

ŁUKASZ TOPCZEWSKI¹⁾

GUIDELINES FOR THE APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR) TO INSPECTION OF CONCRETE BRIDGES – REFLECTION MODE

WYTYCZNE STOSOWANIA GEORADARU GPR PODCZAS INSPEKCJI MOSTÓW ŻELBETOWYCH – METODA ODBIĆ

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono stan wiedzy oraz wyniki badań doświadczalnych konstrukcji żelbetowych i z betonu sprężonego metodą georadarową. Badania przeprowadzono metodą odbiciową (refleksyjną) za pomocą systemu radarowego SIR-20 wraz z zestawem anten o częstotliwościach centralnych 1,6 GHz oraz 2,6 GHz. Wyniki wskazały możliwe obszary zastosowań badań georadarowych przy ocenie stanu technicznego obiektów mostowych z żelbetu oraz betonu sprężonego. Szczególną uwagę poświęcono na przedstawienie wytycznych, jak tę technikę zastosować w praktyce. Podano zalecenia dotyczące wszystkich etapów badania z wykorzystaniem georadaru, w tym w zakresie planowania, ograniczeń i wymagań praktycznych, warunków dostępu do konstrukcji oraz właściwych procedur zbierania i analizy danych.

SŁOWA KLUCZOWE: badania nieniszczące, georadar, GPR, ocena stanu konstrukcji, wykrywanie defektów.

ABSTRACT. In the paper results from experimental tests and state of the art of the GPR technique are presented. Tests were done with the use of SIR-20 GPR system with two antennas 1.6 GHz and 2.6 GHz. The results indicated possible application fields of this technique during condition assessment process of the concrete and prestressed bridges. Particular attention was focused on the preparation of guidelines on how to use this technique in practice. In the paper all stages of testing and data interpretation were thoroughly described and explained.

KEYWORDS: bridge condition assessment, detection of defects, GPR, ground penetrating radar, non-destructive tests.

DOI: 10.7409/rabdim.012.005

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie; ltopczewski@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

Przed przystąpieniem do renowacji lub modernizacji oraz w ramach programów konserwacji obiektów inżynierskich coraz częściej przeprowadza się kompleksowe badania konstrukcji metodami nieniszczącymi (ang. *Non-Destructive Testing*, NDT). Przykładem jednej ze stosowanych metod NDT jest badanie georadarowe, które stanowi bardzo atrakcyjną, alternatywną metodę badawczą. Pozwala wnikać w głąb konstrukcji bez konieczności jej naruszania. Ta metoda badawcza nie jest jednak wciąż zbyt popularna poza środowiskiem naukowym, szczególnie w badaniach konstrukcji wykraczających poza obszar geotechniki. W Polsce jedynie niewielka liczba instytucji badawczych dysponuje odpowiednim, będącym w użyciu sprzętem. Dzięki dopracowywanej od wielu lat technologii urządzenia GPR stają się coraz bardziej popularnym narzędziem do diagnostyki oraz kontroli jakości wznoszonych konstrukcji betonowych [1, 2]. Wielu badaczy potwierdza przydatność tego narzędzia do zastosowań takich jak lokalizacja prętów zbrojeniowych [3, 4], kontrola jakości wypełnienia kanałów kablowych iniektem [5, 6, 7] czy diagnostyka wewnętrznych wad konstrukcji betonowych [8]. Badanie pomostów obiektów mostowych, szczególnie w przypadku konstrukcji z betonu sprężonego, jest wyzwaniem, które było podejmowane przez innych badaczy [1, 9, 10]. Ze względu na szybkość i bezpieczeństwo stosowania badania georadarowe stopniowo wypierają inne stosowane do tej pory metody badawcze, m.in. radiografię [11].

W artykule przedstawiono wytyczne wykonywania badań georadarowych konstrukcji żelbetowych i z betonu sprężonego. Podano zalecenia dotyczące wszystkich etapów badania z wykorzystaniem georadaru, w tym w zakresie planowania, ograniczeń i wymagań praktycznych, warunków dostępu do konstrukcji oraz właściwych procedur zbierania i analizy danych. W pracy podano przykłady wyników badań, których interpretacja najczęściej budzi wątpliwości.

2. OPIS TYPOWEGO ZESTAWU DO BADAŃ GEORADAROWYCH

W większości zastosowań na zestaw GPR składają się:

- antena lub zestaw anten wraz ze współpracującym nadajnikiem i odbiornikiem,
- jednostka sterująca,
- komputer służący do zbierania danych wraz z oprogramowaniem.

1. INTRODUCTION

Exhaustive preliminary inspections using non-destructive inspection techniques (NDT) are becoming common in restoration and retrofitting projects as well as within maintenance programmes of civil engineering structures. A widely known NDT technique is a ground penetrating radar (GPR), which is a very attractive option as it can reliably acquire non-visible information without causing damage to the structure, which is often critical due to conservation and economic factors. Despite the fact that practitioners are becoming more conscious of the potential of this non-destructive technique, its use is still not frequent outside the academic community, at least for structural (non-geotechnical) applications. In Poland, only few research institutes possess the necessary equipment and use it frequently.

Nowadays, due to maturity of GPR systems, they are increasingly being used as a diagnostic and quality assurance tool for concrete structures [1, 2]. The use of this tool has been validated by numerous authors for the assessment of the metallic reinforcement bars [3, 4], in the inspection of grouting quality inside plastic tendon ducts [5, 6, 7] and in the diagnosis of defects in concrete structures [8]. The inspection of bridge decks, particularly in the case of prestressed concrete bridges, is a critical task, but has been successfully carried out by many researchers [1, 9, 10]. Being usually considered faster and safer to apply, GPR is progressively replacing other techniques, such as radiographies. Generally, radioactive methods require special certified operators and the closure of an extended perimeter around the test location for security and health purposes [11].

In the presented paper methodologies for the radar technique and all stages of testing as well as data interpretation were thoroughly described and explained. The most difficult data examples were analysed.

2. DESCRIPTION OF TYPICAL GPR EQUIPMENT

For most applications, typical GPR equipment consists of the following elements:

- antenna or array of antennas with a transmitter and a receiver,
- control unit,
- computer with software to collect data.

Zdjęcia urządzeń wchodzących w skład zestawu GPR przedstawiono na Rys. 1.

Those elements can be seen in the Fig. 1.

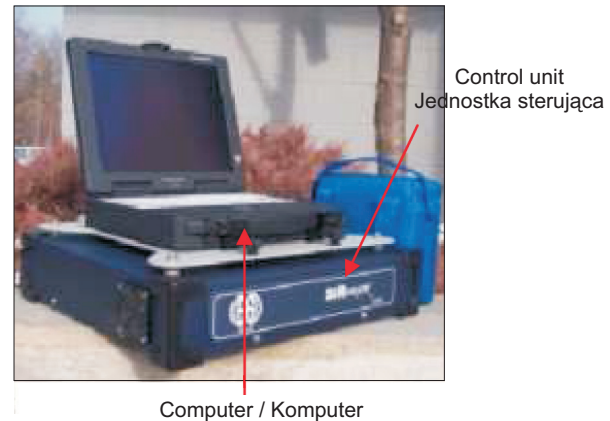


Fig. 1. Typical GPR System with 2.6 GHz antenna from GSSI
Rys. 1. Typowy system radarowy GPR z anteną 2,6 GHz firmy GSSI

W Tabelicy 1 zebrano najczęściej występujące rodzaje anten, podając zakres ich stosowania. Należy zauważyć, że im wyższa częstotliwość, tym mniejsza głębokość penetracji, oznaczająca w praktyce brak możliwości uzyskania obrazów o wysokiej rozdzielczości na większych głębokościach. Konieczny jest więc pewien kompromis między osiąganą rozdzielczością obrazu a głębokością badania. Dokładniejsze informacje na temat sprzętu GPR znaleźć można w literaturze [12 - 14].

