

# CHARAKTERYSTYKA PODŁOŻA GRUNTOWEGO NA PODSTAWIE KORELACJI PARAMETRÓW OTRZYMANÝCH Z BADAŃ GEOFIZYCZNYCH I GEOTECHNICZNYCH

Katarzyna STELMACH<sup>a\*</sup>, Joanna BZÓWKA<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Przedsiębiorstwo Podstawowych Badań i Robót Geotechnicznych GEOSTANDARD Sp. z o.o., ul. Biała 22, 54-044 Wrocław

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

**Streszczenie:** W pracy podjęto próbę korelacji wybranych parametrów otrzymanych z badań geofizycznych i geotechnicznych. Zestawiono wyniki geofizycznych sondowań oraz profilowań elektrooporowych z sondowaniami CPT, stanowiącymi podstawę do rozpoznania warunków gruntowo-wodnych podłoża. Badania geofizyczne i geotechniczne zostały wykonane pod projektowaną autostradę A1 w rejonie Częstochowy w województwie śląskim.

*Słowa kluczowe:* badania geofizyczne, badania geotechniczne, sondowania geofizyczne, profilowania elektrooporowe, sondowania CPT.

## 1. Wprowadzenie

Badania geotechniczne mają na celu dostarczenie w szybki sposób wiarygodnych i miarodajnych informacji dotyczących oceny podłoża gruntowego. Badania geofizyczne pozwalają na sporządzenie przekrojów i map rozmieszczenia gruntów o jednakowych właściwościach, a także na wstępne rozpoznanie podłoża i wskazanie miejsc do szczegółowego badania za pomocą sondowań statycznych. Badania geofizyczne bazują na pomiarach fizycznych właściwości gruntów i skał. W rozpoznaniu ośrodków gruntowych i warunków hydrogeologicznych podstawową metodą badawczą jest metoda geoelektryczna-elektrooporowa, która wykorzystuje zróżnicowanie wielkości oporu właściwego materiału budującego podłoże gruntowe i polega na pomiarze pozornego oporu elektrycznego określonego wycinka przestrzeni geologicznej.

Sondowania statyczne CPT są wykorzystywane do rozpoznania budowy geologicznej podłoża gruntowego oraz bezpośredniego wyznaczania parametrów wytrzymałościowych gruntów. Zaletą sondowań statycznych jest określenie stratyfikacji warstw gruntu oraz ocena podłoża gruntowego w sposób ciągły.

Celem pracy jest przedstawienie zastosowania pomiarów geofizycznych i sondowań CPT oraz korelacji tych wyników badań w celu rozpoznania warunków gruntowo-wodnych podłoża.

## 2. Teren wykonanych badań

Teren badań jest położony w rejonie Częstochowy i stanowi część autostrady A1 (w fazie projektowej), zlokalizowany od km 434+000 do km 442+500 w części województwa śląskiego (Dokumentacja, 2011), co zostało pokazane na rysunku 1.

Pod względem geologicznym na rozpatrywanym terenie występują często wychodnie skał jurajskich, iły, mułowce piaszczyste z wkładkami piaskowców oraz syderytami. Iły i mułowce piaszczyste łącznie z ilastymi osadami batonu (trzeci wiek środkowej jury) w rejonie częstochowskim są nazywane iłami rudonośnymi. Przypowierzchniowe warstwy stanowią piaski średnie, miejscami piaski pylaste oraz gliny zwałowe.

Analizowany teren znajduje się w rejonie częstochowskiego obszaru rudonośnego, w którym była prowadzona przez kilkadziesiąt lat eksploatacja złóż rud żelaza. Eksploatację, którą prowadzono do głębokości 20 i 30 m poniżej poziomu terenu zakończono, a kopalnie uległy zatopieniu.

Z analizy lokalizacji zakładów górniczych i obszarów eksploatacji złóż syderytowych wynika, że na odcinku trasy km 434+600 – km 442+225 podziemna eksploatacja górnicza złóż rud żelaza spowodowała naruszenie stanu równowagi górotworu (rys. 1). Pod wpływem zawału poeksploatacyjnego wyrobisk wystąpiły widoczne na powierzchni terenu niecki obniżeniowe, czasami wypełnione wodą. Część obniżenia górotworu wystąpiła

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: k.stelmach@geostandard.pl



Rys. 1. Obszar wykonywanych badań geofizycznych i geotechnicznych wraz z przebiegiem planowanej autostrady A1 km 434 + 000 – km 442 + 500 (Dokumentacja, 2011)

krótko po zakończeniu eksploatacji złoża, a część ujawniła się dopiero po pewnym czasie.

