ŚRODOWISKO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-Ś/2012
ZESZYT 23
ROK 109
ISSUE 23
YEAR 109

BERNADETTA PASIERB*

METODA TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ W ROZPOZNAWANIU GEOLOGICZNYM PODŁOŻA I OBIEKTÓW ANTROPOGENICZNYCH

RESISTIVITY TOMOGRAPHY IN PROSPECTING GEOLOGICAL SURFACE AND ANTHROPOGENIC OBJECTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono tomografię elektrooporową jako metodę umożliwiającą rozpoznanie budowy geologicznej podłoża. Metodę tomografii elektrooporowej wykorzystano również w celu wykrycia podziemnych obiektów antropogenicznych na terenie Brzozówki w gminie Zielonki i miejscowości Zabierzów. Łącznie wykonano 6 profili, na podstawie których omówiono możliwości zastosowania tomografii elektrooporowej w płytkiej prospekcji, jak również jej możliwości detekcji i lokalizacji obiektów antropogenicznych.

Słowa kluczowe: *metoda elektrooporowa*, *tomografia elektrooporowa ERT*, *detekcja obiektów antropogenicznych*

Abstract

The article presents a method of electrical resisitivity tomography which allows to identify the geological structure of the basement. Resistivity tomography was also used to detection of anthropogenic objects in Brzozówka and Zabierzów areas. A total of six profiles were done, on the basis of which it also describes applications of the electrical resistivity tomography for the near surface prospecting as well as its ability to detect and localize antropogenic objects.

Keywords: *resistivity method, Electrical Resisitivity Tomography ERT, detection of anthropological objects*

* Dr inż. Bernadetta Pasierb, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Metoda tomografii elektrooporowej określana w publikacjach anglojęzycznych jako: *resistivity imaging, electrical resistivity tomography ERT, continuous vertical electrical soundings*, a w literaturze polskiej także jako obrazowanie elektrooporowe, jest obecnie jedną z bardziej popularnych metod geofizycznych. Jest to bezinwazyjna technika geofizyczna o szerokim zakresie zastosowań, wykorzystywana m.in. w rozpoznaniu geologiczno-inżynierskim podłoża budowlanego, monitoringu środowiska i stref zagrożonych ruchami masowymi, w badaniach podłoża dla celów projektowych, a także w wykrywaniu obiektów antropogenicznych i badaniach archeologicznych. Umożliwia wykonywanie pomiarów na profilach o zróżnicowanej długości oraz ich interpretację w geometrii 2D i 3D. Podstawą badań jest określenie elektrycznej oporności badanego ośrodka wywołanej przez obiekty pochodzenia naturalnego, mające związek z geologią badanego podłoża, bądź pochodzenia antropogenicznego związane z działalnością człowieka. W przedstawionym artykule rozpatrywano obie przyczyny wpływające na zmianę oporności elektrycznej ośrodka. Metodą tomografii elektrooporowej rozpoznano budowę geologiczną terenu i ze względu na planowane na tym obszarze prace budowlane starano się zlokalizować występujące obiekty antropogeniczne. Pomiary wykonano na obszarze Wyżyny Krakowskiej we wsi Brzozówka w gminie Zielonki oraz miejscowości Zabierzów, gmina Zabierzów.

