

## ZASTOSOWANIE METODY GEORADAROWEJ DO BADAŃ MURU CEGLANEGO

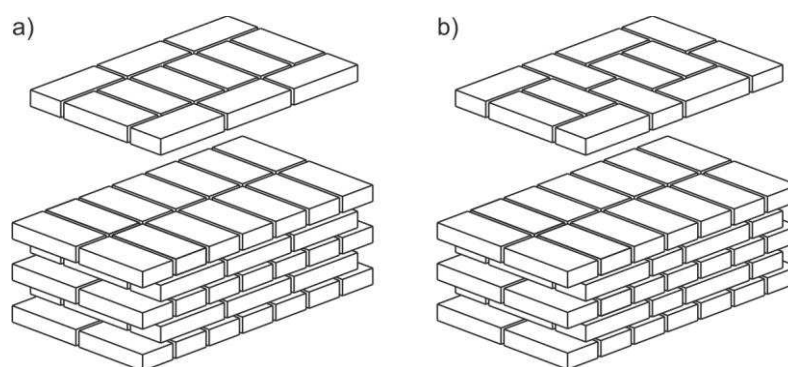
**Jacek Lachowicz**

III stopień, 2 semestr, Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
e-mail: jacek.lachowicz@pg.gda.pl

**Promotor:** *dr hab. inż.* Magdalena Rucka

### 1 WSTĘP

Znaczącą część budowli zabytkowych w Polsce stanowią konstrukcje ceglane. Ze względu na wiek tych budynków rośnie zapotrzebowanie na nieniszczące metody diagnostyczne, które pozwoliłyby na ocenę ich stanu technicznego. Obecnie używanymi metodami w diagnostyce konstrukcji ceglanych [7] są m.in.: metoda mikrosejsmiczna, impact-echo, metoda ultradźwiękowa, akustyczna oraz georadarowa. Niezależnie od stosowanej metody należy zapoznać się z badaną konstrukcją i zaplanować badania. W przypadku konstrukcji ceglanych jedną z istotnych informacji o budynku jest sposób wiązania cegieł w murze (Rys 1), który ma wpływ na interpretację wyników.



**Rysunek 1:** Wiązania cegieł w murze ceglany a) pospolite b) holenderskie

Metoda georadarowa wykorzystuje zjawisko odbicia fali elektromagnetycznej. Dzięki temu znalazła ona szerokie zastosowanie m.in. w archeologii, geologii, w konstrukcjach zabytkowych [1] mostowych [2] oraz żelbetowych [3]. Georadar wykorzystuje się również przy ustaleniu grubości powłoki lodowcowej [10].

Celem niniejszej pracy jest diagnostyka ceglanoego muru z wykorzystaniem obliczeń numerycznych przeprowadzonych za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu.

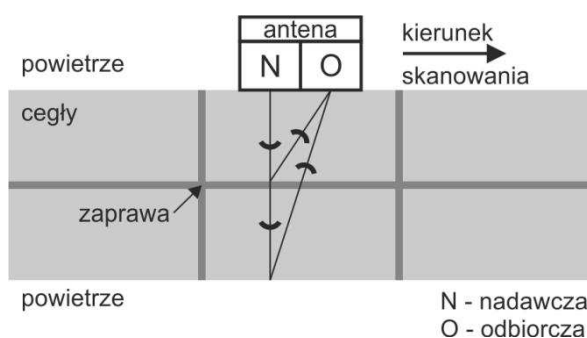
### 2 PODSTAWY TEORETYCZNE METODY GEORADAROWEJ

Metoda GPR bazuje na wysyłaniu krótkiego impulsu elektromagnetycznego do badanej konstrukcji. Prędkość propagacji oraz odbicie fali zależą od właściwości elektrycznych ośrodka tj. przenikalności i przewodności elektrycznej. W przypadku materiałów izotropowych i jednorodnych prędkość fali elektromagnetycznej opisuje następująca zależność [8]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

