

Identyfikacja zagrożenia wystąpienia przebieć hydraulicznych w podłożu obiektów kubaturowych za pomocą nieinwazyjnych metod badawczych

Anna Błaszczak, Kamil Zając – Koło Naukowe Geoinżynierii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Dr inż. Zdzisław Skutnik – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Dr Radosław Mieszkowski – Uniwersytet Warszawski

Mgr Anna Tryfon-Bojarska, mgr Dawid Koch – Zespół R&I Skanska S.A.

Dobre rozpoznanie warunków geotechnicznych, a następnie właściwe zaprojektowanie, wykonanie oraz eksploatacja obiektu budowlanego deweloperskiego jest gwarancją jego niezawodności i funkcjonowania przez długie lata. Dotyczy to zarówno prostych, jak i złożonych warunków gruntowych oraz samej budowli, a więc czynników decydujących o kategorii geotechnicznej. Coraz częściej w budownictwie deweloperskim, w celu zapewnienia odpowiedniej liczby miejsc parkingowych, budowane są garaże i kondygnacje podziemne, które najczęściej posadowione są poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej. W niektórych przypadkach wypór wody nie jest zrównoważony ciężarem konstrukcji i samego obiektu. Wtedy szczególnie ważne jest bardzo dokładne rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych.

Głównymi sposobami zbadania podłoża są metody bezpośrednie (wiercenia oraz sondowania), które umożliwiają punktowe określenie zmienności litologicznej oraz parametrów fizyko-mechanicznych gruntów. W celu pełniejszego rozpoznania podłoża między otworami stosuje się metody geofizyki otworowej i powierzchniowej.

W niniejszym artykule przeanalizowano możliwość zintegrowania badań geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych z pomiarami geofizycznymi wykonanymi metodą tomografii elektrooporowej w przypadku projektu deweloperskiego w skomplikowanych warunkach gruntowo-wodnych.

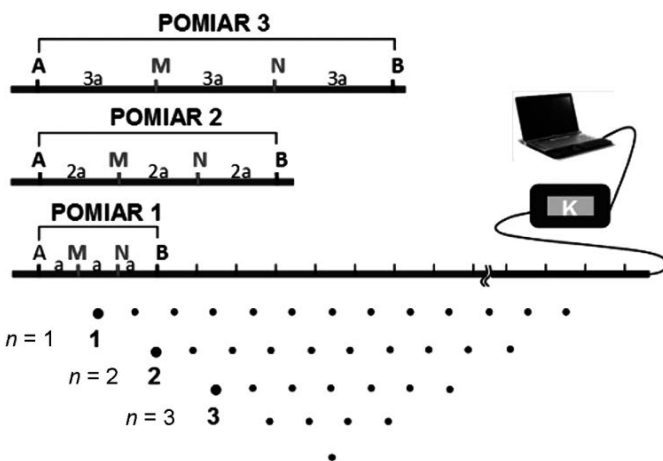
Metoda elektrooporowa polega na pomiarach parametrów sztucznie wywołanego pola elektrycznego w górotworze. Na potrzeby geofizyki poszukiwawczej (poszukiwanie wód podziem-

nych) opracował ją Wenner (1916) [11] i Schlumberger (1920) [9]. Założenia oraz zakres zastosowania metody tomografii elektrooporowej (ERT) są szeroko opisane w pracach na przykład: Dahlina (1996), Loke'a i Barkera (1996), Mościckiego i Antoniuka (1998), Loke'a i in. (2015) i Loke'a (2016) [2, 5, 6, 7, 8].

Podstawowym badanym parametrem jest oporność właściwa formacji geologicznych. Jednostką oporności właściwej (rzeczywistej) jest omometr [Ωm]. Jest to parametr bardzo zróżnicowany, a wartość jego może się zmieniać od 1 Ωm w utworach zasolonych do kilkudziesięciu tysięcy Ωm w utworach takich jak, na przykład, suche piaski wydmy lub skały pochodzenia chemicznego.

