

Zastosowanie badań konduktometrycznych z użyciem inwersji 1D, jako narzędzia do kartowania przestrzennego przypowierzchniowych warstw geologicznych

Paweł Czarniak¹, Grzegorz Pacanowski¹, Przemysław Sobótka¹



P. Czarniak



G. Pacanowski



P. Sobótka

Application of ground conductivity meter data for mapping of geological subsurface layers with the use of 1D inversion. *Prz. Geol.*, 65: 803–810.

Abstract. This article presents the results obtained from geophysical measurements as a supplement to and refinement of geological information obtained from engineering geological studies for the newly constructed highways. The research was conducted using two geophysical methods: Ground Conductivity Meters (GCM) and Electrical Resistivity Tomography (ERT). The above measurements were made on three research fields located along the planned express road S-19 (Kraśnik–Janów Lubelski section). These areas were selected due to the large amount of available

archival data and varied geological conditions. The publication focuses primarily on the presentation of the results obtained using the very fast and extremely efficient GCM method. By processing GCM data, using Laterally Constrained Inversion (LCI) and Spatially Constrained Inversion (SCI) algorithms, the values of electrical resistivity of the surveyed centers were derived. The results are presented in the form of cross-sections and maps of electrical resistivity from different depths, which were collated and compared with the results from another geophysical method, ERT. These examples show that the use of inversion has a significant impact on the refinement of geological boundaries between layers of different electrical resistivities. Thanks to the correlation of geophysical data with boreholes and engineering geological probes, detailed models of the geological structure of the analyzed areas were elaborated, which are necessary for the selection of appropriate solutions for the construction and modernization of road infrastructure.

Keywords: Ground Conductivity Meters (GCM), Electrical Resistivity Tomography (ERT), RID, 1D inversion

Badania geofizyczne znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie zarówno podczas wstępnego rozpoznawania budowy geologicznej, jak i na etapie jej uszczegółowienia. Wszechstronność metod geofizycznych wynika niewątpliwie z kilku elementów, m.in. bezinwazyjności, ciągłego rozpoznania, szybkości akwizycji, stosunkowo taniego kosztu wykonania badań, a także dostępności coraz większej liczby metod badawczych. Wykorzystuje się je w wielu dziedzinach geologii, hydrogeologii oraz budownictwa. Do prac związanych z rozpoznaniem geologii na potrzeby budownictwa drogowego są preferowane metody geofizyczne. Dzięki nim można w szybki i wiarygodny sposób zobrazować budowę geologiczną, do kilkudziesięciu metrów, już na wczesnym etapie badań podłoża gruntowego. Predysponowane są tu zwłaszcza metody umożliwiające rozpoznanie litologii: tomografia elektrooporowa (ERT) i wielopoziomowe profilowania konduktometryczne (GCM).

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów geofizycznych, które są uzupełnieniem i uszczegółowieniem informacji geologicznej, uzyskanej w trakcie badań geologiczno-inżynierskich, dla nowo budowanych dróg szybkiego ruchu. Zaprezentowano przykład zastosowania dwóch metod geofizycznych: wielopoziomowych profilowań konduktometrycznych (GCM) i tomografii elektrooporowej (ERT). Otrzymane wyniki porównano ze sobą, przy jednoczesnej korelacji z informacją geologiczną uzyskaną z wierceń archiwalnych.

CEL BADAŃ

Profilowania konduktometryczne są stosowane w Polsce już od wielu lat do różnych celów, o czym świadczą liczne opracowania i publikacje (Mutke, Chodacki, 2005; Wójcicki i in., 2006; Gołębiowski i in., 2012; Cygal i in., 2015). W ostatnich latach metoda ta została mocno rozwinięta. Przyczyniła się do tego możliwość jednoczesnych pomiarów na wielu poziomach, a także stosowanie coraz wyższej klasy odbiorników GPS, montowanych bezpośrednio w aparaturze. Te dwa elementy, w połączeniu z możliwością automatycznych pomiarów z wyzwalaniem czasowym, umożliwiają efektywną czasowo akwizycję danych terenowych, z zagęszczeniem 0–2,0 m, na kilku głębokościach jednocześnie.

Niniejszy artykuł ma na celu porównanie wyników otrzymanych z badań konduktometrycznych z rezultatami badań otrzymanych z tomografii elektrooporowej, a także sprawdzenie, czy i jak dokładnie odzwierciedlają one litologię badanych obszarów.

Otwiera to nowe perspektywy dla szybkiego rozpoznania budowy geologicznej na inwestycjach liniowych. Również ciągły postęp w technikach modelowania matematycznego, w zestawieniu z zaawansowanymi systemami inwersji 1D i 2D, pozwala na uzyskanie coraz dokładniejszego obrazu rozkładu oporności właściwej warstw geologicznych.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; pawel.czarniak@pgi.gov.pl, grzegorz.pacanowski@pgi.gov, przemyslaw.sobotka@pgi.gov.pl.

METODYKA BADAŃ I ZAŁOŻENIA DO POLIGONÓW

Dla realizacji celu badań wykonano pomiaru polowe dla trzech wytypowanych poligonów testowych, zlokalizowanych wzdłuż planowanej drogi S-19 (odcinek Kraśnik–Janów Lubelski–Nisko): 3-S19-1, 3-S19-3 oraz 3-S19-4 (ryc. 1). Ze względu na trudne warunki (zalanie terenu wiosną 2017) nie udało się wykonać zaplanowanych prac na poligonie 3-S19-2 (w Modliborzycach).

Metodyka prac prowadzonych na wyżej wymienionych obszarach prezentowała się następująco: najpierw wykonano pomiary metodą tomografii elektrooporowej na prostoliniowym odcinku o długości 200 m, a następnie wzdłuż tego samego odcinka przeprowadzono wielopoziomowe profilowania konduktometryczne o długości 200–240 m. Dodatkowo wykonano kilka równoległych profili konduktometrycznych przesuniętych względem siebie o 10 m (ryc. 2). W miejscach badań geofizycznych znajdowały się archiwalne otwory geologiczne, wykonywane w ramach prac pod projektowaną drogę S19.

