

## Analiza porównawcza wyników badań geofizycznych i geologiczno-inżynierskich na potrzeby ustalania modelu geologicznego – przykład poligonu badawczego Kępa Włocławska

Magdalena Gańko<sup>1</sup>, Radosław Mieszkowski<sup>1</sup>, Adrian Gańko<sup>2</sup>



M. Gańko



R. Mieszkowski



A. Gańko

**Comparative analysis of the results of geophysical and geological-engineering methods on the example of Włocławek River-islet investigative testing ground.** *Prz. Geol.*, 63: 121–130.

*Abstract.* The paper presents the correlation of geophysical methods with geological-engineering data. As an experimental testing ground, a terrain with simple soil conditions was selected, located on the Włocławek River-islet. This is a large alluvial area on the Vistula River, downstream of the Włocławek Dam. In the study, the following geophysical methods were applied: vertical electrical sounding (VES), refraction seismic, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT). The evaluation of geological-engineering conditions was executed by using the

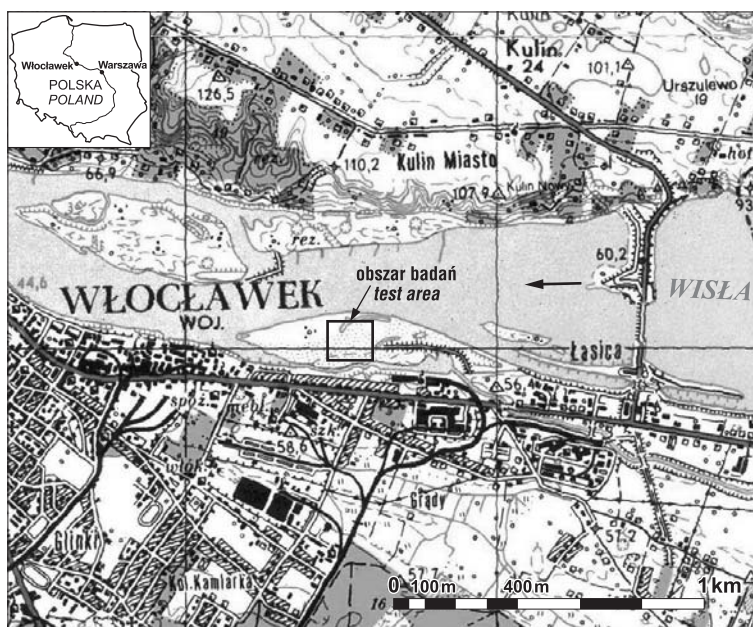
following methods: drilling, cone penetration test (CPT sounding), measurements of the underground water level and macroscopic and laboratory analyses of soils samples. The results obtained were described and presented in a graphic form.

**Keywords:** ground penetrating radar (GPR), vertical electrical sounding (VES), Electrical Resistivity Tomography (ERT), refraction seismics, cone penetration test (CPT)

Prezentowany w artykule problem dotyczy dokładności rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich danego terenu. Za pomocą tradycyjnych metod geologiczno-inżynierskich (wiercenia, sondowania, pobieranie próbek i in.) rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych dokonuje się punktowo, tj. w układzie 1D. Osoba interpretująca wyniki prac terenowych i laboratoryjnych jest zmuszona do interpolowania oraz prognozowania warunków gruntowo-wodnych obszaru zawartego między punktami dokumentacyjnymi. Oznacza to, że opracowując model geologiczny w formie przekroju geologiczno-inżynierskiego, nie można być pewnym, czy interpretacja warunków gruntowo-wodnych w podłożu gruntowym jest w 100% prawdziwa. W pracy przedstawiono zagadnienie korelacji wyników badań geofizycznych z wynikami prac geologiczno-inżynierskich. Celem artykułu jest sprawdzenie możliwości aplikacyjnych wybranych metod geofizycznych, jako uzupełniających określenie warunków geologiczno-inżynierskich w podłożu gruntowym. Na poligon doświadczalny wybrano teren charakteryzujący się prostymi warunkami gruntowymi, położony na Kępie Włocławskiej, tj. rozległym odsypie meandrowym na Wiśle, poniżej zapory we Włocławku (ryc. 1).

Do rozpoznania pola fizycznego poligonu badawczego wybrano powszechnie stosowane metody geofizyczne, tj.: metodę georadarową (GPR), pionowe sondowania elektrooporowe (VES), metodę tomografii elektrooporowej (ERT)

oraz sejsmikę refrakcyjną. Określenie warunków geologiczno-inżynierskich istniejących w podłożu gruntowym poligonu badawczego wykonano za pomocą: wierceń, sondowań CPT, pomiarów poziomu wody podziemnej oraz analizy makroskopowej i laboratoryjnej pobranych próbek gruntów. Lokalizację punktów dokumentacyjnych badań



**Ryc. 1.** Mapa lokalizacyjna poligonu badawczego na Kępie Włocławskiej (1 : 25 000), [www.geoportal.pl](http://www.geoportal.pl)

**Fig. 1.** Location map of the Włocławek River-islet investigative testing ground (1 : 25 000), [www.geoportal.pl](http://www.geoportal.pl)

<sup>1</sup> Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; [magdalena.ganko@student.uw.edu.pl](mailto:magdalena.ganko@student.uw.edu.pl); [r.mieszkowski@uw.edu.pl](mailto: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](mailto:adrian.ganko@geoteko.com.pl).

geologiczno-inżynierskich oraz punktów dokumentacyjnych i profili geofizycznych przedstawiono na rycinie 2.

### BUDOWA GEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Wybrany poligon badawczy Kępa Włocławska jest położony w dolinie rzeki Wisły. Powierzchnia terenu jest na ogół płaska. Miejscami zarysowują się niewielkie obniżenia, powstałe w wyniku działalności przepływów powodziowych na Wiśle. Rzędne terenu zawierają się w przedziale ok. 45,0–47,5 m n.p.m. W podłożu występują czwartorzędowe osady aluwialne: żwiry i piaski o różnej granulacji przewarstwione lokalnie cienkimi warstwami mad (SMGP 1 : 50 000, arkusz Włocławek – Mojski, 1958). Miąższość osadów czwartorzędowych waha się w przedziale 8–13 m. Głębiej zalegają osady plioceńskie wykształcone w postaci ilów pylastych, ilów, glin pylastych i pyłów o barwie brązowoszarej do szarej. Odsłonięcia na prawym brzegu Wisły (na wysokości badanego obszaru) świadczą o zaburzeniu położenia osadów pliocenu w stosunku do pierwotnego stanu.

W utworach czwartorzędowych stwierdzono występowanie jednego swobodnego poziomu wodonośnego, występującego na zmiennej głębokości w zależności od poru roku, tj. od ok. 1 do ok. 4 m p.p.t. Tak duża zmienność położenia zwierciadła wody podziemnej wynika z bliskości stopnia wodnego „Włocławek”, który jest oddalony o ok. 1,5 km na wschód od terenu badań.