3. METODY POMIARU GEORADAROWEGO

Istnieją dwie główne metody pomiaru georadarowego. Pierwsza z nich, najczęściej stosowana zwana jest metodą odbiciową (refleksyjną). W tej metodzie pojedyncza antena lub zestaw anten przemieszcza się po powierzchni badanego obiektu, zbierając prawie pionowe odbicia. Zestaw GPR wysyła impulsy elektromagnetyczne, które zostają skierowane przez antenę nadawczą w głąb badanego obiektu. Wysłana przez urządzenie fala elektromagnetyczna zostaje częściowo odbita w wyniku zmian objętościowych właściwości elektrycznych na napotkanych niejednorodnościach lub obiektach, a fala odbita zostaje zarejestrowana przez antenę odbiorczą. Metodę tę przedstawiono schematycznie na Rys. 2.

In the Table 1 the most common types of antennas are presented with their possible applications. It must be noted that the higher the frequency, the lower the penetration depth, so it is impossible to have high resolution images at very big depth. Some compromise must be made between required resolution and depth of investigation.

Most known producers of the GPR equipment are Mala Geoscience from Sweden, Geophysical Survey Systems from the United States, IDS from Italy and a Sensors and Software from Canada. More in depth information about the GPR equipment can be found in [12 - 14].

3. GPR ACQUISITION MODES

There exist two main acquisition methods with GPR. The first of them is called reflection method. In this method one or more radar antennas are moved over the object surface to collect near-vertical reflections. This is the most popular method in GPR acquisition. In that way, a GPR system sends electromagnetic radiation pulses into the investigation area through a transmitting antenna. The generated electromagnetic wave is partially reflected by changes in bulk electrical properties of the features or objects encountered by the radiowave and the reflection is picked up by the receiving antenna. In Fig. 2 the general description of this methodology is presented.

Table 1. Types of antennas for civil engineering and geotechnical application
Tablica 1. Typy anten w inżynierii lądowej i zastosowaniach geofizycznych

Center frequency Częstotliwość środkowa [MHz]	Depth of penetration Głębokość penetracji [m]	Typical applications Typowe zastosowania
Ground-coupled antennas / Anteny przesuwane po powierzchni (typu ground-coupled)		
1500 - 2600	0.3 - 0.5	• Concrete evaluation, including void detection, rebar and tendon ducts localization / Badania betonu: wykrywanie pustek, lokalizacja prętów i kanałów kablowych • Masonry evaluation, including void detection, rebar and other embedded elements detection / Badania konstrukcji murowych: wykrywanie pustek, prętów zbrojeniowych i innych wbudowanych elementów
900 - 1000	1	• Concrete evaluation, including void detection, rebar and tendon ducts localization / Badania betonu: wykrywanie pustek, lokalizacja prętów i kanałów kablowych • Masonry evaluation, including void detection, layers detection, rebar and other embedded elements detection / Badania konstrukcji murowych: wykrywanie pustek, układu warstw, prętów zbrojeniowych i innych wbudowanych elementów
400 - 500	4	• Engineering, Environmental, void detection, including layer detection, pipes, cables detection / Roboty inżynieryjne, ochrona środowiska, wykrywanie pustek, w tym wyznaczanie granic warstw i wykrywanie rur, kabli wchodzących w zakres sieci uzbrojenia terenu
200 - 300	7	• Geotechnical, Engineering, Environmental, including layer detection, pipes, cables detection / Geotechnika, roboty inżynieryjne, ochrona środowiska, w tym wyznaczanie granic warstw i wykrywanie sieci uzbrojenia terenu
100	20	• Geotechnical, Mining, Environmental, including layer detection, pipes, cables detection / Geotechnika, górnictwo, ochrona środowiska, w tym wyznaczanie granic warstw i wykrywanie sieci uzbrojenia terenu
16 - 80	25 - 35	• Geotechnical, including layer detection, pipes, cables detection / Geotechnika, w tym wyznaczanie granic warstw i wykrywanie sieci uzbrojenia terenu
Air launched antennas / Anteny nadwieszane nad powierzchnią (typu horn)		
2.2	< 0.75	• Pavement thickness and road assessment / Pomiar grubości i ocena stanu technicznego nawierzchni
1000	1	• Highway and bridge deck evaluation / Ocena stanu technicznego dróg i pomostów obiektów mostowych
Borehole antennas / Anteny otworowe		
100	20	• Waterproof, borehole tomography / Tomografia międzyotworowa
1000	1	

Drugą metodą jest tomografia (metoda transmisyjna). Tomografia radarowa znalazła zastosowanie w badaniu konstrukcji budowlanych stosunkowo niedawno. Metoda ta

The second method is called tomography (transmission) method. In case of structural civil engineering, radar tomography is a quite recent technique. It is generally used

umożliwia obrazowanie wnętrza obiektów takich jak podpory, ściany i inne elementy, umożliwiające dostęp przynajmniej z dwóch stron. W tomografii wykorzystywane są dane uzyskane w wyniku przejścia sygnału przez obiekt, co jest cechą charakterystyczną tej metody badawczej. Umieszczone po przeciwnych stronach anteny - nadawczą i odbiorczą - przemieszcza się z punktu do punktu w celu całkowitego pokrycia badanego obszaru falami elektromagnetycznymi i bezpośredniej rejestracji impulsów. Metodzie tej zostanie poświęcony osobny artykuł.

to map the interior of objects like columns, walls and other elements that can be accessed from two or more sides. Tomography is a rather distinct processing mode, which makes use of transmission acquisitions. In this acquisition mode, the transmitter and the receiver antennas are separated and located successively in various positions, in order to cover entirely the investigated area with electromagnetic rays, and the direct pulse is recorded. This method will be described in another paper.

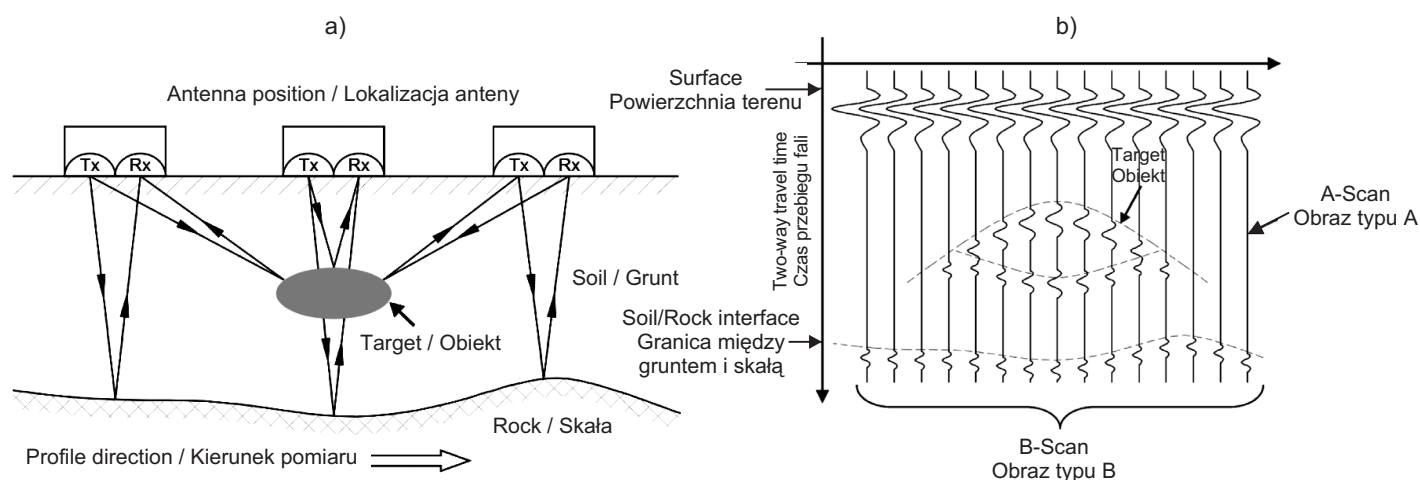


Fig. 2. Scheme of GPR field acquisition in reflection mode (left image -a) and 2D radargram (B-scan) as result (right image - b) [13]

