

Zastosowanie metody obrazowania elektrooporowego do rozpoznania podłoża Południowej Obwodnicy Warszawy

Sebastian Kowalczyk¹, Krzysztof Cabalski¹, Michał Radzikowski¹, Jędrzej Jędrzejewski¹



S. Kowalczyk

K. Cabalski

M. Radzikowski

J. Jędrzejewski

Application of electrical resistivity imaging to ground recognition of the Warsaw Southern Ring-Road. *Prz. Geol.*, 65: 772–778.

Abstract. The article presents the usage of electrical resistivity imaging (ERI) in ground recognition for linear constructions such as the Warsaw Southern Ring-Road. Measurements were performed in a gradient array, on five segments of the route, with previously researched geological conditions. Measurement method intended to probe the soil matrix on different depths. Therefore, the electrode array was set to 2 to 5 meters. The resulting

image of resistivity differed in resolution. Resistivity images were correlated with geological data from boreholes in geology-engineering documentation and other widely available geological information from databases and literature. This allowed to limit ambiguity of interpretation of two-dimensional model of near surface soil matrix resistivity. Thereby, individual ranges of resistivity were assigned to geological content. The measurements allowed to identify geological horizontal variability. Electrical resistivity imaging research confirmed its utility in the recognition of spatial distribution of geological media in foundation soil. The analysis of completed surveys allowed to designate the following areas: locations where anthropogenic and organic soils occur; probable location of the edge of the upland on the eastern side of Vistula River and upper relief of local Neogene clays.

Key words: electrical resistivity imaging (ERI), complex soil conditions, road investment

Stosowanie wielodyscyplinarnego podejścia, z zastosowaniem metod geofizycznych, do badań obszarów o złożonej budowie geologicznej, jest rekomendowane przez Ercolego i in. (2012) oraz Ziniego i in. (2015). Tworzenie modelu podłoża gruntowego na podstawie badań geologiczno-inżynierskich zintegrowanych z badaniami geofizycznymi jest zalecane przez wielu badaczy, np. Dahlina i in. (1994), Kowalczyka i Mieszkowskiego (2011), Maślakowskiego i in. (2014) oraz Kowalczyka i in. (2014a, 2015, 2017a, b). Wykorzystanie technik geofizycznych pozwala, w oparciu o zróżnicowanie właściwości fizycznych, uzupełnić oraz uszczegółwić informację o podłożu uzyskaną na podstawie wierceń. Jedną z najczęściej stosowanych metod geofizycznych w badaniach podłoża dróg szybkiego ruchu (ekspresowych i autostrad) jest metoda obrazowania elektrooporowego (ERI – *electrical resistivity imaging*), nazywana również metodą tomografii elektrooporowej (ERT – *electrical resistivity tomography*) lub ciągłych pionowych sondowań elektrooporowych (CVES – *Continuous Vertical Electrical Sounding*). ERI umożliwia szczegółowe, quasi-ciągłe odwzorowanie rozkładu oporności elektrycznej ośrodka. Oporność elektryczna jest parametrem dobrze odzwierciedlającym zróżnicowanie ośrodka geologicznego pod względem litologicznym pod warunkiem, że zakres przewodności elektrycznej wody, wypełniającej pory gruntu, jest wąski. Poza tym istotna jest sama wartość mineralizacji wody. Jej wysokie wielkości mogą spowodować problemy podczas interpretacji geologicznej. Zasadniczo, wartości oporności uzyskane na podstawie badań elektrooporowych nie pozwalają na jednoznaczne zidentyfikowanie rodzajów gruntu występującego w podłożu. Do tego celu niezbędne są wiercenia

dające szczegółową, choć punktową wiedzę na temat warunków gruntowych. Dowiązanie modelu oporności do danych z wierceń pozwala na zweryfikowanie przyjętego modelu geologiczno-inżynierskiego. Stopień zgodności modelu z rzeczywistymi warunkami jest zależny od złożoności warunków gruntowych oraz zakresu zaprojektowanych badań.

Obrazowanie elektrooporowe jest jedną z najczęściej stosowanych metod geofizycznych w badaniach podłoża dróg. Wykorzystywane jest przede wszystkim do rozpoznawania złożonych warunków geologicznych (Ganerød i in., 2006; Wisén i in., 2008; Ngan-Tillard i in., 2010; Osinowo i in., 2011; Maślakowski i in., 2014; Kowalczyk i in., 2017a, b) oraz pustek krasowych (Batayneh, Al-Zoubi, 2000; Zhou i in., 2002; Gómez-Ortiz, Martín-Crespo, 2012; Lambert i in., 2013). W badaniach krajowych pomiary geoelektryczne zostały określone jako najefektywniejsza metoda geofizyczna do przestrzennego rozpoznania warunków hydrogeologicznych, w związku z projektowaniem dróg krajowych i autostrad, oraz zalecone do stosowania w tym celu (Rodzoch in., 2006). Pomiary ERI zostały wprowadzone Zarządzeniem nr 58 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad (Zarządzenie, 2015) do kanonu badań geologiczno-inżynierskich na potrzeby rozpoznania budowy podłoża na etapie koncepcji tras dwujezdniowych. Zgodnie z tym zarządzeniem, niezależnie od skomplikowania warunków gruntowych dla dróg dwujezdniowych należy wykonać badania metodą tomografii elektrooporowej w osi projektowanej drogi (dla obydwu jezdni) oraz co najmniej trzy otwory wiertnicze w przekroju poprzecznym (oś, prawa i lewa krawędź drogi), w rozstawie wzdłuż osi drogi nie mniejszym niż co 50 m.

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; s.kowalczyk@uw.edu.pl, krzysztof.cabalski@uw.edu.pl, michal.radzikowski@uw.edu.pl; jedrzejjedrzejewski@gmail.com.

Ponadto w każdym przekroju poprzecznym należy wykonać co najmniej jedno sondowanie parametryzujące właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów i skał w podłożu. Dodatkowe pomiary ERT powinny być przeprowadzone dla obiektów inżynierskich. Takie podejście daje zdecydowanie lepsze rozpoznanie podłoża budowlanego niż dotychczas stosowane i jego zasadność potwierdzają wyniki prezentowane w niniejszej pracy.

