

# Wykorzystanie techniki georadarowej do oceny poprawności wykonania konstrukcji gruntowo-powłokowej – studium przypadku

Use of georadar for assessment of soil-steel structure execution correctness – case study

## Streszczenie

Podatne konstrukcje gruntowo-powłokowe są obecnie szeroko stosowane ze względu na szereg zalet, takich jak: niższe koszty inwestycji i utrzymania, krótki czas wzniesienia oraz walory architektoniczne. Różnią się one jednak od konstrukcji sztywnych sposobem pracy co powoduje, że zdarzają się przypadki występowania błędów projektowych i wykonawczych. W celu ich wykrycia i eliminacji właściwe jest zastosowanie nieniszczących metod badawczych (NDT), które umożliwiają ocenę poprawności wykonania niedostępnych elementów konstrukcyjnych. Jedną z popularnych technik badawczych jest metoda georadarowa. Jest ona stosowana między innymi w budownictwie komunikacyjnym do oceny stanu technicznego klasycznych konstrukcji mostowych, nawierzchni drogowych, czy nasypów kolejowych. Metoda ta nie znalazła jednak szerszego zastosowania w badaniach podatnych konstrukcji gruntowo-powłokowych. W artykule przedstawiono przykład użycia metody georadarowej do badań nowo wybudowanego przepustu typu SuperCor. W wyniku badań uzyskano serię radarogramów, które umożliwiły wykrycie niewłaściwego przebiegu warstw konstrukcyjnych oraz elementów odwodnienia obiektu. Występowanie tych nieprawidłowości może mieć znaczny wpływ na trwałość, która związana jest z właściwym wykonaniem elementów odwodnienia obiektu mostowego.

**Słowa kluczowe:** nieniszczące metody badawcze; georadar; konstrukcje gruntowo-powłokowe; SuperCor

## Abstract

Flexible steel-shell-and-soil structures are widely used due to its advantages including lower cost of construction and maintenance, quicker erection process and architectural values. However these structures differs from rigid ones in stress distribution, what may be the reason why construction and design faults occur. To enable its detection and elimination non-destructive testing methods (NDT) should be applied due to their capabilities of assessment of inaccessible elements' construction correctness. One of the popular NDT methods is Ground Penetrating Radar method. It is applied in communication engineering for technical condition assessment of bridge decks, road pavements or railway embankments. However, this method is not commonly used for inspections of flexible steel-shell-and-soil structures. This paper presents application of georadar method in testing a newly built SuperCor culvert. A series of radarograms attained through the research revealed improper construction of backfill layers and drainage elements. Presence of the incorrectness may affect the durability of the structure which is dependent on the proper execution of drainage system.

**Keywords:** non-destructive testing methods; georadar; soil-steel structures; SuperCor

## Oznaczenia

$c$  – prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w próżni – 30,0 cm/ns  
 $v$  – prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w danym ośrodku

$\epsilon_r$  – stała dielektryczna ośrodka  
 $\epsilon$  – przenikalność elektryczna,  
 $\Gamma$  – współczynnik odbicia

**Dr hab. Inż. Grzegorz Świt, prof. PŚk; mgr inż. Łukasz Kosno; mgr inż. Łukasz Sławski** – Politechnika Świętokrzyska.  
Autor korespondencyjny/Corresponding author: lkosno@tu.kielce.pl

## Wstęp

Zasada pracy konstrukcji gruntowo-powłokowych różni się znacząco od klasycznych konstrukcji sztywnych. Szczególne znaczenie ma tu zjawisko pozytywnego przesklepienia, które wpływa na zwiększenie nośności obiektu [1,2]. Konstrukcje podatne zachowują się również w odmienny sposób w czasie wykonawstwa, kiedy to ulegają odkształceniom w czasie układania zasyпки. Początkowo konstrukcja stalowa ulega przewężeniu oraz wypiętrzeniu, a następnie podczas układania wyżej leżących warstw zasyпки w pobliżu klucza oraz ponad nim, wraca do kształtu bliższego pierwotnemu. Występujące momenty zginające zostają zredukowane lub zanikają, dlatego uznaje się, że konstrukcja zostaje sprężona [2,3]. Z powodu występujących deformacji kształt konstrukcji musi być rygorystycznie kontrolowany w oparciu o obowiązujące normatywy. Zgodnie z wytycznymi GDDKiA [4] dopuszczalne odchyłki wymiarów konstrukcji nie mogą przekraczać 2% jej rozpiętości. Ze względu na rozpiętość badanego obiektu dopuszczalne odchyłki mają wartości nominalne sięgające 16 cm. Jest to wartość znaczna, zwłaszcza w porównaniu z zaprojektowanym spadkiem ekranu przeciwwodnego, który wynosi 5%. Dlatego ważne jest monitorowanie wymiarów konstrukcji w czasie jej wykonywania. W przypadku braku właściwego nadzoru nad pracami lub podejrzeniami co do niewłaściwej pracy konstrukcji,

