



RID II (Rozwój Innowacji Drogowych)
**Diagnostyka sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów
inżynierskich, z uwzględnieniem doboru systemów monitoringu**



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

**PROCEDURA PRZEPROWADZANIA BADAŃ GEORADAROWYCH ELEMENTÓW
ŻELBETOWYCH, BETONOWYCH ORAZ KONSTRUKCJI SPRĘŻONYCH I
CIĘGNOWYCH**

Opracował zespół: dr inż. Wiktor Wciślik

prof. dr hab. inż. Grzegorz Świt

Wydanie 3

11.06.2026, Warszawa

Spis treści

1.	Wstęp.....	3
2.	Cel badania.....	3
3.	Opis rodzaju badanych obiektów	3
4.	Charakterystyka badania	3
4.1.	Informacje ogólne.....	3
4.2.	Pomiar i wizualizacja wyników.....	4
4.3.	Aktualne procedury badawcze	8
4.3.1.	Parametry pomiarowe.....	8
4.3.2.	Profilowanie	9
4.3.3.	Wybrane normy i wytyczne.....	10
4.4.	Proponowane procedury.....	10
4.5.	Ograniczenia metody.....	11
5.	Aparatura pomiarowa	13
5.1.	Przegląd wybranych systemów georadarowych.....	13
5.2.	Aparatura wykorzystywana do badań	14
6.	Warunki środowiskowe prowadzenia pomiaru	14
7.	Sposób wykonania badania	14
7.1.	Warunki ogólne	14
7.2.	Przygotowanie pomiaru.....	15
7.3.	Pomiar	15
7.4.	Analiza wyników pomiarów.....	16
7.5.	Wnioskowanie	17
8.	Raport z badania.....	17
9.	Przykład wykorzystania procedury badawczej.....	17
9.1.	Charakterystyka badanego obiektu.....	17
9.2.	Opis badań polowych	17
9.3.	Wyniki badań	19
9.3.1.	Skanowanie spodu belki w kierunku poprzecznym	19
9.3.2.	Skanowanie spodu belki w kierunku podłużnym	21
9.3.3.	Wnioski	25
10.	Literatura	26

1. Wstęp

Niniejsza procedura została opracowana w ramach realizacji projektu badawczego pt. „Diagnostyka sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów inżynierskich, z uwzględnieniem doboru systemów monitoringu”.

Procedura badawcza dotyczy metodyki badań georadarowych pomostów, dźwigarów głównych i podpór drogowych obiektów inżynierskich, wykonanych z betonu zbrojonego i sprężonego.

2. Cel badania

Celem badania georadarowego opisanego w niniejszej procedurze jest określenie struktury wewnętrznej konstrukcji drogowych obiektów inżynierskich, wykonanych z betonu zbrojonego i sprężonego. Dotyczy to przede wszystkim rozmieszczenia i przebiegu cięgien sprężających, zbrojenia miękkiego, jak również detekcji pustek w betonie i deformacji osłon cięgien, szacowania grubości elementów konstrukcyjnych i detekcji rys.

3. Opis rodzaju badanych obiektów

Opisana w niniejszym opracowaniu procedura obejmuje płyty, belki pomostowe oraz podpory mostów i wiaduktów drogowych, wykonanych z betonu zbrojonego i sprężonego (strunobeton i kablobeton).

4. Charakterystyka badania

4.1. Informacje ogólne

Metoda georadarowa (ang. *Ground Penetrating Radar – GPR*) jest nowoczesną techniką badawczą wykorzystywaną do nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych (w budownictwie kubaturowym i komunikacyjnym), drogownictwie, detekcji sieci podziemnych i innych. Pierwsze zastosowania metody GPR obejmowały badania struktur geologicznych. Dalej, wraz z rozwojem technologii (przede wszystkim budową anten wysokoczęstotliwościowych i opracowaniem wydajnego oprogramowania do akwizycji i obróbki danych) metoda ta została zaimplementowana w innych gałęziach przemysłu, przede wszystkim w budownictwie.

Metoda georadarowa należy do metod geofizycznych i polega na emitowaniu do wnętrza badanego ośrodka fali elektromagnetycznej, a następnie rejestrowaniu fali odbitej. Przechodząc przez ośrodek, fala ulega załamaniu i odbiciu na granicach różnych materiałów. Analiza parametrów fali odbitej (rejestrowanej przez antenę odbiorczą) umożliwia nieniszcząco ocenę struktury wewnętrznej ośrodka oraz wykrywanie obiektów takich jak pręty zbrojeniowe i ciągna, jak również pustek, rys i innych nieciągłości.

Wyemitowany przez antenę nadawczą sygnał jest częściowo odbijany od interfejsu pomiędzy dwoma różnymi materiałami i powraca do anteny odbiorczej, a częściowo propaguje do wnętrza badanego ośrodka. Istota pomiaru GPR opiera się zatem na analizie amplitudy fali odbitej od granicy pomiędzy dwoma ośrodkami (materiałami). Stopień odbicia fali na granicy ośrodków określa się najczęściej wartością współczynnika odbicia, definiowaną wg poniższej zależności:

$$R = \frac{A}{A_p} \quad (4.1)$$

gdzie:

R – współczynnik odbicia,

A – amplituda fali odbitej,

A_p – amplituda fali padającej.

Wartości amplitud A i A_p zależą od właściwości fizycznych ośrodka, w którym propaguje fala, to znaczy od jego względnej stałej dielektrycznej ϵ_r oraz przewodności σ . W literaturze dotyczącej metodyki GPR najczęściej bazuje się na stałej dielektrycznej ϵ_r . Wartości ϵ_r dla wybranych materiałów zestawiono w tabeli 4.1:

Tabela 4.1. Wartości stałej dielektrycznej ϵ_r dla wybranych materiałów [Cao, Labuz, Dai, Pantelis 2007].

Materiał	Względna stała dielektryczna ϵ_r
Powietrze	1
Granit	9
Suchy piasek	od 4 do 6
Mokry piasek	30
Asfalt	od 3 do 6
Beton	od 9 do 12
Woda	81
Metal	∞ (idealny przewodnik)

Ogólnie, możliwość detekcji obiektu ukrytego w ośrodku jest warunkowana różnicą pomiędzy wartościami ϵ_r materiału obiektu i ośrodka (im większa różnica ϵ_r tym większe możliwości wykrycia obiektu). Analizując wartości w tabeli 4.1, można stwierdzić, że w porównaniu do betonu, znaczną różnicą ϵ_r odznacza się powietrze, woda oraz metal. Oznacza to, że metoda GPR jest skutecznym narzędziem do wykrywania w betonie takich nieciągłości jak pustki (wypełnione powietrzem lub wodą), zawilgocenia, a przede wszystkim pręty zbrojenia miękkiego i ciężna sprężające.

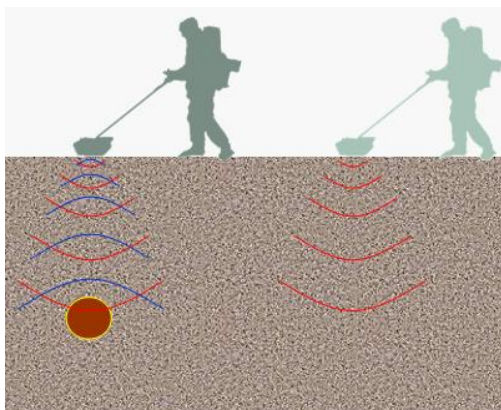
Wymienione wyżej obiekty są możliwe do wykrycia pod warunkiem, że ich wielkość przekracza pionową i poziomą rozdzielczość zastosowanego systemu (por. podrozdział 4.5).

Do podstawowych zalet techniki GPR należą [Rasol i inni 2022]:

- nieniszczący charakter badań,
- duża szybkość akwizycji danych,
- elastyczność, mobilność aparatury,
- stosunkowo niski koszt badań,
- możliwość wykonywania pomiarów na obiektach podczas ich normalnej eksploatacji.

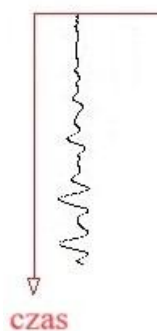
4.2. Pomiar i wizualizacja wyników

Spośród kilku metod wykonywania pomiarów, podstawowym sposobem jest profilowanie refleksyjne. Podczas takiego pomiaru obie anteny (nadawcza i odbiorcza) są jednocześnie przesuwane wzdłuż wytyczonej trasy. W ten sposób jest rejestrowana ciągła informacja w każdym punkcie profilu. Schemat pomiaru georadarowego przedstawiono ideowo na rysunku 4.1:



Rys. 4.1. Schemat pomiaru georadarowego [materiały szkoleniowe firmy IDS]

Podstawowym sposobem zapisu odbicia fali wzdłuż osi zdefiniowanej wewnątrz badanego ośrodka jest pojedyncza trasa (ang. *A-scan*, rysunek 4.2). Na osi pionowej odłożony jest czas dwukierunkowej propagacji fali (z anteny do ośrodka i z powrotem, do anteny odbiorczej). Na osi poziomej zaznaczona jest wartość amplitudy fali odbitej (zazwyczaj wyrażona w mV).

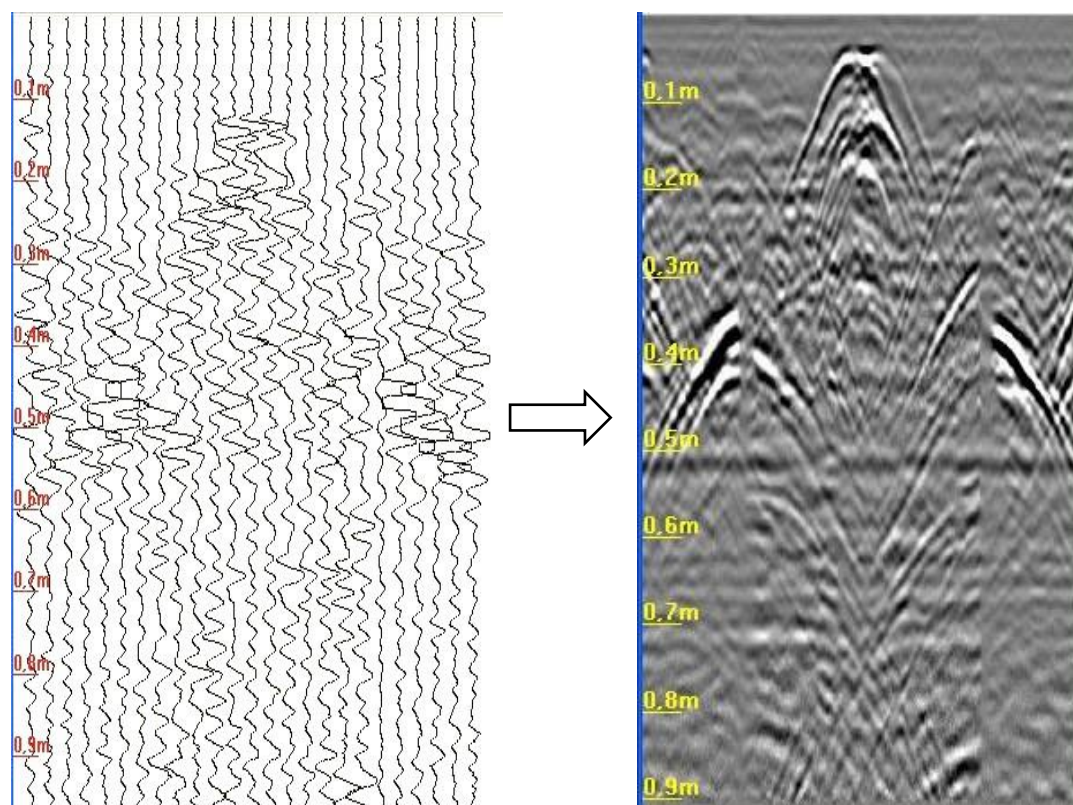


Rys. 4.2. Przykład pojedynczej trasy georadarowej

Na rysunku 4.2 uwagę zwracają wysokie amplitudy w górnej części trasy. Sygnały te stanowią zapis propagacji fali bezpośrednio od anteny nadawczej do odbiorczej, z pominięciem badanego ośrodka (fale propagujące w powietrzu i na powierzchni skanowanego ośrodka). Ponieważ nie wnoszą one użytecznej informacji, zazwyczaj są one usuwane na etapie obróbki materiału (korekcja czasu 0).

