

Maciej MAŚLAKOWSKI, Artur ZBICIAK, Kazimierz JÓZEFIAK, Tomasz PIOTROWSKI

DIAGNOSTYKA STANU PODŁOŻA I PODTORZA KOLEJOWEGO METODĄ GEORADAROWĄ (GPR)

Streszczenie

Artykuł zawiera opis nieinwazyjnej metody badań podłoża i podtorza kolejowego, jaką jest GPR (Ground Penetrating Radar). Pokazuje wyniki badań uzyskane w rzeczywistych warunkach na fragmentach poszczególnych linii kolejowych przygotowywanych do modernizacji. Opisuje wady i zalety niekonwencjonalnej metody geofizycznej, bazującej na nieinwazyjnych pomiarach przepływu fal elektromagnetycznych przez ośrodek gruntowy, w porównaniu do tradycyjnych metod geotechnicznych.

WSTĘP

Stan podtorza kolejowego, rozumianego jako nasyp znajdujący się bezpośrednio pod konstrukcją stanowiącą podkłady i szyny, oraz podłoże gruntowe, będące u podstawy nasypu, jest istotny z punktu widzenia projektowanych napraw czy remontów kolei. Od właściwego rozpoznania stanu podtorza zależy przyjęcie metod naprawczych tj.: dobór odpowiedniego materiału wykorzystanego do wbudowania w podtorze, odpowiednie zabezpieczenie podłoża przed nadmiernymi osiadaniami, wymiana całości podtorza lub tylko częściowe wzmocnienie np. przez podbicie [10].

Najbardziej powszechnymi metodami służącymi do rozpoznawania podłoża i podtorza są metody geotechniczne, takie jak wiercenia czy sondowania statyczne lub dynamiczne [8, 9]. Coraz częściej wykorzystuje się badania nieinwazyjne – geofizyczne – bazujące na pomiarze przejścia różnego rodzaju fal przez ośrodek gruntowy. Jedną z takich metod jest metoda GPR – badanie georadarem.

1. METODA GEORADAROWA

Georadar (GPR, ang. Ground Penetrating Radar) jest to wysoko-impulsowa, mobilna metoda geofizyczna, dostarczająca informacje o istnieniu, przebiegu oraz wzajemnym rozkładzie struktur i obiektów podpowierzchniowych oraz przedstawiająca w sposób graficzny i ciągły strukturę badanego ośrodka wraz z całą infrastrukturą podziemną. Interpretacja uzyskanych danych umożliwia szacunkowe określenie głębokości, wielkości, kształtu obiektów, a także w przybliżeniu materiału, z którego zostały wykonane. Badania georadarowe są metodą bezinwazyjną i obojętną dla środowiska naturalnego.

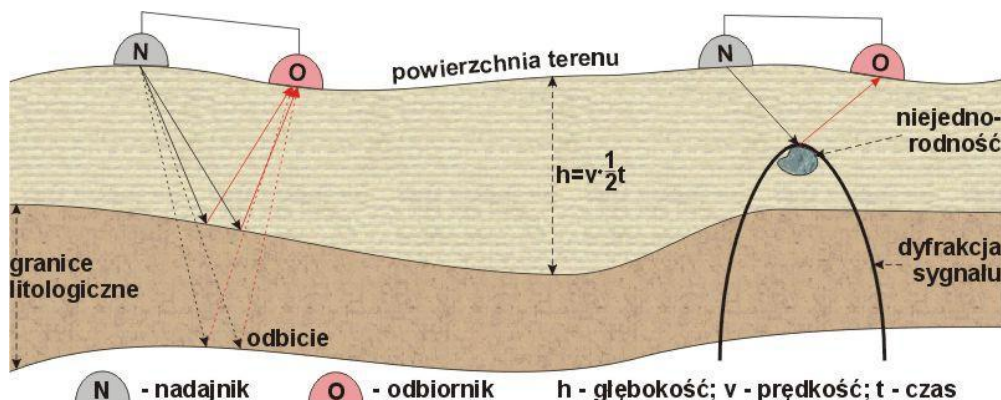
1.1. Zasada działania

Georadar jest precyzyjnym nadawczo-odbiorczym urządzeniem pomiarowym, wykorzystującym propagację fali elektromagnetycznej. Pomiary polegają na emisji fal elektromagnetycznych w głąb ośrodka materialnego i rejestracji sygnałów odbitych na granicy tworzących go ośrodków o różnych parametrach elektrycznych.