BUDOWA GEOLOGICZNA I WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE OBSZARU POLIGONU TESTOWEGO

Obszar poligonów zlokalizowanych wzdłuż projektowanej trasy S19 znajduje się na progu środkowopolskim, wchodzącym w skład Niecki Lubelskiej. Struktura ta odgranicza platformę paleozoiczną od zapadliska przedkarpacciego. W dość złożonej budowie geologicznej obszaru badań biorą udział utwory kredy górnej, neogenu i czwartorzęd. Kredę górną (santon, kampan i mastrycht) reprezentują wapienie, margle i opoki. W neogenie występują jedynie osady miocenu w postaci wapieni, margli oraz iłów krakowieckich przewarstwionych mułkami i piaskami. Miejscami miocenijskie ropy krakowieckie zalegają bezpośrednio na utworach kambry. Czwartorzędowe, przypowierzchniowe partie podłoża charakteryzują się znaczną zmiennością w wykształceniu oraz właściwościach fizyczno-mechanicznych. Na wysoczyznach lessowych podłoża drogi będą stanowić przewarstwiane się wzajemnie spoiste i niespoiste warstwy lessów i utworów lessopodobnych, poniżej których występują zwiertzeliny gliniaste i gruzowo-gliniaste oraz noeogęńskie i kredowe skały macierzyste (wapienie, margle i opoki). Na wysoczyznach polodowcowych podłoża stanowią wzajemnie przewarstwiane się grunty spoiste polodowcowe (gliny zwałowe) oraz grunty niespoiste – piaski polodowcowe i wodnolodowcowe nierozdzielone. W rejonach dolin rzecznych występują serie naprzemiennie występujących piasków rzecznych oraz holocenijskich i plejstocenijskich mad rzecznych. Lokalnie, głównie w rejonie cieków powierzchniowych i zagłębień terenu, stwierdza się występowanie gruntów organicznych wykształconych w postaci namulów i torfów.

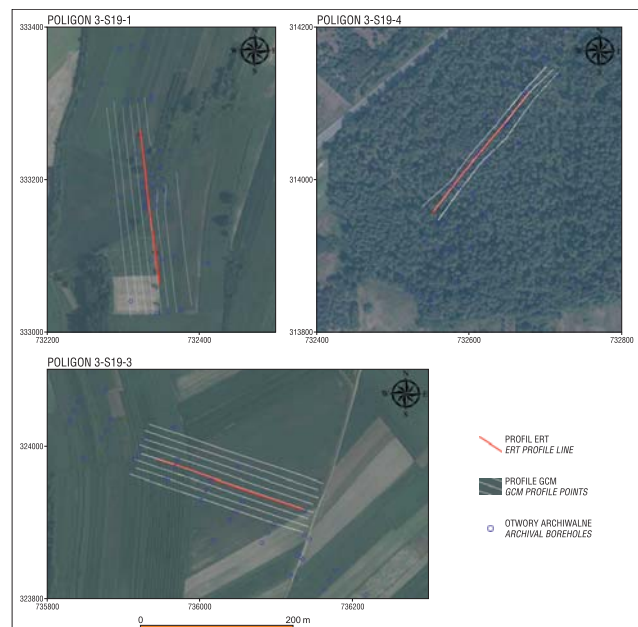
Na omawianym obszarze występują następujące piętra wodonośne:

- górnokredowe piętro wodonośne – główny użytkowy poziom wód podziemnych występuje w marglach, opokach



Ryc. 1. Mapa lokalizacji poligonów testowych na projektowanej trasie S19 Lublin–Rzeszów

Fig. 1. Site map of test polygons on the planned S19 Lublin–Rzeszów expressway



Ryc. 2. Mapy lokalizacji poligonów testowych wraz z przebiegiem profili ERT i GCM

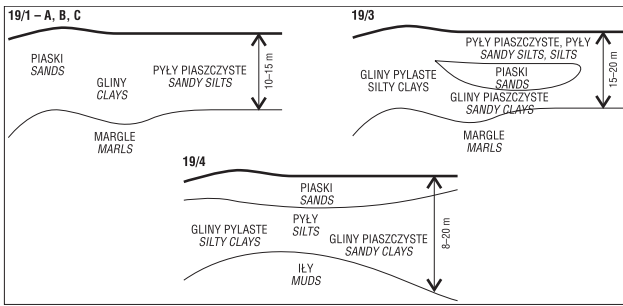
Fig. 2. Site map of test polygons along with ERT and GCM profiles

- wapieniach santonu, kampanu i mastrychtu; zwierciadło wody poziomego użytkowego zalega na głębokościach od ok. 2 m w dolinach rzek do ok. 75 m na wyniesieniach; poziom zasilany głównie infiltracją opadów atmosferycznych;

- neogęńskie piętro wodonośne – w dużej części obszaru badań łączy się z wodami piętra górnokredowego, zbiornik szczelinowo-krasowy o napiętym zwierciadle wód podziemnych, występujący na głębokości od 5 do 50 m p.p.t.;

- czwartorzędowe piętro wodonośne – stanowią je piaski i żwiry rzeczne zalegające na łożach krakowieckich; charakteryzuje się niewielką miąższością oraz brakiem izolacji i najczęściej występuje na głębokościach do 15 m p.p.t.;

Woda gruntowa występuje głównie w holocenijskich i plejstocenijskich utworach rzecznych i piaskach wodnolodowcowych oraz lokalnie w niespoistych gruntach lessopodobnych. Zwierciadło wody gruntowej jest swobodne,



Ryc. 3. Schemat budowy geologicznej na poligonach testowych 3-S19

Fig. 3. Scheme of geological structures on 3-S19 test polygons

tylko lokalnie napięte, występuje na różnych głębokościach w zależności od morfologii terenu, a w dolinach rzek – bardzo płytko lub na powierzchni.

Poligony testowe znajdują się na obszarach o zróżnicowanych warunkach geologicznych:

- Poligon 3-S19-1 – zlokalizowany w pobliżu miejscowości Polichno, gdzie w podłożu występują wzajemnie przewartwiające się warstwy spoiste i niespoiste lessów i utworów lessopodobnych, poniżej których występuje podłoże skalne w postaci miocenijskich wapieni i margli;

- Poligon 3-S19-3 – znajduje się nieopodal miejscowości Janów Lubelski, w warstwie przypowierzchniowej występują utwory lessowe, poniżej których zalegają gliny polodowcowe przewarstwione piaskami wodnolodowcowymi w formie soczew i płatów;

- Poligon 3-S19-4 – niedaleko miejscowości Łązek Ordynacki, w podłożu występują plejstocenijskie piaski rzeczne oraz mady rzeczne (gliny pylaste i pyły), z dużą zawartością części organicznych, oraz ily krakowieckie.

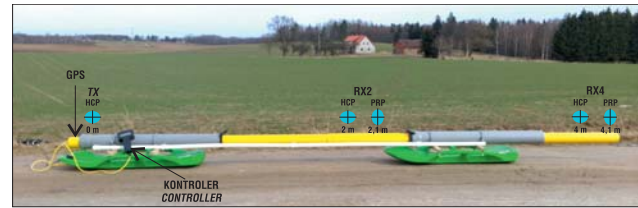
Schemat prawdopodobnej budowy geologicznej na poligonach testowych 3-S19 przedstawiono na rycinie 3.

OPIS PODSTAW FIZYCZNYCH METOD

Metoda elektromagnetyczna (EM)

Metody elektromagnetyczne polegają na badaniu przewodności ośrodka przez wzbudzenie (indukcję) nadajnikiem pierwotnego pola elektromagnetycznego. Wytworzone w ten sposób pole pierwotne generuje w podłożu prądy wirowe, które powodują powstanie wtórnego pola elektromagnetycznego mierzonego przez odbiornik (McNeill, 1980). Pole wtórne oraz przesunięcie fazowe są związane z właściwościami elektrycznymi ośrodka, wynikającymi ze zmian litologii utworów występujących w badanym ośrodku, obecności wód podziemnych, gruntów skażonych, a także infrastruktury podziemnej.

