

## ZASTOSOWANIE METODY GEORADAROWEJ I TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ DO OBSERWACJI POŁOŻENIA SWOBODNEGO ZWIERCIADŁA WÓD PIERWSZEGO POZIOMU WODONOŚNEGO

### GROUND PENETRATING RADAR (GEORADAR – GPR) TESTS AND ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT) TESTS USED FOR TRACKING FREE GROUNDWATER LEVEL OF THE FIRST AQUIFER

MAGDALENA GAŃKO<sup>1</sup>, RADOSŁAW MIESZKOWSKI<sup>1</sup>, ADRIAN GAŃKO<sup>2</sup>

**Abstrakt.** W artykule zaprezentowano ocenę możliwości zastosowania metody georadarowej i tomografii elektrooporowej w rozpoznaniu hydrogeologicznym płytkich wód podziemnych. Podjęto próbę wydzielenia warstw geologicznych, wyznaczenia głębokości do zwierciadła wód podziemnych, oraz określono czynniki mające wpływ na dokładność rozpoznania.

**Słowa kluczowe:** metoda georadarowa (GPR), metoda tomografii elektrooporowej (ERT), zwierciadło wody podziemnej, piezometr.

**Abstract.** The paper presents the appraisal of Ground-Penetrating Radar (GPR) tests and Electrical Resistivity Tomography (ERT) tests used in the hydrogeological exploration of shallow groundwater level. An attempt was made to identify geological layers and determine the distance downward to the groundwater level.

**Key words:** Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT), groundwater level, piezometer.

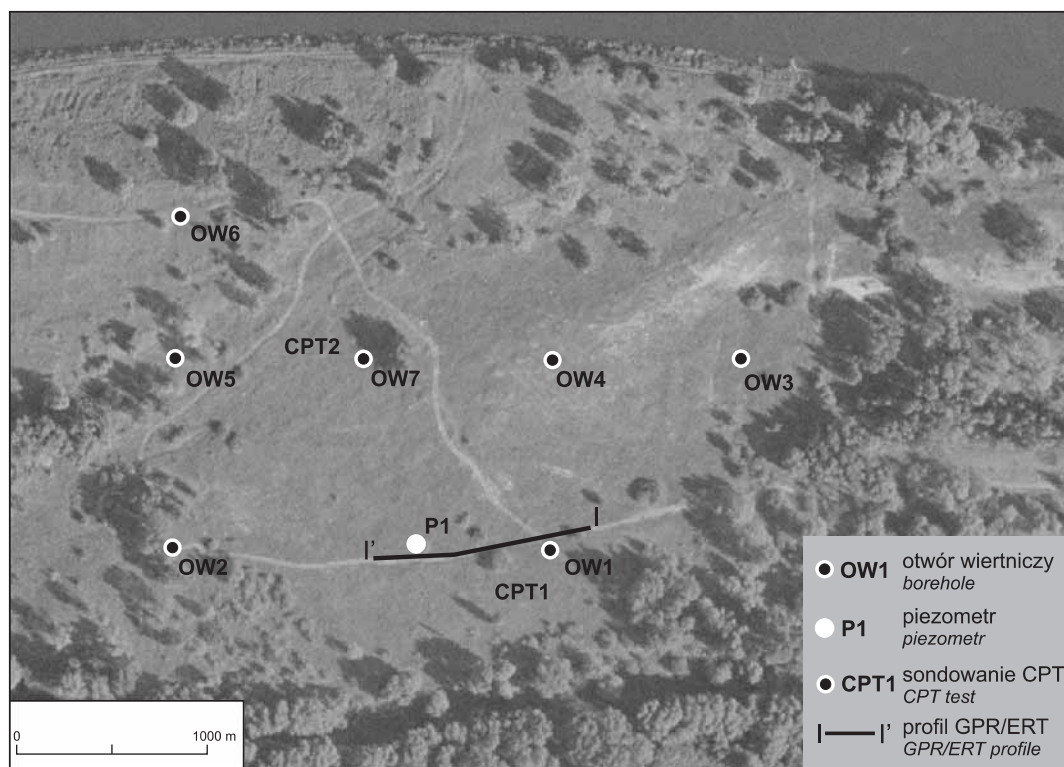
### WSTĘP

Praca ma na celu przedstawienie analizy pola fizycznego, pochodzącego od swobodnego zwierciadła wód podziemnych, uzyskanego dwoma metodami geofizycznymi – georadarową oraz tomografią elektrooporową. Jako poligon badawczy wybrano fragment tarasu zalewowego na rzece Wiśle, poniżej zapory wodnej we Włocławku. Z uwagi na położenie poligonu badawczego, zwierciadło wód podziemnych ulega w dosyć krótkich odstępach czasowych wahaniom w zakresie od 1,5 m do 3,9 m p.p.t. W artykule skoncentrowano się na problematyce poprawności określania położenia zwierciadła wody podziemnej wybranymi metoda-