Na znacznej części terenu i w okolicach Częstochowy występują szkody górnicze związane z zakończoną eksploatacją rud żelaza. Łączna długość analizowanego terenu wynosi około 7,6 km.

### 3. Metody badań

Wstępne ustalenia oraz badania geotechniczne wskazały w niektórych miejscach, na niekorzystne warunki gruntowe. Stanowiło to podstawę do wykonania badań w celu weryfikacji lokalizacji potencjalnych zagrożeń występowania pustek poeksploatacyjnych bądź rozluźnień w naruszonym przez wpływy górnicze górotworze.

Badania geofizyczne wykonano metodą profilowań elektrooporowych EP (*Electrical Profiling*) oraz metodą pionowych sondowań elektrooporowych VES (*Vertical Electrical Sounding*). Dodatkowo wykonano sondowania statyczne CPT.

W metodzie elektrooporowej przedmiotem pomiaru są właściwości pola elektrycznego wytworzonego w podłożu w sposób sztuczny przez system elektrod, na których utrzymywana jest stała różnica potencjałów. Metodą tą wykonuje się pomiary oporności elektrycznej ośrodka gruntowego znajdującego się w obrębie wytworzonego pola elektrycznego i dokonuje się pomiaru zróżnicowania oporności elektrycznej  $\rho$  różnych litologicznych osadów, a w szczególności wysokooporowych osadów piaszczysto-żwirowych i niskooporowych osadów gliniasto-ilastych. Czynniki niekorzystnie wpływającymi na dokładność i jednoznaczność interpretacji geologicznej są oddziaływujące na oporność elektryczną zmienne nawodnienie i mineralizacja wody nasycającej ośrodek (Bestyński, 2011).

Metoda profilowania elektrooporowego EP polega na wykorzystaniu zjawiska deformacji rozkładu pola elektrycznego spowodowanego poziomym zróżnicowaniem

w oporności ośrodka gruntowego. Profilowanie elektrooporowe ma za zadanie zbadanie pozornego oporu właściwego wzdłuż obranego kierunku za pomocą układu o stałych wymiarach, przesuwanego o określone odstępstwa, zwane krokiem profilowania. Pozwala to na wyodrębnienie warstw leżących na stałej głębokości, czyli na określeniu poziomych zmian oporności elektrycznej (Dzwiniel, 1978).

Pionowe sondowanie elektrooporowe VES polega na mierzeniu w obranym punkcie pozornego oporu właściwego, przy stopniowym zwiększeniu odległości między elektrodami, w celu zbadania przekroju geologicznego w pionie. Proces sondowania opiera się na pomiarze oporności pozornej, jako funkcji zmiany wielkości rozstawu pomiarowego elektrod (Barlik, 1986). Sposób ten pozwala na wyznaczenie głębokości występowania kolejnych warstw. Interpretacja wyników z pomiarów polega na wydzieleniu w ośrodku układu warstw fizycznych o określonej miąższości i oporności elektrycznej, a interpretacja geologiczna pomiarów polega na przyporządkowaniu kompleksów litologicznych wydzielonym warstwom fizycznym (Bestyński, 2011).

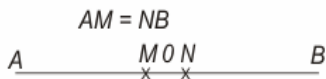
Sondowania statyczne CPT polegają na wciskaniu w podłoże gruntowe stożkowej sondy ze stałą prędkością 2 cm/s, wyposażonej w elektroniczne układy miernicze. W trakcie badania dokonuje się pomiaru dwóch podstawowych parametrów, którymi są: siła oporu penetracji względem powierzchni przekroju poprzecznego końcówki stożka oraz siła tarcia powierzchni bocznej końcówki. Odczyt dokonywany jest metodą elektroniczną, poprzez ciągły pomiar na czujnikach umieszczonych w sondzie i jest przekazywany z końcówki sondy do specjalnego odbiornika. Każdy mierzony parametr rejestrowany jest w odrębnym kanale, w programie rejestrującym dane w postaci pliku, co poddawane jest dalszej interpretacji (Sikora, 2006).

