

ERT i GPR – geofizyczne metody badań podłoża wykorzystywane w budownictwie liniowym

Maciej Maślakowski¹, Kazimierz Józefiak¹, Karol Brzeziński¹, Małgorzata Superczyńska¹



M. Maślakowski K. Józefiak K. Brzeziński M. Superczyńska

Geophysical methods ERT and GPR of subgrade identification in road and railway engineering. *Prz. Geol.*, 65: 765–771.

Abstract. Correct determination of subgrade layers and properties is fundamental for later design and construction stages. Results obtained using traditional geotechnical tests are always of an overly specific nature – information is only provided in certain points in the field. Number of test points and the accuracy of results' interpretation among them influence the design of an engineering structure foundation, which greatly impacts the

cost of a project. Also, the lack of soil testing or insufficient investigation of soil conditions can be the reason for all kinds of legal claims from contractors which often exceed the whole investment budget by several or even several dozen percent. In order to prevent that situation new directives for geotechnical testing include additional geophysical methods such as electrical resistivity tomography (ERT) and ground penetrating radar (GPR). These non-invasive methods can give a spatial image and thus improve the accuracy of soil strata identification. However, these methods have also disadvantages and inaccuracies related to the measurement principles and interpretation of the results. This paper presents limitations and possible errors of geophysical methods ERT and GPR based on example tests carried out for road and railway engineering structures.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography, ERT, Ground Penetrating Radar, GPR, Geophysical field tests

Zgodnie z europejskimi normami Eurokod, projektowanie konstrukcji budowlanych zaczyna się od rozpoznania warunków gruntowo-wodnych. Często też do projektowania konstrukcji geotechnicznych wykorzystuje się metody numeryczne, które bazują na zaawansowanych modelach matematycznych i wymagają dokładnego określenia parametrów wytrzymałościowych gruntów (Józefiak i in., 2015; Superczyńska i in., 2016). Jednak nadal wykonuje się klasyczne badania geotechniczne (wiercenia i sondowania), na podstawie których określa się rodzaj i właściwości gruntu (Instrukcja badań podłoża gruntowego, 1998).

Wprowadzenie w życie nowych przepisów (Wytucznych badań podłoża gruntowego dla potrzeb budowy i modernizacji infrastruktury kolejowej Igo-1 z 2016 r. oraz Zarządzenia nr 58 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 23 listopada 2015 r. w sprawie dokumentacji do realizacji inwestycji) sprawiło, że klasyczne, punktowe metody badań podłoża budowlanego są teraz uzupełniane badaniami dającymi szerszy, przestrzenny zakres informacji. Są to:

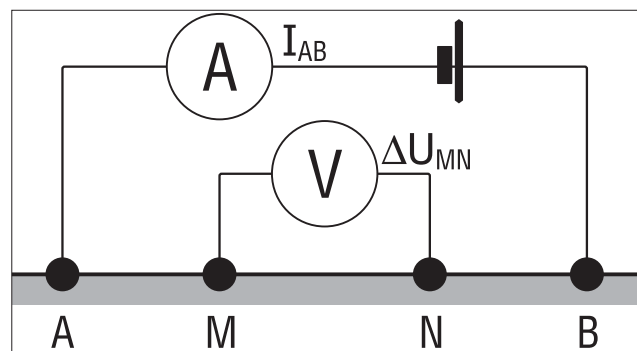
- tomografia elektrooporowa ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) – zgodnie z „Zarządzeniem nr 58 GDDKiA z dnia 23.11.2015 r.” zalecana do stosowania w projektowaniu drogowym;
- badanie georadarem GPR (*Ground Penetrating Radar*) – wedle „Wytucznych badań podłoża gruntowego dla potrzeb budowy i modernizacji infrastruktury kolejowej Igo-1 z 8.01.2015 r.” wymagana do stosowania w projektowaniu kolejowym.

Metody geofizyczne są relatywnie nowymi metodami wykorzystywanymi przez projektantów konstrukcji liniowych. Są nieinwazyjne i dają przestrzenny obraz ośrodka

gruntowego. Niestety, są one obciążone błędami, czego projektanci nie są świadomi. W pracy opisano możliwości stosowania geofizycznych metod ERT i GPR i przedstawiono wyniki badań podłoża dróg oraz linii kolejowych, na podstawie których wyciągnięto wnioski dotyczące zalet i wad metod geofizycznych stosowanych w projektowaniu.

TOMOGRAFIA ELEKTROOPOROWA

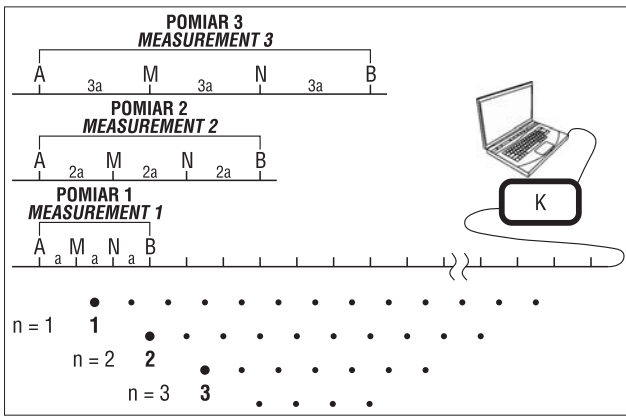
Metoda ERT, zwana inaczej obrazowaniem elektrooporowym, jest połączeniem dwóch klasycznych metod



Ryc. 1. Schemat sondowania elektrooporowego – układ symetryczny Schlumbergera (Stenzel, Szymanko, 1973): I_{AB} – natężenie prądu [A]; ΔU_{MN} – napięcie [V]; A, B, M, N – elektrody zasilające i pomiarowe

Fig. 1. Schematics of electrical resistivity tomography – symmetrical Schlumbergers' array (Stenzel, Szymanko, 1973): I_{AB} – electric current [A]; ΔU_{MN} – voltage [V]; A, B, M, N – measurement and electric current electrodes

¹ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; m.maslakowski@il.pw.edu.pl; k.jozefiak@il.pw.edu.pl; k.brzezinski@il.pw.edu.pl; m.superczynska@il.pw.edu.pl.