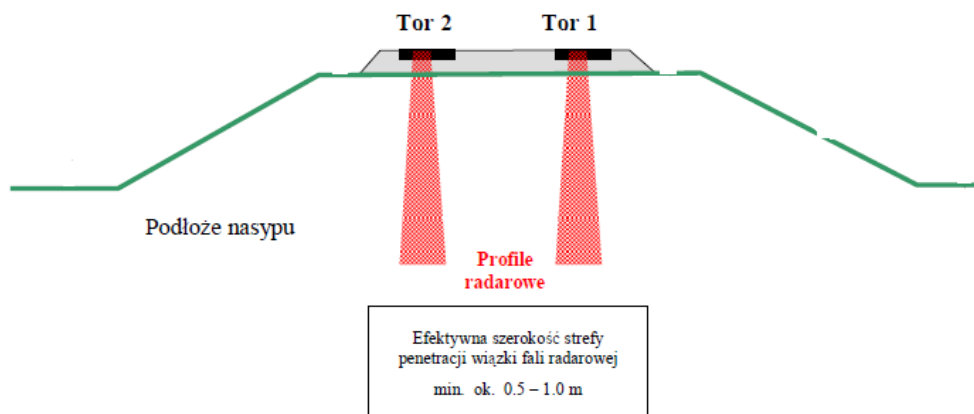
Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku determinują wartości stałej elektrycznej ośrodka oraz jego przewodność. Właściwe określenie prędkości fali w ośrodku pozwala na poprawne ustalenie skali głębokościowej pomiarów. Inną ważną wielkością, którą należy brać pod uwagę w pomiarach georadarowych, jest współczynnik tłumienia ośrodka, który determinuje zasięg propagacji fali elektromagnetycznej. Największy współczynnik tłumienia mają grunty, w szczególności gliny, ropy i utwory nasycone słoną i wysoko zmineralizowaną wodą. Pozostałe utwory można traktować jako ośrodki o małych stratach.

Skuteczność metody georadarowej zależy od własności środowiska propagacji i częstotliwości emitowanej fali. Im większy kontrast wartości stałych dielektrycznych, tym większa wartość współczynnika odbicia, przez co silniejsza wartość amplitudy powracającej w kierunku anteny odbiorczej georadaru. Na tłumienie fali elektromagnetycznej w ośrodku ma wpływ częstotliwość fali oraz przewodność ośrodka. To ostatnie wzrasta wraz ze wzrostem głębokości, wilgotności, porowatości, zasolenia i temperatury ośrodka.

Zasięg prospekcji georadarowej jest uzależniony od dwóch głównych czynników: częstotliwości nominalnej anteny nadawczej oraz oporności elektrycznej (przewodnictwa elektrycznego gruntu) badanego ośrodka. Im mniejsza częstotliwość anteny nadawczej, tym większa jest głębokość penetracji. Z kolei, im mniejsza oporność elektryczna gruntu, tym zasięg głębokościowy jest mniejszy. W skrajnie niekorzystnych przypadkach gruntów niskopropagacyjnych



Rys. 1. Schematyczna zasada działania georadaru



Rys. 2. Schemat wykonywania badań GPR na liniach kolejowych.

(mięszce warstwy glin, ilów, namulów) tłumienie fali elektromagnetycznej może być tak duże, że zasięg głębokościowy prospekcji może zmniejszyć się do kilku metrów, a nawet kilkunastu cm. W takich przypadkach, nawet użycie anten o bardzo niskich częstotliwościach emitowanej fali (25, 50, 100 MHz) nie powoduje znaczącego wzrostu głębokości prospekcji.

1.2. Budowa aparatury i sposób powstawania profilu georadarowego.

Zestaw do badań GPR składa się z dwóch anten: nadawczej i odbiorczej, centralnej jednostki sterującej sygnałem i rejestratora w postaci komputera typu laptop. Jednostka centralna generuje zasadnicze sygnały kontrolne, steruje zegarem nadajnika i odbiornika oraz częstotliwością próbkowania i zapisem danych. Sygnały kontrolne przekazywane są na antenę nadawczą, która wysyła przerywany impuls sinusoidalny, o długości półtora okresu, a druga identyczna antena – odbiorcza, zamontowana w pewnej odległości, odbiera odbite sygnały, które są opóźnione w stosunku do sygnałów nadawanych o określoną wartość – od kilkudziesięciu do kilku tysięcy nanosekund – wynikającą z odległości anteny do reflektora.

