

## OKREŚLANIE SPĄGU GRUNTÓW ORGANICZNYCH METODAMI GEOFIZYCZNYMI NA PRZYKŁADZIE DWÓCH POLIGONÓW BADAWCZYCH NA NIŻU POLSKIM

### DETERMINATION OF A BOTTOM LAYER OF ORGANIC SOIL USING GEOPHYSICAL METHODS AT TWO TEST SITES ON THE POLISH LOWLAND

SEBASTIAN KOWALCZYK<sup>1</sup>, RADOSŁAW MIESZKOWSKI<sup>1</sup>

**Abstrakt.** W pracy przedstawiono problem rejestracji obrazu fizycznego gruntów organicznych, otrzymanego za pomocą trzech metod geofizycznych: georadarowej, elektrooporowej oraz sejsmiki refrakcyjnej. Badania wykonano na dwóch poligonach – Żuków i Całowanie, w obrębie których stwierdzono występowanie gruntów organicznych. Zastosowane metody geofizyczne pozwoliły na dokładne określenie warunków występowania warstwy gruntów organicznych.

**Słowa kluczowe:** georadar, sondowania elektrooporowe, sejsmika refrakcyjna, grunty organiczne.

**Abstract.** In this paper the problem of registration of the physical image of organic soils by using chosen geophysical methods was presented. Three geophysical methods were applied to investigate the problem: ground penetrating radar, vertical electrical sounding and seismic refraction. Investigations were executed at two test sites – Żuków and Całowanie, in which an occurrence of the organic soils was affirmed. The use of geophysical methods group allowed obtaining the accurate qualification of occurrence conditions of organic soils.

**Key words:** ground penetrating radar, vertical electrical sounding, seismic refraction, organic soil.

## WSTĘP

Podstawą zastosowania metod geofizycznych w badaniach złóż torfu jest zróżnicowanie między niektórymi parametrami fizycznymi torfów i ich podłoża (profil pionowy) oraz osadów graniczących z torfami (profil poziomy). W nawiązaniu do parametrów fizycznych torfu i osadów będących z nimi w kontakcie można przyjąć, że najbardziej pełne dane o nagromadzeniach torfu uzyska się metodami: georadarową, sejsmiki refrakcyjnej oraz elektrooporową.

Wykorzystując metody geofizyczne można, prawie bezinwazyjnie, rozpoznać dokładnie podłoże torfów oraz namulów. Precyzyjne rozpoznanie miąższości gruntów organicznych oraz ukształtowania ich podłoża ma znaczenie zwłaszcza w przypadku planowania zagospodarowania terenów na potrzeby budownictwa, szczególnie przy projektowaniu w budownictwie drogowym.

---

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; s.kowalczyk@uw.edu.pl; r.mieszkowski@uw.edu.pl

## CHARAKTERYSTYKA POLIGONÓW BADAWCZYCH

Pomiary geofizyczne zostały przeprowadzone na dwóch poligonach badawczych, zlokalizowanych w odległości około 30 km od Warszawy (fig. 1). Pierwszy z nich znajduje się na zachód od Warszawy, w pobliżu miejscowości Żuków. Teren, na którym były prowadzone pomiary geofizyczne, przeznaczony jest pod budowę autostrady A2 i przebiega równoległe do rzeki Rokitnicy. Obecny przebieg rzeki jest wynikiem robót melioracyjnych, na skutek których koryto zostało uregulowane i na niektórych odcinkach przełożone. W badaniach prowadzonych w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich dla projektu i realizacji odcinka D autostrady A2 (Troć i in., 2010) obszar pomiarów geofizycznych wchodzi w skład tzw. torfowiska, które zostało rozpoznane na długości 1450 m. Na obszarze „torfowiska” średnia miąższość holocenijskich gruntów organicznych wahała się w przedziale 1,5–2,5 m, największa miąższość stwierdzona wierceniami wynosiła 3,2 m. Grunty organiczne wykształcone są jako namuły i namuły gliniaste, torfy oraz grunty próchnicze – głównie piaski humusowe z przewarstwieniami namulów i torfów. Poniżej osadów organicznych

występują plejstocenijskie piaski akumulacji rzecznej. Pakiet gruntów aluwialnych jest podścielony przez osady zlodowacenia środkowopolskiego, w stropie wykształcone jako osady wodnolodowcowe.