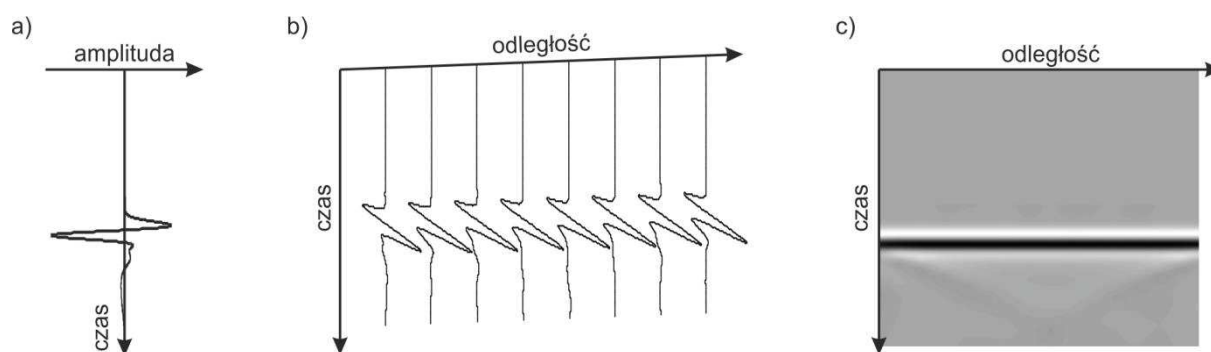
gdzie  $\epsilon_r$  jest względną przenikalnością elektryczną ośrodka, a  $c$  prędkością światła w próżni. Przykładowo dla powietrza przenikalność elektryczna wynosi  $\epsilon_r = 1$ , zaś dla betonu przyjmuje się wartość średnią  $\epsilon_r = 9$ , co pozwala obliczyć prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w betonie  $v = 10$  cm/ns. W przypadku, gdy stała dielektryczna nie jest znana, a wartość prędkości jest niezbędna do poprawnego określenia głębokości inkluzji, dokonuje się pomiaru georadarowego na próbce badanego materiału o znanej wysokości. Znając czas odbicia fali od końca próbki i przebytą przez nią drogę można obliczyć prędkość propagacji.

Wyemitowany impuls docierając do granicy ośrodków o różnych parametrach elektrycznych powoduje odbicie części fali i zarejestrowanie jej przez antenę odbiorczą. Pozostała część propaguje dalej odbijając się od kolejnych warstw (Rys. 2).



**Rysunek 2:** Zasada działania georadaru

Wynikiem zarejestrowanej przez antenę odbiorczą fali jest pojedynczy sygnał czasowy (Rys. 3a). Złożenie poszczególnych sygnałów w każdym położeniu georadaru tworzy plan czasowo-przestrzenny (Rys. 3b), z którego ostatecznie składa się mapa georadarowa (Rys. 3c), zwana również skanem typu B. Odbicie, które w każdym położeniu pojawia się z tym samym opóźnieniem świadczy o podłużnej inkluzji w badanym ośrodku (Rys. 3c).



**Rysunek 3:** Sygnały z danych georadarowych a) pojedynczy sygnał czasowy b) plan czasowo-przestrzenny c) mapa georadarowa