Fala elektromagnetyczna rozchodząca się w środowisku materialnym ulega m. in. odbiciu i pochłanianiu. Wykorzystywane w metodzie georadarowej zjawisko odbicia fali umożliwia ocenę ciągłości badanego ośrodka i wykrywanie granic występujących w nim zaburzeń.

Georadar pracuje w szerokim zakresie częstotliwości od 10 MHz do 2 GHz i więcej. Dobór częstotliwości roboczej zależy od głębokości penetracji (ze względu na tłumienie fal elektromagnetycznych wraz ze wzrostem głębokości) oraz od rodzaju gruntu (iły i gliny mocno ograniczają zasięg fal elektromagnetycznych, w przeciwieństwie do piasków i żwirów).

W pomiarach polegających na prześwietlaniu obiektu odbierana jest fala docierająca bezpośrednio poprzez strukturę. Odbiornik zadaną przez operatora częstotliwością próbkuje sygnał otrzymany z anteny odbiorczej a następnie zamienia go na postać cyfrową o 8 lub 16 bitowej wartości całkowitej. W ten sposób powstaje próbka numeryczna – sample. Wartość numeryczna pojedynczej próbki reprezentuje chwilową wartość amplitudy odebranego sygnału. Odbiór oraz próbkowanie pojedynczego impulsu elektromagnetycznego, wyemitowanego w głąb ośrodka, wykonywany jest w zdefiniowanym przez operatora przedziale czasu, tzw. oknie czasowym. Aparatura rejestruje zatem czas odbioru oraz wartość pojedynczej próbki. Grupa próbek zarejestrowanych w oknie czasowym tworzy ślad georadarowy – tzw. trase. Rejestracja kolejnych śladów powoduje powstanie obrazu georadarowego – tzw. radargramu. Ten

ostatni wygenerowany w wyniku przesuwu anten georadarowych po linii profilowej stanowi przekrój pionowy ośrodka.

Zaawansowane technologicznie, specjalistyczne programy pozwalają uzupełnić model w miejscach pomiędzy profilami oraz prawidłowo przefiltrować uzyskane wyniki w celu dokonania ich właściwej oceny i interpretacji.

1.3. Zastosowanie georadaru

Georadar jest bardzo czułą aparaturą wykorzystującą zjawisko odbicia impulsów na granicach fizycznych różniących się wartościami stałej dielektrycznej i przewodności elektrycznej. Im kontrast między prędkością rozchodzenia się fali w obiekcie, a prędkością rozchodzenia się fali w otaczającym ośrodku jest większy, tym wyraźniejszy odczyt otrzymamy. Możliwym jest więc znalezienie w ziemi obiektów drewnianych, kamiennych, glinianych, murowanych, metalowych czy betonowych, a także określenie położenia i głębokości naruszenia struktury i zmian materiałów rodzimych. Zazwyczaj pomiar georadarowy wykonuje się tzw. powierzchniową metodą refleksyjną (odbicie sygnału) - gdzie nadajnik i odbiornik w stałej odległości od siebie przemieszczają się regularnie po powierzchni terenu, a punkt odbicia i pojedyncza trasa pomiarowa echa leży w połowie odległości między nadajnikiem i odbiornikiem, według schematu przedstawionego na Rys. 1.

Przykładem szerokiego i innowacyjnego zastosowania metody georadarowej są badania konstrukcji z betonu, która w zależności od częstotliwości fali pozwala na detekcję delaminacji, lokalizację prętów zbrojeniowych w żelbecie, pomiar grubości elementu np. posadzki betonowej czy nawet określenia zawartości wody i jonów chlorkowych w betonie [1]. Najnowszym trendem w tym zakresie jest stosowanie kilku komplementarnych metod nieniszczących, w tym metody georadarowej i, na przykład, metody ultradźwiękowej czy impact-echo [1, 3, 4].