Drugi obszar badań został usytuowany na południe od Warszawy, na wschód od miejscowości Całowanie, w zachodniej części Bagna Całowanie należącego do największych torfowisk niskich na Nizinie Mazowieckiej, ciągnącego się pasem o długości 15 km i szerokości ok. 3 km. Bagno Całowanie znajduje się w Dolinie Środkowej Wisły, powstałej w plejstocenie w wyniku powtarzających się cyklicznie procesów erozji i akumulacji rzecznej. Kompleks torfowisk położony jest w deniwelacjach nadzalewowego tarasu fałenicznego. W zachodniej części torfowiska, w zerodowanej części tarasu fałenicznego akumulowały osady tarasu praskiego. Obszar ten jest zmeliorowany siecią kanałów wykonanych w XVIII wieku na polecenie Marszałka Wielkiego Koronnego Franciszka Bielińskiego. Obniżanie zwierciadła wód gruntowych doprowadziło najprawdopodobniej do powolnej degradacji torfowiska.

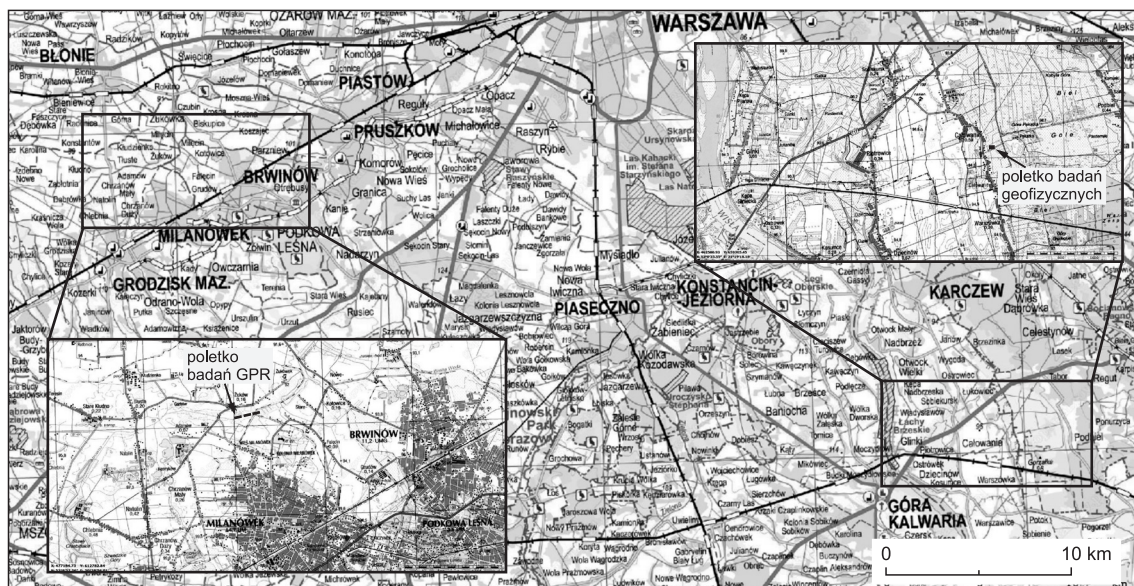


Fig. 1. Lokalizacja poligonów badawczych

Location of the test sites

## METODYKA BADAŃ

Na obu poligonach wiodącymi pomiarami geofizycznymi były badania georadarowe (GPR). Na poligonie w okolicy Żukowa uzyskane w badaniach obrazy georadarowe dowiązano do wierceń geologiczno-inżynierskich, zaś na poligonie w Całowaniu badania georadarowe uzupełniono pomiarami sondowania elektrooporowego oraz sejsmiki refrakcyjnej. Zadaniem tych dwóch metod geofizycznych było uszczegółowienie oraz zweryfikowanie wyników pomiarów GPR.

Badania georadarowe są jedną z metod geofizyki powierzchniowej, stosowanej do ciągłego odwzorowania budowy badanego ośrodka lub też lokalizacji obiektu występującego poniżej powierzchni. Do pomiarów wykorzystano system radarowy RAMAC GPR produkcji szwedzkiej firmy MalaGeoscience. System przeznaczony jest do podpowierzchniowej prospekcji geofizycznej ośrodka geologicznego za pomocą fal elektromagnetycznych. Ba-

dania przeprowadzono z użyciem dwóch ekranowanych anten o częstotliwości nominalnej emitowanej fali elektromagnetycznej wynoszącej 100 oraz 500 MHz. System georadarowy wyposażony był w komputer przenośny typu notebook wraz z fabrycznym oprogramowaniem Ramac GroundVision, przeznaczonym do akwizycji danych pomiarowych, ich analizy i uproszczonego przetwarzania bezpośrednio w terenie.