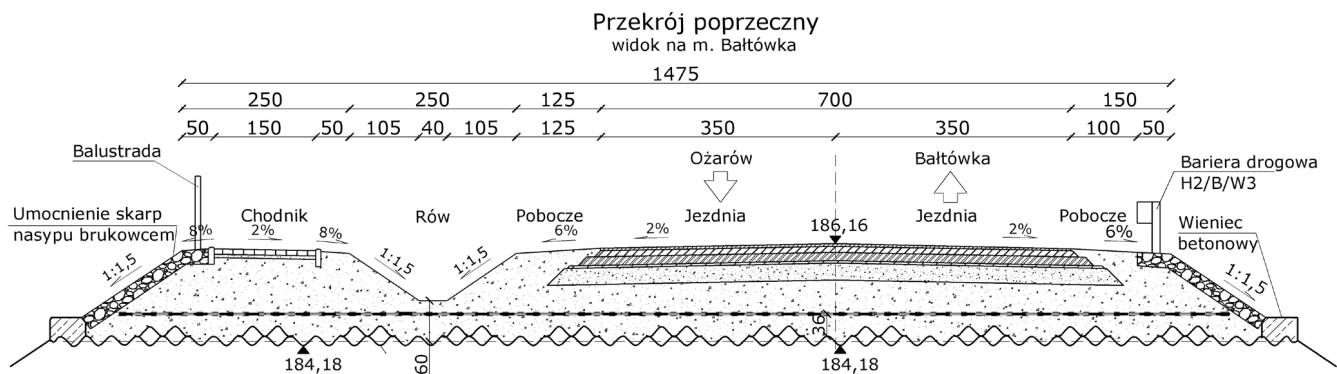
poprawność jej wykonania można ocenić stosując metodę georadarową. Metoda ta może być bardzo pomocna w określaniu przebiegu warstw konstrukcyjnych, położenia elementów odwodnienia, występowania zmian w zagęszczeniu, zawilgocenia, pustek i innych anomalii [5,6]. Uzyskane dane mogą być użyte do określenia i lokalizacji stref uszkodzeń niebezpiecznych dla konstrukcji [7]. Niniejszy artykuł pokazuje zastosowanie metody georadarowej do oceny poprawności wykonania przepustu z blach falistych w ciągu jednej z dróg wojewódzkich w południowo-wschodniej Polsce.

## Podstawowe dane konstrukcji

Obiektem badań był przepust z blach falistych typu SuperCor SC-35B o parametrach:

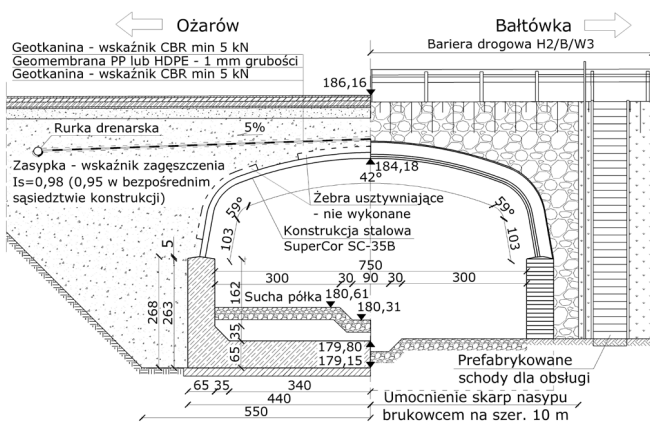
- szerokość x wysokość (wlot/wylot): 7,5x2,72 / 7,5x3,72 m
- długość podstawy/klucza: 30,0 / 18,60 m
- kąt skrzyżowania osi przepustu z drogą: 90°

Obiekt zaprojektowano na obciążenie ruchome klasy A, czyli odpowiadające pojazdowi o ciężarze 500 kN, jako podatną konstrukcję z blach falistych, na fundamentach sztywnych w postaci otwartej skrzynki żelbetowej o zmiennej wysokości. Konstrukcję zasypano gruntem o parametrach podanych w specyfikacji technicznej. Powyżej wykonano ekran przeciwwodny z dwóch warstw geowłókniny przedzielonych warstwą geomembrany,