2. BADANIA PODTORZA KOLEJOWEGO

Refrakcyjne fale georadarowe mogą być wykorzystywane do wyznaczenia parametrów charakteryzujących dwuwarstwowo ośrodek geologiczny, w którym warstwa górna ma większą wartość stałej dielektrycznej niż warstwa dolna. Taka sytuacja może mieć miejsce w wałach przeciwpowodziowych, w których nad strefą zagęszczoną, zalega warstwa silnie rozluźniona, charakteryzująca się m.in. dużym nasyceniem wodami opadowymi.

Rozluźnione (zniszczone) części podtorza charakteryzować się będą większą porowatością w stosunku do części lepiej skonsolidowanych (niezniszczonych). Większa porowatość spowoduje, że w uszkodzonych częściach następować będzie gromadzenie się wód opadowych, co wpłynie wyraźnie na zmianę parametrów elektrycznych.

gnetycznych w ośrodku gruntowym. Powstanie silnych kontrastów elektromagnetycznych pomiędzy zniszczoną a skonsolidowaną częścią wału daje duże szanse na wykrycie granic pomiędzy tymi strefami za pomocą metody georadarowej [5].

Badania GPR na liniach kolejowych były prowadzone według schematu pokazanego na Rys. 2.

Pozycjonowania dokonano za pomocą systemu GPS RTK. Pomiary miały charakter rozpoznania liniowego i zostały wykonane w rozdzielczości pozwalającej na uzyskanie poprawnych wyników, anteną o częstotliwości dającej odczyty do głębokości około 6 m p.p.t. Geofizyczne dane pomiarowe badanego obszaru poddano procedurom przetwarzania przy użyciu oprogramowania SubView. Zastosowane procedury umożliwiły opracowanie przekrojów wzdłuż każdego z pomierzonych ciągów, ukazujących zmiany przenikalności dielektrycznej warstw oraz rozkład ewentualnych stref anomalnych na całej powierzchni terenu oraz głębokość ich zalegania.

Na etapie wstępnym (preprocessing) dokonano analizy poprawności geometrycznej rejestracji oraz wprowadzono niezbędne korekty topograficzne. W odniesieniu do zarejestrowanych danych połowych, przetwarzanie składało się z następujących procedur:

- korekta czasu zerowego,
- usunięcie składowej stałej,
- bandpass,
- wzmocnienie liniowe i wykładnicze,
- filtracja Horizontal Highpass,
- filtracja Horizontal Lowpass,
- dobór skali kolorów dla wizualizacji.

Tak przetworzone profile georadarowe zestawiono następnie w formie tabelarycznej w celu wizualizacji wyników przetwarzania na płaszczyźnie.

3. UZYSKANE WYNIKI BADAŃ

Badania GPR posłużyły do wstępnego rozpoznania podłoża, lokalizacji ewentualnych zmian anomalnych – stref rozluźnień w korpusie podtorza linii kolejowych. Na podstawie uzyskanych wyników wskazano dodatkowe miejsca konieczne do przeprowadzenia szczegółowych badań geotechnicznych.

Prace geofizyczne prowadzono georadarem typu Ground Explorer firmy MALA GeoScience (Rys. 3). Pomiary były prowadzone z użyciem drezyny a sposób mocowania georadaru przedstawiono na Rys. 4.

Badania georadarowe ukazują wszelkie istniejące zmiany w badanym gruncie. Im większy jest kontrast między wartościami przenikalności dielektrycznej na granicy ośrodków, tym wyraźniejszy jest obraz wszelkich anomalii i naruszeń naturalnych warstw gruntu.



Rys. 3. Georadar Ground Explorer firmy MALA GeoScience.