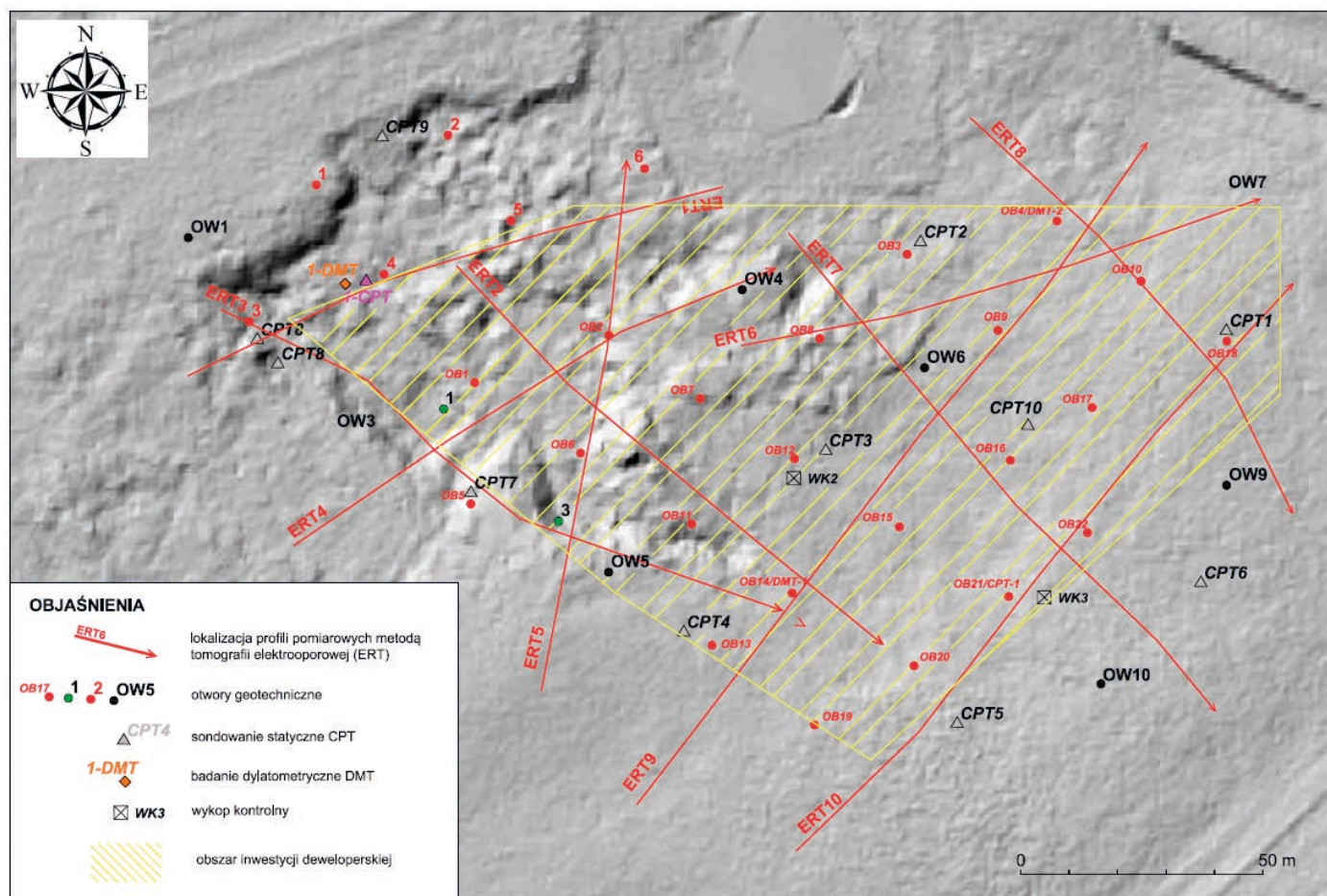
W przeciwieństwie do innych parametrów, na przykład gęstości lub podatności magnetycznej, oporność właściwa jest parametrem kompleksowym, zależnym od wielu czynników i procesów, takich jak: temperatura, zawartość i jakość wody, związków chemicznych, porowatość i przepuszczalność, litologia i skład mineralny.

W utworach czwartorzędowych, gdzie w środowisku naturalnym wody podziemne na ogół wykazują niską mineralizację, oporności elektryczne utworów takich jak: ropy, gliny, piaski różnią się zdecydowanie, w związku z tym klasyfikacja geologiczna danych elektrooporowych nie stanowi problemu. Na ogół przyjmuje się następujące kryteria klasyfikacji (Fajkiewicz 1972, Szymanko i Stenzel 1973) [3, 10]:



Rys. 1. Schemat pomiarów w metodzie tomografii elektrooporowej (za Loke, 2016) [7]

- utwory ilaste (ropy, gliny silnie zailone) – oporności poniżej 25 Ωm ,
- utwory gliniaste (gliny pylaste, gliny zwałowe, gliny piaszczyste) – oporności 25 ÷ 70 Ωm ,
- utwory piaszczyste nawodnione oporności 70 ÷ 300 Ωm ,
- osady niespoiste suche – oporności > 300 Ωm .



Rys. 2. Mapa dokumentacyjna zintegrowanych badań

Znając charakterystyczne zakresy oporności gruntów w badanym terenie oraz korelując wyniki badań geofizycznych z otworami geotechnicznymi, które znajdują się w pobliżu przebiegu ciągów geofizycznych, można z dużym prawdopodobieństwem przełożyć uzyskane wyniki geofizyczne (rozkład wartości oporności) na litologię utworów czwartorzędowych.

W metodzie ERT rozkład oporności elektrycznej ośrodka modeluje się blokami w układzie 2D. Modelowanie takie umożliwia określenie zróżnicowania oporności ośrodka w kierunku pionowym i poziomym na powierzchni przekroju wzdłuż linii układu pomiarowego.

Schemat pomiarów metodą ERT przedstawiono na rys. 1.