↑

Ryc. 3. Układ pomiarowy ERT przygotowany do określenia rozkładu oporności elektrycznej podłoża. Fot. Maciej Maślakowski

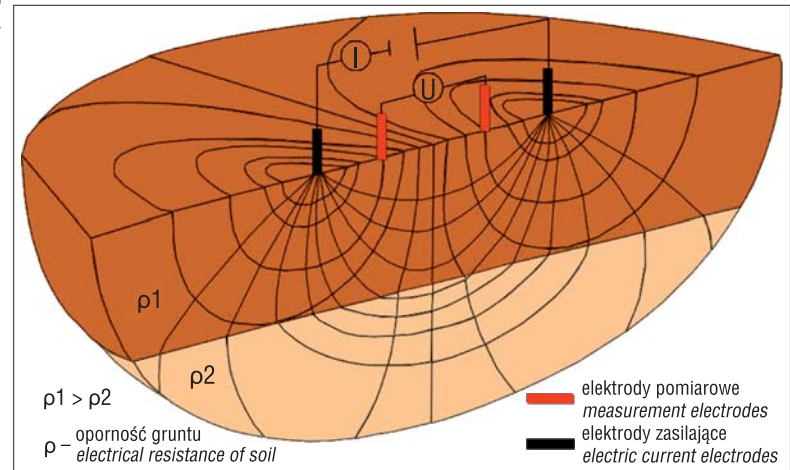
Fig. 3. Array of electrodes prepared for ERT test. Photo by Maciej Maślakowski

geofizycznych: profilowania i sondowania (Samouelian i in., 2005; Loke, 2001). W badaniu tym elektrody są rozmieszczane w gruncie równomiernie wzdłuż profilu (ryc. 1). Aparatura, zgodnie z zaprogramowanym algorytmem, wybiera odpowiednie elektrody, dokonując pomiarów równoważnych serii profilowań (układy o różnych długościach) lub serii sondowań (o punktach odniesienia przesuwających się wzdłuż profilu). W stosunku do klasycznych metod elektrooporowych takie pomiary charakteryzują się 10-krotnie większą wydajnością. Wynikiem pomiarów jest dwu- lub trójwymiarowy przekrój opornościowy (Maślakowski i in., 2014).

→

Ryc. 5. Urządzenie do pomiarów elektrooporowych Terrameter LS (szwedzkiej firmy ABEM). Fot. Maciej Maślakowski

Fig. 5. Terrameter LS used to carry out ERT measurements, produced by the Swedish company ABEM. Photo by Maciej Maślakowski



Ryc. 4. Wizualizacja badania geoelektrycznego gruntu (Archie, 1942)

Fig. 4. Visualization of ERT method (Archie, 1942)



←

Ryc. 2. Schemat układu pomiarowego ERT (Loke, 2001): n = 1, n = 2, n = 3 (1, 2, 3) – kolejne cykle pomiarowe. Pozostałe objaśnienia jak pod ryciną 1

Fig. 2. Schematics of ERT test (Loke, 2001): n = 1, n = 2, n = 3 (1, 2, 3) – consecutive measurement series. Other explanations under figure 1

Pojedyncze sondowania geoelektryczne pozwalają uzyskać charakterystykę elektryczną ośrodka gruntowego w pionie i poziomie, przy założeniu dużej liczby punktów pomiarowych (por. ryc. 1). Oporność pozorną jest obliczana z wzoru:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad [1]$$

gdzie:

ρ – oporność pozorną [Ωm],

ΔV – różnica potencjałów pomiędzy elektrodami M i N [V],

I – natężenie prądu [A],

k – współczynnik geometryczny [-].

W badaniu tomografem liczba punktów pomiarowych jest kilkadziesiąt lub nawet kilkaset razy większa, co daje kilkuwymiarowy efekt końcowy w postaci przekrojów (ryc. 2).

W celu przeprowadzenia pomiaru umieszcza się na powierzchni terenu elektrody prądowe AB i elektrody pomiarowe MN (ryc. 3). Badanie polega na pomiarze różnicy oporności pozornych następujących po sobie warstw skalnych. Wraz ze wzrostem rozpiętości obwodu elektrycznego utworzonego przez grunt i instalację, można

objąć badaniami kolejne warstwy skalne, leżące coraz głębiej pod powierzchnią ziemi. Wyniki badań są odnoszone do środkowego punktu pomiędzy elektrodami (ryc. 4). Ukazują one różnice wartości oporności właściwej (ρ_p) warstw skalnych, przez co umożliwiają rozpoznanie ich układu przestrzennego i litologii.

PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ TOMOGRAFEM ELEKTROOPOROWYM

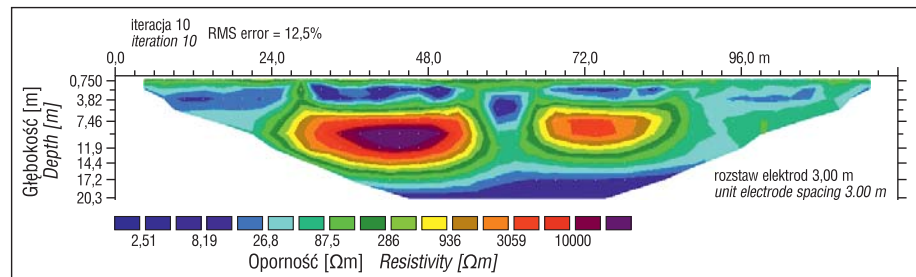
Pomiary ERT wykonano przy nowym Węzle Opacz na trasie S8 w okolicach Warszawy, z zastosowaniem zestawu Terrameter LS szwedzkiej firmy ABEM (ryc. 5), w rozstawie elektrod co 3 m. Przetwarzanie wyników pomiarów ERT prowadzono za pomocą licencjonowanego programu Res2DINV. W każdym profilu pomiarowym zastosowano układ 41 elektrod. W takiej konfiguracji systemu pomiarowego uzyskano prospekcję do ok. 20 m p.p.t. W celu porównania uzyskanych wartości oporności gruntu pomiary wykonano w układach Schlumbergera oraz gradientowym (ryc. 6–9). W profilu 1 w układzie Schlumbergera i gradientowym uzyskano podobny rozkład

oporności rzeczywistej. Na przekrojach wyraźnie dominują dwa pola o dużej oporności, rzędu 7000–10000 Ωm (ryc. 6–7). Pochodzą one od zakopanych dwóch przewodów kanalizacyjnych, przecinających profil. Oporność przewodów jest na tyle duża, że bardzo utrudnia interpretację pod kątem rozpoznania warunków gruntowych. Na podstawie wyników pomiarów dokonanych w układzie Schlumbergera na całej długości profilu 1 wyznaczono granicę spągu nasypów drogowych utworzonych z gruntów sypkich, natomiast wyniki pomiarów wykonanych w układzie gradientowym (ryc. 7) tylko na niewielkich odcinkach profilu umożliwiły wykreślenie spągu nasypów. W profilu 2 wyniki pomiarów oporności rzeczywistej gruntów w układzie Schlumbergera oraz gradientowym różnią się pod względem wartości oporności (ryc. 8–9), jednak można na ich podstawie dokonać interpretacji warunków gruntowych, ponieważ w profilu tym nie występują elementy infrastruktury technicznej (ryc. 8).

Przekroje ERT zinterpretowano w dowiązaniu do danych geologicznych uzyskanych od wykonawcy (ryc. 10–13). Wyniki badań ERT można także prezentować w formie diagramów 3D (ryc. 14).

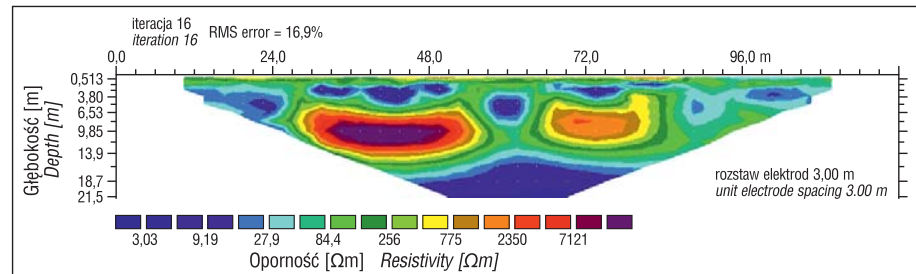
Ryc. 6. Rozkład oporności rzeczywistej w profilu 1, układ Schlumbergera w rozstawie elektrod co 3 m

Fig. 6. Contours of true electrical resistivity in section no. 1, Schlumberger's array for the electrode spacing of 3 m



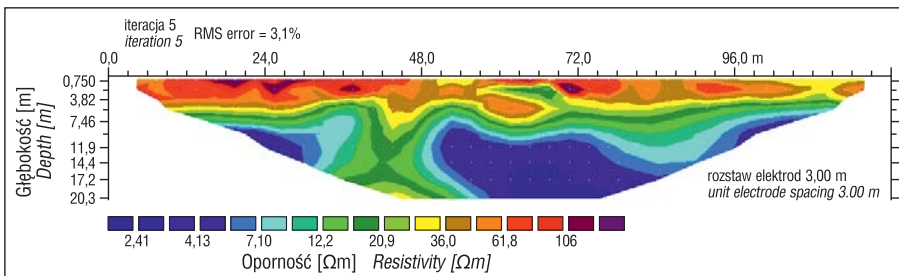
Ryc. 7. Rozkład oporności rzeczywistej profilu 1, układ gradientowy w rozstawie elektrod co 3 m

Fig. 7. Contours of true electrical resistivity in section no. 1, gradient array for the electrode spacing of 3 m