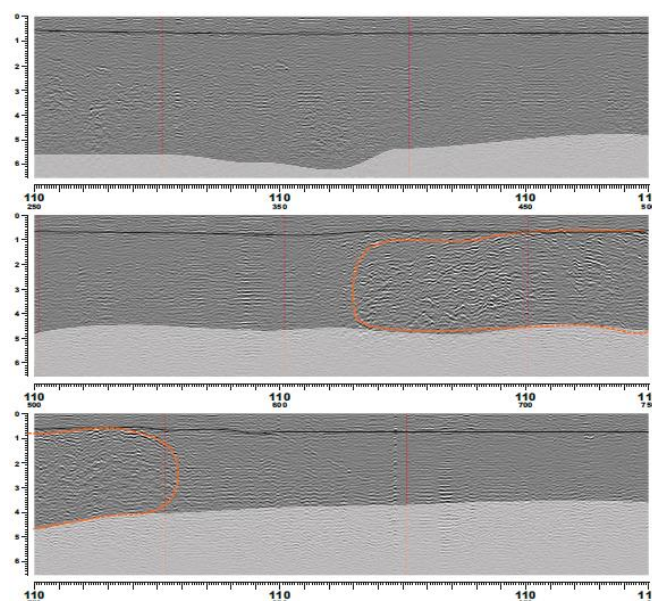
Rys. 4. Sposób mocowania georadaru na drezynie.

Zmiany widoczne są do głębokości limitowanej przez stopień tłumienia ośrodka oraz częstotliwość nadawanej fali elektromagnetycznej. Najlepszą penetrację wykazuje georadar na utworach piaszczystych i żwirach. Praktycznie w całości tłumione są w utworach gliniastych.

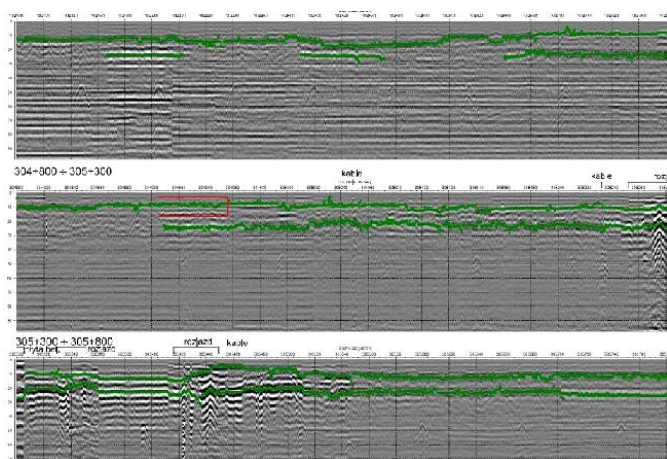
Po obróbce sygnału radarowego i jego analizie otrzymano obraz anomalii z badanych ciągów. Analizę przeprowadzono do głębokości 6 m p.p.t lub do poziomu tłumienia fali elektromagnetycznej.

Brak zmian w odczytach georadarowych wskazuje na zaleganie ośrodka homogenicznego wzdłuż badanego ciągu lub na zaleganie ośrodka o wysokim współczynniku tłumienia, który uniemożliwia przenikanie fali elektromagnetycznej w głąb gruntu. Zakres zasięgu fali elektromagnetycznej został wyrysowany na radargramach.

Analiza szczegółowa dla każdego z fragmentów podtorza została przedstawiona w części graficznej opracowania (Rys. 5, 6). Na Rys. 5 pokazano interpretację fragmentu uzyskanych wyników GPR. Kolor szary/ciemny stanowi nasypy (grunty piaszczyste), które oddziela kolor jasno-szary czyli tłumiące grunty spoiste, na czerwono natomiast są otoczone anomalie wskazujące miejsca wątpliwe do szczegółowych badań geotechnicznych.



Rys. 5. Przykładowy obraz graficzny uzyskanych wyników GPR z interpretacją zawierającą grunty sypkie (nasypy), spoiste podłożo oraz miejsca występowania anomalii.



Rys. 6. Przykładowy obraz graficzny uzyskanych wyników GPR z interpretacją wskazującą miejsca takie jak: rozjazdy, kolizje czy miejsca występowania kabli.

Za pomocą badań georadarowych można doskonale rozpoznać całą infrastrukturę podziemną znajdującą się w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji podtorza, widoczną na Rys. 6. Linia zielona odgranicza nasypy od gruntu rodzimego, na czerwono są zaznaczone anomalie do weryfikacji geotechnicznej podobnie jak na Rys. 5, poza tym widać kable, rozjazdy i kolizje wpływające znacząco na zaburzenia fal.

