

Rola obrazowania elektrooporowego w uszczegółowieniu skomplikowanej budowy geologicznej wzgórza Morasko w Poznaniu

Grzegorz Pacanowski¹, Marta Sokołowska¹, Radosław Mieszkowski²



G. Pacanowski



M. Sokołowska



R. Mieszkowski

Geoelectrical imaging of complex geological structures of the Morasko Hill in Poznań. *Prz. Geol.*, 64: 238–244.

Abstract. The paper focuses on the problem of developing reliable geological models based on point data from boreholes and two-dimensional results of geophysical surveys with application of electrical resistivity tomography (ERT). The study area was the Morasko Hill in Poznań (Poland), located within frontal moraines overlying Pliocene clays with a top surface strongly deformed glaciotectionally. Due to the presence of these deformations, the study area shows a complex geological structure. Analysis of archival boreholes indicates that the top surface of the Pliocene clays is extremely variable, hampering unequivocal determination of geological boundaries.

ERT measurements were used to recognize the detailed geological structure of the area. Next, additional boreholes and CPTU soundings were made in selected localities characterized by anomalies in the distribution of electrical resistivity values. Following the drillings and soundings, and the results of the geophysical survey were reinterpreted. Such complex methodology of field work, including geophysical and geological surveys, has allowed us to present a reliable geological model of the area, in which the ERT results coincide with the drilling results. In practice, the preparation of an appropriate geological model, particularly in the vicinity of escarpments and slopes, is indispensable for designers of construction objects in the selection of foundations and analysis of slope stability.

Keywords: electrical resistivity tomography (ERT), geological model, glaciotectionic deformations

Rozpoznanie podłoża gruntowego na obszarach zaburzonych glacitektonicznie jest niewystarczające wg standardowych zasad stosowanych w geologii inżynierskiej. Wszelkie inwazyjne metody badania podłoża (wiercenia i sondowania) mają charakter punktowy i nie pozwalają na szczegółowe określenie morfologii stropu utworów zaburzonych glacitektonicznie, ponieważ głębokość ich występowania jest bardzo zmienna nawet na niewielkich odległościach. W niniejszym artykule przedstawiono jedną z możliwości kompleksowej oceny podłoża w warunkach skomplikowanej budowy geologicznej – w tym przypadku zdeformowanego glacitektonicznie stropu ilów plioceńskich, który jest przykryty zróżnicowanymi litologicznie osadami czwartorzędowymi – z zastosowaniem wierceń i sondowań jako badań podstawowych oraz geofizycznych, uzupełniających na każdym etapie prac.

Celem wykonanych badań było rozpoznanie warunków geologiczno-inżynierskich zbrocza na potrzeby oceny stateczności wzgórza Morasko. Ponieważ położenie granicy osadów czwartorzędowych i neogeńskich z punktu widzenia lokalizacji ewentualnej powierzchni poślizgu jest kluczowe, istotne było jak najdokładniejsze określenie stropu ilów plioceńskich.

Zaprojektowana ścieżka badawcza obejmowała następujące etapy:

- wykonanie badań geofizycznych w fazie projektu badań geologicznych w celu wstępnego ogólnego rozpoznania budowy geologicznej i skorelowania ich z dostępnymi badaniami archiwalnymi;

- wykonanie otworów wiertniczych w miejscach, w których stwierdzono anomalne rozkłady mierzonych paramet-

trów fizycznych podłoża, dla skorelowania ich z badaniami geofizycznymi oraz pobrania próbek gruntów do badań laboratoryjnych;

- wykonanie sondowań statycznych CPTU do oceny parametrów fizyczno-mechanicznych ośrodka gruntowego;

- wykonanie reinterpretacji badań geofizycznych w do-
wiązaniu do wykonanych otworów badawczych i sondowań;

- wykonanie dodatkowych badań geoelektrycznych w celu uszczegółowienia budowy geologicznej w miejscach wytypowanych na podstawie wstępnego modelu geologicznego.

OPIS TERENU BADAŃ

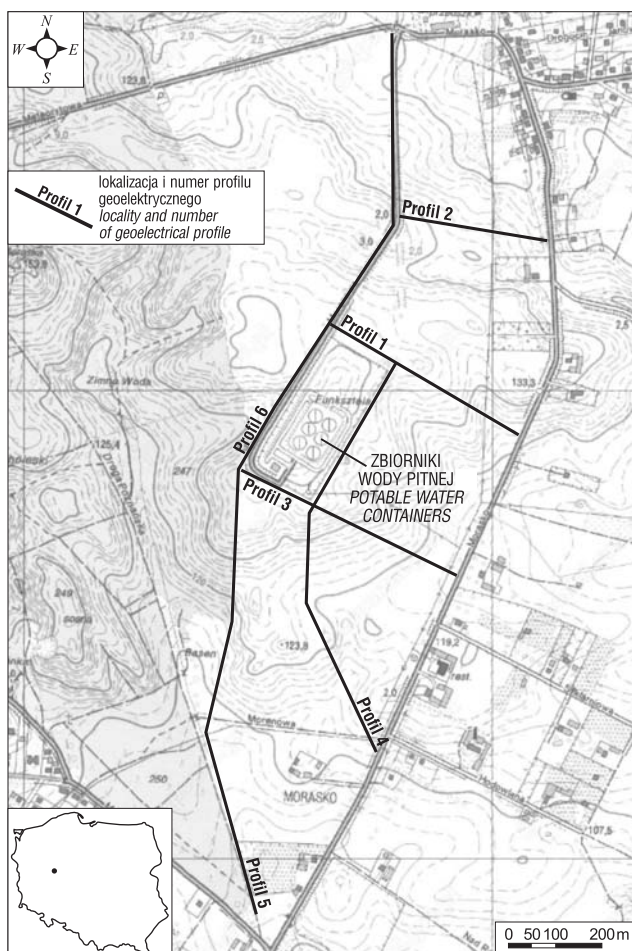
Teren badań (ryc. 1) jest położony na wschodnim stoku wzgórza Morasko (153,8 m n.p.m.) w granicach miasta Poznania. W kierunku północnym opada łagodnie, zaś w południowo-wschodnim dość stromo. Deniwelacje na tym obszarze wynoszą maksymalnie ok. 40 m. Badaniami geofizycznymi objęto teren o powierzchni 110 ha, wykonując na nim 6 profili tomografii elektrooporowej (ERT) o łącznej długości ok. 4 km (ryc. 1). Na tym obszarze w szczytowej jego części znajdowały się zbiorniki wody pitnej, a teren przyległy do nich leży w strefie zagrożenia awarią obiektów wodociągowych.