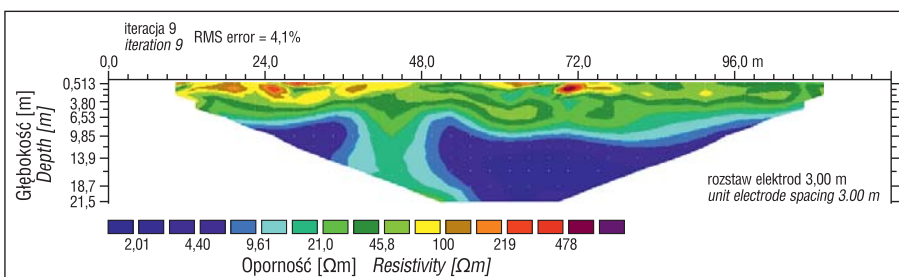
Ryc. 8. Rozkład oporności rzeczywistej w profilu 2, układ Schlumbergera w rozstawie elektrod co 3 m

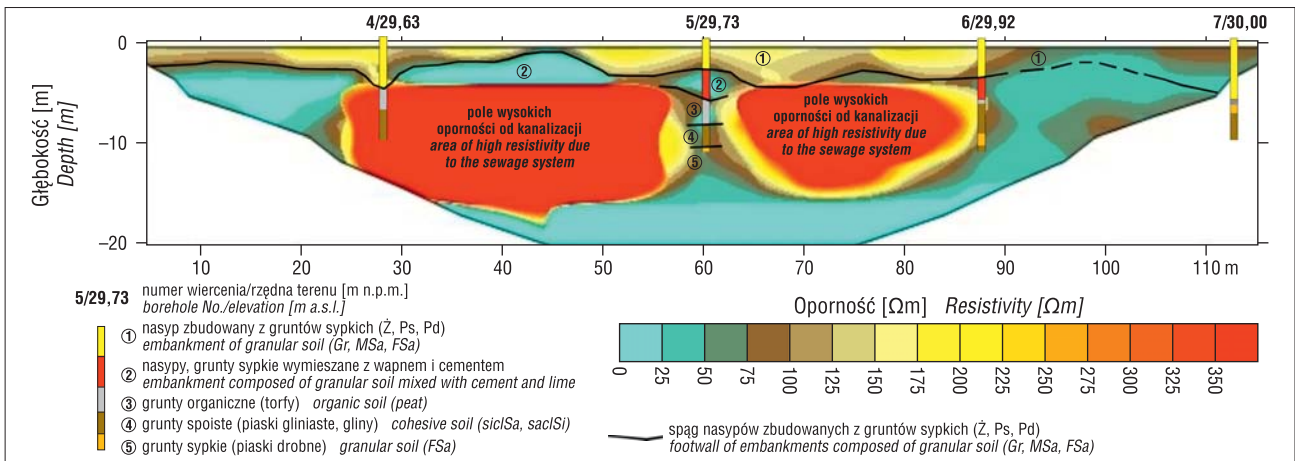
Fig. 8. Contours of true electrical resistivity in section no. 2, Schlumberger's array for the electrode spacing of 3 m



Ryc. 9. Rozkład oporności rzeczywistej w profilu 2, układ gradientowy w rozstawie elektrod co 3 m

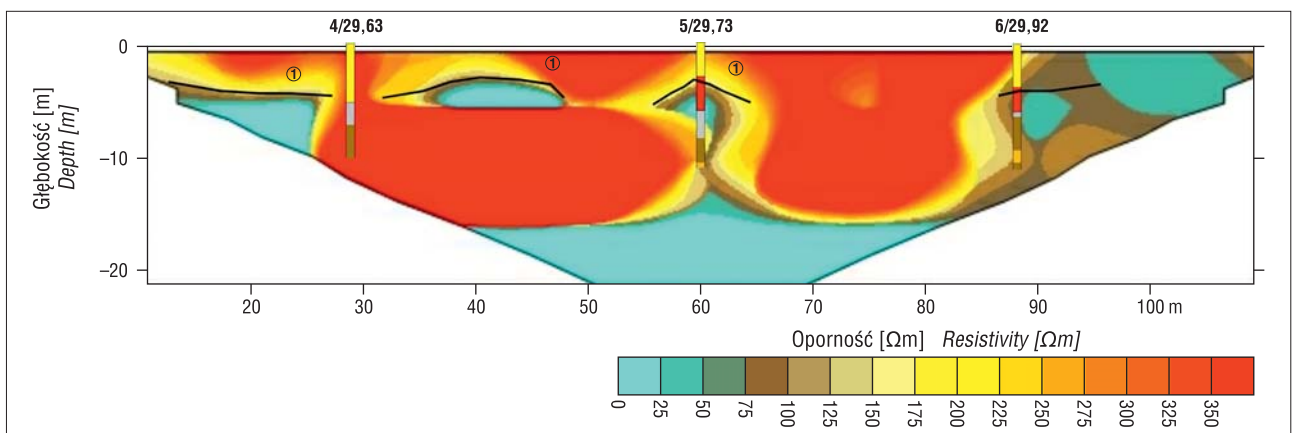
Fig. 9. Contours of true electrical resistivity in section no. 2, gradient array for the electrode spacing of 3 m





Ryc. 10. Interpretacja profilu 1 (układ Schlumbergera)

Fig. 10. Geoelectrical section no. 1 after geotechnical interpretation of ERT data (Schlumberger's array)

