

GEORADAROWA OCENA KONSTRUKCJI NASYPÓW DROGOWYCH

Stanisław Bacior

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Wiesław Nawrocki

Zakład Badań Nieniszczących w Krakowie

Zbigniew Piasek

Politechnika Krakowska

Streszczenie. W pracy podjęto próbę zastosowania georadaru do badań nasypów drogowych dla wybranego fragmentu autostrady A4 w rejonie Łańcuta. Celem wzmocnienia słabonośnego podłoża gruntowego pod autostradą zastosowano warstwy zagęszczonego tłucznia, określanego w normach branżowych jako „materac”. Projekt budowlany obejmował założenia techniczne dotyczące położenia 50-centymetrowej warstwy podbudowy z tłucznia. Na etapie terenowej realizacji projektu, tłuczeń był wgniatały w grunt rodzimy. W konsekwencji niekorzystne warunki geotechniczne spowodowały zwiększone jego zużycie o około 30%, co spowodowało wzrost kosztów budowy fragmentu autostrady. Na materacu z tłucznia ułożono warstwę nasypu o miąższości od 1,0 do 3,0 m. Weryfikacja zwiększonych kosztów budowy wymagała inwentaryzacji wybranych zakresów powierzchniowych „materaca”. Prezentowane w pracy badania dotyczą określenia parametrów podłoża gruntowego pozwalających na pomiary konstrukcji nasypów drogowych z zastosowaniem aparatury georadarowej. Prace badawcze wykonano na odcinku autostrady A4. Dotyczyły pomiaru grubości warstwy tłucznia wzmacniającej podłoże rodzime.

Słowa kluczowe: budowa autostrady, georadar, wzmocnienie pasa drogowego

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Stanisław Bacior, Katedra Geodezji Rolnej, Katastru i Fotogrametrii, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Balicka 253a, 30-198 Kraków, dr inż. Wiesław Nawrocki, Zakład Badań Nieniszczących w Krakowie, ul. Pod Strzechą 19, 31-352 Kraków, prof. dr hab. Zbigniew Piasek, Zakład Geodezji i Geologii Inżynierskiej Politechniki Krakowskiej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: rmbacior@cyf-kr.edu.pl, zpiasek@pk.edu.pl.

FIZYCZNE METODY ROZPOZNAWANIA PODŁOŻA PRZY POMOCY TECHNIK GEORADAROWYCH

W nieinwazyjnych metodach badań struktury podłoża wykorzystywane są zjawiska związane z rozprzestrzenianiem się fal, które w trakcie przemieszczania się przez niejednorodny ośrodek gruntowy, mogą ulegać odbiciu, załamaniu, interferencji, dyfrakcji, rezonansowi i tłumieniu. Poprawna interpretacja zarejestrowanych zmian fali po przejściu przez badany ośrodek, pozwala na jego rozpoznanie.

Wzbudzenie drgań mechanicznych w ośrodku gruntowym powoduje powstanie przemieszczających się w nim fal poprzez przenoszenie drgań z jednej cząsteczki na drugą, bez ich przesunięcia.

W drganiach elektromagnetycznych nie istnieją cząstki fizyczne, które przenoszą drgania. Rozchodzenie się tego rodzaju fal odbywa się poprzez oddziaływania ładunków elektrycznych i magnetycznych, ulegających periodycznym zmianom. Drgania elektryczne powstają w wyniku ruchu elektronów związanych z przepływem prądu zmiennego przez ośrodek. Rozpatrywane są one nie jako przesunięcie w sensie geometrycznym, lecz wychylenie.

Analizowane fale i ich częstotliwości mogą być zastosowane w badaniach właściwości struktur podpowierzchniowych oraz przy wykrywaniu znajdujących się w nich obiektów.

Pomiary elektrooporowe wykonywane są poprzez doprowadzenie do przepływu prądu elektrycznego w gruncie i pomiar jego oporu. Prąd doprowadza się do podłoża gruntowego poprzez dwie wbite w niego elektrody zasilające. Elektrody podłączone są do źródła prądu zmiennego lub stałego, które dostarczają prąd o znanym natężeniu. Aby wyznaczyć wartość oporu elektrycznego niezbędny jest pomiar napięcia przepływającego w gruncie prądu elektrycznego. Pomiaru dokonuje się z zastosowaniem kolejnych wbitych w grunt elektrod pomiarowych podłączonych do miernika napięcia elektrycznego. Wyniki z pomiarów są podstawą do określenia geoelektrycznych przekrojów gruntu.