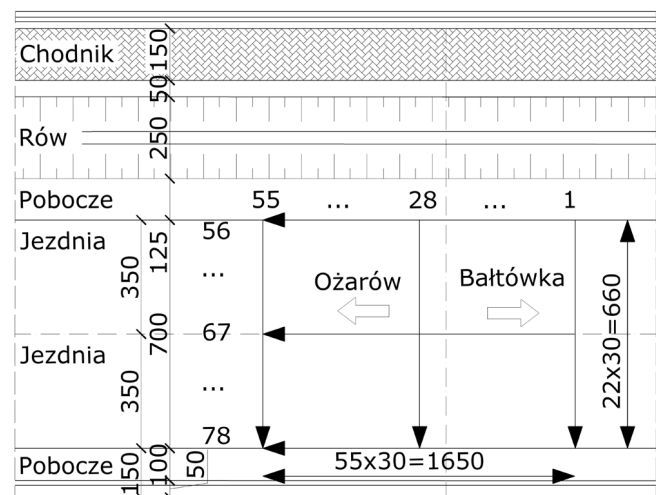
Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez konstrukcję jezdni nad obiektem

Fig. 1. Transverse cross-section of the road above the structure investigated



Rys. 2. Przekrój podłużny przez konstrukcję obiektu

Fig. 2. Longitudinal cross-section of the structure



Rys. 3. Schemat tras pomiarowych

Fig. 3. Measurement routes over the surveyed culvert

zakończonych rurką drenarską. Następnie ułożono kolejne warstwy zasypki, a ponad nimi warstwę podbudowy z mieszanki mineralno-cementowej (MC) klasy C3/4, wykonaną w technologii głębokiego recyklingu. W projekcie założono warstwę podbudowy o grubości 25 cm, jednak grubość warstwy ułożonej przekraczała 50 cm. Do jej wykonania wykorzystano destrukta pozyskany ze sfrezowania starych warstw asfaltowych, w ilości do 50%. Powyżej ułożone zostały warstwy bitumiczne o łącznej grubości 25 cm. Grubość projektowa tych warstw to 29 cm, jednak do czasu badań warstwa ścieralna o grubości 4 cm nie została jeszcze wbudowana.

Całkowita wysokość naziomu nad konstrukcją, bez warstwy ścieralnej, wynosi 180 cm. Przekroje badanej konstrukcji zostały przedstawione na rysunkach numer 1 i 2.

## Metodologia badań

Badania przeprowadzono przed odbiorem końcowym odcinka drogi w listopadzie 2015 roku, przy temperaturze powietrza ok. 5,0 °C i braku opadów w ciągu poprzedzających siedmiu dni. Pomiary wykonano w kierunku prostym i równoległym do osi drogi, w rozstawie co 30 cm, przy użyciu georadar z anteną o częstotliwości 900 MHz. Odległość zapisu pojedynczych śladów radarowych to 2 cm, długość okna czasowego-71,0ns, a częstotliwość próbkowania-1024. Schemat tras pomiarowych pokazano na rysunku numer 3.

Surowe radargramy poddano obróbce przy pomocy dedykowanego oprogramowania, która polegała na poprawie stosunku sygnału użytecznego do szumu, poprawie korelacji i ciągłości refleksów, minimalizacji szumu losowego i eliminacji zakłóceń zdeterminowanych [8].

Uzyskanie na skanach rzeczywistego kształtu konstrukcji stalowej było niemożliwe ze względu na falisty kształt blachy oraz łukowy kształt obiektu w przekroju podłużnym. Takie ukształtowanie konstrukcji powoduje znaczne rozproszenie fal elektromagnetycznych.

## Wyniki badań i ich interpretacja

Oszacowanie parametrów i grubości warstw konstrukcyjnych wymaga określenia prędkości propagacji fali w ośrodku. Prędkości określone za pomocą oprogramowania wynoszą:

- w warstwach nawierzchni bitumicznej: 17,0-18,0 cm/ns;
- w podbudowie MC: 8,0-12,0 cm/ns;
- w zasypce piaskowej powyżej ekranu przeciwwodnego: 10,0 cm/ns;
- w zasypce poniżej ekranu – trudna do określenia ze względu na brak wyraźnych sygnałów.

Różnice prędkości spowodowane są prawdopodobnie niejednorodnością materiału lub nierównomiernym zagęszczeniem. Uzyskane prędkości porównać można z ilorzem grubości warstwy i czasu propagacji. Aby określić czas propagacji fali dla kolejnych warstw, wykorzystano radargramy numer 56 i 78 uzyskane na krawędzi jezdni. Skany te, w przeciwieństwie do np. skanu numer 67, pokrywającego się z niweletą drogi, wolne są od zniekształceń spowodowanych zwiększoną prędkością propagacji w złączu technologicznym pomiędzy pasmami warstwy podbudowy MC. Zjawisko to zostało opisane w dalszej części opracowania. Dzięki określeniu czasu propagacji fali, możliwe było obliczenie jej prędkości. Grubość zasypki piaskowej poniżej ekranu przeciwwodnego wynosi, zgodnie z dokumentacją geodezyjną, 36 cm.