Zapis wyników w postaci trasy jest mało czytelny, niekiedy trudny w interpretacji i stosunkowo rzadko wykorzystuje się go w zagadnieniach inżynierskich.

Zdecydowanie najczęściej stosowanym sposobem wizualizacji wyników jest tzw. falogram (ang. *B-scan*). Stanowi on niejako złożenie wszystkich tras pomiarowych zarejestrowanych wzdłuż pojedynczej ścieżki przejazdu anteny. Dodatkowo, wartości amplitud są przedstawiane w przyjętej skali kolorów. Falogram można zatem interpretować jako macierz amplitud, w której pojedyncze trasy tworzą kolumny, a wiersze odpowiadają czasom, w którym zarejestrowano poszczególne amplitudy. Koncepcję budowy falogramu jako sumy poszczególnych tras zilustrowano na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Sposób tworzenia falogramu

Przykładowy falogram, zarejestrowany na elemencie konstrukcyjnym wykonanym z betonu, przedstawiono na rys. 4.4.

Górną oś falogramu należy utożsamiać z powierzchnią skanowania (po której przesuwane są anteny), natomiast osie pionowe skierowane są do wnętrza badanego ośrodka. Na osi pionowej oznacza się czas dwukierunkowej propagacji fali (z anteny nadawczej do ośrodka i z powrotem do anteny odbiorczej, ang. *two way travel time*). Dalej, znając prędkość propagacji fali w ośrodku, można obliczyć głębokość występowania wykrytego zaburzenia/nieciągłości, zgodnie ze wzorem:

$$s = \frac{v \cdot t}{2} \quad (4.2)$$

gdzie:

s – głębokość położenia wykrytego obiektu,

v – prędkość propagacji fali w ośrodku,

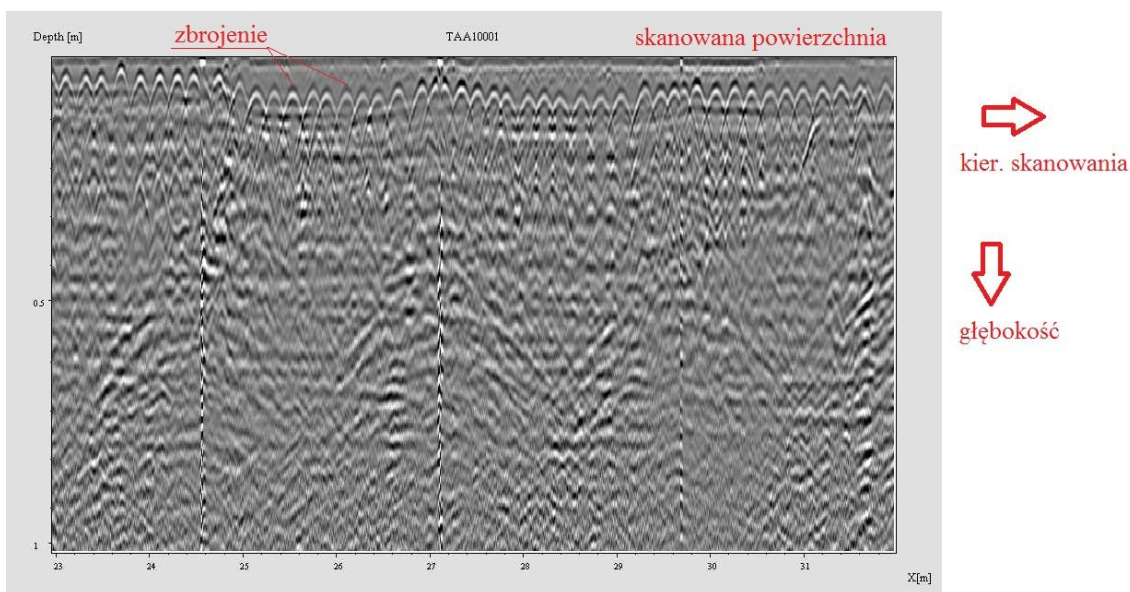
t – czas dwukierunkowej propagacji fali.

Prędkość propagacji fali w konstrukcjach z betonu z reguły wynosi około 10-13 cm/ns. W praktyce zależy ona od właściwości fizycznych badanego ośrodka. W przypadku betonowych konstrukcji mostów zasadniczy wpływ ma wilgotność, a także zawartość soli (chlorki, siarczany), stopień korozji/degradacji betonu, nagromadzenie pustek i inne. Jako że dokładność wyznaczenia prędkości ma zasadniczy wpływ na głębokościową dokładność pomiaru, jest to zagadnienie, któremu należy poświęcić szczególną uwagę podczas wykonywania pomiarów i obróbki danych. Najpewniejszym sposobem określenia prędkości propagacji fali jest porównanie wyników skanowania (np. położenia głębokościowego pręta zbrojeniowego) z wynikiem pomiaru wykonanego w odkrywcę. W przypadku

braku takiej możliwości, można posłużyć się metodami przybliżonymi, takimi jak metoda dopasowania hiperboli syntetycznej.

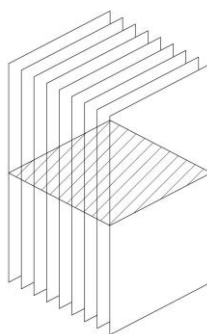
Niezależnie od zastosowanej metody należy pamiętać, że wyznaczona prędkość propagacji fali jest jedynie pewnym oszacowaniem i uśrednieniem z całej głębokości, dla której prowadzono pomiar. W praktyce warstwy przypowierzchniowe (na ogół bardziej zawilgocone) charakteryzują się niższą prędkością propagacji niż warstwy położone głębiej.

Na rysunku 4.4. można ponadto wyodrębnić charakterystyczne, odwrócone hiperbole, będące obrazem obiektu o przekroju kołowym (przede wszystkim prętów zbrojenia miękkiego i cięgien sprężających) w badanym ośrodku. Odległość wierzchołka hiperboli od górnej osi falogramu należy interpretować jako otulinę pręta w badanym przekroju.



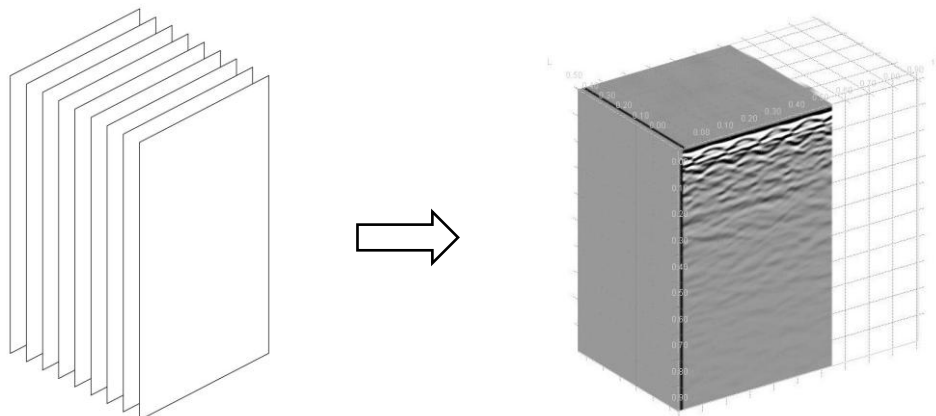
Rys. 4.4. Przykład falogramu wraz z interpretacją.

W przypadku badań inżynierskich związanych z detekcją prętów zbrojeniowych i pustek w betonie, stosunkowo czytelną i wygodną formą wizualizacji wyników są przekroje czasowe (ang. *C-scan*). Stanowią one odwzorowanie amplitud zebranych z poszczególnych ścieżek pomiarowych dla określonego czasu propagacji fali. C skany można zatem interpretować jako „przekrój” przez badany obiekt, płaszczyzną równoległą do skanowanej powierzchni. Rzędna tej płaszczyzny jest definiowana zadaniem czasem propagacji fali (znając prędkość propagacji, można zamienić skalę czasową na głębokościową, uzyskując przekrój na zadanej głębokości, por. równanie 4.2). Definicję sekcji czasowej przedstawiono na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Sposób definiowania sekcji czasowej

Ostatnim, najbardziej zaawansowanym sposobem wizualizacji danych (szczególnie często wykorzystywanym w detekcji sieci uzbrojenia terenu), jest wizualizacja 3D. Łączy ona dane z falogramów zarejestrowanych na sąsiednich, równoległych ścieżkach pomiarowych (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Sposób tworzenia trójwymiarowej wizualizacji danych

W odróżnieniu od wizualizacji pojedynczej trasy (A-skan) i falogramu (B-skan), jakość sekcji czasowych (C-skan) i wizualizacji 3D zależą od rozstawu ścieżek pomiarowych (problem ten zostanie omówiony w podrozdziale 4.3.2).

Należy ponadto zaznaczyć, że niezależnie od wybranego sposobu wizualizacji wyników, podstawową kwestią umożliwiającą prawidłową ocenę i interpretację wyników pomiaru jest odpowiednia obróbka i filtracja wyników. Metoda georadarowa charakteryzuje się bowiem niekorzystnym współczynnikiem wartości sygnału do szumu (ang. *signal to noise ratio*). Ogólnie, celem przetwarzania zarejestrowanych sygnałów jest eliminacja lub ograniczenie szumu oraz wzmocnienie sygnałów użytecznych, będących efektem odbicia fali od nieciągłości materiałowych. Dodatkowo, jak wspomniano wyżej, istotnym etapem przetwarzania danych jest korekta czasu 0, związana z eliminacją sygnału pochodzącego od bezpośredniej transmisji sygnału z anteny nadawczej do odbiorczej. Wybrane procedury przetwarzania danych przedstawiono skrótowo w podrozdziale 7.4.