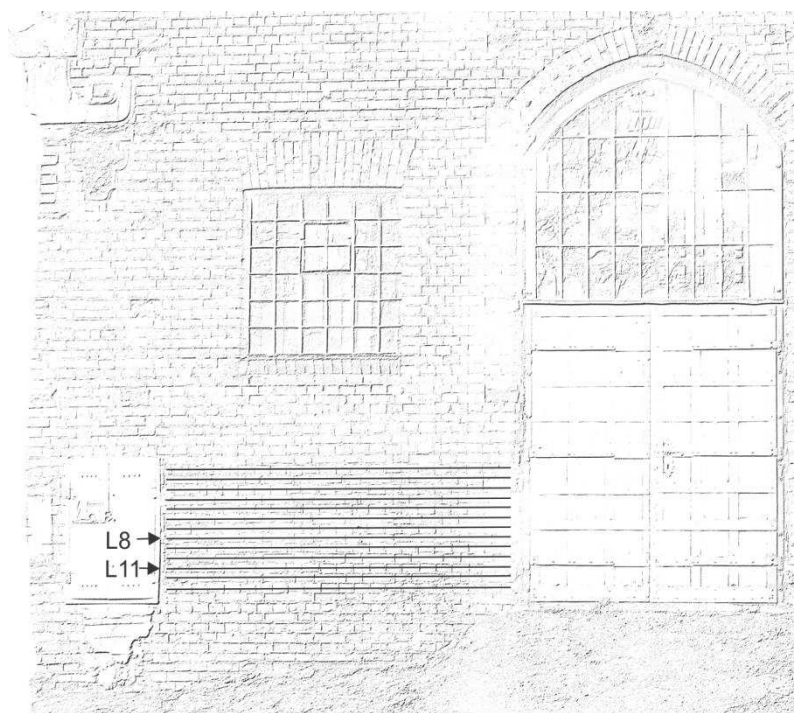
### 3 BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badaniom metodą georadarową została poddana ściana budynku Żelbetu na Politechnice Gdańskiej (Rys. 4). Ściana murowana o grubości dwóch cegieł (51 cm) ułożona w wiązaniu holenderskich jest ścianą frontową Laboratorium Wytrzymałości Materiałów (Katedra Mechaniki i Mechatroniki, Politechnika Gdańska).



**Rysunek 4:** Miejsce pomiarowe

Do badań użyto zestawu georadarowego Alladin firmy IDS, w skład, którego wchodzi dipolowa antena o częstotliwości pracy 2 GHz. Przy akwizycji danych posłużono się programem K2 FAST WAVE, natomiast przy wzmacnianiu i filtrowaniu map użyto oprogramowania GRED HD [5]. Na obiekcie wykonano 13 skanów podłużnych w rozstawie 6,5 cm. Profile skanowania ukazuje Rys. 5.

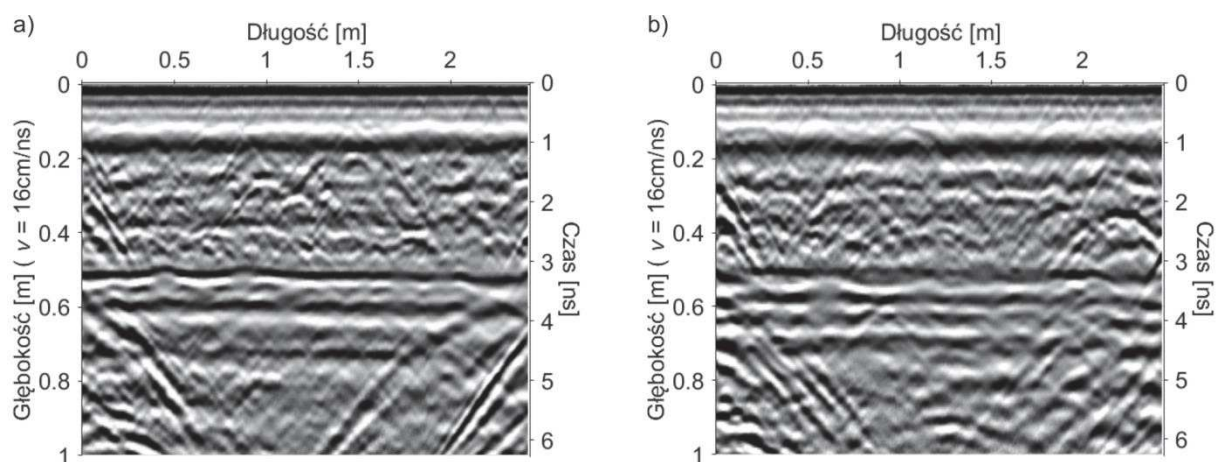


**Rysunek 5:** Wykonane trasy georadarowe

Akwizycji danych georadarowych dokonano z ustaloną prędkością propagacji fali elektromagnetycznej równej 10 cm/ns. Po wykonaniu próbnych pomiarów stwierdzono, iż