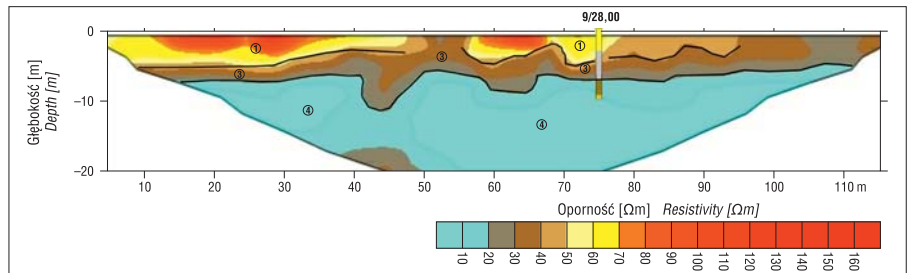


Ryc. 11. Interpretacja profilu 1 (układ gradientowy). Objasnienia jak na ryc. 10

Fig. 11. Geoelectrical section no. 1 after geotechnical interpretation of ERT data (gradient array). Symbols as in Fig. 10

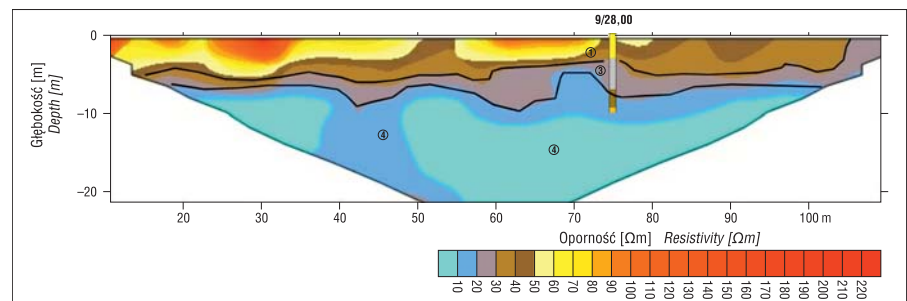
Ryc. 12. Interpretacja profilu 2 (układ Schlumbergera). Objasnienia jak na ryc. 10

Fig. 12. Geoelectrical section no. 2 after geotechnical interpretation of ERT data (Schlumberger's array). Symbols as in Fig. 10



Ryc. 13. Interpretacja profilu 2 (układ gradientowy). Objasnienia jak na ryc. 10

Fig. 13. Geoelectrical section no. 2 after geotechnical interpretation of ERT data (gradient array). Symbols as in Fig. 10

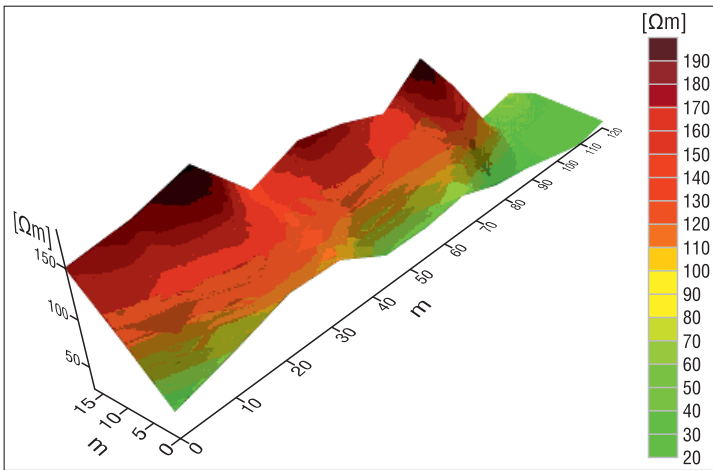


METODA GPR

Metoda GPR (*Ground Penetrating Radar*) jest wysoce rozdzielczą, mobilną metodą geofizyczną, dostarczającą informacji o istnieniu, przebiegu oraz wzajemnym rozkładzie struktur i obiektów pod powierzchnią ziemi. Stosując tę metodę można przedstawić w sposób graficzny

strukturę badanego ośrodka, wraz z całą infrastrukturą podziemną.

Interpretacja uzyskanych danych umożliwia szacunkowe określenie głębokości, wielkości i kształtu znajdujących się pod ziemią obiektów, a także w przybliżeniu materiału, z którego zostały wykonane. Badania georadarowe są metodą bezinwazyjną dla środowiska naturalnego.



Ryc. 14. Interpretacja wyników badań ERT nasypów drogowych k. Opacza w formie diagramu 3D

Fig. 14. Interpretation of ERT data road embankments near Opacz as a 3D contour plot

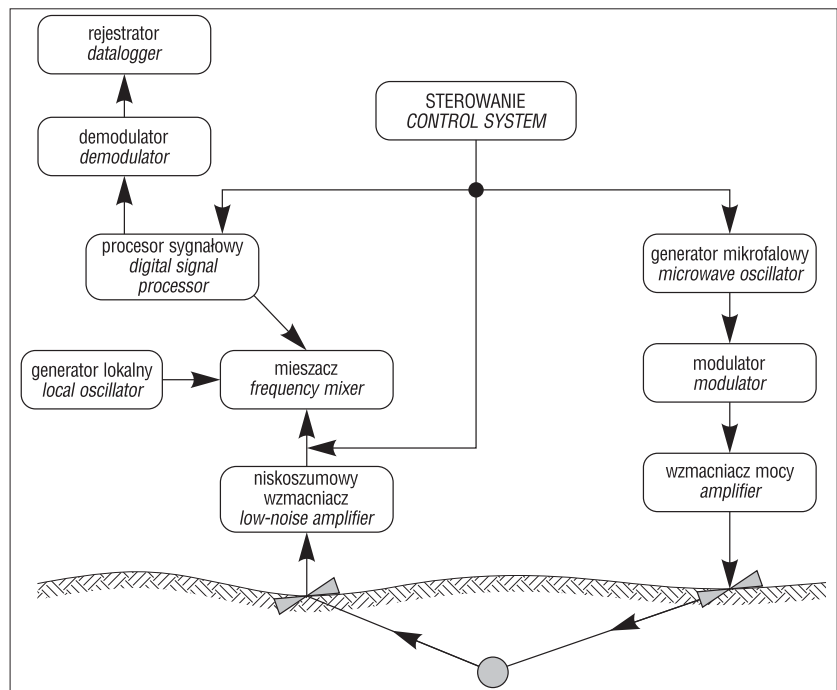
Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku determinują wartości stałej elektrycznej ośrodka oraz jego przewodność. Właściwe określenie prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku umożliwia poprawne ustalenie skali głębokościowej pomiarów. Inną ważną wielkością, którą należy brać pod uwagę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

