i sześciu pionowych skanów podczas każdego eksperymentu. Po zebraniu dane zostały przeniesione do komputera i przetworzo-



Ryc. 2. Widok 3D modelu badawczego; autorem wszystkich rysunków jest P. Frąckiewicz

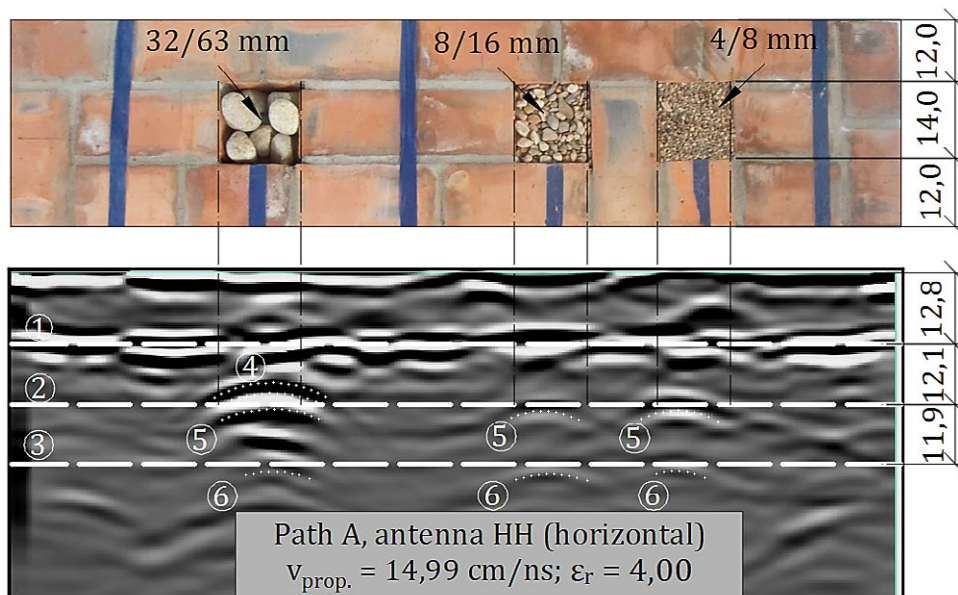
Fig. 2. 3D Overview of the test model; all Figures by P. Frąckiewicz

rouche, Saarenketo 2018]. As far as historic structures are concerned, zones with different water contents have been successfully determined during studies of stone bridges [Solla et al. 2012] or brick vault [Barone, Ferrara 2018].

### Experimental tests on masonry model

The research model created in the Department of Building Structures laboratory at the Wrocław University of Science and Technology was used to test and then evaluate the suitability of the hand-held GPR (Fig. 2) for testing masonry structures. Tests were conducted in fields selected through careful consideration of published research works. Issued to date, reveals a division between in-depth and near-surface tests. In-depth testing includes determining the thickness of structural and finishing layers, detecting metal inclusions and air voids, investigating historical rebuilding and interfacings also attempts to determine physical parameters. Near-surface tests include testing the delamination of finish layers, determining the delamination of surface reinforcements, testing masonry in cracked areas and moisture mapping. In the described experimental campaign, the authors have only focused on in-depth testing. Near-surface tests are ongoing on the date of preparation of the paper.

The brick model comprises a three-brick-thick section of masonry, with three channels that run the entire height of the model. Detailed dimensions and geometry are depicted in Fig. 1. The model rests on a bespoke wooden structure that enables the individual channels to be opened and closed, enabling the contents to be replaced. More than three months passed between the



Ryc. 3. Eksperyment C. Widok z góry wypełnionego modelu i opracowany radargram ścieżki A: 1 – granica grubości pierwszej warstwy cegieł, 2 – granica grubości drugiej warstwy cegieł, określona przez odbicie fali od tylnej ściany kanałów (5), 3 – granica grubości całego modelu, określona przez załamanie fali przy przejściu z ośrodka murywanego do powietrza, ustalona tylko w miejscach usytuowania kanałów (6), 4 – odbicie fali EM wewnątrz kanału wypełnionego kruszywem o największym uziarnieniu

Fig. 3. Experiment C: top view of filled model and evaluated radargram of path A. (1) Thickness limit of the first layer of bricks. (2) Thickness limit of the second layer of bricks. Determined by the reflection of the wave from the back wall of the channels (5). (3) Thickness limit of the entire model. Determined by the refraction at the transition of the wave from the masonry medium to the air, established only at the locations of the channels (6). (4) EM wave reflection inside a channel filled with aggregate of the largest grain size

ne przy użyciu oprogramowania GRED HD. Algorytm postprocessingu zastosowany dla każdego radargramu był identyczny i maksymalnie uproszczony, aby umożliwić obiektywną ocenę przez innych ekspertów. Zastosowano następujące algorytmy przetwarzania danych: korekta czasu zero, usuwanie tła i *bandpass* w dziedzinie przestrzennej. W niektórych przypadkach konieczne było zastosowanie wzmocnienia liniowego. Ostatnim krokiem było zgromadzenie B-skanów w programie do grafiki wektorowej i ich szczegółowy opis.

Przeprowadzono następujące eksperymenty w głębszego badania GPR konstrukcji murowanej:

- Kalibracja za pomocą stalowego pręta umieszczonego za tylną ścianą modelu.
- Testowanie modelu z pustymi wszystkimi trzema kanałami.
- Testowanie modelu z kanałami wypełnionymi kruszywem o frakcjach kolejno: 4–8 mm, 8–16 mm, 32–63 mm.
- Badanie modelu z kanałami wypełnionymi kruszywem o frakcjach kolejno: 16–22 mm, 22–32 mm, 32–63 mm.
- Testowanie modelu z plastikowymi rurkami o średnicach: 2,5 cm, 5 cm i 8,5 cm umieszczonymi w kanałach oraz wypełnieniem kanałów piaskiem (0–2 mm).
- Testowanie modelu z prętem stalowym i rurkami o średnicach: 1,8 cm, 5 cm i 9 cm umieszczonymi w kanałach oraz wypełnieniem kanałów piaskiem (0–2 mm).