odbicie od końca ściany następuje po czasie 3,2 ns tj. 32 cm przy założonej prędkości propagacji. W celu dostosowania osi głębokości do rzeczywistych wymiarów skanowanej konstrukcji (grubość ściany – 51 cm) zmieniono na etapie przetwarzania danych GPR prędkość propagacji na 16 cm/ns.

Rysunek 6 przedstawia przetworzone mapy georadarowe uzyskane w wyniku skanowania warstwy wozówkowo – główkowej (L11) oraz warstwy główkowej (L8). Przy powierzchni ściany widać odbicia od zaprawy ukazujące wozówki oraz główki. Odbicia w środku ściany nie są jednoznaczne do interpretacji. Mogą one świadczyć zarówno o drobnych pustkach powietrznych jak i o kolejnych warstwach cegieł. Po zmianie prędkości propagacji wyraźne odbicie od końca ściany ukazuje się na głębokości 51 cm. Poniżej tej głębokości widać również zakłócenia od pobliskich drzwi stalowych (wyraźne odbicie po prawej stronie z opóźnieniem 4 ns), metalowej skrzynki elektrycznej (mocne odbicie po lewej stronie mapy na głębokości ok. 20 cm) oraz urządzeń znajdujących się w laboratorium.



**Rysunek 6:** Przetworzone mapy georadarowe a) z układu wozówkowo – główkowego (L11) b) z układu główkowego (L8)

#### 4 PODSTAWY TEORETYCZNE OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH PROPAGACJI FALI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

U podstaw teoretycznych propagacji fal elektromagnetycznych (EM) stoją równania Maxwella, opisujące właściwości pola magnetycznego i elektrycznego oraz zależności między nimi. W celu przeprowadzenia obliczeń numerycznych propagacji fali EM należy rozwiązać równania Maxwella przy zadanych warunkach brzegowych. W ośrodkach anizotropowych i stratnych przybierają one postać [4]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \times H = -\frac{\partial D}{\partial t} + J_c + J_s, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot D = q_v, \quad (5)$$

gdzie:  $H$  i  $E$  – wektory natężenia pola magnetycznego i elektrycznego,  $B$  i  $D$  – wektory indukcji magnetycznej i elektrycznej,  $t$  – czas,  $J_c$  – gęstość prądu przewodzenia,  $J_s$  – gęstość prądu w źródle,  $q_v$  – gęstość ładunku elektrycznego.

Uzupełnienie stanowią tzw. równania konstytutywne, które za pomocą stałych materiałowych wiążą ze sobą składowe pola falowego [9]:

