

## METODY GEOFIZYCZNE W GEOLOGII INŻYNIERSKIEJ

### GEOPHYSICAL METHODS IN ENGINEERING GEOLOGY

ZBIGNIEW BESTYŃSKI<sup>1</sup>

**Abstrakt.** W artykule scharakteryzowano podstawowe metody geofizyczne stosowane w geologii inżynierskiej, tzn. metody geoelektryczne i sejsmiczne. Podano ich podstawy fizyczne oraz zalety i ograniczenia w rozwiązywaniu zadań geologii inżynierskiej. Przedstawiono przykłady badań geofizycznych do oceny warunków geotechnicznych budowy tuneli, stanu technicznego budowli i stateczności zboczy osuwiskowych, jak również warunków hydrogeologicznych podłoża tras komunikacyjnych.

**Słowa kluczowe:** oporność elektryczna, prędkość fal sejsmicznych, warstwa fizyczna, klasa geotechniczna, powierzchnia poślizgu.

**Abstract.** This article presents geophysical methods used for geological engineering investigations, their physical basis, and advantages and limitations in geological engineering study. Some examples of geophysical investigations for solving different geological engineering problems are also presented.

**Key words:** electrical resistivity, seismic wave velocity, physical layer, geotechnical class, slide boundary.

### WSTĘP

Badania geofizyczne to jedno z metod rozpoznania geologicznego, a w ocenie warunków geologiczno-inżynierskich ich główną zaletą jest możliwość przestrzennego rozpoznania ośrodka. Badania geofizyczne zwykle uzupełniają tradycyjne punktowe badania geologiczno-geotechniczne, które stanowią dla nich repery geologiczne. W niektórych zagad-

nieniach badania te są jednak niezastąpione (np. mikrorejonyzacja sejsmiczna czy też ocena wpływu drgań podłoża na budowle). W artykule opisano podstawowe metody geofizyczne stosowane w geologii inżynierskiej oraz przedstawiono kilka przykładów rozwiązywanych zagadnień.

### FIZYCZNE PODSTAWY BADAŃ GEOFIZYCZNYCH

Podstawą wykorzystania metod geofizycznych w prospekcji geologicznej jest zróżnicowanie właściwości fizycznych różnych litologicznie osadów i struktur geologicznych. W zależności od celu badań wybiera się metodę geofizyczną,

która określa parametr najlepiej odwzorowujący poszukiwane elementy struktury geologicznej, tektonikę, litologię czy też parametry mechaniczne ośrodka. W rozpoznaniu ośrodków gruntowych i warunków hydrogeologicznych

---

<sup>1</sup> SEGI-AT Sp z o.o., ul. Baletowa 30, 02-867 Warszawa; bestynski.z@gmail.com

podstawową metodą jest metoda geoelektryczna elektrooporowa, natomiast w przypadku ośrodków skalnych i ocenie ich parametrów mechanicznych – metoda sejsmiczna. W odwzorowaniu najpłytszych struktur, głównie antropogenicz-

nych, wykorzystywana jest również metoda georadarowa. Inne metody geofizyczne, tzn. grawimetryczna, magnetyczna i geotermiczna, mają w geologii inżynierskiej mniejsze znaczenie.

## METODY GEOELEKTRYCZNE ELEKTROOPOROWE

Podstawą fizyczną wykorzystania tych metod w prospekcji geologicznej jest zróżnicowanie oporności elektrycznej  $\rho$  różnych litologicznie osadów, w szczególności wysokooporowych osadów piaszczysto-żwirowych i niskooporowych osadów gliniasto-ilastych. Czynniki niekorzystnie wpływającymi na dokładność i jednoznaczność interpretacji geologicznej są oddziałujące na oporność elektryczną zmienne zawodnienie i mineralizacja wody nasycającej ośrodek. Pomiarów elektrooporowych wykonywane są w trzech wariantach metodycznych: profilowania elektrooporowego EP (*Electrical Profiling*), pionowych sondowań elektrooporowych VES (*Vertical Electrical Sounding*) i tomografii elektrooporowej ERT (*Electrical Resistivity Tomography*).

z założeniem płasko-równoległego ułożenia warstw. Metoda jest więc efektywna przy takim lub zbliżonym ich ułożeniu. Interpretacja geologiczna pomiarów polega na przyporządkowaniu kompleksów litologicznych wydzielonym warstwom fizycznym. Do udokładnienia interpretacji wskazane jest wykorzystanie geologicznych otworów reperowych zlokalizowanych na terenie badań. Metoda VES umożliwia wydzielenie w ośrodku gruntowym wysokooporowych, piaszczysto-żwirowych warstw przepuszczalnych i niskooporowych, gliniasto-ilastych warstw nieprzepuszczalnych. Pionowe sondowania elektrooporowe wykorzystuje się głównie do określenia warunków hydrogeologicznych w osadach akumulacji glacialnej. Mniejsze znaczenie mają one w ocenie warunków geotechnicznych podłoża.

### PROFILOWANIE ELEKTROOPOROWE EP

Polega na określeniu poziomych zmian oporności elektrycznej ośrodka 4-elektrodowym układem pomiarowym o stałej długości linii zasilającej. Oporność wyznacza się wzdłuż wyznaczonych linii pomiarowych, na głębokości ustalonej długością linii zasilającej układu pomiarowego. Pomiarów wykonywane są zwykle na 2–3 poziomach prospekcji i umożliwiają określenie poziomego zróżnicowania litologii ośrodka. Przykładowo, powierzchniowe zróżnicowanie oporności w stropie masywu fliszowego umożliwia wyznaczenie przebiegu kompleksów litologicznych budujących masyw, a na podstawie zaburzenia ciągłości ich przebiegu – wnioski o tektonice masywu. Badania wykonane na obszarze Karpat fliszowych umożliwiły określenie empirycznej zależności: % piaskowców =  $f(\rho)$ . W przybliżeniu można przyjąć, że procentowa zawartość piaskowców w ośrodku fliszowym równa jest połowie jego oporności elektrycznej  $\rho$  wyrażonej w omometrach [ $\Omega\text{m}$ ].

### TOMOGRAFIA ELEKTROOPOROWA ERT

Wykonywana jest układem pomiarowym składającym się z 30–40 elektrod rozłożonych wzdłuż linii pomiarowej w jednakowych odstępach (Loke, 1999). Pomiarów przeprowadzane są dla wszystkich 4-elektrodowych kombinacji tych elektrod, spełniających warunki układu Schlumbergera-Wennera. Wybór kombinacji elektrod dokonywany jest w sposób automatyczny. Pomiar tą metodą jest równoważny wykonaniu na odcinku linii pomiarowej kilkudziesięciu sondowań VES o różnych maksymalnych długościach linii zasilającej. Opracowanie rezultatów badań polega na podziale ośrodka na płasko-równoległe bloki o określonych wymiarach i przyporządkowaniu każdemu z nich takiej oporności elektrycznej, by obliczony dla tego układu rozkład potencjałów pokrywał się z określonymi pomiarami. Opracowanie wykonywane jest metodą modelowania matematycznego, która umożliwia szczegółowe określenie zróżnicowania oporności elektrycznej ośrodka w płaszczyźnie pomiarowej, zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym. Interpretacja geologiczna polega na przyporządkowaniu kompleksów litologicznych przedziałom oporności elektrycznej. Podobnie jak w przypadku pomiarów metodą VES, do udokładnienia interpretacji wskazane jest wykorzystanie geologicznych otworów reperowych. Zaletą tomografii elektrooporowej jest możliwość odwzorowania poziomej niejednorodności ośrodka, co w przypadku pionowych sondowań elektrooporowych jest bardzo ograniczone. W ocenie warunków geologiczno-inżynierskich poziome zróżnicowanie ośrodka ma podstawowe znaczenie, ponieważ nierównomierne osiadanie podłoża konstrukcji inżynierskich bezpośrednio zagraża ich stateczności.

### PIONOWE SONDOWANIA ELEKTROOPOROWE VES

Pomiary wykonywane są 4-elektrodowym układem pomiarowym o zmiennej długości linii zasilającej, umożliwiającym przesłedzenie zróżnicowania oporności ośrodka w kierunku pionowym, w punkcie odpowiadającym środkowi układu pomiarowego (Vogelsang, 1995). Opracowanie pomiarów polega na wydzieleniu w ośrodku takiej sekwencji warstw fizycznych o określonej miąższości i oporności elektrycznej, by obliczony dla niej teoretyczny rozkład potencjału elektrycznego pokrywał się z określonymi pomiarami. Pomiarów opracowuje się metodą modelowania matematycznego

## METODY SEJSMICZNE

Podstawą fizyczną wykorzystania metod sejsmicznych w prospekcji geologiczno-geotechnicznej jest zależność prędkości fal sejsmicznych od parametrów mechanicznych ośrodka. Zróżnicowanie parametrów związane jest głównie z naruszeniem pierwotnej struktury ośrodka, a w mniejszym stopniu z jego zróżnicowaniem litologicznym. Pomiar sejsmiczne umożliwiają wydzielenie w ośrodku granic warstw o różnych prędkościach fal sejsmicznych oraz obszarów o obniżonych parametrach mechanicznych w strefach koncentracji spękań związanych z uskokami, nasunięciami itp. Metodami sejsmicznymi wykorzystywanymi w geologii inżynierskiej są: metoda profilowania refrakcyjnego SRP (*Seismic Refraction Profile*) falami podłużnymi  $V_p$  i poprzecznymi  $V_s$ , metoda tomografii sejsmicznej ST (*Seismic Tomography*) fal bezpośrednich i fal refrakcyjnych oraz metoda analizy spektralnej fal powierzchniowych MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*).

### PROFILOWANIE REFRAKCYJNE SRP

Pomiary polegają na rejestracji wzdłuż wybranej linii pomiarowej fal refrakcyjnych  $V_p$  lub  $V_s$  załamanych pod kątem granicznym na kontakcie dwóch ośrodków. Warunkiem powstania fali refrakcyjnej jest wyższa prędkość rozchodzenia się fal w ośrodku zalegającym głębiej. Taką sekwencją prędkości charakteryzuje się profil wietrzniowy ośrodka skalnego, którego pierwszą warstwę stanowi zwietrzelina chemiczna, drugą zwietrzelina fizyczna, a trzecią – lity masyw skalny. Opracowanie pomiarów oparte na prawach ruchu falowego umożliwia określenie głębokości i przebiegu granic oraz prędkości fal sejsmicznych w wydzielonych warstwach. Przebieg warstw odwzorowuje strukturę ośrodka, a prędkość fal sejsmicznych jest wskaźnikiem parametrów mechanicznych wydzielonych warstw. Do określenia modułu sprężystości ośrodka konieczne jest wykonanie pomiarów fal  $V_p$  i  $V_s$ . Wyznaczony na ich podstawie tzw. „dynamiczny” moduł sprężystości  $E_d$  nie uwzględnia cech reologicznych ośrodka, nie może więc być bezpośrednio wykorzystany w obliczeniach projektowych. Jego przeliczenie na moduł „statyczny”  $E_s$ , ustalony w warunkach zbliżonych do obciążenia podłoża rzeczywistą budowlą, wykonuje się na podstawie formuł korelacyjnych określanych dla danego typu ośrodka skalnego. Dla fliszu formuła taka ma postać:  $E_s = a(E_d)^b$ , gdzie dla zaburzonych tektonicznie warstw godulskich:  $a = 0,056$  i  $b = 1,43$ .

### TOMOGRAFIA SEJSMICZNA ST

Pomiary wykonywane są w dwóch wariantach metodycznych – tomografii fal bezpośrednich i tomografii fal refrakcyjnych (Kasina, 2001). Pomiary metodą tomografii fal bezpo-

średnich przeprowadzane są między dwoma liniami usytuowanymi w otworach wiertniczych lub w wyrobiskach górniczych. Wzdłuż jednej z nich rozmieszczone są punkty wzbudzenia, a wzdłuż drugiej odbiorniki drgań. W ramach cyklu pomiarowego fala sejsmiczna generowana w każdym z punktów wzbudzenia rejestrowana jest wszystkimi odbiornikami. W efekcie powierzchnia pomiarowa pokryta zostaje siatką promieni sejsmicznych, z których każdy niesie informację o innym jej wycinku. Cykl obliczeniowy obejmuje podział powierzchni pomiarowej na elementy powierzchniowe i utworzenie dla każdego promienia równania określającego różnicę czasu zmierzonego i obliczonego na podstawie przyjętej prędkości fal w każdym z wydzielonych elementów, które przecina promień. Rozwiązaniem otrzymanego układu równań są prędkości fal dla każdego elementu powierzchniowego, a stąd odwzorowanie prędkości fal na całej powierzchni pomiarowej.

W metodzie tomografii refrakcyjnej przedmiotem analizy są promienie sejsmiczne generowane falą refrakcyjną i rejestrowane na powierzchni terenu. Procedura obliczeniowa prowadząca do odwzorowania rozkładu prędkości fal w ośrodku nad granicą refrakcyjną jest podobna do stosowanej w tomografii fal bezpośrednich. Dokładność odwzorowania jest jednak znacznie mniejsza, co wynika z niedokładności w określeniu tras przebiegu promieni sejsmicznych.

Tomografię fal bezpośrednich wykorzystuje się zwykle do określenia zróżnicowania ośrodków skalnych, a tomografię refrakcyjną do wyznaczenia zróżnicowania warstw nadkładu. Metoda tomografii fal bezpośrednich znajduje zastosowanie głównie w szczegółowej ocenie warunków posadowienia dużych obiektów inżynierskich oraz w ocenie stanu technicznego obiektów już istniejących. Na podstawie przestrzennego zróżnicowania ośrodka ze względu na prędkość fal sejsmicznych w podłożu projektowanych obiektów możliwe jest okonturowanie stref najsłabszych, niespełniających wymaganego kryterium odkształcalności. Wydzielone strefy poddaje się zabiegom wzmacniającym, a po ich zakończeniu pomiary wykonuje się powtórnie w celu sprawdzenia skuteczności tych działań. Taki sposób prowadzenia prac umożliwia lepszą homogenizację ośrodka i często znaczne oszczędności (np. zmniejszenie o 30% projektowanego zakresu prac cementacyjnych w podłożu wież wlotowych zapory Świnna Poręba).

### ANALIZA SPEKTRALNA FAL POWIERZCHNIOWYCH MASW

W prospekcji wykorzystuje się fale powierzchniowe Rayleigha wzbudzane w sposób sztuczny lub naturalny (mikrosejsmy, falowanie, wiatr itp.). Fale (zwykle o częstotliwości 2–30 Hz) rejestruje się rozstawem niskoczęstotliwościowych geofonów i poddaje analizie spektralnej, określając ich pręd-

kości w funkcji częstotliwości. Fale powierzchniowe o niższej częstotliwości, a więc większej długości, propagują na większą głębokość, zatem w rezultacie wyznacza się zmienność prędkości fal z głębokością. Prędkość fal powierzch-

niowych jest ściśle związana parametrami mechanicznymi ośrodka. Metodę wykorzystuje się od określenia zróżnicowania przypowierzchniowej warstwy gruntów.

## PRZYKŁADY ROZWIĄZYWANYCH ZADAŃ

### OCENA WARUNKÓW GEOTECHNICZNYCH BUDOWY TUNELI W KARPATACH FLISZOWYCH

Budowa tras komunikacyjnych w rejonach górskich wiąże się często z koniecznością budowy tuneli. Obiekty takie projektowane są w Zaborni na trasie Kraków–Zakopane oraz w Lalikach, w Węgierskiej Górcie i w Milówce na trasie autostrady południe–północ. W budownictwie tunelowym ze względu na liniowy charakter obiektów powszechnie stosowane są klasyfikacje geotechniczne (Bieniawski, 1989). Standardowe klasyfikacje – *Rock Mass Rating* (RMR) Bieniawskiego i *Rock Mass Quality* (Q) Bartona – oparte są na parametrach określanych w sztolniach pilotowych tuneli. Istniała więc potrzeba utworzenia klasyfikacji geotechnicznej umożliwiającej ocenę geotechniczną masywu bez potrzeby wykonywania sztolni pilotowych, tym bardziej że współczesne techniki górnicze zakładają drążenie tunelu całą średnicą i natychmiastową obudowę. Dla masywów fliszowych klasyfikację taką utworzono, opierając się na parametrach geofizycznych. Podstawą jej stworzenia był fakt, że parametry geotechniczne klasyfikacji RMR i Q można podzielić na dwie grupy – pierwsza z nich opisuje wytrzymałość i rozdrobnienie materiału skalnego, a druga tarcie między blokami budującymi masyw. Każdą z tych dwóch grup można opisać jednym parametrem geofizycznym: pierwszą prędkością fal sejsmicznych, a drugą opornością elektryczną ośrodka. Klasyfikację utworzono na podstawie korelacji klasy RMR ze wskaźnikiem KFG (Klasyfikacja Geofizyczna Fliszu), będącym kombinacją parametrów geofizycznych  $V_p$  i  $\rho$ . Korelację przeprowadzono, opierając się na pomiarach geofizycznych i geotechnicznych wykonanych na 22 stanowiskach pomiarowych w sztolniach badawczych zlokalizowanych na terenie całych Karpat fliszowych i reprezentujących pełny zakres zróżnicowania fliszu, tak pod względem litologicznym, jak i tektonicznym. Zestawienie danych pomiarowych wykorzystanych do utworzenia KFG przedstawiono w tabeli 1. Klasa geotechniczna określa warunki drążenia i utrzymania tunelu, umożliwia również ocenę odkształcalności ośrodka w skali oddziaływania obiektu, zarówno ze względu na czas, jak i przestrzeń. Wiarygodność KFG została potwierdzona w czasie drążenia sztolni hydrotechnicznych zapory Świnna Poręba oraz tunelu w Lalikach. Klasyfikację Geofizyczną Fliszu przedstawiono na IX Kongresie ISRM w Paryżu, (Bestyński, Thiel, 1999), a rezultaty badań na trasach tuneli w Zaborni i Lalikach – na konferencji NARMS-TAC w Toronto (Bestyński, Thiel, 2002).

### OCENA WARUNKÓW GEOTECHNICZNYCH BUDOWY TUNELU W OSADACH AKUMULACJI GLACJALNEJ

W Sopocie projektowany jest tunel łączący ciąg komunikacyjny trójmiasta Gdańsk–Sopot–Gdynia z jego obwodnicą. Tunel o długości 1350 m będzie przecinał pasmo wzgórz morenowych zbudowanych z piaszczysto-gliniastych osadów akumulacji glacialnej. Na jego trasie wykonano kompleksowe badania geofizyczne metodami sejsmiczną i geoelektryczną. Na podstawie badań geoelektrycznych metodą VES wydzielono w ośrodku kompleksy opornościowe, a dzięki badaniom sejsmicznym refrakcyjnym – warstwy o zróżnicowanych prędkościach fal sejsmicznych  $V_p$ . Opierając się na danych z wierceń i sondowań geotechnicznych wykonanych na trasie tunelu, wydzielonym warstwom przyporządkowano litologię oraz stopień zagęszczenia (grunty sypkie) i stopień plastyczności (grunty spoiste). Na podstawie kompleksowej interpretacji całości badań geologicznych, geotechnicznych i geofizycznych ośrodek podzielono na warstwy geotechniczne, przydzielając każdej z nich litologię, stopień zagęszczenia lub plastyczności oraz przedziały oporności elektrycznej i prędkości fal sejsmicznych. Określono w ten sposób warunki geotechniczne drążenia tunelu (tab. 2).

Bardziej szczegółowy opis badań i uzyskanych rezultatów przedstawiono na XI Kongresie ISRM w Lizbonie (Bestyński, Thiel, 2007).

### OCENA STATECZNOŚCI ZBOCZY OSUWISKOWYCH

Ilościowa ocena stateczności zbocza to prognoza obliczeniowa, w której konieczne jest określenie geometrii powierzchni poślizgu i wytrzymałości materiału ze strefy poślizgu. Geometrię powierzchni poślizgu można określić metodą sejsmicznego profilowania refrakcyjnego. Podstawą jej wykorzystania jest w tym przypadku fakt, że materiał skalny, który podlegał zsuwowi, charakteryzuje się niższą od nienaruszonego podłoża prędkością fal sejsmicznych, a więc przebieg granicy refrakcyjnej odwzorowuje powierzchnię poślizgu. Metodę sejsmiki refrakcyjnej standardowo stosuje się do odwzorowania przebiegu powierzchni poślizgu osuwisk zlokalizowanych na obszarze Karpat fliszowych. Uproszczoną, ale również ilościową prognozą stateczności zboczy osuwiskowych jest metoda SMR (*Slope Mass Rating*), oparta na klasyfikacji geotechnicznej ośrodka. Jej podstawą jest

Tabela 1

**Zestawienie rezultatów badań geotechnicznych i geofizycznych na terenie Karpat fliszowych**  
Results of the geotechnical and geophysical measurements of the Carpathian flysh area

