

OBRAZ FIZYCZNY ZWIERCIADŁA WÓD PIERWSZEGO POZIOMU WODONOŚNEGO W ŚWIELE BADAŃ METODĄ TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ (ERT)

PHYSICAL IMAGE OF WATER TABLE DETERMINED BY THE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT) METHOD

MAGDALENA GAŃKO¹, RADOŚLAW MIESZKOWSKI¹, ADRIAN GAŃKO², PIOTR TUCHOŁKA³

Abstrakt. W artykule przedstawiono i omówiono wyniki rozpoznania pierwszego poziomu wodonośnego za pomocą metody tomografii elektrooporowej (ERT). Wybrano trzy poligony badawcze w obrębie Warszawy, o różnej budowie geologicznej i odmiennych warunkach hydrogeologicznych. Jeden poligon znajduje się w obrębie wysoczyzny połodowcowej na terenie Warszawy („Pole Mokotowskie”), a dwa pozostałe są położone w obrębie doliny rzeki Wisły („Józefów” i „Tarchomin”). Poligony umiejscowione w obrębie doliny rzeki charakteryzują się m.in. swobodnym poziomem zwierciadła wody, natomiast w obrębie poligonu na wysoczyźnie połodowcowej występuje poziom wodonośny pod ciśnieniem. Rezultaty wykonanych badań dowodzą, że poziom wód podziemnych wyraźnie zaznacza się w obrazie uzyskanym metodą ERT, ale nie zawsze daje precyzyjne wyniki. Dokładność jego wyznaczenia zależy od uziarnienia gruntów, ich kontrastu opornościowego, wilgotności, metody profilowania elektrycznego oraz od ukształtowania stropu osadów niskooporowych (Warszawa – ily plioceńskie).

Słowa kluczowe: metoda tomografii elektrooporowej (ERT), oporność gruntu, poziom wody podziemnej, osady niskooporowe.

Abstract. The paper presents the results and interpretation of Electrical Resistivity Tomography (ERT) study of the first aquifer. The study was carried out in the Warsaw region on three selected test fields with different geological structure and hydrogeological conditions: two in the Wisla River valley (“Józefów” and “Tarchomin”) and one in a postglacial upland in Warsaw (“Pole Mokotowskie”). The river valley aquifers are unconfined, whereas in the upland, the first aquifer is confined and under pressure. The results clearly show the presence of aquifers on the ERT image, but the positioning of the water level is not always precise. The precision depends on granulometry of sediments, resistivity contrasts, chosen method of resistivity measurement and morphology of low-resistivity sediments (e.g. Pliocene clays in the Warsaw area).

Key words: Electrical Resistivity Tomography (ERT), soil resistivity, groundwater level, low-resistivity sediments.

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: magdalena.ganko@student.uw.edu.pl, r.mieszkowski@uw.edu.pl

² GEOTEKO Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 3/5, 02-739 Warszawa; e-mail: adrian.ganko@geoteko.com.pl

³ UMR CNRS 8148 IDES, Département des Sciences de la Terre, Université Paris Sud, 91405 Orsay, France; e-mail: piotr.tucholka@u-psud.fr

WSTĘP



Fig. 1. Lokalizacja poligonów badawczych „Józefów”, „Pole Mokotowskie” i „Tarchomin” na tle planu Warszawy i okolic

Location of the test grounds “Józefów”, “Pole Mokotowskie” and “Tarchomin” on the background of the map Warsaw and its neighbourhood

W pracy skoncentrowano się na analizie rozkładu oporności rzeczywistej gruntów pod kątem wyznaczenia zwierciadła wody podziemnej. Jako kryterium wyboru lokalizacji trzech poligonów badawczych (Warszawa i okolice) przyjęto podział warunków gruntowo-wodnych podanych w Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dn. 25 kwietnia 2012 r. (DzU 2012 Nr 0, poz. 463).

Dla obszaru, który charakteryzuje się warunkami gruntowo-wodnymi prostymi (występują warstwy gruntów jednorodnych genetycznie i litologicznie, zalegające poziomo) wykonano badania na poligonie „Józefów”. Poligon „Pole Mokotowskie” można odnieść do warunków gruntowo-wodnych złożonych (występują warstwy gruntów niejednorodnych, nieciągłych, zmiennych genetycznie i litologicznie). Skomplikowane warunki gruntowo-wodne występują na poligonie „Tarchomin”, ze względu na bardzo zmienne położenie stropu utworów plioceńskich, płytko położone zwierciadło wód podziemnych, lokalizację w dolinie oraz sąsiedztwo rzeki Wisły. Umieszczenie poligonów badawczych przedstawiono na [figurze 1](#).