Pomiary elektromagnetyczne GCM (*Ground Conductivity Meter*) prowadzi się za pomocą konduktometrów, w których cewki nadawcza TX i odbiorcza RX (sprzężone czasowo i częstotliwościowo) są umieszczone w takiej samej odległości i orientacji względem powierzchni ziemi (pionowo – HCP, lub poziomo – PRP). W zależności od częstotliwości cewek, odległości między nimi, orientacji względem cewki nadawczej oraz przewodności elektrycznej ośrodka jest możliwy pomiar do głębokości kilku metrów. Wynikiem badań konduktometrycznych jest pomiar pozornej przewodności elektrycznej (S/m) lub jej odwrotności – oporności pozornej (Ωm), a także przesunięcie



Ryc. 4. Konduktometr DUALEM-42S wraz z rozstawem cewek nadawczych i odbiorczych: GPS – nadajnik umieszczony w przedniej części urządzenia; TX – cewka nadawcza; RX2, RX4 – cewki odbiorcze, HCP – położenie cewki (poziome); PRP – położenie cewki (pionowe)

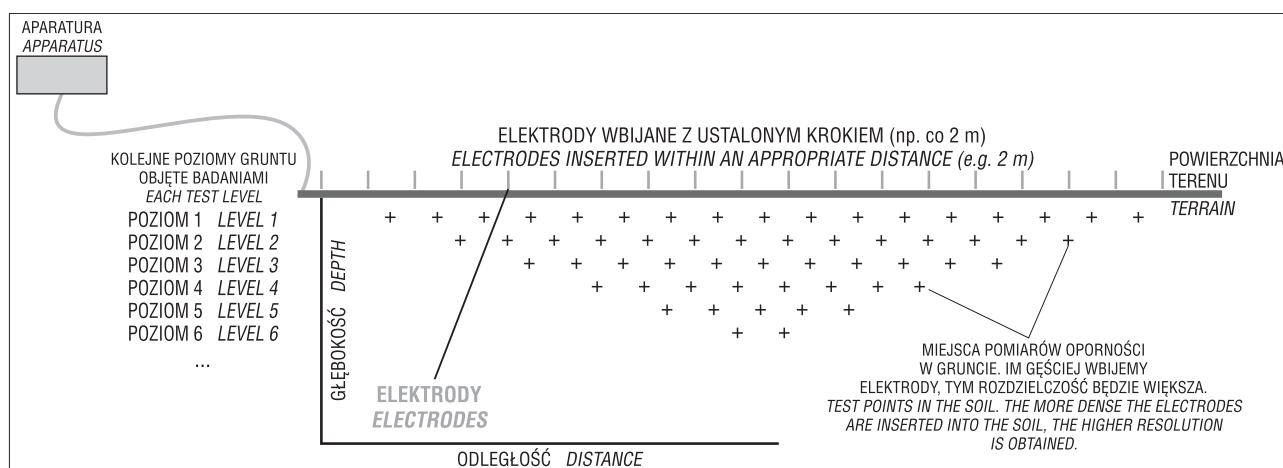
fazowe, określające charakter zaburzeń występujących w ośrodku (pochodzących od obiektów dobrze przewodzących prąd elektryczny, jak kable, rury itp.).

W ramach prowadzonych prac wykorzystano dwa konduktometry wielopoziomowe. Konduktometr DUALEM-42S, posiadający odbiorniki o podwójnej geometrii, oddalone o 2 i 4 m od nadajnika (ryc. 4), zapewniające jednoczesny pomiar przewodności ośrodka na czterech poziomach rozpoznania, oraz konduktometr DUALEM-1S posiadający również odbiornik o podwójnej geometrii, ale oddalony od nadajnika o 1 m, mierzący przewodność na dwóch poziomach. Zastosowanie dwóch typów urządzeń pozwoliło na zarejestrowanie danych z orientacyjnych przedziałów głębokościowych do 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,2 i 6,4 m. Dzięki temu była możliwość bardzo szybkiego prześledzenia zmian miąższości, budowy geologicznej w warstwach przypowierzchniowych, z jednoczesnym zachowaniem bardzo dużej rozdzielczości.

Ze względu na przyjętą metodykę prac, konduktometr został umieszczony na specjalnie skonstruowanych sankach, w ustalonej i dokładnie znanej wysokości nad poziomem gruntu. Powyższa procedura miała na celu zachowanie stałej wysokości cewek odbiorczych i nadawczych, co z kolei eliminowało ewentualną niepewność określenia przewodności oraz miąższości poszczególnych warstw. Więcej informacji o sposobie pomiarów za pomocą konduktometrów wielopoziomowych znajdziemy w publikacji Beamisha (2011).

Badania konduktometryczne wykonano wzdłuż zaplanowanych linii pomiarowych z automatycznym, jedno-sekundowym wyzwaniem pomiaru, co pozwoliło na uzyskanie gęstości próbkowania ok. 1 m. Określenie współrzędnych poziomych oraz wysokości poszczególnych punktów było możliwe dzięki sprzężonemu z aparaturą nadajnikowi GPS.

Wyniki pomiarów przefiltrowano (usunięto jednoznacznie błędne zapisy wywołane zakłóceniami), po czym podano je procedurze inwersji jednowymiarowej, wykorzystując algorytm AarhusInv w programie Aarhus Workbench (<https://www.aarhusgeosoftware.dk/>). Kompilacja dwóch typów jednowymiarowych przetwarzań: poprzecznie ograniczonej inwersji LCI (*laterally constrained inversion*; Auken i in., 2005) oraz przestrzennie ograniczonej inwersji SCI (*spatially constrained inversion*; Viezzoli i in., 2008), umożliwiła budowę modeli pseudo 2D i 3D. Takie podejście wymagało stworzenia modelu wyjściowego, opartego np. na oporności i miąższości poszczególnych warstw, gdzie w wyniku kombinacji liniowych parametrów podstawowych było możliwe uzyskanie rzeczywistego modelu badanego ośrodka.



Ryc. 5. Schemat pomiarów w metodzie ERT
Fig. 5. Scheme of ERT method measurements

Algorytm LCI umożliwia przetwarzanie bardzo dużych zbiorów danych elektromagnetycznych w stosunkowo niedługim czasie. Zasada jego działania przedstawia się w poszczególnych etapach następująco: najpierw profile (ciągi) konduktometryczne są dzielone na podsekcje o określonej długości. Dla każdego odcinka tworzony jest odrębny model jednowymiarowy 1D, a następnie przez korelację parametrów tożsamy (zazwyczaj oporność i głębokość) łączy się sąsiednie modele. Uzyskany tym sposobem model jest poddawany inwersji (traktując go jako pojedynczy zbiór danych) (Auken i in., 2005).