Fale elektromagnetyczne, wykorzystywane w metodzie GPR, są falami poprzecznymi, tzn. w każdym punkcie pola wektor natężenia pola elektrycznego „E” i wektor indukcji magnetycznej „B” są wzajemnie prostopadłe i prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku (Karczewski, 2007). Fala elektromagnetyczna reaguje na zmianę stałej dielektrycznej ośrodka. Wraz ze wzrostem stałej dielektrycznej spada prędkość rozchodzenia się fal. Na granicach ośrodków różniących się stałą dielektryczną następuje odbicie, załamanie i rozpraszanie fal, zgodnie z prawami ruchu falowego. W prospekcji georadarowej wykorzystuje się fale odbite od granic ośrodków różniących się stałą dielektryczną i oporem elektrycznym, związanych z wykształceniem litologicznym ośrodka oraz stopniem jego zawodnienia.

Drugą metodą geofizyczną wykorzystaną na poligonie Całowanie były pomiary metodą pionowego sondowania elektrooporowego w układzie Schlumbergera, o rozstawie AB/2 równym 100 m. W metodzie elektrooporowej przedmiotem obserwacji są właściwości pola elektrycznego, wytworzonego sztucznie w ośrodku gruntowym lub skalnym przez system elektrod (Szymanko, Stenzel, 1973). Metodą tą wykonuje się pomiary pozornego oporu elektrycznego gruntów lub skał znajdujących się w obrębie pola wytworzonego za pomocą elektrod. Na podstawie tych pomiarów interpretuje się sposób ułożenia gruntów lub skał różniących się zdolnością przewodzenia prądu elektrycznego. Opór pozorny ( $\rho$ ), który jest rejestrowany w terenie, oblicza się na podstawie stosunku natężenia prądu ( $I$ ) zadanego na elektrodach prądowych A i B do różnicy napięcia ( $\Delta V$ ) wytworzonego na elektrodach pomiarowych M i N, skorelowanego o współczynnik  $K$  zależny od rozstawu elektrod A, B, M, N. Na podstawie wartości oporu pozornego oraz rozstawu elektrod AB/2 wykreśla się krzywą sondowania, którą pod-

daje się przetwarzaniu i interpretacji ilościowej. Do krzywej pomierzonej dopasowuje się iteracjami krzywą teoretyczną, wyliczoną numerycznie za pomocą programu komputerowego na podstawie dobranych wartości oporu rzeczywistego ( $\rho$ ) i głębokości rzeczywistej ( $h$ ). W następnym etapie dokonuje się dowiązania otrzymanych oporów rzeczywistych do rodzaju gruntu (skały).

Na poligonie Całowanie zostały przeprowadzone także pomiary przy zastosowaniu 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). Badania sejsmiczne refrakcyjne wykorzystują fale sprężyste refrakcyjne, czyli załamane pod kątem krytycznym na granicy dwóch ośrodków, z których ośrodek leżący niżej charakteryzuje się większymi prędkościami fal sejsmicznych. Fala refrakcyjna, powstająca na granicy dwóch takich ośrodków, propaguje wzdłuż granicy z prędkością charakterystyczną dla niżej leżącej warstwy, a następnie wraca do odbiorników na powierzchni. W pomiarach refrakcyjnych istotne są czasy „pierwszych wstąpień” fal podłużnych, na podstawie których można odwzorować rozkład prędkości fal sejsmicznych w wyznaczonej płaszczyźnie pomiarowej.

Na poligonie w Całowaniu pomiary wykonano metodą profilowania 20-kanalowym rozstawem pomiarowym o długości 50 m. Odległości między kolejnymi kanałami wynosiły 1 m, a fale sejsmiczne dla każdego rozstawu wzbudzano na obydwu jego końcach oraz w środku rozstawu. Fale sejsmiczne wzbudzano udarowo, młotem o ciężarze 8 kg, a rejestrowano geofonami o częstotliwości 28 Hz i aparaturą sejsmiczną DMT Summit z zapisem cyfrowym oraz możliwością sumowania energii drgań sejsmicznych. Zastosowana metodyka pomiarów umożliwiła szczegółowe ustalenie zróżnicowania prędkości fal sejsmicznych w przypowierzchniowej warstwie osadów oraz ciągłe śledzenie granicy sejsmicznej zalegającej na głębokości ok. 2 m. Obliczenia wykonano techniką komputerową z wykorzystaniem oprogramowania ReflexW.

## WYNIKI BADAŃ

**Badania georadarowe.** Zasięg prospekcji georadarowej jest uzależniony od dwóch głównych czynników: częstotliwości nominalnej anteny nadawczej oraz oporności elektrycznej (przewodnictwa elektrycznego) badanego ośrodka. Im mniejsza częstotliwość anteny nadawczej, tym większa jest głębokość penetracji. Z kolei im mniejsza oporność elektryczna gruntu, tym zasięg głębokościowy jest mniejszy. Pomiary georadarowe na poligonie w Żukowie były prowadzone z prawej strony projektowanej trasy autostrady A2. Początkowo wykorzystywano anteny o częstotliwości 100 i 500 MHz. Ze względu na duże tłumienie

fali elektromagnetycznej oraz słabą rozdzielczość warstw przypowierzchniowych przy pomiarach anteną o częstotliwości 100 MHz skoncentrowano się na prowadzeniu pomiarów na tym terenie z wykorzystaniem anteny o częstotliwości 500 MHz.