Pierwsze dwa eksperymenty (A, B) miały na celu przede wszystkim kalibrację ustawień urządzenia oraz określenie prędkości propagacji fali EM (elektromagne-

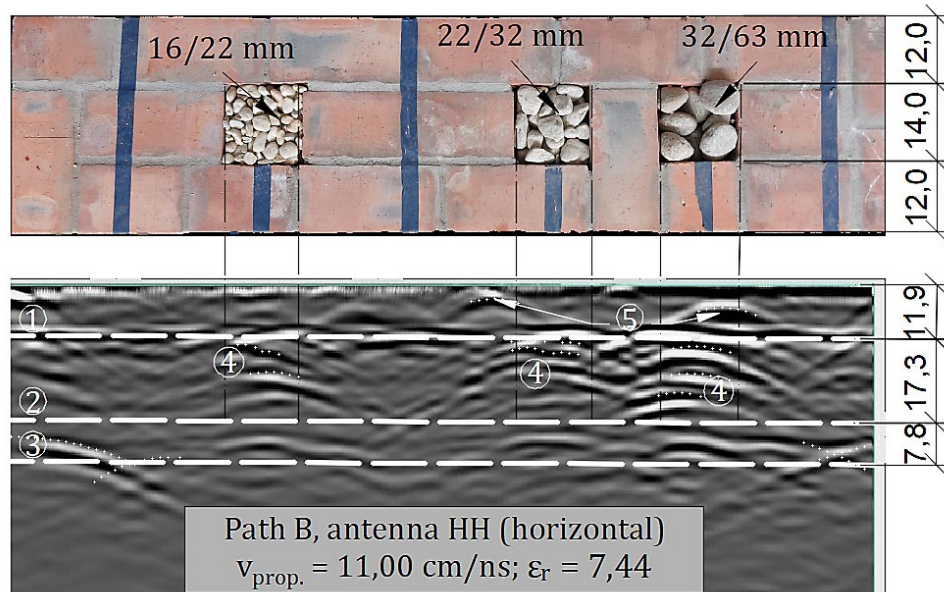
laying of the bricks and the initial GPR tests to ensure the moisture levels were consistent and

The surveys were conducted using C-Thru handheld GPR. The device has two sets of cross-polarized transmit and receive antennas operating at 2.0 GHz [IDS GeoRadar Srl]. Data collection involved conducting three horizontal and six vertical scans during each experiment. Following collection, the data was transferred to a computer and post-processed using GRED HD software. The post-processing algorithm used for each radargram was identical and simplified to ensure objective evaluation by other experts. The data processing algorithms used: time zero correction, background removal and bandpass both in the space domain. Occasionally linear gain had to be involved. The last step included collecting B-scans in a vector graphics program and describing them in detail.

Following experiments were carried out on in-depth GPR testing of the masonry structure:

- Calibration with a steel rod placed behind the back wall of the model.
- Testing of the model with all three channels empty.
- Testing of the model with channels filled in sequence with aggregates of fractions: 4–8 mm, 8–16 mm, 32–63 mm.
- Testing of the model with channels filled in sequence with aggregates of fractions: 16–22 mm, 22–32 mm, 32–63 mm.
- Testing of the model with plastic pipes with the following diameters: 2.5 cm, 5 cm, 8.5 cm placed in





Ryc. 4. Eksperyment D. Widok z góry wypełnionego modelu i opracowany radargram ścieżki B: 1 – granica grubości pierwszej warstwy cegieł, 2 – granica grubości drugiej warstwy cegieł, 3 – granica grubości całego modelu. określona przez załamanie przy przejściu fali z ośrodka murowanego do powietrza, ustalona tylko w miejscach lokalizacji kanałów, 4 – odbicia fal EM wewnątrz poszczególnych kanałów od większych kamieni wypełniających, 5 – odbicia fal od pionowych spoin występujących wzdłuż ścieżki

Fig. 4. Experiment D: top view of filled model and evaluated radargram of path B. (1) Thickness limit of the first layer of bricks. (2) Thickness limit of the second layer of bricks. (3) Thickness limit of the entire model. Determined by the refraction at the transition of the wave from the masonry medium to the air, established only at the locations of the channels. (4) EM wave reflections inside individual channels from major infill stones. (5) Wave reflections from vertical joints occurring along the path

tycznej). W ich wyniku ustalono, że średnia prędkość propagacji fali EM przez model wynosi 11 cm/ns, a stała dielektryczna jest równa 7,44. Możliwe było również stosunkowo dokładne określenie grubości warstw muru oraz wymiarów samych kanałów. Średni błąd w wyznaczeniu wymiarów geometrycznych wyniósł 7,33%. Kolejne dwa eksperymenty (C, D) zostały zaplanowane w taki sposób, aby symulować częsty scenariusz w historycznych konstrukcjach, gdzie mur składa się z dwóch warstw licowych i luźnego wypełnienia. Ich celem było określenie, jaki wpływ na obrazowanie GPR ma rodzaj wypełnienia i jakie są najmniejsze fragmenty wypełnienia, które można zidentyfikować. Ryciny 3 i 4 przedstawiają wypełnienie kanału różnymi zasypkami wraz z przykładami opracowanych radargramów.

Konieczna była kalibracja pomiarów przy okazji każdej serii eksperymentów z różnymi rodzajami zasypek. Pomimo to średni błąd pomiarów geometrycznych w obu próbach wyniósł 13,75%. Jest to prawdopodobnie związane z różnym poziomem wilgotności materiału zasykowego. Podczas każdego badania możliwe było ustalenie położenia kanałów i wymiarów poszczególnych warstw muru. Ustalono, że przy użyciu anten 2,0 GHz nie jest możliwe zidentyfikowanie ziaren mniejszych niż 16 mm. Tylko w eksperymencie D można było zaobserwować odbicie fali od elementu wypełniającego.