BUDOWA GEOLOGICZNA

Wzgórze Morasko stanowi kulminację pasma wzgórz moreny czołowej stadiału poznańskiego zlodowacenia Wisły (zlodowacenia północnopolskie) powstałej w wy-

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975, Warszawa; grzegorz.pacanowski@pgi.gov.pl, marta.sokolowska@pgi.gov.pl.

² Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; r.mieszkowski@uw.edu.pl.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru objętego badaniami oraz ciągów tomografii elektrooporowej (ERT)

Fig. 1. Location of the study area and electrical resistivity tomography (ERT) profiles

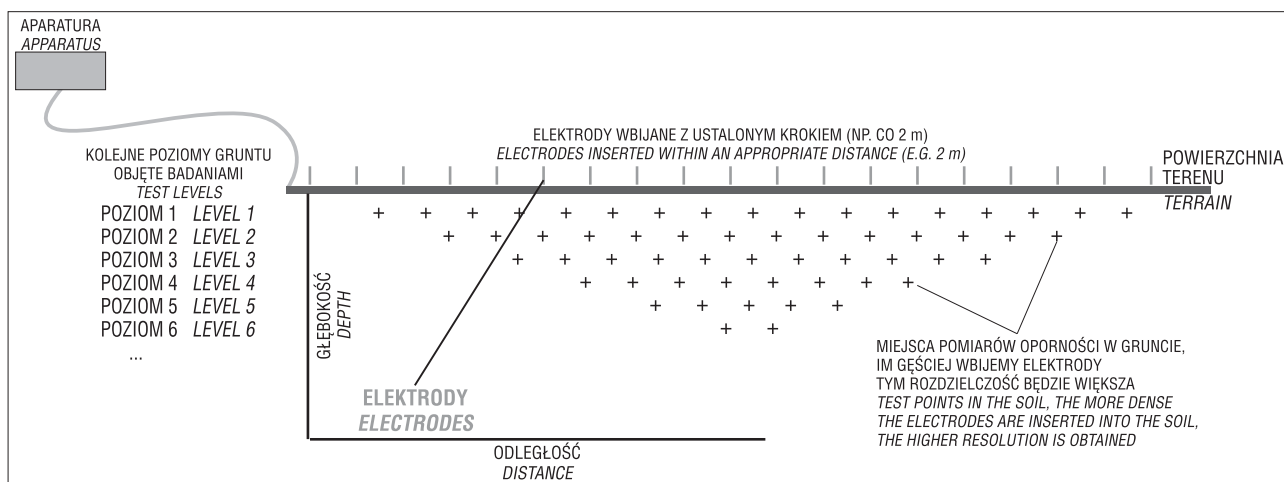
niku glaciektonicznego spiętrzenia utworów neogenu. Ogólny model geologiczny obszaru badań scharakteryzowano na podstawie archiwalnych map seryjnych Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (Chmał, 1990; Dąbrowski i in., 2000), danych z Atlasu geologiczno-inżynierskiego Poznania (Musiatowicz i in., 2007) oraz archiwalnej dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Frankowski i in., 2013). Wzgórze jest zbu-

dowane z plejstocenijskich piasków i żwirów czołowo-morenowych. Miąższość tych osadów wynosi kilkanaście metrów. Osady morenowe leżą na utworach zlodowacenia wisły (fazy poznańskiej) wykształconych w postaci glin, piasków gliniastych z domieszką kamieni i przewarstwieniami piasków. Lokalnie w tych glinach mogą występować głązy narzutowe. Poniżej osadów lodowcowych plejstocenu zalegają utwory neogenu – jeziorne osady plicocenu wykształcone w postaci ilów, niekiedy z soczewkami piasków barwy szaroniebieskiej lub szarozielonej. Osady te miejscowo wyłaniają się na powierzchni i charakteryzują dużym zróżnicowaniem parametrów fizyczno-mechanicznych oraz znacznym obniżeniem parametrów wytrzymałościowych w strefach zluźnień i złuskowań (Dyjur, 1977).