Analiza przeprowadzona modułem LCI pozwala uzyskać model pseudo 2D, którego parametry mogą być wykorzystane podczas prowadzenia dalszych przetwarzań metodą SCI. Inwersja SCI (*spatially constrained inversion*) umożliwia stworzenie modelu opornościowego gruntu – pseudo 3D, wykorzystując algorytm 1D. Zbiór danych, model oraz zadane ograniczenia przestrzenne (oporność warstw, miąższość, głębokość, zasięg przestrzenny węzłów itd.) są przetwarzane jako jeden proces, z wykorzystaniem triangulacji Delaunay, tworząc siatkę węzłów za pomocą metody *nearest neighboring* (najbliższe sąsiedztwo). Ograniczenia inwersji są zależne przede wszystkim od odległości i pozycji poszczególnych węzłów w przestrzeni oraz ich wagi. Algorytm ten prowadzi do utworzenia poprzecznie wygładzonego modelu z wyraźnymi granicami, który odzwierciedla zmiany w modelu ośrodka (Viezzoli i in., 2008).

Ogólne założenia inwersji SCI są bardzo podobne do LCI. Jedyna różnica polega na migracji danych, która w SCI odbywa się w całej przestrzeni objętej pomiarem – wzdłuż linii pomiarowej, pomiędzy liniami oraz między warstwami (Viezzoli i in., 2008). Podczas SCI tworzony jest bardziej dokładny, spójny model geologiczny (model pseudo 3D) w stosunku do analiz wykonanych jedynie na podstawie pojedynczego ciągu pomiarowego (model 2D).

Dla każdego modelu inwersji został obliczony indeks DOI (*Depth of Investigation*), który daje szacunkową głębokość uzyskania wiarygodnego modelu geologicznego (Oldenburg, Li, 1999). Informacje poniżej DOI zostały usunięte z profili oraz map opornościowych.

Metoda tomografii elektrooporowej (ERT)

Metoda tomografii elektrooporowej jest często wykorzystywana do różnego rodzaju badań tzw. płytkiej geolo-

gii (głębokości rzędu kilku do kilkudziesięciu metrów). Jest z powodzeniem stosowana w rozwiązywaniu różnych zagadnień geologicznych i hydrogeologicznych w Polsce, m.in. do określania budowy geologicznej (Pacanowski i in., 2016), oceny stateczności skarp (Kowalczyk i in., 2014), w geologii inżynierskiej (Bestyński, 2011) oraz w budownictwie (Czarniak in., 2014).

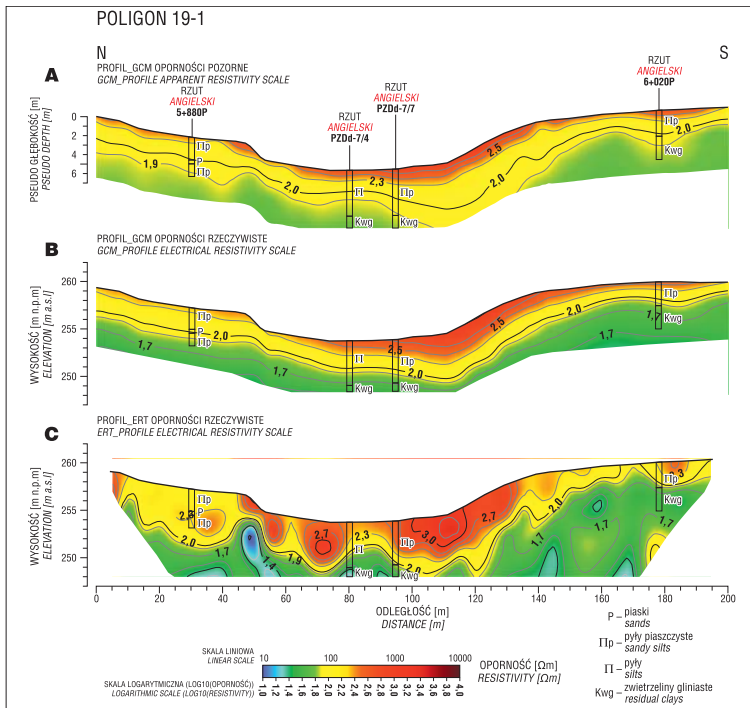
Założenia metody są szeroko opisane w pracach: Kele- ra i Frischknechta (1966), Loke'a i Barkera (1996), Loke'a, (2004), Dahlina i Zhou (2004), Loke'a i in. (2007). Metoda ta na stałe weszła do kanonu stosowanych metod geofizycznych.

Tomografia elektrooporowa bazuje na zjawisku przepływu stałego prądu elektrycznego przez ośrodek gruntowy, a przedmiotem rozpoznania jest przestrzeń objęta układem pomiarowym. Uproszczony schemat pomiarowy przedstawiono na rycinie 5.

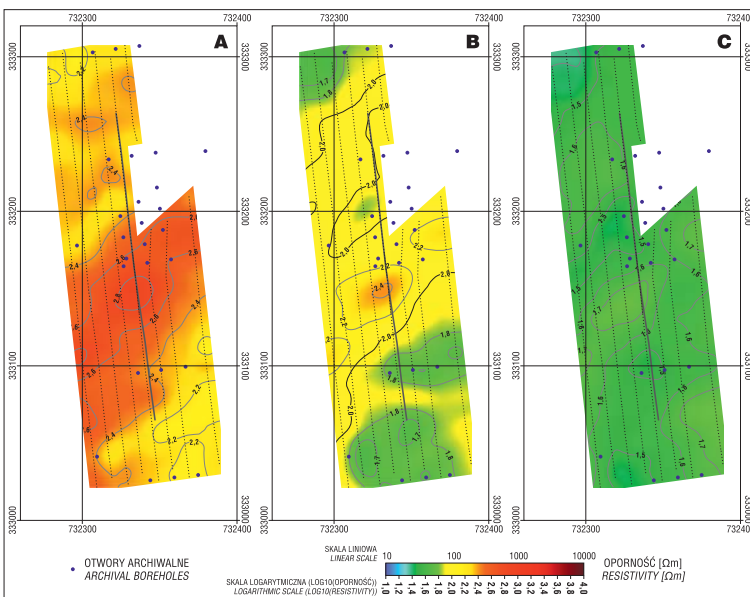
Wyznaczona z takiego pomiaru oporność elektryczna jest określana terminem oporności pozornej. Wielkość ta nie odwzorowuje w sposób ścisły oporności elektrycznej badanego ośrodka. Jest pewną wielkością wypadkową odnoszącą się do całej półprzestrzeni, przez którą przepływa prąd elektryczny.