Celem niniejszego artykułu jest potwierdzenie przydatności metody obrazowania elektrooporowego zintegrowanej z badaniami geologicznymi w dokładniejszym rozpoznaniu warunków geologicznych. Podejście takie umożliwi optymalne zaprojektowanie posadowienia obiektów inżynierskich w różnych warunkach geologicznych związanych z geomorfologią terenu

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Budowa geologiczna oraz warunki geologiczno-inżynierskie występujące w podłożu projektowanej Południowej Obwodnicy Warszawy (POW) są ściśle związane z geomorfologią terenu badań oraz są charakterystyczne dla całego regionu aglomeracji warszawskiej (Pożaryski, 1963; Dzierżek, 2015).

Omawiany odcinek POW przebiega przez trzy podstawowe formy geomorfologiczne:

- Równinę Warszawską, na której znajduje się początkowy, 3,5 km odcinek trasy POW;

- Dolinę Środkowej Wisły – odcinek między km 3+500 a km 15+250;

- Równinę Wołomińską, na której znajduje się ostatni odcinek POW, między km 15+250 a km 19+000.

Równinę Warszawską stanowi wysoczyzna polodowcowa niezdenudowana oraz zdenudowana, tworząca dość wyrównaną powierzchnię, o rzędnych wahających się ok. 100–115 m n.p.m. Można na niej wyróżnić cały szereg drugorzędnych form geomorfologicznych, takich jak: kemy, powierzchnie przepływu wód lodowcowych, pagórki akumulacji szczelinowej, poziom erozyjno-denudacyjny, interstadialną dolinę rzeczna, równinę zastoiskową, porzuczone starorzecza po przepływach wód lodowcowych i zagłębienia po martwym lodzie (Sarnacka, 1976).

Dolina Środkowej Wisły to typowa dla środkowej Polski dolina rzeczna z tarasami zalewowymi oraz nadzalewowymi. Od Równiny Warszawskiej odcina ją wysoka na kilkanaście metrów skarpa (tzw. skarpa warszawska), której nachylenie wynosi przeciętnie 24°, a lokalnie dochodzi nawet do 30° (Frankowski i in., 2000). Istotną z geologiczno-inżynierskiego punktu widzenia problematyka stateczności skarpy warszawskiej w rejonie przebiegu POW została szerzej omówiona przez Kaczmarka (2014), Kowalczyka i in. (2014b), Kaczmarka i Dobaka (2015) oraz Kaczmarka i Popielskiego (2016).

Na odcinku warszawskim, w dolinie wyróżnia się najczęściej dwa tarasy zalewowe (niższy i wyższy) oraz trzy nadzalewowe (niższy – praski, wyższy – falenicki, i najwyższy – otwocki) (Sarnacka, 1980). Rzędne terenu w dolinie Wisły wahają się w granicach 80–95 m n.p.m.

Równina Wołomińska to wysoczyzna morenowa, a w rejonie wschodniego końca POW często określana jako jej niższy poziom erozyjno-denudacyjny (Nowak, 1978). Rzędne terenu wahają się ok. 100–110 m n.p.m. Krawędź między Równiną Wołomińską, a Doliną Środkowej Wisły nie jest tutaj tak wyraźna jak na zachodnim brzegu Wisły, ponieważ najczęściej maskują ją formy morfologiczne

pochodzenia eolicznego: wydmy, równiny piasków przewianych oraz wodnolowcowych: równiny sandrowe, kemy, pagórki akumulacji szczelinowej, zagłębienia bezodpływowe. Na powierzchni wysoczyzny częste są też zagłębienia po bryłach martwego lodu.

W artykule, podczas omawiania wyników badań i ich dyskusji, zastosowano klasyczny podział stratygraficzny czwartorzędu opisany przez Sarnacką (1992). Od tego czasu ulegał on zmianom (Lindner i Marks, 2012; Lindner i in., 2013; Marks i in., 2016). Niemniej jednak podział wg Sarnackiej był stosowany w Szczegółowej Mapie Geologicznej Polski tego rejonu (Nowak, 1978; Sarnacka, 1976; Sarnacka, 1980), Atlasie geologiczno-inżynierskim Warszawy (Frankowski i in., 2000), a obecnie jest najczęściej wykorzystywany przez dokumentatorów geologiczno-inżynierskich.

METODYKA BADAŃ ELEKTROOPOROWYCH

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metodę obrazowania elektrooporowego (ERI). Podstawy teoretyczne metody elektrooporowej oraz jej dotychczasowy rozwój i zastosowanie są opisane w literaturze przedmiotu (Dahlin, 1996; Samouëlian i in., 2005; Loke, 2011; Loke i in., 2013).

Pomiary ERI wykonano, aparaturą Terrameter LS szwedzkiej firmy ABEM z użyciem 4 kabli, wzdłuż których rozmieszczono po 21 elektrod w rozstawie co 2 m (linia pomiarowa V), 3 m (linia pomiarowa III) oraz co 5 m (linie pomiarowe I, II, IV), na każdym z nich. Wykonanie pomiarów wzdłuż linii pomiarowej I, IV oraz V wymagało zastosowania techniki *roll-along*. W uproszczeniu polega ona na wykonywaniu pomiarów na czterech kablach i gdy elektrody z pierwszego kabla wezmą udział we wszystkich zaprojektowanych pomiarach, jest on przenoszony na koniec linii pomiarowej. Van Overmeeren i Ritsema (1988) oraz Dahlin (1996) przedstawili w swoich pracach dokładniejszy opis tej techniki. *Roll-along* umożliwia wykonywanie długich, jeżeli potrzeba nawet kilkukilometrych, linii pomiarowych, nie wpływając na głębokość penetracji badania. Pomiary wykonano układem gradientowym, który daje dobre rezultaty przy rozpoznawaniu/kartowaniu poziomej zmienności. Dahlin i Zhou (2006) szczegółowo opisali w swojej publikacji układ gradientowy z zastosowaniem kombinacji wielu elektrod prądowych.