W rezultacie prowadzonych prac uzyskano echogramy, które dość dokładnie odwzorowują ukształtowanie warstw zalegających w strefie przypowierzchniowej. Prospekcja na tym terenie, przy antenie o częstotliwości 500 MHz, sięgała do głębokości 2–3 m. Na podstawie badań georadarowych nie jest możliwe określenie litologii ośrodka. Jednakże jeżeli

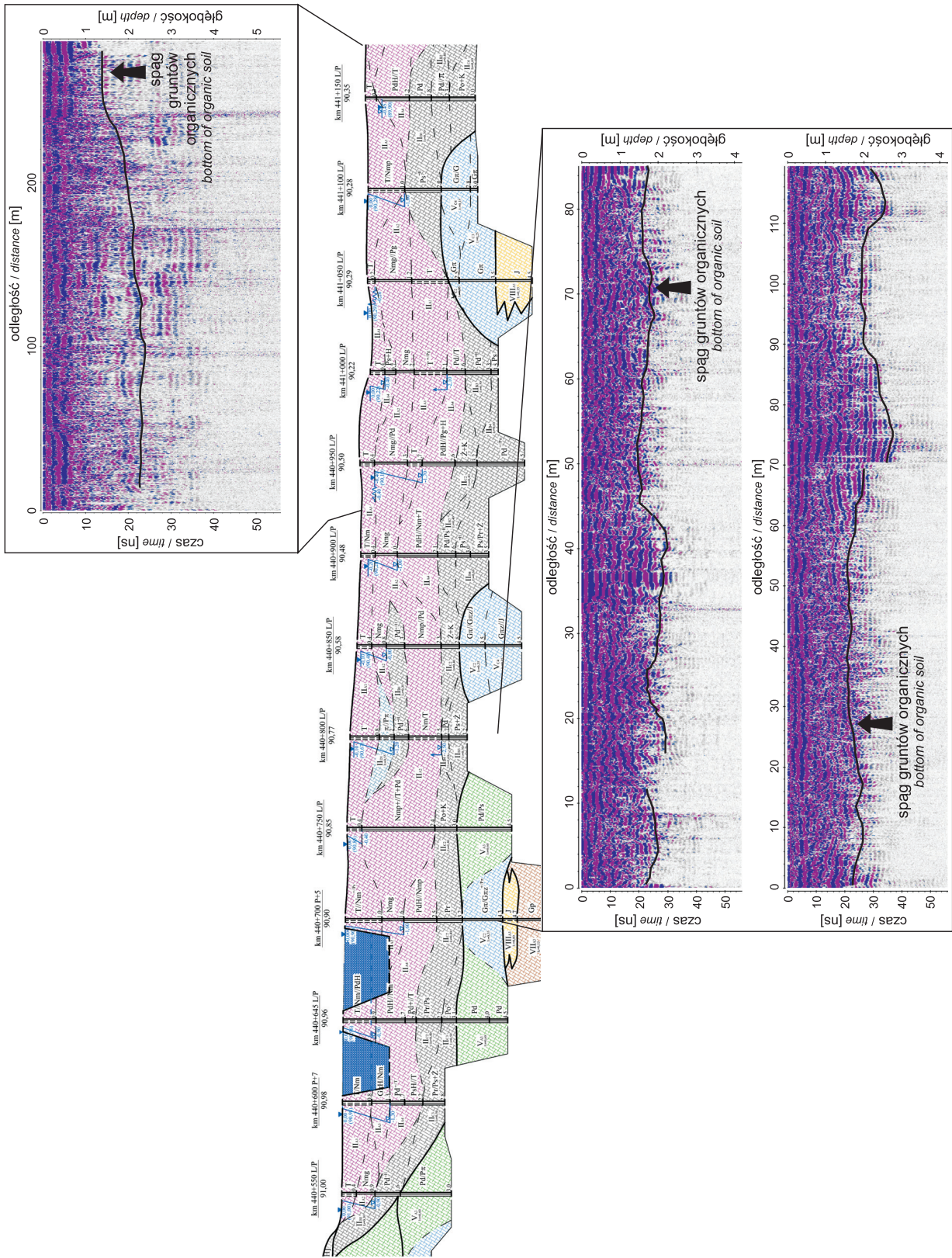


Fig. 2. Profile GPR wykonane w ciągu projektowanej autostrady A2 na tle przekroju geologiczno-inżynierskiego  
 GPR profiles along the designed A2 highway together with the engineering-geological cross-section

znana jest budowa geologiczna terenu, to można pokusić się o korelowanie litologii z echogramem georadarowym.