mi geofizycznymi dla dynamicznie zmieniającego się układu. Pomiary wykonano w dwóch okresach – w sierpniu 2011 r. i październiku 2012 r., przy różnicy głębokości do zwierciadła wód podziemnych równej dwa metry. W celu zweryfikowania wyników prac geofizycznych z warunkami gruntowo-wodnymi, na wybranym poligonie wykonano wiercenia, sondowania CPT oraz piezometr (lokalizacja – [fig. 1](#)). Obserwacje na wybranym poligonie badawczym trwają od wiosny 2011 r. i zostały częściowo opracowane przez autorów w złożonym do druku artykule (Gańko i in., 2013).

<sup>1</sup> 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

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



**Fig. 1. Mapa dokumentacyjna terenu badań**

Documentary map of the study area

## POŁOŻENIE I BUDOWA GEOLOGICZNA POLIGONU BADAWCZEGO

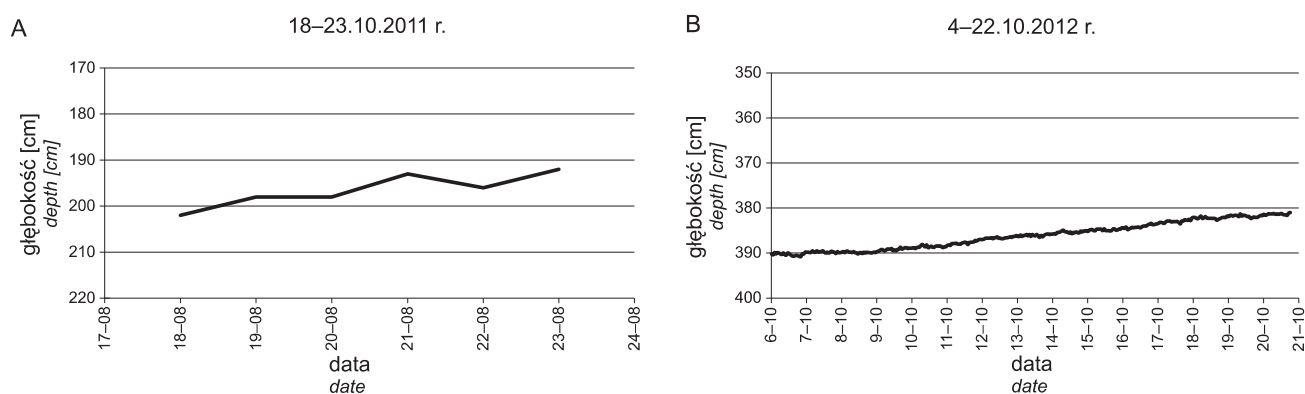
Badany teren znajduje się w województwie kujawsko-pomorskim, na terenie Włocławka. Pod względem zagospodarowania terenu jest to nieużytek zielony pokryty roślinnością trawiastą z nielicznymi drzewami i krzewami. Pod względem geomorfologicznym teren badań znajduje się w dolinie Wisły, na niższym tarasie zalewowym i jest stosunkowo płaski. W celu rozpoznania warunków grunto-

wo-wodnych wykonano wiercenia i sondowania CPT do maksymalnej głębokości 11 m p.p.t. – do stropu iłów pliczeńskich. Na poligonie badawczym występują osady aluwialne, wykształcone w postaci piasków średnioziarnistych, lokalnie grubo- i drobnoziarnistych o miąższości do 10 m, z przewarstwieniami mad. Głębiej występuje strop iłów pliczeńskich.

## WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Pierwszy swobodny poziom wodonośny występuje stosunkowo płytko pod powierzchnią terenu i nie jest izolowany utworami nieprzepuszczalnymi, z wyjątkiem lokalnie występujących mad o niewielkiej miąższości. Warstwę wodonośną budują piaski średnio- i gruboziarniste miejscami przewarstwione drobnoziarnistymi. Położenie zwierciadła wód podziemnych ściśle zależy od stanu wód rzeki Wisły. Spąg warstwy wodonośnej nawiercono na głębokościach 9,8 m oraz 10,5 m.

Na terenie badań wykonano piezometr obserwacyjny (wyposażony w *diver*), który umożliwia zdalne prowadzenie stałego monitoringu wahań wód pierwszego poziomu wodonośnego. Wykres położenia zwierciadła wód podziemnych w czasie prowadzenia badań oraz w dniach poprzedzających przedstawiono na [figurze 2](#). W obydwu przedziałach czasowych stwierdzono analogiczną tendencję wzrostu położenia zwierciadła wody.



**Fig. 2.** Wykresy zmian położenia zwierciadła wody

The graphs of changes in the groundwater level

## METODY POMIARÓW GEOFIZYCZNYCH

Badania geofizyczne z użyciem systemów georadarowych opierają się na zjawisku odbicia fal elektromagnetycznych o wysokich częstotliwościach, emitowanych za pomocą specjalnych anten nadawczych w głąb ośrodka geologicznego. Zagadnienie badań georadarowych opisano w pracach Jola (2009), Karczewskiego (2007) oraz Kirsch (2009). Na poligonie badawczym wykonano cztery profile georadarowe antenami ekranowanymi o częstotliwościach 100, 250 i 500 MHz. Na potrzeby publikacji wykorzystano odcinek profilu I–I', przedstawionego na figurze 1. Do wykonania badań metodą profilowania radarowego zastosowano uniwersalny system RAMAC GPR produkcji Mała Geo-Science. Maksymalny zasięg głębokościowy badań w rozpoznanym ośrodku gruntowym sięgał do około 5 m.

Metodę ERT opracowano pod koniec XX w. i opisano np. w pracach Kirsch (2009) i Loke'a (2012). Ogólnie metoda ta, podobnie jak inne metody elektrooporowe, opiera się na zjawisku przepływu stałego prądu elektrycznego przez ośrodek skalny. Zasięg głębokościowy metody ERT jest pochodną długości stosowanych rozstawów pomiarowych oraz rozkładu oporności elektrycznych w przestrzeni objętej pomiarem. W artykule opisano wykonane modele rozkładu oporności dla dwóch stanów zwierciadła wód podziemnych – 1,9 m p.p.t. (sierpień 2011 r.) oraz 3,9 m p.p.t. (październik 2012 r.). Pomiary wykonano w układzie Wennera dla 41 elektrod, rozstawionych co 2 m wzdłuż profilu georadarowego I–I'. Głębokość prospekcji sięgała do około 14 m p.p.t.

## REZULTATY BADAŃ GEOFIZYCZNYCH

### METODA GEORADAROWA

Przetwarzanie uzyskanych wyników badań georadarowych wykonano przy użyciu systemu do zaawansowanego *processingu* i interpretacji danych – ReflexW firmy Sandmaier Co. Z uwagi na wymogi redakcyjne, co do ilości stron, w artykule przedstawiono i poddano analizie wyniki badań georadarowych, przeprowadzonych anteną ekranowaną 250 MHz jedynie wzdłuż profilu I–I'. Pomiary georadarowe wykonano w sierpniu 2011 r. oraz w październiku 2012 r., w celu sprawdzenia, czy na echogramach GPR zaznaczy się refleks od swobodnego zwierciadła wody podziemnej przy jej zmiennych stanach. Do korelacji refleksów ze zwierciadłem wody podziemnej wykorzystano dane z piezometru. Wyniki profilowań GPR z podaną interpreta-

cją przedstawiono na figurze 3. W przypadku badań wykonanych w sierpniu 2011 r. swobodne zwierciadło wody podziemnej występowało na głębokości 1,9 m p.p.t. Poziom ten wyraźnie zaznaczał się na echogramie (fig. 3A). Poniżej zwierciadła wody podziemnej fale elektromagnetyczne ulegały tłumieniu, co uniemożliwiło wykonanie prawidłowej identyfikacji głębiej występujących granic geologicznych.