Na tej podstawie określono średnią prędkość propagacji fali dla warstwy:

$$36,0\text{cm}/(7,0\text{ns}\times 0,5)\approx 10\text{cm/ns}$$

Grubość warstwy zasypki piaskowej powyżej ekranu przeciwwodnego, przy założeniu prędkości propagacji fali elektromagnetycznej takiej jak w warstwie poniżej ekranu, wykonanej z tego samego materiału, można ustalić za pomocą wyrażenia:

$$10,0\text{ns}\times 0,5\times 10,0\text{cm/ns}\approx 50\text{cm}$$

W celu oszacowania prędkości fali we warstwie podbudowy MC należy przyjąć jej grubość jako różnicę całkowitej grubości naziomu oraz pozostałych warstw:

$$180,0\text{cm}-25,0\text{cm}-50,0\text{cm}-36,0\text{cm}=69,0\text{cm}$$

Dla takiego założenia oszacowana prędkość fali elektromagnetycznej dla warstwy wynosi:

$$69,0\text{cm}/((21,5\text{ns}-3,5\text{ns})\times 0,5)\approx 8,0\text{cm/ns}$$

Prędkość fali w warstwach nawierzchni bitumicznej (bez warstwy ścieralnej) wynosi:

$$25,0\text{cm}/((3,5\text{ns}-0,5\text{ns})\times 0,5)\approx 17,0\text{cm/ns}$$

Wartość stałej dielektrycznej dla ośrodka małastratnego można wyliczyć z zależności [9]:

$$\epsilon_r = \left( \frac{c}{v} \right)^2$$

która ma wartość:

- dla warstw nawierzchni bitumicznej: 3,1;
- dla podbudowy MC: 14,1;
- dla zasypki piaskowej: 9,0.

Zjawisko odbicia fal elektromagnetycznych pozwala określić ciągłość badanego ośrodka oraz wykryć granice występujących zaburzeń. Skuteczność wykrywania zmian zależy od wartości współczynnika odbicia  $\Gamma$ , który równy jest stosunkowi amplitudy fali odbitej do padającej. Płaszczyzna rozgraniczająca dwa ośrodki małastratne tym silniej odbija fale, im większy jest kontrast impedancji właściwych, a tym samym przenikalności elektrycznych. Współczynnik odbicia zależy od względnych przenikalności elektrycznych ma postać [9]:

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,1}} - \sqrt{\epsilon_{r,2}}}{\sqrt{\epsilon_{r,1}} + \sqrt{\epsilon_{r,2}}}$$

Jeśli impuls o amplitudzie równej 1,0 przenika przez ośrodek i dociera do interfejsu warstw, amplituda fali odbitej powinna mieć wartość określoną powyższym równaniem, która wynosi:

- dla interfejsu warstw nawierzchni asfaltowych oraz podbudowy MC:  $\Gamma = 0,36$ ;
- dla interfejsu podbudowy MC oraz zasypki piaskowej:  $\Gamma = -0,11$ .

Fala elektromagnetyczna na granicy podbudowy MC oraz zasypki piaskowej zmieniła polaryzację, a pozostała energia transmitowana została w głąb zasypki. Istnienie widocznego interfejsu pomiędzy warstwami zasypki piaskowej wskazuje na występowanie ekranu przeciwwodnego. Interfejs może być widoczny tylko w przypadku warstw o zróżnicowanych wartościach stałych dielektrycznych. W przypadku warstw zasypki piaskowej, wykonanych z tego samego materiału, współczynnik odbicia  $\Gamma$  powinien wynosić zero. Analogicznie, dla interfejsu zasypka piaskowa-konstrukcja stalowa wartość współczynnika