PODSUMOWANIE

Niestety, z uwagi na zbyt małą popularność, nieinwazyjne metody badań, czyli takie, w których nie można dotknąć ręką badanego materiału, albo zobaczyć go na własne oczy, ciągle stanowią dodatek do badań podstawowych, jakimi są badania geotechniczne. W tym wypadku pomiary georadarowe miały także charakter jedynie sondażowy. Skupiono się na wyznaczeniu przede wszystkim możliwych, prawdopodobnych miejsc rozluźnień w strukturze podtorza (miejsca anomalne) wraz z głębokością ich zalegania, a także na ustaleniu dodatkowych punktów do przeprowadzenia pomiarów geotechnicznych.

Ponadto badania GPR są też mało precyzyjne pod względem rozpoznawania geologii i geotechniki w stosunku do badań tradycyjnych, ponieważ ilość i jakość uzyskiwanych danych niestety pozostawia wiele wątpliwości. Poza rozpoznaniem w miarę dokładnych granic poszczególnych wydzieleni tzn. takich, które w ten sam sposób tłumią fale przedstawianych na Rys. 5 i Rys. 6, nie otrzymujemy żadnych informacji szczegółowych, takich jak dokładny skład gruntu czy też jego stan. Dlatego też, metoda georadarowa, jak i inne metody geofizyczne [2, 6, 7, 11], otwierają przed badaczami szerokie spektrum możliwości ich zastosowania. W przyszłości może należeć do badań podstawowych, cieszących się wiarygodnością nie mniejszą niż badania inwazyjne – geotechniczne.

Ze względu na fakt, iż badania są w trakcie realizacji, w niniejszym artykule nie zostały podane szczegółowe miejsca lokalizacji, a jedynie przykładowe wyniki, jakie uzyskano w trakcie badań.

BIBLIOGRAFIA

1. Adamczewski G., Garbacz A., Piotrowski T., Załęgowski K., Zastosowanie komplementarnych metod NDT w diagnostyce konstrukcji betonowych, Materiały Budowlane, 9 (493) 2013.
2. Archie G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. AIME 146.
3. Garbacz A., Piotrowski T., Załęgowski K., Adamczewski G., UIR-Scanner Potential to Defect Detection in Concrete, Advanced Materials Research, 687, 2013, Ed. Ru Wang and Zhenghong Yang, Trans Tech Publications Ltd, 359-365; doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.687.359.

4. Garbacz A., Adamczewski G., Załęgowski K., Piotrowski T., Application of radar, impact-echo and ultrasonic methods for concrete quality assessment with UIR-Scanner, Mechanics and Materials, 2013, Ed. Jemiolo S., Lutomirska M., (red.) Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 201-211; ISBN 978-83-7814-170-9.
5. Marczak H., Gołębiowski T., Tomecka-Suchoń S., 2005 – Analiza możliwości wykorzystania georadarowych fal refrakcyjnych do lokalizacji zmian w budowie wałów przeciwpowodziowych, Geologia : kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.
6. Maślakowski M., Józefiak K., Badania geofizyczne służące ocenie zagęszczenia nasypów drogowych, Monografia Wydziału Inżynierii Lądowej, Teoretyczne Podstawy Budownictwa, Tom V, 2014, str. 47-56.
7. Maślakowski M., Kowalczyk S., Mieszkowski R., Józefiak K., Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) as a tool in geotechnical investigation of the substrate of highway, Studia Quaternaria, vol. 31, no. 2 (2014), str. 83-89.
8. PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
9. PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
10. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. 2012 poz. 463).
11. Stenzel P., Szymanko J. 1973. Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. 435 p.

EXAMINATION OF RAILWAY SUBGRADE CONDITIONS USING GROUND PENETRATING RADAR

Abstract

The paper contains description of a non-destructive testing method of a railway subgrade which is Ground Penetrating Radar (GPR). Results of field tests carried out for realistic conditions along sections of existing railway tracks being prepared for modernization, are shown. The article describes advantages and disadvantages of the unconventional geophysical method based on non-invasive measurements of electromagnetic waves propagation in a soil medium and compares it with traditional geotechnical testing approach.

Autorzy:

dr **Maciej Maślakowski** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów
 prof. dr hab. inż. **Artur Zbiciak** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów
 mgr inż. **Kazimierz Józefiak** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów
 dr inż. **Tomasz Piotrowski** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej