

## Ocena możliwości zastosowania metody georadarowej i elektrooporowej do identyfikacji rozluźnionych stref gruntów niespoistych

Radosław Mieszkowski<sup>1</sup>, Piotr Zawrzykraj<sup>1</sup>, Emilia Wójcik<sup>1</sup>,  
Dorota Żmudzin<sup>1</sup>, Paweł Popielski<sup>2</sup>



R. Mieszkowski



P. Zawrzykraj



E. Wójcik



D. Żmudzin



P. Popielski

**Evaluation of the applicability of GPR and resistivity methods for identifying loose zones in non-cohesive soils.** *Prz. Geol.*, 65: 779–784.

*Abstract.* The results of the possibility of geophysical methods application (such as geoelectrical ones, including ground penetrating radar and electrical resistivity tomography) to identify areas of

loose sands were presented in the article. Registered anomalies obtained from geophysical survey have been verified by geological and engineering tests (drillings and dynamic probing). Measurements were carried out along the part of the lateral earth dam, consisting of man-made soils with a thickness of approximately 7 m and underlying alluvial medium grained sands. The results obtained from the geophysical survey and direct assessment of density by means of dynamic probing allowed to demonstrate the relationship between a specific type of geophysical anomalies and the density of non-cohesive man-made soils.

**Keywords:** ground penetrating radar (GPR) method, electrical resistivity tomography (ERT) method, dynamic sounding (DPL), relative density, degree of compaction

Badania geofizyczne wykonywane na potrzeby geologicznego rozpoznania ośrodka skalnego i gruntowego są stosowane z powodzeniem do rozwiązywania różnych problemów środowiskowych, geotechnicznych oraz w budownictwie (Bestyński, Trojan, 1975; Ślusarczyk, 2001; Dziewański, Pilecki, 2002; Karczewski, Ziętek, 2002; Mutke, Chodacki, 2005; Pilecki i in., 2007; Popiołek i in., 2008; Kamiński i in., 2014). Te bezinwazyjne techniki pomiarowe, chociaż dostarczają informacji o strukturze lub cechach środowiska geologicznego w sposób pośredni, stanowią uzupełnienie punktowych pomiarów wykonywanych w otworach *in situ*. Z tego względu interpretacja badań geofizycznych powinna zawsze uwzględniać dostępne informacje geologiczne, a ich wyniki należy przedstawiać na zintegrowanych przekrojach bądź mapach. Zagadnieniami zastosowania metod geofizycznych do oceny zagęszczenia nasypów drogowych zajmowali się m.in. Maślakowski i Józefiak (2014).

W niniejszym artykule przedstawiono przykład wykorzystania wybranych metod geofizycznych (metoda georadarowa i tomografii elektrooporowej) do identyfikacji stref, w których występują grunty o niskim zagęszczeniu. Przyczyną takiej niekorzystnej sytuacji z punktu widzenia stateczności podłoża budowlanego, mogą być deformacje filtracyjne. Proces rozwoju i wystąpienia tego rodzaju zjawisk, może mieć charakter gwałtowny, niekontrolowany i trudny do prognozowania. Analizowany przypadek, to przykład ośrodka narażonego szczególnie na deformacje filtracyjne z uwagi na charakter inwestycji. Piętrzenie wody w obiektach hydrotechnicznych implikuje generację wartości spadku hydraulicznego, wskazujących na możliwości wystąpienia procesów geodynamicznych.

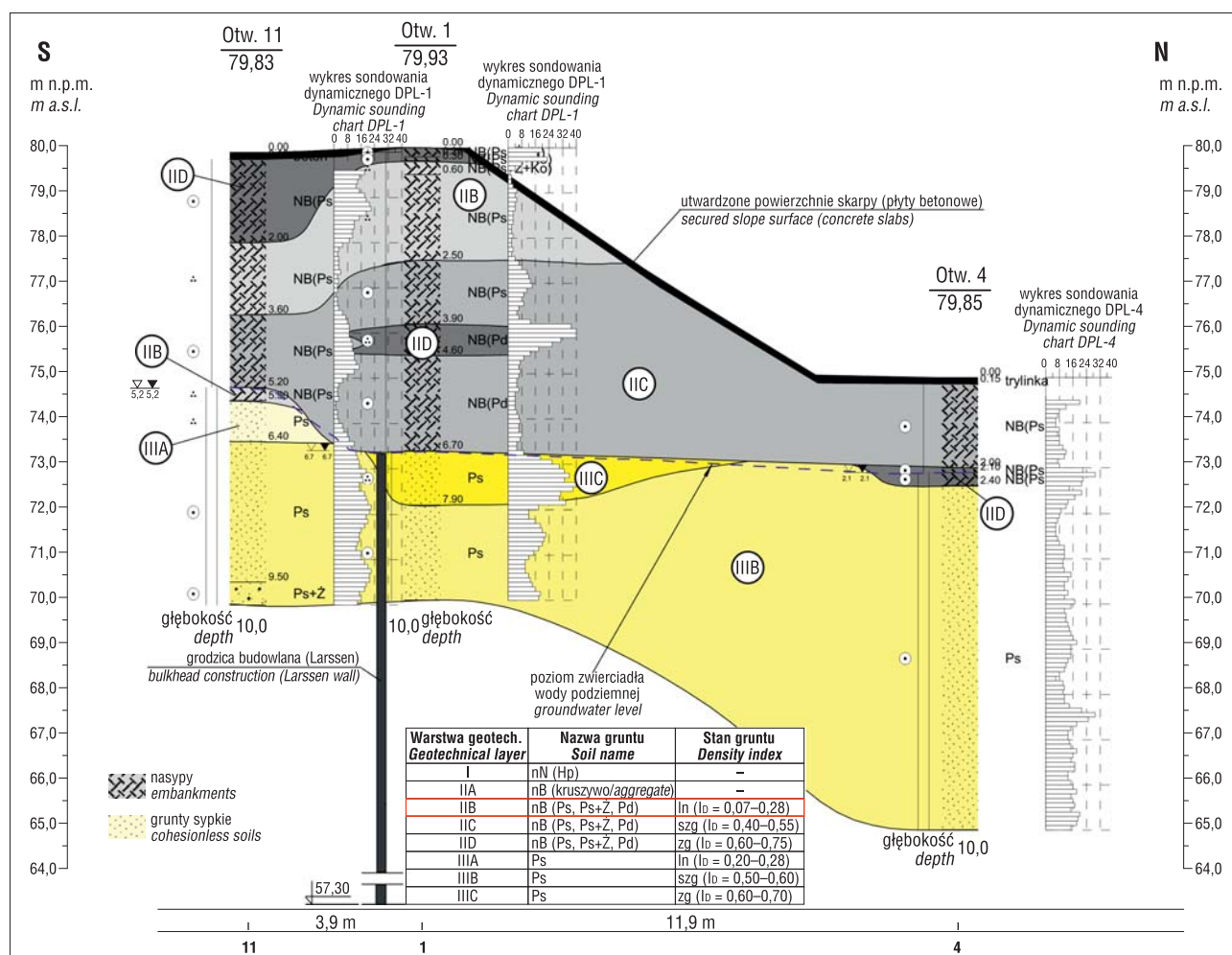
Celem artykułu jest pokazanie możliwości aplikacji metod geoelektrycznych do jakościowej i ilościowej charakterystyki stref rozluźnienia gruntów. Podjęto próbę znalezienia zależności między opornością elektryczną a stopniem zagęszczenia i wskaźnikiem zagęszczenia gruntów niespoistych.

### CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAWCZEGO

Obszar, na którym przeprowadzono badania jest zlokalizowany w dolinie rzecznej na obszarze Niżu Polskiego. Do badań wytypowano skarpe zbudowaną z nasypowych gruntów niespoistych w pobliżu obiektu hydrotechnicznego zlokalizowanego na południe od Pułtusza w województwie mazowieckim. Przestrzeń poddaną ocenie prospekcji geofizycznej i zagęszczenia stanowiły grunty nasypowe, budujące umocniony brzeg obiektu, oraz zalegające poniżej utwory aluwialne, zakumulowane u schyłku plejstocenu. Wytypowana skarpa jest umocniona płytami betonowymi oraz narzutem kamiennym. Obserwacje stanu i uszkodzeń umocnień skłonu skarpy wykazały, że korpus ziemny obwałowania jest miejscami niestabilny. Świadczą o tym przemieszczenia, obniżenia płyt betonowych oraz ubytki materiału gruntowego pod nimi. Z uwagi na przeznaczenie i sposób pracy budowli (piętrzenie wody) w obszarze badań należy spodziewać się wysokich wartości spadku hydraulicznego. Stanowi on potencjalnie przyczynę deformacji filtracyjnych, które mogą prowadzić do rozluźnienia, a nawet zniszczenia struktury gruntu. Przyjęto przy tym założenie, że pierwotne zagęszczenie gruntów nasypowych, osiągnięte w fazie

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

<sup>2</sup> Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 04-694 Warszawa; pawel.popielski@is.pw.edu.pl.