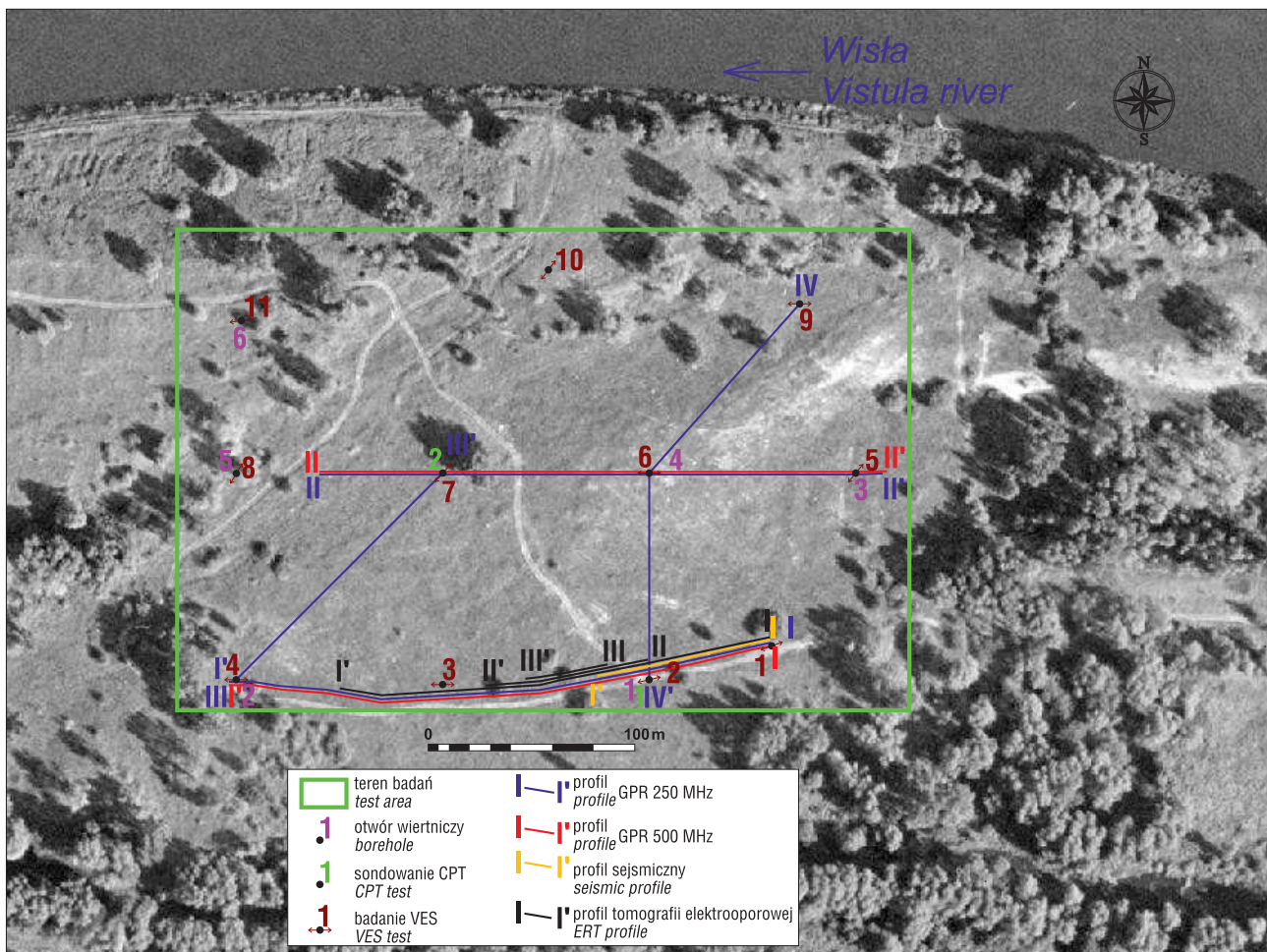
### ZASTOSOWANE METODY GEOFIZYCZNE

Na poligonie badawczym Kępa Włocławska wykonano pomiary geofizyczne czterema metodami: georadarową (GPR), pionowych sondowań elektrooporowych (VES), tomografii elektrooporowej (ERT) oraz sejsmiki refrakcyjnej (ryc. 2). Ich celem było określenie przebiegu warstw geologiczno-inżynierskich pomiędzy otworami wiertniczymi oraz skorelowanie anomalii geofizycznych z wynikami badań inwazyjnych (wiercenia geologiczne i sondowania CPT).

#### Metoda pionowych sondowań elektrooporowych (VES)

Założenia metody elektrooporowej zostały sformułowane na początku XX w. przez braci Conrada i Marcela Schlumbergerów. Opis teorii metody można znaleźć m.in. w pracach Kellera & Frischknechta (1966) lub Szymanko & Stenzla (1973).

W ramach opracowania wykonano jedenaście pionowych sondowań elektrooporowych, w układzie Schlumbergera, o rozstawie elektrod prądowych AB/2 od 63 do 100 m (ryc. 2). Taki rozstaw umożliwił rozpoznanie rozkładu oporności gruntów do głębokości ok. dwudziestukilku metrów. Pomiary wykonano aparaturą PMG102 (produkcji polskiej). Do przetwarzania danych wykorzystano specjalistyczny program IPI2Win wersja 2.1 - IPI\_Res2 i IPI\_Res3, zalecany do metody elektrooporowej.



Ryc. 2. Mapa dokumentacyjna  
Fig. 2. The documentation map



### Metoda tomografii elektrooporowej (ERT)

Metoda tomografii elektrooporowej została opracowana pod koniec XX w. i jest szeroko opisana w pracach Kirscha (2009) i Loke'a (2012). W badaniach elektrooporowych wykonanych do niniejszego opracowania wykorzystano aparaturę Terrameter LS ABEM (produkcji szwedzkiej). Wzdłuż wybranej trasy pomierzono rozkłady oporności elektrycznej gruntów dla trzech rozstawów elektrod co: 5, 2 i 1 m. Przyjęta metodyka pomiarowa umożliwiła uzyskanie rozkładu oporności elektrycznej gruntów dla trzech zakresów głębokości prospekcji oraz rozdzielczości:

- profil I–I' – rozstaw elektrod co 5 m, protokół gradient (głębokość prospekcji do 35 m), rozdzielczość w poziomie wyniosła 5 m, rozdzielczość w pionie jest zmienna, w górnych częściach przekroju osiąga 2 m, natomiast w dolnych – 5 m;

- profil II–II' – rozstaw elektrod co 2 m, protokół gradient (głębokość prospekcji do 14 m), rozdzielczość w poziomie wyniosła 2 m, rozdzielczość w pionie jest zmienna, w górnych częściach przekroju osiąga 1 m, natomiast w dolnych – 2 m;

- profil III–III' – rozstaw elektrod co 1 m, protokół Schlumberger (głębokość prospekcji do 6 m), rozdzielczość w poziomie wyniosła 1 m, rozdzielczość w pionie jest zmienna: w górnych częściach przekroju sięga 0,5 m, natomiast w dolnych – 1 m.

Zwiększenie dokładności rozpoznania przebiegu granic geologicznych oraz położenia zwierciadła wód podziemnych było możliwe dzięki dowiązaniu do niwelacji istniejących otworów geologicznych.

### Metoda georadarowa (GPR)

Idea badań geofizycznych z użyciem systemów georadarowych opiera się na zjawisku odbicia fal elektromagnetycznych o wysokich częstotliwościach, emitowanych za pomocą specjalnych anten nadawczych, w głąb ośrodka geologicznego. Zagadnienie to było opisane w pracach Karczewskiego, 2007; Jola, 2009 oraz Kirscha, 2009.

Istotny wpływ na możliwości prospekcji georadarowej ma oporność elektryczna badanego ośrodka. Im oporność elektryczna jest niższa, tym większe tłumienie fali oraz spadek zasięgu prospekcji fal elektromagnetycznych i odwrotnie – im wyższa oporność elektryczna, tym głębokość prospekcji radarowej wzrasta. Odnosząc te zależności do warunków zastanych na wybranym poligonie, zauważono, że w gruntach sypkich (aluwialnych) w strefie saturacji fale elektromagnetyczne ulegały silnemu tłumieniu, tj. obraz granic refleksyjnych był niewyraźny. Zjawisko to miało wpływ na redukcję głębokości rozpoznania oraz rozdzielczość metody poniżej zwierciadła wody podziemnej.

Natomiast w strefie aeracji, w gruntach sypkich, nawet niewielka różnica parametrów elektrycznych gruntów (stałej dielektrycznej i oporności elektrycznej), spowodowana zmianą właściwości fizyko-mechanicznych gruntów (np. uziarnieniem lub zagęszczeniem), miała wpływ na powstawanie wyraźnych refleksów fal elektromagnetycznych.