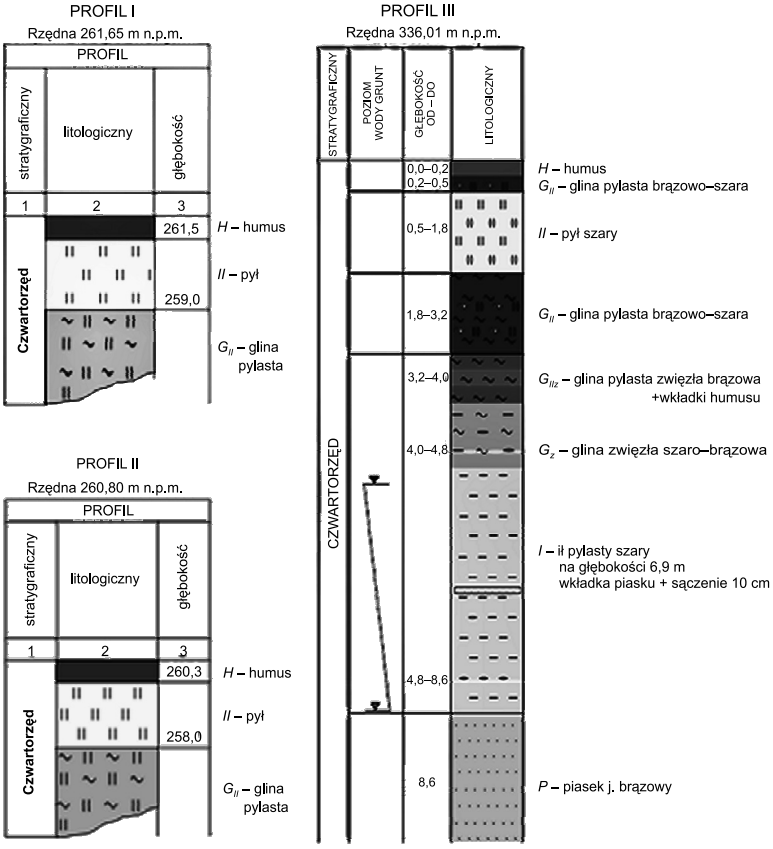
2. Charakterystyka terenu badań

Badany teren we wsi Brzozówka i w Zabierzowie położony jest w województwie małopolskim w obrębie Wyżyny Krakowskiej (rys. 1). Gmina Zielonki leży na Wyżynie Krakowskiej Północnej charakteryzującej się płaskimi lub lekko zaokrąglonymi garbami i wysoczyznami zbudowanymi ze skalistych wapieni jurajskich i kredowych, na których osadzona jest seria trzeciorzędowych iłów mioceńskich. Utwory czwartorzędowe wykształcone są, jako lessy i gliny lessopodobne, o miąższości sięgającej do około 20 m. W dolinach rzecznych utwory czwartorzędowe reprezentowane są przez żwiry i piaski o różnej granulacji. Niewielkie istniejące na terenie gminy dolinki mają charakter wądołów i wąwozów [1].

Zabierzów położony jest na obszarze Wyżyny Krakowskiej Południowej w obrębie największego zrębowego wzniesienia – Garbu Tenczyńskiego, opadającego stromymi progami do tektonicznego zapadliska Rowu Krzeszowickiego. Zbocza Rowu poprzecinane są licznymi dolinami o charakterze jarów i parowów, w części wschodniej nawet wąwozów i kanionów krasowych. Wschodnie partie Garbu Tenczyńskiego, w obrębie gminy Zabierzów pokrywa las zabierzowski. Dnem Rowu Krzeszowickiego płynie Rudawa, która za Zabierzowem skręca na południe tworząc przełom doliny Rudawy przez Garb Tenczyński pod legendarną Skałą Kmity. W budowie geologicznej omawianego obszaru największy udział mają jurajskie kompleksy skalistych wapieni liczące nawet 300 m miąższości. Rów Krzeszowicki wypełniony jest grubą serią trzeciorzędowych osadów ilastych. Całość pokryta jest, podobnie jak w Zielonkach, czwartorzędowymi osadami lessopodobnymi reprezentowanymi przez nawiane pod koniec epoki lodowej pyły i gliny pylaste, podścielone deluwialno-wietrzelinowymi glinami zwięzłymi i piaskami z domieszką rumoszu wapiennego [2].