Do wykonania pomiarów, których wyniki przedstawiono w niniejszym artykule, wykorzystano 12-kanalowy tomograf elektrooporowy ABEM Terrameter LS. Badania prowadzono z 2-metrowym rozstawem elektrod, co dało możliwość osiągnięcia prospekcji do głębokości ok. 28 m. Na potrzeby niniejszego artykułu ograniczono wyniki ERT do 7–8 m, żeby mieć lepsze porównanie wyników z danymi GCM. Pomiary terenowe prowadzono metodą *Roll Along*, przenosząc kolejne kable na czoło profilu. Dokładne położenie oraz wysokość każdej elektrody pomierzono za pomocą wysokiej klasy urządzenia GPS, pracującego w trybie RTK (*Real Time Kinematic*), co pozwoliło także na określenie dokładnej morfologii badanego obszaru. Po zapoznaniu się z warunkami terenowymi oraz modelem geologicznym (ryc. 3), zdecydowano o zastosowaniu układu pomiarowego GRADIENT_XL, umożliwiającego wykonanie stosunkowo dużej ilości punktów pomiarowych przy niewielkim czasie akwizycji.

Uzyskane wyniki z pomiarów terenowych oraz lokalizację poszczególnych elektrod zaimportowano do programu Res2DInv, gdzie dokonano ich przetworzenia. W efekcie otrzymano obraz przedstawiający rozkład opor-



Ryc. 6. Zestawienie przekrojów z wielopoziomowych profilowań konduktometrycznych w skali: **A** – oporności pozornej, **B** – oporności rzeczywistej, **C** – tomografii elektrooporowej w skali oporności rzeczywistej. Poligon 3-S19-1
Fig. 6. Ground conductivity meter cross-sections on: **A** – apparent resistivity scale, **B** – electrical resistivity scale, **C** – electrical resistivity tomography on electrical resistivity scale. 3-S19-1 test polygons



Ryc. 7. Zestawienie map oporności rzeczywistej z wielopoziomowych profilowań konduktometrycznych na głębokości 1 (**A**), 3 (**B**) oraz 6 m (**C**) p.p.t. Poligon 3-S19-1
Fig. 7. Electrical resistivity maps of ground conductivity meter profiling at depth of 1 (**A**), 3 (**B**) and 6 m (**C**) b.g.l. 3-S19-1 test polygon

ności zbliżonej do rzeczywistej na danej głębokości, wraz z uwzględnieniem morfologii terenu.

WYNIKI BADAŃ

Stosowanie wielopoziomowych profilowań konduktometrycznych ma niewątpliwie tę zaletę, że znacznie zwiększa

się efektywność pracy, a także uzyskujemy informację z kilku poziomów, na których są mierzone oporności. W efekcie mamy możliwość zastosowania opisanych już procedur przetwarzania danych (inwersji) z oporności pozornych do oporności rzeczywistych. Z badań wynika, że istnieją takie sytuacje, gdy wynik otrzymany z oporności pozornych (ryc. 6) niewiele różni się od oporności rzeczywistych. W tym przypadku są widoczne pewne różnice, szczególnie w granicach przebiegu poszczególnych warstw. Na innych analizowanych obszarach te rozbieżności są znacznie większe.

Z opisywanych przykładów wynika, że zastosowanie algorytmów przetwarzania ma istotny wpływ na końcowy obraz rozkładu wartości oporności, a rezultaty badań zmieniają się tylko w nieznacznym stopniu w zależności od tego czy wykonamy je metodą tomografii elektrooporowej czy z zastosowaniem konduktometrii wielopoziomowej.

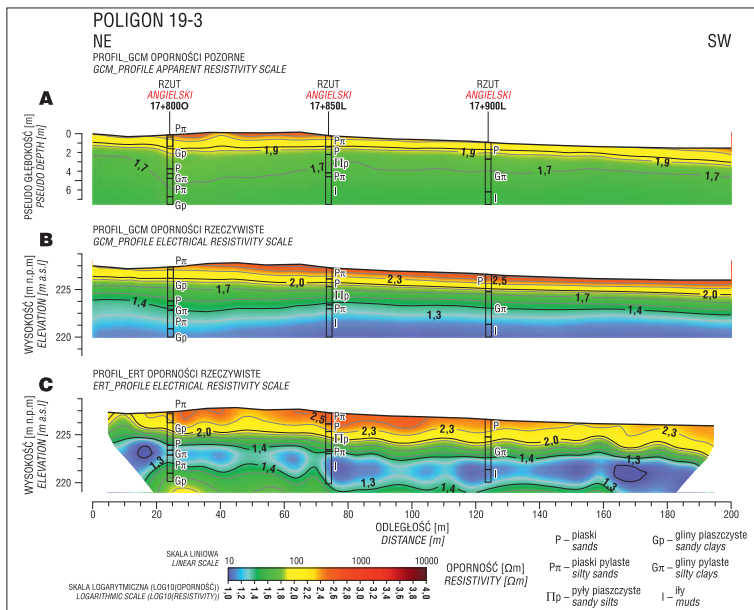
Jak już wspomniano, przedstawienie rezultatów badań GCM tylko w postaci rozkładu oporności pozornej w bardzo wielu przypadkach jest nieuzasadnione. W wyniku zastosowania inwersji uzyskujemy rozkład oporności właściwej, który w sposób szczegółowy odwzorowuje przebieg granic geologicznych pomiędzy strefami o różnych opornościach. Na każdym analizowanym obszarze obrazy rozkładu oporności dla metody ERT i GCM są bardzo zbliżone i interpretacja wyników będzie bardzo podobna. Istnieją oczywiście pewne różnice w rozkładzie wartości oporności, jednak nie mają one decydującego wpływu na interpretację geologiczną.

Głębokości zalegania warstw oraz ich przebiegi uzyskane metodą konduktometryczną pokrywają się z danymi uzyskanymi z wiercen i sondowań, dzięki czemu można odzwierciedlić rzeczywistą budowę geologiczną badanego terenu.

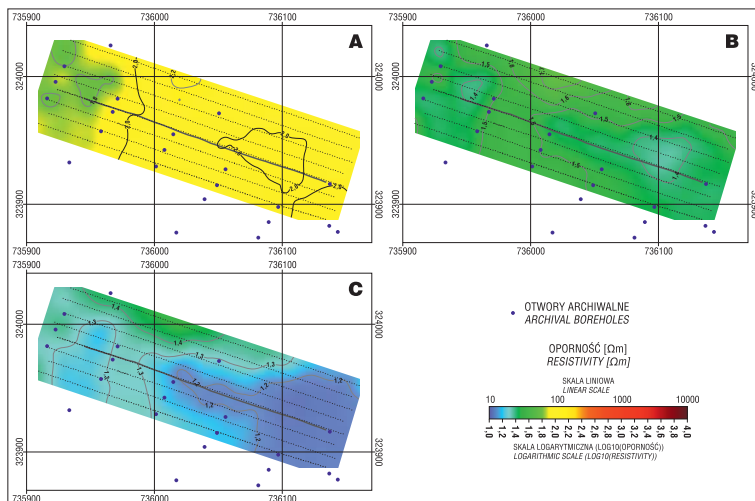
Należy także nadmienić, że dla ośrodków o dużym zróżnicowaniu wartości oporności (od kilku do kilku tys. Ω m) rozkłady wartości oporności na przekrojach czy mapach warto pokazać w skali logarytmicznej. Przedstawienie ich w funkcji logarytmu dziesiętnego z wartości oporności daje lepsze odwzorowanie graficzne.