$$B = \mu H, \quad (7)$$

$$D = \varepsilon E, \quad (6)$$

$$J_c = \sigma E, \quad (8)$$

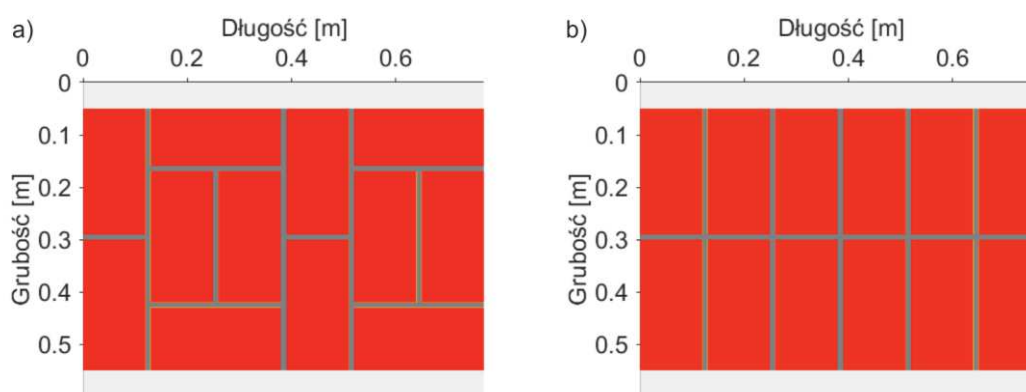
gdzie:  $\mu$  – przenikalność magnetyczną,  $\varepsilon$  – przenikalność elektryczną,  $\sigma$  – przewodność elektryczna (konduktywność).

Sposób rozwiązywania równań Maxwella uwzględniających zależność pola elektromagnetycznego od współrzędnych przestrzeni i czasu został zaprezentowany przez Yee [11] w 1966 r. Opracował on algorytm rozwiązywania problemów propagacji fali elektromagnetycznej korzystając ze zbioru równań różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. FDTD – finite difference time domain). Analizowany model dyskretyzuje się na siatkę obliczeniową, w węzłach której definiuje się stałe materiałowe ( $\mu$ ,  $\varepsilon$  oraz  $\sigma$ ). Na końcu obszaru obliczeniowego zadaje się absorbujące warunki brzegowe, które mają za zadanie symulować propagację fali EM w nieskończoność. W celu uzyskania mapy georadarowej należy zdefiniować dwa punkty siatki obliczeniowej (antena nadawcza i odbiorcza) oraz ścieżkę i krok skanowania. W pierwszym punkcie definiuje się źródło wymuszające propagację fali EM za pomocą odpowiedniej funkcji. W drugim natomiast zapisuje się stan pola elektrycznego i magnetycznego w czasie, rejestrując odbicia czasowe od poszczególnych inkluzji. W ten sposób otrzymujemy odpowiedź czasową w każdym położeniu zestawu antenowego z odpowiednio zdefiniowanym krokiem.

W niniejszej pracy analizy numeryczne przeprowadzono w dwóch wymiarach za pomocą programu GprMax 2D [4]. Program ten nie posiada graficznego interfejsu i jest sterowany za pomocą linii komend. Dzięki temu oprogramowanie jest bardzo elastyczne i znajduje szerokie zastosowanie w inżynierii elektromagnetycznej.