Metoda ERT jest jedną z najczęściej wykorzystywanych metod w geotechnice ze względu na stosunkowo niski koszt oraz łatwość wykonania. Te bezinwazyjne techniki pomiarowe dostarczają informacji o strukturze i cechach ośrodka gruntowego w sposób pośredni, ale ich zasięg jest zdecydowanie większy niż punktowych pomiarów profili otworów wiertniczych czy sondowań geotechnicznych wykonywanych w warunkach *in situ*. Najczęściej są one wykonywane jako badania do wstępnego rozpoznania budowy geologicznej, szczególnie do określenia głębokości i miąższości warstw wodonośnych, wyznaczenia uprzywilejowanych ścieżek przepływu wód gruntowych, wykrywania różnego rodzaju zanieczyszczeń wód gruntowych oraz samego gruntu.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU I ZAKRES BADAŃ

Terenem badań było podłoże projektowanego obiektu deweloperskiego w centralnej Polsce. Budowa geologiczna przedmiotowego rejonu należy do złożonych i trudnych pod względem rozpoznania z uwagi na silne zaburzenia osadów zarówno czwartorzędowych, jak i pliocenu.

Geomorfologicznie teren badań położony jest na granicy dwóch jednostek: wysoczyzny polodowcowej i tarasu nadzalewowego Wisły. Na powierzchni obszaru objętego badaniami zalega warstwa nasypów. Głębiej występują nieciągłe kompleksy gruntów spoistych i sypkich nawodnionych wodą pod ciśnieniem. Poziom ciśnienia piezometrycznego stabilizuje się na głębokości około 4 m nad „0” Wisły, to jest około 1 ÷ 2 m poniżej p.p.t. Na obszarze wykonywanych badań geofizycznych, w jego północno-wschodniej części, znajduje się rozległa niecka o głębokości

około 1 ÷ 1.5 m p.p.t. Obszar ten, ze względu na swoje położenie geologiczne (kontakt dwóch jednostek geomorfologicznych), był poddany wielu procesom geologicznym, w tym glacytektonicznym, co obecnie przekłada się na znaczny stopień skomplikowania budowy geologicznej (nieciągłe warstwy geologiczne, rynny erozyjne wypełnione nawodnionymi piaskami). Z tego powodu jednoznaczne rozpoznanie budowy geologicznej podłoża za pomocą wierceń czy sondowań, wykonywanych nawet w dużej liczbie, nie zawsze odwzorowuje stopień skomplikowania podłoża. Stąd też stosowanie w takich przypadkach nieinwazyjnych metod geofizycznych, w tym elektrooporowych, jest jak najbardziej uzasadnione (Lech i inni, 2016) [4].

METODYKA BADAŃ

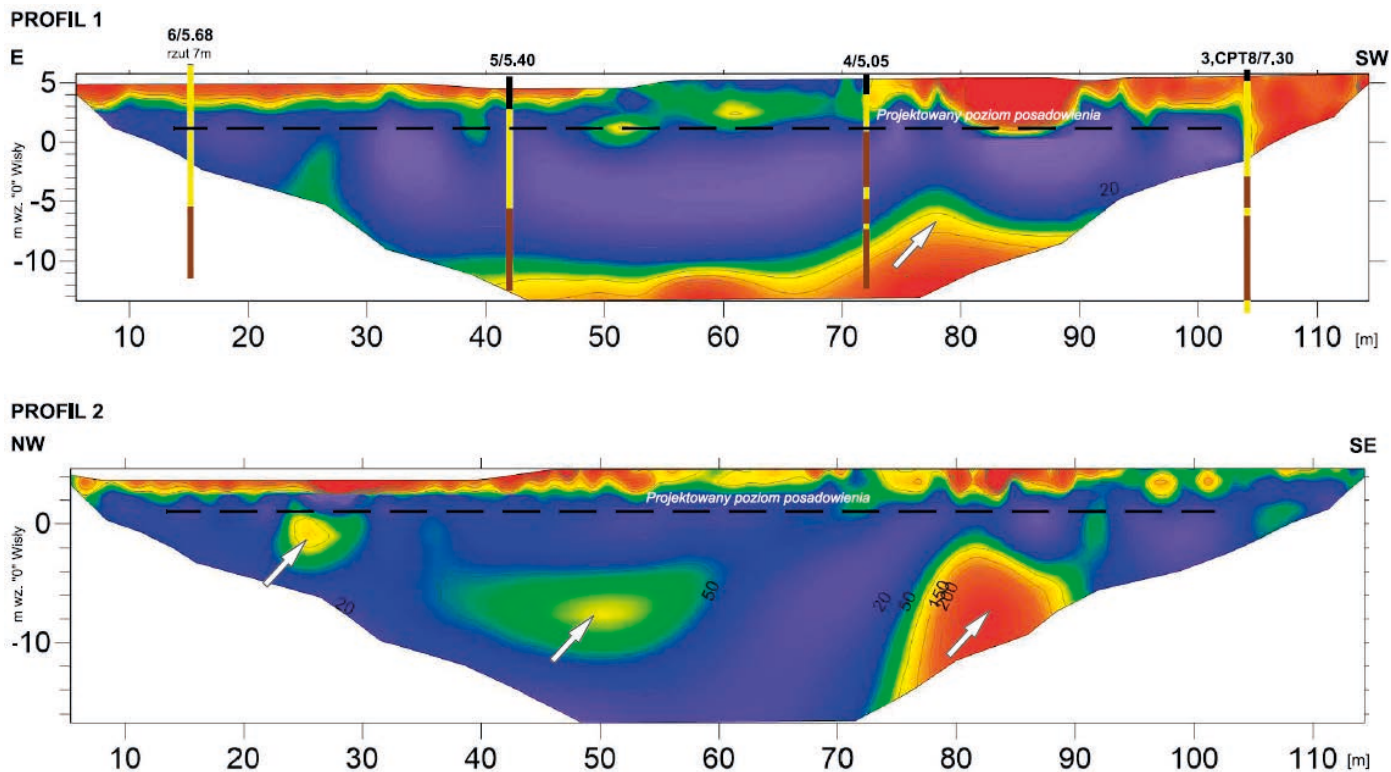
W celu otrzymania wysokiej rozdzielczości rozkładu oporności elektrycznej podłoża gruntowego elektrody były uziemione co 2 m. Uzyskano dzięki temu prospekcję rzędu 20 ÷ 30 m p.p.t. w zależności od długości profilu. Rozdzielczość pozioma wyniosła około 2 m, zaś rozdzielczość pionowa była zmienna: przy powierzchni terenu około 50 cm, a w spągowej części profilu około 2 m. Pomiary wykonano metodyką gradientów (zgodnie z: Dahlin & Zhou, 2006) [1].