Rys. 2. Schemat pobierania danych z systemem radarowym w metodzie odbić (lewy rysunek - a) oraz wynik pomiaru w postaci radargramu 2D (prawy rysunek - b) [13]

Po przetworzeniu do postaci cyfrowej uzyskujemy:

• Obraz typu A (profil jednowymiarowy)

Obraz typu A to wynik pomiaru w jednym punkcie. Wykres przedstawia amplitudę odbić w funkcji czasu (Rys. 2). Znając prędkość rozchodzenia się fali w betonie, skalę czasu możemy przekształcić na głębokość. Amplituda i faza sygnału zależą od odległości oraz właściwości napotkanych w betonie konstrukcji obcych.

• Obraz typu B (profil dwuwymiarowy)

Profile dwuwymiarowe stanowią najczęstszy wynik i podstawę do interpretacji wyników badania. Antena wraz z nadajnikiem i odbiornikiem przemieszcza się po linii pomiaru. Po rejestracji całego ciągu pomiarowego, składając pojedyncze wykresy (obrazy typu A) wzdłuż linii na

When the image is digitalized, it can be then visualized in various ways:

• A-Scans (one-dimensional profiles)

An A-scan is a result of a point measurement. The detected intensity of the reflections is presented as a function of time (Fig. 2). If the propagation velocity of radar waves in concrete is known, the time scale can be converted into a depth scale. The intensity and the phase of the signal depend on the distance and on the properties of the structures in the concrete.

• B-Scans (two-dimensional profiles)

2D vertical profiles are the most commonly used images in GPR survey and a starting point for further interpretation. The antenna with a transmitter and a receiver is moved along the survey line. If a whole trace is recorded, the plot of these A-scans along a line on the surface in

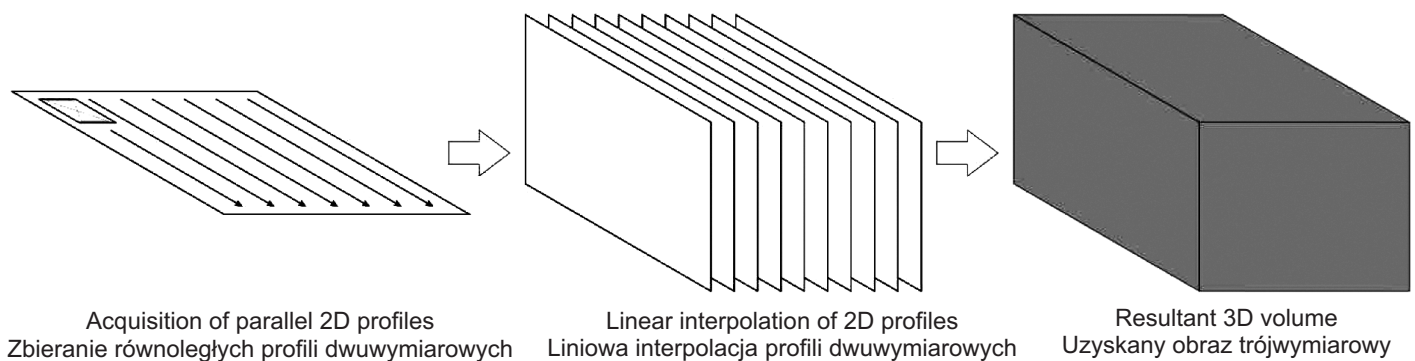


Fig. 3. Scheme of the process of producing 3D volumes from field data acquired in reflection mode
 Rys. 3. Schemat tworzenia obrazów 3D z danych pobranych w metodzie odbić

powierzchni terenu uzyskujemy obraz typu B – zwany również radargramem, przedstawiony na Rys. 2. Wynik takiej obróbki jest równoważny przekrojowi poprzecznemu w płaszczyźnie wyznaczonej kierunkiem ciągu pomiarowego. W obrazach typu B amplitudy mogą zostać przedstawione w postaci dwuwymiarowej na wykresie zwanym „wiggle plot”, z przypisaniem kolorów do pikseli lub w odcieniach szarości.

• Obraz typu C (profil trójwymiarowy)

Wizualizacja trójwymiarowa powstaje po złożeniu równoległych i położonych blisko siebie profili dwuwymiarowych (Rys. 3). Więcej informacji na ten temat można uzyskać w literaturze [15 - 17]. Sposób uzyskiwania odpowiednich danych pozwalających na uzyskanie bryły precyzyjnie odzwierciedlającej budowę podłoża gruntuowego przedstawia Rys. 3.

W celu uzyskania bryły stanowiącej precyzyjny obraz przestrzenny pierwszorzędne znaczenie ma dokładna lokalizacja każdego ciągu pomiarowego oraz jego równoległość w stosunku do ciągów sąsiednich. Dokładność podczas wyznaczania punktu początkowego i końcowego pozwala na uzyskanie równej długości radargramów. Odpowiedni odstęp pomiędzy profilami jest niezbędny w celu uniknięcia utraty istotnych informacji. Zmniejszanie odstępów między równoległymi profilami prowadzi co prawda do uzyskania obrazu wynikowego o większej dokładności, ale jednocześnie ilość danych przestrzennych może okazać się za duża do przetworzenia z punktu widzenia ograniczonych możliwości sprzętowych i ograniczonego czasu badania. W związku z powyższym w większości

Fig. 2 is called B-scan (or radargram for radar data). The result is equivalent to a perpendicular slice through the plane in trace direction. In the B-scan the intensities are represented two-dimensionally as wiggle or pixel in assigned colors or grey scale.

• C-Scans (three-dimensional profiles)

3D visualization technique consists in obtaining a 3D volume of the radar data by acquiring a dense subset of parallel 2D radar profiles (Fig. 3). More in depth information can be obtained in [15 - 17]. Fig. 3 illustrates how to acquire adequate data in order to allow a precise reconstruction of the 3D representative body of the subsoil features.

The accurate location of each trace and its parallelism with the adjacent ones is critical to produce accurate 3D volumes. A good control of the starting and end points allows to obtain radargrams with the same length. The separation between each profile is necessary to avoid losing essential information. Although the smaller the separation between parallel profiles, the more accurate the final data will be, this can result in excessive amount of data, which might not provide useful information due to the limited computer resources and time needed for acquisition and processing of 3D data. Thus, in most practical applications, the Nyquist criterion should be followed [18] and a separation of 5 cm is usually sufficient to obtain good accuracy. Afterwards, the 3D volume is created by performing a linear interpolation between successive radargrams.

This technique has been successfully applied in numerous applications of NDT investigation of civil structures by providing a visualization of the radar data within the

praktycznych zastosowań stosuje się kryterium Nyquista [18], a odległość 5 cm pomiędzy profilami równoległymi okazuje się być wystarczająca w celu uzyskania wymaganej dokładności obrazowania. Następnym krokiem jest stworzenie bryły przy wykorzystaniu liniowej interpolacji poszczególnych radargramów.