## 5 BADANIA NUMERYCZNE

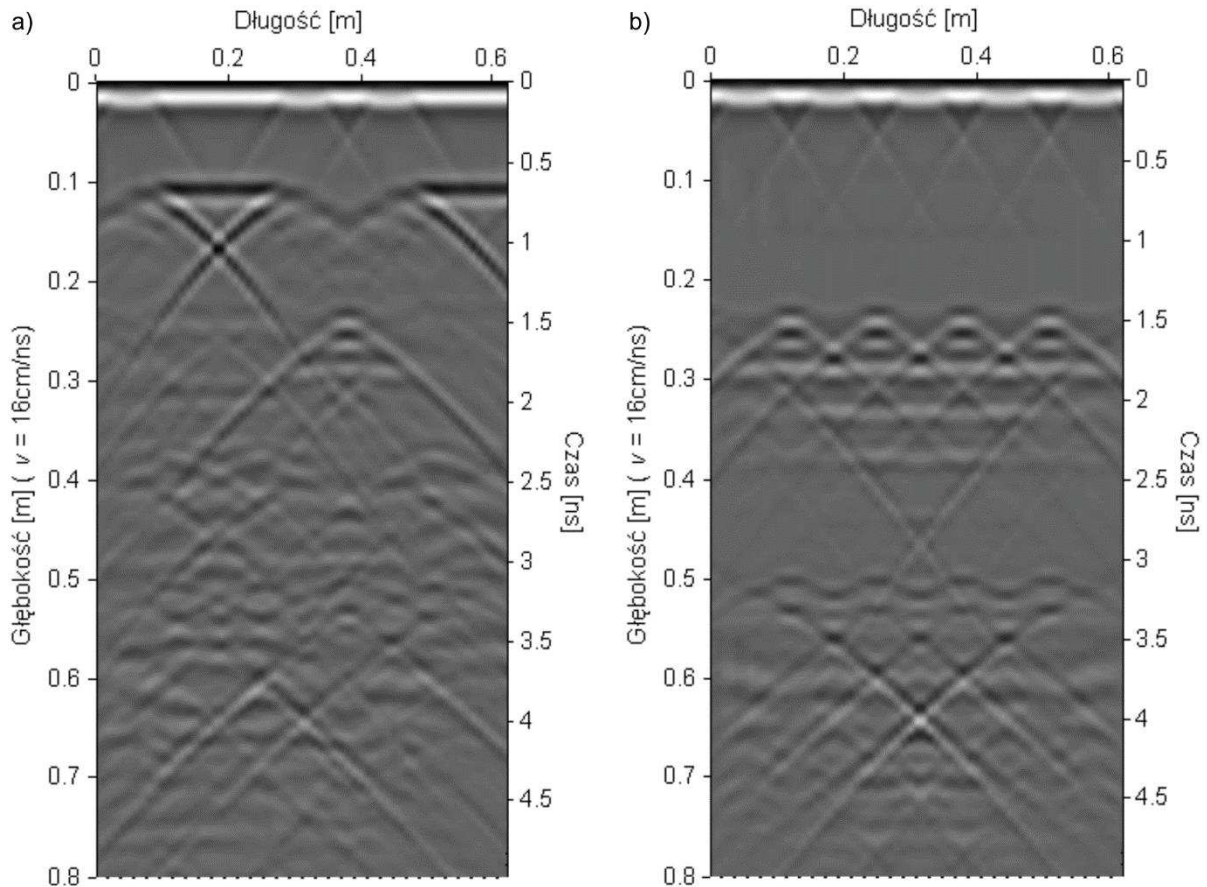
Przedmiotem badań numerycznych była ściana murowana o grubości dwóch cegieł ułożona w wiązaniu holenderskim. Z uwagi na charakterystykę ścian murowanych do analizy przyjęto dwa osobne modele numeryczne (Rys. 7), przedstawiające dwie kolejne warstwy ściany. Pierwszy model przedstawia wozówkowo-główkowy układ cegieł, drugi zaś układ główkowy.



**Rysunek 7:** Modele numeryczne ściany murowanej a) układ wozówkowo-główkowy  
b) układ główkowy

Modele zdyskretyzowano na siatkę kwadratową o oczkach  $dx = dy = 0,001$  m. W modelu uwzględniono dwie warstwy powietrza ( $\varepsilon_r = 1$ ,  $\sigma = 0$  S/m) o grubości 5 cm. Przenikalność elektryczną cegły  $\varepsilon_r = 3,5$  przyjęto na podstawie badań eksperymentalnych podstawiając

otrzymaną prędkość propagacji fali do zależności (1). Pozostałe parametry elektryczne przyjęto na podstawie danych literaturowych [6] dla cegły  $\sigma = 0,02$  S/m oraz dla zaprawy  $\epsilon_r = 8$  oraz  $\sigma = 0,065$  S/m. Źródło wymuszające propagację fali EM zadano, jako sygnał Rickera o częstotliwości  $f = 2$  GHz. Antena odbiorcza ustawiona została w odległości 6 cm od anteny nadawczej, a ścieżkę skanowania zdefiniowano wzdłuż górnej krawędzi muru z krokiem 0,01 m. Obliczenia przeprowadzono dla 63 przypadków położenia zestawu anten. Rysunek 8 przedstawia mapy georadarowe uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych.