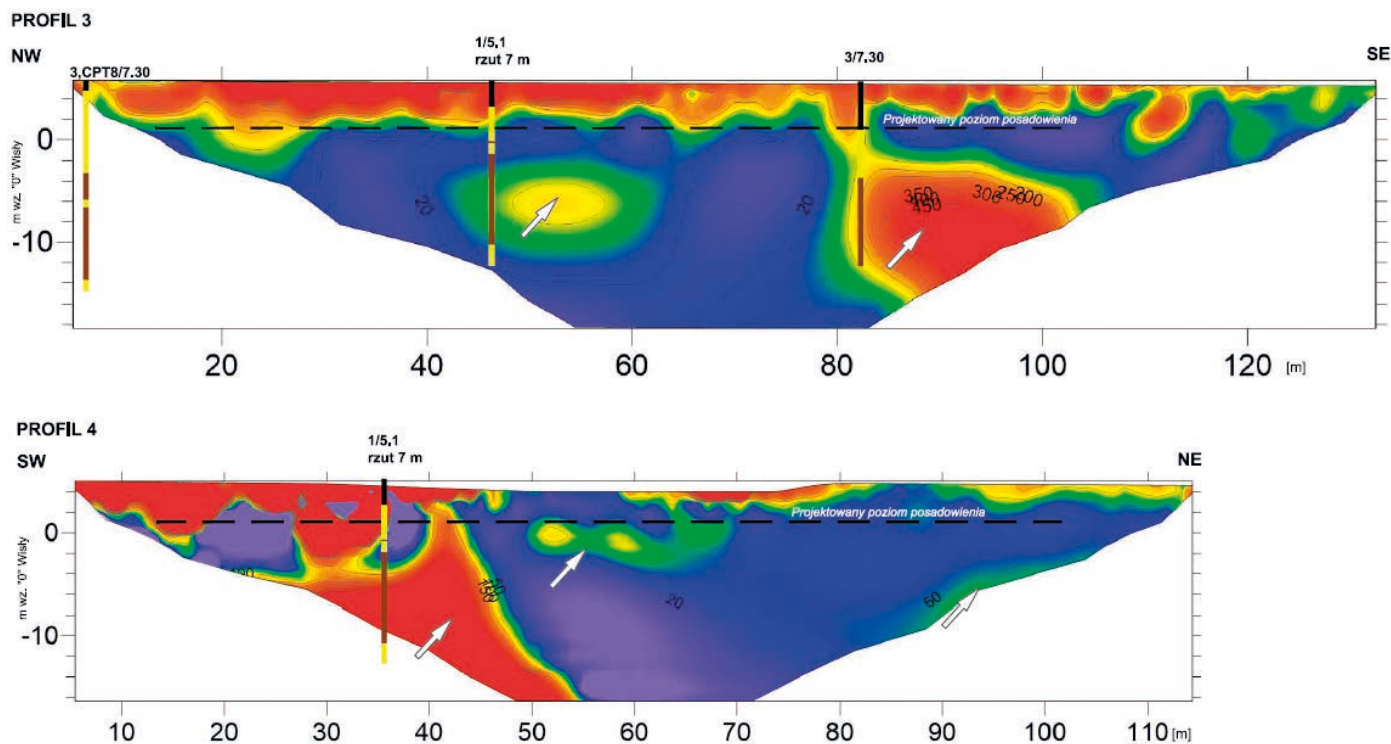
Rys. 3. Aparatura do tomografii elektrooporowej TERRAMETER LS 8 ch. (prod. ABEM, Szwecja)

Tabela I. Charakterystyka przetwarzania wybranych profili elektrooporowych (ERT)