Rys. 1. Lokalizacja terenu badań geoelektrycznych w Brzozówce i Zabierzowie
Fig. 1. Location of the area resistivity tomography study in Brzozówka and Zabierzów



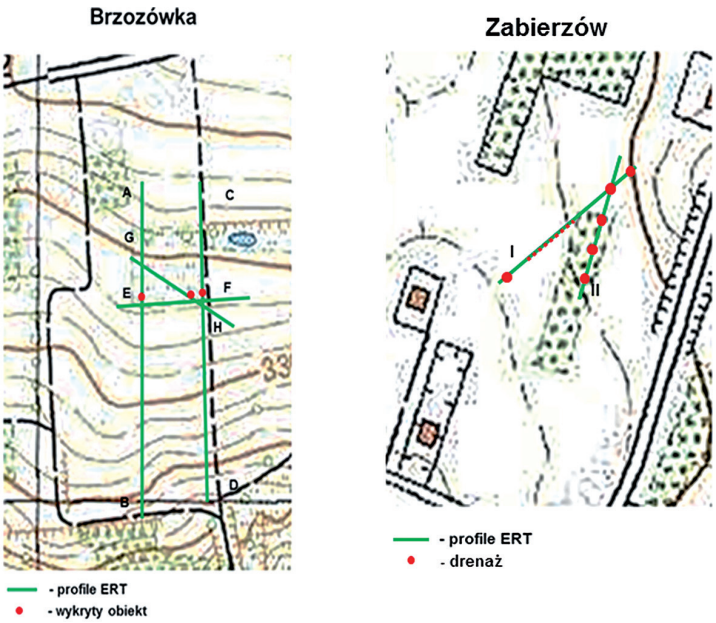
Rys. 2. Profile geologiczne otworów: Zabierzów profil I i II [3], Brzozówka profil III [4]
Fig. 2. Geological profiles Zabierzów I and II [3], Brzozówka III [4]

Pod powierzchnią terenu występuje warstwa gliniastej gleby o małej miąższości. Budowę geologiczną przedstawiają profile geologiczne (rys. 2) wykonane w miejscu badań we wsi Brzozówka [3] oraz w Zabierzowie [4].

We wsi Brzozówka rejon badań stanowiło południowe, silnie nachylone zbocze doliny Prądnika. W górnej partii, prostopadle do spadku zbocza, utworzono dwa tarasy: parking i boisko. Pomiary wykonano wzdłuż całego zbocza. W Zabierzowie badania wykonano na północnym zboczu Garbu Tenczyńskiego, niedaleko Skały Kmity. Obszar w obu przypadkach pokryty był roślinnością łąkową.

3. Metodyka badań

W celu rozpoznania budowy geologicznej i wykrycia potencjalnych miejsc występowania obiektów antropogenicznych przeprowadzono badania geofizyczne metodą tomografii elektrooporowej. Pomiary we wsi Brzozówka na zboczu doliny wykonano wzdłuż 4 profili: dwóch usytuowanych równolegle do nachylenia zbocza, jeden prostopadle i jeden ukośnie w sposób przecinający pozostałe na terenie planowanego boiska. W Zabierzowie wykonano 2 profile pomiarowe, umieszczając jeden równolegle do drogi, a drugi ukośnie, zgodnie ze spadkiem terenu. Profile poprowadzono w taki sposób, aby przecinały się na terenie planowanego obiektu i znajdowały w sąsiedztwie 2 otworów geotechnicznych. Plan lokalizacji przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia profili w terenie

Fig. 3. Localization of electrical resistivity tomography measurements

Na zboczu w Brzozówce poprowadzono profile AB i CD o długości 258,5 m, EF o długości 148,5 m oraz najkrótszy GH wynoszący 115,5 m. Umożliwiły one rozpoznanie ośrodka do głębokości 19–43 m. Rozstaw między kolejnymi elektrodami wynosił 5,5 m. Pomiary wykonano symetrycznym układem Schlumbergera.

W Zabierzowie pomiary również przeprowadzono układem Schlumbergera. Zastosowano układ o wysokiej rozdzielczości, w którym elektrody rozstawione były co 1 m i 2 m. Pozwoliło to na rozpoznanie ośrodka z dużą dokładnością. Długość profili w Zabierzowie wynosiła odpowiednio 48 i 37 metrów, co przełożyło się na głębokość penetracji wynoszącą odpowiednio 8 i 6 metrów. Badania geofizyczne metodą obrazowania elektrooporowego przeprowadzono aparaturą ARES firmy GF Instruments.