CHARAKTERYSTYKA METODY TOMOGRAFII ELEKTROOPORWEJ (ERT)

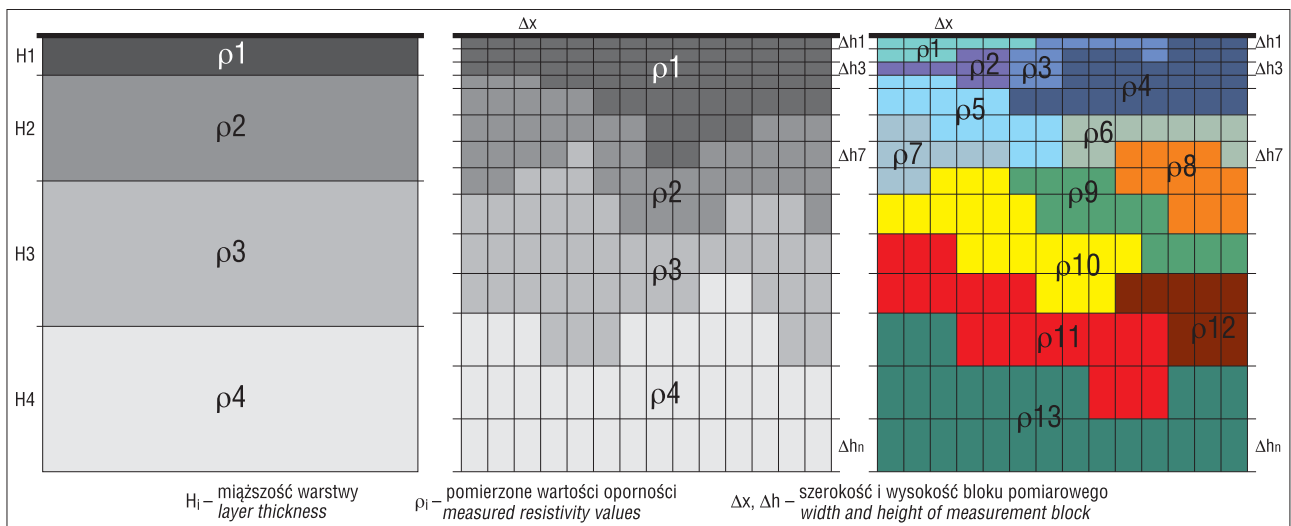
Metoda tomografii elektrooporowej (ERT – *Electrical Resistivity Tomography*) jest zdaniem autorów jedną z najbardziej wszechstronnych metod geofizycznych w badaniach płytkiej geologii – do 100–150 m p.p.t., szczególnie w badaniach utworów czwartorzędowych i podczwartorzędowych. Dzięki swym unikatowym cechom, takim jak: szeroka rozpiętość zasięgu głębokościowego (w zależności od metodyki prowadzenia prac – od kilku do kilkuset metrów), szczegółowości i dokładności odwzorowania (obrazowania) ośrodka geologicznego, a także szerszemu niż w innych metodach zakresowi stosowalności, metoda ta na stałe weszła do kanonu metod geofizycznych.

Założenia ERT są opisane w pracach: Kelera i Frischknechta (1966), Loke'a i Barkera (1996), Loke'a (2004), Loke'a i in. (2007). Tomografia elektrooporowa jest z powodzeniem stosowana w geologii również w Polsce, m.in. do określania budowy geologicznej (Kowalczyk i in., 2015) na potrzeby oceny stateczności skarp (Kowalczyk i in., 2014), w geologii inżynierskiej (Bestyński, 2011) oraz w budownictwie (Pacanowski i in., 2014). Bazuje ona na zjawisku przepływu stałego prądu elektrycznego przez ośrodek skalny, a przedmiotem rozpoznania jest przestrzeń ośrodka geologicznego, która w większości układów pomiarowych znajduje się poniżej elektrod potencjałowych. Uproszczony schemat pomiarowy przedstawiono na rycinie 2.



Ryc. 2. Schemat metodyki pomiarów tomografii elektrooporowej

Fig. 2. Electrical resistivity tomography measurement scheme



Ryc. 3. Modele geoelektryczne wykorzystywane w procesie interpretacji
 Fig. 3. Geoelectrical models used in the interpretation process

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

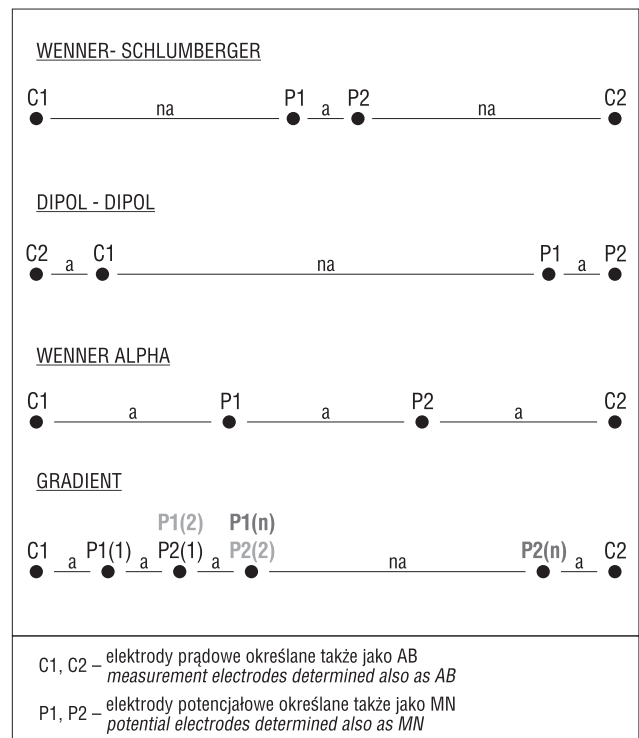
W Polsce przez lata najczęstszym typem stosowanych badań geoelektrycznych były pionowe sondowania elektrooporowe (określane skrótowo jako SGE, lub VES) oraz metoda profilowań elektrooporowych (PE). Wspólną cechą obu metod była ich „jednowymiarowość”, tzn. określenie zmian oporności elektrycznej ośrodka jedynie w pionie (sondowania) lub w poziomie (profilowania). Konsekwencją takiego sposobu pomiarów były znaczne ograniczenia interpretacyjne, zwłaszcza w przypadku warstw zaburzonych, ponieważ podstawowe założenie dla metody pionowych sondowań elektrooporowych – płasko-równoległe zaleganie warstw geologicznych – nie było spełnione.