Dane oporności pozornej uzyskane w pomiarach terenowych zostały przetworzone za pomocą programu Res2DInv (Loke, 1996–2002; Loke i in., 2003), w celu otrzymania dwuwymiarowego modelu oporności przypowierzchniowej części ośrodka geologicznego. W geometrii 2D interpretacji modelu ośrodka dokonuje się dyskretyzując przestrzeń pomiarową na prostokątne komórki, a nie na płasko-równoległe warstwy o nieskończonej rozciągłości jak ma to miejsce w przypadku pionowych sondowań elektrooporowych (Loke, 2001). Umożliwia to śledzenie zmian oporności elektrycznej ośrodka zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym. W Res2DInv wykonano kilka działań, żeby otrzymane modele oporności najlepiej odwzorowywały rzeczywistości. Po pierwsze, zostały usunięte punkty pomiarowe, których wartości oporności są znacząco różne w porównaniu z sąsiednimi danymi (*bad data points*). Nie usunięcie tych danych mogłoby spowodować występowanie fałszywych anomalii na przekroju pomierzonej oporności pozornej, co niekorzystnie wpłynie

na wynik końcowy. Następnie wprowadzono poprawkę topograficzną na podstawie numerycznego modelu terenu (*Digital Elevation Model*). Kolejnym krokiem przetworzenia było wykonanie inwersji danych z wykorzystaniem obu dostępnych w programie algorytmów, które wymuszają na przekroju gładkie (*the smooth inversion method*) albo ostre (*the robust inversion method*) przejścia pomiędzy prezentowanymi danymi. Dalszej analizie poddano rezultaty otrzymane w wyniku inwersji przy zastosowaniu algorytmu wygładzonego modelu wartości oporności (*the smoothness-constrained least-squares method with smoothing of model resistivity values*). Inwersją w geofizyce określa się dopasowanie teoretycznego modelu ośrodka do danego zestawu danych pomiarowych (Lines, Treitel, 1984). Proces przeprowadza się w kilku krokach. Pierwszym jest rozwiązanie zadania odwrotnego (*inversion problem*), co pozwala na wygenerowanie modelu oporności na podstawie pomierzonych wartości oporności pozornej. Drugi krok to rozwiązanie zadania prostego (*forward problem*) – otrzymany model oporności jest użyty do wyliczenia oporności pozornej. Następnie wykonuje się kolejne iteracje, dopasowując model ośrodka do rezultatów pomiarów do momentu, gdy pomierzone i obliczone wartości oporności są satysfakcjonująco porównywalne. Dopasowanie pomiędzy pomierzonymi a obliczonymi wartościami oporności określa błąd dopasowania.

Interpretację geologiczną przekrojów rozkładu oporności otrzymanych w wyniku inwersji przeprowadzono w kilku etapach. Na każdym z przekrojów dokonano podziału na warstwy fizyczne o zbliżonej wartości oporności. Następnie odniesiono podzielone warstwy fizyczne do danych geologicznych pochodzących z archiwalnej dokumentacji (Bulanda i in., 2013). W przypadku interpretacji położenia stropu iłów neogeńskich, rozpoznanie na podstawie ww. dokumentacji nie zawsze było wystarczające. Wówczas korzystano z danych z Atlasu geologiczno-inżynierskiego Warszawy (Frankowski i in., 2000). Ostatnim krokiem była korekta lub/i uszczegółowienie dokonanych w pierwszym etapie wydzieleni.

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Wyboru lokalizacji wykonanych badań dokonano na podstawie szczegółowej analizy wyników badań geologiczno-inżynierskich zawartych w „Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej określającej warunki geologiczno-inżynierskie posadowienia obiektów budowlanych Południowej Obwodnicy Warszawy...” (Bulanda i in., 2013) oraz innych danych geologicznych dostępnych m.in. w Centralnej Bazie Danych Geologicznych (aplikacja GeoLog, <http://m.bazagis.pgi.gov.pl/cbdg/#/landing>). Ich wyboru dokonano tak, żeby można było rozpoznać szerokie spektrum problematyki geologicznej, które jest celem zainteresowań w trakcie dokumentowania podłoża inwestycji drogowych ze szczególnym uwzględnieniem posadowienia obiektów inżynierskich. Rozstaw elektrod, wynoszący 2–5 m, umożliwił dokładniejsze rozpoznanie podłoża na potrzeby ewentualnego pośredniego sposobu posadowienia obiektów inżynierskich. Gdyby celem było rozpoznanie podłoża pod posadowienie nasypów drogowych, to wówczas należałoby przyjąć rozstaw elektrod ok. 1 m, żeby uzyskać odpowiednią rozdzielczość obrazów oporności. Wyniki pomiarów o takim rozstawie nie są jednak prezentowane w niniejszym artykule.

W nawiązaniu do założonych kryteriów wytypowano pięć poligonów badawczych, wzdłuż trasy projektowanej POW:

- I-I – skarpa warszawska, deluwia, koluwia i zabagnienia przyskarpowe;
- II-II – występowanie gruntów antropogenicznych, podłoże plioceńskie;
- III-III – grunty spoiste madowe, o charakterze wysadzinowym;
- IV-IV – rozpoznanie zamaskowanej krawędzi wysoczyzny i występowanie czwartorzędowych iłów;
- V-V – występowanie gruntów organicznych (namuły i torfy) niewielkich miąższości.