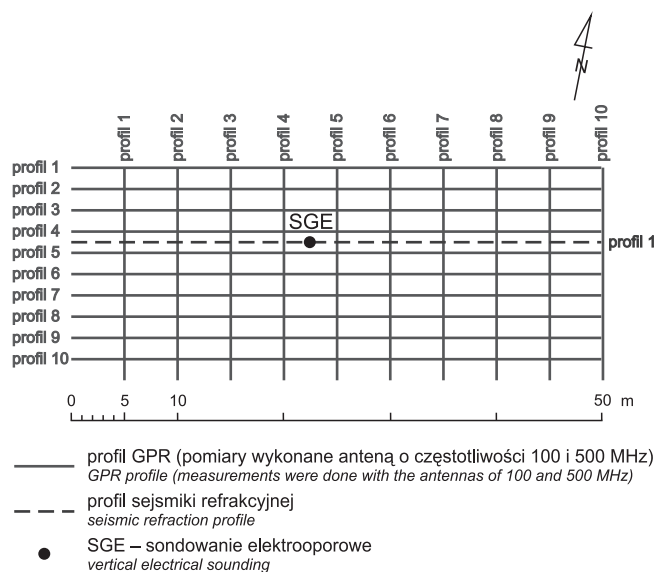
Obrazy georadarowe uzyskane wzdłuż profili prowadzonych równoległe do rzeki Rokitnicy zostały skorelowane z wierceniami wykonanymi dla określenia warunków geologiczno-inżynierskich odcinka D autostrady A2 (Troć i in., 2010). Na podstawie echogramów oraz wierceń można dokładnie prześledzić spąg gruntów organicznych, na tym terenie podścielonych piaskami oraz lokalnie gliną (fig. 2).

Badania georadarowe z pewnością mogą być pomocne przy określaniu miąższości torfów i namulów pomiędzy otworami wiertniczymi. Znajomość głębokości zalegania gruntów organicznych, a co za tym idzie możliwość określenia rzędnej gruntów nośnych, jest szczególnie istotna na tym obszarze ze względu na konieczność ich wymiany na grunty niespoiste pod planowaną inwestycję.

Mała inwazyjność metod geofizycznych na środowisko ma szczególne znaczenie przy badaniu torfowisk „żywych”, takich jak to położone na terenie Mazowieckiego Parku Krajobrazowego.

Drugi poligon badań geofizycznych, wielkości 50 na 20 m, położony był na skraju Bagna Całowanie. Badania GPR były prowadzone w siatce, której schemat przedstawiono na figurze 3. Profile podłużne oddalone były o 2 m, zaś profile poprzeczne o 5 m. W echogramach z profili prowadzonych w poprzek poligonu uzyskano na głębokości około 1,5 m horyzontalny refleks, będący najprawdopodobniej granicą między gruntami organicznymi a niespoistymi (fig. 4a). Ta sama granica w pomiarach prowadzonych wzdłuż poligonu została wykryta na głębokości między 1 a 2 m, a w jej morfologii uwidaczniała się struktura przypominająca wał (fig. 4b).

**Badania elektrooporowe.** Sondowanie elektrooporowe wykonano na poligonie badawczym w pobliżu miejscowości Całowanie. Zastosowano układ pomiarowy Schlumbergera, o rozstawie  $AB/2 = 100$  m. Szacunkowy zakres prospekcji wyniósł ok. 35 m poniżej powierzchni. Pomiarów wykonano aparaturą PMG102, do zasilania linii AB użyto przetwornicy prądu stałego o napięciu do 400 V. Uzyskaną krzywą SGE



**Fig. 3. Schemat rozmieszczenia punktu oraz linii pomiarowych przeprowadzonych badań geofizycznych na skraju bagna Całowanie**

The scheme of measurement points and lines distribution of executed geophysical investigations along the edge of Całowanie swamp

poddano przetwarzaniu i interpretacji ilościowej za pomocą programu INCEL. Spąg osadów organicznych stwierdzono na głębokości 2,2 m, natomiast ich strop na głębokości 1.1 m (tab. 1). Rezultaty pomiarów elektrooporowych wraz z interpretacją geologiczną przedstawiono na figurze 5.

**Badania sejsmiczne.** Na poligonie badawczym Całowanie wykonano pomiary wzdłuż jednego profilu sejsmicznego metodą refrakcyjną o długości 50 m (fig. 3). Celem pomiarów było określenie głębokości spągu osadów organicznych. Rezultaty przetwarzania i interpretacji pomiarów sejsmicznych przedstawiono na figurze 6. Wzdłuż profilu wyodrębniono dwie warstwy różniące się prędkością rozchodzenia się fal.