Budowę geologiczną wybranych poligonów badawczych opracowano na podstawie *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000* (arkusze: Warszawa Zachód, Piaseczno i Legionowo) oraz na podstawie danych z dostępnych wierceń archiwalnych.

BUDOWA GEOLOGICZNA WYBRANYCH POLIGONÓW BADAWCZYCH

Poligon „Józefów”. Miejsce badań jest położone w dolinie rzeki Wisły na tarasie otwockim. Powierzchnia terenu jest płaska, o rzędnych około 84–85 m n.p.m. Na badanym obszarze występują osady sypkie o miąższości dochodzącej do około 40 m. Głębiej występują iły plioceńskie. Swobodne zwierciadło poziomu wód gruntowych znajduje się na głębokości około 5 m p.p.t.

Poligon „Pole Mokotowskie”. Powierzchnia terenu jest płaska, o rzędnej około 107 m n.p.m. Warstwę przypowierzchniową na całym analizowanym terenie tworzą nasypy niekontrolowane piaszczysto-gruzowe o miąższości dochodzącej do 2 m. Pod nasypami leżą piaski fluwioglacjalne o niewielkiej miąższości (kilkadziesiąt cm), a głębiej występują gliny zlodowacenia warty o miąższości dochodzącej do kilkunastu metrów. W stropie glin, lokalnie, zaznaczają się płytkie wcięcia erozyjne. Pod warstwą glin na zmiennej głębokości (15–25 m p.p.t.) znajduje się warstwa nawodnionych piasków fluwioglacjalnych o zmiennej miąższości (od

kilku do kilkudziesięciu metrów). Zwierciadło wód podziemnych o charakterze napiętym w warstwie utworów piaszczystych stabilizuje się na głębokości około 10 m p.p.t.

Poligon „Tarchomin”. Poligon badawczy jest położony na niższym tarasie nadzalewowym rzeki Wisły, w północnej części Warszawy. Powierzchnia terenu jest płaska, o rzędnych około 81,0–81,5 m n.p.m. Na zachód od analizowanego terenu, w odległości około 1,2 km płynie rzeka Wisła.

Warstwę przypowierzchniową na całym analizowanym terenie tworzą gleby oraz nasypy o miąższości dochodzącej do 1 m. Poniżej leży seria aluwialnych osadów piaszczystych (miąższość 4,2–8,0 m). Głębiej występują osady akumulacji wodnolodowcowej i lodowcowej zlodowaceń środkowopolskich. Łączna miąższość osadów tej serii maksymalnie wynosi 26 m. W spągu osadów czwartorzędowych leżą iły plioceńskie. Strop ilów występuje na różnej głębokości, od 58 do około 74 m n.p.m. Zwierciadło wód gruntowych o charakterze swobodnym występuje na głębokości około 3 m p.p.t.

POMIARY GEOFIZYCZNE METODĄ TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ

Założenia metody elektrooporowej zostały sformułowane na początku XX w. przez braci Conrada i Marcela Schlumbergerów. Opis teorii metody można znaleźć np. w pracach Kellera i Frischknechta (1966) oraz Szymanki i Stenzela (1993). Metodę tomografii elektrooporowej opracowano pod koniec XX w. i szeroko opisano np. w pracach Kirsch (2009) i Loke'a (2012). W badaniach elektrooporowych, wykonanych na potrzeby opracowania, wykorzystano czterokanałową aparaturę Terrameter LS produkcji ABEM. Wszystkie pomiary wykonano w układzie 41 elektrod według schematu Schlumbergera. Odstęp elektrod wzdłuż

wytyczonych profili pomiarowych wynosił 5 m. Uzyskany w pomiarach zasięg głębokościowy rozpoznania oporności ośrodka wynosił do około 33 m p.p.t. Przyjęty układ pomiarowy umożliwił uzyskanie rozdzielczości w poziomie, wynoszącej około 5 m, natomiast rozdzielczość w pionie, w górnych częściach przekroju wyniosła 1,5 m, a w dolnych 2,5 m. Zwiększenie zarówno dokładności rozpoznania przebiegu granic geologicznych, jak i położenia zwierciadła wód podziemnych było możliwe dzięki dowiązaniu do niwelacji istniejących otworów geologicznych.