Powyższa technika była stosowana z powodzeniem do oceny konstrukcji budowlanych, umożliwiając wizualizację danych z pomiaru radarowego w postaci przekrojów pionowych [19] lub izopowierzchni [20]. Dzięki niej możliwe jest uzyskanie realistycznego obrazu obiektów liniowych, takich jak instalacje, pręty oraz duże pustki. Ponadto prezentacja wyników w formie bardziej zbliżonej do rzeczywistości pozwala odczytać rzeczywiste kształty wewnętrznych niejednorodności również osobom nieposiadającym specjalistycznego przygotowania w tym zakresie.

4. ZASTOSOWANIE BADAŃ GEORADAROWYCH PRZY OCENIE STANU TECHNICZNEGO OBIEKTÓW MOSTOWYCH

4.1. PLANOWANIE BADANIA NIENISZCZĄCEGO

4.1.1. Uwagi ogólne

Staranne zaplanowanie badania przy użyciu georadaru z uwzględnieniem jego możliwości i ograniczeń jest niezbędne, aby było ono warte poniesionych kosztów. W tym celu warto zapoznać się z przedstawionymi tutaj szczegółowymi wytycznymi dla badań georadarowych metodą odbiciową. Przetawione wnioski wynikają z obserwacji poczynionych przez autorów podczas badań laboratoryjnych i pomiarów na terenie Portugalii, Niemiec i Polski. Mają one wspomagać podejmowanie decyzji przez administratorów obiektów mostowych, planujących zlecenie wykonania badań nieniszczących na drodze przetargu.

4.1.2. Ograniczenia i wymagania praktyczne

W przypadku badań georadarowych przy wyborze techniki należy uwzględnić:

- rodzaj i specyfikę badanego materiału ze względu na różną prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w różnych materiałach, zarówno naturalnych, jak i wytworzonych przez człowieka,

investigated area by showing the results as depth slices [19] or by providing more realistic views of linear objects, such as pipes, cables, rebars and large voids, through isosurfaces [20]. Additionally, it allows non-specialized radar users to understand better radar results by providing more realistic shapes of embedded features.

4. METHODOLOGIES FOR RADAR IN THE REFLECTION MODE APPLIED FOR THE INSPECTION OF BRIDGES

4.1. PLANNING AN NDT INVESTIGATION

4.1.1. General comments

Only carefully planned NDT inspection based on radar technique with deep understanding of its advantages and limitations can make the inspection worth its price. Thus detailed methodologies for radar in reflection mode are presented. Those conclusions are based on authors own experience taken from the laboratory and on-site measurements in Portugal, Germany and Poland. Those conclusions should be a basis for bridge owners, who are planning public contests concerning use of NDT techniques.

4.1.2. Limitations and practical requirements

In the case of GPR, the following items must be considered in the process of selecting the technique:

- type and nature of the materials to be investigated, as electromagnetic waves propagate at different speeds in different kinds of natural and man-made materials,
- nature of the investigation targets (reinforcement, moisture, voids, etc.). Generally, a very dense grid of reinforcement produces poor or no results at all,
- preliminary assessment of the presence of moisture (e.g. due to rain or rising damp), as it affects severely the GPR performance and can prevent the acquisition of suitable data,
- careful choice of antennas needed to perform the task. It must be based on operator's individual expertise taking into account previously mentioned remarks. In general terms, choice of antennas depends on requested depth resolution and required penetration depth. It must be remembered that high frequency antennas have very low penetration depth but have quite high depth resolution,

- specyfikę szukanej niejednorodności (zbrojenie, wilgoć, pustka itd.). Bardzo gęsta siatka prętów zbrojeniowych pozwoli uzyskać co najwyżej bardzo niewyraźne wyniki,
- wstępną ocenę poziomu wilgotności (np. jako skutek opadów lub podsiąkania) ze względu na bardzo istotny, negatywny wpływ wilgoci na przebieg badania georadarowego, nawet w stopniu uniemożliwiającym zebranie potrzebnych danych,
- odpowiedni do warunków dobór anten. Powinien on uwzględniać doświadczenie operatora oraz opisane poniżej uwarunkowania. Generalnie dobór anteny zależy od wymaganej rozdzielczości i głębokości penetracji. Pamiętać należy, że anteny o wysokiej częstotliwości charakteryzują się bardzo małą głębokością penetracji, oferując w zamian wyższą rozdzielczość,
- czas potrzebny do zebrania danych w ilości odpowiedniej z punktu widzenia oczekiwanych wyników badania. Nadmierna ilość danych może niepotrzebnie wydłużyć czas ich obróbki i w efekcie zwiększyć koszt badania,
- szacunkowy czas na przeprowadzenie całego badania. Nierówności powierzchni konstrukcji betonowej lub murowej, powodujące nieprawidłowy ruch koła pomiarowego, mogą bardzo utrudnić zbieranie danych. Nie bez znaczenia jest również czas niezbędny do przeniesienia sprzętu na miejsce badania, który może być dłuższy niż czas samego badania. Należy starannie dobrać rusztowania lub zwyżki, uwzględniając warunki występujące w miejscu badania.

4.1.3. Możliwe obszary zastosowań profilowania georadarowego metodą odbiciową z wykorzystaniem obrazowania dwu- i trójwymiarowego

Wyniki badań laboratoryjnych profilowania georadarowego metodą odbiciową zostały szeroko omówione przez autora w poprzednich pracach [7, 21] i zweryfikowane w trakcie badań terenowych opisanych w publikacji [1]. Obejmują one przede wszystkim obrazowanie dwu i trójwymiarowe przy ustalaniu parametrów geometrycznych (m.in. wykrywanie prętów zbrojenia i kanałów kablowych) i nieciągłości konstrukcji (m.in. lokalizacje pustek oraz punkty niedogęszczenia mieszanki betonowej). Należy zwrócić uwagę, że wizualizacje trójwymiarowe wymagane są jedynie w ściśle określonych sytuacjach.

- careful assessment of the time needed to acquire sufficient data to obtain the requested results. Too much data can increase processing time and costs unnecessarily,
- careful assessment of time needed to perform the testing. Irregularities of the concrete or masonry surfaces can make the data acquisition very difficult due to possible malfunctioning of survey wheel of the antennas. Also time needed to access the test sites can be much longer than testing time itself. Good scaffolding systems or movable platforms must be chosen very carefully and correspond to each particular test site.

4.1.3. Possible areas of applicability to radar reflection profiling using 2D and 3D image visualisation techniques

Results from laboratory experiments of radar reflection profiling are widely presented by author in his previous works [7, 21] and validated during on-site tests in [1]. They include mainly the use of 2D and 3D imaging for the verification of structural geometry (like detection of rebars or tendon ducts) and integrity (like location of voids or areas with poorly compacted concrete). It must be clearly noted that 3D visualisation techniques are only required on specified areas.

Quality control and diagnosis by non-destructive inspection using GPR can result in an increase in safety of structures and in a global reduction of future repair and replacement costs. Thus, there are significant implications for the successful application of GPR techniques to the civil engineering industry, such as:

1. Performance evaluation and updating of the assumptions made in the models used for the assessment of structural safety in existing structures for the design of new structures.
2. Validation of geometry surveys used for assessment or retrofit actions of existing structures and for quality control of new structures.
3. Damage detection of the structure or infrastructure caused by inadequate or faulty workmanship or by any external action.

Kontrola jakości i diagnostyka z wykorzystaniem nieniszczących badań georadarowych może zaowocować zwiększeniem bezpieczeństwa konstrukcji oraz ogólną redukcją kosztów przyszłych napraw i wymian. Istnieje jednak szereg implikacji warunkujących powodzenie zastosowania technik georadarowych w budownictwie, do których należą:

1. Ocena efektywności oraz aktualizacja założeń przyjętych w modelach wykorzystanych w ocenie stabilności istniejących konstrukcji w celu wykorzystania ich przy projektowaniu nowych konstrukcji.
2. Weryfikacja pomiarów geometrycznych wykorzystywanych przy analizie stanu lub planowaniu modernizacji istniejących konstrukcji lub kontroli jakości konstrukcji nowobudowanych.
3. Wykrywanie uszkodzeń konstrukcji lub instalacji wynikających z nieodpowiedniego lub wadliwego wykonawstwa lub oddziaływań zewnętrznych.