**Tabela 1**

**Wyniki sondowania elektrooporowego**

The results of vertical electrical sounding

| Opór elektryczny [Ωm] | Głębokość do spągu warstwy geologicznej [m] | Miąższość warstwy geologicznej [m] | Litologia                            |
|-----------------------|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| 16                    | 0,4   | 0,4                                | gleba                                |
| 198                   | 1,1   | 0,7                                | piaski zawodnione                    |
| 11                    | 2,2   | 1,1                                | grunty organiczne, zailone           |
| 96                    | 4,7   | 2,5                                | piaski zawodnione                    |
| 39–56                 | 22,0  | 17,3                               | gliny o różnym stopniu zapiaszczenia |
| 15                    |   |                                    | iły plicieńskie                      |

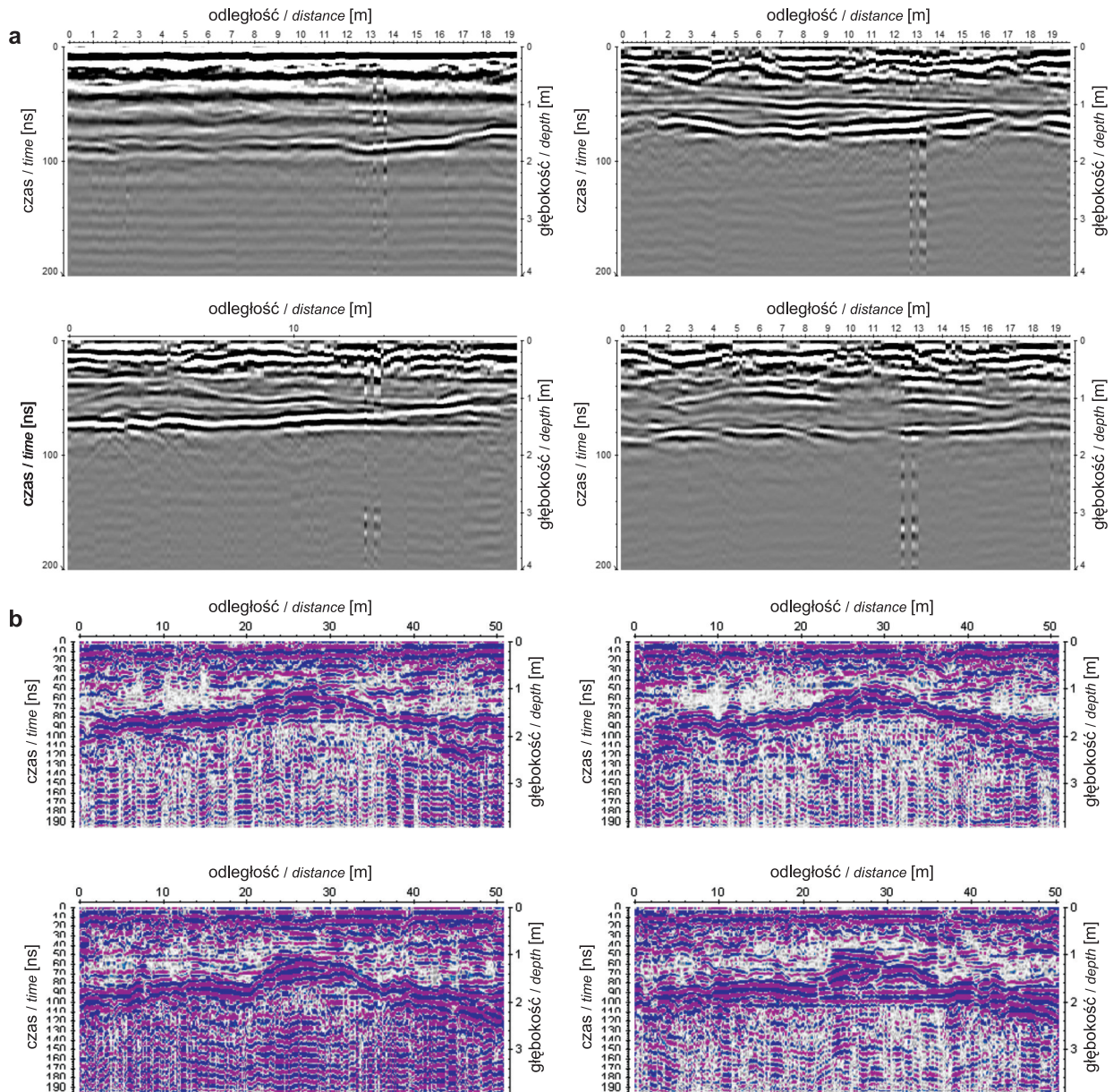


Fig. 4. Obrazy georadarowe uzyskane na bagnie Całowanie: a – profile 5–8 w poprzek, b – profile 1–4 wzdłuż