W tomografii elektrooporowej (ERT) istnieje możliwość stworzenia modelu zmiennego zarówno w pionie, jak i w poziomie. Właściwość ta powoduje, że badania tego typu określa się jako badania dwuwymiarowe – 2D. Dla zaburzeń glacictektonicznych, gdzie zmienność geologii jest duża i mało przewidywalna, tego typu metodyka daje zadawalające rezultaty, co zostanie przedstawione poniżej w wynikach prac.

Na rycinie 3. przedstawiono trzy modele geoelektryczne. Pierwszy (po lewej) to prosty model 1D – otrzymywany w wyniku interpretacji pionowych sondowań elektrooporowych, oparty na płasko-równoległym zaleganiu warstw różnych opornościowo (Rudzki & Krawiec, 2007).

Drugi z modeli (środkowy) jest rozwinięciem pierwszego – warstwy jednak nie są w nim płasko-równoległe. Jest to model prosty – 2D dla metody tomografii elektrooporowej.

Trzeci z nich – odpowiadający największej zmienności ośrodka geologicznego – to model 2D, w którym oporności zmieniają się zarówno w pionie, jak i w poziomie. Jest to zaawansowany model 2D, wykorzystywany w procesie przetwarzania danych w metodzie tomografii elektrooporowej. Taka budowa modelu pozwala na zobrazowanie bardziej skomplikowanych struktur geologicznych, których

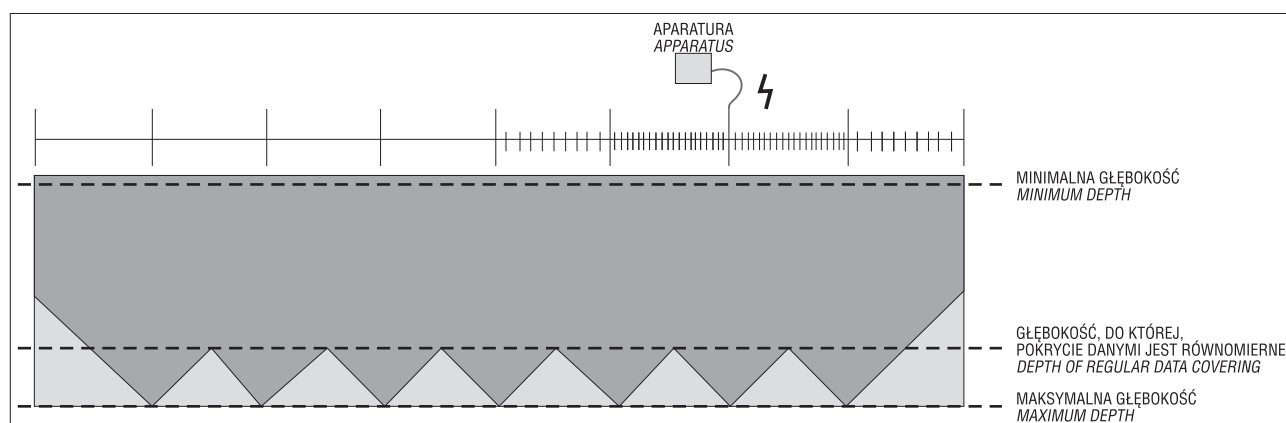


Ryc. 4. Przykłady schematów pomiarowych wykorzystywanych przy pomiarach ERT
 Fig. 4. Examples of measurement arrays used in the ERT method

opisanie tradycyjnie stosowanym układem płasko-równoległych warstw jest często niemożliwe.

Istnieje kilka metod przetwarzania takich modeli, ale zasada jest zawsze podobna, stosuje się tu podział blokowy, gdzie oczko bloku o wymiarach Δx na Δh_n określa zmierzoną wartość (bądź kilka wartości) oporności. Przy czym szerokość oczka w poziomie Δx jest najczęściej stała dla całego profilu, natomiast szerokość oczka w pionie Δh – zmienna (Rudzki & Krawiec, 2007). Zmiana następuje wraz z głębokością – wielkość oczka wzrasta.

Przygotowane do modelu dane wejściowe (dane polowe) muszą być jak najlepszej jakości. Z racji tego, że proces akwizycji danych jest w pełni automatyczny, przed wykonaniem badań należy dobrać: odpowiedni protokół