Profilowania elektrooporowe były wykonane w celu potwierdzenia miejsc rozluźnień górotworu, wywołanych płytką eksploatacją górniczą. Wykonane profilowania

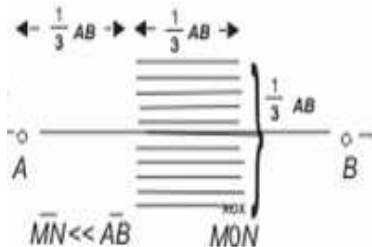
przeprowadzono metodą średniego gradientu na głębokości 30 m.

W badaniach polowych do wykonywania pomiarów oporu pozornego, zarówno przy sondowaniu oraz profilowaniu, stosuje się różne typy układów pomiarowych. Różnice między nimi polegają na różnej liczbie elektrod zasilających AB i pomiarowych MN, sposobie ich rozmieszczenia na powierzchni terenu oraz sposobie zmiany położenia elektrod przy wykonywaniu kolejnych pomiarów oporu pozornego.

W przedmiotowych badaniach zastosowano w sondowaniach elektrooporowych rozmieszczenia elektrod w układzie Schlumbergera (rys. 2), a w profilowaniach elektrooporowych układ średniego gradientu (rys. 3).



Rys. 2. Układ symetryczny Schlumbergera



Rys. 3. Układ średniego gradientu

Podstawą interpretacji wyników badań elektrooporowych jest uzyskanie oporności górotworu według następującego wzoru:

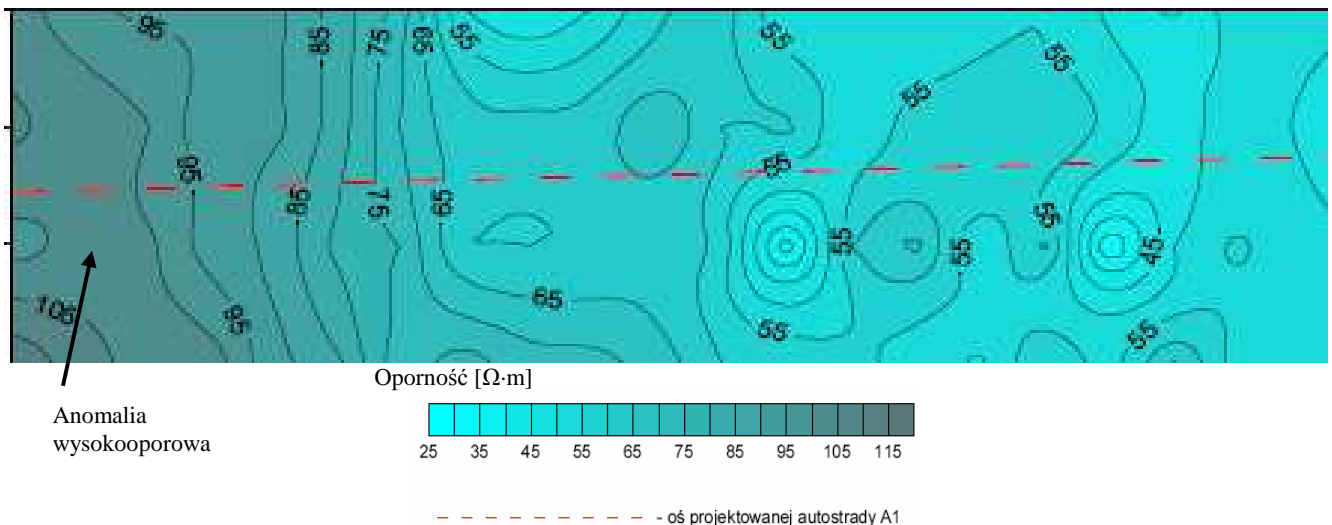
$$\rho_k = K \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

gdzie:  $\rho_k$  jest opornością górotworu w  $\Omega\cdot m$ ,  $K$  jest współczynnikiem geometrycznym układu pomiarowego w m,  $V$  jest różnicą potencjałów między elektrodami M,N w V, a  $I$  jest natężeniem prądu płynącego przez górotwór i elektrody A, B w A.