4.3. Aktualne procedury badawcze

4.3.1. Parametry pomiarowe

Podstawowym zagadnieniem, jakie należy uwzględnić podczas projektowania badań georadarowych, jest dobór parametrów akwizycji, które pozwolą na zarejestrowanie danych o wymaganej jakości i rozdzielczości. Najważniejsze wytyczne w tym zakresie omówiono w pracy [Karczewski, Ortyl, Pasternak 2011]. Parametry akwizycji obejmują przede wszystkim:

- długość okna czasowego – maksymalny czas „nasłuchu” odbitego sygnału, mierzony od momentu jego wysłania przez antenę nadawczą. Jego wartość powinna pozwalać na odbiór sygnału z obszaru o żądanej głębokości. Do wyznaczenia okna czasowego zazwyczaj wykorzystuje się zależność [Annan 2001]:

$$T = 1,3 \frac{2h}{v} \quad (4.3)$$

gdzie:

T – długość okna czasowego [ns],

h – żądany zasięg głębokościowy (dodatkowo ograniczony tłumieniem fali),

v – prędkość propagacji fali w badanym ośrodku.

- częstotliwość próbkowania rejestrowanego sygnału – zgodnie z kryterium Nyquista powinna ona wynosić nie mniej niż dwukrotność maksymalnej częstotliwości występującej w sygnale. W praktyce częstotliwość próbkowania przyjmuje się na poziomie przynajmniej 600 % maksymalnej częstotliwości sygnału,
- długość kroku pomiarowego (odległość pomiędzy kolejnymi trasami, związana z rozdzielczością poziomą). Wartość ta nie powinna być większa niż:

$$\Delta x = \frac{75}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.4)$$

gdzie:

Δx – maksymalna długość kroku pomiarowego,

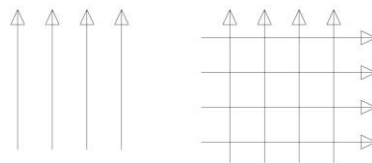
f – częstotliwość fali,

ϵ_r – względna przenikalność elektryczna badanego ośrodka.

- sumowanie sygnału (zastosowanie wysokiego składania sygnału jest wykorzystywane w celu poprawy stosunku sygnału do szumu).

4.3.2. Profilowanie

Spośród różnych metod profilowania, w badaniach konstrukcji inżynierskich najczęściej wykorzystuje się profilowanie refleksyjne, w którym anteny nadawcza i odbiorcza są jednocześnie przesuwane wzdłuż wytyczonej uprzednio ścieżki skanowania. Ocena struktury konstrukcji wymaga zastosowania wielu równoległych ścieżek pomiarowych. W przypadku lokalizacji prętów zbrojeniowych najkorzystniejsze jest wytyczenie ścieżek prostopadłych do spodziewanego kierunku zbrojenia. Detekcja siatek zbrojeniowych wymaga wytyczenia ścieżek w dwóch prostopadłych kierunkach (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Przykłady rozmieszczenia ścieżek pomiarowych dla lokalizacji prętów ułożonych w jednym kierunku (z lewej) oraz w dwóch kierunkach (z prawej)

Przyjęty rozstaw ścieżek pomiarowych jest kluczowy dla uzyskania wysokiej jakości wyników. Oszacowania rozstawu ścieżek można dokonać, znając przybliżoną wielkość i głębokość położenia poszukiwanego ciała. Wówczas maksymalny rozstaw ścieżek pomiarowych można wyznaczyć jako sumę założonej wielkości ciała i podwojonej długości krótszej półosi elipsy śladu pokrycia anteny [Karczewski, Ortyl, Pasternak 2011]. Zachodzi zależność:

$$s = d + \frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (4.5)$$

gdzie:

s – rozstaw ścieżek pomiarowych,

d – spodziewana wielkość poszukiwanego ciała,

λ - długość fali elektromagnetycznej, wyznaczana jako iloraz prędkości fali w ośrodku do jej częstotliwości,

h - spodziewana głębokość położenia poszukiwanego ciała,

ε_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka.

$0,5 \cdot \left(\frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \right)$ - długość krótszej półosi elipsy śladu pokrycia anteny.

W badaniach konstrukcji inżynierskich powyższa zależność jest szczególnie istotna przy lokalizowaniu pustek i innych obiektów, których rozmiary są porównywalne we wszystkich kierunkach. Prowadząc badania tylko w kierunku detekcji prętów zbrojeniowych, rozstaw ścieżek można nieco zwiększyć.

4.3.3. Wybrane normy i wytyczne

W krajach Europy Zachodniej i Ameryki Północnej badania diagnostyczne mostów betonowych z wykorzystaniem georadaru są w różnym zakresie zestandaryzowane. Warto wymienić tu choćby normę włoską (CEI 306-8), francuską (NF S70-003-2 2012), wytyczne niemieckie (B10), czy skandynawskie (Mara Nord Project).

Prace nad stworzeniem procedury badań georadarowych mostów wykonanych z betonu były prowadzone również w ramach europejskich projektów badawczych, również z udziałem polskich badaczy. Opisy procedur można znaleźć np. w pracach [Topczewski i inni 2007, Topczewski 2012, Hugenschmidt i Mastrangelo 2006].

Normy dotyczące badań diagnostycznych mostów betonowych z wykorzystaniem techniki GPR są od wielu lat rozwijane w Stanach Zjednoczonych. Podstawowe pojęcia i parametry zostały zdefiniowane w dokumencie ASTM D6432-11.

Procedury związane z diagnostyką mostów betonowych omówiono w ASTM D 6087-97. Dokument określa:

- warunki środowiskowe prowadzenia pomiaru,
- procedurę sprawdzenia aparatury (określenie stosunku sygnału do szumu S/N – *signal to noise ratio*, test stabilności układu pomiarowego),
- metodykę badań polowych wraz z wytycznymi doboru wybranych parametrów akwizycji,
- amplitudowe kryterium oceny delaminacji płyty pomostu będącej wynikiem korozji górnego zbrojenia płyty.

4.4. Proponowane procedury

Dotychczas podstawowym zastosowaniem metody GPR w konstrukcjach inżynierskich wykonanych z betonu zbrojonego była detekcja prętów/kabli oraz pustek w strukturze materiału. Jednakże, wpływ właściwości fizycznych materiału na sposób propagacji fali elektromagnetycznej czyni metodę GPR użytecznym narzędziem także do wykrywania obszarów degradacji konstrukcji betonowych. Dotyczy to przede wszystkim takich zjawisk jak zawilgocenie betonu, obecność chlorków, korozja, karbonatyzacja i inne. W ostatnich latach opublikowano wiele prac, w których podjęto próby powiązania parametrów fali odbitej z obecnością i nasileniem zjawisk korozyjnych. Wyczerpujący przegląd literatury zamieszczono w pracy [Tešić, Baričević, Serdar 2021].

Szczególnie często podejmowanym w ostatnich latach tematem jest analiza parametrów fali odbitej w zależności od wilgotności betonu i stopnia jego nasycenia roztworami chlorków. Prowadzone w tym zakresie badania mają na ogół bardziej laboratoryjny niż aplikacyjny charakter [Senin i Hamid 2016, Leucci 2012, Klysz i Balayssac 2007].

Wykorzystując zjawisko zmniejszenia amplitudy fali i prędkości jej propagacji w materiale zawilgoconym i zanieczyszczonym roztworami chlorków, zaproponowano metodykę oceny zawilgocenia i zawartości roztworów NaCl w betonie, bazując na wartości amplitudy fali odbitej od górnego zbrojenia płyty pomostowej. Wraz ze wzrostem stopnia zanieczyszczenia otuliny wartość amplitudy spada. Przykład zastosowania takiej procedury na obiekcie mostowym opisano na przykład w pracy [Azari 2016]. Ponieważ jednak wartość amplitudy fali odbitej może się zmieniać w zależności od wahań grubości otuliny, otrzymane z pomiaru dane należy poddać korekcji głębokościowej [Barnes i inni 2008].

Choć z uwagi na rozdzielczość metody GPR uznaje się ją za nieprzydatną do oceny średnicy prętów zbrojeniowych, podejmuje się próby pośredniego wyznaczania średnic na podstawie charakterystyk fali odbitej. Przykładowo, w pracy [Utsi i Utsi 2004] stwierdzono, że stosunek amplitud fal spolaryzowanych na kierunku prostopadłym i równoległym do pręta jest zależny od jego średnicy. Należy jednak pamiętać, że relacja ta jest zależna od środkowej częstotliwości anteny. Zauważono ponadto, że przeprowadzenie powyższej analizy jest problematyczne przy rozstawach prętów mniejszych niż 20 cm. Jak przyznają sami autorzy dokładność metody jest stosunkowo niska, bowiem błąd wyznaczenia średnicy prętów sięga około 20 %.

Kolejnym ważnym problemem inżynierskim jest właściwa interpretacja rodzaju materiału tworzącego wykryty obiekt. Choć badanie GPR nie pozwala na jednoznaczne wskazanie rodzaju materiału, to analiza charakteru fali odbitej umożliwia zawężenie potencjalnych materiałów do określonej grupy. Kluczowa jest w tym przypadku analiza polarności fali odbitej [Jiao i inni 2020]. W przypadku, w którym fala zostaje odbita, przechodząc z ośrodka o wyższej stałej dielektrycznej do niższej, polarność fali odbitej jest taka sama jak polarność fali emitowanej przez antenę nadawczą. W konstrukcjach betonowych taka sytuacja ma miejsce w przypadku fali migrującej z betonu do pustki wypełnionej powietrzem (por. wartości stałej dielektrycznej z tabeli 4.1). Sytuacja zmienia się, kiedy pustka jest wypełniona wodą. Ponieważ stała dielektryczna wody jest wyższa niż betonu, polarność fali odbitej jest odwrotna do polarności fali emitowanej. W pracy [Jiao i inni 2020] zaproponowano ponadto algorytm wykrywania pustek w betonie bazując na zjawisku polarności i procedurze binaryzacji falogramu. Wielkość pustek można określić analizując przekroje czasowe C-skan (poziome).