Jak zaznaczono wcześniej, głównym celem badań było sprawdzenie, czy profilowania konduktometryczne mogą być efektywnie wykorzystywane na potrzeby inwestycji drogowych oraz czy mogą one zastąpić profilowania wykonywane metodą tomografii elektrooporowej. Miałoby to istotne znaczenie z uwagi na fakt, że profilowania konduktometryczne są znacznie wydajniejsze czasowo, a co za tym idzie tańsze.

Podczas badań związanych z rozpoznaniem geologii na potrzeby drogownictwa głębokość rozpoznania z reguły nie przekracza 5–6 m. Zatem prospekcja metody konduktometrycznej (6 m p.p.t.) jest w tym wypadku wystarczająca.



Ryc. 8. Zestawienie przekrojów z wielopoziomowych profilowań konduktometrycznych w skali: **A** – oporności pozornej, **B** – oporności rzeczywistej, **C** – tomografii elektrooporowej w skali oporności rzeczywistej. Poligon 3-S19-3
Fig. 8. Ground conductivity meter cross-sections on: **A** – apparent resistivity scale, **B** – electrical resistivity scale, **C** – electrical resistivity tomography on electrical resistivity scale. 3-S19-3 test polygons



Ryc. 9. Zestawienie map oporności rzeczywistej z wielopoziomowych profilowań konduktometrycznych na głębokości 2 (**A**), 4 (**B**) oraz 6 m (**C**) p.p.t. Poligon 3-S19-3
Fig. 9. Electrical resistivity maps of ground conductivity meter profiling at depth of 2 (**A**), 4 (**B**) and 6 m (**C**) b.g.l. 3-S19-3 test polygon

Poligon 3-S19-1

Na podstawie badań archiwalnych (Rant i in., 2016) na rycinie 3 przedstawiono koncepcję płytkiej budowy geologicznej tego poligonu. Wynika z niej, że od powierzchni mogą występować utwory piaszczyste lub też lessy i pyły. Utwory te przykrywają niżej leżące gliny. Taka budowa powinna występować w strefie analizowanych wyników badań geofizycznych, czyli do głębokości 6 m.

Rozkład wartości oporności zarówno dla metody ERT, jak i GCM potwierdza taki model budowy geologicznej. W strefie przypowierzchniowej dominują oporności rzędu

100–300 Ωm, lokalnie do 1000 Ωm, co należy utożsamiać z piaskami. Mięszkość tego kompleksu osiąga maksymalnie 5 m – mapa oporności rzeczywistej na głębokości 6 m p.p.t. (ryc. 7C) definitywnie wskazuje na brak wyżej opisanych utworów. Miejsca o stosunkowo niewielkiej mięszkości warstwy piaszczystej, natomiast o dosyć wysokich opornościach (barwy żółte), należy utożsamiać z występowaniem pyłów oraz lessów (ryc. 6). Dolna część przekrojów geofizycznych charakteryzuje się znacznie niższymi opornościami. Ich wartości wahają się w granicach 30–70 Ωm, co odpowiada opornościom glin. Lokalnie widoczny spadek oporności rzeczywistej do 20–25 Ωm (barwy niebieskie) można przypisać ilom lub glinom o dużej zawartości frakcji ilastej (ryc. 6).

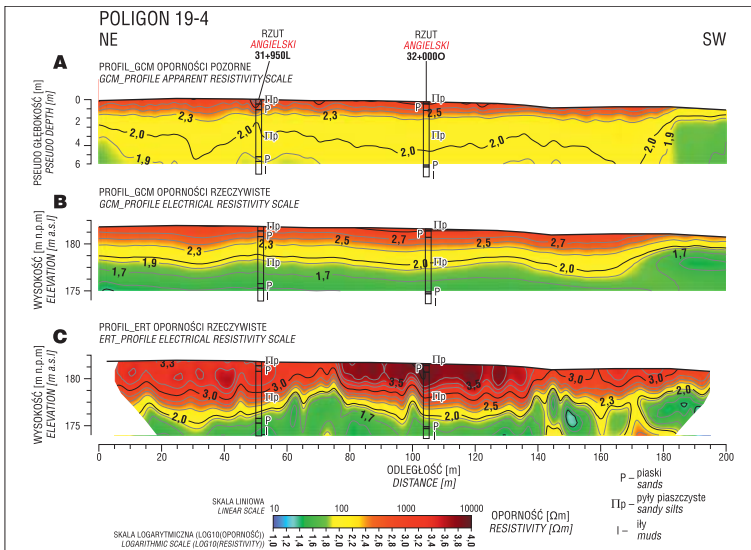
Wyniki badań uzyskane na drodze konduktometrii, a także tomografii elektrooporowej, znajdują odzwierciedlenie w ogólnym modelu budowy geologicznej badanego poligonu i są one zbieżne. Należy jednak pamiętać, że w przypadku ERT mamy do czynienia z modelowaniem 2D, a w przypadku CGM z 1D – czego efektem jest bardziej „płaski” obraz przedstawiony na przekroju. Niemniej jednak przekładając wyniki badań na model geologiczny, wydaje się, że profilowania konduktometryczne dają porównywalne rozkłady oporności w stosunku do rozkładów uzyskanych metodą tomografii elektrooporowej.

Poligon 3-S19-3

Analiza materiałów archiwalnych przeprowadzona dla poligonu 3-S19-3 wskazuje, że na badanym obszarze należy spodziewać się utworów, które można podzielić na trzy kompleksy opornościowe. Będą to piaski, pyły piaszczyste tworzące warstwę przypowierzchniową, podścielające je grunty spoiste w postaci glin, glin pylastych, a także ilów o zmiennej zawartości frakcji piaszczystej. Możliwe jest także istnienie licznych przewarstwień soczewek piasków i glin o znacznym udziale frakcji piaszczystej.