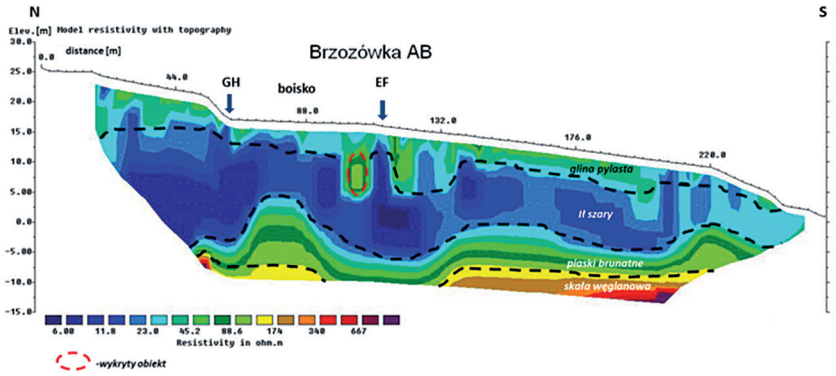
4. Wyniki badań i ich interpretacja

Procedurę przetwarzania danych i inwersji przeprowadzono za pomocą programu RES2DINV firmy Geotomo Software. Interpretacja ilościowa wykonana została w formie automatycznej inwersji 2D, polegającej na rozwiązaniu zadania prostego, dla założonego modelu ośrodka i iteracyjnym dopasowaniu modelu początkowego do zmierzonych wartości. Proces inwersji 2D umożliwia minimalizację błędu dopasowania oraz uzyskanie najbardziej prawdopodobnego modelu opornościowego ośrodka, czyli rozkładu oporności rzeczywistej wzdłuż badanego profilu. Efektem zastosowanej automatyzacji procesu inwersji jest otrzymanie na przekroju rozmytego obrazu. Wyraża się on w braku ostrych zmian, wyraźnych granic między wartościami oporności elektrycznej wywołanej przez ośrodki naturalne (np. kolejne warstwy, poziomy wodonośne) lub obiekty pochodzenia antropogenicznego. Ze względu na automatyczny charakter procesu inwersji w metodzie tomografii elektrooporowej nie jest możliwe wprowadzenie w takich przypadkach skokowych zmian. Dlatego na podstawie wyników inwersji 2D w metodzie tomografii, podobnie jak w innych badaniach elektrooporowych, otrzymujemy uogólniony model budowy ośrodka [5, 6].

Na podstawie interpretacji przekrojów ERT, uzyskanych z badań metodą tomografii elektrooporowej, oraz korelujących z nimi do głębokości ponad 8 m danymi z otworu geotechnicznego, na terenie Brzozówki wyróżniono występowanie trzech kompleksów warstw różniących się opornościami rzeczywistymi. W strefie przypowierzchniowej pojawiają się lessy i gliny pylaste o oporności 20–50 Ωm i zmiennej miąższości od 2 do 5 m na krańcach boiska i do 10 m w jego części centralnej (przekrój GH rys. 6). Poniżej stwierdzono obecność szarych iłów niskooporowych, o charakterystycznej małej oporności 6–20 Ωm i miąższości wynoszącej na terenie boiska około 12 m. Miąższość iłów wyraźnie maleje w kierunku południowym (przekrój AB). Iły szare podścielone są warstwą brunatno-brązowych piasków o zróżnicowanej oporności 50–180 Ωm i miąższości około 5–7 m, rosnącej w części południowej. Przebieg tej warstwy odwzorowuje kontur stropu podłoża. Występujące poniżej skały węglanowe, na niektórych przekrojach widoczne tylko fragmentarycznie (przekrój CD), to wapienie i wapienie margliste o nieregularnej rzeźbie stropu, wykazujące wysokie oporności, od 180 Ωm do około 700 Ωm.