4.2. BADANIE

4.2.1. Warunki dostępu

Dogodny i bezpieczny dostęp do przedmiotu badania georadarowego ma kluczowe znaczenie dla jego powodzenia. Brak dogodnego dostępu z istniejących rusztowań lub konieczność skorzystania z dodatkowych drabin lub podestów w celu zwiększenia pionowego zasięgu może istotnie wydłużyć czas badania. Przykład podestu roboczego przedstawiono na Rys. 4. Z powodu niewłaściwej wysokości podestu, aby zbadać belki zabudowane w konstrukcji konieczne jest skorzystanie z dodatkowych schodów, co znacząco wydłuży czas badania. Ponadto w sytuacji, gdy rusztowanie nie obejmuje całego obiektu, konieczne będzie kilkakrotne wnoszenie i znoszenie sprzętu po schodach w celu zbadania kolejnych podpór. Skutkuje to niepotrzebną stratą czasu oraz wynikającym stąd wzrostem kosztów badania.

4.2.2. Zakładanie i zaznaczanie siatek pomiarowych na badanej konstrukcji

Wymiary siatki pomiarowej zależą w znacznej mierze od założonych celów badania. Przykładowo, jeśli biuro projektowe zleciło zlokalizowanie obiektów osadzonych w konstrukcji jedynie w płaszczyźnie i można się spodziewać, że nie będą one miały skomplikowanych kształtów, w zupełności wystarczy siatka o mniejszym zagęszczeniu

4.2. TESTING

4.2.1. Accessing the test site

Good and safe access to test site is the key to successful GPR investigation. If the scaffolding system is not covering well the test area or the test location height requires use of additional ladders or platforms, the duration of GPR investigation can be significantly extended. In Fig. 4 an example of access platform is shown. Because of the wrong height of the platform itself, constructed to test internal beams, additional stairs had to be used, what significantly extended testing time. Also because the scaffolding system was not placed all over a bridge, equipment had to be transported down and upstairs several times to access consecutive pillars. That caused unnecessary time loss and implied additional costs.



Fig. 4. Example of scaffolding system used to access the test site

Rys.4. Przykład systemu rusztowań stosowanego do badań w terenie

4.2.2. Selection and marking of test grids

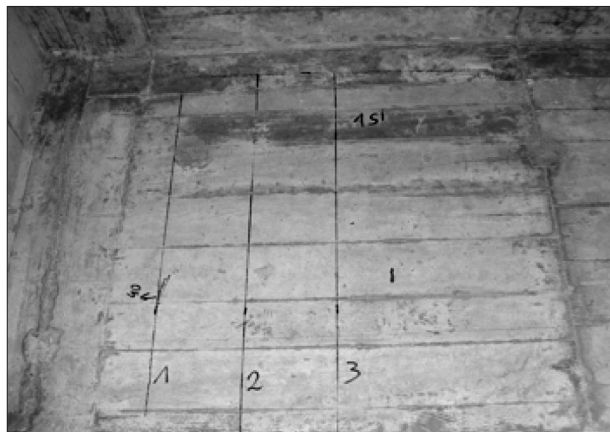
The size of the grid strongly depends on the test objectives. If for instance design office requires the information about the location of embedded objects only in plane, and the objects are not expected to have complicated shapes, less dense grid can be advised. According to the author's experience, to search for tendon ducts, grids with 20 - 40 cm of spacing between parallel profiles can be successfully applied. Profiles should be performed in the perpendicular

profilu. Z doświadczeń autora wynika, że przy ustalaniu położenia kanałów kablowych w konstrukcji sprężonej równoległe osie pomiarowe należy wyznaczyć w odstępach co 20 - 40 cm. Osie pomiarowe należy prowadzić w kierunku prostopadłym do spodziewanego przebiegu elementów osadzonych w betonie (takich jak pręty zbrojeniowe lub kanały kablowe).

Jeśli jednak wymagana jest lokalizacja i określenie kształtu elementów osadzonych w betonie i niejednorodności w przestrzeni trójwymiarowej, nieodzowne będzie użycie gęstszych siatek. Jak wynika z doświadczeń autora, realistyczne dane przestrzenne o osadzonych w konstrukcji elementach lub niejednorodnościach uzyskać można zakładając siatkę o równoległych osiach pomiarowych rozmieszczonych co 5 cm [7]. Dotyczy to jednak bardzo konkretnych sytuacji, gdy mamy do czynienia ze specyficznymi problemami. Wizualizacja trójwymiarowa jest szczególnie przydatna przy poszukiwaniu punktów niedogęszczenia mieszanki zgodnie z informacjami zamieszczonymi w publikacjach [7, 21].

Siatki należy zaznaczyć na konstrukcji wodoodpornym flamastrem, korzystając z poziomic. Pionowe i poziome linie prowadzące powinny być bardzo wyraźnie widoczne na powierzchni. Przykłady siatek pomiarowych przedstawiono na Rys. 5.

a)



b)

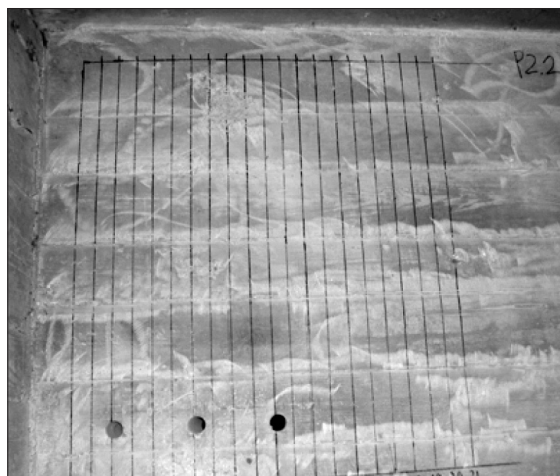


Fig. 5. Examples of measuring vertical and horizontal lines in beams: a) at the bridge with a line separation of 20 cm, b) at the bridge with a line separation of 5 cm

Rys. 5. Przykłady siatek pomiarowych na belkach mostowych: a) na moście z 20 cm odstępem pomiędzy liniami pomiarowymi, b) na moście z 5 cm odstępem pomiędzy liniami pomiarowymi

4.2.3. Zbieranie danych

W przypadku badania metodą odbiciową wymagana jest równa sucha powierzchnia, z zaznaczoną na niej siatką pomiarową. Podczas pomiaru należy sprawdzać długości uzyskanych profili, aby uniknąć nieprawidłowych danych odległościowych. Operator powinien zwracać uwagę na braki w radargramach i powtórzyć pomiar w przypadku

direction to the expected embedded elements (like rebars or tendon ducts).

In case if 3-dimensional information about location and shape of embedded elements or anomalies is required, more dense grids can be strongly advised. According to author's experience, 5 cm of spacing between parallel profiles is sufficient to obtain realistic 3D information about embedded structural elements or anomalies [7]. That method concerns only solving specific problems in very specific situations. 3D image visualization is especially useful while searching for areas with poorly compacted concrete, like indicated in [7, 21].

The grids should be marked with waterproof marker, using the levelling rod. Vertical and horizontal reference lines should be indicated very clearly. Examples of test grids are shown in Fig. 5.