Rejon	Geologia		Odształcalność [MPa]										Klasa geotechniczna KFG		
			Metody dynamiczne		Metody statyczne				Według odształcalności podłoża obiektu		Według KFG		Parametr geofizyczny		Liczba klas. KFG
	Litologia	Tektonika	Akus.	Sejm.	Es [2 m <sup>2</sup> ]	D [2 m <sup>2</sup> ]	Es [0,5 m <sup>2</sup> ]	D [0,5 m <sup>2</sup> ]	Es	D	Es	D	Vp [m/s]	ρ [Ωm]	
Besko M1	p-ce (95%)	nierzaburzona	–	24 000	11 900	11 600	–	7300			10 930	1080	3800	350	70,5
Besko M2	p-ce (70%)	średnio zaburzona	–	14 500	4220	4010	3310	2240	3950	3900	2040	1400	2800	110	34,2
Besko M3	p-ce (5%)	średnio zaburzona	–	12 000	2980	1710	2750	1480	–	–	1260	831	3000	30	25,0
Dobczyce M1	p-ce (99%)	nierzaburzona	–	17 000	5200	4800	3200	3200	5200	2500	5780	5120	3200	300	56,9
Dobczyce M2	zlep. (98%)	nierzaburzona	–	15 200	4050	3700	3960	3680	–	–	3800	3120	3000	250	48,2
Klimkówka M1	p-ce (45%)	średnio zaburzona	–	14 900	1540	1100	1100	810	–	–	2000	1400	3000	100	34,7
Klimkówka M2	p-ce (95%)	średnio zaburzona	–	22 000	7400	5900	3100	2750	–	–	5860	5150	3800	300	57,8
Klimkówka M4	p-ce (60%)	średnio zaburzona	–	16 000	3100	2750	–	–	–	–	2070	1500	3100	100	35,3
Krempna KM	p-ce (40%)	średnio zaburzona	–	10 700	2460	1240	–	–	–	–	1680	1170	2600	80	31,0
Porąbka-Żar M1	p-ce (50%)	średnio zaburzona	–	18 400	–	–	600	370	–	–	1940	1400	3100	90	34,2
Porąbka-Żar M2	p-ce (45%)	średnio zaburzona	–	19 000	–	–	2300	1870	–	–	2100	1530	3200	100	35,7
Porąbka-Żar M4	p-ce (45%)	słabo zaburzona	–	18 400	–	–	3200	2370	–	–	1900	1360	3100	85	33,6
Porąbka-Żar M5	p-ce (90%)	średnio zaburzona	–	10 000	2750	2440	–	–	2800	2100	1680	1150	2100	150	30,7
Porąbka-Żar M6	p-ce (15%)	silnie zaburzona	–	16 700	1600	1365	–	–	1925	1400	1480	1000	3000	50	28,3
Świnna Poręba M1	p-ce (40%)	brekcja tektoniczna	–	5800	760	340	365	318	–	–	1030	660	1900	90	20,9
Świnna Poręba M2	p-ce (70%)	brekcja tektoniczna	–	8700	1310	690	400	240	–	–	1530	1020	2300	110	28,6
Świnna Poręba M3	p-ce (85%)	brekcja tektoniczna	–	6700	660	240	–	–	–	–	1090	700	2000	120	22,0
Świnna Poręba M4	p-ce (80%)	słabo zaburzona	–	12 600	2020	1400	–	–	–	–	2040	1480	3100	150	35,1
Świnna Poręba M5	p-ce (90%)	średnio zaburzona	–	6250	820	670	500	400	–	–	1600	1120	1800	180	30,2
Świnna Poręba M6	p-ce (90%)	średnio zaburzona	–	6250	650	460	635	327	–	–	1600	1120	1800	185	30,2
Świnna Poręba S1	p-ce (60%)	słabo zaburzona	32 230	19 800	3300	2400	3300	2940	–	–	2590	1960	3200	120	40,0
Świnna Poręba S2	p-ce (60%)	brekcja tektoniczna	9310	5455	380	215	450	360	–	–	990	625	1900	90	20,0

Es – moduł sprężystości; D – moduł odkształcenia; p-ce – piaskowce; zlep. – zlepienie  
Es – elasticity modulus; D – deformation modulus; p-ce – sandstones; zlep. – conglomerates

Tabela 2

**Parametry geotechniczne i geofizyczne wydzielonych warstw geotechnicznych na trasie tunelu łączącego ciąg komunikacyjny trójmiasta z jego obwodnicą**

Comparison of geotechnical and geophysical parameters of geotechnical layers on the route of the tunnel connecting Gdynia–Gdańsk–Sopot metropolitan area with the ring road

Warstwa geotechniczna	Litologia	Stopień zagęszczenia $I_D$	Stopień plastyczności $I_L$	Oporność elektryczna $\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	Prędkość fal podłużnych $V_p$ [m/s]
I	piasek drobny, humus (Q)	0,38	–	b. zmienna	200–300
II	piasek drobny i pylasty (Q)	0,54	–	b. zmienna	450–700
IIIa	piasek drobny i pylasty (Q)	0,81	–	100–240	900–1800
IIIb	piasek różnoziarnisty (Q)	0,84	–	100–240	900–1800
IV	glina piaszczysta (Q)	–	0,4	50–70	600–700
V	glina piaszczysta (Q)	–	0,2	50–120	900–1800
VI	ił, pył, piasek pylasty (neogen)	–	0,0	40–70	900–1800