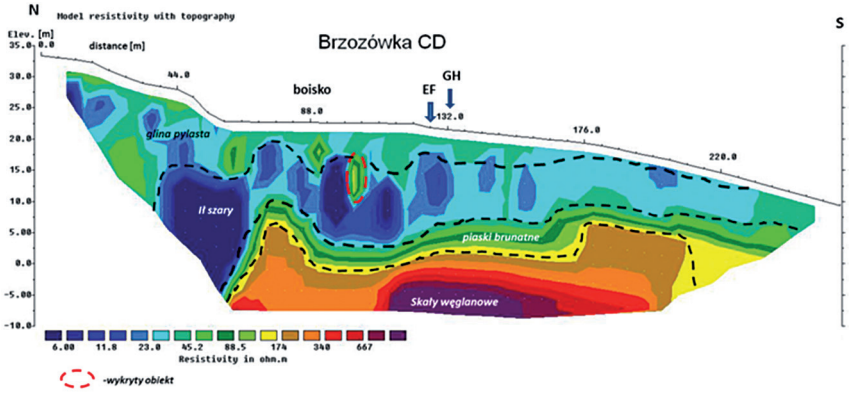
W wyniku przeprowadzonej interpretacji, na przekrojach AB i GH u podnóża skarpy nad boiskiem w warstwie przypowierzchniowej, stwierdzono występowanie glin pylastych

o małej miąższość około 2 m. W tym miejscu, zalegające poniżej iły, wykazują bardzo niską oporność, rzędu 6 Ωm, co wskazuje na silne zawodnienie. Obecność glin pylastych, ich mała miąższość oraz występowanie w podłożu silnie zawodnionych iłów może być powodem zsuwu skarpy. Na analizowanych przekrojach, z wyjątkiem przekroju EF, stwierdzono występowanie anomalii w postaci zmiany oporności elektrycznej ośrodka. Anomalia dodatnia, o wartościach oporności rzeczywistej znacznie wyższych od otoczenia, zaznacza się na wszystkich przedstawionych przekrojach w obrębie silnie zawodnionej warstwy szarych iłów (rys. 4–6). Charakterystyczny, regularny, cylindryczny kształt anomalii sugeruje jej antropogeniczne pochodzenie. Obraz interpretowanego obiektu jest zniekształcony, co znacznie utrudnia ocenę jego kształtu i parametrów zalegania [5, 6]. Na podstawie przedstawionych przekrojów głębokość zalegania obiektu pochodzenia prawdopodobnie antropogenicznego jest trudna do dokładnego określenia. Wielkość tę orientacyjnie można ocenić na około 7 m pod powierzchnią terenu, praktycznie w warstwie szarych iłów. Lokalizację obiektu leżącego prawie równolegle do profilu EF przedstawiono na rys. 3.



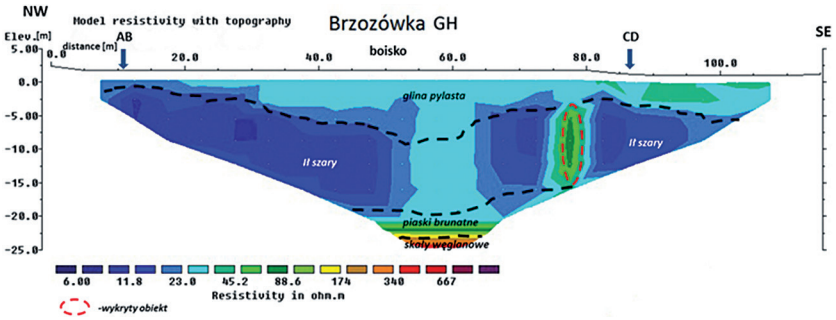
Rys. 4. Przekrój geoelektryczny Brzozówka AB