Nr profilu pomiar.(*)	Liczba elektrod	Długość profilu [m]	Protokół pomiarowy	Głębokość prospekcji [m p.p.t]	Liczba punktów pomiarowych	Liczba „leveli” (poziomów) wyznaczenia oporności	Błąd inwersji
8	57	112	GRADIENT (Dahlin&Zhou, 2006), rozstaw elektrod 2 m	≈21	714	16	3.9%
7	75	144		≈27	1166	30	2.03
9	91	180		≈30	1752	36	6.86
10	81	160		≈30	1476	36	8.27
6	61	120		≈21	786	20	28! Silne zaburzenia pola elektr. od instalacji podziemnych



Rys. 4. Rozkład oporności elektrycznych w profilach nr 1 i 2



Rys. 5. Rozkład oporności elektrycznych w profilach nr 3 i 4

Na analizowanym obszarze wykonano 10 profili elektrooporowych zlokalizowanych tak, aby swoim zasięgiem objąć cały obszar projektowanego osiedla mieszkaniowego (rys. 2)

Pomiary wykonano ośmiokanałową aparaturą Terrameter LS, szwedzkiej firmy ABEM (rys. 3).

WYNIKI BADAŃ

Na obszarze objętym badaniami wykonano 10 profili elektrooporowych tak, aby swoim zasięgiem objęły cały obszar projektowanej inwestycji. Wybrane parametry geometrii profili ERT (długości profili, liczba elektrod) oraz charakterystykę

PROFIL 5

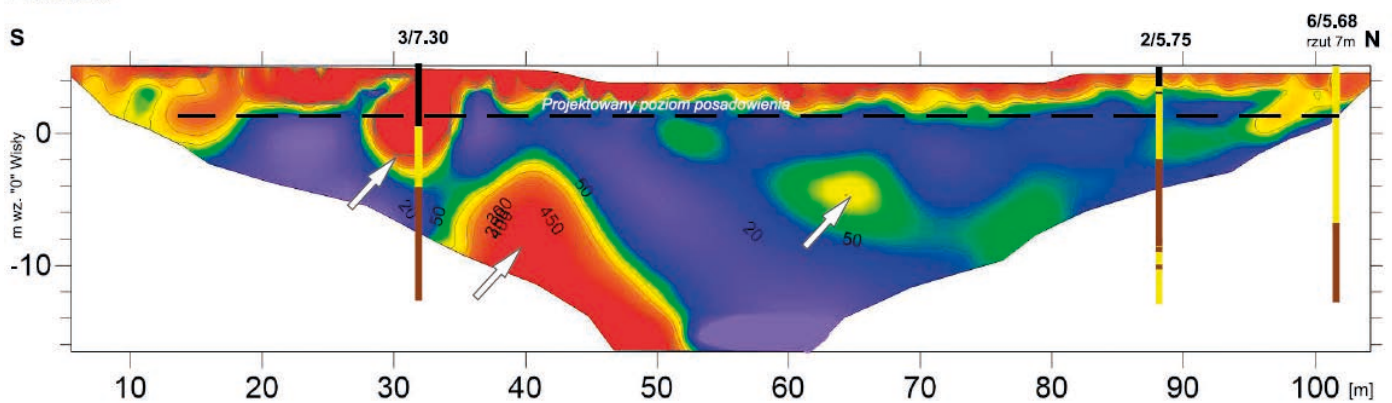
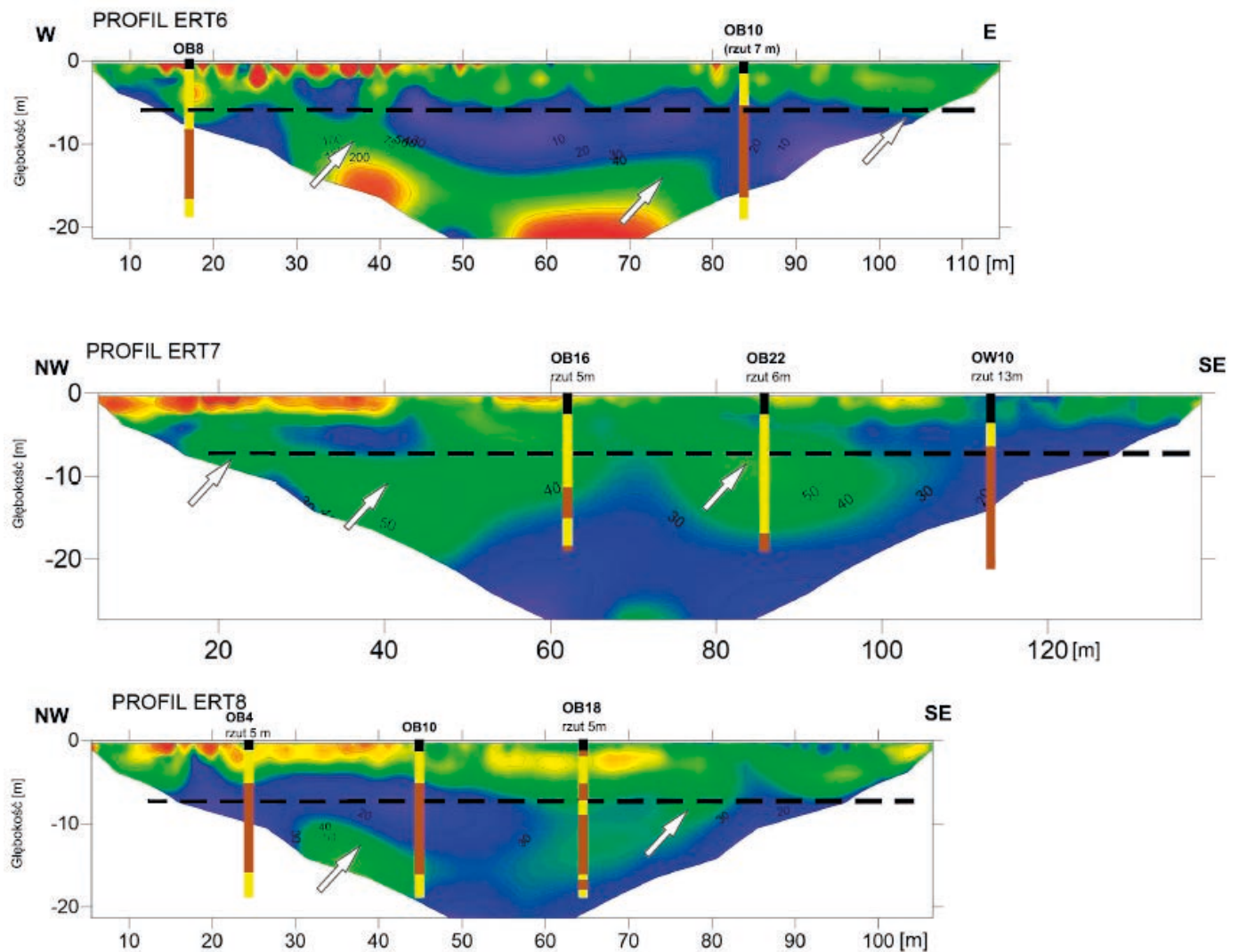