W gruntach spoistych metoda georadarowa ma bardzo ograniczone możliwości prospekcji z uwagi na silne tłumienie fal elektromagnetycznych.

Na poligonie badawczym wykonano 4 profile georadarowe anteną ekranowaną o częstotliwości 250 MHz i 2 profile anteną ekranowaną o częstotliwości 500 MHz oraz przetestowano pomiary anteną 100 MHz.

Antena 250 MHz umożliwiła prospekcję do głębokości ok. 6 m, zaś antena 500 MHz (o większej rozdzielczości) pozwoliła rozpoznać podłoże do głębokości ok. 1,4 m. Zapis czasów rejestracji fal elektromagnetycznych przedstawia się na echogramach. Wyniki uzyskane anteną 100 MHz charakteryzowały się zbyt małą rozdzielczością, dlatego rezultatów tych nie uwzględniono.

Do wykonania badań metodą profilowania radarowego zastosowano uniwersalny system RAMAC GPR produkcji szwedzkiej firmy Mala GeoScience. System rejestracji danych georadarowych był wyposażony w komputer przenośny typu notebook wraz z oprogramowaniem firmowym GroundVision przeznaczonym do akwizycji, analizy i uproszczonego przetwarzania danych w trakcie wykonywania pomiarów. Dokładne przetwarzanie otrzymanego sygnału GPR wykonano oprogramowaniem ReflexW (produkcji K.J. Sandmeier Co.).

### Metoda sejsmiki refrakcyjnej

Podstawą fizyczną wykorzystania pomiarów sejsmicznych w prospekcji geologiczno-inżynierskiej jest, wynikająca z teorii sprężystości, zależność prędkości fal sejsmicznych rozchodzących się w ośrodku od jego parametrów mechanicznych związanych z litologią, stopniem zagęszczenia materiału, czy też stopniem zniszczenia pierwotnej struktury ośrodka (Szymanko & Stenzel, 1973).

W metodzie sejsmiki refrakcyjnej rejestruje się czas wstąpienia fal refrakcyjnych, czyli załamanych pod kątem granicznym na granicy dwóch ośrodków, z których ośrodek leżący niżej charakteryzuje się większymi prędkościami fal sejsmicznych. Pomiary wykonano metodą profilowania aparaturą 18-kanalową dla dwóch rozstawów geofonów – 1 i 5 m. Fale sejsmiczne dla każdego rozstawu wzbudzano na obu jego końcach, wzdłuż rozstawu w odstępach, co 2–3 geofony oraz na zewnątrz profilów, w odstępnie połowy długości profilu. Zastosowana metoda pomiarów umożliwiła szczegółowe zróżnicowanie prędkości fal sejsmicznych w przypowierzchniowej warstwie osadów oraz ciągłe śledzenie granicy sejsmicznej stropu ilów plioceńskich, zalegających na głębokości do ok. 10 m p.p.t. Obliczenia wykonano oprogramowaniem ReflexW (produkcji K.J. Sandmeier Co.).

Fale sejsmiczne wzbudzano udarowo, młotem o ciężarze 8 kg. Do rejestracji drgań zastosowano geofony o częstotliwości 28 Hz i aparaturę sejsmiczną DMT Summit.

### Uzyskane wyniki badań geofizycznych

Zastosowane metody geofizyczne mierzyły różne parametry pola fizycznego gruntów, tj.: oporność elektryczną (VES i ERT), czas przemieszczania się fal elektromagnetycznych (GPR) oraz czas przemieszczania się fal sejsmicznych (metoda refrakcyjna). Uzyskane wyniki charakteryzują się odmiennymi rozdzielczościami oraz zasięgiem głębokościowym i w różnym stopniu przyczyniły się do szczegółowego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych.

**Wyniki uzyskane metodą pionowych sondowań elektrooporowych (VES).** W wyniku przetwarzania i interpretacji ilościowej krzywych pionowych sondowań elektrooporowych otrzymano obraz rozpozniowania warstw geologicznych na podstawie rozkładu oporności rzeczywistych w skali głębokości rzeczywistej. Obrazy wybranych krzywych pomierzonych w terenie, wraz z interpretacją geologiczną, przedstawiono na rycinie 3a–d.

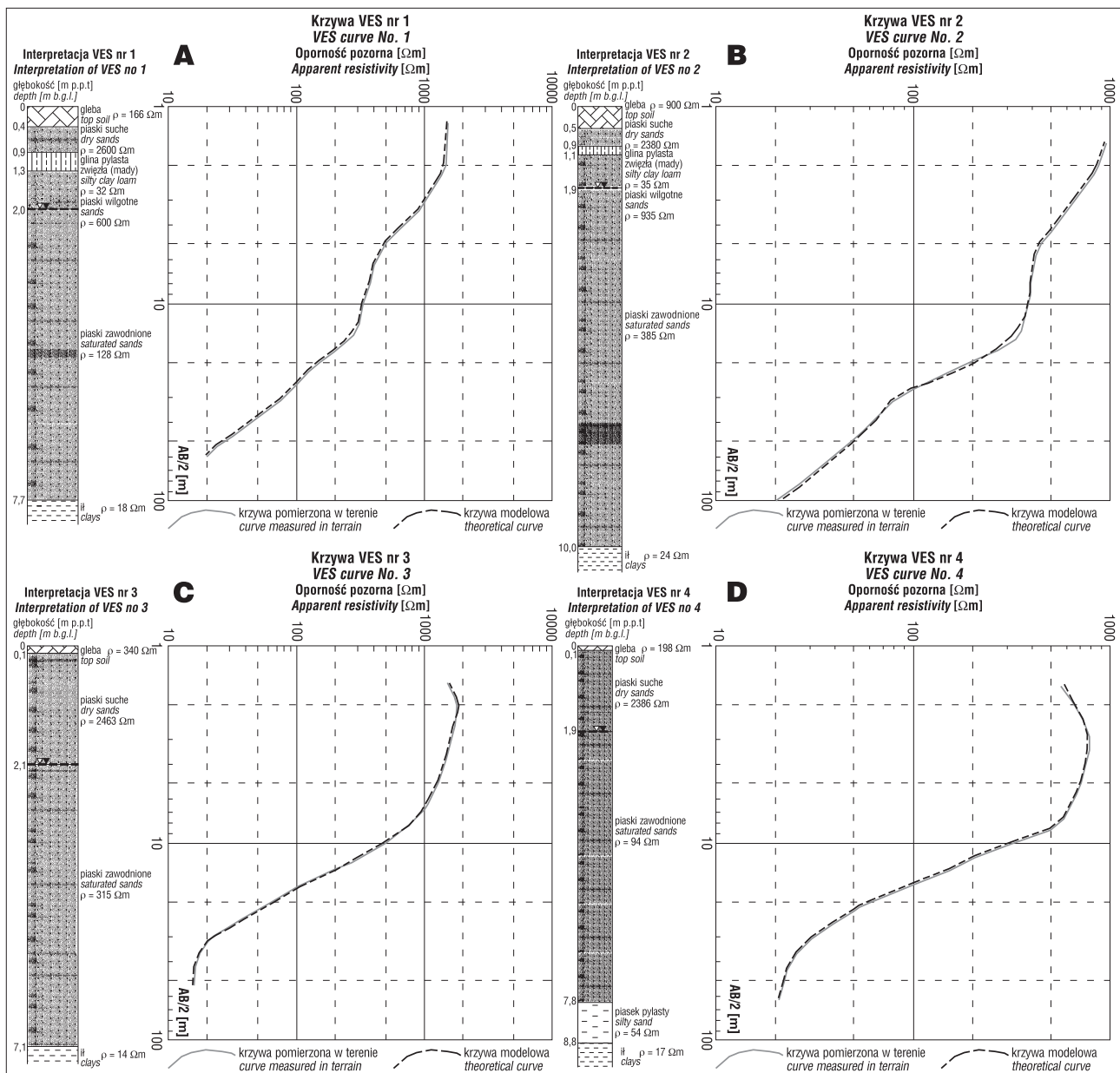
Osady strefy aeracji wykazują oporności w przedziale 600–2600  $\Omega\text{m}$ , natomiast osady strefy saturacji charakteryzują się opornościami rzędu 94–385  $\Omega\text{m}$ . Głębokość poziomu wód podziemnych (ok. 2 m p.p.t), stwierdzona otworami wiertniczymi, koreluje się z wynikami badań elektrooporowych.