Fig. 4. ERT cross-section of the Brzozówka AB

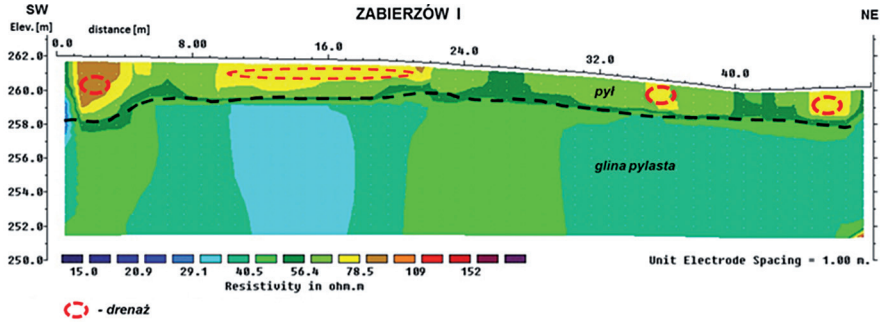


Rys. 5. Przekrój geoelektryczny Brzozówka CD

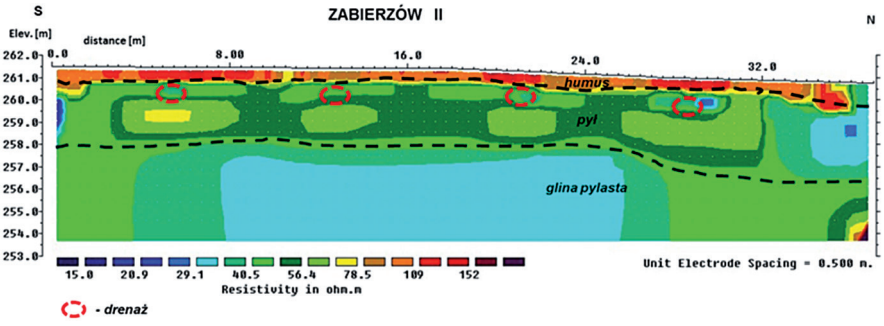
Fig. 5. ERT cross-section of the Brzozówka CD



Rys. 6. Przekrój geoelektryczny Brzozówka GH
Fig. 6. ERT cross-section of the Brzozówka GH



Rys. 7. Przekrój geoelektryczny Zabierzów I
Fig. 7. ERT cross-section of the Zabierzów I



Rys. 8. Przekrój geoelektryczny Zabierzów II
Fig. 8. ERT cross-section of the Zabierzów II

W Zabierzowie, na podstawie pomiarów przeprowadzonych metodą tomografii elektrooporowej oraz w oparciu o wykonane otwory geotechniczne, stwierdzono występowanie kilku kompleksów warstw (rys. 7 i 8). Warstwę przypowierzchniową, prawie zanikającą na profilu I, a wyraźnie widoczną na profilu II stanowi humus o miąższości około 0,5 m. Zaznaczające się wysokie wartości oporności rzeczywistej warstwy przypowierzchniowej

100–150 Ωm świadczą o jej małej wilgotności. Poniżej, stwierdzono obecność utworów lessopodobnych składających się z pyłów i glin pylastych. Granica między nimi a warstwą przypowierzchniową na profilu I przebiega prawdopodobnie na głębokości około 259 m n.p.m., a na profilu II na około 258,0 m n.p.m. Warstwa pyłów charakteryzuje się wyższą opornością wynoszącą 40–60 Ωm. Jej miąższość można określić na około 1,5 m do 2 m. Warstwę spodnią stanowią gliny pylaste o miąższości powyżej 7 m i oporności rzędu 30–40 Ωm.