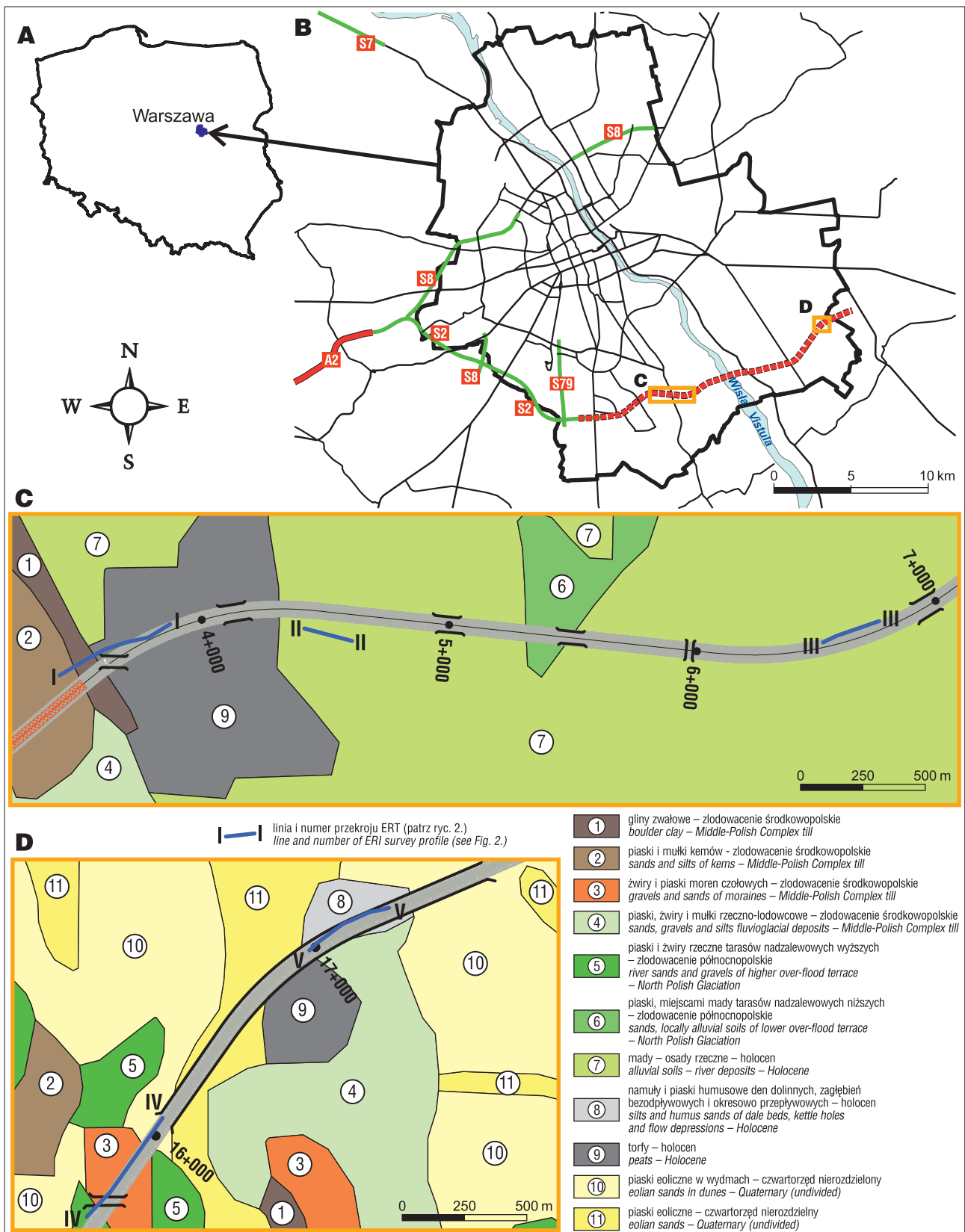
Poligon I-I (ryc. 1, 2A)

W rejonie tym, kluczowym zagadnieniem jest rozpoznanie budowy skarpy warszawskiej, złożonej z dwóch poziomów glin zwałowych zlodowacenia środkowopolskiego, podścielonych piaskami rzeczniczymi interglacjału mazowieckiego oraz preglacjału, które zalegają na iłach neogeńskich. Ważnym elementem budowy geologicznej mogą być utwory deluwialne oraz koluwalne.

Problematykę stateczności skarpy warszawskiej na podstawie pomiarów elektrooporowych, przeprowadzonych w niewielkiej odległości od projektowanej trasy Południowej Obwodnicy Warszawy, przedstawiono w pracach Kaczmarka (2014) oraz Kowalczyka i in. (2014b). Przekrój elektrooporowy I-I został wykonany w obrębie projektowanego przebiegu drogi POW i jest generalnie zgodny z wynikami elektrooporowymi uzyskanymi wcześniej w tym rejonie.

Poniżej krawędzi skarpy warszawskiej występują grunty organiczne (torfy i namuły). Dokładne rozpoznanie zasięgu przestrzennego i głębokości zalegania gruntów organicznych jest istotne przy wyborze sposobu posadowienia obiektów. Ma również kluczowe znaczenie dla zaprojektowania przebiegu trasy pod względem ekonomicznym, zapewniającym bezpieczeństwo wykonania oraz jej późniejszego funkcjonowania. W dalszym kilometrażu projektowanej trasy POW grunty organiczne występują jako facja powodziowa (mady) na tarasach Wisły oraz w zagłębieniach bezodpływowych.

Na przekroju elektrooporowym wzdłuż linii I-I (ryc. 2A), na podstawie zmienności zakresów oporności oraz wiedzy geologicznej o obszarze badań z materiałów archiwalnych (Frankowski i in., 2000; Bulanda i in., 2013), wyróżniono 8 kompleksów, którym przypisano treść geologiczną. Najgłębiej zidentyfikowaną warstwą są iły neogeńskie – oznaczone jako (1). Zróżnicowanie oporności wskazuje, że relief stropu tej warstwy jest zmienny. Informacja ta może się okazać istotna podczas projektowania ścian szczelnych lub szczelinowych, w celu posadowienia obiektów inżynierskich. W zachodniej części przekroju jest widoczny kontakt iłów neogeńskich z warstwą o oporności powyżej 100 Ω m, zidentyfikowaną jako piaski fluawioglacjalne (2). Na tych piaskach zalega warstwa glin wysoczyznowych (o oporności 30–50 Ω m) określona (3). Na krawędzi skarpy wysoczyzny wyróżniono nasypy (10). Część tego wydzielenia mogą stanowić utwory deluwialne i/lub koluwalne, których w analizowanych otworach wiertniczych nie stwierdzono. W piaskach rzecznych (7) występują grunty zastoiskowe. Soczewki tych gruntów, wykazujące największy kontrast właściwości