REZULTATY BADAŃ GEOFIZYCZNYCH

Wyniki pomiarów metodą tomografii elektrooporowej standardowo przedstawia się w postaci przekrojów izol linii, obrazujących zmiany oporności w badanym ośrodku w układzie 2D (odległości wzdłuż linii profilowania i głębokość względem powierzchni terenu). Do przetwarzania danych wykorzystano program RES2DINV firmy Geotomo Software (RES2DINV Manual, 2003). Dokładny opis metod przetwarzania pomierzonych w terenie oporności pozornych

znajduje się np. w pracach Griffithsa i Barkera (1993) oraz Loke'a i Barkera (1996).

Poligon „Józefów”. Uzyskane wyniki badań metodą ERT, nawiązane do danych geologicznych, pozwoliły na wyodrębnienie dwóch warstw (fig. 2). Granicę między tymi warstwami, tj. zwierciadło wód podziemnych o charakterze swobodnym, można bardzo precyzyjnie wyznaczyć. Poziom

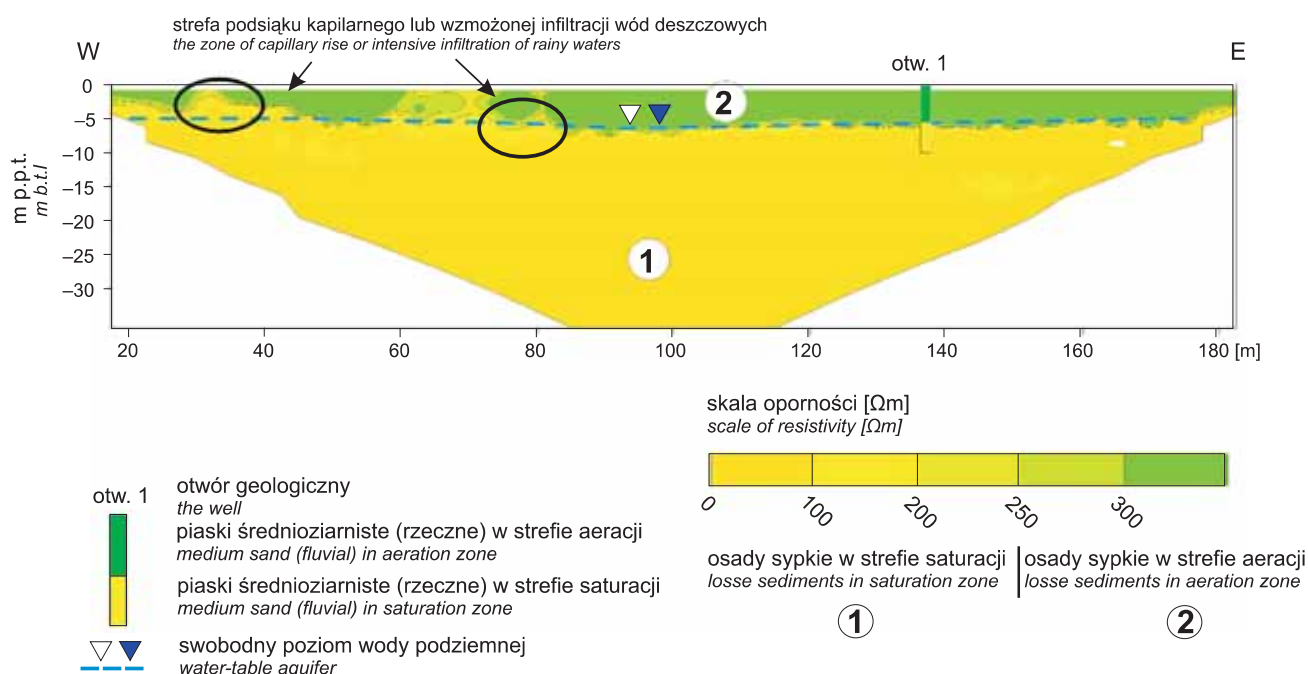


Fig. 2. Rozkład oporności rzeczywistej na poligonie „Józefów” – proste warunki gruntowo-wodne