Metody sejsmiczne mają zastosowanie do pomiarów geofizycznych, w których wykorzystywane są własności fal sprężystych, wzbudzonych w ośrodku gruntowym. Analizując zmiany prędkości i parametrów fali sprężystej w badanym środowisku, można wnioskować o jego budowie [Fajklewicz 1972].

W metodzie georadarowej wykorzystywane jest zjawisko odbicia przemieszczającej się fali elektromagnetycznej od obiektów i struktur, różniących się wartościami stałej dielektrycznej. Georadar jest urządzeniem pozwalającym na badania i pomiary budowy warstw podłoża gruntowego [Karczewski i Ziętek 1996, Marcak i in. 1996].

Spośród prezentowanych metod jedynie aparatura georadarowa umożliwia wykonanie pomiarów grubości warstw podłoża gruntowego z dokładnością centymetrową, co jest wymagane w realizacji omawianych badań.

METODA GEORADAROWA POMIARU WARSTW WZMACNIAJĄCYCH PODBUDOWĘ NASYPU

Pomiar georadarem polega na przesuwaniu jego anten wzdłuż wyznaczonego profilu. Antena nadawcza i odbiorcza przemieszczane są równocześnie. Z anteny wysyłany jest impuls fali elektromagnetycznej o określonej częstotliwości i amplitudzie. Fala ta odbija się na granicy dwóch ośrodków i powraca do aparatury, gdzie jest elektronicznie przetwarzana i rejestrowana. Impulsy fal wysyłane w trakcie przemieszczeń anteny skanują podłoże i tworzą jego obraz w postaci tzw. echogramu.

Głębokość granicy odbijającej falę oblicza się ze wzoru:

$$D = \frac{c \cdot t}{2\sqrt{\epsilon_r}}, \text{ m} \quad (1)$$

gdzie:

ϵ_r – stała dielektryczna,

t – czas od wysłania do rejestracji odbitego sygnału,

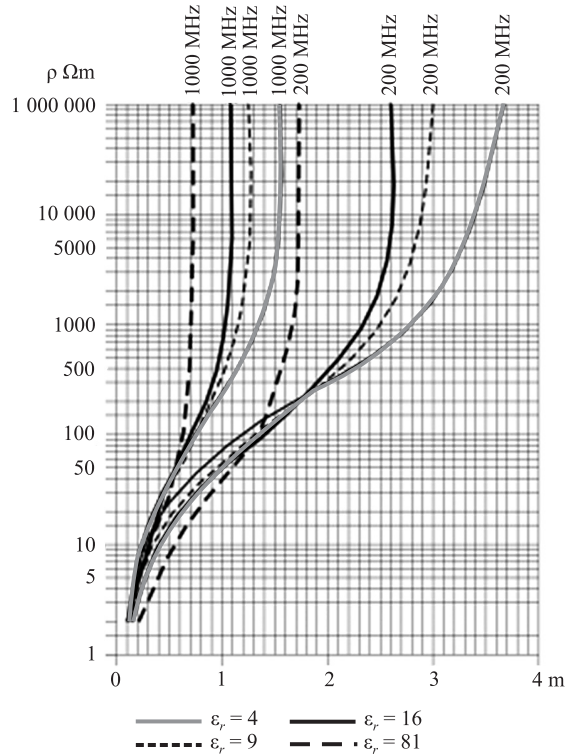
c – prędkość światła.

W ośrodku geologicznym impuls elektromagnetyczny ulega tłumieniu, odbiciu i załamaniu. Tłumienie fali elektromagnetycznej ma podstawowy wpływ na zasięg głębokościowy metody georadarowej i zależy od przewodności ośrodka geologicznego. Im przewodność jest wyższa, tym tłumienie jest większe. Jednym z decydujących parametrów wpływającym na przewodność jest wilgotność ośrodka.

Stała dielektryczna dla większości materiałów, z których zbudowane jest podłoże gruntowe, waha się w granicach od 1 do 88 jednostek. Im większe są różnice w wielkości stałej dielektrycznej między dwoma ośrodkami, tym wyraźniejsza będzie na granicy tych ośrodków zmiana w sposobie rozchodzenia się fali elektromagnetycznej [Ulriksen 1982].

Na rozdzielczość utworzonego obrazu ma wpływ częstotliwość fal elektromagnetycznych i budowa anteny. Im większa jest stosowana częstotliwość fali, tym mniejsze elementy można zarejestrować. Wraz ze wzrostem częstotliwości fali wzrasta jej tłumienie w ośrodku, w którym się rozchodzi, a tym samym maleje głębokość jej penetracji. Na ryc. 1 przedstawiono przykład wpływu oporności ośrodka, jego stałej dielektrycznej i częstotliwości anteny georadaru na głębokość wykrywania obiektu podziemnego [Nawrocki i Piasek 2006].

Zaletą metody georadarowej jest ciągłość pomiarów i szybkość ich wykonywania. W konstrukcji GPR znajdują zastosowanie anteny wysyłające i odbierające fale elektromagnetyczne o szerokim spektrum częstotliwości. Pozwala to na lokalizację obiektów o różnych rozmiarach i położonych na różnych głębokościach.



Ryc. 1. Wpływ oporności ośrodka, jego stałej dielektrycznej na zasięg wykrywania stałego przewodu o średnicy 10 cm

Fig.1. Impact resistance center, the dielectric constant of the detection range of steel wire with a diameter of 10 cm

ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I WSTĘPNE ANALIZY POMIARÓW

W założeniach projektowych przyjęto położenie 50-centymetrowej warstwy podbudowy z tłucznia – „materaca”. W trakcie prac budowlanych tłuczeń był wgniatały w grunt rodzimy. W konsekwencji niekorzystne warunki geotechniczne spowodowały zwiększone zużycie tłucznia o około 30% od zakładanych w projekcie.

Prace badawcze rzeczywistej grubości „materaca” obejmowały wykonanie:

- pomiarów przekrojów poprzecznych wzdłuż zadanego odcinka autostrady (do interpretacji przekrojów uwzględniono pierwotną rzeźbę terenu i rzędne górnej powierzchni „materaca”),
- pomiarów niwelacyjnych powierzchni nasypów w zakresach wybranych przekrojów badawczych,
- badań georadarowych wzdłuż wyznaczonych przekrojów,
- odwiertów kontrolnych w zadanych miejscach autostrady,
- interpretację wyników georadarowych.

Analizy kompleksowe z wykonanych badań terenowych były podstawą do oceny dokładności pomiarów grubości „materaca” oraz wpływu na nią miąższości gruntu nasypowego.

Badania terenowe wykonano na odcinku od km 600+500 do km 600+600 budowanej autostrady.

Testy geotechniczne podłoża wykazały, że gruntami rodzimymi były gliny i gliny pylaste. Na podstawie badań stwierdzono także usunięcie warstwy gleby.

Technika układania „materaca” była zgodna z normami branżowymi w zakresie:

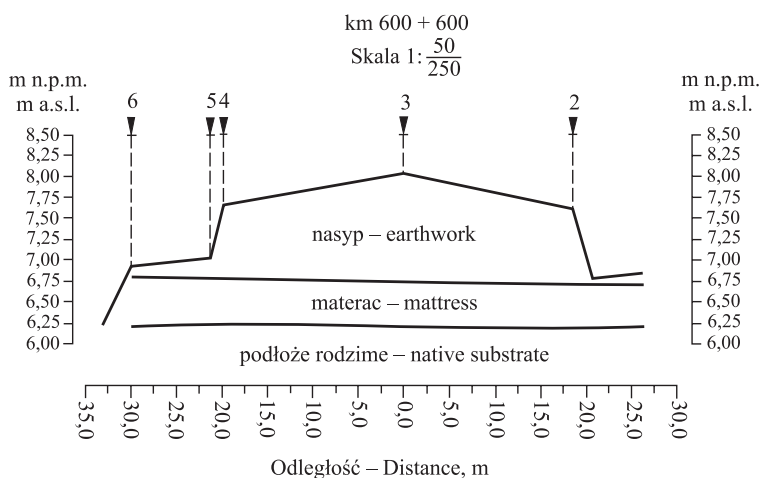
- zniwelowania zadanej powierzchni gruntów,
- ułożenia geowłókniny,
- wielokrotnego nadsypywania walcowanego kruszywa do zaprojektowanego poziomu,
- pokrycia kruszywa geowłókniną.

Na tak wykonanej podbudowie usypano nasypy z gruntów piaszczystych. Miąższość nasypów wynosi od kilkudziesięciu centymetrów do ponad trzech metrów. Z powodu niesprawdzonych dokładnie parametrów gruntowych, „materac” osiągnął grubość do 70 cm, przekraczając założone wartości projektowe.

Zatem analizami objęto także współrzędne przestrzenne XYZ wybranych punktów, pomierzonych na etapie prac budowlanych na powierzchni:

- terenu przed położeniem „materaca”,
- górnej materaca,
- nasypu.