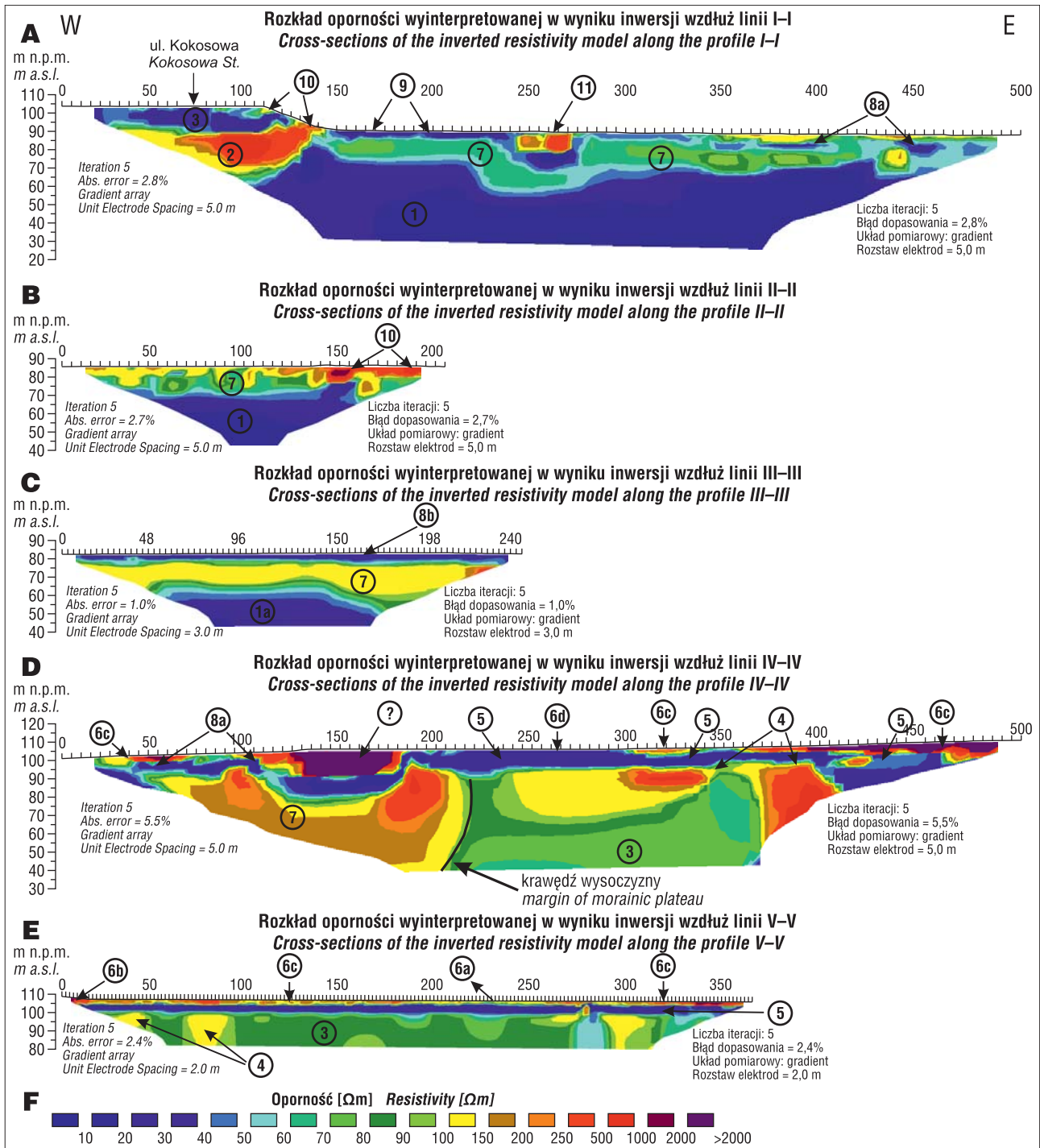


Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań wraz z przebiegiem Południowej Obwodnicy Warszawy na tle: **A** – na tle granic Polski; **B** – układu komunikacyjnego Warszawy; **C** i **D** – fragmentów Mapy Geologicznej Polski, arkusz Warszawa Wschód (Nowak, 1972)

Fig. 1. Location of the study area with the course of the Warsaw Southern Ring Road against: **A** – Polish border; **B** – Warsaw transport network; **C** and **D** – extracts of Mapa Geologiczna Polski arkusz Warszawa Wschód (Nowak, 1972)

elektrycznych z piaskami rzeczными, zostały oznaczone jako (8a). Poniżej skarpy warszawskiej, na ok. od 145 do 235 m linii pomiarowej, stwierdzono występowanie

gruntów organicznych – torfów i namułów (9). Na przekroju wyróżniono także anomalie związane z infrastrukturą techniczną (11).



Ryc. 2. Rozkład oporności wyinterpretowanej w wyniku inwersji wzdłuż linii pomiarowych. Objasnienia w tekście
 Fig. 2. Cross sections of the inverted resistivity model along the measurement profiles. Explanations in the text

Poligon II-II (ryc. 1, 2B)

W tym rejonie istotnym elementem budowy geologicznej są stosunkowo płytko występujące iły neogeńskie, na których zalegają piaski rzeczne tarasu nadzalewowego niższego (tarasu praskiego) związane ze zlodowaceniem północnopolskim. Lokalnie występują grunty antropogeniczne.

Przekrój elektrooporowy II-II (ryc. 2B) jest zlokalizowany w obrębie tarasu nadzalewowego Wisły na Błoniach Wilanowskich. W zachodniej części przekroju – prosta budowa geologiczna – na iłach neogeńskich (1) zalega

warstwa piasków rzecznych (7). Po wschodniej stronie (od 115 m linii pomiarowej) występują grunty antropogeniczne (o opornościach powyżej 200 Ω m), oznaczone jako (10), na piaskach tarasu nadzalewowego.