The real resistance value in the “Józefów” test ground

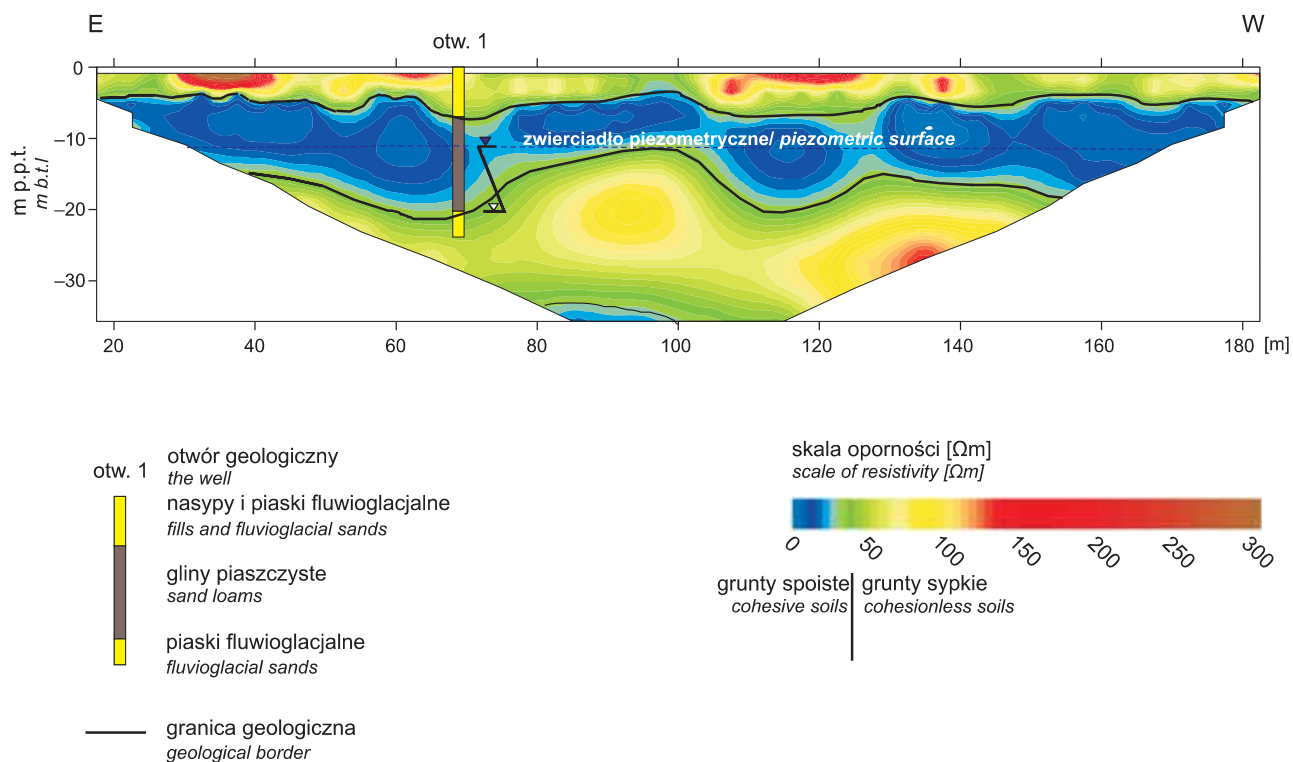


Fig. 3. Rozkład oporności rzeczywistej na poligonie „Pole Mokotowskie” – złożone warunki gruntowo-wodne