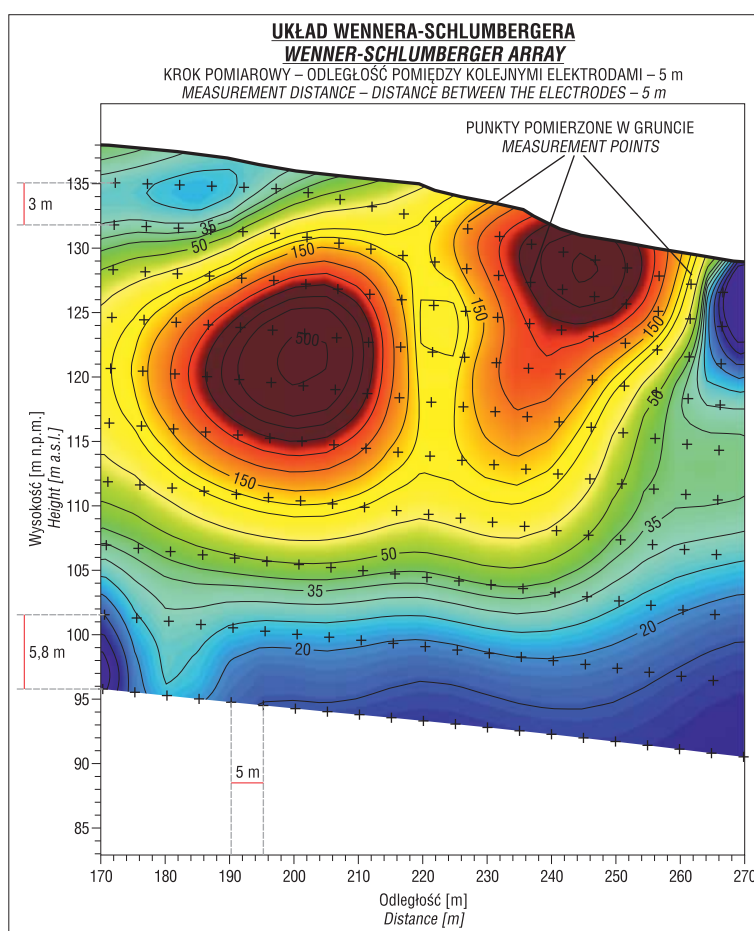
Ryc. 5. Schemat pokrycia danymi badanego ośrodka wzdłuż linii pomiarowej ERT
Fig. 5. Data-coverage scheme along the ERT line

pomiarowy, zakres prądu, zadbać o dobre uziemienie elektrod (aparatury dają możliwość pomiaru i ewentualnego poprawienia uziomu każdej elektrody), wyeliminować zakłócenia, a także wprowadzić odpowiednie filtry składania i redukcji błędów.

Liczba możliwych do wykonania w ten sposób pomiarów jest stosunkowo duża – w praktyce jest to nawet kilka tysięcy na 1 km profilowania. Wymusza to stosowanie zaawansowanych aparatów pomiarowych z możliwością automatycznego sterowania procesem akwizycji i rejestracji danych. Nowoczesne sprzęty dają też możliwość pomiarów wielokanałowych. Trzeba jednak nadmienić, że w przypadku wykonywania badań w wariancie pomiarów wielokanałowych nie ma możliwości zastosowania wszystkich układów pomiarowych (Dahlin & Zhou, 2004). Schemat czterech najbardziej popularnych schematów pomiarowych przedstawiono na rycinie 4. Stosowanie każdego z układów ma swoje wady i zalety. W literaturze istnieje wiele prac porównujących wszystkie te układy (Loke i in., 2007), ale zastosowanie konkretnego w dużej mierze zależy od zadania, które jest do wykonania.

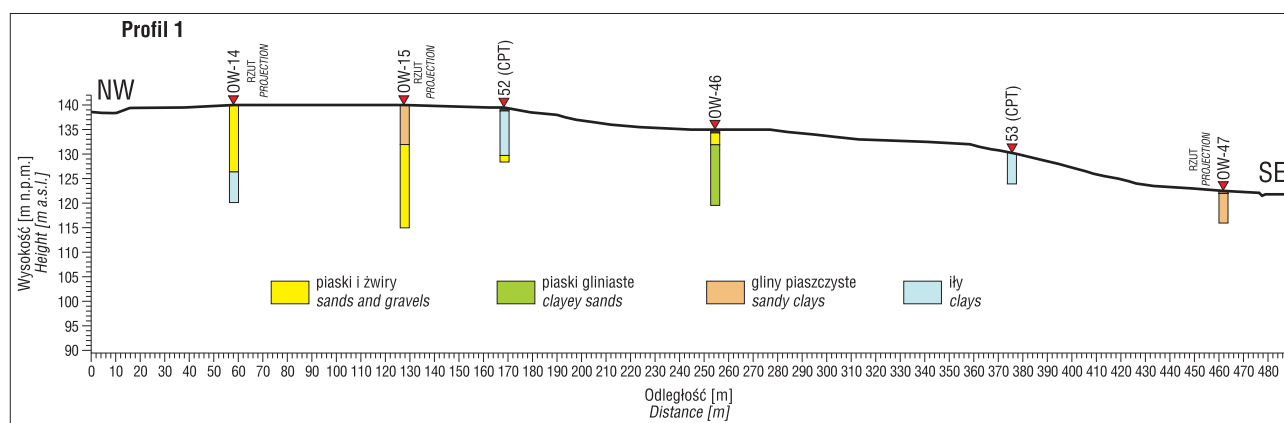
W przypadku badań opisanych w niniejszym artykule zdecydowano się na wybranie układu Wennera-Schlumbergera, który charakteryzuje się znacznie większą liczbą punktów pomiarowych w stosunku do układu Wennera. Układ ten daje możliwość pomiarów tylko jednokanałowych. Pomiar wykonano aparaturą Terrameter LS (prod. ABEM, Szwecja). Założono, że głębokość rozpoznania wyniesie maksymalnie ok. 30–40 m p.p.t. Badania geoelektryczne zaprojektowano w taki sposób, żeby osiągnąć zakładaną głębokość.