Ryc. 1. Przekrój geotechniczny przez skarpy obiektu hydrotechnicznego  
Fig. 1. Geotechnical cross-section through the embankment of hydrotechnical object

wznoszenia budowli hydrotechnicznej, spełniało wymagania projektu oraz stosownych standardów w tym zakresie.

Analizowana skarpy jest zbudowana z gruntów nasypowych, głównie piasków średnich oraz drobnych. W podłożu nasypów zalegają rodzime, piaszczyste grunty aluwialne. Schemat budowy geologicznej przedstawiono na rycinie 1.

## METODYKA BADAŃ

### Metody geofizyczne

Badania geofizyczne z użyciem systemów georadarowych opierają się na zjawisku odbicia fal elektromagnetycznych o wysokich częstotliwościach, emitowanych za pomocą specjalnych anten nadawczych w głąb podłoża gruntowego. Tłumienie energii, zmiana fazy i częstotliwości oraz czas powrotu odbitej fali radarowej zależą od właściwości fizycznych ośrodka, z których główną rolę odgrywają: oporność elektryczna (tłumienie energii) i stała dielektryczna (powstawanie fal odbitych). Istotny wpływ na możliwości prospekcji radarowej ma oporność elektryczna badanego ośrodka. Im oporność elektryczna jest niższa, tym większe tłumienie fali oraz spadek zasięgu prospekcji radarowej i odwrotnie, im wyższa oporność elektryczna, tym głębokość prospekcji radarowej wzrasta. W praktyce przyjmuje się, że dobre warunki do prospekcji

radarowej występują dla ośrodka o oporności powyżej 100  $\Omega$ m. Zagadnienie badań georadarowych jest szeroko opisane w pracach: Jola (2009) oraz Karczewskiego (2007). Badania georadarowe wykonano metodą profilowania refleksyjnego przy użyciu systemu georadarowego MALA GX HDR z anteną ekranowaną o częstotliwości 450 MHz.

Założenia metody elektrooporowej zostały sformułowane na początku XX w. przez braci Conrada i Marcela Schlumbergerów. Szczegółowy opis teorii metody można znaleźć np. w pracy Kellera i Frischknechta (1966) bądź Samoueliana i in. (2005). Na terenie objętym pomiarami zastosowano zaawansowaną metodę elektrooporową – metodę tomografii elektrooporowej (ERT). Metoda ta została opracowana pod koniec XX w. i jest szeroko opisana (np. Zhdanov, Keller, 1994; Loke, 1996, 2013a, b; Mościcki, Antoniuk, 1998; oraz Samouelian i in., 2005). W metodzie ERT rozkład oporności elektrycznej ośrodka modeluje się blokami w układzie 2D. Modelowanie takie umożliwia określenie różnicowania oporności ośrodka w kierunku pionowym i poziomym na powierzchni przekroju wzdłuż linii układu pomiarowego. Pomiary metodą ERT wykonano wzdłuż jednego profilu, układem pomiarowym typu gradient (zgodnie z Dahlin, Zhou, 2006) z rozstawem elektrod 2 m. Pomiary wykonano aparaturą Terrameter LS, szwedzkiej firmy ABEM. Charakterystykę pomiarów metodą ERT przedstawiono w tabeli 1.