4.2.3. Performing data acquisition

Data in the reflection mode should be acquired on the smooth, dry surface, with previously prepared test grid. Length of the acquired profiles should be controlled during the measurement, so no misleading distance information is obtained. Operator should pay attention if no traces are lost, and if so, repeat the measurement (Fig. 6). Antenna

ich zauważenia (Rys. 6). Antenę należy przesuwac ze stałą prędkością jak najbliżej badanej powierzchni. Dla zapewnienia prawidłowości danych odległościowych należy wyraźnie zaznaczyć na antenie jej oś, dzięki czemu operator będzie mógł rozpocząć i zakończyć pomiar dokładnie na linii odniesienia, zaznaczonej na badanej powierzchni.

should be moved with constant speed and remain as close as possible to the tested surface. To ensure exact distance information, position of the centre of the antenna should be clearly marked on the antenna itself so the operator can start or end the measurement on an exact reference line marked on the tested surface.

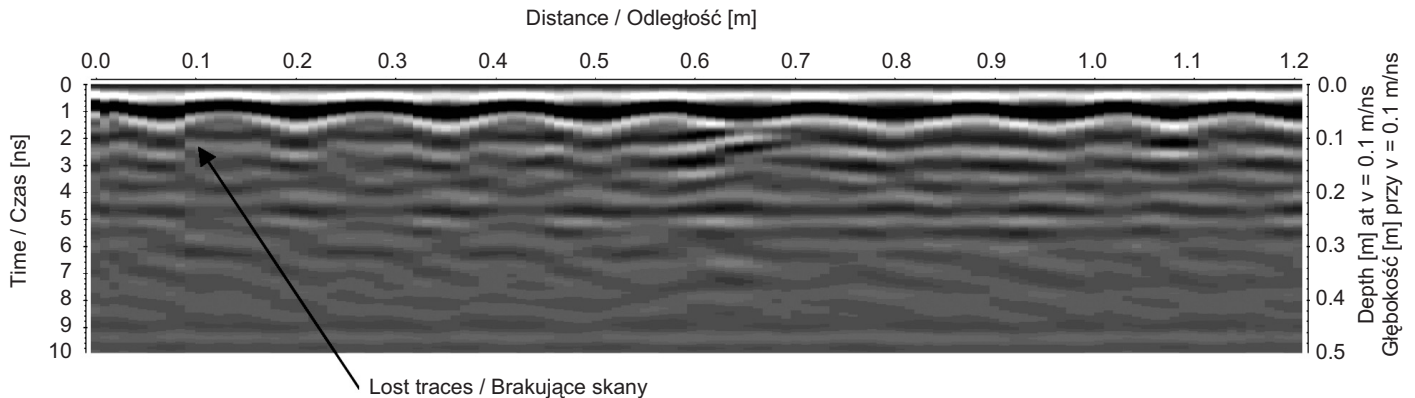


Fig. 6. Example of radargram where some traces were lost
Rys. 6. Przykład radargramu, gdzie niektóre ze skanów zostały utracone

W trakcie pomiaru należy przeprowadzać kalibracyjne pomiary czasu przebiegu fali, korzystając z metalowego ekranu umieszczonego po drugiej stronie badanej konstrukcji w celu wyznaczenia średniej prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku. Typowy wynik takiej kalibracji przedstawiono na Rys. 7. Dysponując wynikiem pomiaru prędkości, łatwo można przeliczyć oś czasu na głębokość i w ten sposób określić głębokości, na jakich występują znalezione obiekty. Typowy pomiar kalibracyjny przeprowadza się, umieszczając metalowy ekran po jednej stronie konstrukcji i przesuwając antenę po powierzchni z drugiej strony. Możliwy jest również układ odwrotny, w którym antena pozostaje nieruchomo, a metalowy przedmiot przesuwa się ze stałą prędkością po drugiej stronie konstrukcji.

During this process, time calibration measurements with metallic shield on the opposite side should be performed to estimate the average propagation velocity within the cross section of tested structure. Typical result from such calibration is presented in Fig. 7. When the velocity information is given, time axis can be converted easily into the depth scale to measure the depth of targets. Typical measurement procedure consists of placing metallic shield on one side of tested structure and moving an antenna along the surface of the other side. Also the opposite procedure is possible, when the antenna is remaining stationary and metallic object is moved with constant speed on the opposite side.

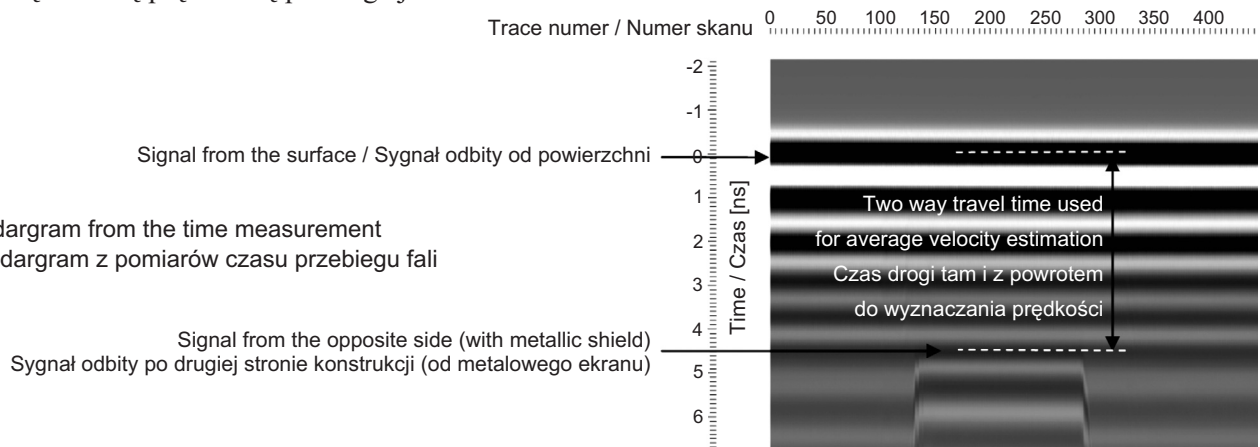


Fig. 7. Radargram from the time measurement
Rys. 7. Radargram z pomiarów czasu przebiegu fali

4.3. OBRÓBKA I ANALIZA DANYCH

4.3.1. Obróbka danych

Nieobrobione dane z pomiarów radarowych zawierają wiele szumów, które muszą zostać odfiltrowane przy pomocy specjalistycznego oprogramowania. Procedury obróbki danych uzyskanych w badaniu metodą odbiciową przedstawiono szczegółowo w literaturze [13]. W niektórych systemach istnieje możliwość zastosowania filtrów sprzętowych (np. pasmowych) już na etapie zbierania danych w terenie. Takie rozwiązanie może znacząco przyspieszyć proces interpretacji danych, umożliwiając częściową interpretację już w terenie.

4.3.2. Interpretacja danych

Zasadniczo metoda interpretacji danych zawartych w radargramach dwuwymiarowych jest dobrze znana. Polega na znalezieniu wierzchołków hiperbol, wyznaczających usytuowanie osadzonych w konstrukcji elementów lub na rozpoznaniu przebiegu warstw konstrukcji. Również interpretacja danych przestrzennych nie powinna stwarzać problemów w sytuacji, gdy dane o osadzonych w konstrukcji elementach i niejednorodnościach przedstawione są w formie izopowierzchni lub przekrojów na głębokość konstrukcji, co umożliwia łatwe określenie kształtu i wyznaczenie współrzędnych wbudowanych elementów. Mogą jednak wystąpić sytuacje stwarzające spore problemy na etapie interpretacji danych. Najważniejsze z nich to:

1. Ekranowanie fal przez gęsto rozmieszczone pręty zbrojeniowe.

Możemy mieć do czynienia z dwoma przypadkami, w których zjawisko ekranowania odpowiednio będzie lub nie będzie widoczne dla operatora georadaru. W pierwszym przypadku, bardzo gęsta siatka zbrojenia powoduje całkowity brak sygnału z niżej położonej części konstrukcji (Rys. 8). W drugim, bardziej złożonym przypadku mały kąt wierzchołkowy stożka fali elektromagnetycznej spowoduje przeoczenie obiektów znajdujących się bezpośrednio pod metalową siatką, szczególnie, gdy będą zbliżone wielkością do oczka siatki (Rys. 9).