GPR images of Całowanie swamp: a – profiles no. 5–8 across the swamp, b – profiles no. 1–4 along the swamp

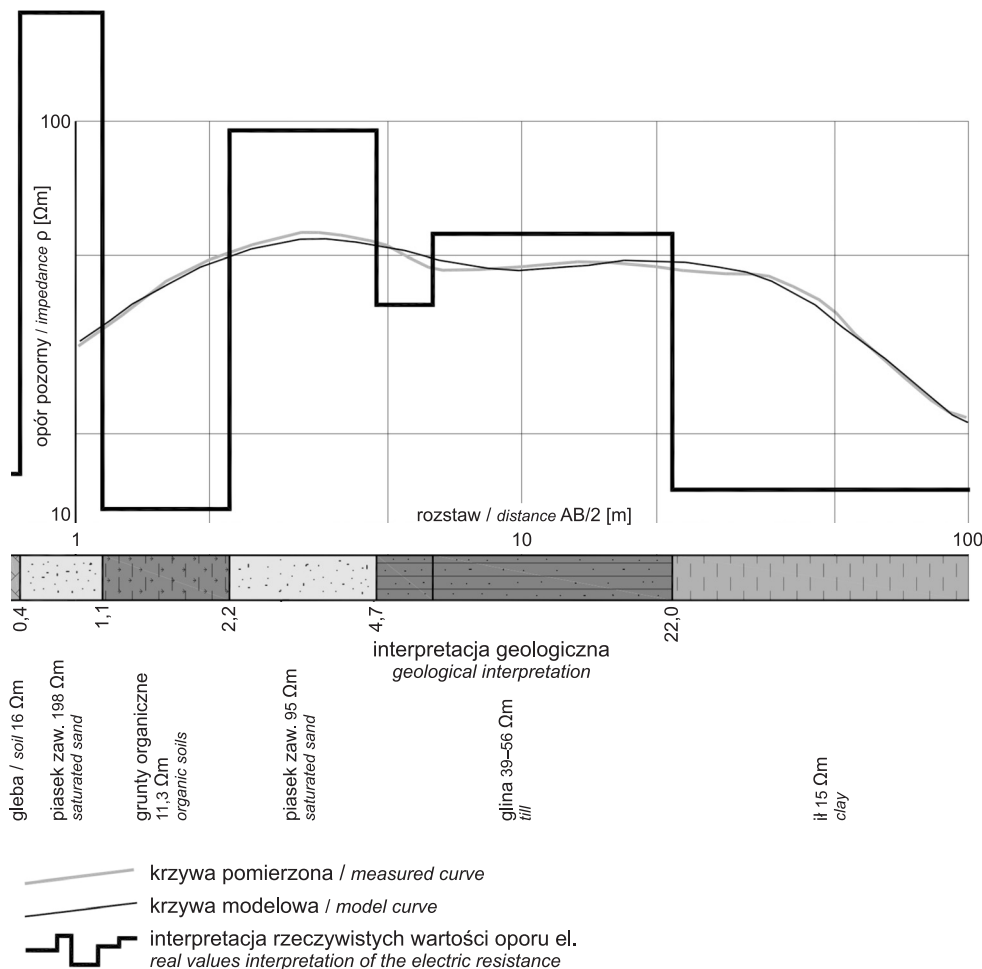
Pierwszą warstwę, o niskiej prędkości 250–390 m/s, należy korelować z poziomem gleby oraz piaskami zawodnionymi i gruntami organicznymi. Zastosowana metoda refrakcyjna nie pozwoliła na wydzielenie granic pomiędzy wymienionymi warstwami geologicznymi, z uwagi na niespełnienie warunku przyrostu prędkości fal sejsmicznych z głębokością.

Drugą warstwę, o prędkości w przedziale 1470–1580 m/s, należy odnieść do osadów niespoistych, zawodnionych. Granicą refrakcyjną jest strop piasków zawodnionych, które zalegają pod warstwą osadów organicznych. Zatem na podstawie sejsmiki refrakcyjnej na tym poligonie spąg osadów organicznych występuje na głębokości około 2 m.

## DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

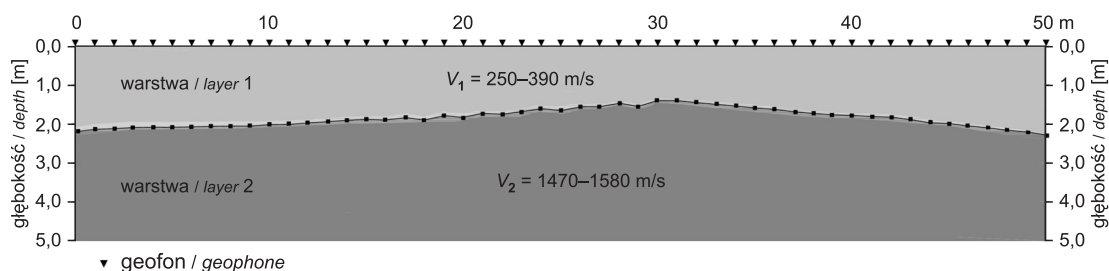
W pracy zajęto się zagadnieniem rejestracji obrazu fizycznego gruntów organicznych, otrzymanego za pomocą różnych metod geofizycznych na dwóch poligonach badawczych – Żuków i Całowanie. Na poligonie w pobliżu Żukowa

wykonano tylko pomiary georadarowe, korelując je z wierceńiami geologiczno-inżynierskimi, natomiast na poligonie niedaleko Całowania zastosowano metody: georadarową, elektrooporową oraz sejsmiki refrakcyjnej. Analiza uzyska-



**Fig. 5. Wyniki pomiarów metodą pionowych sondowań elektrooporowych wraz z interpretacją geologiczną**

Measurements results of the vertical electricity sounding together with the geological interpretation



**Fig. 6. Profil wykonany metodą sejsmiki refrakcyjnej**

Seismic refraction profile

nych wyników wskazuje, że jedynie badania oparte na kilku uzupełniających się metodach geofizycznych pozwalają na dokładne określenie położenia i rozprzestrzenienia gruntów organicznych.

Za pomocą metody georadarowej można dokładnie określić przebieg spągu gruntów organicznych (szczególnie torfów), gdy spełnione będą dwa warunki: grunty organiczne będą zalegały w strefie przypowierzchniowej (do głębokości około 3 m) oraz występowanie tych gruntów będzie stwier-

dzone na podstawie wierceń lub za pomocą innych metod geofizycznych, np. SGE.

Metoda elektrooporowa umożliwia określenie zarówno stropu, jak i spągu gruntów organicznych tylko w przypadku wystąpienia kontrastu między opornością gruntów organicznych i warstw otaczających.

Metoda sejsmiki refrakcyjnej pozwala określić strop i spąg poszczególnych warstw wówczas, gdy prędkość rozchodzenia się fali przyrasta wraz z głębokością. Zazwy-

czaj w gruntach organicznych fale sprężyste rozchodzą się z mniejszą prędkością niż w ich otoczeniu. Na poligonie Całowanie grunty organiczne leżą pomiędzy gruntami mineralnymi. Zatem w tej sytuacji nie można wyznaczyć stropu gruntów organicznych z wykorzystaniem sejsmiki refrakcyjnej. Z powodzeniem jednak można określić głębokość zalegania spągu takich gruntów.

Podsumowując, można stwierdzić, że kompleksowe zastosowanie kilku metod geofizycznych – georadarowej,

elektrooporowej i sejsmiki refrakcyjnej – pozwala na dokładne określenie głębokości występowania spągu gruntów organicznych oraz ich konfiguracji w stosunku do warstw otaczających.

Badania georadarowe ze względu na precyzyjne zobrażowanie powierzchni spągowej gruntów organicznych należy rekomendować jako pomiary uzupełniające wiercenia geologiczno-inżynierskie prowadzone na potrzeby inwestycji liniowych.

## LITERATURA

KARCZEWSKI J., 2007 – Zarys metody georadarowej. AGH, Kraków.  
SZYMANKO J., STENZEL P., 1973 – Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno inżynierskich. Wyd. Geol., Warszawa.  
TROĆ M., WOJTASIK A.T., DOJCZ P., NOWAK D., GUZIK W.,

RADZIEMSKI Ł., GIBASIEWICZ-DOJCZ M., BARMIŃSKI B., KACPRZAK P., WICHLACZ D., 2010 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki geologiczno-inżynierskie dla projektu i realizacji autostrady A2 Stryków–Kopotopa na odcinku D w km 431+500 – 449+100. GT Projekt Sp. z o.o., Swadzim.

## SUMMARY

This paper deals with the registration problem of the physical image of organic soils. Three geophysical methods were applied to investigate the problem: ground penetrating radar, vertical electrical sounding and seismic refraction. Investigations were executed at two test sites: Żuków and Całowanie.

At Żuków site, GPR profiles were correlated with engineering geology boreholes. At Całowanie site, the group of geophysical methods was used: GPR method, vertical elec-

tricity sounding and seismic refraction method. Analysis of achieved results have shown, that the methodology based on mutual applying a few geophysical methods complementing each other allows to determine accurate position and distribution of organic soils.

Due to precise illustration of bottom layer surface of organic soils, GPR method might be recommend as supplementing measurements for engineering geological drillings conducted for the purposes of linear investments.