**Rysunek 8:** Otrzymane z obliczeń mapy georadarowe a) układ wozówkowo-główkowy b) układ główkowy

Mapa georadarowa uzyskana w wyniku obliczeń układu wozówkowo-główkowego (Rys. 8a) ukazuje wyraźne odbicia przypowierzchniowe od zaprawy wskazujące wozówki i główki. Widoczne jest również mocne i wyraźne odbicie od wewnętrznych warstw główkowych na głębokości ok. 12 cm. Kolejne odbicia nie są jednoznaczne w interpretacji. Obliczenia nie wykazały nawet jednoznacznego i mocnego odbicia od końca ściany jak w przypadku badań doświadczalnych. Echogram uzyskany z analizy układu główkowego jest zdecydowanie łatwiejszy w interpretacji. Przy powierzchni ukazują się odbicia od zaprawy wskazujące główki. Na głębokości ok. 25 cm widać kolejne odbicia od zaprawy świadczące o początku drugiego rzędu cegieł. Ostatnie odbicia na głębokości ok. 51 cm ukazują koniec ściany murowanej.

## 6 PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych ceglanego muru o grubości dwóch cegieł i wiązaniu holenderskim. Badania diagnostyczne miały na celu identyfikację grubości muru, rozkładu cegieł i wykrycie ewentualnych pustek powietrznych czy też uszkodzeń. Pomiarów dokonano przy pomocy anteny georadarowej o wysokiej częstotliwości pracy (2 GHz). Wykonano łącznie 13 skanów podłużnych. Przedstawiono wyniki dla warstw cegieł w układzie wozówkowo-główkowym oraz układzie główkowym. Uzyskane mapy georadarowe jednoznacznie wskazują grubość muru na 51 cm.

Przeprowadzono obliczenia numeryczne wykorzystując program GprMax 2D, bazujący na metodzie różnic skończonych w dziedzinie czasu. Utworzono dwa modele układu cegieł w murze jak dla badania eksperymentalnego. Właściwości materiałowe uzyskano z badań doświadczalnych oraz danych literaturowych. Uzyskane w wyniku obliczeń mapy georadarowe pokazują, iż interpretacja odbić nie jest jednoznaczna, przynajmniej w przypadku układu wozówkowo-główkowego. Porównanie danych obliczeniowych z wynikami badań eksperymentalnych prowadzi do wniosku, iż jedynie mocne i niepowtarzalne odbicia można uznać za możliwe uszkodzenie muru ceglanego.

## LITERATURA

- [1] Binda L. et al., The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy, NDT&E International, Volume 38, 2005.
- [2] Diamanti N., Giannopoulos A., Forde C. M., Numerical modeling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges, NDT&E International, Volume 41, 2008.
- [3] Drobiec Ł., Określenie parametrów stali zbrojeniowej w konstrukcji, XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2014.
- [4] Giannopoulos A., Modelling ground penetrating radar by GprMax, Construction and Building Materials, Volume 19, 2005.
- [5] GRED HD Software. GPR High Definition Data Post Processing. User Manual. Pisa, 2013.
- [6] Hamrouche R. et al., Numerical modeling of ground-penetrating radar (GPR) for the investigation of jointing defects in brick masonry structures, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, 2009.
- [7] Hamrouche R. et al., Simulation and Detection Limit of EM Waves in Masonry Structures with Application of an Algorithm for Image Processing, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Marrakesh, Morocco, 2011.
- [8] Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M., Zarys metody georadarowej, Wydawnictwo AGH, Kraków, 2011.
- [9] Rucka M., Lachowicz J., Analiza numeryczna i doświadczalna propagacji pola elektromagnetycznego w badaniach metodą georadarową, Budownictwo i Architektura, Volume 13, 2014.
- [10] Singh S. K. et al., Estimation of glacier ice thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan region, Current Science, Volume 103, 2012.
- [11] Yee K. S., Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 14, 1966.