Występowanie stropu iłów płoceńskich, na podstawie metody pionowych sondowań elektrooporowych, wyinterpretowano na głębokości ok. 7,1–10,0 m p.p.t. Odpowiada ona głębokości stropu iłów w wierceniach nr 2 (8,8 m p.p.t) i nr 4 (10,5 m p.p.t) oraz sondowaniach CPT nr

2 (9,0 m p.p.t) (por. z odpowiednimi rycinami w rozdz. Badania geologiczno-inżynierskie).

**Wyniki uzyskane metodą tomografii elektrooporowej (ERT).** Podstawową jakością zaletą metody ERT, w przeciwieństwie do metody VES, jest sposób opracowania rezultatów pomiarów. W metodzie ERT rozkład oporności elekttrycznej ośrodka modeluje się układem płasko-równoległych bloków, a nie płasko-równoległych warstw, jak w metodzie VES. Modelowanie takie umożliwia określenie zróżnicowania oporności ośrodka w kierunku pionowym i poziomym na powierzchni przekroju wzdłuż linii układu pomiarowego.

Uzyskane obrazy oporności pozornej zostały przetworzone w programie Res2dinv firmy Geotomo Software z zastosowaniem automatycznej inwersji. Procedura ta jest wykonywana iteracyjnie z założeniem minimalizacji błędu dopasowania. Rezultatem przetwarzania jest najbardziej prawdopodobny obraz oporności ośrodka geologicznego, jaki można otrzymać na podstawie danych oporności pozor-



Ryc. 3. A–D Krzywe wynikowe pionowych sondowań elektrooporowych  
 Fig. 3. A–D Resultant curves of vertical electrical sounding

nej uzyskanych z pomiarów terenowych. Przeprowadzone badania ERT umożliwiły quasi-ciągłe dwuwymiarowe prześledzenie rozkładu oporności elektrycznej w gruntach występujących w przekroju pionowym wzdłuż linii pomiarowej (ryc. 4).

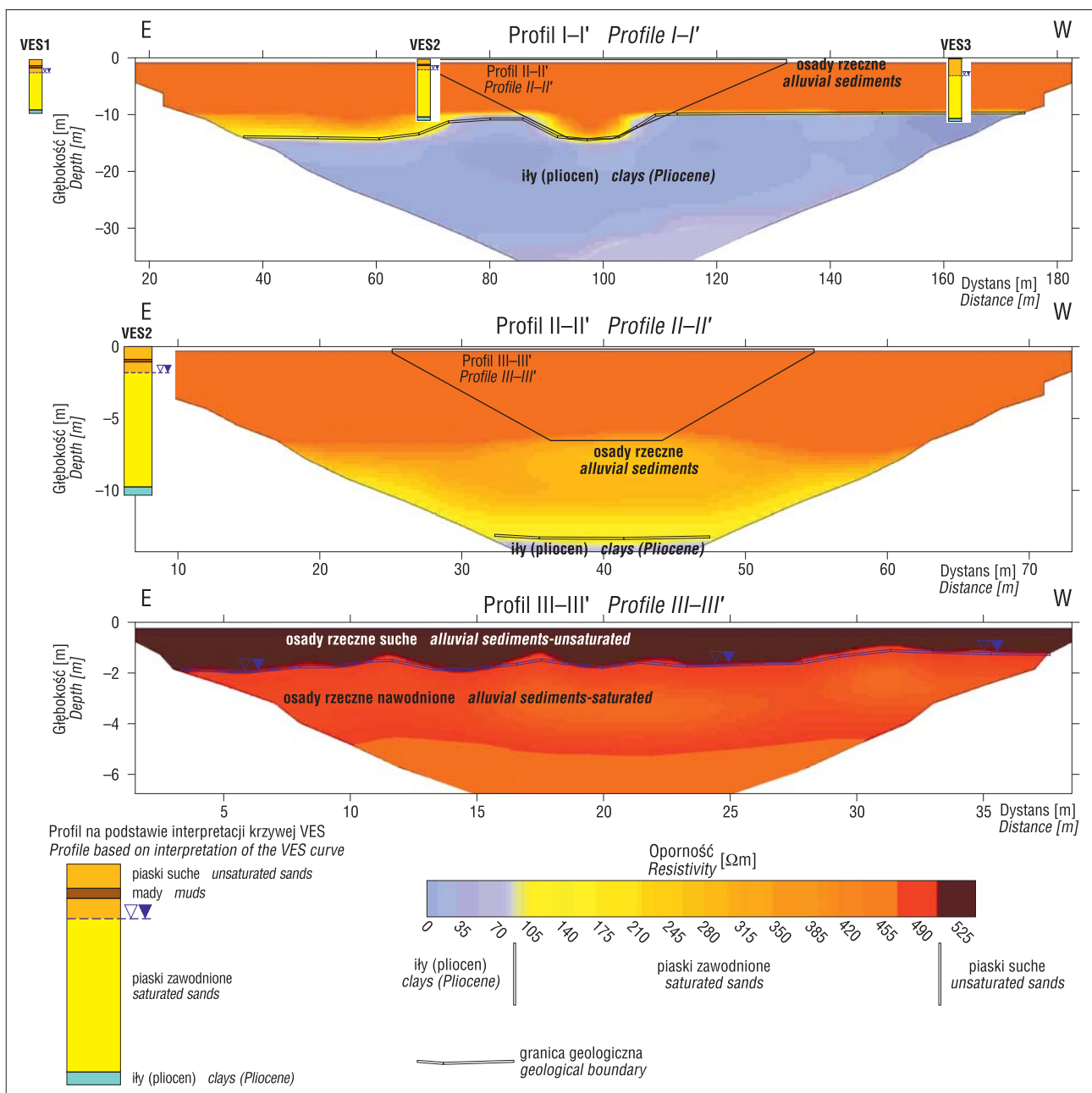
Układ pomiarowy ERT z rozstawem elektrod co 5 m pozwolił na precyzyjne prześledzenie stropu iłłów pliocénskich. Przyjęty stosunkowo duży rozstaw elektrod uniemożliwił uzyskanie jakichkolwiek innych informacji geologicznych oraz geologiczno-inżynierskich. Udało się jedynie wydzielić obszar o niskich opornościach (ok. 20  $\Omega\text{m}$ ), odpowiadający iłłom pliocénskim, oraz obszar o wysokich opornościach (powyżej 300  $\Omega\text{m}$ ), odnoszący się do rzecznych osadów czwartorzędowych (niespoistych).

Pomiary ERT z rozstawem elektrod co 2 m, w danych warunkach gruntowo-wodnych, dały podobny wynik jak

pomiary przy rozstawie elektrod co 5 m, tylko na krótszym odcinku przekroju.

Dopiero pomiar rozstawem elektrod co 1 m (o największej rozdzielczości) umożliwił zaobserwowanie anomalii w rozkładzie oporności elektrycznej w strefie aeracji oraz saturacji. Nie osiągnięto stropu iłłów. Strefa aeracji charakteryzuje się opornościami w przedziale 100–300  $\Omega\text{m}$ , natomiast w strefie aeracji pomierzono oporności powyżej 500  $\Omega\text{m}$ . Takie oznaczenia oporności korespondują z wynikami uzyskanymi metodą VES.

Badaniami metodą ERT udało się precyzyjnie określić granice między iłłami pliocénskimi, a sypkimi osadami czwartorzędowymi. Jednak przy zaproponowanych rozstawach elektrod, nie udało się określić zależności między obrazem fizycznym, a parametrami geologiczno-inżynierskimi gruntów.