Poligon III-III (ryc. 1, 2C)

Przekrój elektrooporowy wzdłuż linii III-III (ryc. 2C) jest również zlokalizowany na tarasie nadzalewowym na lewobrzeżnej stronie Wisły. Najgłębiej rozpoznana warstwa jest niskooporowa, oznaczona jako (1a), i charakteryzuje się opornością w zakresie 15–35 Ω m. Strop tej

warstwy został stwierdzony najpłycej na głębokości ok. 30 m. Głębokość rozpoznania wierceniami na tym obszarze sięgała 25 m. Nie było zatem możliwe zinterpretowanie treści geologicznej tej niskooporowej warstwy na podstawie wierceń. Przepisanie treści geologicznej nastąpiło przez dowiązanie położenia jej stropu do położenia na tym obszarze stropu iłów neogeńskich, wg Atlasu geologiczno-inżynierskiego Warszawy (Frankowski i in., 2000). Powyżej warstwy zinterpretowanej jako ility neogeńskie zalegają piaski rzeczne interglacjału eemskiego i zlodowacenia północnopolskiego tarasu nadzalewowego Wisły (7). Przymierzchniowe partie terenu budują mady gliniaste (8b).

Poligon IV-IV (ryc. 1, 2D)

Po prawej stronie rzeki Wisły zostały wykonane pomiary wzdłuż linii IV-IV oraz V-V. Badania na poligonie IV-IV przeprowadzono na granicy pomiędzy tarasem nadzalewowym najwyższym (otwockim), a wysoczyzną – Równiną Wołomińską. Taras otwocki jest zbudowany z gruntów spoistych zastoiskowych, mad oraz piasków rzecznych zlodowacenia północnopolskiego i interglacjału eemskiego. Wysoczyznę, budują dwa poziomy glin zwałowych zlodowacenia środkowopolskiego, piaski moren czołowych oraz ility zastoiskowe, często nadbudowane piaskami eolicznymi, co dodatkowo utrudnia przesłedzenie krawędzi tarasu w terenie.

Po zachodniej stronie przekroju IV-IV na piaskach tarasu nadzalewowego (7) zalegają spoiste grunty zastoiskowe (8a) przykryte gruntami piaszczystymi, które przy powierzchni terenu są suche, a w partiach spągowych nawodnione (6c). W okolicy 150 m linii pomiarowej występuje wysokooporowa anomalia, która nie została jednoznacznie zidentyfikowana. Być może jest ona związana z przebiegiem jakiejś infrastruktury technicznej, oznaczonej jako (?). Wykonane pomiary ERI pozwoliły na zlokalizowanie krawędzi wysoczyzny. Po wschodniej jej stronie najstarszymi utworami w obrazie elektrooporowym są gliny lodowcowe (3). W warstwach glin, o opornościach w zakresie 60–90 Ωm , zostały stwierdzone piaski nawodnione (4), o opornościach przeważnie powyżej 100 Ωm . Utwory te są przykryte niskooporowymi (do 35 Ωm) iłami zastoiskowymi oznaczonymi na przekroju jako (5). Powyżej warstwy iłów, bezpośrednio poniżej powierzchni terenu, zostały wyinterpretowane wydzielania: piasek suchy w spągowej części nawodniony (6c), piasek nawodniony o małej miąższości na iłach (6d) (informacja uzyskana na podstawie wierceń, duży rozstaw elektrod – 5 m, nie pozwolił na jej stwierdzenie w obrazie rozkładu oporności).

Poligon V-V (ryc. 1, 2E)

Linia pomiarowa V-V została zlokalizowana na obszarze wysoczyzny. W budowie geologicznej udział biorą gliny zwałowe zlodowacenia środkowopolskiego, w których stwierdza się przewarstwienia piaszczyste o genezie wodnolodowcowej. Nad nimi zalegają utwory zastoiskowe przykryte piaskami wodnolodowcowymi i eolicznymi.

Pomiary były wykonywane przy 2-metrowym rozstawie elektrod, co pozwoliło na uzyskanie wyższej rozdzielczości, ale mniejszej głębokości rozpoznania. Najstarszymi utworami są tutaj gliny zwałowe (3), w których stwierdzono występowanie piasków nawodnionych (4). Utwory te są

przykryte ciągłą warstwą iłów zastoiskowych (5). Powyżej występują piaski suche nawodnione w spągowej części (6c). Pierwsze metry linii pomiarowej były poprowadzone po osadach wydmy i tam zostały wyinterpretowane piaski suche o opornościach powyżej 500 Ωm (6b). W środkowej części linii pomiarowej (ok. 186–250 m), bezpośrednio poniżej powierzchni terenu zostały wyinterpretowane piaski zalegające na namulach (6a). Miąższość namulów stwierdzona w wierceniach jest niewielka i wynosi 0,3–2,1 m. Występują one przeważnie w warstwie piaszczystej, miejscami zalegają bezpośrednio na gruntach spoistych i są przykryte gruntami niespoistymi.

PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule zostało przedstawione studium przypadku zastosowania metody elektrooporowej zintegrowanej z badaniami geologicznymi, w celu określenia przypowierzchniowej zmienności warunków gruntowych na potrzeby inżynierskie. Zastosowane rozstawy elektrod (2–5 m) pozwoliły na rozpoznanie podłoża umożliwiające zaprojektowanie pośredniego posadowienia obiektów inżynierskich. Generalnie należy stwierdzić zgodność pomiędzy badaniami ERI, dającymi dwuwymiarowe rozpoznanie, a informacjami uzyskanymi z wierceń. Rezultaty przedstawionej w artykule metody elektrooporowej umożliwiają uzupełnienie modelu budowy geologicznej określanego na podstawie wierceń. Obrazowanie elektrooporowe zwiększa (lub może zwiększyć) szczegółowość rozpoznania warunków gruntowo-wodnych, a co za tym idzie wpływa także na zwiększenie stopnia zgodności modelu przestrzennego z rzeczywistymi warunkami geologiczno-inżynierskimi. Autorzy napotkali szereg problemów związanych z interpretacją wyników badań, jak np. brak pewności dotyczącej rozdzielenia gruntów antropogenicznych od utworów deluwialnych, czy anomalie, które mogą wynikać z istnienia infrastruktury technicznej. Jednak nie ma to zasadniczego wpływu na stosowność tej metody, zwłaszcza w połączeniu z tradycyjnymi metodami geologicznymi, jak kartowanie geologiczne, wiercenia i sondowania.