założenie, że stateczność zbocza zależy od wytrzymałości materiału budującego zbocze, od wzajemnej relacji kątów upadu i rozciągłości zbocza oraz potencjalnej powierzchni poślizgu. Wskaźnik SMR określa się na podstawie klasy geotechnicznej RMR lub KFG masywu, poprzez wprowadzenie współczynników korygujących zależnych od wzajemnej relacji wspomnianych kątów. Metodę SMR wykorzystano do oceny stateczności zbocza w rejonie wież wlotowych zapory Świnna Poręba. Osuwisko znajdujące się powyżej wież wlotowych zagrażało ich konstrukcji, a prognoza stateczności zbocza wykonana metodą SMR wykazała prawdopodobieństwo zsuwu wynoszące 0,9. Potwierdziła się ona w czasie robót ziemnych. Osuwisko uaktywniło się, co spowodowało konieczność jego stabilizacji. Wykonano ją metodą kotwienia koluwiów do litego skalnego podłoża i torkretowania. Bardziej szczegółowy opis osuwiska i wykonanych badań przedstawiono na VII Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu Geofizyka w Geologii, Górnictwie i Ochronie Środowiska w Krakowie (Bestyński, 2009).

OCENA STANU TECHNICZNEGO  
I SKUTECZNOŚCI PRAC REMONTOWYCH  
ZAPORY BETONOWEJ

Badania wykonane metodą tomografii sejsmicznej fal bezpośrednich obejmowały betonowy korpus zapory czołowej w Wapienicy. Zapora, zbudowana w latach 1928–1932 i składająca się z 19 bloków, wykazywała przecieki. Zdecydowano więc, że należy ją uszczelnić i wzmocnić metodą iniekcji cementowych z otworów wierconych w koronie zapory, przewiercających jej korpus i zagłębiających się w skalne podłoże. Przed rozpoczęciem cementacji w każdym

z bloków wykonano pomiar między otworami zlokalizowanymi przy jego bocznych ścianach. Uzyskane na tej podstawie mapy rozkładu prędkości fal sejsmicznych wskazują, w których rejonach i w jakim stopniu beton budujący każdy z bloków jest osłabiony. Po zakończeniu cementacji pomiary powtórzono w identycznej lokalizacji i z zastosowaniem tej samej metodyki. Porównanie map prędkości uzyskanych przed cementacją i po niej wskazuje z kolei, w którym rejonie danego bloku i w jakim stopniu beton został wzmocniony i uszczelniony. Pomiary takie umożliwiają optymalne zaprojektowanie prac cementacyjnych, a po ich zakończeniu ocenę skuteczności wzmocnienia i uszczelnienia ośrodka oraz lokalizację ewentualnych otworów doszczelniających.

Metodykę i rezultaty badań na przykładzie VI bloku korpusu zapory w Wapienicy przedstawiono szczegółowo na XIV Międzynarodowej Konferencji Technicznej Kontroli Zapór w Wałbrzychu (Bestyński, 2011).

OCENA WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH  
WZDŁUŻ TRAS PROJEKTOWANYCH DRÓG  
I AUTOSTRAD

Drogi i autostrady, szczególnie przy dużym natężeniu ruchu, niekorzystnie wpływają na środowisko naturalne i stwarzają zagrożenie dla zbiorników wód podziemnych. Konieczne jest więc szczegółowe rozpoznanie warunków hydrogeologicznych wzdłuż projektowanych tras komunikacyjnych. Jednym ze sposobów takiego rozpoznania są pomiary elektrooporowe metodami VES i ERT. Umożliwiają one wydzielenie w ośrodku wysokooporowych warstw przepuszczalnych będących zbiornikami wód podziemnych i niskooporowych warstw nieprzepuszczalnych izolujących

te zbiorniki przed zanieczyszczeniem. Aby ocenić skuteczność pomiarów, wymienionymi metodami wykonano badania na 5 odcinkach doświadczalnych o długościach po ok. 1000 m, zlokalizowanych w zróżnicowanych warunkach geologicznych. Na każdym odcinku wykonano badania metodą VES (z odległościami między punktami pomiarowymi równymi 100 m) oraz badania metodą ERT, jak również przekrój hydrogeologiczny na podstawie kilku wierceń. Uzyskane rezultaty wskazują, że badania metodą VES są wystarczające tylko przy prostej budowie geologicznej i zbliżonym do

płasko-równoległego ułożeniu warstw. W przypadku skomplikowanej geologii konieczne jest przeprowadzenie badań metodą ERT. Pomiary metodą VES w takich warunkach często nie odwzorowują lokalnych nieciągłości nieprzepuszczalnej warstwy izolującej, które stanowią potencjalne źródło zanieczyszczenia zbiornika wód podziemnych. Szczegółowe rezultaty badań na wszystkich odcinkach doświadczalnych przedstawiono w Poradniku Metodycznym (Rodzoch, 2006).