Fig. 6. Rozkład oporności elektrycznych w profilu 5

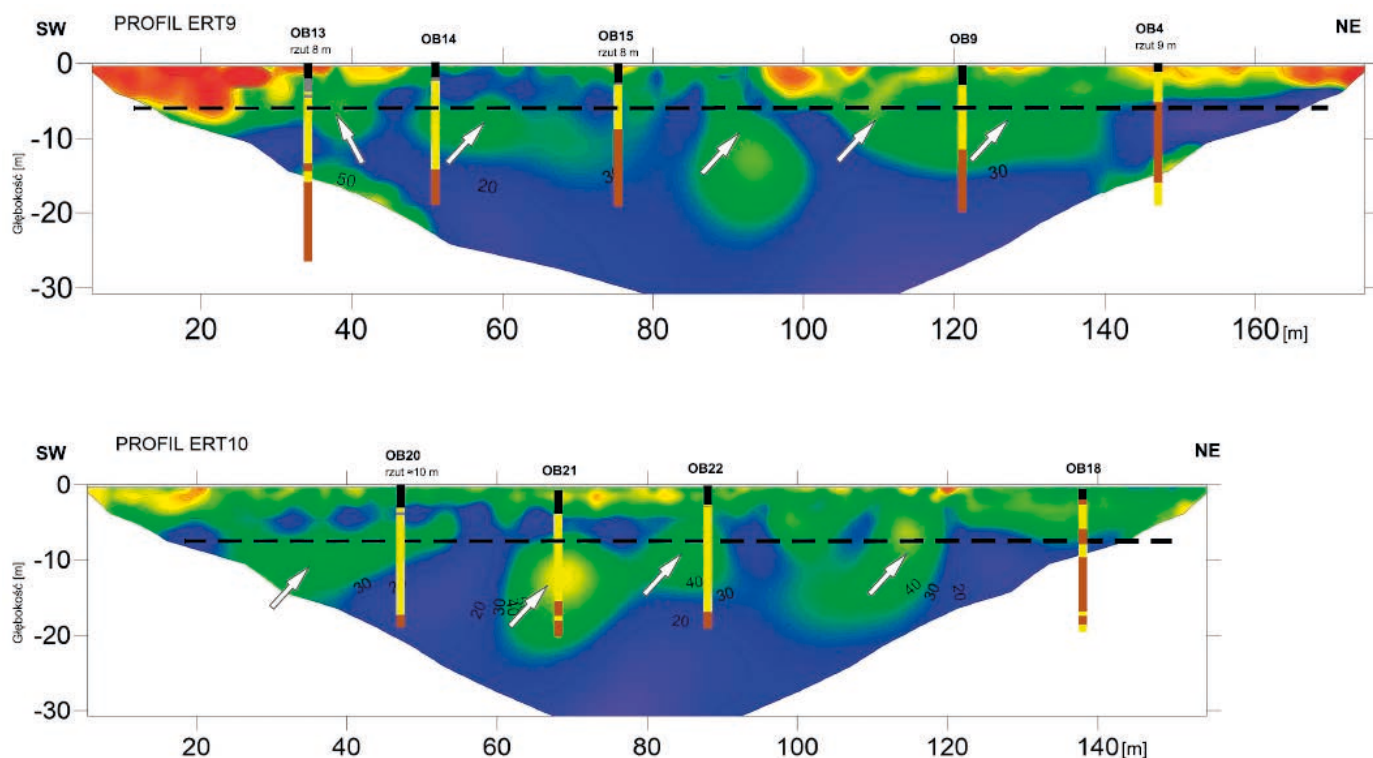


Rys. 7. Rozkład oporności elektrycznych w profilach nr 6 ÷ 8

ich przetwarzania (na przykład głębokości prospekcji czy błąd inwersji) zestawiono w tabl. 1. W kontekście dokładności uzyskanych wyników badań geofizycznych bardzo ważna jest wartość błędu inwersji, to jest dokładności dopasowania modelu do danych pomiarowych z terenu. Z jednym wyjątkiem (profil 6), gdzie błąd inwersji jest poniżej 10%. Świadczy to o bardzo wia-