Ryc. 4. Zestawienie profili elektrooporowych (wykonanych metodą ERT)

Fig. 4. The comparison of the resistivity profiles (made by ERT)



**Wyniki uzyskane metodą georadarową.** Badania georadarowe przeprowadzono zestawem anten o częstotliwościach 250 i 500 MHz wzdłuż czterech profili. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki dwóch profili: nr I oraz II z uwagi na to, że wzdłuż nich były zlokalizowane: wiercenia, sondowania CPT, sondowania VES, profil ERT oraz profil sejsmiki refrakcyjnej.

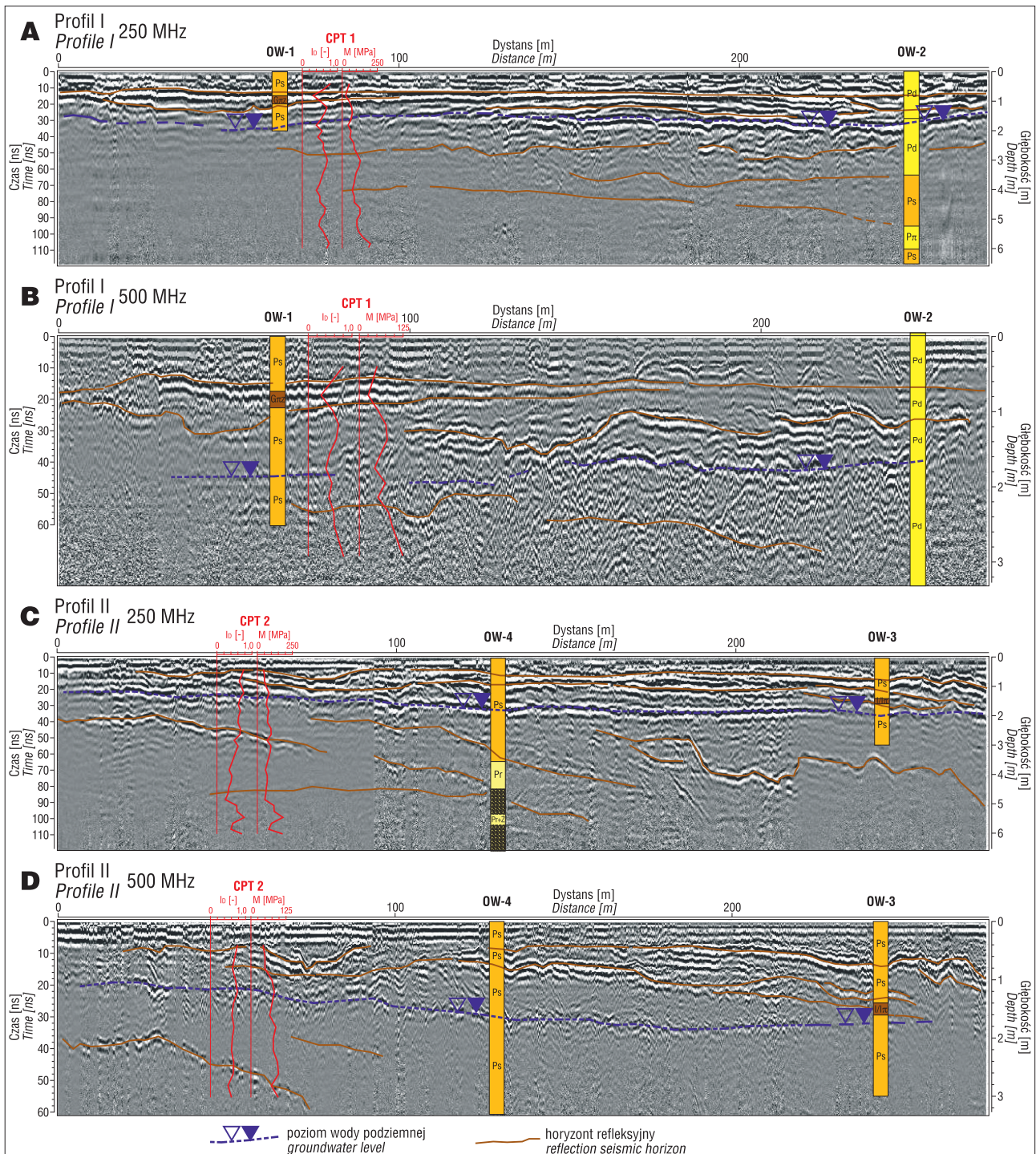
Przetwarzanie i interpretacja echogramów (ryc. 5a–d) pozwoliły na wydzielenie kilku poziomów refleksyjnych:

– refleksy zaznaczone kolorem brązowym odpowiadają granicom litologicznym warstw o różnych wartościach stałej dielektrycznej, np. piaski suche, piaski zawo-

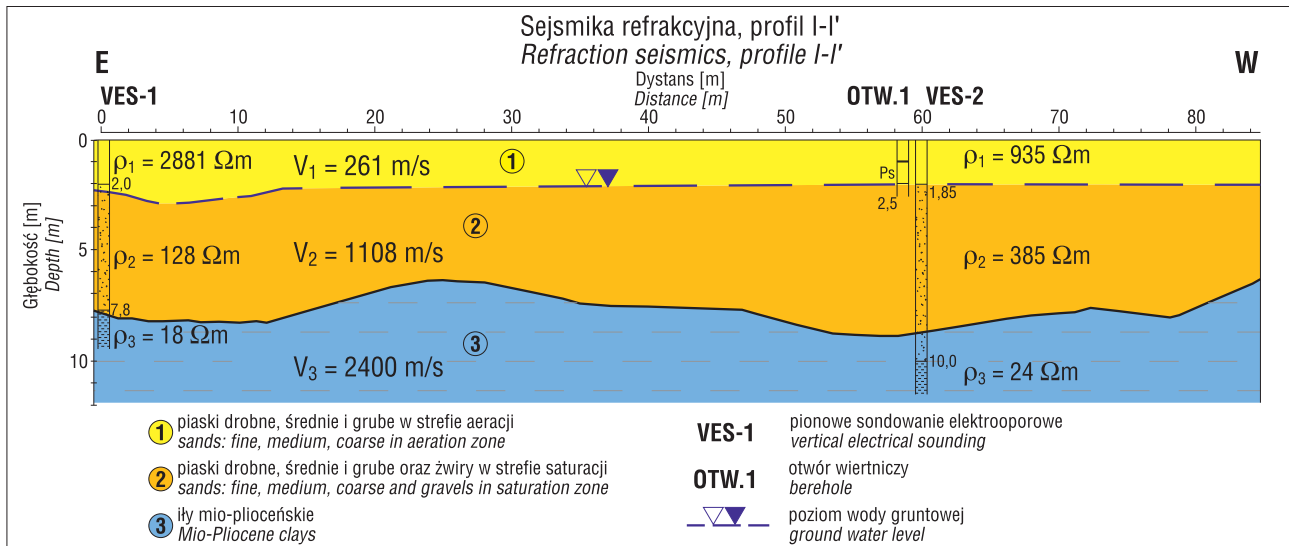
dnione, mady (gliny pylaste zwięzłe) i żwiry;

– refleksy zaznaczone kolorem niebieskim, jest swobodnym poziomem wody podziemnej. Występuje on na głębokości ok. 1,5–2,0 m p.p.t i koreluje się ze stwierdzonymi poziomami wód podziemnych z otworów wiertniczych nr 1, 2 i 4.

**Wyniki uzyskane metodą sejsmiki refrakcyjnej.** Przetwarzanie i interpretacja danych z sejsmiki refrakcyjnej pozwoliły na wydzielenie trzech warstw różniących się prędkościami rozchodzenia fal podłużnych (ryc. 6).