Analiza amplitud i czasu propagacji fali w betonie może również posłużyć do wyznaczenia jego względnej stałej dielektrycznej, co pośrednio umożliwia ocenę jakości betonu w konstrukcji. Wartość stałej dielektrycznej $\epsilon_r < 5$ wskazuje na zaawansowaną korozję i degradację struktury betonu. Z kolei wysokie wartości ϵ_r (powyżej 10) zazwyczaj wiążą się ze znacznym zawilgoceniem betonu [Lee, Oh, Cho 2022]. Zmiana amplitudy fali odbitej może być również wynikiem korozji prętów zbrojeniowych [Al-Hameedawi i inni 2022].

4.5. Ograniczenia metody

Planując badania z wykorzystaniem metody GPR, należy wziąć pod uwagę jej wady i ograniczenia. Podstawową kwestią jest brak możliwości rozróżnienia na falogramach materiałów o zbliżonych wartościach stałej dielektrycznej (np. warstwy betonu układane w różnych terminach). Do innych, najczęściej podawanych w literaturze ograniczeń należą [Rasol i inni 2022]:

- wysoka przewodność niektórych materiałów i związane z tym tłumienie fali (np. w materiałach silnie zawilgoconych i gruntach gliniastych), co komplikuje lub nawet uniemożliwia zarejestrowanie sygnałów wysokiej jakości,
- rozpraszanie sygnału,
- trudna, niekiedy uznaniowa interpretacja wyników, wymagająca dużego doświadczenia,
- zasięg penetracji jest zależny nie tylko od zastosowanej aparatury (przede wszystkim środkowej częstotliwości anteny), ale również od właściwości badanego ośrodka.

W przypadku konstrukcji wykonanych z betonu zbrojonego znaczącym ograniczeniem obszaru zastosowania metody GPR jest gęsta siatka prętów zbrojeniowych, powodująca silne odbicie fali, przez co brak jest możliwości oceny struktury poniżej siatki (brak wówczas możliwości detekcji kolejnych warstw zbrojenia). Analogicznie, obecność innych elementów metalowych (np. marki umieszczone w elemencie betonowym) ogranicza lub nawet uniemożliwia akwizycję jakościowych danych. Co więcej, obecność metalowych elementów powyżej skanowanej powierzchni (na przykład balustrady i bariery energochłonne na mostach) mogą zaburzać wyniki pomiaru (zwłaszcza w przypadku anten nieekranowanych).

Interpretując wyniki pomiaru należy również pamiętać o bardzo silnym wpływie zawilgocenia elementu konstrukcyjnego na wyniki pomiarów. Ogólnie obecność wody/wilgoci powoduje zmniejszenie prędkości propagacji fali, co z kolei może zostać przez niedoświadczonego operatora zinterpretowane w postaci przeszacowania głębokości zalegania obiektu. W przypadku konstrukcji betonowych obszary o zwiększonej wilgotności mogą przedstawiać fałszywy obraz zwiększonej w tym miejscu otuliny prętów zbrojeniowych. Zaleca się zatem, aby pomiarów nie wykonywać bezpośrednio (w ciągu kilku dni) po opadach deszczu. W przypadku stwierdzenia lokalnego zwiększenia czasu dotarcia fali do prętów zbrojeniowych (widoczne na falogramie jako lokalne zwiększenie grubości otuliny) należy przeprowadzić kalibrację prędkości fali. Najczęściej stosowana procedura polega na umieszczeniu po drugiej stronie skanowanego elementu metalowej płytki i rejestrowaniu czasu propagacji fali do płytki i z powrotem. Znając czas propagacji fali i drogę jaką przebywa (dwukrotność grubości elementu betonowego – droga tam i z powrotem), można określić prędkość propagacji fali. Jeśli jest ona mniejsza niż w pozostałych obszarach, może to oznaczać to lokalne zawilgocenie konstrukcji i konieczność korekty skali głębokościowej na falogramie.

Dla powierzchniowej oceny zmian wilgotności elementu można wykorzystać wilgotnościomierz.

Dobierając układ pomiarowy do danego zastosowania należy pamiętać o rozdzielczości pomiaru, zależnej zarówno od częstotliwości środkowej anteny, jak i stałej dielektrycznej ośrodka. Rozróżnia się rozdzielczość pionową (zdolność rozróżniania obiektów w pionie) i poziomą (wyodrębnianie obiektów wzdłuż ścieżki pomiarowej). Orientacyjnie można założyć, że rozdzielczość pionowa jest równa 25% długości fali. Przykładowo, dla stałej dielektrycznej ośrodka wynoszącej $\epsilon_r = 9$ (wartość typowa dla betonu) rozdzielczość pionowa anteny 1 GHz wynosi około 2 cm [Karczewski, Ortyl, Pasternak 2011].

Rozdzielczość pozioma jest z kolei zależna dodatkowo od głębokości, na jakiej znajduje się ciało. W przypadku wspomnianej anteny 1 GHz, na głębokości 0,5 m rozdzielczość wynosi jedynie 16 cm [Karczewski, Ortyl, Pasternak 2011].

Dobór częstotliwości środkowej anteny, oprócz rozdzielczości pomiaru determinuje jego zasięg głębokościowy. Ogólnie wraz ze wzrostem częstotliwości anteny wzrasta rozdzielczość, ale maleje zasięg (przykładowe wartości przedstawiono w rozdziale 5).

5. Aparatura pomiarowa

5.1. Przegląd wybranych systemów georadarowych

Poniżej zestawiono przykładowe systemy georadarów dostępne na rynku. Uwzględniono zestawy o parametrach właściwych dla zastosowań w diagnostyce konstrukcji betonowych (środkowa częstotliwość anteny około 1-2 GHz).

- IDS C-THRU – podstawowy zestaw o niewielkich gabarytach i prostej obsłudze. Wizualizacja danych w czasie rzeczywistym. Dedykowane oprogramowanie pozwala na automatyczne rozpoznawanie prętów zbrojeniowych i pustek w betonie. Wielkość i masa urządzenia pozwalają na skanowanie powierzchni pionowych i sufitowych. Koszt ok. 15 000 \$.
- Mała CX Concrete Scanner – niewielkie przenośne urządzenie dedykowane do skanowania konstrukcji betonowych (zastosowania obejmują detekcję zbrojenia, kabli sprężających, jak również ocenę grubości nawierzchni mostowej). Możliwość zapisu wyników i ich wizualizacji w czasie rzeczywistym podczas pomiaru. Urządzenie sprzedawane w zestawie z oprogramowaniem do akwizycji i obróbki danych. Cena ok. 9 000 \$.
- GSSI StructureScan – niewielkie, obsługiwane ręcznie urządzenie (możliwość umieszczenia na wózku pomiarowym), produkowane w wersjach z antenami 1,6 i 2,6 GHz. Wykorzystanie systemowych podkładek do równomiernego prowadzenia anteny pozwala na uzyskanie wysokiej jakości danych do obrazowania trójwymiarowego. Opcjonalnie możliwość zakupu oprogramowania do obróbki danych Radan z modulem 3D.
- Sensors and Software Noggin – rodzina georadarów o bardzo szerokich możliwościach indywidualnej konfiguracji. Do zastosowań mostowych dedykowana jest antena o częstotliwości 1 GHz (obsługiwana ręcznie na powierzchniach pionowych i sufitowych lub umieszczana na różnych typach wózków pomiarowych). Możliwość pozycjonowania GPS i bezprzewodowego przesyłania danych.
- MALA ProEx – georadar obsługujący od dwóch do ośmiu kanałów (w zależności od konfiguracji), łączony z antenami ekranowanymi o częstotliwościach do 2,3 GHz. Zależnie od konfiguracji, może być wykorzystywany jako niewielkie urządzenie ręczne lub tworzyć większe zestawy. Światłowodowa technika wymiany danych skutkuje wysoką wydajnością. Zastosowanie wysokoczęstotliwościowych anten pozwala na uzyskanie wysokiej jakości obrazowania struktury wewnętrznej betonu (zbrojenie, cięgna sprężające, pustki i inne).
- GSSI BRIDGESCAN – urządzenie umieszczone na wózku pomiarowym, przeznaczone do skanowania pomostów od góry. Standardowa konfiguracja obejmuje antenę o częstotliwości 1,6 GHz. Możliwe jest pozycjonowanie GPS urządzenia. Dołączone oprogramowanie Radan zawiera moduł dedykowany do obróbki danych mostowych.
- IDS RIS HI-BRIGHT – zestaw 16 anten o częstotliwościach 2 GHz, dedykowany do badań konstrukcji mostów. Pozwala na wyznaczenie grubości nawierzchni, płyty pomostowej, detekcję zawilgoceń i innych anomalii. Ponadto w łatwy sposób można określić głębokość i stan siatek zbrojeniowych. Podwójna polaryzacja anten umożliwia wykrywanie obiektów liniowych zorientowanych wzdłużnie i poprzecznie do ścieżki pomiarowej. Dołączone specjalistyczne oprogramowanie do obróbki danych HD3 Bridge Module ułatwia i usprawnia obróbkę wyników, jak również ich interpretację. Urządzenie odznacza się znacznymi gabarytami, co

ogranicza jego zastosowanie do skanowania powierzchni pomostu od góry. Koszt zestawu ok. 90 000 \$.

5.2. Aparatura wykorzystywana do badań

W skład systemu georadarowego wchodzi anteny nadawcza i odbiorcza oraz jednostka centralna wraz z zasilaniem i pamięcią. Dane z anteny docierają do jednostki centralnej i zostają zapisane na twardym dysku. Kolejnym elementem jest procesor, który umożliwia filtrowanie, analizę i wizualizację otrzymanych wyników.

Do badań konstrukcji pomostów betonowych wykorzystuje się następującą aparaturę pomiarową i oprogramowanie:

- antena o częstotliwości zależnej od wymaganej rozdzielczości pionowej pomiaru i żądanego zasięgu głębokościowego (wraz ze wzrostem zasięgu maleje rozdzielczość pomiaru). Można założyć, że antena 600 MHz umożliwia w sprzyjających warunkach osiągnięcie zasięgu głębokościowego na poziomie 4 m, przy rozdzielczości pionowej rzędu 5 cm. W przypadku anteny 900 MHz parametry te wynoszą odpowiednio 2 m/2 cm, a dla anteny 2 GHz 0,5 m/0,5 cm.
- cyfrowa jednostka sterująca Fast Wave lub HiMod,
- komputer/tablet,
- zasilanie/akumulatory,
- wózek jezdny,
- oprogramowanie do akwizycji danych OneVision lub K2 Fast Wave,
- oprogramowanie do przetwarzania danych Gred HD lub Gred 3D.

6. Warunki środowiskowe prowadzenia pomiaru

Temperatura powietrza podczas prac polowych powinna zawierać się w zakresie od ok. 5 do 25 °C. Skanowania nie powinno prowadzić się podczas intensywnych opadów atmosferycznych, ani bezpośrednio po nich.

Z uwagi na charakterystykę propagacji fali oraz możliwe trudności w analizie i interpretacji wyników, nie zaleca się wykorzystywania metody georadarowej wcześniej niż 2-3 dni po ustąpieniu intensywnych i długotrwałych opadów.