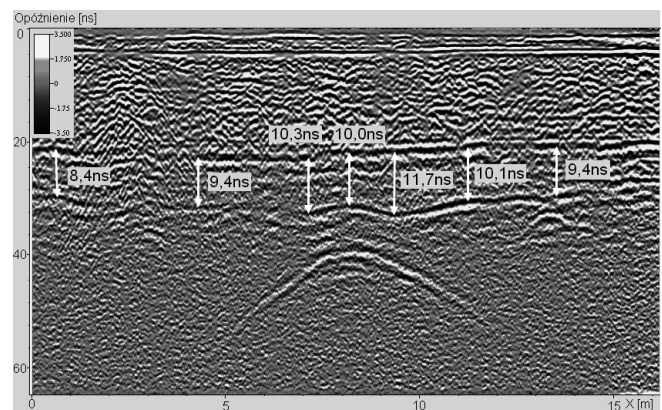
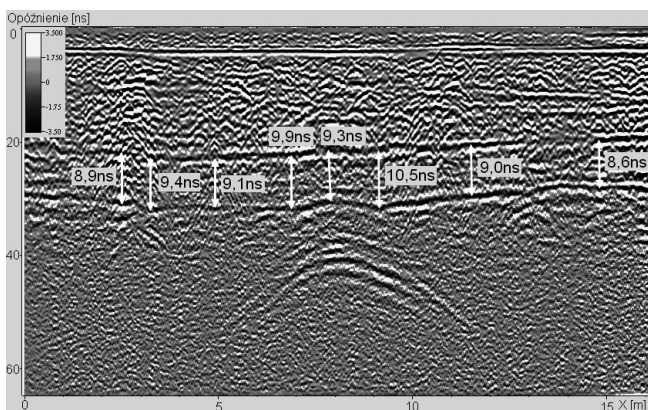
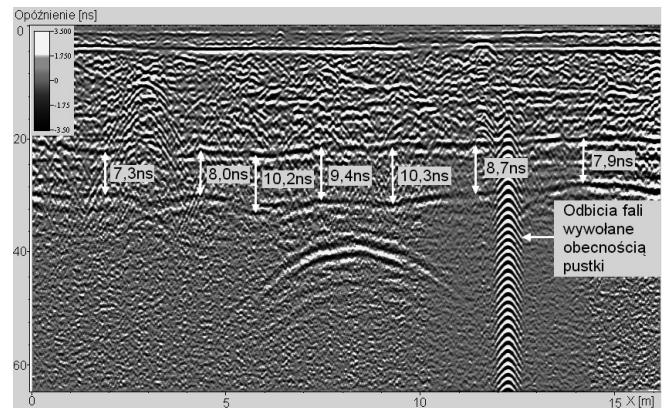
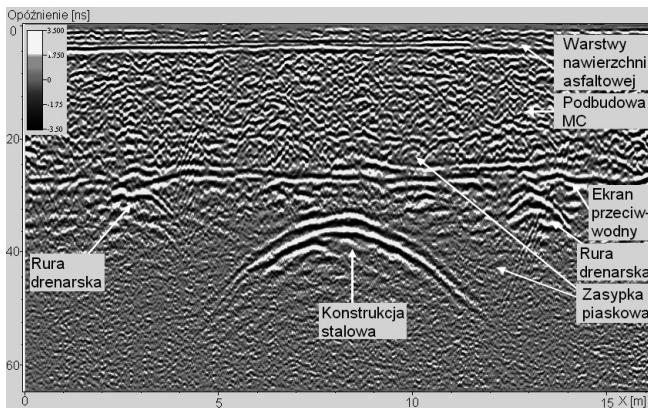
odbicia wynosi  $\Gamma = -1,00$ ; ponieważ metal będący idealnym reflektorem odbija całą energię.

W dalszej części opracowania przedstawiono wyniki badań georadarowych. Pokazane radargramy (B-skany) to profile podłużne złożone z pojedynczych śladów radarowych (A-skanów). Na osi pionowej zaznaczono czas propagacji fali, a na poziomej długość skanu. W prawym dolnym rogu umieszczono legendę przedstawiającą wartość amplitudy fali i przypisaną jej skalę szarości.

Na rysunku numer 4 przedstawiono radargram uzyskany dla skanu nr 65, będący przekrojem podłużnym przez obiekt w pobliżu osi jezdni. Należy zauważyć, że ekran przeciwwodny widoczny jest dla opóźnienia 26,0-28,0 ns, natomiast konstrukcja stalowa dla 32,0 ns. Nastąpiło 'wyniesienie' ekranu i konstrukcji względem położenia widocznego na innych radargramach, uzyskanych w większej odległości od osi drogi. Powodem występowania tych anomalii jest zwiększona prędkość propagacji fali w ośrodku. Jest to prawdopodobnie spowodowane niższym stopniem zagęszczenia części warstwy podbudowy MC nad ekranem przeciwwodnym. Warstwa ta była wykonywana pasmami, a miejsca występowania anomalii pokrywają się ze złączem technologicznym w osi drogi. Zjawisko to jest widoczne na skanach poprzecznych do osi drogi, jak również na widoku tomografii (C-skan).