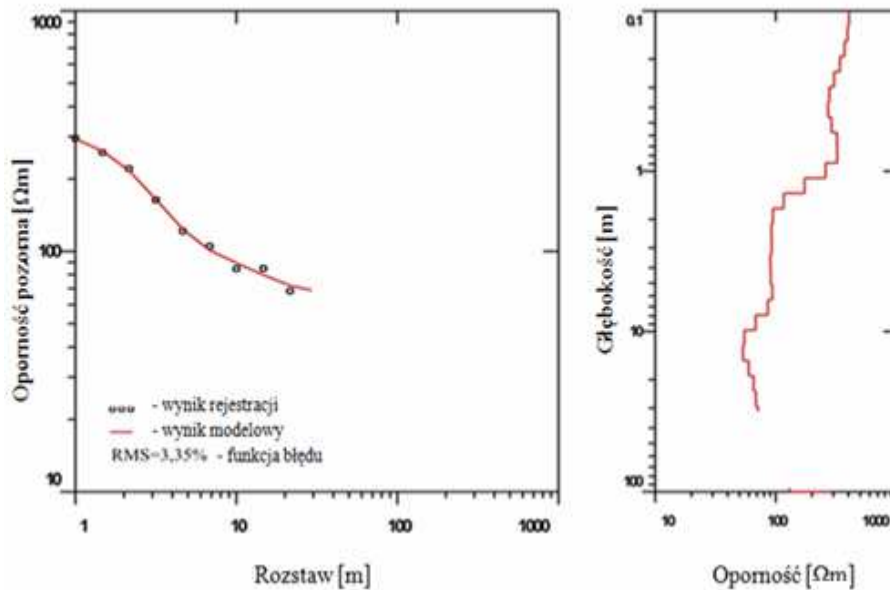
Profilowania elektrooporowe EP przedstawiają mapę rozkładu oporności w zakresie od 45-105  $\Omega\cdot m$  (rys. 4). Na przedstawionej mapie oporność w granicach od 100-105  $\Omega\cdot m$  jest opornością podwyższoną w stosunku do całości „tła”, informującą o występowaniu anomalii wysokooporowej, wskazującej na występowanie rozluźnień lub ewentualnych pustek w górotworze.

Wartości oporności są sumą „tła” i poszukiwanej anomalii, gdzie pod pojęciem „tła” określa się jednolity górotwór o stałych wartościach oporności, uzyskanych na jednym poziomie pomiarowym. W przypadku, gdy w górotworze mamy do czynienia z układem fizycznie niejednorodnym (pustki, spękania, szczeliny), wykres oporności jest linią o zmiennym przebiegu. Wszelkie zniekształcenia, których wartość przekracza poziom „tła”, nazywane są anomaliami. Wartość oporności w strefach anomalnych zależy od oporności skał, w obrębie których one występują oraz intensywności spękań (Dokumentacja, 2011).

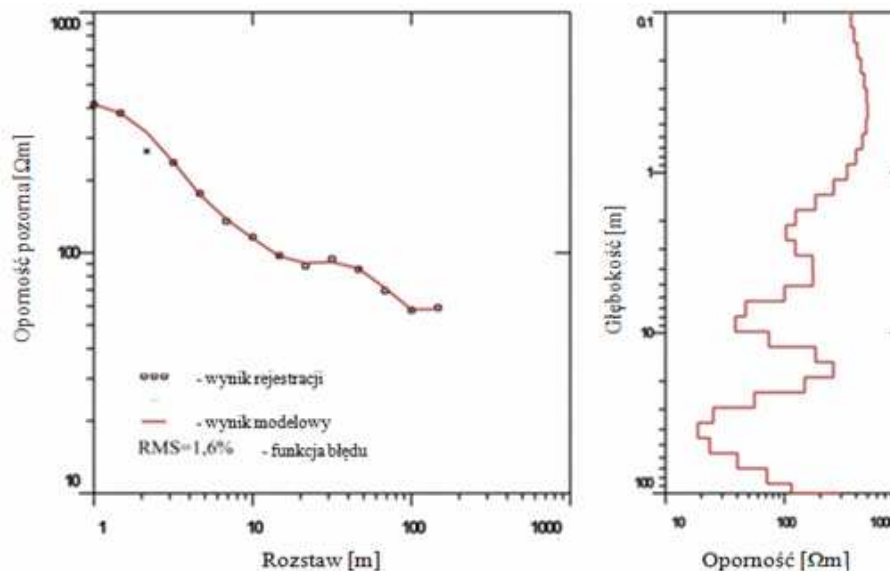
Interpretację pionowych sondowań elektrooporowych VES wykonano metodą Occama (rys. 5 i 6). Metoda Occama jest metodą iteracyjną. Interpretacja polega na automatycznej modyfikacji parametrów modelu 1D (miąższości i oporności warstw) poprzez minimalizację funkcji błędów  $RMS > \min$ . RMS czyli funkcji określającej stopień dopasowania krzywej teoretycznej do krzywej polowej. Do interpretacji użyto programu IX1D firmy Interpex. W metodzie Occama model wyjściowy jest modelem półprzestrzeni podzielonym na warstwy, których miąższość rośnie z głębokością w skali logarytmicznej. W czasie interpretacji geometria pozostaje stała, zmienia się tylko oporność warstw. Stąd, w wyniku interpretacji uzyskujemy model gładki, niezbyt precyzyjny, ale za to obiektywny.