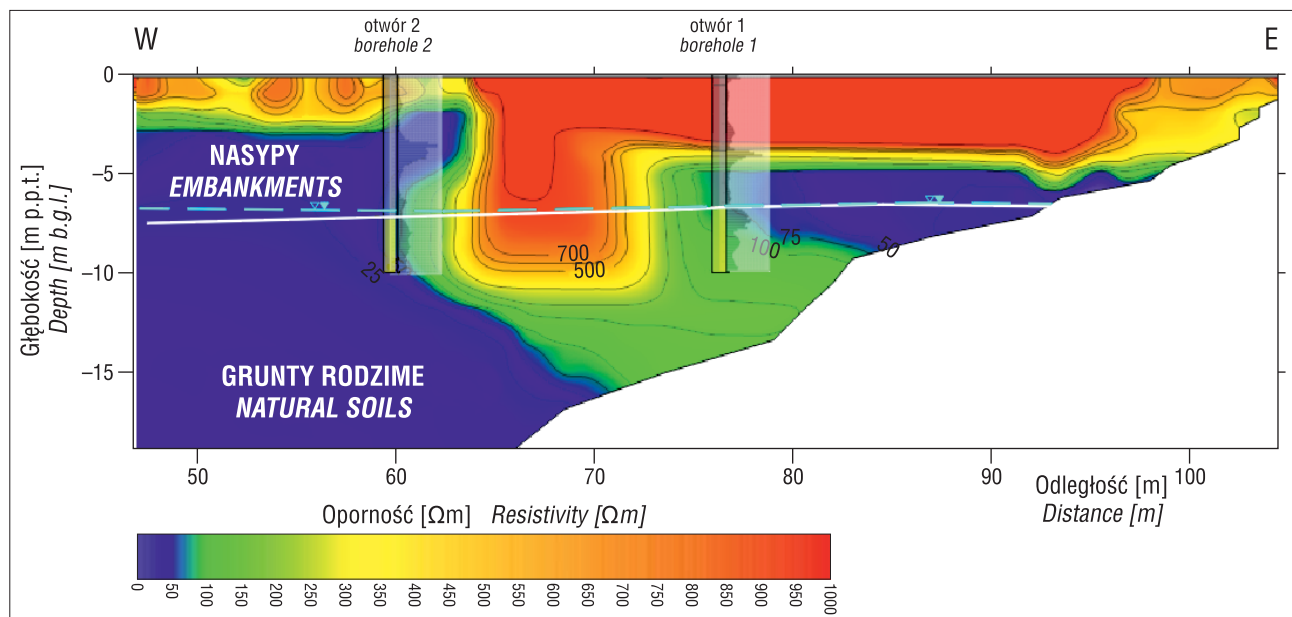
### Badania geologiczno-inżynierskie

W ramach bezpośredniej oceny parametrów geologiczno-inżynierskich wykonano wiercenia badawcze oraz sondowania dynamiczne DPL do głębokości 10 m. Na podstawie wierzeń ustalono zmienność litologiczną, pobrano próbki do analiz granulometrycznych oraz pomierzono położenie lustra wody podziemnej. Metodyka sondowań DPL była

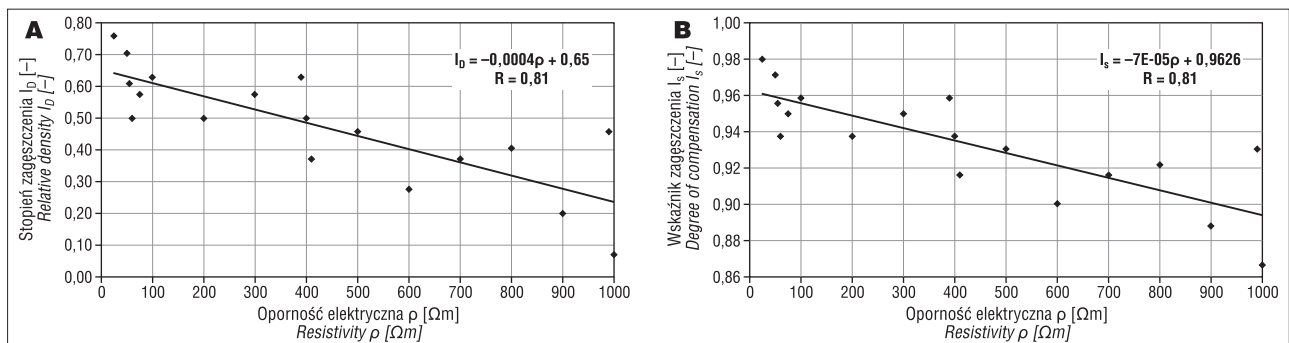
zgodna z normą PN-B-04452:2002, pozwalając na charakterystykę zmienności oporu pogrążania sondy, a następnie interpretację parametrów zagęszczenia ( $I_D/I_S$ ) (Bażyński i in., 1999). Rozstaw punktów badawczych, wynoszący od 10 do 30 m, pozwolił na racjonalne ekonomicznie, klarowne i dostatecznie dokładne ustalenie przestrzennej zmienności zagęszczenia struktury w warunkach *in situ*. Lokalizacja punktów pomiarowych uwzględniała częściowo widoczne

**Tab. 1.** Dane techniczne parametrów pomiarów metodą ERT  
**Table 1.** Technical data of electrical resistivity tomography survey

Nr profilu pomiarowego No. of profile	Układ pomiarowy Applied array	Odległość między elektrodami Distance between electrodes [m]	Liczba elektrod Number of electrodes	Długość profilu Profile length [m]	Głębokość prospekcji [m p.p.t.] Depth of investigation [m b.g.l.]	Prąd maksymalny Max. current [mA]	Prąd minimalny Min. current [mA]	Uwagi Comments
1	gradient	2	57	112	19	2000	5	zastosowano grupowanie elektrod grouping electrodes methods was applied



**Ryc. 2.** Rozkład oporności elektrycznych wzdłuż wyznaczonego profilu ERT (lokalizacja na ryc. 5)  
**Fig. 2.** Resistivity image obtained in the ERT survey (for location see Fig. 5)