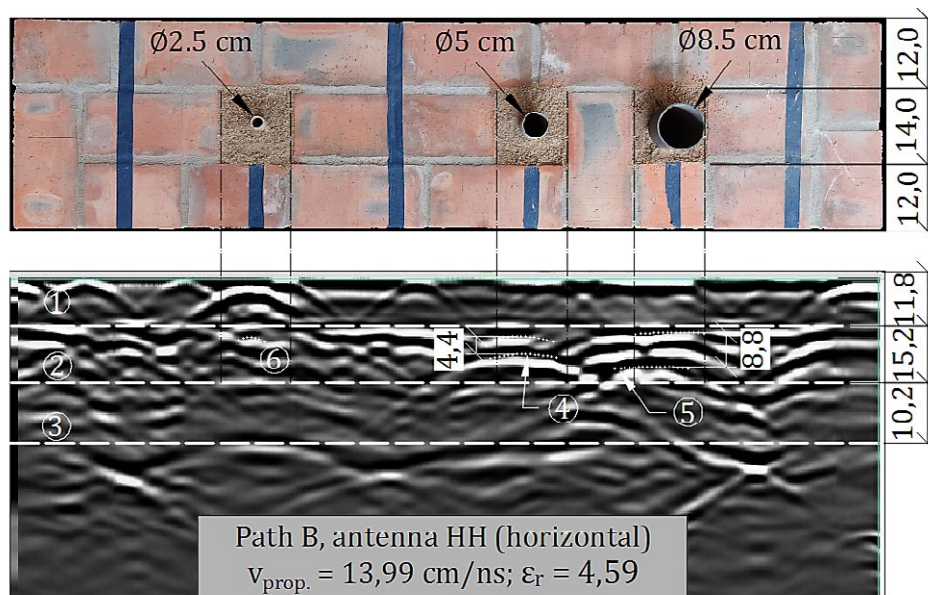
Eksperyment E, polegający na zastosowaniu plastikowych rurek o różnych średnicach, został zaprojektowany w celu symulacji pustek powietrznych i kanałów, które nie są rzadkością w historycznych konstrukcjach murowanych (cegły dziurawki, gniazda belek stropo-

the channels and refilling the channels with sand (0–2 mm).

- F. Testing of the model with steel rod and pipes with the following diameters: 1.8 cm, 5 cm, 9 cm placed in the channels and refilling the channels with sand (0–2 mm).

The first two experiments (A, B) were basically aimed at calibrating the device settings and determining the propagation speed of the EM (electromagnetic) wave. As a results, it was determined that the average speed of EM wave propagation through the model is 11 cm/ns and the dielectric constant is equal to 7.44. It was also possible to determine comparatively accurately the thickness of the layers of masonry and the dimensions of the channels themselves. The average error in determining geometric dimensions was 7.33%. The next two experiments (C, D) were designed to simulate a common scenario in historic structures, where the masonry consists of two face layers and loose fill. The aim was to determine what influence the type of fill has on GPR imaging and what are the smallest fragments of fill that can be registered. Fig. 3 and Fig. 4 demonstrates the channel filling with various backfills along with examples of elaborated radargrams.

It was necessary to calibrate the measurements at each attempt during the experiments with different types of channel backfill. Despite this, the average error of geometric measurements in both trials was 13.75%. This was probably related to the different moisture content of the backfill material. During every survey,



Ryc. 5. Eksperyment E. Widok z góry wypełnionego modelu i opracowany radargram ścieżki B: 1 – granica grubości pierwszej warstwy cegieł, 2 – granica grubości drugiej warstwy cegieł, 3 – granica grubości całego modelu, 4 – odbicie fali EM od przedniej i tylnej ściany rurki o średnicy 5 cm, 5 – odbicie fali EM od przedniej i tylnej ścianki rury o średnicy 8,5 cm, 6 – niewielkie odbicie fali od najmniejszej rurki, brak możliwości pomiaru średnicy

Fig. 5. Experiment E: top view of filled model and evaluated radargram of path B. (1) thickness limit of the first layer of bricks. (2) Thickness limit of the second layer of bricks. (3) Thickness limit of the entire model. (4) Refraction of the EM wave from the front and back walls of a 5cm diameter tube. (5) Refraction of the EM wave from the front and back walls of a 8.5cm diameter tube. (6) Minor wave reflection from the smallest tube—no diameter measurement possible

wych, szczeliny wypełnione powietrzem itp.). Rycina 5 przedstawia, podobnie jak w poprzednich badaniach, widok z góry wypełnionego modelu wraz z jednym z przykładowych B-skanów, jakie zostały opracowane. Kanaly wypełniono piaskiem o stałej wilgotności względnej – takiej samej jak dla pozostałych elementów modelu. Wypełnienie piaskiem nie powodowało żadnych zakłóceń fal EM pochodzących z georadaru.

Przeprowadzone badanie pozwoliło określić większość wymiarów geometrycznych z zadowalającą dokładnością wynoszącą średnio 90,8%. Możliwe było również określenie średnicy dwóch większych rur z błędem 7,65%. Ustalenie wymiarów najmniejszej z nich nie powiodło się, choć wskazano jej dokładną lokalizację.

Eksperyment F był ostatnim przeprowadzonym w tej serii badań i przebiegał bardzo podobnie do eksperymentu E, z wyjątkiem tego, że wykorzystano w nim rury stalowe. Widok eksperymentu przedstawiono na rycinie 6. Metalowe elementy często występują wewnątrz zabytkowych konstrukcji murowanych, mogą to być wszelkiego rodzaju łączniki mechaniczne, wtórnie wprowadzone wzmocnienia (ściagi, pierścienie, belki stalowe) lub pozostałości elementów architektonicznych.