**Ryc. 5.** Profil GPR I, **A** – antena 250 MHz, **B** – antena 500 MHz. Profil GPR II, **C** – antena 250 MHz, **D** – antena 500 MHz  
**Fig. 5.** GPR profile I, **A** – antenna 250 MHz, **B** – antenna 500 MHz. GPR profile II, **C** – antenna 250 MHz, **D** – antenna 500 MHz



Ryc. 6. Przekrój sejsmiczny  
Fig. 6. Seismic cross-section

Głębokości wydzielonych granic sejsmicznych różnią się nieco od tych oznaczonych wierceniami oraz badaniami georadarowymi i elektrooporowymi. W metodzie sejsmicznej wody podziemne wyinterpretowano na głębokości ok. 2 m p.p.t., natomiast strop ilów pleceńskich wyznaczono na głębokości ok. 8–9 m p.p.t., przy czym na długości 25 m profilu sejsmicznego otrzymano wyraźne jego spłylenie – do głębokości ok. 6,5 m p.p.t.

Niewielkie odstępstwa głębokości granic geologicznych stwierdzone w metodzie sejsmicznej mogą wynikać z zakłóceń rejestrowanych na otrzymanych w terenie sejsmogramach, które były spowodowane szumem wywołanym płynącą wodą w korycie oraz zakłóceń pochodzących od strony miasta.

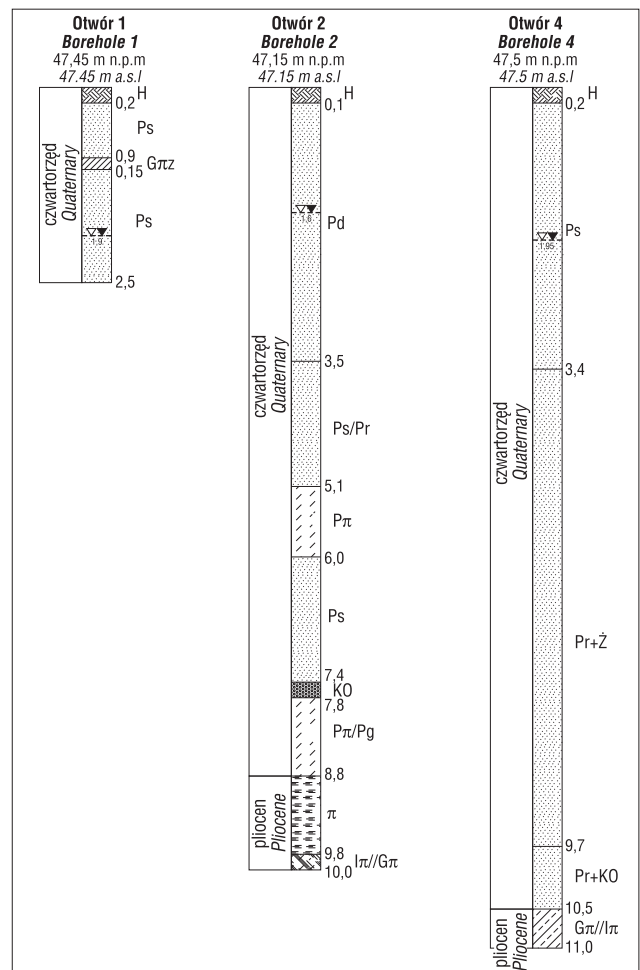
### BADANIA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE

W zakres badań geologiczno-inżynierskich weszły wiercenia ręczne oraz mechaniczne (maks. do głęb. 11 m p.p.t). Razem odwiercono 31 mb. W trakcie wierzeń przeprowadzono analizę makroskopową gruntu, pobierano próbki o naturalnym uziarnieniu NU i o naturalnej wilgotności NW do badań laboratoryjnych (wg normy PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe) oraz dokonywano pomiarów głębokości poziomu wody podziemnej. Wybrane profile otworów wiertniczych (nr 1, 2 i 4) przedstawiono na rycinie 7.

Wykonano również 2 sondowania statyczne CPT (ryc. 8a i b) do głębokości odpowiednio 9,6 oraz 11,0 m, które zostały wykorzystane do oceny rodzaju i stanu gruntu. Sondowania statyczne CPT wykonano za pomocą mechanicznego stożka typu Begemann zestawem PAGANI TG 63-150.

Interpretację profilu litologicznego (podział na grunty spoiste i niespoiste) wykonano na podstawie nomogramu Robertsona (1986, 1990), natomiast ustalenie rodzajów grunty oparto na sąsiednich profilach wierzeń i pomierzonych wartościach współczynnika tarcia  $R_f$  (Baldi i in., 1986; Senneset i in., 1982, 1989).

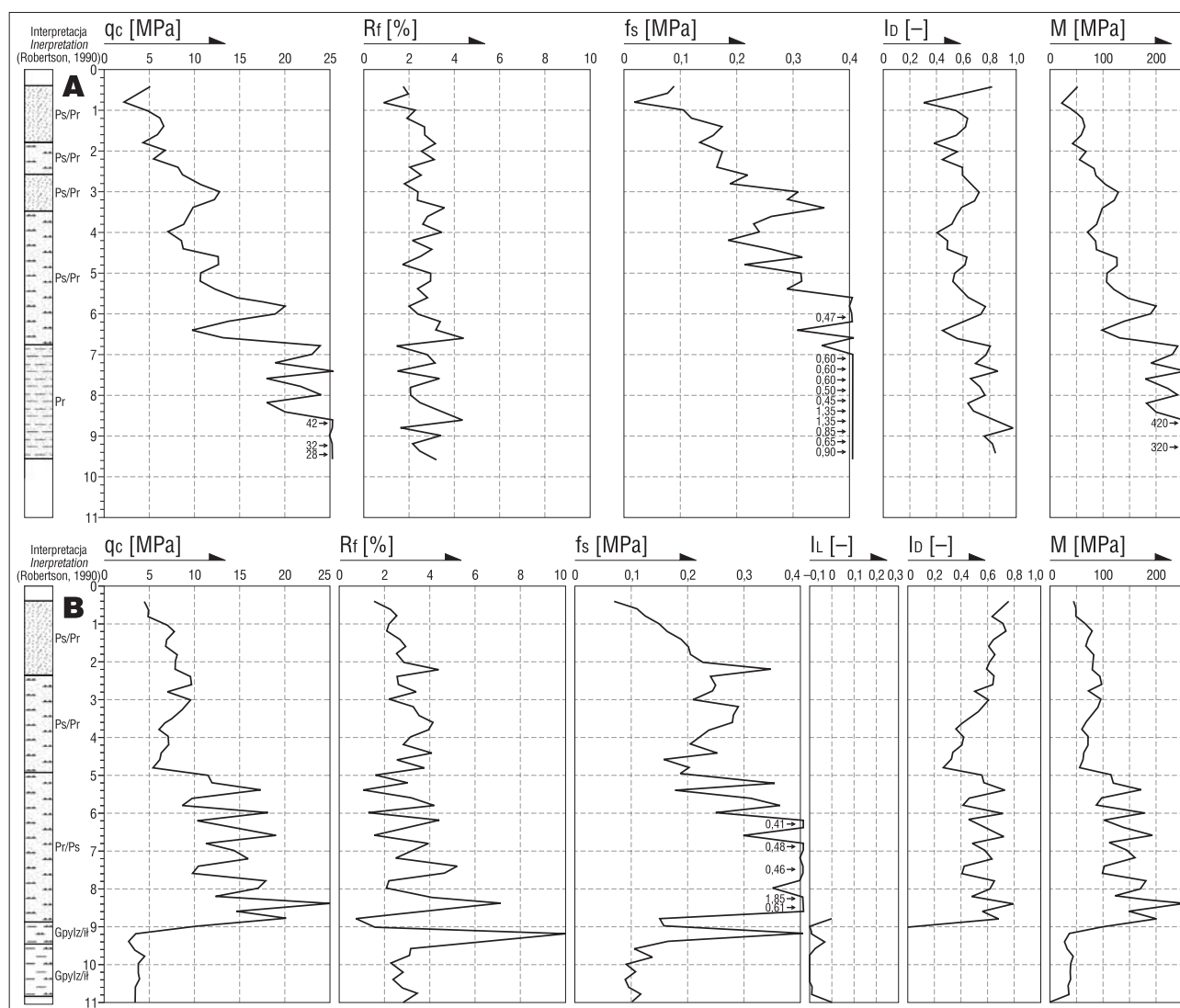
Badania laboratoryjne pobranych próbek gruntu obejmowały: analizy uziarnienia (metodą areometryczną