**Ryc. 3. A** – zależność stopnia zagęszczenia nasypów piaszczystych od oporności elektrycznej; **B** – zależność wskaźnika zagęszczenia nasypów piaszczystych od oporności elektrycznej

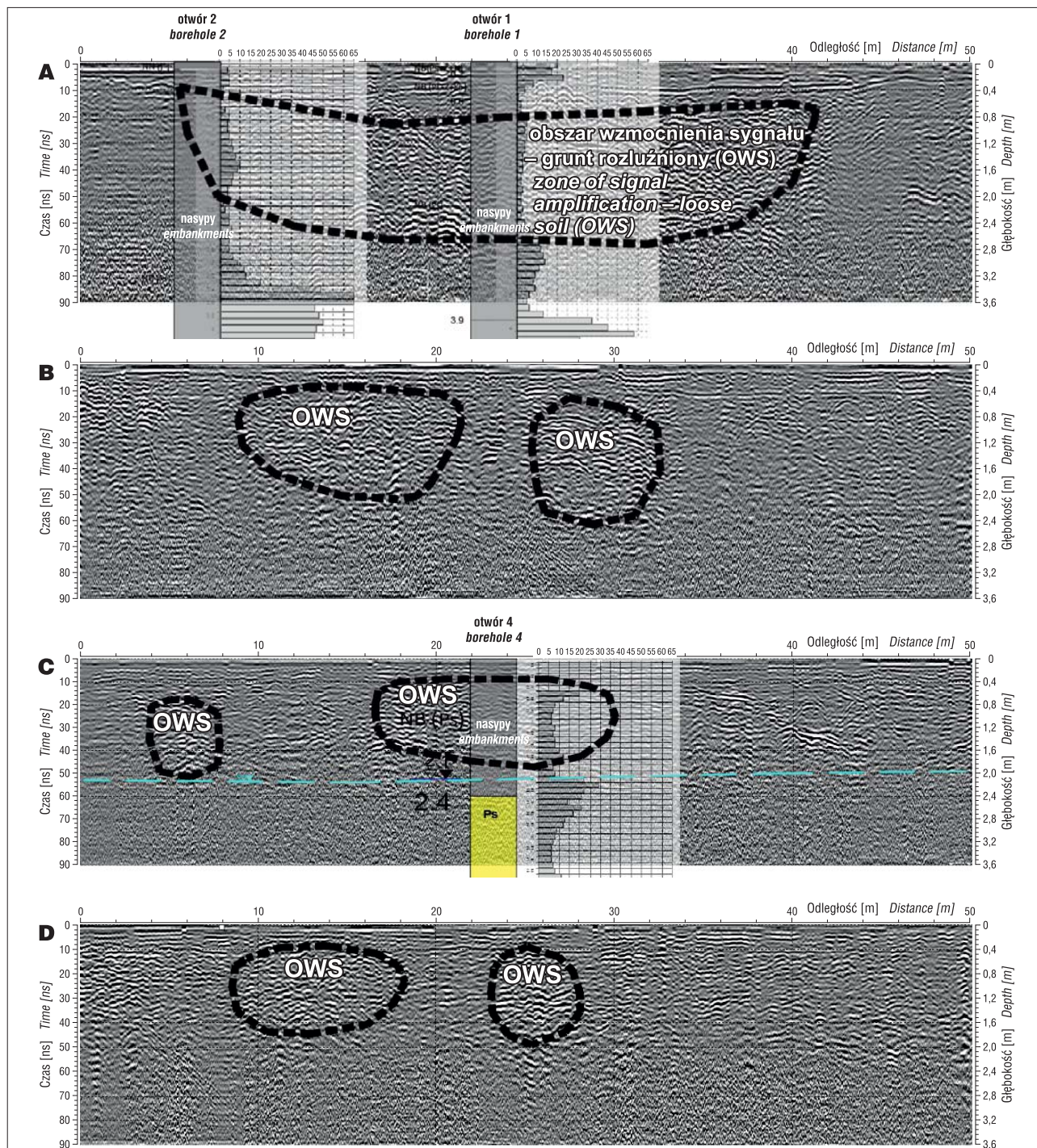
**Fig. 3. A** – the relationship between relative density and resistivity for the sand embankment; **B** – the relationship between degree of compaction and resistivity for the sand embankment

uszkodzenia nawierzchni betonowej. Wykonywanie wierceń badawczych odbywało się w znaczącej mierze w sposób ręczny, z wykorzystaniem rur osłonowych, z uwagi na duże nachylenie (ok. 20–30°) i tym samym ograniczoną dostępność powierzchni badawczej.