Badania georadarowe wykonane w październiku 2012 r., przy zwierciadle wody podziemnej na głębokości 3,9 m p.p.t., umożliwiły wskazanie słabych refleksów od zwierciadła wody. Weryfikację przeprowadzono na podstawie korelacji ze wskazaniem stanu wody w piezometrze. Zauważono, że przy obniżonym zwierciadle wód gruntowych, na echogramie (fig. 3B) pojawiło się kilka wyraźnych refleksów, których nie stwierdzono na echogramach wykonanych

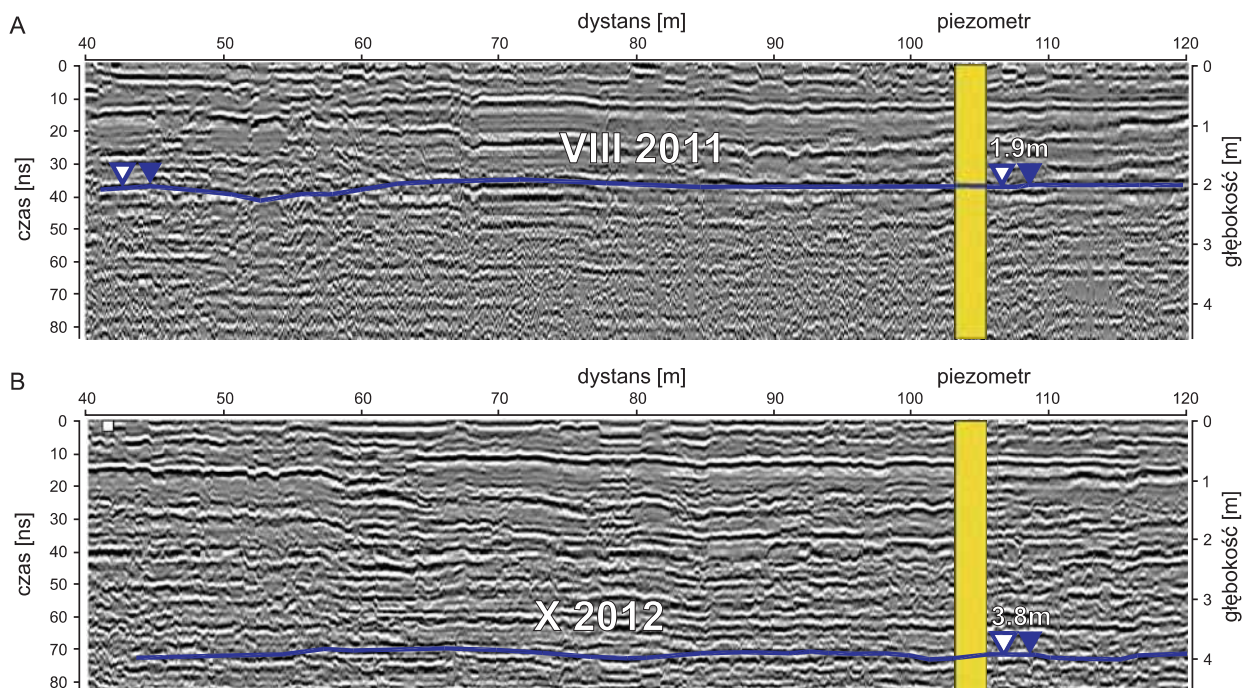


Fig. 3. Echogramy badań GPR wzdłuż fragmentu profilu I-I' (dystans 40–120 m)

GPR echograms along part of the profile I-I' (distance 40–120 m)

w sierpniu 2011 r. Ma to związek ze słabszym tłumieniem fal elektromagnetycznych w ośrodku, który nie jest nawodniony.

#### METODA TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ

Wyniki modelowania rozkładu oporności rzeczywistej metodą tomografii elektrooporowej, w nawiązaniu do

danych geologicznych i georadarowych, umożliwiły wyodrębnienie trzech warstw geoelektrycznych wzdłuż analizowanego profilu – iłłów płoceńskich ( $<20 \Omega\text{m}$ ), piasków strefy saturacji ( $20\text{--}250 \Omega\text{m}$ ) oraz piasków strefy aeracji (ok.  $250 \Omega\text{m}$ ).