Uzyskanie prawidłowych wyników badań georadarowych zależy od właściwości środowiska propagacji i częstotliwości emitowanej fali. Im większy kontrast wartości stałych dielektrycznych, tym większa wartość współczynnika odbicia, przez co większa wartość amplitudy powracającej w kierunku

Idea badań geofizycznych z użyciem systemów georadarowych opiera się na zjawisku odbicia fal elektromagnetycznych o wysokich częstotliwościach. Badanie polega na emisji fal elektromagnetycznych w głąb ośrodka materialnego i rejestracji sygnałów odbitych na granicy tworzących go ośrodków o różnych parametrach elektrycznych (Jol, 2009; Karczewski i in., 2011). Odbite fale są odbierane przez antenę odbiorczą i archiwizowane za pomocą odpowiednio skonfigurowanych systemów rejestracji. Emisja i odbiór fal są prowadzone impulsowo (ryc. 15).



Ryc. 15. Schemat blokowy georadaru impulsowego (Karczewski i in., 2011)
Fig. 15. Flowchart of an impulse georadar (Karczewski et al., 2011)



Ryc. 16. Georadar Ground Explorer firmy MALA. Fot. M. Maślakowski

Fig. 16. Geo-radar Ground Explorer produced by the MALA. Photo by M. Maślakowski



Ryc. 17. Sposób mocowania georadaru na drezynie. Fot. M. Maślakowski

Fig. 17. Geo-radar attached to a draisine. Photo by M. Maślakowski

anteny odbiorczej georadaru. Na tłumienie fali elektromagnetycznej w ośrodku skalnym wpływa częstotliwość fali oraz przewodność ośrodka. Przewodność ośrodka wzrasta wraz ze wzrostem głębokości, wilgotności, porowatości, zasolenia i temperatury. Im mniejsza jest oporność elektryczna gruntu, tym mniejszy zasięg głębokościowy badania. W skrajnie niekorzystnych warunkach geologicznych, tzn. podczas badań gruntów niskooporowych (mięszce warstwy glin, ilów, namulów), tłumienie fali elektromagnetycznej może być tak duże, że zasięg głębokościowy prospekcji może się zmniejszyć do kilku metrów, a nawet kilkunastu centymetrów. W takich przypadkach nawet użycie anten o bardzo niskich częstotliwościach emitowanej fali (25, 50, 100 MHz) nie powoduje znaczącego wzrostu głębokości prospekcji.

Zestaw do badań GPR składa się z dwóch anten (nadawczej i odbiorczej), centralnej jednostki sterującej sygnałem i rejestratora, którym jest komputer typu laptop. Jednostka centralna generuje sygnały kontrolne, steruje zegarem nadajnika i odbiornika oraz częstotliwością próbkowania i zapisem danych. Sygnały kontrolne są przekazywane do anteny nadawczej, 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 w większym. 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).

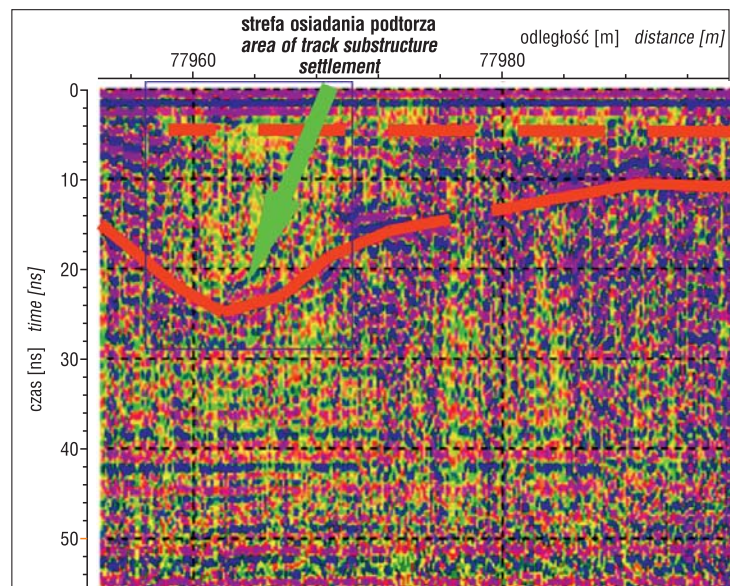
W pomiarach polegających na przesświetlaniu obiektu odbierana jest fala docierająca bezpośrednio poprzez struktury. Odbiornik z zadaną przez operatora częstotliwością próbkuje sygnał otrzymany z anteny odbiorczej, a następnie zamienia go na postać cyfrową o 8- lub 16-bitowej wartości całkowitej. W ten sposób powstaje próbka numeryczna. Wartość numeryczna pojedynczej próbki reprezentuje chwilową wartość amplitudy odebranego sygnału. Odbiór oraz próbkowanie pojedynczego impulsu elektromagnetycznego, wyemitowanego w głąb ośrodka, są wykonywane w zdefiniowanym przez operatora czasie, tzw. oknie czasowym. Aparatura rejestruje czas odbioru oraz wartość pojedynczej próbki. Grupa próbek zarejestrowanych w oknie czasowym tworzy ślad georadarowy – tzw. trace. Rejestracja kolejnych śladów tworzy obraz georadarowy – tzw. radargram. Radargram wygene-