### WYNIKI BADAŃ

Po wyeliminowaniu błędnych wartości oporności uzyskanych metodą ERT oraz wzmocnieniu kontrastu otrzy-

many wartości, przeprowadzono interpretację wyników badań głównie pod kątem lokalizacji na profilach stref o wysokiej oporności elektrycznej (powyżej kilkuset  $\Omega\text{m}$ ). Następnie strefy te skorelowano z profilami wierceń i sondowaniami dynamicznymi DPL. Wykonane sondowania wskazują, że nasypy obwałowania są bardzo niejednorodne. Ich stopień zagęszczenia waha się w przedziale  $I_D = 0,07 \div 0,75$  (ryc. 1). Najniższym zagęszczeniem charakteryzuje się warstwa IIB ( $I_D = 0,07 \div 0,28$ ). Warstwa ta zalega w strefie skłonu skarpy obwałowania oraz występu-



Ryc. 4. Echogramy georadarowe wykonane wzdłuż skarpy obiektu hydrotechnicznego (lokalizacja na ryc. 5). A, C – echogram obrazujący strefę wzmocnienia sygnału z profilami wierceń i wykresami sondowań DPL; B, D – echogram ze strefą wzmocnienia sygnału

Fig. 4. Echograms GPR made along the slop of embankment of hydrotechnical object (for location see Fig. 5). A, C – echogram imaging the zone of gain signal with profiles of drilling and sounding graphs DPL; B, D – echogram with zone of gain signal

je w jej korpusie i bezpośrednio wpływa na obniżenie stateczności. Efektem takiego stanu są liczne spękania oraz zapadanie się płyt żelbetowych stabilizujących powierzchnię skarpy. Prawdopodobnie w korpusie obwałowania mają miejsce deformacje filtracyjne. Strefy rozluźnienia gruntu przedstawiono na rycinie 2.

Dodatkowo zestawienie wyników sondowań DPL z rozkładem oporności elektrycznej umożliwiło opracowanie ilościowej zależności między stopniem zagęszczenia ( $I_D$ ) i wskaźnikiem zagęszczenia ( $I_S$ ) a opornością elektryczną (ryc. 3A i B), zgodnie z którą wraz ze wzrostem parametrów zagęszczenia maleje oporność elektryczna. Rozrzut punktów pomiarowych wynika ze znacznej niejednorodności strukturalnej gruntów nasypowych (ryc. 1) oraz zmiennej wilgotności. Oporność elektryczna zagęszczonych gruntów sypkich w strefie aeracji wynosi poniżej 100  $\Omega m$ .

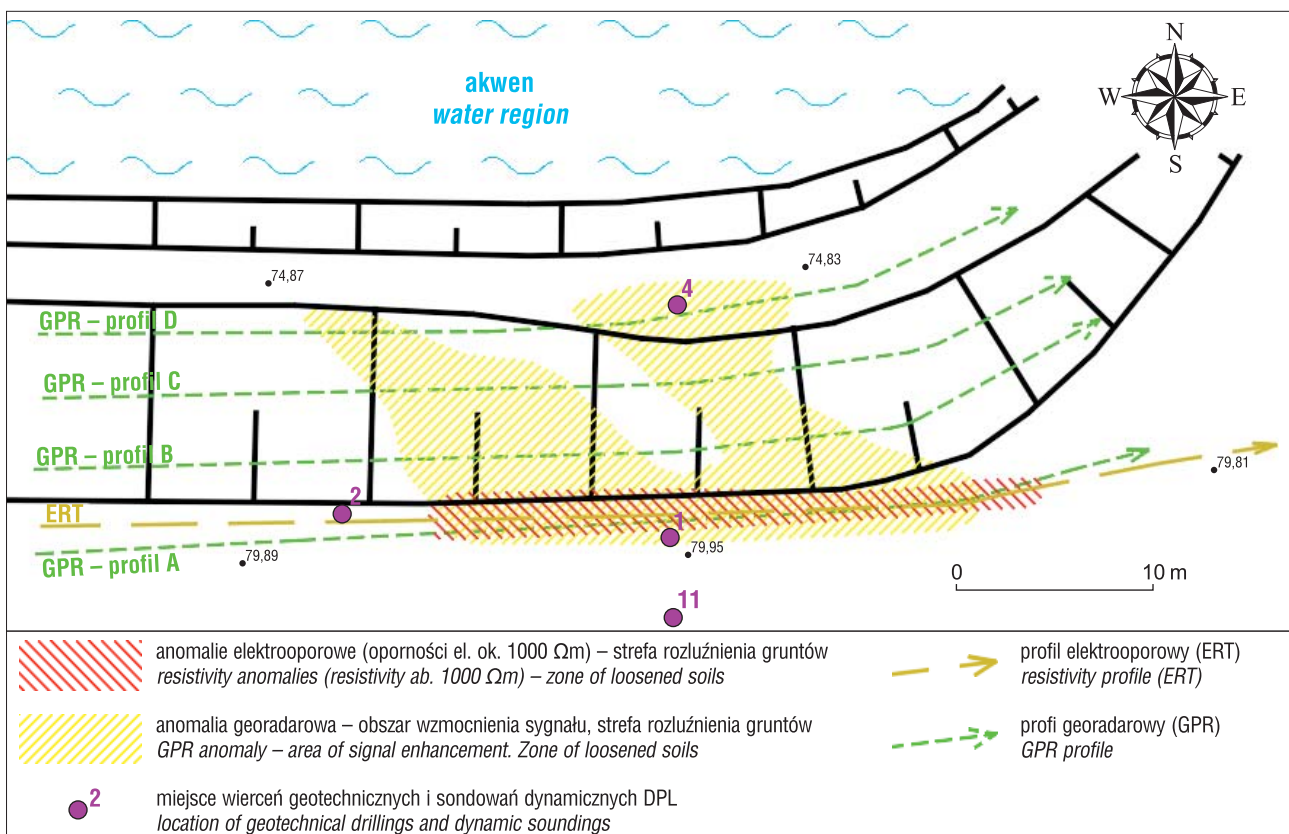
Wyniki badań georadarowych po wzmocnieniu sygnału fali elektromagnetycznej oraz usunięciu zakłóceń przedstawiono na ryc. 4A–D. Interpretacja wyników badań miała charakter jakościowy, głównie pod kątem lokalizacji na echogramach stref wzmocnienia sygnału. Strefy te, po skorelowaniu z profilami wierceń i sondowaniami dynamicznymi DPL zinterpretowano, jako miejsca rozluźnienia gruntu.