Pomiary terenowe wykonano w przekrojach w odległościach około 25 m oraz w punktach załamań budowanej autostrady. Pomierzone współrzędne XYH stanowiły podstawę wykonania teoretycznych przekrojów warstwowych. Przykładowy przekrój przedstawia ryc. 2. Przekroje nie uwzględniają zwiększonej grubości materaca



2, 3, ..., n – punkty przykładowe wykonanej niwelacji technicznej – sample points made technical leveling

Ryc. 2. Przykład warstwowego przekroju poprzecznego budowanej autostrady

Fig. 2. An example of a layered cross the highway under construction

w miejscach, w których tłuczeń był wciśnięty w podłoże rodzime. Przyjęto, że mogły również wystąpić różnice w rzędnych na powierzchni nasypu, która uległa czasowej erozji.

Z przytoczonego powodu w miejscach zaprojektowanych profili georadarowych wykonano geodezyjne pomiary niwelacyjne powierzchni nasypów oraz przewiertów „materaca”.

GEORADAROWE BADANIA TERENOWE

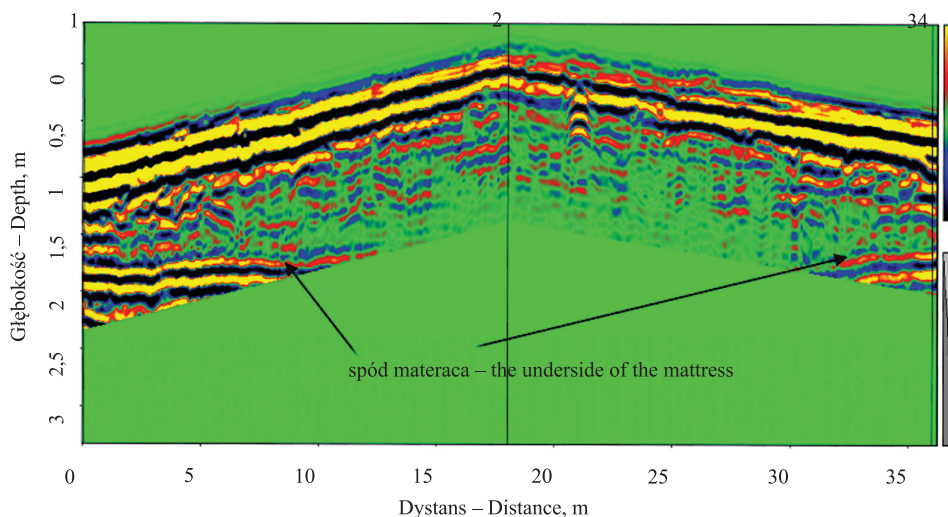
Przytoczone założenia projektowe były podstawą wykonania pięciu profili georadarowych aparaturą ZOND-12e wzdłuż przekrojów poprzecznych: 600.500 km, 600.525 km, 600.550 km, 600.575 km i 600.600 km budowanej autostrady. W pomiarach zastosowano anteny 500 MHz i 300 MHz. Na profilach pomierzono rzędne punktów charakterystycznych. Na skutek prac budowlanych i warunków atmosferycznych (wyplukiwanie gruntu przez wody opadowe) rzędne powierzchni nasypów uległy zmianie w stosunku do rzędnych pomierzonych wcześniej przez wykonawcę autostrady. Dane z niwelacji profili zastosowano do przekształcenia obrazów profili georadaru. Przykładowy obraz przedstawiono na ryc. 3.

Podstawowym parametrem wpływającym na pomiar głębokości georadarem jest wielkość stałej dielektrycznej. Ośrodek gruntowy stanowiły piaski gliniaste i tłuczeń „materaca”. W pracy założono, że na wielkość stałej dielektrycznej znaczący wpływ ma wilgotność ośrodka gruntowego. Badany ośrodek z uwagi na swoje właściwości może łatwo zmieniać swoją wilgotność pod wpływem opadów atmosferycznych.

W oparciu o doświadczenia Autorów przyjęto, że wartości stałych dielektrycznych ϵ_r piasków gliniastych i zagęszczonego tłucznia są podobne. Z wzoru (1) obliczono stałą dielektryczną ϵ_r . W obliczeniach uwzględniono wielkość głębokości D , równą różnicy rzędnych pierwotnej powierzchni terenu i pomierzonej rzędnej nasypu. Wartość t otrzymano z profilu georadarowego. Obliczona stała dielektryczna ϵ_r była równa 4.