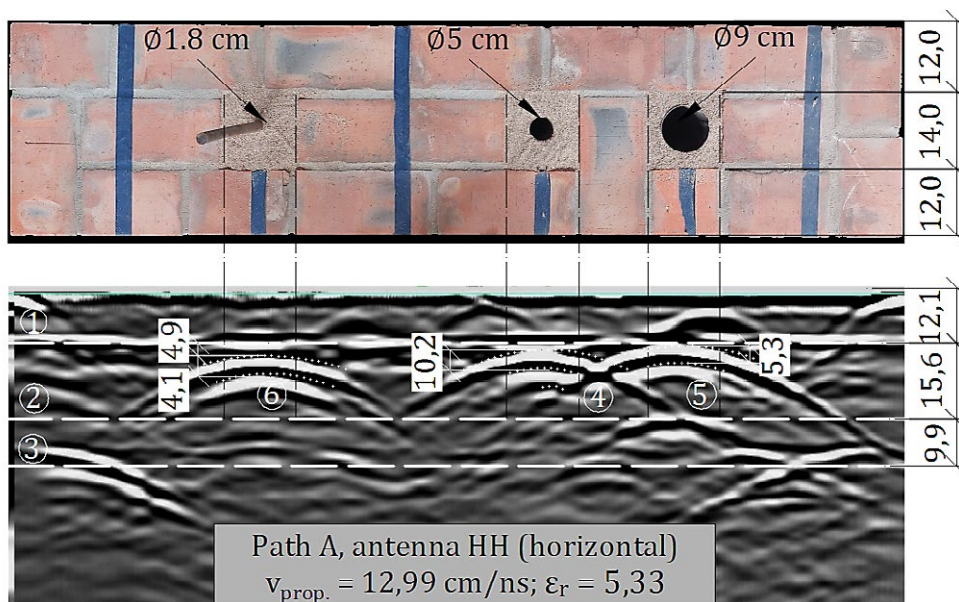
W badaniu modelu murowanego z metalowymi intruzjami, których wartość stałej dielektrycznej znacznie się różni od pozostałych elementów konstrukcji, określenie grubości z dostateczną dokładnością było możliwe jedynie dla dwóch pierwszych warstw cegieł. Ze względu na brak możliwości przenikania fal EM przez metal nie jest możliwe ustalenie średnicy poszczególnych rur. Można jedynie w przybliżeniu określić głębo-

was feasible to establish the position of the channels and the space between the distinct masonry layers. It was found that with the use of 2.0 GHz antennas, capturing grains smaller than 16 mm was not feasible. Only in experiment (D), situated within the channel, could the reflection of the wave from the fill element be observed.

Experiment (E) involving plastic tubes of various diameters was designed to simulate air voids and conduits that are not uncommon inside historic masonry structures (hollow bricks, sockets from wooden beams, air-filled fractures, etc.) Fig. 5 shows, as in previous studies, a top view of the filled model along with one of the example B-scans that were developed. The channels were filled with sand with a fixed relative humidity—the same as the other components of the model. The sand fill in general did not interfere in any manner with the EM waves originating from the GPR.

The survey was successful in determining most geometric dimensions with a satisfactory accuracy of 90.8% on average. It was also possible to determine the diameter of the two larger tubes with an error of 7.65%. Establishing the dimensions of the smallest one was not successful, although its pinpoint location was indicated.

Experiment (F) was the last conducted in this research series and was remarkably analogous to experiment (E) except that steel tubes were used. A view of the experiment is shown in Fig. 6. Metal components are very likely to be found inside historic masonry structures, these may include all kinds of mechanical fasteners, secondarily introduced reinforcements (tie



Ryc. 6. Eksperyment F. Widok z góry wypełnionego modelu i opracowany radargram ścieżki A: 1 – granica grubości pierwszej warstwy cegieł, 2 – granica grubości drugiej warstwy cegieł, 3 – granica grubości całego modelu, 4 – wielokrotne odbicia fali EM od powierzchni metalowej rury o średnicy 5 cm, 5 – odbicia fali od rurki o średnicy 9 cm, 6 – odbicie pochodzące od pręta o średnicy 1,8 cm, przy czym zmierzono odległość pręta od pierwszej warstwy cegieł

Fig. 6. Experiment F: top view of filled model and evaluated radargram of path A. (1) Thickness limit of the first layer of bricks. (2) Thickness limit of the second layer of bricks. (3) Thickness limit of the entire model. (4) Multiple, reflections of the EM wave from the surface of a metal tube with a diameter of 5 cm. (5) Reflections of the wave from the 9 cm diameter tube. (6) Reflection originating from a bar with a diameter of 1.8 cm. The distance of the rod from the first layer of bricks was measured

kość ich położenia względem pierwszej warstwy cegieł. Odbicia fal od metalowych elementów są na tyle silne, że zakłócają interpretację pozostałej części radargramu. Zaobserwowano również, że dla rury o średnicy 5 cm umieszczonej w środkowym kanale odbicie było silniejsze niż dla rury o większej średnicy (9 cm). Grubość ścianki mniejszej rurki wynosiła 3,5 mm, podczas gdy grubość ścianki większej – tylko 1,4 mm.

### Omówienie wyników

W większości opisanych powyżej prac badawczych w zakresie zastosowania georadaru w konstrukcjach zabytkowych został on wykorzystany do określenia grubości poszczególnych warstw konstrukcyjnych i wykończeniowych [Catapano et al. 2018; Bosiljkov et al. 2010; Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008; Nuzzo et al. 2010; Kadioglu, Kadioglu 2010; Duppel 2010; Corazzi, Conti 2011; Corazzi, Conti, Marini 2005]. Również podczas przeprowadzonych przez autorów eksperymentów grubość każdej warstwy muru była każdorazowo określana. Aby taka operacja była skuteczna, niezbędna jest wcześniejsza kalibracja urządzenia lub znajomość stałej dielektrycznej badanego medium. Naukowcy wielokrotnie zwracają uwagę na konieczność przeprowadzenia kalibracji urządzenia na badanym obiekcie. W wypadku testów laboratoryjnych modelu wykonanie kalibracji nie było trudne: możliwy był dostęp do modelu ze wszystkich stron i fizyczny pomiar jego grubości, a jego geometria była dokładnie określona. Podczas przeprowadzania testów *in-situ* taka sytuacja jest rzadkością, a do prawidłowej kalibracji

rods, rings, steel beams) or remnants of architectural elements.

In the case of testing a masonry model with metal intrusions, which have a significantly different value of the dielectric constant, it was only possible to determine the thickness of the first two layers of bricks with satisfactory accuracy. As a result of the impossibility of penetrating EM waves through metal, it is not possible to determine the diameter of individual tubes. Only the depth of their position relative to the first layer of bricks can be approximated. Wave reflections from the metal elements are sufficiently intense that they interfere the interpretation of the rest of the radargram. It was also observed that for a 5 cm diameter tube located in the middle channel, the reflection was stronger than for a larger diameter tube (9 cm). The wall thickness of the smaller one was 3.5 mm while the wall thickness of the larger one was only 1.4 mm.

### Discussion

In most of the research works described in section 2, the GPR was used to determine the thickness of individual construction and finishing layers [Catapano et al. 2018; Bosiljkov et al. 2010; Diamanti, Giannopoulos, Forde 2008; Nuzzo et al. 2010; Kadioglu, Kadioglu 2010; Duppel 2010; Corazzi, Conti 2011; Corazzi, Conti, Marini 2005]. Also, during our own experiments, the thickness of each layer of masonry was determined each time. For such an operation to be effective, it is necessary to calibrate the device in advance or the dielectric constant of the test medium must be known. Researchers repeatedly

często wymagane są towarzyszące badania niszczące, takie jak odkrywki lub odwierty rdzeniowe.

Inny bardzo skuteczny obszar zastosowania badań georadarowych to wykrywanie i lokalizacja elementów metalowych wewnątrz badanego ośrodka. Jest to możliwe dzięki dużej różnicy we właściwościach dielektrycznych muru i metalu. W pracy [Santos-Assunção et al. 2014] badacze stworzyli trójwymiarowy obraz metalowej rury stanowiącej wzmocnienie zabytkowej kolumny, który był bardzo zbliżony do rzeczywistego stanu zachowania tego elementu. Model powstał na podstawie tomografii, której uzyskanie było możliwe dzięki wielokrotnemu skanowaniu kolumny ze wszystkich stron. W badaniu przeprowadzonym przez autorów (skanowanie tylko z jednej strony) możliwe jest jedynie określenie położenia metalowej rury oraz głębokości, na jakiej się ona znajduje. Ze względu na brak skanowania wzdłuż innych płaszczyzn i zjawisko dyspersji fal przez metal nie było możliwe określenie podczas testów laboratoryjnych wymiarów żadnej z rur. Gdy nie występują ubytki w ściankach rury, bardzo trudno jest również jednoznacznie stwierdzić, czy mamy do czynienia ze stalowym prętem czy z rurą. W innych badaniach [Bosiljkov et al. 2010; Pérez-Gracia et al. 2013; Nuzzo et al. 2010], podczas których badacze mieli do czynienia z elementami metalowymi, ograniczali się oni jedynie do określenia lokalizacji elementu i głębokości, na jakiej się znajdował.

Analogicznie do metalu również powietrze charakteryzuje się dużym kontrastem stałej dielektrycznej pomiędzy ośrodkiem murowanym. Dlatego też podczas badań georadarowych często identyfikowane są wszelkiego rodzaju pustki. Podczas eksperymentu B, który polegał na skanowaniu modelu z pustymi kanałami, możliwe było precyzyjne określenie wymiarów (zarówno głębokości, jak i szerokości) zbudowanych kanałów. Eksperyment E z kolei pozwolił z dokładnością 90,4% określić przekrój plastikowych rurek imitujących pustki i pęknięcia wewnątrz modelu. Próba oszacowania wielkości pęknięć i pustek powiodła się również w przypadku opisanym przez Ilarię Catapano i innych [Catapano et al. 2018]. Identyfikacja mniejszych ubytków została przeprowadzona podczas badania zabytkowych rzeźb kamiennych przez Selme i Yusufa K. Kadioglu [Kadioglu, Kadioglu 2010]. W badaniach przedstawionych w niniejszym artykule udało się zidentyfikować małą rurkę (o średnicy 2,5 cm), ale podobnie jak w badaniach opisanych przez Kadioglu, nie udało się określić jej dokładnego rozmiaru, a jedynie oszacowano głębokość, na jakiej się znajduje.

Eksperymenty C i D zostały przeprowadzone w celu potwierdzenia, czy podobnie jak w przypadku opisanym w [Solla et al. 2012], możliwe jest rozróżnienie i zbadanie wypełnienia konstrukcji murowej. W wyniku tych eksperymentów określono najmniejszy rozróżnialny element wypełnienia (16–22 mm) z użyciem stosowanego narzędzia. Analiza ta pozwoliła również na wyciągnięcie wniosków dotyczących badania historycznych przewarstwień, co jest wykonalne w ograniczonym zakresie. Rzeczywiście w ramach badań GPR, jak to opisano w [Pérez-García et

emphasize the necessity of challenging calibration of the device on the test object. In the case of the laboratory tests of the model, calibration was straightforward because it was possible to access the model from all sides, physically measure its thickness, and the exact geometry was known. When performing in-situ testing, such a situation is uncommon, and accompanying destructive testing such as excavation or core drilling is often required for correct calibration.

Another highly effective area of application of GPR surveys is detection and localization of metallic elements inside the surveyed medium. This is possible due to the major difference in dielectric properties between masonry and metal. In the paper [Santos-Assunção et al. 2014], the researchers created a three-dimensional image of the metal pipe that is the reinforcement of the historic column, which was very close to the actual state of preservation of the element. The model was created on the basis of tomography, which was possible to obtain due to multiple scans of the column from all sides. In the case of our study (scanning only from one side), it is possible to determine the position of the metal pipe, as well as the depth at which it is located. Due to the lack of scans along other planes and the phenomenon of wave scattering by the metal, it was not possible to determine the dimensions of any of the pipes during the laboratory tests. When none of the pipe's walls are damaged, it is also very difficult to determine unequivocally whether it is a steel bar or a pipe. In other tests [Bosiljkov et al. 2010; Pérez-Gracia et al. 2013; Nuzzo et al. 2010] during which researchers deal with metal elements, as in the case of our work, they were limited only to determining the location of the element and the depth at which it was located.

Analogous to metal, air is also characterized by a vast contrast of dielectric constant between the masonry medium. Therefore, all kinds of voids are often identified during GPR surveys. During Experiment B, which involved scanning the model with empty channels, it was possible to precisely determine the dimensions, (both depth and width) of the constructed channels. Experiment E, on the other hand, made it possible to determine, with 90.4% accuracy, the cross-section of plastic tubes imitating voids and cracks inside the model. The attempt to estimate the size of cracks and voids was also successful in the case described in [Catapano et al. 2018]. Identification of smaller voids was carried out in [Kadioglu and Kadioglu 2010] when studying historic stone sculptures. In the case of the research presented in this article, it was possible to identify a small tube (2.5 cm diameter), but as in the case of the research described in [Kadioglu, Kadioglu 2010], it was not possible to determine its exact size and only estimate the depth at which it is located.