The real resistance value in the “Pole Mokotowskie” test ground

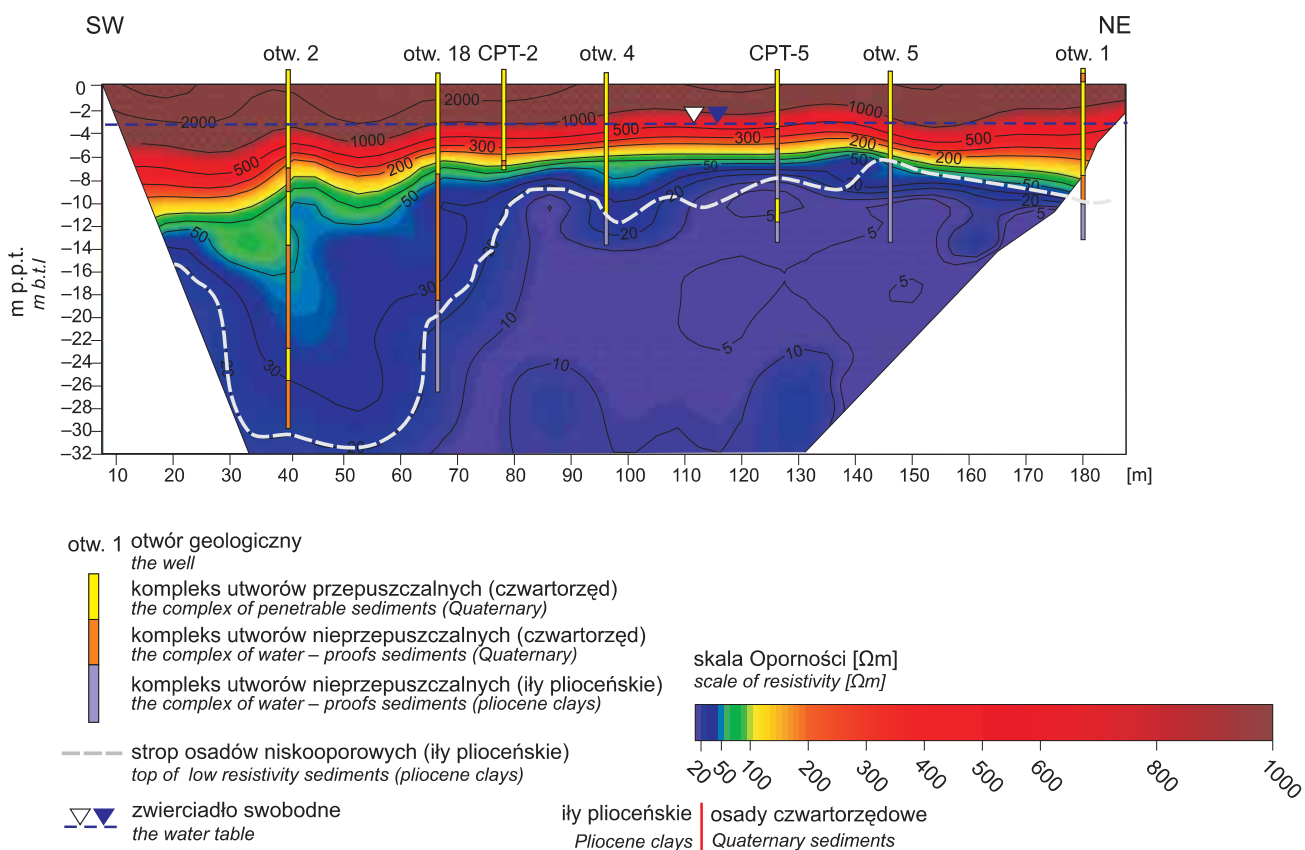


Fig. 4. Rozkład oporności rzeczywistej na poligonie „Tarchomin” – skomplikowane warunki gruntowo-wodne

The real resistance value in the “Tarchomin” test ground

wody podziemnej koreluje się z izolacją oporności rzeczywistej 250 Ω m.

W przypadku występowania podsiąku kapilarnego lub stref wzmoczonej infiltracji wód powierzchniowych (zachodnia część profilu – fig. 2), zaciera się granica między strefą saturacji i aeracji. Wynika to z braku wyraźnych kontrastów opornościowych między osadami zawodnionymi a osadami o zwiększonej wilgotności.

Poligon „Pole Mokotowskie”. Korelacja profilu otworu wiertnicznego z uzyskanymi wynikami badań metodą ERT, umożliwiła wyodrębnienie trzech warstw na przekroju pomiarowym (fig. 3). Powierzchnia zwierciadła napiętego pokrywa się ze stropem piasków fluwioglacjalnych, tj. z izolacją 50 Ω m. Z uwagi na wyraźny kontrast opornościowy między warstwami nr 1 i 2 granicę geologiczną można dość precyzyjnie wyznaczyć. Woda zawarta w warstwie nr 2 znajduje się pod ciśnieniem, stabilizującym się na głębokości około 10 m p.p.t.

Metodą ERT nie można określić wysokości ciśnienia piezometrycznego (poziomu stabilizacji).