4.3. DATA PROCESSING AND ANALYSIS

4.3.1. Data processing

Raw data recorded by each radar system contain a lot of noise and they need to be filtered by specialised software. Detailed processing procedures for data acquired in reflection mode are presented widely in [13]. In some systems, hardware filters (like band-pass) can be applied during on-site data acquisition. It can significantly speed-up data interpretation process, making it possible to interpret some of the data on-site.

4.3.2. Data interpretation

In general terms, data interpretation from 2D radargrams is well known and is based mainly on identifying the peaks of the hyperbolas in order to determine the position of embedded structural elements or recognize the layers within the structure. Interpretation of 3D data is easy as well, because information about embedded structural elements or anomalies is provided as isosurfaces or depth slices, so the shape and coordinates can be quite easily interpreted. However in some situations data interpretation can be difficult. These are mainly:

1. Shielding of the electromagnetic waves caused by closely spaced reinforcement.

There exist two cases where shielding effect can be visible or invisible for the operator. In the first case, when the reinforcement grid is very dense, there will be no observable signal below (Fig. 8). In the second, more complicated case, due to low aperture of the cone of the electromagnetic waves, objects situated directly behind the metallic grid remain undetected, especially when they are the size of the grid itself (Fig. 9).

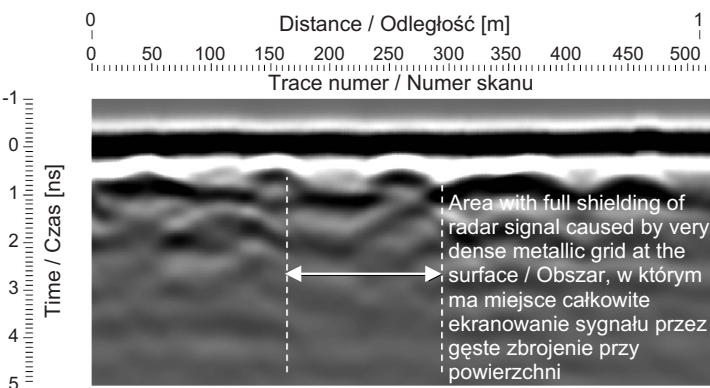


Fig. 8. Example of the full shielding effect behind very dense reinforcement grid

Rys. 8. Przykład pełnego ekranowania sygnału poniżej gęstej siatki zbrojeniowej

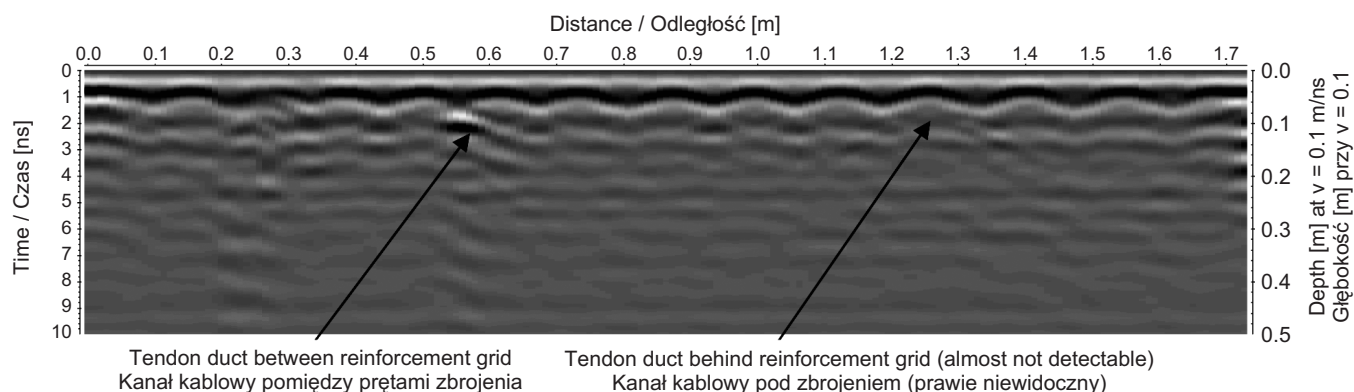


Fig. 9. Example of partial shielding effect

Rys. 9. Przykład częściowego ekranowania sygnału

2. Zmienna jakość betonu (wynikająca z niejednakowego zagęszczenia lub dużej ilości wody).

W tym konkretnym przypadku duże zawilgocenie wewnątrz konstrukcji można stwierdzić obserwując zmiany sygnału pochodzącego ze spodu konstrukcji. Jeśli sygnał jest jednakowy na całej długości, konstrukcję można uznać za mniej więcej jednorodną. Gdy jednak sygnał pochodzący ze spodu konstrukcji wykazuje zmiany (takie jak przedstawione na Rys. 10), a czas dojścia sygnału do spodu konstrukcji jest dłuższy niż standardowo przyjmowany dla danej głębokości, możemy mieć do czynienia z bardzo wilgotnym betonem.

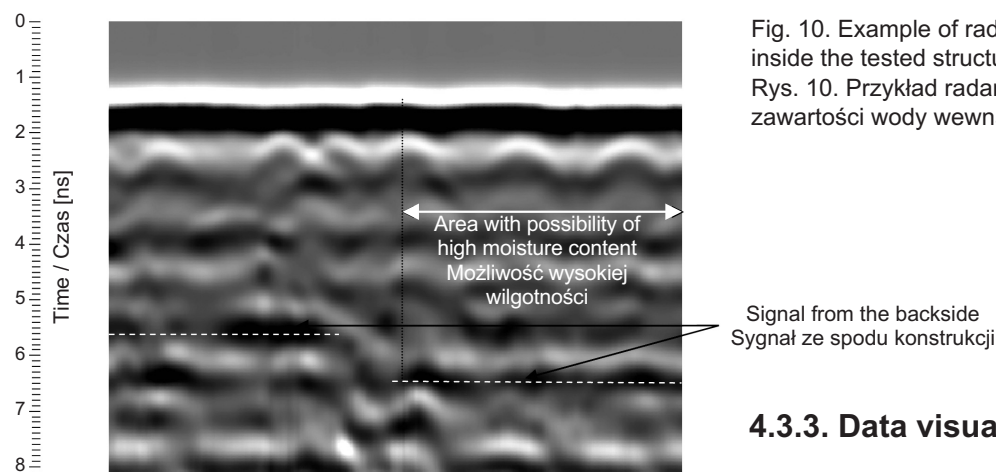


Fig. 10. Example of radargram with indication of high moisture inside the tested structure

Rys. 10. Przykład radargramu ze wskazaniem wysokiej zawartości wody wewnątrz testowanej konstrukcji

4.3.3. Prezentacja graficzna

Najodpowiedniejszą, z punktu widzenia odbiorcy końcowego, metodą przedstawienia danych jest rysunek programu AutoCAD ze współrzędnymi do linii prowadzących

2. Presence of different concrete qualities (different compaction or presence of high amount of water).

In that particular case, presence of salty water inside the structure can be identified by observing the changes of signal from the backside of the tested structure. If the signal is uniform along its entire length, the structure can be considered more or less homogenous. But if signal from the back side is changed (like indicated in Fig. 10), and time needed to reach the back side is longer than usually for the specified depth, it can indicate presence of very wet concrete.

4.3.3. Data visualisation

The most adequate way of presenting the results for the end – users is to show them as AutoCAD drawing with coordinates to the reference lines (vertical and horizontal). In that way, bridge owners, having marked grids on the test sites, can easily identify location of rebars, tendon ducts or deteriorated areas. Numerous examples of such results are presented in [1].