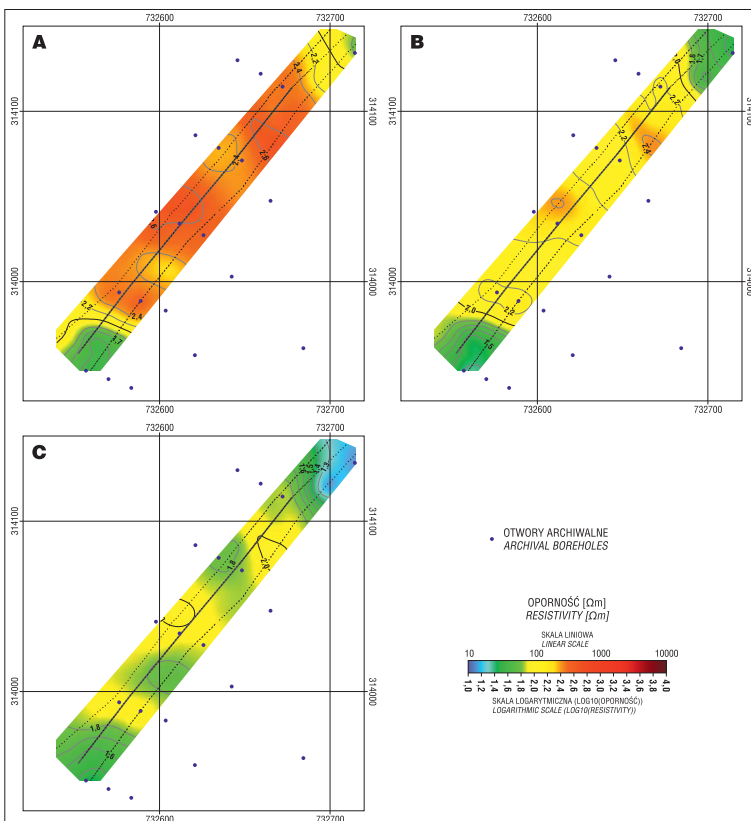
Wyniki badań odzwierciedlają i uzupełniają zakładaną koncepcję budowy geologicznej. Zarówno dane uzyskane z tomografii elektrooporowej, jak i konduktometrii jednoznacznie wskazują na piaszczystą, piaszczysto-pylastą strefę przypowierzchniową. Utwory o wysokiej oporności (powyżej 100 Ωm; barwy żółte do ciemnoczerwonych) pokrywają w sposób ciągły całą wierzchnią część omawianego obszaru (ryc. 9A). Szczególnie wyraźnie widać to na mapie oraz przekroju konduktometrycznym (ryc. 8B), który znacznie dokładniej obrazuje strefę przypowierzchniową. Mięszkość pokładów wysokooporowych wynosi 1–2 m. Poniżej opisanej warstwy przypowierzchniowej zaznaczają się grunty, które pod kątem oporności elektrycznej należy sklasyfikować jako niskooporowe (ryc. 9 B, C).

W przekrojach geofizycznych grunty niskooporowe uwidaczniają się poprzez barwy ciemnozielone do niebie-



Ryc. 10. Zestawienie przekrojów z wielopoziomych profilowań konduktometrycznych w skali: **A** – oporności pozornej, **B** – oporności rzeczywistej, **C** – tomografii elektrooporowej w skali oporności rzeczywistej. Polygon 3-S19-4

Fig. 10. Ground conductivity meter cross-sections on: **A** – apparent resistivity scale, **B** – electrical resistivity scale, **C** – electrical resistivity tomography on electrical resistivity scale. 3-S19-4 test polygons



Ryc. 11. Zestawienie map oporności rzeczywistej z wielopoziomych profilowań konduktometrycznych na głębokości 2 (A), 3 (B) oraz 5 m (C) p.p.t. Polygon 3-S19-4

Fig. 11. Electrical resistivity maps of ground conductivity meter profiling at depth of 2 (A), 3 (B) and 5 m (C) b.g.l. 3-S19-4 test polygons

skich, natomiast dane z pobliskich odwiertów pozwalają zaklasyfikować je jako utwory spoiste – głównie gliny oraz ły. Na przekroju oporności rzeczywistej uzyskanym metodą tomografii elektrooporowej (ryc. 8C) możemy

zaobserwować zmienność w litologii wspomnianych utworów spoistych. Bezpośrednio pod warstwą przypowierzchniową zalegają utwory niskooporowe (barwy niebieskie), które na podstawie pobliskich odwiertów należy uznać za ły lub gliny z znacznym udziałem frakcji iłowej. Poniżej widoczna zmiana barw (od zielonych do miejscami żółtych – zachodnia część przekroju) wskazuje na wzrost udziału materiału piaszczystego – należy się spodziewać glin pylastych, glin piaszczystych, a także soczewek piasku.

Należy podkreślić że rozkład oporności pozornych, jaki uzyskano z badań konduktometrycznych, nie odzwierciedla dobrze takiej budowy geologicznej i dopiero zastosowanie odpowiednich algorytmów obliczeniowych daje dobrą korelację z otworami archiwalnymi.

Poligon 3-S19-4

Ostatnim obszarem, na którym dokonano zestawienia pomiarów elektromagnetycznych z geoelektrycznymi był poligon 3-S19-4. Zgodnie z przyjętą metodyką wstępnego określenia płytkiej budowy geologicznej dokonano na podstawie badań archiwalnych. Informacja otrzymana z pobliskich odwiertów wskazuje, że od powierzchni występuje kilkumetrowa warstwa utworów wysokooporowych w postaci piasków. Poniżej zalegają pokłady glin o zmiennej zawartości frakcji piaszczystej, a także utwory ilaste.

Wykonane pomiary geofizyczne pozwoliły na dosyć dokładne rozpoznanie przebiegu wyżej wymienionych utworów, a także na określenie stref o zwiększonej zawartości materiału piaszczystego oraz iłowego w niższej leżących gruntach spoistych.

Jak wspomniano wcześniej powierzchnię strefę tworzą piaski (barwy żółte do czerwonych, widoczne na przekrojach – ryc. 10, oraz na mapie oporności rzeczywistej na głębokości 2 m p.p.t. – ryc. 11A). Tworzą one ciągłą pokrywę o zmiennej miąższości, osiągającej swoje maksimum w części centralnej (ok. 4,5 m) oraz minimum w części południowej (ok. 1,5 m). Powyższą sytuację dobrze obrazuje przekrój konduktometryczny (ryc. 10A, B), uwidaczniający przebieg oraz miąższość pokładów piaszczystych, a także granicę między nimi a niższą leżącą strefą utworów spoistych.

Poniżej warstw piaszczystych o wysokiej oporności zalegają wspomniane już utwory spoiste. Dane z otworów wiertniczych wskazują, że są to utwory gliniaste o zróżnicowanej zawartości frakcji piaszczystej oraz iłowej, a także utwory ilaste, miejscami z domieszką materiału piaszczystego. Dane uzyskane z pomiarów geoelektrycznych wskazują, że opisywana warstwa ma charakter niejednorodny. Żółte plamy zawierające się w utworach spoistych (zobrazowanych jako jednolita warstwa o barwie zielonej), świadczą o znaczącym wzroście

materiału piaszczystego w tych strefach. Będą to prawdopodobnie soczewki piasku, na które jak się okazuje, nie natrafił żaden odwiert – nie było można zatem względnie ich w budowie geologicznej, omówionej na podstawie wykonanych otworów.