Ryc. 7. Profile otworów geologicznych nr 1, 2 i 4 (H – humus; Pπ – piasek pylasty; Pd – piasek drobny; Ps – piasek średni; Pr – piasek gruby; KO – kamienie; Gπz – glina pylasta zwięzła, Pg – piasek gliniasty; π – pył, Iπ – il pylasty; Gπ – glina pylasta)

Fig. 7. The sections of boreholes 1, 2 and 4 (H – top soil; Pπ – silty sand; Pd – fine sand; Ps – medium sand; Pr – coarse sand; KO – stones; Gπz – silty clay loam, Pg – clayey sand; π – silt; Iπ – silty clay; Gπ – silty loam)





**Ryc. 8. A.** Sondowanie CPT-1; **B.** Sondowanie CPT-2 ( $q_c$  – opór na stożku,  $R_f$  – współczynnik tarcia,  $f_s$  – opór tarcia gruntu na tulei,  $I_L$  – stopień plastyczności,  $I_D$  – stopień zagęszczenia,  $M$  – moduł ściśliwości)

**Fig. 8. A.** CPT-1 sonding; **B.** CPT-2 sonding ( $q_c$  – point resistance,  $R_f$  – friction ratio,  $f_s$  – friction sleeve,  $I_L$  – liquidity index,  $I_D$  – density index,  $M$  – modulus of compressibility)

i sitową), oznaczenie wilgotności naturalnej gruntu  $w_n$  oraz oznaczanie granic konsystencji mąd (glin pyłastych zwięzłych). Analizę sitową, oznaczenia wilgotności naturalnej i granicy plastyczności wykonano zgodnie z normą PN-EN 1997-2:2009 – Eurokod 7. Analizę areometryczną przeprowadzono metodą Prószyńskiego, wg Procedury Badawczej opracowanej w firmie Geoteko. Granicę płynności oznaczono metodą jednopunktową, wg amerykańskiej normy ASTM D 4318-84, której możliwość stosowania w warunkach polskich została zweryfikowana w Laboratorium Geoteko (Wolski i in., 2011). Rodzaje i stan gruntów oznaczano zgodnie z PN-EN ISO 14688-1:2006. Wyniki laboratoryjnych badań uziarnienia wykorzystano do weryfikacji opisów rodzajów gruntów na kartach dokumentacyjnych otworów wiertniczych. Badania laboratoryjne wykonano w laboratorium Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii UW oraz w laboratorium firmy Geoteko.

Wykonane wiercenia umożliwiły rozpoznanie budowy geologicznej do głęb. 11 m p.p.t. Pozwoliły one na określenie: litologii gruntów, położenie poziomu wód podziem-

nych oraz głębokości zalegania stropu iłów plioceńskich. Z uwagi na bliskość stopnia wodnego „Włocławek”, poziom zwierciadła wód podziemnych podlega częstym wahaniom. W trakcie prowadzonych badań zwierciadło wody podziemnej występowało w przedziale 0,85–2,60 m p.p.t (tj. ok. 45,2 m n.p.m.).

Za pomocą sondowania CPT oznaczono m.in. stany gruntów i ich moduły ściśliwości. Grunty sypkie w przewierczonym profilu, charakteryzują się zmiennym stanem zagęszczenia w przedziale  $I_D = 0,30$ – $0,98$  – dominują grunty w stanie średniozagęszczonym. Litologicznie są to rzeczne piaski drobne, piaski średnie oraz piaski grube ze żwirami. Ich moduł ściśliwości wzrasta wraz z głębokością: od 30 do 250 MPa.

Strop utworów plioceńskich nawiercono na głębokości 8,8 m p.p.t (otwór nr 2 – ryc. 7) oraz 10,5 m p.p.t (otwór nr 1 – ryc. 7). Litologicznie są to łyły oraz gliny pyłaste zwięzłe. Osady te charakteryzują się stanem zwartym i półzwartym ( $I_L = -0,1$ – $0,0$ ); ich moduł ściśliwości wynosi ok. 40 MPa.

Analiza echogramów GPR w odniesieniu do wyników sondowania CPT1 i CPT2 (ryc. 8a i b) zwraca uwagę na



pewne korelacje zaznaczających się horyzontów refleksyjnych z rozkładem maksimów i minimów krzywych stopnia zagęszczenia ( $I_D$ ) i modułu ściśliwości ( $M$ ) otrzymanych z sondowań statycznych CPT. Np. na profilu I (250 MHz) w obrębie nawierconych piasków drobnych (otwór 2) można zauważyć na głębokości ok. 2,5 m horyzont refleksyjny, który koresponduje z „pikiem” wzrostu wartości  $I_D$  i  $M$  w sondowaniu CPT1 (zmian z  $I_D = 0,6$  na  $I_D = 0,7$  oraz  $M = 80$  MPa na  $M = 130$  MPa). Podobną sytuację widać na profilu I (500 MHz) na głębokości ok. 1,3 i 2,5 m również w obrębie piasków drobnych. Na profilu II (250 MHz) na głębokości ok. 5 m zaznacza się w sondowaniu CPT2 wyraźny wzrost z  $I_D = 0,25$  na  $I_D = 0,8$  i z  $M = 50$  MPa na  $M = 180$  MPa. Zmiana ta odpowiada stropowi warstwy żwirów nawierconych w otworze 4 (ryc. 7). Również w strefie aeracji w profilu piasków średnich (otwór 4) na głębokości ok. 1 m zaznacza się horyzont refleksyjny, który koresponduje ze wzrostem wartości z  $I_D = 0,6$  na  $I_D = 0,8$  i  $M = 100$  MPa na  $M = 160$  MPa.

Z powodu silnego tłumienia fal elektromagnetycznych w przestrzeni poniżej poziomu wody podziemnej nie udało się metodą georadarową, przy zastosowanych antenach (250 i 500 MHz), osiągnąć stropu ilów plioceńskich występujących na analizowanym terenie w przedziale głębokości ok. 8–13 m.

## DYSKUSJA I WNIOSKI

W artykule zestawiono dla wybranego terenu (Kępa Włocławska) wyniki czterech płytkich metod geofizycznych (GPR, VES, ERT oraz sejsmiki refrakcyjnej) z rozpoznaniem geologicznym (wiercenia) oraz z wynikami badań geologiczno-inżynierskich (sondowania statyczne CPT i badania laboratoryjne).

Zastosowane metody geofizyczne charakteryzują się różną rozdzielczością oraz głębokością rozpoznania podłoża gruntowego. Metoda GPR umożliwiła najdokładniejsze rozpoznanie podłoża w wymiarze 2D. Na przykład udało się wydzielić horyzonty refleksyjne, które można korelować z granicami geologicznymi, a także z warstwami gruntów o zróżnicowanym zagęszczeniu. Poza tym metodą GPR można też identyfikować hiperbole dyfrakcyjne odnoszące się do zakopanych przedmiotów lub lokalnych niejednorodności gruntu (np. otoczków). Ograniczeniem metody GPR jest stosunkowo niewielka prospekcja (kilka metrów) zależna od wartości oporności elektrycznej gruntów objętych rozpoznaniem. Badania gruntów wykształconych w postaci osadów o wysokiej oporności elektrycznej (np. suche piaski) dają bardzo dobre wyniki (wyraźne granice refleksyjne i głęboka prospekcja). Zawodnienie osadów wpływa na obniżenie ich oporności elektrycznej, a tym samym ogranicza głębokość rozpoznania podłoża gruntowego. Na gruntach spoistych praktycznie nie da się prowadzić pomiarów georadarowych.