Na podstawie analizy przedstawionych przekrojów w utworach lessopodobnych zbudowanych z pyłów i glin pylastych zaobserwowano zmiany oporności rzeczywistej ośrodka w postaci charakterystycznych anomalii. Widoczny szczególnie na proflu II (rys. 7) owalny powtarzający się regularnie co 8 m kształt pochodzi od wykonanego na tym terenie drenażu. Głębokość ułożenia rur drenażowych można określić na około 1 m p.p.t. Również na profilu I można zauważyć w kilku miejscach, w warstwie przypowierzchniowej, na głębokości około 1 m pojawiające się lokalne anomalie, jednak już nie tak regularne. Ich kształt jest bardziej rozmyty i mało wyraźny, co powoduje, że nie można na całym profilu jednoznacznie określić miejsc położenia drenu. Utrudnienia w interpretacji wzrastają im płycej znajduje się obiekt anomalny w odniesieniu do swoich rozmiarów i względnej wielkości układu pomiarowego, jak również wzajemnego rozmieszczenia wszystkich elektrod na profilu pomiarowym [7]. Badany teren należałoby zagęścić siatką profili i zastosować układ pomiarowy z mniejszym rozstawem elektrod. Na podstawie otrzymanych wyników trudno jest jednoznacznie określić przebieg założonych rur drenażowych, jednak istnieje możliwość ich lokalizacji (rys. 3) oraz określenia ich przybliżonej głębokości występowania.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania tomografii elektrooporowej do rozpoznania płytkiej budowy geologicznej i detekcji podziemnych obiektów antropogenicznych. Metoda ERT pozwoliła na uzyskanie szczegółowych informacji o budowie geologicznej terenu we wsi Brzozówka oraz w Zabierzowie. Umożliwiła również przedstawienie rozkładu oporności badanych utworów oraz określenia ich miąższości. Na podstawie analizy przekrojów geoelektrycznych uzyskanych w wyniku zastosowania inwersji 2D oraz własności utworów pylastych i ilastych zwrócono uwagę na możliwość występowania zsuwu skarpy na terenie boiska we wsi Brzozówka. Metodą tomografii elektrooporowej zlokalizowano miejsca występowania rur drenażowych, założonych na głębokości około 1 m, w utworach pylastych w Zabierzowie. Zbyt mała liczba poprowadzonych profili nie pozwoliła na dokładne określenie ich przebiegu. Na przekrojach geoelektrycznych uzyskanych z pomiarów w Brzozówce na głębokości około 7 m zlokalizowano obiekt pochodzenia prawdopodobnie antropogenicznego. Stwierdzono, że metoda tomografii elektrooporowej daje dobre efekty w poszukiwaniach podziemnych obiektów antropogenicznych w przypadku, gdy poszukiwany obiekt znajduje się w jednorodnym otoczeniu. W przypadku zróżnicowanej budowy lub gdy w sąsiedztwie występuje więcej obiektów zakłócających obraz, interpretacja jest utrudniona i prowadzi do niejednoznacznych wyników. Utrudnienia w interpretacji wzrastają im płycej znajduje się obiekt anomalny w odniesieniu do swoich rozmiarów i względnej wielkości układu pomiarowego. Istotne znaczenie ma też rodzaj zastosowanego układu po-

miarowego i jego rozstaw. Dużą zaletą metody tomografii elektrooporowej jest wykonywanie pomiarów w sposób ciągły i bezinwazyjny. Jest to znaczna przewaga nad punktowymi sondowaniami. Metoda również nie ma ograniczeń w osiągnięciu założonej głębokości wykonywanych badań związanych z występowaniem w podłożu wód gruntowych lub gruntów ilastych. W tomografii elektrooporowej utrudnieniem może być osiągnięcie do zakładanej głębokości pomiaru, która nie w każdych warunkach może być uzyskana. Metoda tomografii zalecana jest do wstępnego rozpoznania terenu przed właściwymi badaniami geotechnicznymi i geologiczno-inżynierskimi.

Artykuł przygotowano częściowo w ramach działalności statutowej – umowa PK nr Ś-2/245/DS/2012. Autorka dziękuje Zespołowi Zakładu Geoinżynierii, Geologii i Ochrony Powierzchni Ziemi za udział w pomiarach oraz pani Elżbiecie Chrzanowskiej za pomoc w opracowaniu wyników badań.

Literatura

[1] Bukowy S., *Geologia obszaru pomiędzy Krakowem a Korzkwią*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa 1956.
[2] Gradziński R., *Przewodnik geologiczny po okolicach Krakowa*, Warszawa 1972.
[3] Jarocki Z., *Karty dokumentacyjne otworów geologiczno-inżynierskich*, Zabierzów 2011.
[4] Gwóźdź R., *Karta dokumentacyjna otworu geologiczno-inżynierskiego*, Brzozówka 2012.
[5] Loke M.H., *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, 1996–2004.
[6] Rudzki M., *Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej do wykrywania podziemnych obiektów antropogenicznych*, Publ. Inst. Geophys. Pol. Accad. Sc., M. 25, 313, 2002.
[7] Mościcki W., Antoniuk J., *Metoda obrazowania elektrooporowego (resistivity imaging). Przykład badań dla celów geologiczno-inżynierskich*, Mat. V Konferencji Nauk. Tech. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska", Kraków 1999, 315-325.