rowany w wyniku przesuwu anten georadarowych po linii profilowej ukazuje 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.

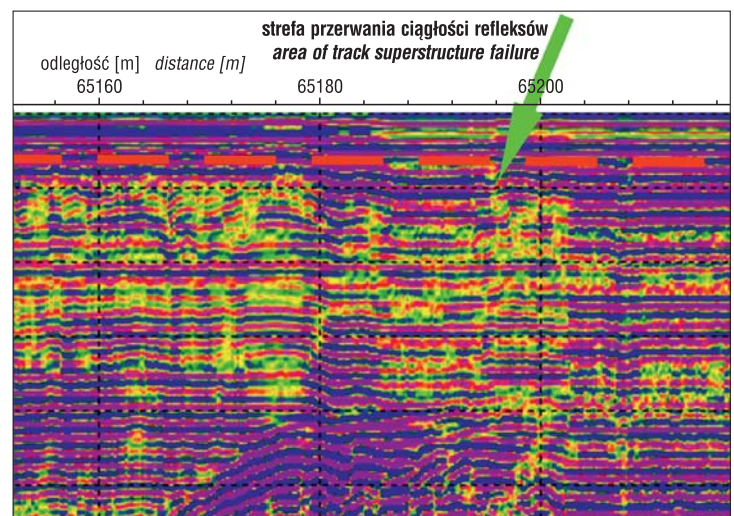
PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ GEORADAREM

W celu wzmocnienia sygnału fali elektromagnetycznej oraz usunięcia zakłóceń, uzyskane w terenie wyniki pomiarów georadarowych (echogramów) przetwarzano i zinterpretowano za pomocą programu ReflexW (Sandmeier Co.). W interpretacji wyników pomiarów georadarowych zwracano uwagę na:



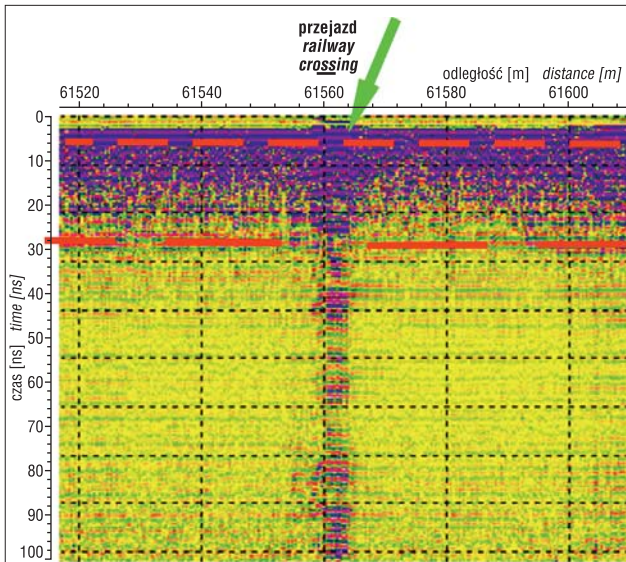
Ryc. 18. Fragment echogramu georadarowego z zaznaczoną strefą osiadania podtorza (wskazanie zieloną strzałką)

Fig. 18. Part of GPR radargram with the indicated area of track substructure settlement

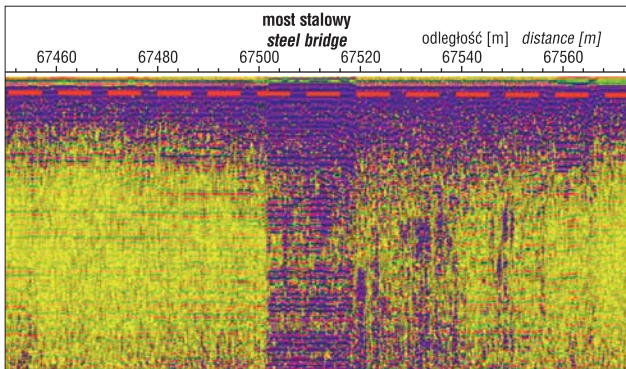


Ryc. 19. Fragment echogramu georadarowego z zaznaczoną strefą przerwania ciągłości refleksów, wskazującą na osłabienie podtorza na gruntach słabonośnych

Fig. 19. Part of GPR radargram with the indicated area of track superstructure failure



Ryc. 20. Zakłócenia od żelbetowych przejazdów przez tory
Fig. 20. Interference caused by a railway crossing



Ryc. 21. Zaburzenia fal elektromagnetycznych od stalowych mostów
Fig. 21. Interference caused by steel bridges

- osiadanie warstw podtorza (ryc. 18);
- przerwanie ciągłości refleksów – wskazujące na osłabienie podtorza na gruntach słabonośnych (ryc. 19);
- zakłócenia od żelbetowych przejazdów (ryc. 20);
- zakłócenia od konstrukcji stalowych mostów (ryc. 21).