Poligon „Tarchomin”. Na podstawie wyników badań metodą ERT i danych geologicznych wydzielono cztery warstwy geoelektryczne (fig. 4). Zastosowanie metody ERT do określenia położenia zwierciadła wód podziemnych jest nieskuteczne w warunkach geologicznych, w których strop osadów niskooporowych (iłów plioceńskich) jest płytko położony i ma duże deniwelacje (rzędu od kilku do kilkudziesięciu metrów). Na obraz rozkładu oporności rzeczywistej duży wpływ mają skrajne wartości oporności pozornej. Model oporności rzeczywistych pokazuje skomplikowaną geometrię rozkładu warstw, trudną do korelowania z punktowymi wierceniami. Poziom swobodnego zwierciadła wody jest niemożliwy do określenia w tym modelu, zdominowanym przez różnice litologiczne (piaski suche, zawodnione, gliny oraz łą ze znacznymi deniwelacjami stropu).

PODSUMOWANIE

W pracy metodę tomografii elektrooporowej zastosowano do identyfikacji i określenia położenia poziomu wody podziemnej. Pomiary wykonano na trzech poligonach badawczych, różniących się stopniem złożoności warunków gruntowo-wodnych.

Wyniki pomiarów elektrooporowych dowodzą, że w miejscach, gdzie istnieją wysokie kontrasty opornościowe między osadami, przy prostych warunkach gruntowo-wodnych, poziom wody podziemnej można precyzyjnie zidentyfikować (fig. 2). Jedynie strefy podsiąku kapilarnego lub wzmoczonej infiltracji wód opadowych mogą ten obraz zaburzyć (np. zachodnia część profilu – fig. 2).

W przypadku zwierciadła napiętego przy prostych i złożonych warunkach gruntowo-wodnych, gdzie poziom wody nawierconej odpowiada granicy między osadami spójnymi a niespójnymi, kontrasty opornościowe między nimi są na tyle wyraźne, że można dokładnie określić przebieg spągu warstwy napinającej.

Na obszarach o skomplikowanej budowie geologicznej, np. wynikającej ze znacznych deniwelacji granic geologicznych, nawet przy wyraźnych kontrastach opornościowych, nie można precyzyjnie określić ukształtowania zwierciadła wody podziemnej, ponieważ rozkład oporności elektrycznej jest zdominowany przez ukształtowanie warstw geologicznych o różnej litologii i oporności.

Autorzy są wdzięczni Mazowieckiej Jednostce Wdrażania Programów Unijnych za sfinansowanie zakupu aparatury Terrameter LS (ABEM) 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”.

LITERATURA

- GRIFFITHS D.H., BARKER R.D., 1993 — Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. Applied Geoph.*, **29**, 211–226.
- KELLER G.V., FRISCHKNECHT F.C., 1966 — Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- KIRSCH R. (red.), 2009 — Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology, 2nd ed., Springer, Flintbek.
- LOKE M.H., 2012 — Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Malaysia.
- LOKE M.H., BARKER R.D., 1996 — Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**, 131–152.
- MORAWSKI W., 1978 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Warszawa Zachód (523). Inst. Geol., Warszawa.
- NOWAK J., 1974 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Legionowo (487). Inst. Geol., Warszawa.
- RES2DINV Manual, 2003 — GEOTOMO Software, 5 Cangkat Miden Loroung 6, Miden Heights, 11700 Gelugor, Penang, Malaysia. www.geoelectrical.com.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych (DzU 2012 Nr 0, poz. 463).

SARNACKA Z., 1974 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Piaseczno (560). Inst. Geol., Warszawa.

SZYMANKO J., STENZEL P., 1993 — Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wyd. Geol., Warszawa.

SUMMARY

In this work, Electrical Resistivity Tomography was used to identify and localise the groundwater level. The measurements were carried out in three test fields with different degree of complication of geological and hydrogeological structures. The results show that in areas with high contrasts of resistivity between rock types and relatively simple geometry of the top of underlying low-resistivity formations (clays and tills), the water-level position may be determined with good precision. However, locally, in zones of strong capillary sorption or infiltration of surface water (western part of Fig. 2), the contrast of resistivity related to the water

table may become diluted on the resistivity image, providing imprecise information about the water level. In case of the confined aquifer, where the top of water-bearing layer corresponds to the bottom of the confining unit, the resistivity contrast is clear allowing precise positioning of the water level. On the contrary, in an area where the top of low-resistivity Pliocene clays (Fig. 4) is at a shallow depth and shows strong relief variations (up to tens of metres) and with very high contrasts of resistivity (up to thousands of Ωm), the ERT method fails to identify the water level as the resistivity is dominated by lithology.