Rys. 4. Anomalia wysokooporowa w km 435+460 (Dokumentacja, 2011)



Rys. 5. Wynik sondowania elektrooporowego VES s1 – km 435 + 460



Rys. 6. Wynik sondowania elektrooporowego VES s2 – km 435 + 440

Testy CPT stanowiły dodatkowe badania uzupełniające do wykonanych geofizycznych profilowań elektrooporowych. Badania CPT wykonano w miejscach anomalii geofizycznych. Do przeprowadzenia badań penetracyjnych wykorzystano ciężką sondę statyczną Hyson 200 kN z osprzętem (system rejestracyjny i stożek). Zgodnie z instrukcją „International Test Procedure for Cone Penetration Test CPT, CPTU”, opracowaną przez Komitet Techniczny TC-16 (ISSMGE, 1999) w badaniach zastosowano piezostożek elektryczny, który umożliwiał ciągłe mierzenie i zapisywanie w miarę zwiększania się głębokości trzech charakterystyk penetracji: opór stożka  $q_c$ , tarcie na tulei ciernej  $f_s$  i nadwyżkę ciśnienia porowego  $u_c$ . Według instrukcji TC-16, jak i normy PN-B-04452:2002 *Geotechnika. Badania polowe* w badaniach wykorzystano stożek charakteryzujący się standardową geometrią: powierzchnią podstawy  $10 \text{ cm}^2$ , powierzchnią tulei ciernej

$150 \text{ cm}^2$  i kątem wierzchołkowym stożka  $60^\circ$ . Stożek wciskano w podłoże ze stałą prędkością  $2 \text{ cm/s}$ .

Podstawę do interpretacji wykresów charakterystyk testów statycznego sondowania są dane zapisane w oryginalnej formie elektronicznej.

Do wyznaczenia parametrów geotechnicznych wydzielonych w podłożu warstw gruntów niezbędna jest standaryzacja i normalizacja zarejestrowanych parametrów sondowania do postaci współczynników i wskaźników, które wykorzystuje się w systemach klasyfikacyjnych i procedurach interpretacyjnych (ISSMGE, 1999). Zestawienie wyników sondowań CPT przedstawia tabela 1 (Dokumentacja, 2011).

Tab. 1. Zestawienie wyników badań podłoża gruntowego (Dokumentacja, 2008 i 2011)

Sondowania elektrooporowe		Przekrój geologiczny		Przelot warstwy [m]	Rodzaj gruntu	Domieszki	Opór stożka $q_c$ [MPa]	Naprężenie pionowe $\sigma_{vo}$ [kPa]	Parametry stanu	Parametry sondowania	
km 435+400 – 435+500 skala 1:100		km 435+450 – 435+500 rzędna 256+71 m n.p.m.							$I_D$ [-]	$I_L$ [-]	$q_c - \sigma_{vo}$ [MPa]
				0,0-0,2	H	-	-	-	-	-	-
				0,2-0,5	Ps	/Pr	0,5	2	0,40	-	4,29
				0,5-0,8	II	//Pd	4,3	6	-	0,32	2,29
				0,8-1,3	Ps	//Pd, II	2,3	12	0,45	-	4,78
				1,3-2,1	Ps	//Pd	4,8	20	0,70	-	10,87
				2,1-3,1	Ps	//Żg	10,9	30	0,30	-	3,45
				3,1-3,7	Ps	//II	3,5	46	>0,15	-	2,04
				3,7-8,6	II	//H, G <sub>II</sub>	2,1	62	-	0,52	1,08
				8,6-11,2	Ps	/Pr	1,2	118	0,70	-	14,91
				11,2-20,4	Pr	/Ps/Po	15,1	194	0,50	-	11,83
				20,4-22,0	Ps	//Pr	12,2	312	0,65	--	20,58
				22,0-33,0	Po	/Ż/Pr	21,0	420	0,55	-	17,35



Pionowe sondowania elektrooporowe VES s1 i VES s2 wykonano w miejscu występowania wysokooporowej anomalii geofizycznej (rys. 4). Wyniki sondowań pokazują, że do głębokości 1 m występuje warstwa wysokooporowa (piaski suche), a następnie do głębokości około 5-7 m poniżej poziomu terenu warstwa niskooporowa (rys. 5 i 6). Wynik sondowania VES s1 pokazuje brak danych dla większych rozstawów, czyli brak danych dla głębiej zalegających warstw gruntu (rys. 5).