rygodnym odwzorowaniu rozkładu oporności podłoża grunto-
wego i daje szansę na prawidłową interpretację geoelektryczną
profilu ERT (rys. 4 ÷ 8).

Obrazy rozkładu oporności właściwej gruntów wzdłuż wy-
tyczonych profili pomiarowych wraz z objaśnieniami przedsta-
wiono kolejno na rys. od 4 do 9 (w układzie 2D).



Rys. 8. Rozkład oporności elektrycznych w profilach nr 9 i 10

OBJAŚNIENIA



Rys. 9. Objasnienia do profili nr 1-10 (rys. 4-8)

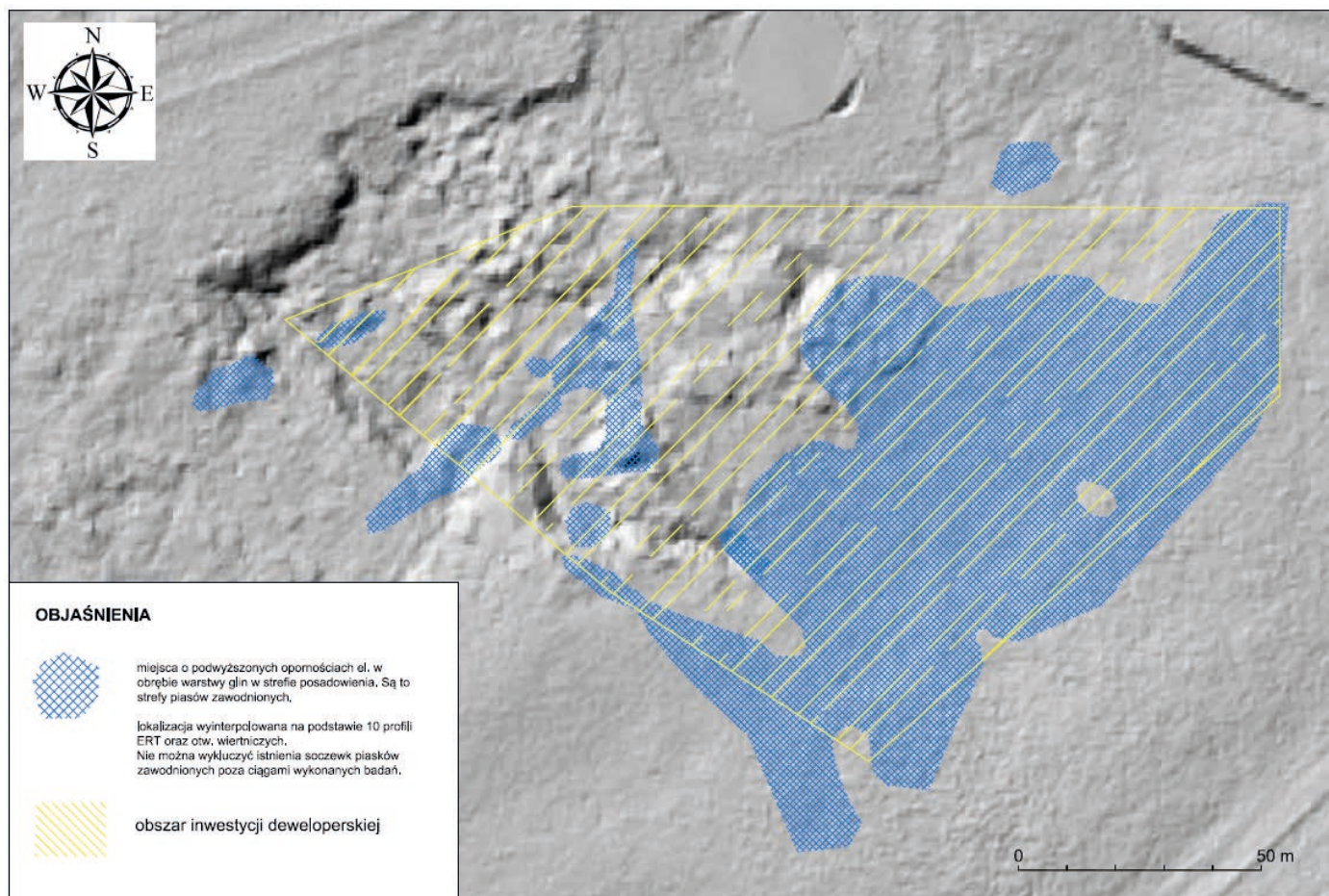
Skala zmienności oporności elektrycznej podłoża gruntowego jest w zakresie od kilku do 500 Wm. Przy czym oporność w zakresie wartości < 40 Wm zidentyfikowano jako grunty spoiste, zaś w strefach o wartościach oporności > 40 Wm występują grunty niespoiste (przy powierzchni wilgotne, natomiast od rzędnej około 3 m wz. „0” Wisły nawodnione). Profile elektrooporowe skorelowano z otworami geotechnicznymi. Pozwoliło to na potwierdzenie, że strefy o niskiej oporności odpowiadają glinom, zaś strefy o podwyższonych opornościach odpowiadają osadom sypkim lub małospoistym (pyły piaszczyste, piaski drobne i średnie). Taki charakter wykształcenia litologii podłoża jest efektem położenia terenu planowanej budowy w strefie przejściowej między wysoczyzną a doliną Wisły.