Profile geoelektryczne wykonano z 5-metrowym rozstawem elektrod, co dało głębokość prospekcji dla obszaru całkowitego pokrycia przekroju danymi do ok. 30–40 m p.p.t. Na rycinie 5. zaprezentowano schemat pokrycia danymi badanego ośrodka wzdłuż linii pomiarowej ERT oraz sposób akwizycji danych, w którym badanie dowolnie długiego odcinka odbywa się poprzez przenoszenie kolejnych kabli na czoło profilu (*Roll Along*). Przyjęty układ pomiarowy umożliwił uzyskanie rozdzielczości w poziomie wynoszącej ok. 5 m, natomiast w pionie: w górnych częściach

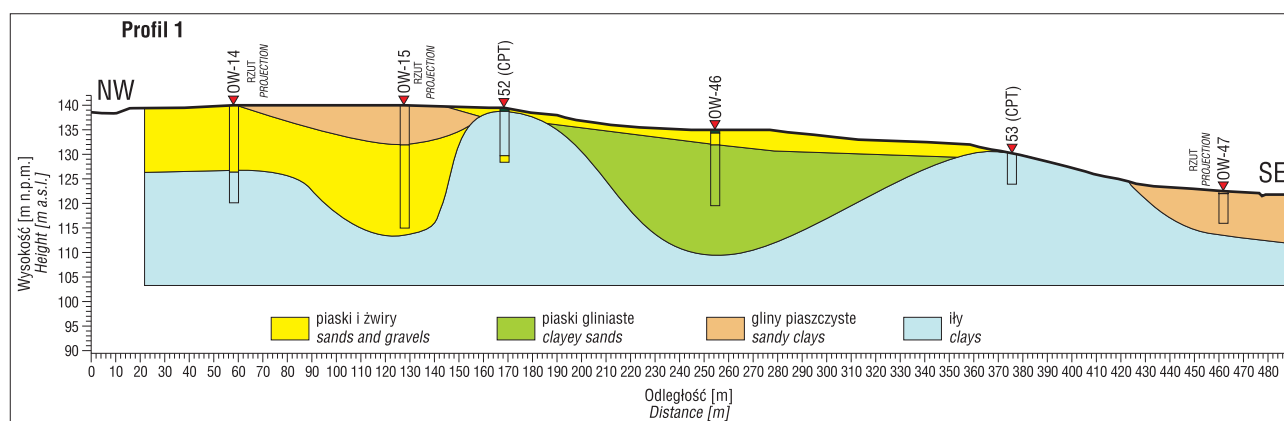


Ryc. 6. Fragment profilu z zaznaczonymi miejscami pomiarów (czarne krzyżyki)
Fig. 6. Part of the profile with measurement points (black crosses)

przekroju – 3 m, a w dolnych – 6 m. Fragment profilu wraz z zaznaczonymi punktami po inwersji przedstawiono na rycinie 6. Aparatura ABEM daje możliwość eksportu plików pomierzonych wartości w postaci rezystancji gruntu. Taka forma umożliwia wprowadzenie przestrzennego położenia każdej elektrody, którą otrzymujemy w wyniku pomiarów GPS, systemem RTK (*Real Time Kinematic*). Na tej podstawie zostaje wyliczony współczynnik geometryczny K i oporność pozorna. Dopiero taki plik zostaje zaimportowany do programu, który daje możliwość obliczenia wartości oporności rzeczywistych. Autorzy do przetwarzania danych używają programów Res2Dinv oraz



Ryc. 7. Przekrój nr 1 z naniesionymi profilami wierceń
Fig. 7. Profile No. 1 with borehole sections



Ryc. 8. Przepuszczalny przekrój geologiczno-inżynierski wzdłuż profilu nr 1
Fig. 8. Possible cross-section interpretation along profile No. 1

2XPII. Po procesie inwersji otrzymano ostateczny przekrój opornościowy i był on podstawą do interpretacji.

WYNIKI BADAŃ

Na podstawie rozkładu wartości oporności oraz zmienności oporności ośrodka gruntowego na badanym terenie rozróżniono następujące kategorie litologiczne (Frankowski i in., 2013):

- ośrodek o oporności od 25 do 70 Ωm – są to gliny, gliny piaszczyste i pylaste;
- ośrodek o oporności poniżej 25 Ωm (lokalnie 5–10 Ωm) – odpowiada utworom ilastym.

Jako granicę czwartorzęd/ropy plioceńskie przyjęto wartość oporności 25 Ωm . Po tej izolacji poprowadzono linię wyznaczającą strop ropy plioceńskich.