Dla stanów wód pomierzonych w sierpniu 2011 r. zwierciadło wód podziemnych o charakterze swobodnym, występujące na głębokości 1,9 m p.p.t., wyznacza izolonia około  $250 \Omega\text{m}$  (fig. 4)

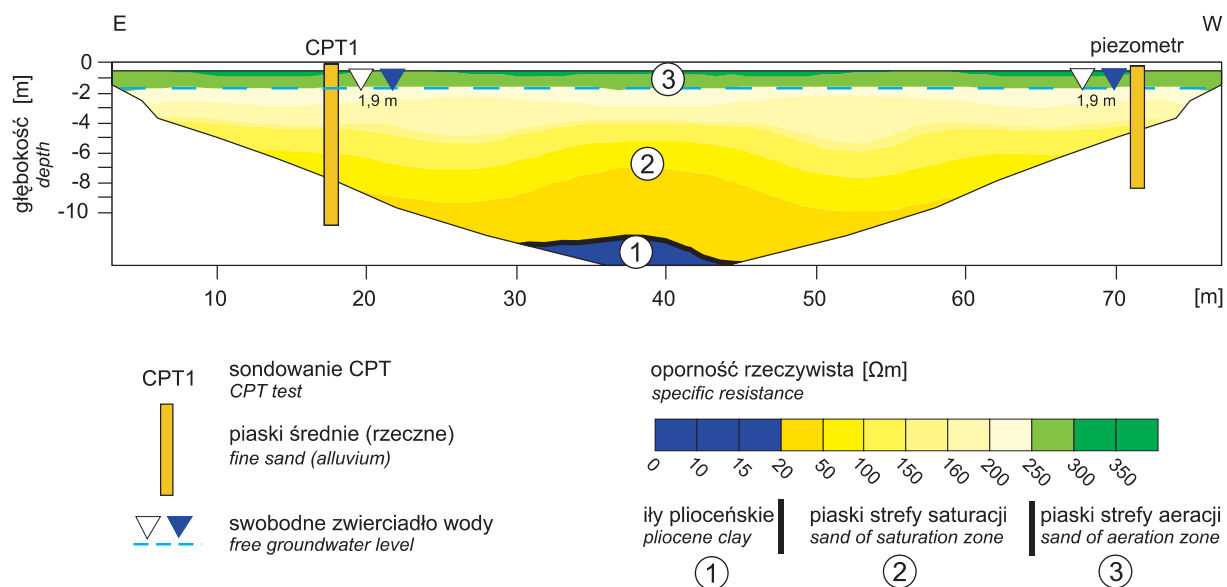


Fig. 4. Model rozkładu oporności rzeczywistej dla profilu I-I' – sierpień 2011 r.