Experiments C and D were conducted to confirm whether, as in the case described in [Solla et al. 2012], it is possible to distinguish and examine the infill of a masonry structure. As a result of these experiments, the smallest distinguishable element of fill (16–22 mm) using the

al. 2008] i [Nuzzo et al. 2010], możliwe jest rozróżnienie dwóch materiałów budowlanych o podobnych właściwościach dielektrycznych. Jednak jednoznaczne określenie konkretnych materiałów, o których mowa, wymaga przeprowadzenia badań innymi metodami. W tym kontekście badanie GPR może być traktowane jedynie jako wstępne wskazanie lub jako jedno z potwierdzeń hipotezy – jak w wypadku różnych okresów rekonstrukcji kopuły Hagia Sophia [Duppel 2010].

### Wnioski i podsumowanie

Na podstawie kampanii eksperymentalnej ukierunkowanej na wglębne badania konstrukcji murowanych ręcznym georadarem z antenami 2,0 GHz można sformułować następujące wnioski:

- Za pomocą georadaru możliwe jest rozróżnienie warstwowej struktury muru. Po kalibracji można zmierzyć grubość poszczególnych warstw z dokładnością od 92,67 do 86,25%.
- Wymiar najmniejszego wykrywalnego kruszywa wynosi 16–22 mm.
- Możliwe jest identyfikowanie pustek powietrznych oraz ich pomiar. Można było zmierzyć pustkę powietrzną (średnicę rury) dopiero od 5 cm i większą.
- Obiekty metalowe są dobrze rozpoznawalne, choć nie powiodło się określić ich wymiarów, możliwe było jedynie ustalenie, na jakiej głębokości obiekt się znajduje.
- W wypadku metalowych rurek zaobserwowano bardziej wyraźne odbicie fali EM od rurki o mniejszej średnicy, ale grubszej ścianie.
- Badane elementy metalowe zaburzały interpretację pozostałych elementów radargramu.

Biorąc pod uwagę wnioski z analizy poszczególnych omówionych prac badawczych oraz wyniki badań własnych, można określić obszary efektywnego zastosowania georadaru w badaniach konstrukcji murowych. Obszary te zostały zebrane i usystematyzowane w tabeli 3.

Wykorzystanie georadaru do analizy konstrukcji murowanych stanowi wciąż przedmiot szeroko zakrojonych badań. Jego szczególna użyteczność jest widoczna zwłaszcza w kontekście badań dziedzictwa kulturowego, gdzie występuje konieczność ograniczenia liczby odkrywek, które mogą być szkodliwe lub niedozwolone. Dzięki swoim zaletom GPR staje się podstawowym narzędziem do diagnozowania struktur obiektów zabytkowych, pozwalając na ograniczenie interwencji do absolutnego minimum. Jako metoda nieniszcząca georadar może być odpowiedni do stosowania w miejscach, w których ważne jest zachowanie cennych powłok wykończeniowych. Metoda ta ma jednak również znaczne ograniczenia i z tego powodu często stosuje się ją w połączeniu z innymi badaniami nieniszczącymi. Dobrym przykładem takiej komplektywności kilku metod nieniszczących jest badanie starożytnego mostu, w którym obok GPR zastosowano fotogrametrię UAV i termografię [Biscarini et al. 2020].

employed tool was determined. This analysis also enabled the drawing of conclusions regarding the study of historical layering, which is feasible to a limited extent. Indeed, within the framework of GPR studies, as described in [Perez-Garcia et al. 2008] and [Nuzzo et al. 2010], distinguishing between two building materials with similar dielectric properties is feasible. However, the unambiguous determination of the specific materials in question requires testing by other methods. In this context, the GPR study can be treated only as a preliminary indication or as one of the confirmations of a hypothesis—as was the case with the different periods of reconstruction of the Hagia Sophia dome [Duppel 2010].

### Conclusions and summary

The following conclusions can be gleaned from the experimental campaign on in-depth handheld GPR testing of masonry structures with 2.0 GHz antennas:

- With the use of the GPR, the layered structure of the masonry can be distinguished. After calibration, it is possible to measure the thickness of individual layers with accuracy ranging from 92.67% to 86.25%.
- The dimension of the smallest aggregate to be captured is between 16–22 mm.
- It is possible to identify air voids along with dimensional measurements. Measuring an air void (tube diameter) from 5 cm and above was possible.
- The metal objects are highly detectable, although dimensional determination was not successful. It was only possible to establish at what depth the object was located.
- For metallic tubes, a more noticeable reflection of the EM wave was observed from a tube with a smaller diameter but thicker wall.
- In the case of examined metal elements configuration, they disrupted the interpretation of the rest of the radargram data.

Taking into account the conclusions of the analysis of the individual studies in section 2 and the results of author's own research, it is possible to determine the areas of effective application of GPR in the examination of masonry structures. These areas are collected in Tab. 3. and systematized according to their effectiveness and depth of investigation.

The use of GPR for the analysis of masonry structures is still the subject of intense research. Its exceptional value is seen especially in the context of heritage surveys, where it is crucial to avoid excavations that may be damaging or unacceptable. Thanks to its advantages, GPR is becoming an invaluable tool in diagnosing the structure of historic buildings, allowing interventions to be kept to an absolute minimum. As a non-destructive method, GPR is adequate for use in areas where it is important to preserve the valuable surface finishes of building envelopes. However, this method also has significant limitations and because of them the technique is often used in conjunction with other non-destructive tests. A good example of such com-