Na rysunku numer 5 przedstawiającym skan numer 74 pokazano czas propagacji fali od interfejsu podbudowa MC-zasyпка piaskowa do interfejsu ekranu przeciwwodnego. Interfejsy te są ciągłe, bez wyraźnych uskoków, co jest dobrze widoczne w prawej części radargramu. Założyć można, że w warstwach położonych wyżej nie ma

obszarów o znacznie różniącym się stopniu zagęszczenia czy innych anomalii istotnie zmieniających prędkość propagacji fali. Ekran przeciwwodny widoczny jest dla opóźnienia 29,0-33,0 ns, natomiast konstrukcja stalowa dla opóźnienia 36,0 ns. Są to wartości znacznie większe niż widoczne na radargramie numer 65, pokrywają się one natomiast z wartościami występującymi na profilach numer 76 i 78. Świadczyć to może o jednorodnym zagęszczeniu warstwy podbudowy MC na tym obszarze. Zaznaczony na radargramie czas propagacji fali pomiędzy interfejsami jest zmienny. Wartość maksymalną – 10,3 ns – osiąga we współrzędnej  $X = 9,3$  m. Przy założeniu prędkości fali EM na poziomie 10,0 cm/ns, czas ten odpowiada grubości ok. 51,5 cm. Kolejne lokalne maksimum, 10,2 ns, znajduje się we współrzędnej  $X = 5,7$  m. Ponad kluczem obiektu widoczne jest zmniejszenie dystansu pomiędzy warstwami do 9,4 ns, natomiast w większej odległości od obiektu dystans pomiędzy warstwami ulega zmniejszeniu do 8,0-8,7 ns. W miejscach występowania lokalnych maksymów widoczne są zniżenia ekranu przeciwwodnego. Zauważyć należy, że droga nad badanym obiektem znajduje się w spadku podłużnym, a rzędna niwelety zmniejsza się od lewej do prawej. Powinno to powodować pochylenie widocznych interfejsów przeciwnie spadku do drogi, wobec czego widoczny na radargramie spadek ekranu przeciwwodnego powinien być zwiększony po lewej stronie obiektu i zmniejszony po stronie prawej. Tymczasem po obydwu stronach obiektu widoczny spadek jest przeciwny do projektowanego. Nawet przy konserwatywnym założeniu, że ekran przeciwwodny ma właściwy – daszkowy spadek, a widoczny interfejs został zniekształcony przez różnice w prędkości propagacji fali, spowodowane zmianami



**Rys. 4÷7.** Przekrój podłużny z opisanymi elementami konstrukcyjnymi oraz pokazany czas propagacji fali między interfejsami - skan 65, 74, 76, 78

**Fig. 4÷7.** Longitudinal cross-section of the culvert with structural elements indicated and the difference between the electromagnetic wave propagation times of subsequent interfaces - scan no. 65, 74, 76, 78

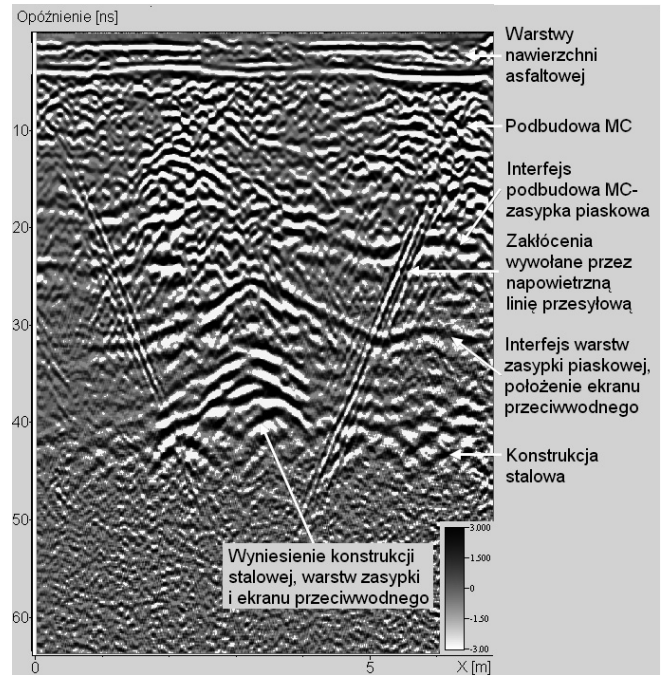


w stopniu zagęszczenia warstw leżących wyżej, to różnice czasów propagacji fali w warstwie zasypki ponad ekranem w lokalnych zaniżeniach we współrzędnych  $X= 5,7$  i  $X= 9,3$  m mają wartość 0,8-0,9 ns w stosunku do klucza obiektu oraz 1,6-2,2 ns względem czasów zmierzonych dla rzędnych sąsiadujących po stronie zewnętrznej. Przy założeniu prędkości propagacji fali we warstwie zasypki piaskowej na poziomie 10,0 cm/ns, wartości te odpowiadają zaniżeniom o głębokości 4,0-4,5 cm w stosunku do klucza obiektu i 8,0-11,0 cm względem czasów zmierzonych dla rzędnych po stronie zewnętrznej. W sytuacji gdy spadek projektowy ekranu przeciwwodnego wynosi 5,0 cm/m, może to uniemożliwiać prawidłowe odwodnienie obiektu. Brak możliwości odprowadzenia wody bardzo niekorzystnie wpływa na trwałość obiektu, gdyż w zaniżeniach mogą powstawać zastoiska wody, która zamarzając i odmrażając może powodować lokalne podnoszenie i opadanie warstw znajdujących się wyżej oraz związaną z tym degradację obiektu. Poniżej pokazano rysunki numer 4-7, na których widoczne są opisane zjawiska.