Analiza wyników badań geofizycznych oraz wierceń i sondowań potwierdza, że podłoże jest bardzo niejednorodne. Poniżej poziomu posadowienia zalegają nieciągłe warstwy osadów sypkich, spoistych i małospoistych. Profile otworów generalnie potwierdzają charakter rozkładu oporności elektrycznej, co świadczy o ich wiarygodności. Jednakże złożone warunki gruntowo-wodne w poziomie i w pionie sprawiają, że interpolacja budowy geologicznej między otworami jest obarczona dużym

ryzykiem błędu. Zastosowanie tomografii elektrooporowej umożliwiło identyfikację stref nawodnionych piasków (rys. 10) w rejonie projektowanego poziomu posadowienia fundamentów. Ich obecność może mieć wpływ na kluczowe aspekty efektywności danej inwestycji, czyli czas i koszty realizacji.

WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły weryfikację oraz uszczegółowienie budowy geologicznej podłoża gruntowego. Analizując rozkłady oporności elektrycznej w przekrojach pomiarowych stwierdzono, że w podłożu projektowanych obiektów zarówno w poziomie posadowienia, jak i poniżej, występują nawodnione piaski, często z wodą pod ciśnieniem. Wykonanie wykopu może powodować powstawanie przebiegów hydraulicznych w gruntach niespoistych lub wypieranie warstw gruntów spoistych podścielonych gruntami niespoistymi i zalewanie dna wykopu. Odształcenia filtracyjne, jako zjawisko, mogą mieć charakter spokojny, jak i gwałtowny, niekontrolowany i trudny do prognozowania. Analizowany przypadek to przykład obszaru



Rys. 10. Mapa anomalii elektrooporowych na tle planowanej inwestycji

narażonego szczególnie na deformacje filtracyjne ze względu na posadowienie płyty fundamentowej poniżej zwierciadła wody gruntowej.

Celem wykonanych pomiarów geofizycznych było uzupełnienie wiedzy o budowie geologicznej terenu w nawiązaniu do profili otworów wiertniczych. Zgromadzony materiał pozwolił wydzielić strefy, w których może dojść do wystąpienia niekorzystnych zjawisk hydrodynamicznych (wyparcia, upłynnienia, erozji wewnętrznej lub przebicia hydraulicznego) mogących pojawić się w trakcie prowadzenia prac budowlanych.

Zintegrowane rozpoznanie podłoża za pomocą metod bezpośrednich i geofizycznych dostarczyło zdecydowanie więcej informacji o warunkach gruntowo-wodnych terenu inwestycji, które są istotne przy właściwym projektowaniu konstrukcji, obudowy wykopu i jego odwodnienia, w celu zabezpieczenia przed negatywnym działaniem wody gruntowej.

LITERATURA

1. Dahlin T., Zhou B.: Multiple-gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging, *Near Surface Geophysics*, Vol 4, No 2, April 2006, 113-123
2. Dahlin T.: 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, 1996, 275-284.
3. Fajkiewicz Z. (red.): *Zarys geofizyki stosowanej*, Wydawnictwa Geologiczne, 1972.
4. Lech M., Bajda M., Markowska-Lech K., Skutnik Z.: Przykłady zastosowania pomiarów oporności elektrycznej w geotechnice środowiskowej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 93, 2016, , 83-94
5. Loke M. H., Barker R. D.: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 1996, 131-152.
6. Loke, M. H., Kiflu, H., Wilkinson, P. B., Harro, D., Kruse, S.: Optimized arrays for 2-D resistivity surveys with combined surface and buried arrays. *Near Surface Geophysics*, 13, 2015, 505-517.
7. Loke, M. H.: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomosoft Solutions*, Malaysia 2016.
8. Mościcki W. J., Antoniuk J.: The method of electrical resistivity tomography. The examples of investigations for engineering-geology aims. Materials of the 5. Scientifically technical Conference: geophysics in geology, the mining and the protection of the environment(in Polish). Krakow, Poland, 1998, 315-325.
9. Schlumberger C.: *Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol*, Paris, 1920.
10. Szymanko J., Stenzel P.: *Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1973.
11. Wenner F.: A method of measuring earth resistivity. *Bulletin of US Bureau of Standards*, 12, 1916, 469-478.