7. Sposób wykonania badania

7.1. Warunki ogólne

Przed przystąpieniem do pomiaru należy poinformować zarządcę obiektu o planowanym terminie prac polowych. Badania przeprowadza się z zachowaniem ogólnych zasad BHP oraz, ewentualnie, szczegółowych przepisów bezpieczeństwa, jeżeli jest to wymagane przez zarządcę obiektu.

7.2. Przygotowanie pomiaru

Przed rozpoczęciem prac polowych należy zgromadzić i przeanalizować dostępną dokumentację techniczną badanego obiektu. Szczególną uwagę należy zwrócić na ewentualne odstępstwa od zatwierdzonego projektu (ujawnione w dokumentacji powykonawczej), jak również historię prac remontowych, utrzymaniowych, czy też ewentualnych przebudów obiektu.

Planując prace terenowe, należy pamiętać, że pomimo zastosowania anten ekranowanych, zakłócenia pomiaru mogą pojawiać się jako wynik oddziaływania obiektów metalowych zlokalizowanych w pobliżu anteny (np. bariery energochłonne, balustrady). Inną możliwą przyczyną powstawania zakłóceń jest bliskość linii elektroenergetycznych.

Kolejny etap obejmuje tyczenie/trasowanie ścieżek pomiarowych na powierzchni pomostu, w dwóch prostopadłych kierunkach (najlepiej na kierunku wzdłuż i w poprzek osi obiektu). Trasy można zaznaczyć za pomocą sznurka rozciągniętego pomiędzy ustawionymi na powierzchni pomostu obciążnikami, jaskrawej farby lub kredy.

W przypadku niewielkich obszarów skanowania (wielkości rzędu 1m x 1m) dopuszcza się zastosowanie podkładki/maty dostarczonej przez wytwórcę urządzenia, pełniącej funkcję szablonu do tyczenia ścieżek pomiarowych.

Przed przystąpieniem do pomiaru należy przeprowadzić kalibrację urządzenia, wykonując próbne skanowanie przy uruchomionym narzędziu kalibracyjnym oprogramowania do akwizycji danych.

Pomiar prowadzi się przesuwając antenę po badanej powierzchni. Anteny wysokoczęstotliwościowe (1-2 GHz), z uwagi na swoją masę i gabaryty, nie stwarzają większych ograniczeń w operowaniu w trudno dostępnych miejscach. Za ich pomocą można zatem skanować powierzchnie poziome, pionowe i sufitowe. Anteny o mniejszych częstotliwościach są pod tym względem mniej elastyczne i pozwalają na badania jedynie powierzchni poziomych od góry.

W przypadku uzyskania niezadowalających wyników (na przykład niewyraźny obraz i duża liczba zakłóceń będące następstwem znacznego zagęszczenia górnego zbrojenia płyty pomostowej), pomiar należy wykonać również na dolnej powierzchni płyty. Określenie przebiegu kabli w dźwigarach kablobetonowych wymaga przeprowadzenia skanowania powierzchni bocznych belek. Specyfika metody GPR predestynuje ją także do wykrywania pustek w kanałach kablowych (braki iniektu). Jednakże, w strefach o znacznym zagęszczeniu zbrojenia i innych elementów metalowych uzyskanie dokładnych wyników jest trudne lub niekiedy nawet niemożliwe.

W każdym przypadku ostateczną decyzję odnośnie zakresu prac polowych i sposobu zdjęcia należy podejmować po analizie wyników pomiarów próbnych.

7.3. Pomiar

Przed przystąpieniem do właściwych badań należy przeprowadzić pomiar kalibracyjny osobno dla każdego skanowanego elementu konstrukcyjnego (płyta pomostowa, belki, podpory). Podstawowy zakres kalibracji polega na uruchomieniu narzędzia kalibracyjnego w programie do akwizycji danych, a następnie przesuwaniu anteny po powierzchni przeznaczonej do właściwych badań, aż do wyświetlenia na ekranie komputera komunikatu o zakończeniu procedury. W pozostałym zakresie kalibracja odbywa się automatycznie, bez udziału użytkownika (powyższy tok postępowania dotyczy georadarów produkcji IDS).

Rozszerzony zakres kalibracji obejmuje kalibrację prędkości fali i wymaga dostępu z dwóch przeciwległych stron elementu konstrukcyjnego (płyty pomostowej, boczne powierzchnie belek).

Kalibracja prędkości obejmuje przejazd anteną po uprzednim umieszczeniu na przeciwległej powierzchni metalowej płytki. W kolejnym etapie odczytuje się z zarejestrowanego falogramu czas propagacji fali pomiędzy nadajnikiem a płytką (w dwóch kierunkach). Znając grubość badanego elementu, można obliczyć średnią prędkość fali, przekształcając wzór 4.2 (s jest wówczas grubością badanego elementu konstrukcyjnego). Wyznaczoną w ten sposób prędkość fali wykorzystuje się podczas obróbki danych do właściwej konwersji skali czasowej na głębokościową.

Pomiar polega na wykonaniu przejazdów wózkiem z zamontowaną anteną wzdłuż wytyczonych uprzednio ścieżek skanowania. Rozstaw ścieżek pomiarowych zaleca się przyjmować w zależności od wielkości poszukiwanego obiektu i planowanego sposobu wizualizacji wyników. Wstępnie można założyć rozstaw ścieżek rzędu 0,2-0,3 m. Zależnie od potrzeb (np. w obszarach o znacznym stopniu degradacji) odległość tę można odpowiednio zmniejszyć.

Należy pamiętać, że na jakość zarejestrowanych falogramów (zwłaszcza w przypadku anten nieekranowanych) może mieć wpływ obecność obiektów znajdujących się na powierzchni terenu (przede wszystkim obiekty metalowe znajdujące się w sąsiedztwie badanego obszaru, linie energetyczne napowietrzne, itd.).

7.4. Analiza wyników pomiarów

Przed przystąpieniem do analizy wyników należy przeprowadzić obróbkę zarejestrowanych falogramów w celu usunięcia sygnałów niepożądanych (zakłócenia, sygnał tła itd.) oraz wzmocnienia sygnałów użytecznych.

Do obróbki sygnału wykorzystuje się oprogramowanie Gred HD lub Gred 3D, dostarczone przez wytwórcę urządzenia.

Podstawowy zakres filtrowania danych obejmuje procedury:

- korekcja czasu 0,
- uśrednianie,
- filtracja częstotliwościowa,
- wzmocnienie sygnału (korekta amplitudy sygnału tłumionego na większych głębokościach).

W celu prawidłowego oszacowania głębokości położenia wykrytych obiektów, należy określić średnią prędkość propagacji fali w badanym ośrodku. Najlepszym sposobem określenia prędkości jest porównanie głębokości określonej podczas badania próbnego z pomiarem głębokości wykonanym w odkrywce (na przykład pomiar głębokości odsłoniętego pręta zbrojeniowego względem powierzchni betonu i skalibrowanie prędkości propagacji fali tak, aby otrzymać zgodność głębokości położenia pręta na falogramie z jego rzeczywistym położeniem w konstrukcji).

Zazwyczaj jednak nie ma możliwości wykonania odkrywki i bezpośredniego porównania wyników pomiarów. W tym przypadku można posłużyć się przybliżoną metodą, zaimplementowaną na przykład w oprogramowaniu Gred HD. Polega ona na kalibrowaniu prędkości poprzez dopasowanie kształtu hiperboli otrzymanej podczas pomiarów (reprezentującej pręt zbrojeniowy - por. rys. 4.4.) z hiperbolą syntetyczną, wygenerowaną w programie. Procedura ta pozwala na oszacowanie prędkości fali i określenie głębokości, na której znajduje się poszukiwany obiekt.

7.5. Wnioskowanie

Podczas interpretacji wyników należy wziąć pod uwagę możliwość występowania sygnałów (odbić) od innych elementów infrastruktury (przede wszystkim metalowych). Sygnały te można usuwać na etapie obróbki danych, z wykorzystaniem filtracji f-k.

W przypadku zawilgocenia badanej konstrukcji należy uwzględnić zmianę prędkości fali elektromagnetycznej, spowodowaną obecnością wilgoci.

8. Raport z badania

Raport z badania powinien zawierać następujące dane:

- lokalizację obiektu (nr drogi, kilometraż, nazwa przeszkody),
- parametry aparatury użytej do badań,
- warunki środowiskowe podczas pomiarów (temperatura, wilgotność, ew. obecność opadów atmosferycznych),
- rozmieszczenie i numerację ścieżek pomiarowych,
- zastosowane procedury obróbki falogramów,
- wyniki badań,
- wnioski.

9. Przykład wykorzystania procedury badawczej

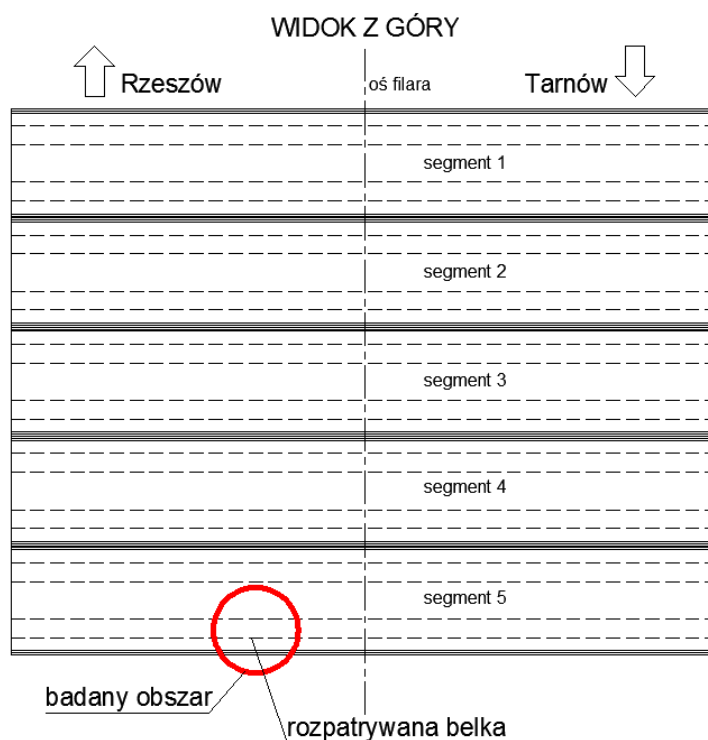
Poniżej przedstawiono przykład zastosowania procedury badawczej do oceny struktury belek kablobetonowych przejścia górnego dla zwierząt dużych nad autostradą A4 km 537+645.