Na rysunku numer 8 pokazano przekrój poprzeczny obiektu. Poza opisanymi elementami konstrukcyjnymi zauważyć można opisane wcześniej zjawisko „wyniesienia” konstrukcji stalowej, zasypki piaskowej i ekranu przeciwwodnego. Jest ono spowodowane wzrostem prędkości propagacji fali, wywołanym prawdopodobnie przez zmiany w stopniu zagęszczenia ośrodka. Ponieważ linie interfejsu ekranu przeciwwodnego oraz interfejsu pomiędzy podbudową MC i zasypką piaskową przebiegają równolegle względem siebie wnioskować można, że niedogęszczony obszar występuje wyżej – we warstwie podbudowy MC. Wskazuje to na jednorodność zasypki piaskowej, a tym samym na równomierne jej zagęszczenie. Zjawisko to można zaobserwować na całym obszarze skanowania wzdłuż osi drogi.

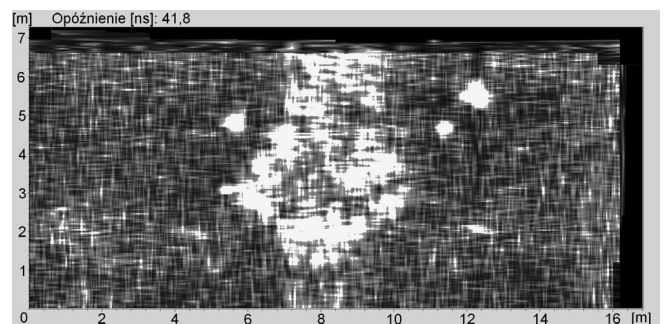
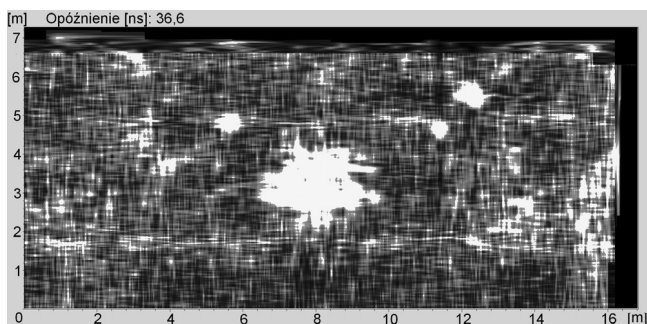
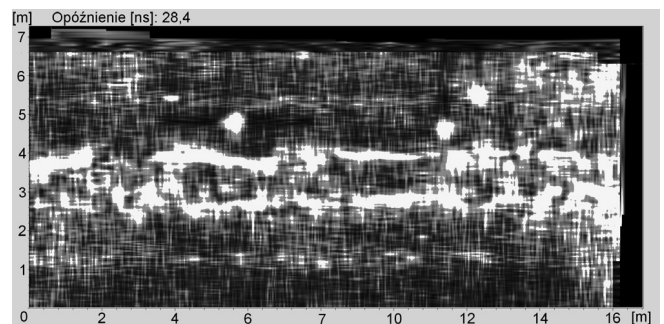
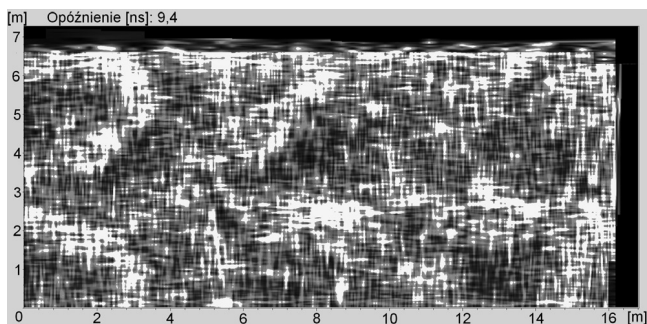
Kolejne rysunki pokazują widoki tomografii – C-skany. Rysunek 9 przedstawia przekrój przez podbudowę MC, uzyskany dla opóźnienia 9,4 ns. Żółty kolor odpowiada wyższej amplitudzie fali i niższej jej prędkości, a półkoliste kształty obszarom o lepszym zagęszczeniu. Wzór ten prawdopodobnie powstał na skutek rozgarniania pryzm i zagęszczenia działek roboczych mieszanki MC. Obszar skanowania

obejmował tylko jezdnię, co wyjaśnia asymetrię wzoru. Rysunek 10 ukazuje tomogram uzyskany dla 28,4 ns. Zauważyć można obszar o jaśniejszym zabarwieniu wzdłuż osi drogi. Jest to obraz ekranu przeciwwodnego, które został wyniesiony z powodu zwiększonej prędkości propagacji fali w złączu technologicznym między pasmami układowej podbudowy MC. Zniekształcenie obrazu warstw leżących niżej zauważyć można na tomogramach uzyskanych dla 36,6 i 41,8 ns, pokazanych na rysunkach 11 i 12. Środek konstrukcji stalowej, znajdujący się pod obszarem podbudowy o słabszym zagęszczeniu, pojawia się na widokach uzyskanych dla mniejszych opóźnień niż dla pozostałych jej części.