Metody elektrooporowe (VES i ERT) umożliwiają rozpoznanie rozkładu oporności elektrycznej podłoża gruntowego w wymiarach 1D, 2D, a nawet 3D. Dowiadując wyniki badań elektrooporowych do przynajmniej jednego, dwóch wierceń geologicznych, można szybko i w miarę pewnie wyciągać wnioski dotyczące budowy geologicznej większego obszaru terenu objętego badaniami geofizycznymi. Ograniczeniem metod elektrooporowych jest zmniejszenie

rozdzielczości wraz z głębokością oraz konieczność spełnienia pewnych warunków pomiarowych w terenie, tj. zapewnienie dobrego uziemia elektrod (co jest trudne w przypadku prowadzenia pomiarów na gruntach suchych) oraz wybranie terenu, na którym nie ma infrastruktury technicznej (np. elektrycznych linii napowietrznych, okablowania podziemnego, światłowodów itp.), co w praktyce oznacza rezygnację z prowadzenia takich pomiarów w rejonach silnie zurbanizowanych.

Metoda sejsmiki refrakcyjnej pozwala na prześledzenie w wymiarze 2D granicy, po której ślizga się fala sejsmiczna (refrakcyjna). Powierzchnie te można identyfikować, po dowiązaniu do otworów wiertniczych, z konkretnymi granicami geologicznymi. Ograniczeniem metody sejsmiki refrakcyjnej są zakłócające drgania wywołane przez czynniki naturalne (wiatr, płynącą wodę w korycie rzeki) oraz antropogeniczne (ruch kołowy, praca różnych urządzeń itp.).

Prawidłowe przetwarzanie i interpretacja wyników pomiarów geofizycznych zależy od ilości dostępnego materiału pochodzącego z rozpoznania bezpośredniego (wiercenia, sondowania). Im więcej jest danych geologicznych, czy geologiczno-inżynierskich, tym można lepiej i bardziej wiarygodnie opracować wyniki badań geofizycznych.

Możliwości pomiarowe aparatury geofizycznej zależą od terenu badań. W przedstawionych badaniach pomiary prowadzono w dolinie Wisły na osadach aluwialnych (głównie osady sypkie) przy głębokości zwierciadła wody podziemnej ok. 2 m p.p.t. Na takim obszarze z powodzeniem można stosować metody elektrooporowe, ponieważ elektrody mają dobre (niskie) uziomy. Metoda georadarowa miała pewne ograniczenia, z uwagi na płytko występujący poziom wód podziemnych. Oporność osadów zawodnionych jest stosunkowo niska ( $<100 \Omega\text{m}$ ) przez co fale elektromagnetyczne ulegały tłumieniu, dając słabsze rozpoznanie wgłębne. Na wybranym poligonie były prowadzone pomiary georadarowe przy użyciu trzech anten ekranowanych: 100, 250 oraz 500 MHz. Analiza otrzymanego materiału pokazała, że tylko echogramy uzyskane anteną 250 MHz umożliwiają, w zastanych warunkach gruntowo-wodnych, najlepsze dowiązanie do profili wierceń oraz sond CPT. Echogramy otrzymane z anteny 100 MHz dały obraz o zbyt małej rozdzielczości (nie udało się zidentyfikować korelacji z profilami otworów), natomiast obraz otrzymany z anteny 500 MHz miał dobrą rozdzielczość, ale prospekcja sięgnęła tylko 1,4 m p.p.t.

W przypadku aparatury sejsmicznej w badaniach metodą refrakcyjną kwestia zawilgocenia gruntów nie odgrywa większej roli, za to istotne są drgania zakłócające wpływające negatywnie na rejestrację zapisu czasu wstąpienia fali.

Analiza otrzymanych wyników z zastosowanych metod geofizycznych dowodzi, że w rozwiązaniu założonego problemu badawczego najlepiej sprawdził się georadar. Wyinterpretowane horyzonty refleksyjne na echogramach odpowiadały granicom wydzieleni o zmiennych parametrach fizyko-mechanicznych, np. różniących się stopniem zagęszczenia oraz wartością modułu ściśliwości. Informacje te miały charakter jakościowy. Poza tym na echogramie wyraźnie można było zidentyfikować poziom wód podziemnych. Metodą elektrooporową udało się określić położenie zwierciadła wody podziemnej oraz wykartować

strop ilów plioceńskich. Metodą sejsmiki refrakcyjnej otrzymano warstwy sejsmiczne różniące się wartościami prędkości fal podłużnych, które, opierając się na profilach wiertniczych, można było dowiązać do wydzieleni litologicznych. Gdyby zastosować rozbudowany wariant metody sejsmicznej, np. z pomiarem prędkości fal poprzecznych, to zdołano by wyznaczyć wartości modułu ścinania (G) gruntów. Jest to parametr istotny przy projektowaniu posadowienia fundamentów.

Wydaje się, że zastosowanie grupy metod geofizycznych do określenia warunków geologiczno-inżynierskich jest konieczne. Sondowania statyczne, dynamiczne, jak również wiercenia dają wyniki punktowe. Kompleksowe zastosowanie metod geofizycznych, opartych na wyznaczeniu różnych pól fizycznych, daje możliwość pełniejszego i bardziej wiarygodnego uzupełnienia obrazu warunków gruntowo-wodnych zawartego między punktowymi badaniami geologiczno-inżynierskimi. Poza tym istnieją metody geofizyczne, np. CSWS i MASW, które dają wartości ilościowe mierzonych parametrów mechanicznych gruntów. Dodatkowo za stosowaniem metod geofizycznych przemawia fakt, że są one metodami nieinwazyjnymi oraz cechują się szybkim czasem wykonania badań w porównaniu ze standardowymi metodami geologiczno-inżynierskimi.

Praca powstała w ramach badań statutowych Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydziału Geologii UW. Autorzy są wdzięczni Recenzentom za poświęcony czas oraz wiele cennych i konstruktywnych uwag przydatnych do napisania niniejszego artykułu.

## LITERATURA

ASTM D 4318-84 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

- BALDI G., BELLOTTI R., GHIOMMA V., JAMIOLKOWSKI M. & PASQUALINI E. 1986 – Interpretation of CPTs and CPTUs; 2nd part: drained penetration of sands. Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar, Singapore: 143–156.
- JOL H.M. (red.) 2009 – Ground Penetrating Radar: theory and application. 1<sup>st</sup> ed., Elsevier.
- KARCZEWSKI J. 2007 – Zarys metody georadarowej. Uczelniane Wyd. Nauk.-Dydakt. AGH, Wyd. I, Kraków.
- 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, 2<sup>nd</sup> ed., Springer.
- LOKE M.H. 2012 – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Malaysia.
- MOJSKI J.E. 1958 – Mapa Geologiczna Polski 1 : 50 000, arkusz Włocławek wraz z objaśnieniami. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688-1:2006 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe.
- ROBERTSON P.K., CAMPANELLA R.G., GILLESPIE D. & GREIG J. 1986 – Use of piezometer cone data. Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ'86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg. Amer. Soc. Engineers: 1263–1280.
- ROBERTSON P.K. 1990 – Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotech. J., 27 (1): 151–158.
- SENNESET K., JANBU N. & SVANO G. 1982 – Strength parameters obtained from static cone penetration tests. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, 2, Balkema Pub., Rotterdam: 863–870.
- SENNESET K., SANDVEN R. & JANBU N. 1989 – The evaluation of soil parameters from piezocone tests; Transportat. Res. Rec., 1235: 24–37.
- SZYMANKO J. & STENZEL P. 1973 – Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich, Wyd. Geol., Warszawa.
- WOLSKI W. (red.) 2011 – Biuletyn Geotechniczny GEOTEKO, nr 2. Wyd. Geoteko, Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 17.01.2013 r.  
Akceptowano do druku 6.10.2014 r.