Powierzchniowe rozprzestrzenienie anomalii geofizycznych elektrooporowych i georadarowych przedstawiono na rycinie 5. Zamieszczono na niej również wybrane punkty i profile badawcze (geologiczno-geofizyczne). Okonturowane anomalie odnoszą się do stref rozluźnienia gruntów nasypowych budujących skarpe obwałowania, czyli wskazują na fragment skarpy zagrożony niestatecznością.

## WNIOSKI

Uzyskanie kompletnej informacji geologicznej było możliwe dzięki zintegrowaniu klasycznych metod badań z zakresu geologii inżynierskiej (wiercenia, sondowania dynamiczne) z bezinwazyjnym obrazowaniem wglębnym (metoda georadarowa i metoda tomografii elektrooporowej). Niskie wartości zagęszczenia gruntów są spowodowane rozwojem procesów deformacji filtracyjnych wywołanych przepływem wody, ponieważ pierwotne zagęszczenia w czasie formowania budowli ziemnej odpowiadało założeniom projektowym. Niskie wartości zagęszczenia gruntu są spowodowane później występującymi procesami deformacji jego struktury wywołanymi wymuszonym przepływem wody. Zasięg występowania gruntów o słabym zagęszczeniu może być utożsamiany z zasięgiem procesów określanych jako deformacje filtracyjne i jest traktowany jako strefy rozluźnienia wywołanego tymi procesami. Komplementarność programu badawczego umożliwiła obiektywną ocenę zasięgu procesów geodynamicznych.

Wartość oporności gruntów sypkich w strefie aeracji wynosi poniżej 100  $\Omega m$  dla gruntów zagęszczonych ( $I_D \geq 0,66$ ,  $I_S \geq 0,96$ ). Porównanie parametrów zagęszczenia i oporności elektrycznej, wyrażone w postaci zależności funkcyjnej o zadowalającym współczynniku korelacji, jest obarczone stopniem niepewności (współczynnik korelacji wynosi  $R = 0,81$ ) z uwagi na ograniczoną liczebność zbioru danych początkowych i inne cechy środowiska geologicznego, wpływające na parametry geoelektryczne. Natomiast w badaniach georadarowych obszar rozluźnienia gruntów



Ryc. 5. Lokalizacja strefy rozluźnionych gruntów w obrębie analizowanego fragmentu skarpy obwałowania obiektu hydrotechnicznego  
Fig. 5. The locality of the loose zones in non-cohesive soils within the investigated part of a slope of a hydrotechnical object

charakteryzował się wyraźną strefą wzmocnienia sygnału fali na echogramie.