9.1. Charakterystyka badanego obiektu

Rozpatrywany obiekt ma konstrukcję dwuprzęsłową, betonową, monolityczną. Rozpiętości przęseł 31,5 oraz 33,0m. Konstrukcja pomostu złożona z pięciu oddylatowanych podłużnie segmentów. Każdy z segmentów zaprojektowano jako ustrój dwubelkowy. Oparcie segmentów przegubowe, za pośrednictwem łożysk. Przyczółki masywne, pełnościenne, żelbetowe. Konstrukcja filara słupowa.

9.2. Opis badań polowych

Badaniom poddano fragment belki skrajnej przedmiotowego obiektu (od strony Tarnowa) w obszarze wskazanym przez Zleceniodawcę, zaznaczonym na rysunku 9.1.



Rys. 9.1. Obszar konstrukcji poddany badaniom georadarowym

Wykorzystując aparaturę IDS Aladdin z anteną o częstotliwości 2 GHz, wykonano skanowanie spodu belki w kierunku podłużnym i poprzecznym, jak również badania powierzchni bocznych belki. Skanowanie spodu belki w kierunku poprzecznym prowadzono od strony skraju obiektu w kierunku jego środka. Skanowanie powierzchni bocznych i spodniej (wzdłuż belki) prowadzono od środka przęsła w kierunku filara. Odstęp między poszczególnymi trasami przejazdu anteny wynosił około 10cm. Badania wykonywano w temperaturze około 25°C, przy bezdeszczowej pogodzie. Łącznie wykonano 45 skanowań.

Zarejestrowane falogramy poddano obróbce z wykorzystaniem następujących procedur:

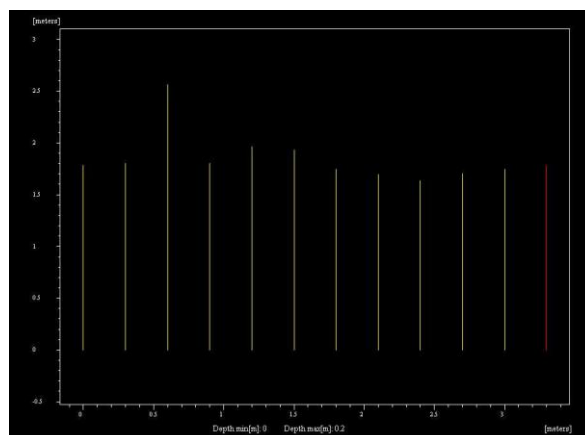
- korekcja czasu 0,
- uśrednianie,
- filtracja częstotliwościowa,
- wzmocnienie liniowe sygnału.

Uzyskane na tej podstawie echogramy były podstawą do analizy struktury betonu rozpatrywanej belki.

9.3. Wyniki badań

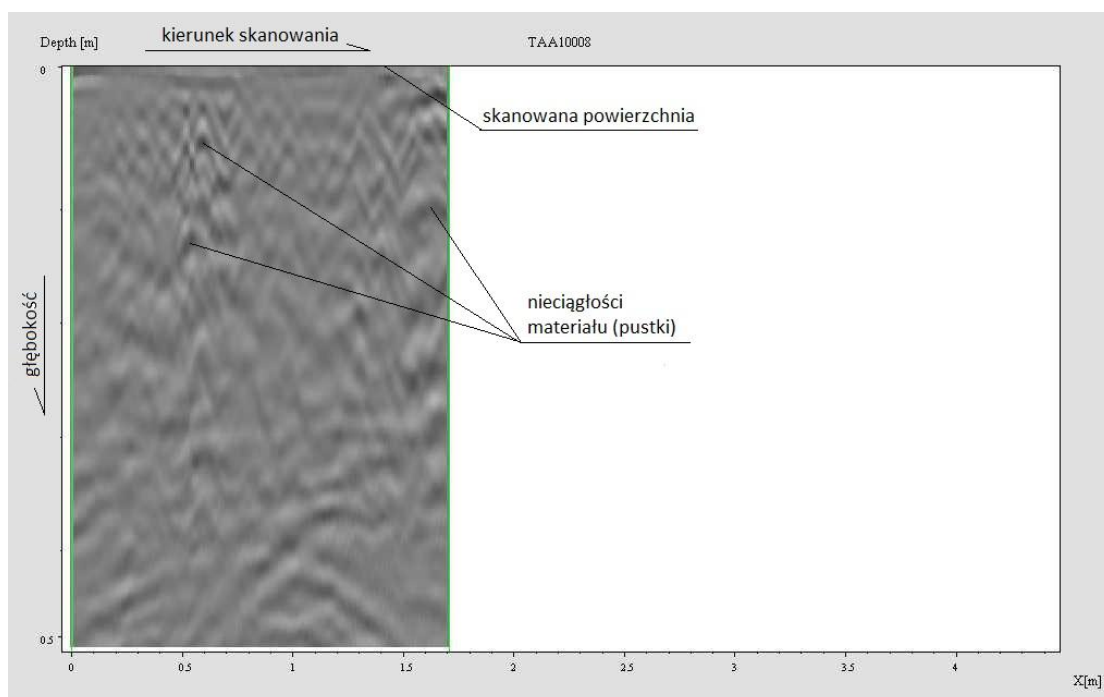
9.3.1. Skanowanie spodu belki w kierunku poprzecznym

Na rysunku 9.2 przedstawiono widok ścieżek pomiarowych rozpatrywanego obszaru w programie GRED3D.



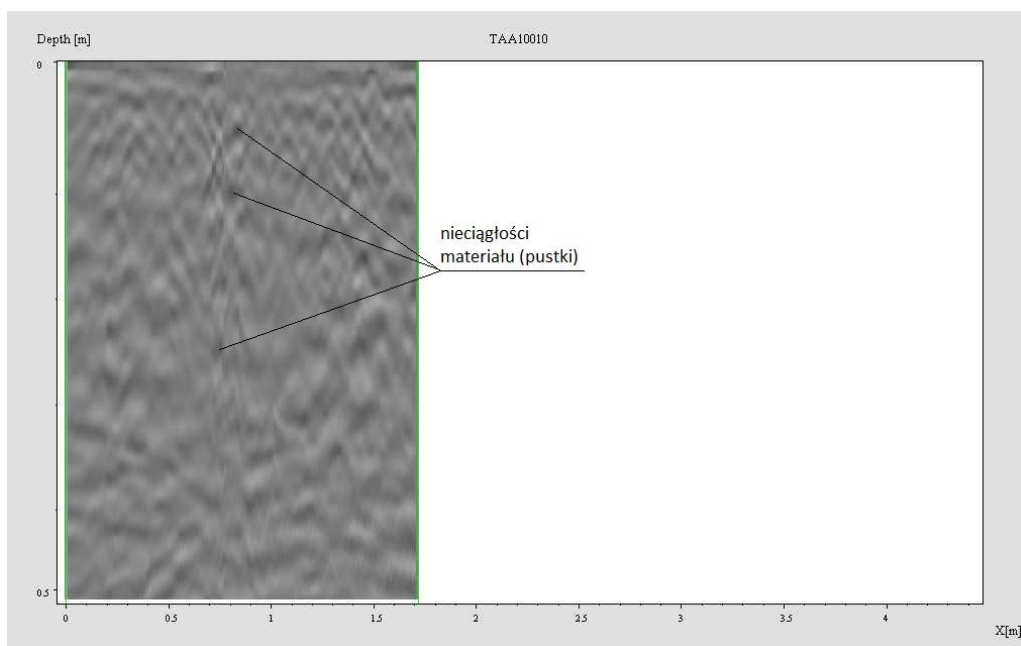
Rys. 9.2. Widok ścieżek skanowania w programie GRED3D

Poniżej zaprezentowano przykładowe echogramy uzyskane podczas skanowania belki w kierunku poprzecznym. Górna, pozioma oś określa skanowaną płaszczyznę (w tym przypadku dolną powierzchnię belki), natomiast oś pionowa głębokość pod skanowaną powierzchnią. Zróżnicowana intensywność zabarwienia echogramu związana jest ze zmianami amplitudy fali odbitej, a tym samym obecnością nieciągłości struktury materiału bazowego (zbrojenie, pustki).