Autorzy artykułu dziękują studentom Wydziału Geologii specjalności geologia-inżynierska oraz hydrogeologia za pomoc w przeprowadzeniu pomiarów terenowych. Aparatura Terrameter LS, produkcji szwedzkiej firmy ABEM, została zakupiona przez Wydział Geologii UW ze środków RPO woj. mazowieckiego na lata 2007–2013 w ramach Projektu pt. „Modernizacja i wyposażenie laboratoriów Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego do prowadzenia istotnych dla Mazowsza prac badawczo-rozwojowych w zakresie geoinżynierii środowiska – ETAP 1”. Dziękujemy również Recenzentom za wszelkie uwagi, które przyczyniły się do powstania ostatecznej wersji tego artykułu.

LITERATURA

- BATAYNEH A.T., AL-ZOUBI A.S. 2000 – Detection of a Solution Cavity Adjacent to a Highway in Southwest Jordan Using Electrical Resistivity Methods. *J. Environ. Eng. Geophys.*, 5 (4), 25–30. DOI: 10.4133/JEEG5.4.25.
 BULANDA J., KOZAK W., KAWA W., MACH D., CZUDEK G. 2013 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki geologiczno-inżynierskie posadowienia obiektów budowlanych Południowej Obwodnicy Warszawy na odcinku od węzła „Puławska (bez węzła) do węzła „Lubelska” (bez węzła) – od km 0+300 do km 0+880 oraz od km 3+455 do km 18+950 bez odcinka tunelowego w km 0+880 – 3+455. *Zakł. Usł. Geol. i Proj. Bud. i Ochr. Środ. Geotech Sp. z o.o., Rzeszów,*