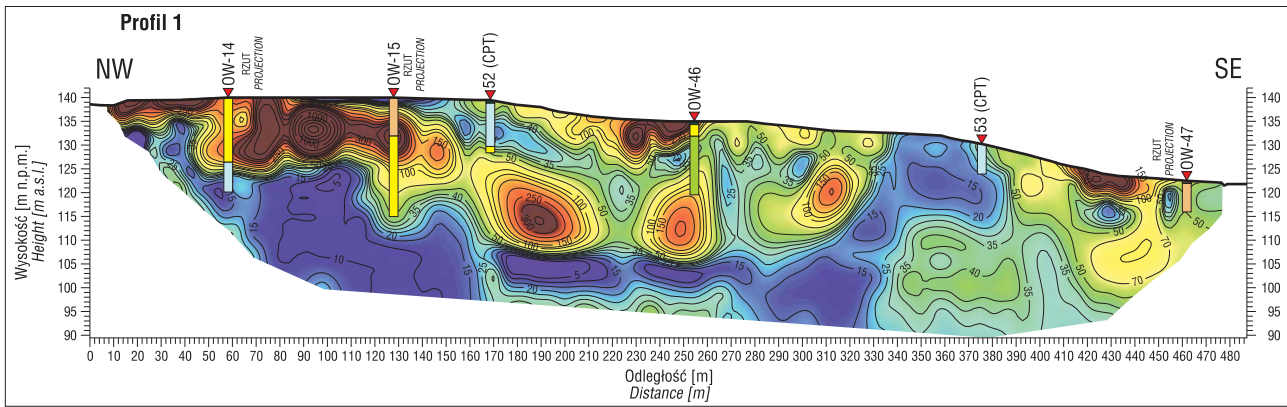
Uzasadniając zasadności zastosowania badań geofizycznych do uszczegółowienia skomplikowanej budowy geologicznej, na potrzeby niniejszej pracy przyjęto wstępne założenie, że dla ustalenia modelu geologicznego wzgórza Morasko nie wykonano badań geofizycznych, a jedynie klasyczne (punktowe) metody rozpoznania podłoża, tj. wiercenia i sondowania CPTU (*Cone Penetration Testing*). Na przekroju nr 1 (ryc. 7) zestawiono wyniki wykonanych wierceń i sondowań z uwzględnieniem morfologii terenu. W kolejnym etapie autorzy w ramach eksperymentu wyrysowali granice geologiczne wyłącznie na podstawie wyników wierceń i sondowań (ryc. 7). Zastosowali klasyczną metodę łączenia warstw pomiędzy punktami badawczy-

mi, uzyskali przekrój geologiczny w formie zaproponowanej na rycinie 8.

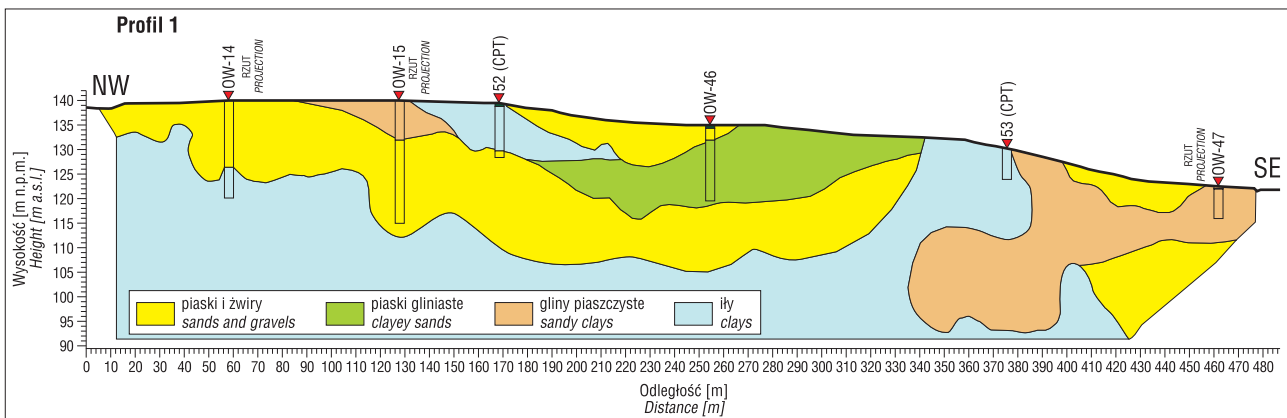
W celu weryfikacji modelu budowy geologicznej dane geologiczne (wiercenia i sondowania CPTU) skorelowano z opracowanymi wynikami pomiarów geofizycznych metodą ERT. Sam obraz rozkładu oporności elektrycznej uzyskany za pomocą metody ERT nie daje dokładnego położenia granic fizycznych. Interpolowane granice mogą być nieznacznie przesunięte w stosunku do zarejestrowanych wartości – do kilku metrów w zależności od warunków.

Dopiero skorelowanie wyników pomiarów elektrooporowych z istniejącymi wierceniami i sondowaniami pozwoliło na uściślenie przebiegu granic geologicznych pomiędzy warstwami o różnych opornościach elektrycznych. Na rycinie 9. zilustrowano efekt tego działania dla wybranego profilu nr 1, którego lokalizację przedstawiono na rycinie 1. Widoczna jest tu duża zmienność stref różnorodności opornościowo, co jest charakterystyczne dla stref zaburzeń glaciektonicznych. W konsekwencji uzyskano odmienną interpretację geologiczną (ryc. 10) w stosunku do tej, która nie uwzględniała wyników badań geofizycznych.

W rzeczywistości w analizowanym profilu nr 1 udział utworów piaszczystych jest znaczny, a stwierdzone w badaniach bezpośrednich (CPT-52) utwory ilaste stanowią porwak starszego podłoża, a nie jego zdeformowany strop w postaci pojedynczego fałdu. Po uwzględnieniu wyników badań geofizycznych uzyskano także inne rozprzestrzenienie utworów czwartorzędowych w poziomie, np. pomiędzy otworem OW-47 a CPT-53 lub OW-46 a CPT-53. Mając na uwadze fakt, że wiele rozwiązań projektowych zależy od



Ryc. 9. Przekrój geoelektryczny nr 1 z naniesionymi profilami otworów i sond CPTu
Fig. 9. Geoelectrical cross-section along profile No. 1 with borehole sections and CPTu