Na koniec nadmienić należy, że zasięg głębokościowy uzyskany metodą tomografii elektrooporowej daje pełniejszy obraz budowy geologicznej, ze względu na dokładniejsze odwzorowanie rozkładu oporności w badanym ośrodku. Niemniej jednak, do badań związanych z rozpoznaniem geologii pod nowo budowane drogi głębokość rozpoznania podłoża uzyskana za pomocą metody GCM jest w większości przypadków zadowalająca.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie badań geofizycznych w wersji konduktometrycznej do kartowania przestrzennego przypowierzchniowych warstw geologicznych jest bardzo wydajnym narzędziem, które umożliwia rozpoznanie w ciągu zaledwie kilku godzin rozległych obszarów, np. pod obiekty liniowe. Uzyskane wyniki w postaci map oraz przekrojów rozkładu oporności rzeczywistej (po przeprowadzeniu inwersji) są bardzo szczegółowe, a w połączeniu z danymi geologicznymi, pochodzącymi z otworów oraz sondowań, dają bardzo wiarygodny obraz podłoża budowlanego. Dzięki zastosowaniu badań geofizycznych zarówno w wersji GCM, jak i ERT, już na wstępnym etapie projektu można zidentyfikować strefy, które mogą mieć negatywny wpływ na planowane przedsięwzięcia. Za ich pomocą można wskazać obszary, gdzie należy wykonać dodatkowe rozpoznanie (otwory wiertnicze lub/i sondy), zmniejszyć liczbę wierceń, ale przede wszystkim zwiększyć poziom uszczegółowienia wyników, co w efekcie może przynieść duże oszczędności na dalszym etapie realizacji inwestycji drogowej.

W prezentowanej pracy skoncentrowano się na rozpoznaniu budowy geologicznej pod obiekty liniowe, ale zaprezentowane przetwarzanie oraz inwersja danych konduktometrycznych, może być stosowane do wielu innych celów, takich jak: ocena stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych, okonturowania obszarów występowania zanieczyszczeń, poszukiwania rud metali i złóż kopalin pospolitych (żwirów, piasków), archeologii, identyfikacji infrastruktury podziemnej itp.

Prezentowane wyniki badań zostały wykonane w ramach projektu: „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”, który jest realizowany w ramach programu krajowego RID – Rozwój Innowacji Drogowych ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). Instytucjami finansującymi projekt jest Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) oraz Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA). Autorzy składają serdeczne podziękowania recenzentom prof. dr. hab. Piotrowi Tucholka oraz dr. inż. Zbigniewowi Bestyńskiemu za cenne dla przygotowania artykułu uwagi.

LITERATURA

- AUKEN E., CHRISTIANSEN A.V., JACOBSEN B.H., FOGED N., SØRENSEN K.I. 2005 – Piecewise 1D Laterally Constrained Inversion of resistivity data. *Geophys. Prospect.*, 53: 497–506.
- BEAMISH D. 2011 – Low induction number, ground conductivity meters: a correction procedure. *J. Appl. Geophys.* 75: 244–253.
- BESTYŃSKI Z. 2011 – Metody geofizyczne w geologii inżynierskiej. *Biul. Państ. Inst. Geol.*, 446: 175–182.
- CYGAŁ A., STEFANIUK M., KRET A., KLITYŃSKI W. 2015 – Zastosowanie metody konduktometrycznej do typowania stref o zmiennych parametrach filtracyjnych w obrębie podstawy wału przeciwpowodziowego. *Prz. Geol.*, 63 (10/1): 652–656.
- CZARNIAK P., PACANOWSKI P., BĄKOWSKA A., MIESZKOWSKI R., WELC F. 2014 – The role of geophysical ERT method to evaluate the leakproofness of diaphragm wall of deep foundation trenches on the example of the construction of retail and office complex in Lublin, Poland. *Stud. Quart.*, 31 (2): 91–99.
- DAHLIN T., ZHOU B. 2004 – A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys. Prospect.*, 52 (5): 379–398.
- DUALEM 2016 – Electromagnetic Induction: Operation and Interpretation especially at Low Induction Numbers, DUALEM.
- GOŁĘBIEWSKI T., TOMECKA-SUCHOŃ S., FARBISZ J. 2012 – Zastosowanie kompleksowych metod geofizycznych do nieinwazyjnego badania stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. *Symposium Europejskie Współczesne Problemy Ochrony Przeciwpowodziowej. Paris – Orléans, 28–29–30.03.2012.* <https://www.aarhusgeosoftware.dk/>.
- KELER G.V., FRISCHKNECHT F.C. 1966 – Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- KOWALCZYK S., MIESZKOWSKI R., PACANOWSKI G. 2014 – Ocena stateczności wybranych fragmentów skarpy warszawskiej w świetle badań geofizycznych metodą tomografii elektrooporowej. *Prz. Geol.*, 62 (10/2): 634–640.
- LOKE M.H. 2004 – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.ualberta.ca.
- LOKE M.H. & BARKER R.D. 1996 – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prospect.*, 44 (1): 131–152.
- LOKE M.H., ALFOUZAN F.A. & NAWAWI M.N.M. 2007 – Optimisation of electrode arrays used in 2D resistivity imaging surveys. *ASEG Extended abstracts 2007*: 1–4.
- MCNEILL J.D. 1980 – Electrical conductivity of soils and rocks. *Geonics Limited. Technical Note TN-5. Mississauga, Ontario, Canada.*
- MUTKE G., CHODACKI J. 2005 – Zastosowanie płytkiego profilowania elektromagnetycznego do rozwiązywania zagadnień inżynierskich i środowiskowych w przypowierzchniowych warstwach podłoża. *Pr. Nauk. GIG Górnictwo i Środowisko*, 3: 55–64.
- OLDENBURG D.W., LI Y. 1999 – Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophys.*, 64 (2): 403–416.
- PACANOWSKI G., SOKOŁOWSKA M., MIESZKOWSKI R. 2016 – Obrazowanie elektrooporowe w uszczegółowieniu skomplikowanej budowy geologicznej na przykładzie wzgórza Morasko w Poznaniu. *Prz. Geol.*, 64 (4): 238–244.
- RANT P., LUTY M., KOWALCZUK J., WOJDAB., KWIATKOWSKA A., KAPEL K. 2016 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby projektowanej inwestycji budowy drogi ekspresowej S19 Lublin–Rzeszów odc. 2 Kraśnik (koniec obwodnicy) – granica województwa lubelskiego i podkarpackiego. *Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Oddział w Lublinie*, 782/2016.
- VIEZZOLI A., CHRISTIANSEN A.V., AUKEN E., SØRENSEN K.I. 2008 – Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophys.*, 73: F105–F113.
- WÓJCICKI A., HONCZARUK M., PACANOWSKI G. 2006 – Subsurface Geophysical Surveys to Civil Engineering, Geotechnical and Environmental Applications. 68th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2006.