(pionowych i poziomych). Pozwala to administratorom obiektów mostowych łatwo określić usytuowanie prętów zbrojenia, kanałów kablowych i uszkodzeń wewnętrznych konstrukcji. W literaturze [1] znaleźć można liczne przykłady takiego przedstawienia wyników.

4.4. KALIBRACJA SPRZĘTU I OPROGRAMOWANIA DO BADAŃ GEORADAROWYCH

Przeprowadzenie kalibracji posiadanego sprzętu przed wyruszeniem w teren ma pierwszorzędne znaczenie. W tym celu każdy użytkownik georadaru powinien stworzyć własny wzorzec kalibracyjny. Autor wykonał wiele takich wzorców, zajmując się tematem interpretacji danych georadarowych. Informacje o poprzednich pracach znaleźć można w [21].

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Wyniki badań oraz analiza stanu wiedzy na temat techniki georadarowej wykazały jej duży potencjał w zakresie lokalizacji zbrojenia oraz osłon kanałów kablowych usytuowanych wewnątrz istniejących konstrukcji żelbetowych i z betonu sprężonego. Georadar, oprócz swoich licznych zalet, posiada też szereg wad, takich jak niemożność wykonania pomiaru na świeżo zabetonowanej konstrukcji czy też na konstrukcji silnie zmoczonej przez padający deszcz. W przeciwieństwie do profometru jest w stanie zlokalizować elementy wewnętrzne konstrukcji niemal na każdej głębokości. Jednakże należy nadmienić, że im wyższa będzie częstotliwość centralna zastosowanych anten, tym mniejsza będzie ich głębokość penetracji. Przyjmuje się dla celów badawczych, że stosując antenę 1600 MHz można osiągnąć zdolność penetracji w głąb konstrukcji do 0,4 m. Na koniec należy podkreślić, że obrazowanie dwuwymiarowe jest najbardziej efektywną metodą zbierania danych oraz dostarcza wystarczającej ilości informacji do ich właściwej interpretacji. Tylko w bardzo szczególnych przypadkach, takich jak gęsta wielowarstwowa i wielokierunkowa siatka zbrojeniowa można zastosować technikę obrazowania trójwymiarowego.

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł opracowano w ramach pracy własnej IBDiM nr PW.S - 516. Autor dziękuje również za wsparcie, jakie otrzymał w ramach projektu unijnego “Sustainable Bridges” wykonywanego ramach 6. Programu Ramowego UE.

4.4. CALIBRATION OF RADAR EQUIPMENT AND SOFTWARE

It is extremely important to calibrate own equipment before going to real on-site testing. For that purpose each radar owner should build his own test specimen. Author made many specimens to learn how to interpret radar data. Description of previous works can be found in [21].

5. FINAL REMARKS

Analysis of test results and state of the art showed big potential of this technique in the scope of reinforcement localization or tendon ducts placed inside concrete structures. Despite its many advantages, georadar has also wick points such as lack of testing possibility on the wet surface. Unlike the profometer it can accurately localize embedded elements inside the concrete structures. But one has to remember that higher the frequency of the used antenna, lower will be the penetration depth. It is assumed that 1600 MHz antenna can reach 0.4 m inside the tested structure. Finally, it is worth noting that two-dimensional data visualization is the most time and cost effective method of the radar profiling. Only in very few complicated cases data must be visualized in the three-dimensional way.

ACKNOWLEDGEMENT

Paper was prepared on the basis of the IBDiM funded project no. PW.S - 516. Author would like to acknowledge the support from the European Project “Sustainable Bridges” funded within the 6th FP.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] Cruz P.J.S., Topczewski L., Fernandes F., Trela Ch., Lourenço P.B.: Application of radar techniques to the verification of design plans and the detection of defects in concrete bridges. *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*, **6**, 4, 2010, 395 - 407
- [2] Maierhofer Ch., Kind T.: Application of impulse radar for non-destructive investigation of concrete structures. *Proceedings of SPIE*, **4758**, Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Steven Koppenjan, Hua Lee Editors, Santa Barbara 2002, 382 - 387
- [3] Derobert X., Aubagnac C., Abraham O.: Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy. *NDT&E International*, **35**, 8, 2002, 541 - 548

- [4] *Maierhofer Ch., Brink A., Rolig M., Wiggensauser H.*: Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar. *NDT&E International*, **36**, 4, 2003, 257-263
- [5] *Forde M.C.*: Ground Penetrating Radar. In: Introduction to Non-destructive Evaluation Technologies for Bridges Conference. Transportation Research Board, Washington, 2004
- [6] *Giannopolous A., Macintyre P., Rodgers S., Forde M., Koppenjan S.K., Hua L.*: GPR detection of voids in post-tensioned concrete bridge beams. 9th International conference on ground penetrating radar, Santa Barbara, USA, 2002
- [7] *Topczewski L., Fernandes F., Cruz P.J.S., Lourenço P.B.*: Verification of construction plans of concrete bridges and detection of possible deficiencies using Ground Penetrating Radar. 3rd International Conference of Association for Bridge Maintenance and Safety and Management (IABMAS), July 16-19, Porto, Portugal, 2006
- [8] *Taffe A., Maierhofer Ch.*: Guidelines for NDT methods in civil engineering. *Proc. NDT-CE*, Berlin, 2003
- [9] *Hugenschmidt J.*: Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials*, **16**, 3, 2002, 147 - 154
- [10] *Scott M., Rezaizadeh A., Delahazab A., Santos C.G., Moore M., Graybeal B., Washer G.*: A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment. *NDT&E International*, **36**, 4, 2003, 245 - 255
- [11] *Mitchell T.M.*: Radioactive/Nuclear Methods. In: *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, edited by V.M. Malhotra and N.J. Carino, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2004
- [12] *Daniels D.J.*: Ground Penetrating Radar - 2nd edition. The Institution of Electrical Engineers, Series "Radar, sonar, navigation and avionics", **15**, London, 2004
- [13] *Fernandes F.M.*: Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry. PhD thesis, University of Minho, Guimaraes, 2006
- [14] *Malhorta V.M., Carino N.J.*: *CRC Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1991
- [15] *Groenenboom J., Van der Kruk J., Zeeman J.H.*: 3D GPR data acquisition and the influence of positioning errors on image quality. *Proceedings EAGE 63rd Conference and Technical Exhibition*, Amsterdam, 2001
- [16] *Kohl Ch., Krause M., Maierhofer Ch., Wöstmann J., Wiggensauser H., Mayer K.*: 3D-visualisation of NDT data using a data fusion technique. *Insight*, **45**, 12, 2003, 800 - 808
- [17] *Valle S., Zanzi L., Lenzi G.*: 2D and 3D focusing of ground penetrating radar data for NDT. 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Queensland, Australia, 23-26 May, 2000, 157 - 162
- [18] *Doerksen K.*: Improved optical positioning for GPR based structure mapping. *Proceedings 9th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar GPR2002*, Santa Barbara, California, April 29 - May 2, 2002
- [19] *Lualdi M., Zanzi L., Binda L.*: Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations. *Proceedings, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, September 16-19, 2003, CD-ROM
- [20] *Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., Valle S., Colla C., Forde M.*: Application of sonic and radar tests on the piers and walls of the Cathedral of Noto. *Construction and Building Materials*, **17**, 8, 2003, 613 - 627
- [21] *Topczewski L., Fernandes F., Cruz P.J.S., Lourenço P.B.*: Practical implications of GPR investigation using 3D data reconstruction and transmission tomography. *Journal of Building Appraisal*, **3**, 1, 2007, 59 - 76 (invited paper)