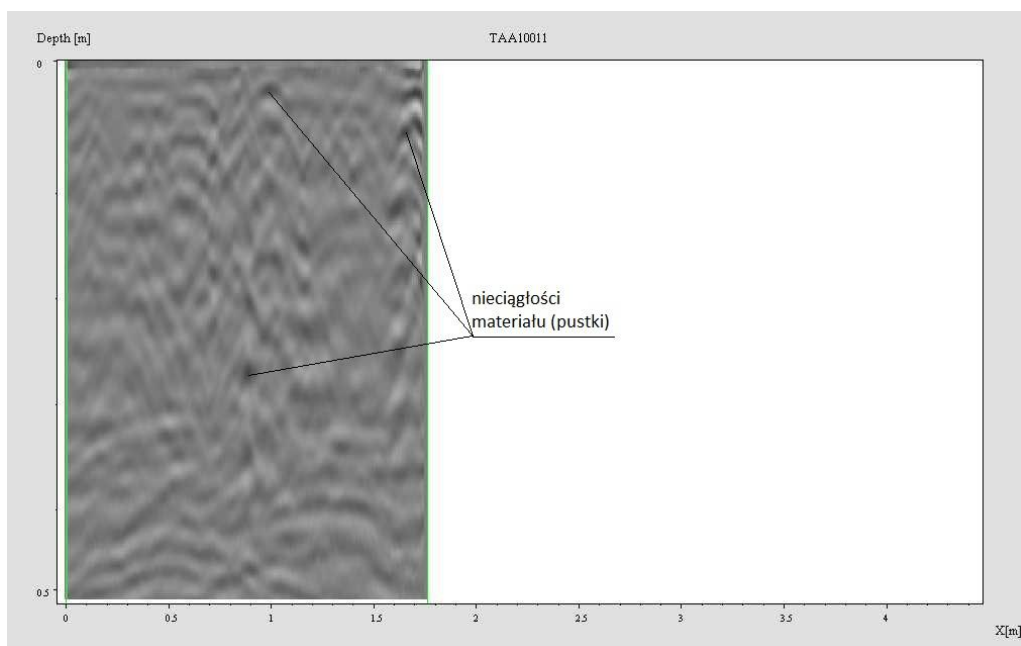


Rys. 9.3. Echogram nr 8 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki

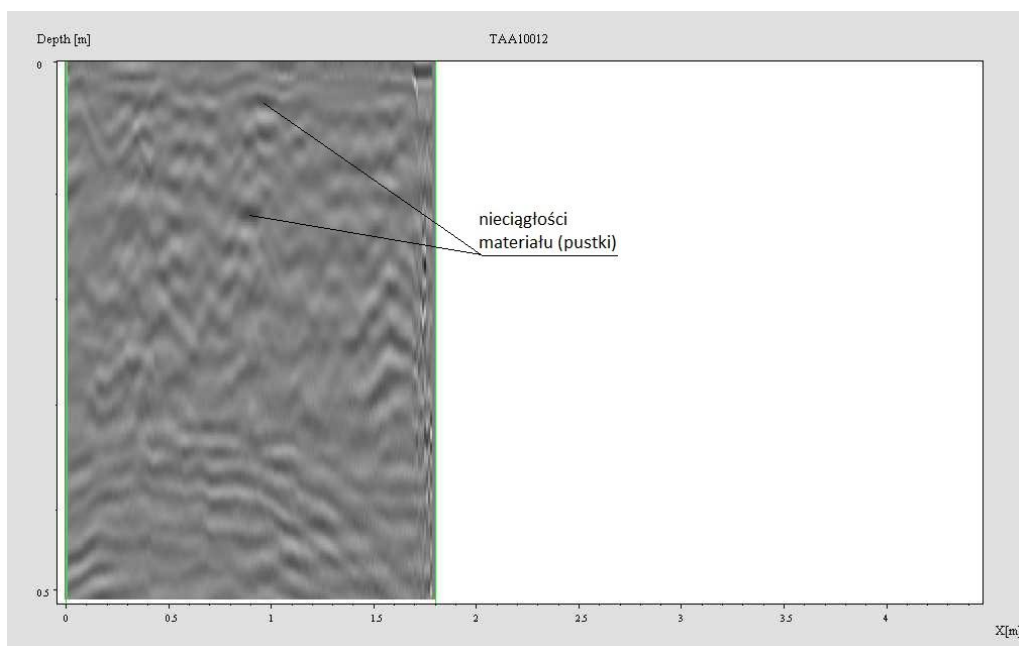
Analiza uzyskanych echogramów wskazuje na obecność nieciągłości materiału, najprawdopodobniej w postaci pustek. Na 5 spośród 12 zarejestrowanych echogramów zaobserwowano kilka nierównomiernie rozmieszczonych pustek o wielkości około 1cm każda. Największe skupiska nieciągłości odnotowano w pobliżu dolnego narożnika belki od strony Tarnowa. Należy zaznaczyć, iż obserwowane pustki występują na maksymalnej głębokości około 25 – 30cm, licząc od spodniej powierzchni belki.



Rys. 9.4. Echogram nr 10 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki



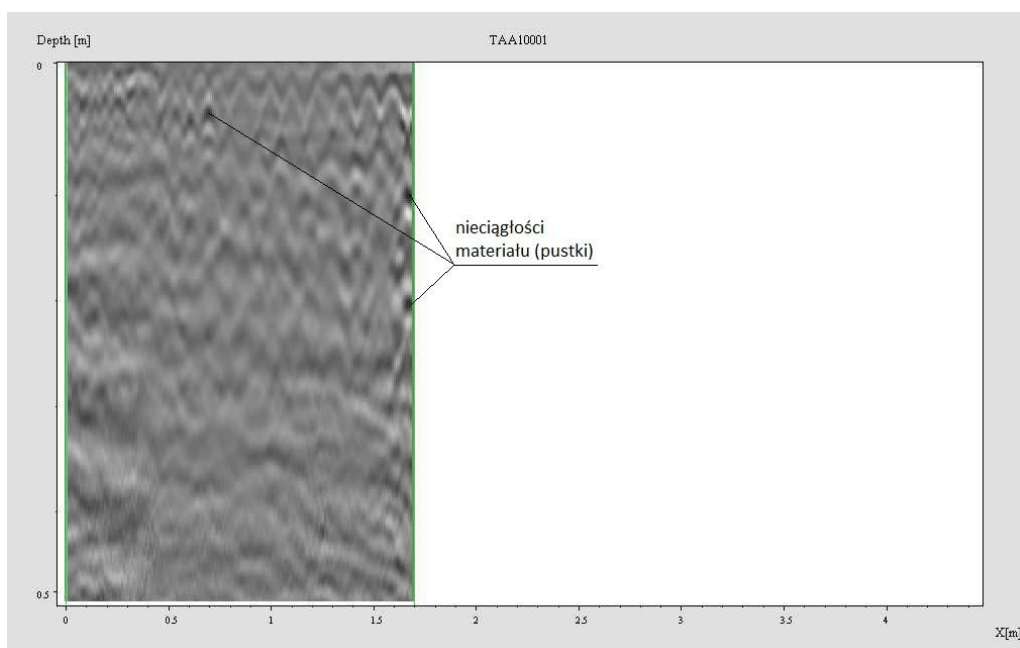
Rys. 9.5. Echogram nr 11 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki



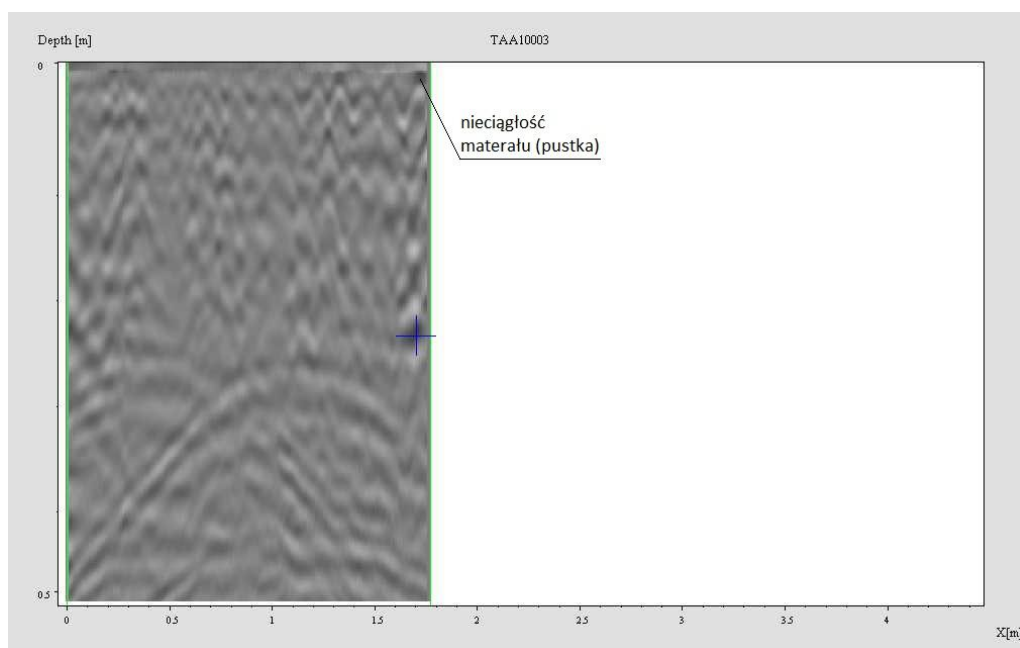
Rys. 9.6. Echogram nr 12 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki

9.3.2. Skanowanie spodu belki w kierunku podłużnym

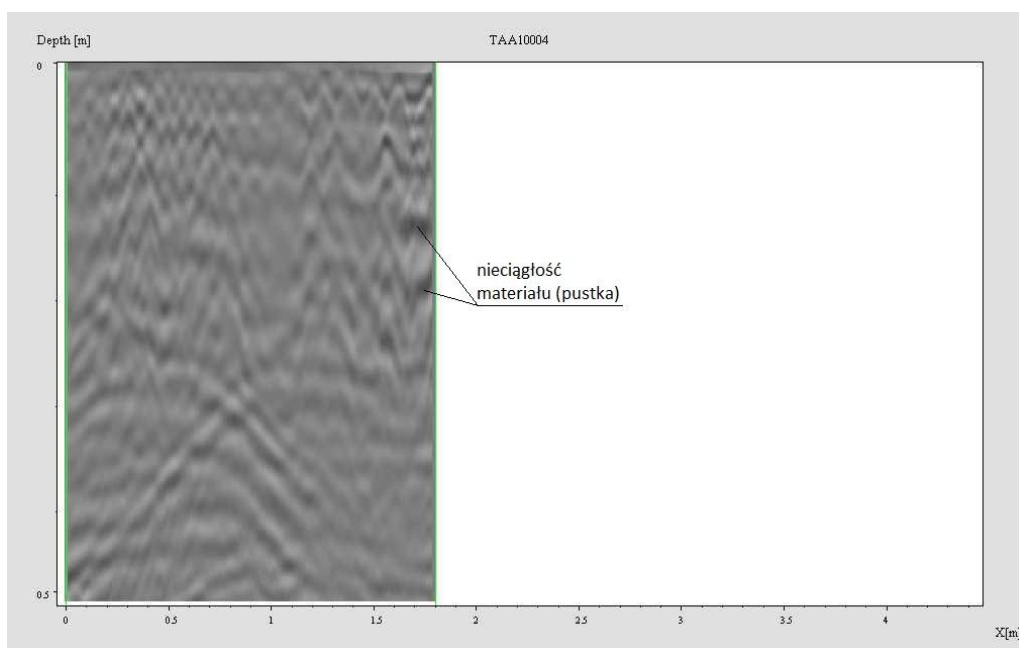
W celu weryfikacji uzyskanych wyników, przeprowadzono skanowanie spodu belki w kierunku podłużnym. Na rysunkach 9.7-9.12 zaprezentowano wybrane falogramy otrzymane w czasie pomiarów. Analiza porównawcza rysunków 9.3-9.6 i 9.7-9.12 wskazuje na zgodność uzyskanych wyników. W części spodniej belki, przede wszystkim w pobliżu narożnika od strony skraju obiektu odnotowano obecność do 5 pustek na każdym echogramie. Wymiary zaobserwowanych nieciągłości nie przekraczają 1cm.