Przyjęta metodyka badawcza umożliwiła precyzyjną identyfikację zasięgu ośrodków o odmiennych właściwościach, szczególnie stref rozluźnienia gruntów. Takie kompleksowe rozpoznanie jest szczególnie istotne w trakcie monitoringu stanu technicznego obiektów o kluczowym znaczeniu gospodarczym.

Dziękujemy obu Recenzentom za uwagi i tym samym polepszenie treści naszego artykułu.

## LITERATURA

- BAŻYŃSKI J., DRĄGOWSKI A., FRANKOWSKI Z., KACZYŃSKI R., RYBICKI S., WYSOKIŃSKI L. 1999 – Zasady sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich, Państw. Inst. Geol., Min. Środowiska, Warszawa: 20–178.
- BESTYŃSKI Z., TROJAN J. 1975 – Metody geofizyczne w badaniach stateczności zboczy skalnych. Mat. Badawcze s. spec., 4. Warszawa: IMiGW.
- DAHLIN T., ZHOU B. 2006 – Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4 (2): 113–123.
- DZIEWAŃSKI J., PILECKI Z. 2002 – Ocena warunków geologiczno-inżynierskich na terenie powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Zgłobicach. *Studia, Rozprawy, Monografie* 109. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- JOL H.M. (red.) 2009 – Ground Penetrating Radar: Theory and Application, 1<sup>st</sup> ed., Elsevier.
- KAMIŃSKI M., ZIENTARA P., KRAWCZYK M. 2014 – Wykorzystanie tomografii elektrooporowej do badania osuwisk – osuwisko Działisz (południowo-zachodnie Podhale). *Prz. Geol.*, 62 (4): 198–203.
- KARCZEWSKI J. 2007 – Zarys metody georadarowej. Uczelniane Wyd. Nauk.-Dydakt. AGH, wyd. I, Kraków.
- KARCZEWSKI J., ZIĘTEK J. 2002 – Wykorzystanie metody georadarowej w geofizyce środowiska. *Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc.*, M-27 (352): 223–232.
- KELLER G.V., FRISCHKNECHT F.C. 1966 – Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- LOKE M.H. 2013a – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Gelugor: Geotomo Software.
- LOKE M.H. 2013b – Optimisation of electrode arrays used in 2D resistivity imaging surveys.
- LOKE M. H., BARKER R. D. 1996 – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prospect.*, 44: 131–152.
- MAŚLAKOWSKI M., JÓZEFIAK K. 2014 – Badania geofizyczne służące ocenie zagrożenia nasypów drogowych. *Monogr. Wydz. Inż. Łódzkiej, Teoretyczne Podstawy Budownictwa*, tom V, Warszawa: 47–56.
- MOŚCICKI W.J., ANTONIUK J. 1998 – The method of electrical resistivity tomography. The examples of investigations for engineering-geology aims. *Materials of the 5. Scientific-technical Conference: geophysics in geology, the mining and the protection of the environment [in Polish]*. Kraków, Poland: 315–325.
- MUTKE G., CHODACKI J. 2005 – Zastosowanie płytkiego profilowania elektromagnetycznego do rozwiązywania zagadnień inżynierskich i środowiskowych w przypowierzchniowych warstwach podłoża. *Pr. Nauk. Gł. Inst. Gór.*, ser. Gór. i Środ., 3: 55–64.
- PILECKI Z., ZIĘTEK J., KARCZEWSKI J., PILECKA E., KŁOSIŃSKI J. 2007 – The effectiveness of recognizing of failure surface of the Carpathian flysch landslide using wave methods, *Proc. 13<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 3–5 September 2007, Istanbul.
- PN-B-04452:2002 – Geotechnika. Badania polowe.
- POPIOŁEK E., PILECKI Z.(red.), KARCZEWSKI J., ZIĘTEK J., KŁOSIŃSKI J., BARANOWSKI A., PILECKA E., ORTYL Ł., PSZONKA J., KRAWIEC K. 2008 – Wpływ rozdzielczości metod falowych na efektywność rozpoznania granic nieciągłości osuwiska. Kraków: Agencja Wyd.-Poligraf. ART-TEKST.
- SAMOUELIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUAND A., RICHARD G. 2005 – Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83: 173–193.
- ŚLUSARCZYK R. 2001 – Możliwości zastosowania geofizyki inżynierskiej w problematyce budownictwa lądowego i wodnego. *Mat. Konf. Geofizyka w inżynierii i ochronie środowiska*, Dębe, marzec 2001. WGGIOŚ, Kraków: 109–124.
- ZHDANOV M.S., KELLER G.V. 1994 – The geoelectrical methods in geophysical exploration. Elsevier, Amsterdam.