Analizowana głębokość <i>Evaluated depth</i>	Duża skuteczność <i>High efficiency</i>	Średnia skuteczność <i>Medium efficiency</i>	Mała skuteczność <i>Low efficiency</i>
Testy wglębne <i>In-depth tests</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Określenie grubości warstw konstrukcyjnych i wykończeniowych</li> <li>• <i>Determination of the thickness of construction and finishing layers</i></li> <li>• Detekcja intruzji metalowych</li> <li>• <i>Detecting metal intrusions</i></li> <li>• Identyfikacja pustek powietrznych</li> <li>• <i>Identification of air voids</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Badanie historycznych przewarstwień i etapów przebudowy</li> <li>• <i>The study of historical redevelopment and interfacing</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parametry mechaniczne</li> <li>• <i>Strength characteristics</i></li> </ul>
Testy przypowierzchniowe <i>Near-surface tests</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Delaminacja warstw wykończeniowych</li> <li>• <i>Delamination of facing layers</i></li> <li>• Mapowanie zawilgocenia</li> <li>• <i>Structure moisture mapping</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Delaminacja wzmocnień powierzchniowych</li> <li>• <i>Delamination of surface reinforcements</i></li> <li>• Badanie zarysowanych obszarów muru</li> <li>• <i>Examination of masonry in the cracked areas</i></li> </ul>

Tab. 3. Podsumowanie obszarów zastosowań GPR według ich głębokości oraz skuteczności badania

Tab. 3. Summary of GPR application areas according to their effectiveness

Istnieje wiele podobnych przykładów z równoległym wykorzystaniem wielu technik nieniszczących, co dodatkowo podkreśla przydatność georadaru w połączeniu z innymi metodami. Charakterystyczną cechą tego rodzaju podejścia jest to, że w przeciwieństwie do metod niszczących dostarczają one informacji o strukturze w bardzo ograniczonym zakresie. Umiejętna integracja narzędzi diagnostycznych i ich odpowiedni dobór do danego zagadnienia mają zasadnicze znaczenie dla powodzenia badań.

Ponieważ badania autorów potwierdzające skuteczność wykorzystania georadaru do diagnostyki konstrukcji murowych w określonych obszarach zostały przeprowadzone jedynie na modelu w laboratorium, konieczna jest szersza kampania badawcza na różnych obiektach zabytkowych. Autorzy planują również w niedalekiej przyszłości przeprowadzenie niezbędnych badań w laboratorium w celu zweryfikowania skuteczności georadaru w zakresie testów przypowierzchniowych, takich jak: mapowanie wilgotności konstrukcji, delaminacja warstw licowych oraz badanie muru w obszarach zarysowanych<sup>1,2</sup>.

plementary of several non-destructive methods is the survey of an ancient bridge, where UAV photogrammetry and infrared thermography were used alongside GPR [Biscarini et al. 2020]. There are many similar examples with parallel use of multiple non-destructive techniques, which further emphasizes the value of GPR in combination with other methods. The distinctive feature of these methods is that, unlike destructive methods, they provide information about the structure to a very limited scope. Skillful integration of diagnostic tools and their appropriate selection for a given problem is crucial to successful research.

Since the authors' research confirming the effectiveness of using GPR to diagnose masonry structures in specific areas was carried out only on a model in the laboratory, it is necessary to carry out a broader survey campaign on various historic buildings. The authors also plan in the near future to carry out still necessary tests in the laboratory to verify the effectiveness of GPR in areas related to near-surface tests such as: structure moisture mapping, delamination of facing layers and examination of masonry in the cracked areas.

<sup>1</sup> Badania zostały w całości zrealizowane i sfinansowane przez Katedrę Konstrukcji Budowlanych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

<sup>2</sup> Niniejszy artykuł został wcześniej opublikowany jako pre-print i jest dostępny pod DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4022334/v1>.

## Bibliografia / References

### Opracowania / Secondary sources

- Alani Amir, Tosti Fabio, Bianchini Ciampoli Luca, Gagliardi Valerio, Benedetto Andrea, *An Integrated Investigative Approach in Health Monitoring of Masonry Arch Bridges Using GPR and Insar Technologies*, „NDT & E International” 2020, nr 115.
- Barone Pier, Ferrara Carlotta, *Non-Invasive Moisture Detection for the Preservation of Cultural Heritage*, „Heritage” 2018, nr 1.

- Bavusi Massimo, Di Napoli Rosario, Soldovieri Francesco, *Microwave Tomographic Approach for Masonry Investigation: Some Real Results*, „Advances in Geosciences” 2010, nr 24.
- Benedetto Andrea, Benedetto Francesco, *Application Field – Specific Synthesizing of Sensing Technology*, [w:] *Comprehensive Materials Processing*, vol. 13: *Sensor Materials, Technologies and Applications*, red. Saleem Hashmi, [Amsterdam] 2014.