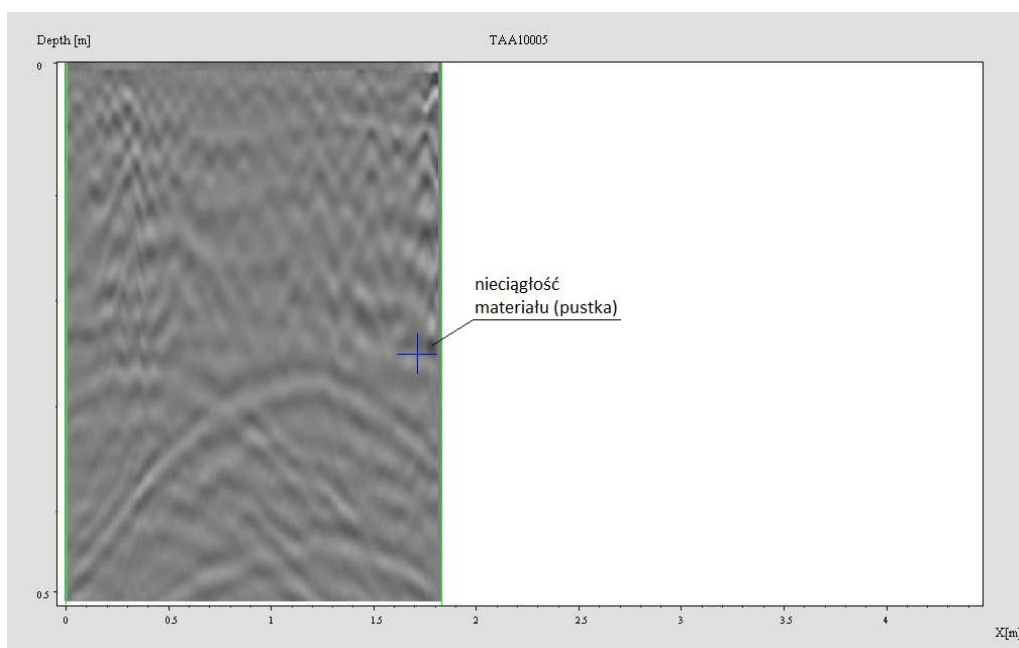
Rys. 9.7. Echogram nr 1 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki



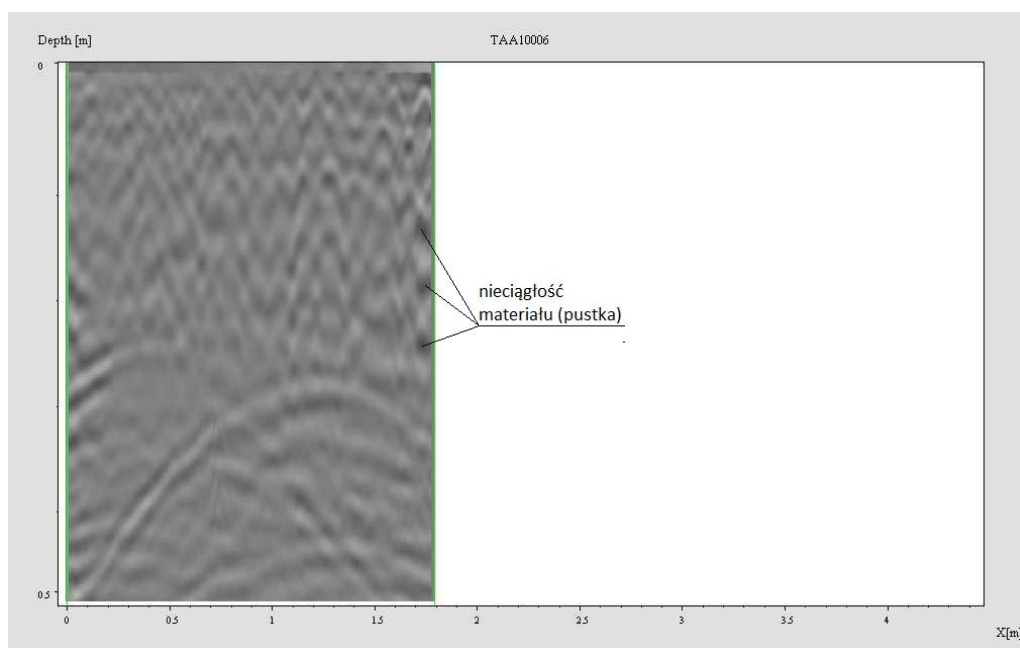
Rys. 9.8. Echogram nr 3 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki



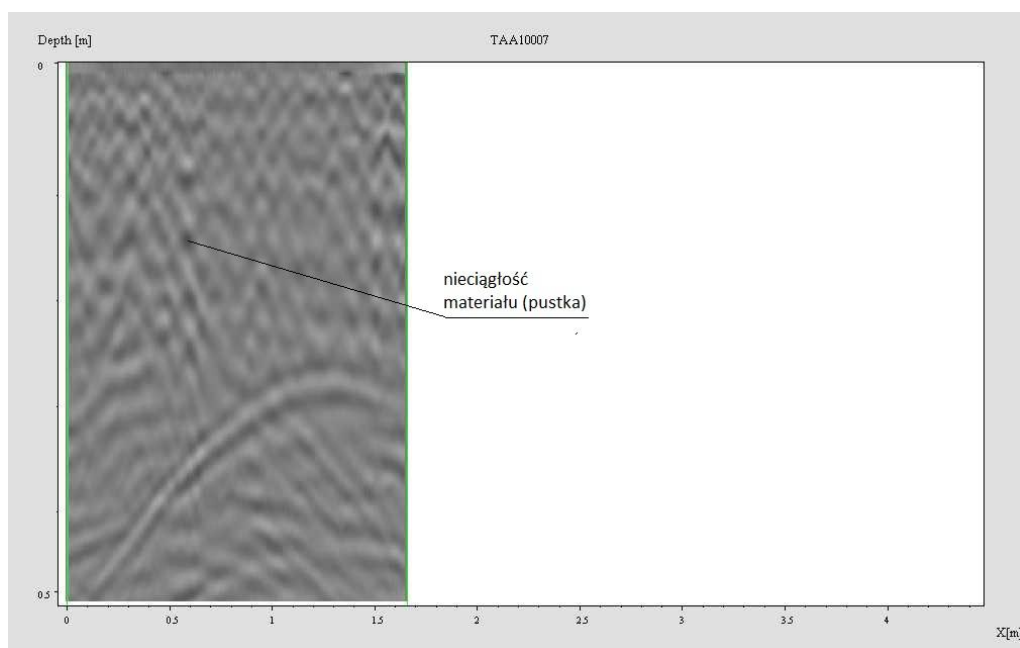
Rys. 9.9. Echogram nr 4 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki



Rys. 9.10. Echogram nr 5 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki



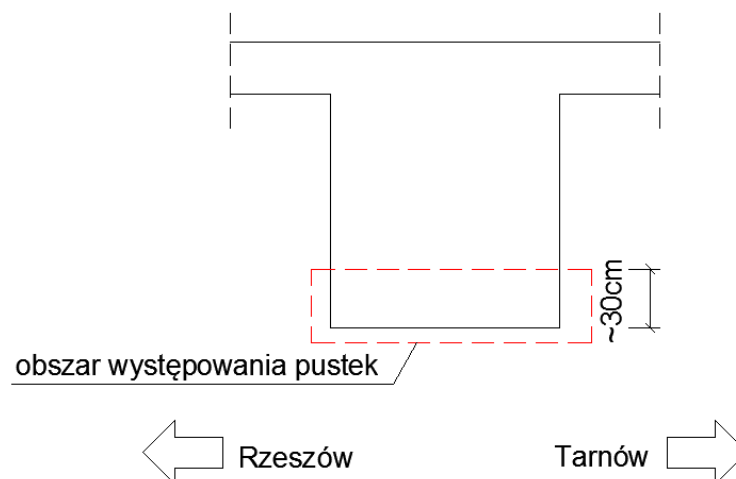
Rys. 9.11 Echogram nr 6 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki



Rys. 9.12 Echogram nr 7 zarejestrowany podczas skanowania spodu rozpatrywanej belki

9.3.3. Wnioski

Przeprowadzone wyniki wskazują na obecność pojedynczych pustek o wielkości około 1cm w dolnej części belki (rys. 9.13).



Rys. 9.13. Wyniki badań

Powyższe nieciągłości występują w warstwie o grubości około 30cm, licząc od spodu belki, przede wszystkim w pobliżu narożnika belki od strony Tarnowa. Badania georadarowe środkowej i górnej części belki nie wykazały anomalii struktury betonu w tym obszarze.

10. Literatura

1. Al-Hameedawi A.N.M., Abdulkhudhur R., Abdulkareem A.O. „Ground penetration radar based digital image processing for reinforcement corrosion in concrete”, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 2022, 241.
2. Annan A.P. “Ground Penetrating Radar”, *Workshop Notes, Sensors & Software*, 2001.
3. ASTM D 6087-97 Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar.
4. ASTM D6432-11 Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation.
5. Azari H. “Condition assessment of concrete bridge deck using GPR”, *LTBP News*, 6, 2016, pp. 1-4.
6. B 10: Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., DGZfP (2008).
7. Barnes C.L., Trottier J.F., Forgeron D. “Improved concrete bridge deck evaluation using GPR by accounting for signal depth– amplitude effects”, *NDT&E International*, 41, 2008, pp. 427-433.
8. Cao Y., Labuz J.F., Dai S., Pantelis J. „Implementation of Ground Penetrating Radar, Final Report”, Minnesota Department of Transportation Research Services Section, 2007.
9. CEI 306-8, Impiego del radar per introspezione del suolo per prospezioni ad opera di posa di servizi ed infrastrutture sotterranee, Comitato Elettrotecnico Italiano, 2004.
10. Hugenschmidt J., Mastrangelo R. “GPR inspection of concrete bridges”, *Cement & Concrete Composites*, 28, 2006, pp. 384-392.
11. Jiao L., Ye Q., Cao X., Huston D., Xia T. “Identifying concrete structure defects in GPR image”, *Measurement*, 160, 2020, 107839.
12. Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M. „Zarys metody georadarowej”, wydanie 2, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.
13. Klysz G., Balayssac J.P. “Determination of volumetric water content of concrete using groundpenetrating radar”, *Cement and Concrete Research*, 37 2007, pp. 1164-1171.
14. Lee S., Oh H.J., Cho B.H. “Decision-making process for maintenance of concrete bridge deck with asphalt overlays using automated digital road scanner”, *Developments in the Built Environment*, 12(4), 2022, 100103.
15. Leucci G. “Ground penetrating radar: an application to estimate volumetric water content and reinforced bar diameter in concrete structures”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(12), 2012, pp. 411-422.
16. Mara Nord Project.: Recommendations for guidelines for the use of GPR in bridge deck surveys, June 2011.
17. materiały szkoleniowe firmy IDS
18. NF S70-003-2 (2012): Travaux à proximité des réseaux. Partie 2: techniques de détection sans fouille/Works in the neighborhood of utilities. Part 2: Trenchless techniques of detection.
19. Rasol M., Pais J.C., Pérez-Gracia V., Solla M., Fernandes F.M., Fontul S., Ayala-Cabrera D., Schmidt F., Assadollahi H. “GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights”, *Construction and Building Materials*, 324, 2022, 126686.
20. Senin S.F., Hamid R. “Ground penetrating radar wave attenuation models for estimation of moisture and chloride content in concrete slab”, *Construction and Building Materials*, 106, 2016, pp. 659-669.

21. Tešić K., Baričević A., Serdar M. "Non-destructive corrosion inspection of reinforced concrete using ground-penetrating radar: a review" *Materials*, 14, 2021, 975.
22. Topczewski Ł. "Guidelines for the application of ground penetrating radar (GPR) to inspection of concrete bridges – reflection mode", *Roads and Bridges*, 11, 2012, pp. 329-343.
23. Topczewski Ł., Fernandes F.M., 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, pp. 59-76.
24. Utsi V., Utsi E. "Measurement of reinforcement bar depths and diameters in concrete", Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, Delft, The Netherlands.