- Nr CBDG 1018591, Inw. 2665/2014 Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa (mat. niepubl.).
- DAHLIN T., JOHANSSON S., LANDIN O. 1994 – Resistivity Surveying for Planning of Infrastructure. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1994, 509–528. DOI: 10.4133/1.2922084.
- DAHLIN T. 1996 – 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14 (7), 275–283. DOI: 10.3997/1365-2397.1996014.
- DAHLIN T., ZHOU B. 2006 – Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophys.*, 4 (2), 113–123. DOI: 10.3997/1873-0604.2005037.
- DZIERŻEK J. 2015 – Warszawa II. Zarys geologii aglomeracji warszawskiej. [W:] Dzierżek J. (red.), *Nizina Mazowiecka i obszary przyległe: 43 stanowiska geologiczne: przewodnik po geomorfologii i geologii czwartorzędowej*. Wyd. Geol. UW, 24–25.
- ERCOLI M., PAUSELLI C., FORTE E., DI MATTEO L., MAZZOCCA M., FRIGERI A., FEDERICO C. 2012 – A multidisciplinary geological and geophysical approach to define structural and hydrogeological implications of the Molinaccio spring (Spello, Italy). *J. Appl. Geophys.*, 77: 72–82. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.11.011.
- FRANKOWSKI Z., BAŻYŃSKI J., ZAWADZKI R., LEWKOWICZ M., SMAGAŁA S., WYSOKIŃSKI L., MAJER E., ŁUKASIK S., FILIPOWICZ A., SOBIECH J. 2000 – Atlas geologiczno-inżynierski Warszawy. http://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/warszawa.
- GANERØD G.V., RØNNING J.S., DALSEGG E., ELVEBAKK H., HOLMØY K., NILSEN B., BRAATHEN A. 2006 – Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 65: (3), 231–243. DOI: 10.1007/s10064-006-0041-6.
- GÓMEZ-ORTIZ D., MARTÍN-CRESPO T. 2012 – Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Eng. Geol.*, 149–150, 1–12. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.07.022.
- KACZMAREK Ł. 2014 – Geomorfologiczna i geofizyczna analiza uwarunkowań stateczności skarpy warszawskiej w rejonie Ursynowa. *Prz. Nauk. Inż. Kształt. Środ.*, 65: 215–226.
- KACZMAREK Ł., DOBAK P. 2015 – Stability conditions of the Vistula Valley attained by a multivariate approach—a case study from the Warsaw Southern Ring Road. *Geologos*, 21 (4): 249–260. DOI: 10.1515/logos-2015-0020.
- KACZMAREK Ł.D., POPIELSKI P. 2016 – Wpływ wybranych aspektów symulacji numerycznych na wyniki obliczeń stateczności Skarpy Warszawskiej w obszarze Południowej Obwodnicy Warszawy. *Inż. Mor.*, 4: 210–215.
- KOWALCZYK S., MIESZKOWSKI R. 2011 – Determination of a bottom layer of organic soil using geophysical methods at two test sites on the Polish Lowland (in Polish with English summary). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446, 191–198.
- KOWALCZYK S., CABALSKI K., RADZIKOWSKI M. 2014a – Zastosowanie metod geofizycznych w ocenie przekształceń antropogenicznych podłoża obiektów liniowych na przykładzie odcinka trasy S8 w markach koło Warszawy. *Materiały konferencyjne 5. Ogólnopolskie Sympozjum Współczesne Problemy Geologii Inżynierskiej w Polsce*, 15–17.10.2014 Lublin, s. 72.
- KOWALCZYK S., MIESZKOWSKI R., PACANOWSKI G. 2014b – Ocena stateczności wybranych fragmentów skarpy warszawskiej w świetle badań geofizycznych metodą tomografii elektrooporowej (ERT). *Prz. Geol.*, 62 (10/2): 634–640.
- KOWALCZYK S., ZAWRZYKRAJ P., MIESZKOWSKI R. 2015 – Application of electrical resistivity tomography in assessing complex soil conditions. *Geol. Quart.*, 59 (2): 367–372. DOI: 10.7306/gq.1172.
- KOWALCZYK S., CABALSKI K., RADZIKOWSKI M. 2017a – Application of geophysical methods in the evaluation of anthropogenic transformation of the ground: A case study of the Warsaw environs, Poland. *Eng. Geol.*, 216: 42–55. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.11.008.
- KOWALCZYK S., ZAWRZYKRAJ P., MAŚLAKOWSKI M. 2017b – Application of the electrical resistivity method in assessing soil for the foundation of bridge structures: a case study from the Warsaw environs, Poland. *Acta Geodynam. Geomater.*, 14/2 (186): 221–234. DOI: 10.13168/AGG.2017.0005.
- KOWALCZYK S., ŻUKOWSKA K.A., MENDECKI M.J., ŁUKASIAK D. 2017c – Application of electrical resistivity imaging (ERI) for the assessment of peat properties: A case study of the Calowanie Fen, Central Poland. *Acta Geophys.*, 65: 223–235. DOI: 10.1007/s11600-017-0018-9.
- LAMBERT D.W., ADAMS G.L., FODOR B., FENNEWALD L.E. 2013 – Use of electrical resistivity surveying to evaluate collapse potential related to road construction over a cave. *Carbon. Evaporit.*, 28 (1–2): 215–219. DOI: 10.1007/s13146-012-0109-2.
- LINDNER L., MARKS L. 2012 – O podziale klimatostatygaficznym kompleksu środkowo-wopolskiego w plejstocenie Polski. *Prz. Geol.*, 60 (1): 36–45.
- LINDNER L., MARKS L., NITA M. 2013 – Climatostratigraphy of interglacials in Poland: Middle and Upper Pleistocene lower boundaries from a Polish perspective. *Quatern. Internat.*, 292: 113–123. DOI: 10.1016/j.quaint.2012.11.018.
- LINES L.R., TREITEL S. 1984 – Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophys. Prospect.*, 32: 159–186. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1984.tb00726.x.
- LOKE M.H. 1996–2002 – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomo Software*.
- LOKE M.H. 2001 – Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys: RES2DINV Manual*, Geotomo Software, Malaysia.
- LOKE M.H., ACWORTH I., DAHLIN T. 2003 – A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Explorat. Geophys.*, 34: 182–187.
- LOKE M.H., 2011 – Electrical resistivity surveys and data interpretation. in Gupta H. (red.), *Solid Earth Geophysics Encyclopaedia (2nd Edition) “Electrical & Electromagnetic”* Springer-Verlag, 276–283.
- LOKE M.H., CHAMBERS J.E., RUCKER D.F., KURAS O., WILKINSON P.B. 2013 – Recent developments in the directcurrent geoelectrical imaging method. *J. Appl. Geophys.*, 95: 135–156.
- MARKS L., DZIERŻEK J., JANISZEWSKI R., KACZOROWSKI J., LINDNER L., MAJECKA A., MAKOS M., SZYMANEK M., TOŁOCZKO-PASEK A., WORONKO B. 2016 – Quaternary stratigraphy and palaeogeography of Poland. *Acta Geol. Pol.*, 66 (3): 410–434. DOI: 10.1515/agp-2016-0018.
- MAŚLAKOWSKI M., KOWALCZYK S., MIESZKOWSKI R., JÓZEFIAK K. 2014 – Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) as a tool in geotechnical investigation of the substrate of a highway. *Stud. Quatern.*, 31 (2): 83–89. DOI: 10.2478/squa-2014-0008.
- NGAN-TILLARD D., VENMANS A., SLOB E., MULDER A. 2010 – Total engineering geology approach applied to motorway construction and widening in the Netherlands: Part II: Pilot site in tidal deposits. *Eng. Geol.*, 114 (3–4): 171–180. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.04.015.
- NOWAK J. 1972 – Mapa Geologiczna Polski, A – Mapa utworów powierzchniowych, Inst. Geol., za http://cbdgmapa.pgi.gov.pl/arcgis/services/kartografia/mgp200k_a/MapServer/WMServer.
- NOWAK J. 1978 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, ark. Okuniew (525), Inst. Geol.
- OSINOWO O.O., AKANJI A.O., AKINMOSIN A. 2011 – Integrated geophysical and geotechnical investigation of the failed portion of a road in Basement Complex terrain, south-western Nigeria. *RMZ – Mat. Geoenviron.* 58 (2): 143–162.
- POŻARYSKI W. 1963 – Jednostki geologiczne Polski. *Prz. Geol.*, 11 (1): 4–10.
- RODZIOCH A., KUŚMIERZ A., SAWICKA-SIARKIEWICZ H., BORZYSZKOWSKI J., BESTYŃSKI Z., DOBKOWSKA A., GÓRKA J., KRUK L., LEŚNIAK J., OFICJALSKA H., PACHOLEWSKI A., TKACZYK A. 2006 – Zasady sporządzania dokumentacji określających warunki hydrogeologiczne w związku z projektowaniem dróg krajowych i autostrad. *Poradnik metodyczny*. Min. Środ., Warszawa 60.
- SAMOUELIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUAND A., RICHARD G. 2005 – Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till. Res.*, 83 (2): 173–193. DOI: 10.1016/j.still.2004.10.004.
- SARNACKA Z. 1976 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, ark. Piaseczno (560), Inst. Geol.
- SARNACKA Z. 1980 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, ark. Warszawa Wschód (524), Inst. Geol.
- SARNACKA Z. 1992 – Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. *Pr. Państw. Inst. Geol.*
- WIŚN R., CHRISTIANSEN A., DAHLIN T., AUKEN E. 2008 – Experience from Two Resistivity Inversion Techniques Applied in Three Cases of Geotechnical Site Investigation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 134 (12): 1730–1742. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:12(1730).
- VAN OVERMEEREN R.A., RITSEMA I.L. 1988 – Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6 (10): 313–324. DOI: 10.3997/1365-2397.1988017.
- ZARZĄDZENIE nr 58 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dn. 23 listopada 2015 r.; <http://www.gddkia.gov.pl/pl/2663/Rok-2015>.
- ZHOU W., BECK B.F., ADAMS A.L. 2002 – Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environ. Geol.*, 42: 922–928.
- ZINI L., CALLIGARIS C., FORTE E., PETRONIO L., ZAVAGNO E., BOCCALI C., CUCCHI F. 2015 – A multidisciplinary approach in sinkhole analysis: The Quinis village case study (NE-Italy). *Eng. Geol.*, 197: 132–144. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.07.004.