Model of the real resistance distribution for the profile I-I' – August 2011

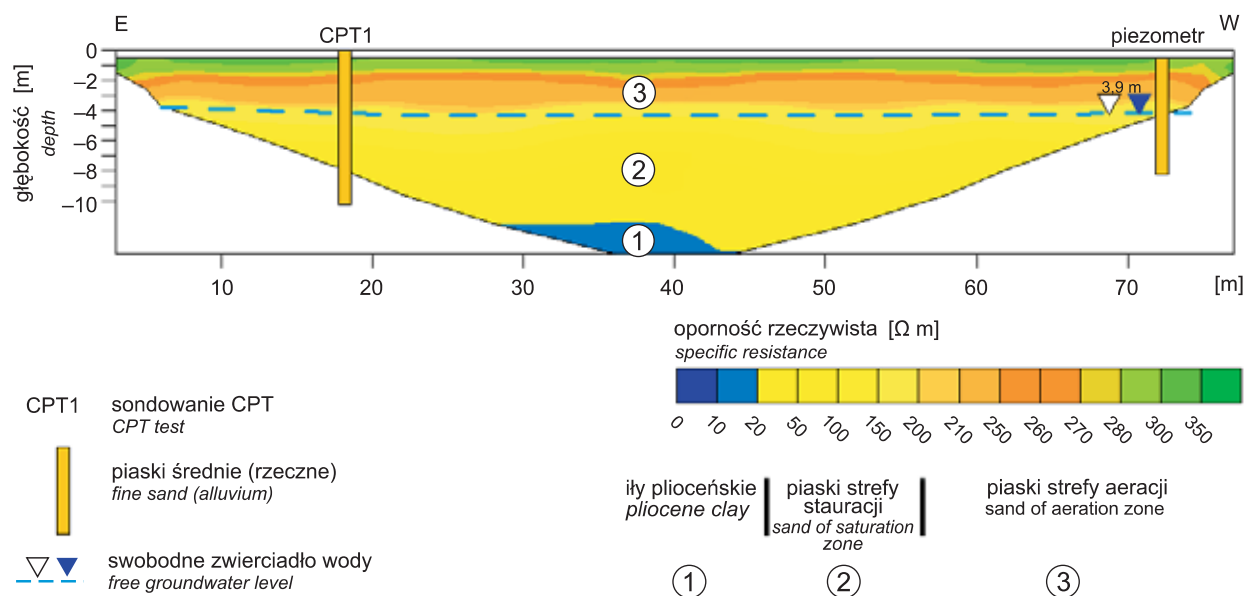


Fig. 5. Model rozkład oporności rzeczywistej dla profilu I-I' – październik 2012 r.

Model of the real resistance distribution for the profile I-I' – October 2012

Dla stanów wód pomierzonych w październiku 2012 r. zwierciadło wód podziemnych, występujące na głębokości około 4 m p.p.t., wyznacza izolacja około 200  $\Omega$ m (fig. 5). W strefie wahań zwierciadła wód, pomiędzy 1,9 m p.p.t. a 3,9 m p.p.t., wyraźnie zaznacza się strefa o podwyższonych opornościach w zakresie 200–280  $\Omega$ m. Ma to związek

z częściowym nasyceniem porów gruntów w strefie wahań stanów wód (podsiąk kapilarny), co przekłada się na brak kontrastu opornościowego oraz trudności z wyrażnym wyznaczeniem zwierciadła wody podziemnej. Różnica w wartościach oporności [ $\Omega$ m], może wynikać ze zróżnicowanego poziomu infiltracji wód opadowych.

## PODSUMOWANIE

Przy interpretacji wyników badań geofizycznych metodami georadarową i tomografii elektrooporowej wskazane jest nawiązanie do otworu badawczego o dobrze rozpoznanej litologii i warunkach hydrogeologicznych. Na podstawie przeprowadzonych badań geofizycznych, jednoznacznie stwierdzono położenie swobodnego zwierciadła wód podziemnych. Zwierciadło na głębokości 1,9 m p.p.t. wyraźnie zaznacza się na profilach geofizycznych. Natomiast zwierciadło na głębokości około 3,9 m p.p.t. zaznacza się mniej wyraźnie. Ma to związek z częściowym nasyceniem porów gruntów w strefie dynamicznego wahań stanu wód i przez to ze zwiększonym tłumieniem fal elektromagnetycznych

oraz brakiem wyraźnego kontrastu pomiędzy strefą saturacji i aeracji. Poniżej zwierciadła wody podziemnej fale elektromagnetyczne ulegają tłumieniu, co uniemożliwia identyfikację głębiej występujących warstw geologicznych. Natomiast tomografia elektrooporowa umożliwia głębsze rozpoznanie profilu gruntowego poniżej zwierciadła wody.

Problem utraty kontrastu pomiędzy strefą aeracji i saturacji przy wykorzystaniu powyższych metod podlega złożonym czynnikom, takim jak podsiąk kapilarny, wielkość infiltracji wód opadowych oraz głębokość występowania zwierciadła wód podziemnych.

## LITERATURA

- GAŃKO M., MIESZKOWSKI R., GAŃKO A., 2013 — Analiza porównawcza metod geofizycznych z warunkami geologiczno-inżynierskimi na przykładzie poligonu badawczego Kępa Włocławska [w druku].
- JOL H.M. (red.), 2009 — Ground Penetrating Radar: Theory and Application. Elsevier, Amsterdam.
- KARCZEWSKI J., 2007 — Zarys metody georadarowej. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- 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.

## SUMMARY

It is recommended to correlate the results of GPR and ERT tests with well logs to determine the lithology and hydrogeological conditions. The location of free groundwater level was explicitly defined on the basis of performed geophysical tests. The groundwater level at the depth of 1.9 m bgl was quite clearly marked on the geophysical profiles, while at the depth of 3.9 m bgl, it was marked less

clearly due to partial pore saturation in the zone of dynamic changes of groundwater level, resulting in the lack of contrast between the saturation and aeration zones. The electromagnetic waves below the groundwater level are subject to dumping that prevents deeper geological layers to be identified. ERT tests allow deeper identification of soil layers below the groundwater level.