W celu oceny dokładności przeprowadzonych pomiarów wykonano odwierty kontrolne do spodu materaca. W sumie wykonano 10 odwiertów, po dwa dla każdego przekroju georadarowego. Dokładność pomiaru głębokości, wymagana w prowadzonych badaniach została określona na minimum 5 cm.

Po analizie pomiarów wykonanych georadarem z anteną o częstotliwości 300 MHz i przyjętym zasięgu głębokościowym 1,5 m stwierdzono, że pomiar głębokości wykonano z dokładnością 5 cm. Następnie poddano analizie profile wykonane anteną 500 MHz i zasięgami głębokościowymi 3 m i 1,5 m (por. ryc. 3). Dla zasięgu głębokościowego 3 m otrzymana dokładność pomiaru głębokości spodu „materaca” była równa około 8–10 cm. Natomiast dla zasięgu głębokościowego 1,5 m dokładność ta wynosiła od 4 cm do 5 cm. Na wszystkich profilach georadarowych głębokość spodu materaca nie przekraczała 1,5 m.



Ryc. 3. Profil georadarowy wykonany anteną o częstotliwości 500 MHz i zasięgu głębokościowym 1,5 m w km 600+525

Fig. 3. Profile georadarowy made antenna with a frequency of 500 MHz and extent of deep 1.5 m in km 600+525

WNIOSKI KOŃCOWE

- Przeprowadzone badania wykazały, że pomiar głębokości spodu materaca z tłucznia znajdującego się pod nasypami drogowymi jest możliwy do wykonania metodą georadarową przy spełnieniu zależności pomiędzy:
 - opornością a stałą dielektryczną ośrodka gruntowego,
 - zasięgami głębokościowymi wykonywanych pomiarów,
 - częstotliwościami anten georadaru [Nawrocki i Piasek 2006].
- Celem uzyskania dokładności pomiaru większej od 5 cm, należy pomiar wykonywać anteną o częstotliwości co najmniej 500 MHz. Zasięg głębokościowy spodu materaca nie może być większy od 1,5 m. Niezbędne jest również wykonywanie odwiertów kontrolnych w celu określenia dokładnej wartości stałej dielektrycznej.
- Metoda georadarowa może być wdrożona przy innych typach nasypów (np. wały).

PIŚMIENNICTWO

- Bacior, S. (2010). The impact of motorway section under construction between the towns of Borek Mały and Boreczek on arable land. *Infrastr. Ecol. Rural Areas*, 3, 5–15.
- Fajkiewicz, Z. (red.) (1972). *Zarys geofizyki stosowanej*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- Karczewski, J., Ziętek, J. (1996). Zastosowanie metody GPR do badania skażeń gruntu węglowodorami. *Nafta i Gaz*, 5.
- Marcak, H., Karczewski, J., Ziętek, J. (1996). Analiza możliwości wykorzystania metod georadarowych do określania zmian ekologicznych w ośrodku geologicznym. *Techn. Poszuk. Geol.*, 2.

- Nawrocki, W., Piasek, Z. (2006). Metody falowe lokalizacji infrastruktury i obiektów podziemnych. Teorie, badania symulowane i eksperymentalne. Monografia 328, Ser. Inżynieria Środowiska, Politechnika Krakowska, Kraków.
- Ulriksen, P. (1982). Application of impulse radar to civil engineering. Department of Engineering Geology, Lund.

GPR ESTIMATION OF ROAD EMBANKMENTS CONSTRUCTION

Abstract. The aim of this study was to determine the ground conditions, which were the basis to determine the thickness of the “mattress” using ground penetrating radar. Project of constructed A4 motorway sector in the area of Łañcut, included technical assumptions, concerning laying of 50 centimeter layer of a broken stone “mattress”, to strengthen the foundation of the road embankment. At the stage of field implementation of the project, the broken stone was driven into the subsoil. As a result, unfavorable geotechnical conditions resulted in increased consumption of crushed stone by about 30%. Thus, an increase in the cost of highway construction occurred. On the broken stone “mattress”, a layer of embankment of thickness from 1.0 to 3.0 m was laid. Verification of the increased cost of construction, required a survey of selected area ranges of “mattress”, of increased thickness.

Key words: motorway construction, ground penetrating radar, reinforcement of roadway

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 11.06.2015

Do cytowań – For citation: Bacior, S., Nawrocki, W., Piasek, Z. (2015). Georadarowa ocena konstrukcji nasypów drogowych. Acta Sci. Pol., Formatio Circumictus, 14(2), 17–24.