## WNIOSKI

1. Opisane przykłady potwierdzają celowość wykorzystania badań geofizycznych w rozpoznaniu geologiczno-inżynierskim.
2. Badania elektrooporowe umożliwiają:
  - wydzielenie w ośrodku gruntowym warstw przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych i na tej podstawie ocenę warunków hydrogeologicznych podłoża obiektów inżynierskich,
  - określenie składu litologicznego masywów fliszowych oraz wnioskowanie na temat ich tektoniki,
3. Badania sejsmiczne umożliwiają:
  - ocenę odkształcalności podłoża obiektów inżynierskich i ocenę skuteczności zabiegów wzmacniających podłoże,
  - określenie stanu technicznego obiektów inżynierskich oraz ocenę skuteczności ich wzmacniania i uszczelniania.
4. Badania sejsmiczne i elektrooporowe umożliwiają ocenę klasy geotechnicznej masywów fliszowych, a na jej podstawie także określenie optymalnej techniki drażenia i obudowy tuneli oraz ilościową ocenę stateczności zboczy osuwiskowych.

## LITERATURA

- BESTYŃSKI Z., 2009 — Badania geofizyczne w budownictwie hydrotechnicznym. *Zesz. Nauk. AGH, Geologia*, **35**, 2/1: 393–403.
- BESTYŃSKI Z., 2011 — Metody geofizyczne w ocenie stanu technicznego i skuteczności prac remontowych obiektów hydrotechnicznych. *Bezpieczeństwo Zapor – Nowe Wyzwania*. Seria Monografie IMGW-PIB: 136–142.
- BESTYŃSKI Z., THIEL K., 1999 — Flysh geotechnical properties by the Geophysical Classification Index KFG. *Proceedings, IX International Congress on Rock Mechanics ISRM 1999*, **2**: 1339–1348.
- BESTYŃSKI Z., THIEL K., 2002 — Geotechnical investigation at the pre-design tunnel location. *North American Rock Mass Symposium & Tunneling Ass. of Canada, Toronto 2002* – paper number 352.
- BESTYŃSKI Z., THIEL K., 2007 — Geophysical investigation to evaluate geotechnical condition in glacial deposits along the route of planned communication tunnel. *Proceedings, XI International Congress on Rock Mechanics ISRM 2007*. Lizbon.
- BIENIAWSKI Z.T., 1989 — *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley & Sons, New York.
- KASINA Z., 2001 — *Tomografia sejsmiczna*. Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków.
- LOKE M.H., 1999 — *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. ABEM Ltd. [<http://www.georentals.co.uk/Lokenote.pdf>].
- RODZOCH A., 2006 — *Zasady sporządzania dokumentacji określających warunki hydrogeologiczne w związku z projektowaniem dróg krajowych i autostrad*. Poradnik Metodyczny. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- VOGELSANG D., 1995 — *Environmental geophysics. A practical guide*. Springer-Verlag, Berlin.

## SUMMARY

This paper presents geophysical methods, especially electric resistivity profiling, sounding and tomography, also seismic refraction profiling and tomography, their physical basis, advantages and limitations in geological engineering investigations. Some examples of geophysical investigations

for solving different geological engineering problems are also presented. These examples include:

- electric resistivity and seismic refraction measurements for estimation of geophysical classification index KFG and determination on that basis of geotechnical condi-

- tions on the route of communication and hydrotechnical tunnels drilled in the flysch formation;
- electric resistivity vertical sounding and seismic refraction profiling for estimation of geotechnical conditions on the route of communication tunnels in glacial deposits;
  - determination of flysch slope stability using SMR (Slope Mass Rating) index defined on the basis of geophysical classification index KFG and adjustment factors F1, F2, F3;
  - seismic tomography method for determination of technical conditions of concrete dam body and efficiency of their renovation;
  - electric resistivity vertical sounding and electric resistivity tomography measurements for determination of hydrogeological conditions of the basement along highway routes.

Geophysical investigations were very useful for solving all presented geological engineering and geotechnical problems.