- Binda Luigia, *Recommendations of RILEM TC 177-MDT: Masonry Durability and On-Site Testing*, „Materials and Structures / Matériaux et Constructions” 2005 (March), t. 38.
- Binda Luigia, *Rilem TC 127-MS: Non Destructive Tests for Masonry Materials and Structures*, „Materials and Structures / Matériaux et Constructions” 2001, t. 34.
- Binda Luigia, *Rilem TC 127-MS: Tests for Masonry Materials and Structures*, „Materials and Structures / Matériaux et Constructions” 1997 (July), t. 30.
- Biscarini Chiara, Catapano Iaria, Cavalagli Nicola, Ludeno Giovanni, Pepe Francesco A., Ubertini Filippo, *UAV Photogrammetry, Infrared Thermography and GPR for Enhancing Structural and Material Degradation Evaluation of the Roman Masonry Bridge of Ponte Lucano in Italy*, „NDT & E International” 2020, nr 115.
- Bosiljkov Vlatko, Uranjek Mojmir, Žarnić Roko, Bokan-Bosiljkov Violeta, *An Integrated Diagnostic Approach for the Assessment of Historic Masonry Structures*, „Journal of Cultural Heritage” 2010, t. 11, nr 3.
- Carrick Utsi Erica, *Velocity Calibration*, [w:] *Ground Penetrating Radar: Theory and Practise*, red. Erica Carrick Utsi, Oxford–Cambridge 2017.
- Catapano Iaria, Ludeno Giovanni, Soldovieri Francesco, Tosti Francesco, Padeletti Giuseppina, *Structural Assessment via Ground Penetrating Radar at the Consoli Palace of Gubbio (Italy)*, „Remote Sensing” 2018, t. 10, nr 1.
- Corazzi Roberto, Conti Giuseppe, *Georadar Survey*, [w:] *The Secret of Brunelleschi’s Dome in Florence*, Firenze 2011.
- Corazzi Roberto, Conti Giuseppe, Marini Stefania, *Indagini Non Invasive e Rilievi*, [w:] *Cupola di Santa Maria del Fiore – Tra ipotesi e realtà*, Bologna 2005.
- Diamanti Nectaria, Giannopoulos Antonios, Forde Michael C., *Numerical Modelling and Experimental Verification of GPR to Investigate Ring Separation in Brick Masonry Arch Bridges*, „NDT & E International” 2008, t. 41, nr 5.
- Duppel Christoph, *Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul*, Karlsruhe 2010.
- Hugenschmidt Johannes, Loser Roman, *Detection of Chlorides and Moisture in Concrete Structures with Ground Penetrating Radar*, „Materials and Structures” 2008, t. 41, nr 4.
- Kadioglu Selma, Kadioglu Yusuf K., *Picturing Internal Fractures of Historical Statues Using Ground Penetrating Radar Method*, „Advances in Geosciences” 2010, nr 24.
- 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, nr 8.
- Lai Wallace W.L., Dérobert Xavier, Annan Peter, *A Review of Ground Penetrating Radar Application in Civil Engineering: A 30-Year Journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis*, „NDT & E International” 2018, nr 96.
- Laurens Stéphane, Balaýssac Jean-Paul, Rhazi Jamal, Arliguie Ginette, *Influence of Concrete Relative Humidity on the Amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) Signal*, „Materials and Structures” 2002, t. 35, nr 4.
- Leppala Anja, Hamrouche Rani, Saarenketo Timo, *Non-destructive Moisture Mapping from Basement Walls with High-Frequency GPR, 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, Rapperswil 2018.
- Lubowiecka Izabela, Armesto Julia, Arias Pedro, Lorenzo Henrique, *Historic Bridge Modelling Using Laser Scanning, Ground Penetrating Radar and Finite Element Methods in the Context of Structural Dynamics*, „Engineering Structures” 2009, t. 31, nr 11.
- McCann David M., Forde Michael C., *Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures*, „NDT & E International” 2001, t. 34, nr 2.
- Negri Sergio L., Aiello Antonietta M., *High-Resolution GPR Survey for Masonry Wall Diagnostics*, „Journal of Building Engineering” 2021, nr 33.
- Nuzzo Luigia, Calia Angela, Liberatore Domenico, Masini Nicola, Rizzo Enzo, *Integration of Ground-Penetrating Radar, Ultrasonic Tests and Infrared Thermography for the Analysis of a Precious Medieval Rose Window*, „Advances in Geosciences” 2010, nr 24.
- Pérez-Gracia Vega, Caselles Oriol, Clapés Jaime, Martínez Guillermo, Osorio Raul, *Non-Destructive Analysis in Cultural Heritage Buildings: Evaluating the Mallorca Cathedral Supporting Structures*, „NDT & E International” 2013, nr 59.
- Pérez-Gracia Vega, García Francisco, Pujades Lluís G., González Drigo Ramón, Di Capua Daniel, *GPR Survey to Study the Restoration of a Roman Monument*, „Journal of Cultural Heritage” 2008, t. 9, nr 1.
- Ranalli Danilo, Scozzafava Marco, Tallini Marco, *Ground Penetrating Radar Investigations for the Restoration of Historic Buildings: The Case Study of the Collemaggio Basilica (L’Aquila, Italy)*, „Journal of Cultural Heritage” 2004, t. 5, nr 1.
- Santos-Assunção Sonia, Pérez-Gracia Vega, Caselles Oriol, Clapes Jaume, Salinas Victor, *Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies*, „Remote Sensing” 2014, t. 6, nr 9.
- Solla Mercedes, Caamano Carloc, Riveiro Belen, Lorenzo Henrique, *GPR Analysis of a Masonry Arch for Structural Assessment*, [w:] *6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, Piscataway 2011.
- Solla Mercedes, Lorenzo Henrique, Rial Fernando I., Novo Alexandre, *Ground-Penetrating Radar for the Structural Evaluation of Masonry Bridges: Results and Interpretational Tools*, „Construction and Building Materials” 2012, nr 29.

#### Źródła elektroniczne / Electronics sources

C-Thru Datasheet, IDS Georadar, [b.d.], <https://idsgeoradar.com/products/ground-penetrating-radar/c-thru> (dostęp: 8.03.2024).

## Streszczenie

Badania z wykorzystaniem georadaru to obecnie jedna z szybciej rozwijających się technik diagnostyki nieinwazyjnej. Są szeroko stosowane w inżynierii lądowej, jak również w konstrukcjach kubaturowych, coraz częściej znajdują też zastosowanie w obszarze konserwacji zabytków. Badanie konstrukcji zabytkowych stanowi szczególne wyzwanie, ze względu na ich heterogeniczną strukturę. Przedstawione badanie ma na celu określenie możliwości zastosowania georadaru w rozwiązywaniu konkretnych problemów związanych z zabytkami murowanymi. Kompiluje studia przypadków dotyczące zabytkowych konstrukcji murowanych, kategorizując problemy według obszarów zastosowania georadaru. Skonstruowano specjalny model, imitujący zabytkowy mur ceglany, który był poddawany odpowiednim modyfikacjom, a następnie badany z wykorzystaniem georadaru w celu weryfikacji wniosków płynących ze stadium przypadków. Następnie omówiono i przeanalizowano skuteczność urządzenia w poszczególnych obszarach zastosowań.

## Abstract

Ground-penetrating radar (GPR) is a rapidly evolving non-destructive testing method widely used in civil and structural engineering, and increasingly in monument preservation. Investigating historic structures with GPR is challenging due to their heterogeneous nature. This study aims to determine the feasibility of GPR in addressing specific issues related to masonry monuments. It compiles case studies on masonry historic structures, categorizing problems by GPR application areas. A specialized masonry research model was created, modified, and examined with a hand-held GPR to verify research conclusions. The paper concludes with a discussion and analysis of the device's effectiveness in various applications.