Poniżej do kilkunastu metrów występuje warstwa zawodniona. Dla sondowania VES s1 ta warstwa jest wyraźnie rozmyta.

Głębiej oporność wzrasta dla obu krzywych, jednakże w sondowaniu VES s2 na głębokości od 20-30 m do kilkudziesięciu metrów poniżej poziomu terenu występuje warstwa niskooporowa. Obniżenie oporności jest spowodowane występowaniem wody gruntowej lub ilów/glin.

Poniżej, na głębokości od 60 m poniżej poziomu terenu występuje podłoże wysokooporowe, co wskazuje na występowanie pustki.

#### 4. Podsumowanie

W artykule wykazano przydatność badań geofizycznych, jak również sondowań statycznych do identyfikacji występowania stref anomalii oraz przyczyny ich występowania dla płytkich wyrobisk górniczych.

Wyniki badań geofizycznych stanowią dobrą podstawę do wskazania miejsc, w których należy wykonać sondowania statyczne. Taki sposób postępowania pozwala na zmniejszenie liczby sondowań statycznych i liczby wykonywanych badań geotechnicznych na terenach objętych wpływami eksploatacji złóż rud żelaza.

Jednocześnie pojawia się konieczność korelacji wyników badań geofizycznych z badaniami geotechnicznymi, a w szczególności z sondowaniami statycznymi. Analizy korelacyjne są na etapie doświadczalnym. Przedmiotem dalszych badań oraz analiz będzie okonturowanie, za pomocą sondowań elektrooporowych, miejsc wystąpienia stref anomalnych, w celu uzyskania szczegółowych fizycznych zależności.

Wykorzystanie badań geofizycznych – profilowań i sondowań elektrooporowych – oraz sondowań

statycznych, pozwoli na uzyskanie ciągłego wielowarstwowego obrazu ośrodka geologicznego, zawierającego informację o rzeczywistej budowie geologicznej i miarodajnych wartościach parametrów geotechnicznych.

#### Literatura

- Barlik M. (1986). Wybrane Zagadnienia z Geofizyki. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Bestyński Z. (2011). Metody geofizyczne w geologii inżynierskiej. *Biuletyn PIG*, Warszawa.
- Dzwinel J. (1978). Geofizyka. Pomiary geoelektryczne. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- ISSMGE (1999). Test procedures for Cone Penetration (CPT) and Cone Penetration with Pore Pressure (CPTU). A report prepared by the Technical Committee TC-16.
- Państwowy Instytut Geologiczny, Instytut Techniki Budowlanej, Instytut Badawczy Dróg i Mostów (2008). Dokumentacja geologiczno-inżynierska na potrzeby projektowania autostrady A1 na odcinku od granicy województwa łódzkiego do węzła „Pyrzowice” (z węzłem), od km 399+742,51 do km 475+327,65 wraz z odcinkiem drogi ekspresowej S1 od węzła „Pyrzowice” do węzła „Lotnisko”, Warszawa.
- P.P.B.iR.G. Geostandard Sp. z o.o. (2011). Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla oceny warunków geologiczno-inżynierskich podłoża pod projektowane przepusty, drogi dojazdowe oraz obiekty inżynierskie na odcinku od granicy województwa łódzkiego i śląskiego do węzła „Zawodzie” (z węzłem) projektowanej autostrady A1 (km 399+742,51 – 442+500), Wrocław.
- Sikora Z. (2006). Sondowanie Statyczne. WNT, Warszawa.

#### SUBSOIL CHARACTERISTICS ON THE BASIS OF PARAMETER CORRELATIONS ESTIMATED FROM GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL TESTS

**Abstract:** In the paper there is a correlation sample of selected parameters estimated from geophysical and geotechnical tests. The comparison of geophysical sounding and elektroresistance profiling with CPT tests is the basis for recognizing subsoil conditions. Geophysical and geotechnical tests were carried out for a new designed A1 motorway at the area of Częstochowa in the Silesia region..