PODSUMOWANIE

Badania geofizyczne ERT i GPR są stosowane jako metody uzupełniające konwencjonalne badania geologiczno-inżynierskie i geotechniczne. Ich celem jest weryfikacja informacji uzyskanych z wierceń oraz sprawdzenie warunków gruntowych pomiędzy wykonanymi otworami (Bestyński, 2011; Białostocki, Farbiasz, 2007).

Interpretacja wyników badań ERT i GPR nie jest, niestety, jednoznaczna. Anomalie geofizyczne nie muszą się pokrywać z faktycznymi problemami. Wskazanie miejsc występowania realnych dysfunkcji nie jest proste. Ukazują to przedstawione w artykule przykłady, np. tłumienia sygnału georadarowego, sprawiające, że skuteczność metody GPR w rozpoznawaniu warunków gruntowych szacuje się na około 50%. To bardzo duży, niedopuszczalny wręcz błąd.

Stosowanie metody ERT ograniczają zakłócenia obrazu powodowane przez obiekty infrastruktury podziemnej. Poza rozpoznaniem w miarę dokładnych granic poszczególnych wydzielen nie otrzymujemy żadnych szczegółowych informacji o gruncie, takich jak dokładny skład mineralogiczny czy też jego stan fizyczny.

Metody geofizyczne otwierają szerokie możliwości ich zastosowania (Archie, 1942; Loke, 2001; Maślakowski i in., 2014, 2015). W przyszłości nieinwazyjne metody geofizyczne mogą się stać równie wiarygodne jak metody geotechniczne, lecz wymaga to wielu badań poprawiających skuteczność i trafność interpretacji uzyskiwanych wyników.

Pragniemy podziękować Szanownym Recenzentom, Profesorowi Piotrowi Tuchołce oraz Doktorowi Radosławowi Mieszkowskiemu, za pozytywne zaopiniowanie naszego artykułu. Wnikliwe uwagi, sugestie i pytania, zawarte w recenzjach, były dla nas motywacją do ponownego, krytycznego spojrzenia na otrzymane wyniki badań. Projekt „Nowoczesne metody rozpoznawania podłoża gruntowego w drogownictwie” jest finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Skarb Państwa – Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach wspólnego przedsięwzięcia RID.

LITERATURA

- ARCHIE G.E. 1942 – The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME* 146, DOI:10.2118/942054-G.
- BESTYŃSKI Z. 2011 – Metody geofizyczne w geologii inżynierskiej. Współczesne problemy geologii inżynierskiej w Polsce. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 175–183.
- BIAŁOSTOCKI R., FARBISZ J. 2007 – Badania geoelektryczne – elektrooporowe. Stan aktualny i możliwości wykorzystania wyników. *Biul. Inf. Geofizyka*, 5: 28–41.
- JOL H.M. 2009 – *Ground Penetrating Radar: Theory and Application*, 1st ed., Elsevier.
- INSTRUKCJA badań podłoża gruntowego 1998 – Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa.
- JÓZEFIAK K., ZBICIAK A., MAŚLAKOWSKI M., PIOTROWSKI T. 2015 – Numerical Modelling and Bearing Capacity Analysis of Pile Foundation. *Proced. Engineering*, 111: 356–363. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.101.
- KARCZEWSKI J., ORTYL Ł., PASTERNAK M. 2011 – Zarys metody georadarowej. AGH, Kraków, wyd. II popr. i rozw.
- LOKE M.H. 2001 – *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys: RES2DINV Manual*, www.geoelectrical.com.
- MAŚLAKOWSKI M., KOWALCZYK S., MIESZKOWSKI R., JÓZEFIAK K. 2014 – Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) as a tool in geotechnical investigation of the substrate of highway. *Stud. Quatern.*, 31 (2): 83–89.
- MAŚLAKOWSKI M., ZBICIAK A., JÓZEFIAK K. 2015 – Tomografia elektrooporowa jako skuteczna metoda rozpoznawania nasypów antropogenicznych w warunkach budowy odcinka drogi S8 w okolicy Warszawy. *Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów*, 4: 4792–4799.
- PN-EN 1997-1-2008 – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.
- SAMOUELIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUAND A., RICHARD G. 2005 – Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Elsevier, Soil & Tillage Res.*, 83: 173–193.
- STENZEL P., SZYMANKO J. 1973 – *Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich*. Wyd. Geol., Warszawa.
- SUPERZYŃSKA M., JÓZEFIAK K., ZBICIAK A. 2016 – Numerical Analysis of Diaphragm Wall Model Executed in Poznań Clay Formation Applying Selected Fem Codes. *Arch. Civil Engin.*, 62 (3): 207–224.
- Wytyczne badania podłoża gruntowego dla potrzeb budowy i modernizacji infrastruktury kolejowej Igo-1 – Załącznik do uchwały nr 760/2016 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 9 sierpnia 2016 r.
- WYTYCZNE badań podłoża gruntowego dla potrzeb budowy i modernizacji infrastruktury kolejowej Igo-1, PKP PLK S.A., 2016, Warszawa.
- ZARZĄDZENIE nr 58 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 23 listopada 2015 r.