**Rys. 8.** Przekrój poprzeczny, wraz z opisanymi elementami konstrukcyjnymi – skan 27

**Fig. 8.** Transverse section of the culvert with structural elements indicated – scan no. 27



**Rys. 9÷12.** Widoki tomografii dla opóźnień 9,4; 28,4; 36,6 i 41,8 ns

**Fig. 9÷12.** Tomographic images obtained for delays of 9,4; 28,4; 36,6 and 41,8 ns

---

## Podsumowanie

Metoda georadarowa jest jedną z częściej stosowanych nieniszczących metod badawczych, zwłaszcza w budownictwie komunikacyjnym, gdzie stosowana jest do oceny stanu technicznego dróg, lotnisk, nasypów kolejowych czy klasycznych konstrukcji mostowych [10,11]. Jednakże nie znalazła ona powszechnego zastosowania w badaniach podatnych konstrukcji gruntowo-powłokowych, co ze względu na jej zalety oraz potencjał jest zastanawiające.

Przedstawione zastosowanie metody georadarowej umożliwiło określenie przebiegu warstw i położenia elementów konstrukcyjnych oraz prawidłowości wykonania prac ulegających zakryciu. Metoda georadarowa umożliwiła wskazanie potencjalnych problemów związanych z nieprawidłowym odwodnieniem zasypki, które w trakcie eksploatacji mogą doprowadzić do awarii poprzez działanie wody i niskich temperatur. Badanie pośrednio umożliwiło wskazanie obszarów o niższym stopniu zagęszczenia w obrębie warstw konstrukcyjnych. W przypadku konstrukcji gruntowo-powłokowych metoda georadarowa może być skutecznym narzędziem służącym do oceny prawidłowości wykonania obiektów w ramach odbiorów końcowych oraz wskazywania obszarów, co do których istnieje podejrzenie nieprawidłowego wykonania i konieczne jest przeprowadzanie dalszych badań. Metoda georadarowa może również być pomocna w określeniu stanu technicznego oraz zakresu prac remontowych istniejących obiektów.

## Literatura

- [1] Janusz L., Madaj A.: Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007.
- [2] Machelski Cz.: Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008.
- [3] Kosno Ł., Świt G.: Behaviour analysis of steel-shell-and-soil corrugated structure in the construction phase illustrated with SuperCor SC-57S, Conference Proceedings, p. 716-722, 24TH International Conference on Metallurgy and Materials Metal2015, Brno, Republika Czeska, 2015.
- [4] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji inżynierskich z blach falistych, Załącznik do Zarządzenia Nr 9 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, Żmigród, 18 marca 2004 r.
- [5] Annan, A.P.: GPR For infrastructure imaging, Symposium Proceedings BB 85-CD, 6TH International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE 2003, Berlin, Niemcy, 2003.
- [6] Hugenschmidt J.: Non-destructive-testing of traffic-infrastructure using GPR, Symposium Proceedings BB 85-CD, 6TH International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE 2003, Berlin, Niemcy, 2003.
- [7] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W.: Monitoring of Active Destructive Processes as a Diagnostic Tool for the Structure Technical State Evaluation, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Volume: 61, Issue: 1, s.: 97-109, 2013.
- [8] Kosno Ł. et al.: Inwentaryzacja niedostępnych elementów konstrukcji budynku z zastosowaniem georadaru na przykładzie budynku zabytkowego, monografia z 61. Konferencji Naukowej Bydgoszcz-Krynica, 20-25.09, s.: 85-91, 2013.
- [9] Karczewski J.: Zarys metody georadarowej, Uczelniane wydawnictwo naukowe – dydaktyczne AGH, Kraków, 2007.
- [10] Sztukiewicz R.: Współczesne badania nieniszczące konstrukcji nawierzchni drogowych, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 86, nr 11, s. 45-49, 2014.
- [11] Runkiewicz L., Sieczkowski J.: Dostosowanie polskich doświadczeń w zakresie nieniszczącej oceny wytrzymałości betonu do wymagań PN-EN, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 87, nr 12, s. 95-100, 2015.