Ryc. 10. Przekrój geologiczno-inżynierski wzdłuż profilu nr 1, po uwzględnieniu danych z badań geoelektrycznych
Fig. 10. Cross-section along profile No. 1 after reinterpretation using geoelectrical data

położenia i nachylenia stropu iłów plicieńskich na badanym obszarze (np. zagłębienie ścian szczelinowych) lub jak bardzo ich położenie wpływa na zagadnienia stateczności skarp z punktu widzenia lokalizacji ewentualnej powierzchni poślizgu, istotne jest jak najdokładniejsze odzwierciedlenie rzeczywistych warunków geologicznych w podłożu. W analizowanym przypadku badania geofizyczne wniosły ważne informacje o budowie geologicznej badanego terenu, w szczególności w skomplikowanych warunkach gruntowych, gdzie zmienność jest tak duża, że uzyskanie wiarygodnego modelu geologicznego z zastosowaniem punktowych metod badawczych jest niemożliwe przy użyciu tradycyjnych rozstawów. Dzięki tej metodzie oraz przyjętej ścieżce badawczej z uwzględnieniem danych z badań bezpośrednich (wierceń i sondowań) możliwe było wyinterpretowanie przebiegu warstw geologicznych pomiędzy otworami wiertniczymi i sondowaniami. Charakterystyka opornościowa utworów budujących wzgórze jest na tyle kontrastowa, że pozwoliła na interpretację przebiegu zaburzeń glaciektonicznych. Widać bardzo duże deniwelacje stropu iłów, dochodzące do kilkudziesięciu metrów.

PODSUMOWANIE

Bardzo dobra korelacja badań geofizycznych z wynikami wierceń potwierdza dużą skuteczność metody tomografii elektrooporowej (ERT). Jak pokazują doświadczenia autorów, metoda ta sprawdza się w uszczegóławianiu mo-

delu geologicznego podłoża o skomplikowanej budowie. W analizowanym przypadku pozwoliła ona dokładniej określić przebieg zdeformowanego glaciektonicznie stropu iłów plicieńskich, co stanowiło niezbędną informację odnośnie oceny stateczności wzgórze. Dzięki temu, że uzyskany z zastosowaniem tomografii elektrooporowej obraz budowy geologicznej został potwierdzony badaniami bezpośrednimi, możliwe było wyinterpretowanie na jej podstawie przebiegu granic geologicznych pomiędzy otworami wiertniczymi, czego nie można byłoby uzyskać z zastosowaniem wyłącznie metod inwazyjnych (wierceń i sondowań). Zdaniem autorów metoda ERT stanowi cenne uzupełnienie badań geologicznych, zwłaszcza w skomplikowanych warunkach gruntowych, pod warunkiem skorelowania jej z wynikami wierceń.

Autorzy pragną serdecznie podziękować Recenzentowi za poświęcony czas oraz wkład włożony w powstanie ostatecznej wersji artykułu. Publikacja powstała w ramach tematu „Prowadzenie i aktualizacja Bazy Danych Geologiczno-Inżynierskich (BDGI) wraz ze sporządzeniem Atlasu geologiczno-inżynierskiego wybranych obszarów kraju w skali 1 : 10 000” (22.1109.1301.03.1).

LITERATURA

- BESTYŃSKI Z. 2011 – Metody geofizyczne w geologii inżynierskiej, Biul. Państw. Inst. Geol., 446: 175–182.
CHMAL R. 1990 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Poznań z objaśnieniami. PIG-PIB.
DAHLIN T. & ZHOU B. 2004 – A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays, Geophys. Prospect., 52: 379–398.

- DĄBROWSKI S., TRZECIAKOWSKA M. & STRABURZYŃSKA R. 2000 – Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Poznań z objaśnieniami. PIG-PIB.
- DYJOR S. 1977 – Uwagi o wpływie obszarów zaburzonych glacictonicznie na warunki geotechniczne górotworu. Badania Geologiczne Struktur Glacictonicznych: II Sympozjum Glacictoniki, Zielona Góra, 25–38.
- FRANKOWSKI Z., MAJER E., SOKOŁOWSKA M., BARAŃSKI M., PIETRZYKOWSKI P., ROGUSKI A., PACANOWSKI G., CZARNIAK P., WOLSKI W., SAMEL B., KOCH D., MAKOWSKI K., MIROWSKA A., SALWOWSKI R. & RÓGOWSKA A. 2013 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla potrzeb opracowania ekspertyzy w zakresie badań stateczności wzgórze Morasko w aspekcie jego planowanego zagospodarowania. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- 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: 634–640.
- KOWALCZYK S., ZAWRZYKRAJ P. & MIESZKOWSKI R. 2015 – Application of electrical resistivity tomography in assessing complex soil conditions. Geol. Quart., 59: 125–133.
- 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: 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, 1: 1–4.
- MUSIATEWICZ M., KATRYŃSKI W., ŁADOŃ A., KACPRZAK L., BĄK T., DZIASEK A., BUJNOWSKI K., BUJNOWSKA S., KOCÓJ A., KROPP J., DYSZY A., KECZMERSKI A. & KOŁPACZYŃSKI M. 2007 – Atlas geologiczno-inżynierski Poznania. Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych, Przedsiębiorstwo Geodezyjne i Geologiczno-Fizjograficzne Geoprojekt, Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- PACANOWSKI G., CZARNIAK 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. Quatern., 31: 91–99.
- RUDZKI M. & KRAWIEC A. 2007 – Ocena zanieczyszczenia wód podziemnych z wykorzystaniem metody tomografii elektrooporowej. Współczesne problemy hydrogeologii, 13 (2): 335–343, Kraków.