

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 60, 2013: 117–125
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 60, 2013)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 60, 2013: 117–125
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 60, 2013)

Marek BAJDA, Mariusz LECH, Kinga KRONIK

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Wykorzystanie powierzchniowych badań elektrooporowych do oceny stanu technicznego budowli ziemnych

The use of surface electric resistivity tomography for examination of technical conditions of the earth structures

Słowa kluczowe: badanie geofizyczne, tomografia elektrooporowa, wały przeciwpowodziowe

Key words: geophysical investigation, electric resistivity tomography, levees

Wprowadzenie

Norma Eurokod 7 obejmuje powszechnie stosowane geotechniczne badania terenowe wybrane na podstawie ich znaczenia w praktyce geotechnicznej oraz istnienia procedur badawczych akceptowanych w Europie. W Eurokodzie dopuszcza się stosowanie innych, nieujętych w normie metod badawczych. W takich przypadkach nakazuje ona przeprowadzenie badań weryfikujących inną powszechnie uznaną metodą badawczą. Badania geofizyczne (np. pomiary oporności) mogą być stosowane jako uzupełniające badania polowe gruntów (PN-EN 1997-1 2008, PN-EN 1997-2

2009). Możliwości wykorzystania badań geofizycznych (tomografii elektrooporowej) w geotechnice przedstawiono na przykładzie badań przeprowadzonych w celu oceny stanu technicznego fragmentu wału przeciwpowodziowego.

W praktyce inżynierskiej ocena stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych przeprowadzana jest na podstawie punktowych badań *in situ* (wierceń oraz sondowań) uzupełnionych badaniami laboratoryjnymi. Główną zaletą badań *in situ* jest fakt, że są one przeprowadzane w rzeczywistych warunkach gruntowo-wodnych, które nie zawsze mogą być w pełni odtworzone w laboratorium. Wadą jest to, że dają informacje punktowe o stanie technicznym wału. Duże odległości między wierceniami i sondowaniami mogą prowadzić do błędnej interpretacji budowy i stanu technicznego wałów, w której wyniku mogą być pominięte strefy rozluźnienia w korpusie

obwałowania (Gołębiewski i in. 2012). Rozwiązaniem problemu mogłoby być zagęszczenie badań *in situ*, jednakże stałyby się one z ekonomicznego punktu widzenia nieopłacalne oraz wpłynęłoby to niekorzystnie na strukturę wału przeciwpowodziowego.

Nowe zadania stawiane geoinżynierii wymagają nowych technik służących do oceny warunków gruntowych *in situ* oraz do monitorowania procesów zachodzących w gruncie. Znaczącą rolę w zaspokojeniu tych potrzeb odgrywają metody geofizyczne zaadaptowane do celów geotechnicznych.

Powierzchniowe badania geofizyczne od dziesięcioleci stosowane są w praktyce inżynierskiej. Do zalet metod geofizycznych zaliczyć można ich nieniszczący i nieinwazyjny charakter, niskie koszty i szybkie uzyskanie wyników, możliwość ich stosowania w różnorodnych materiałach, w tym: w gruntach, skałach litych, materiałach odpadowych i utworach antropogenicznych. Z szerokiej gamy geofizycznych technik pomiarowych najczęściej wykorzystywane w praktyce inżynierskiej są metody georadarowe (GPR), tomografia elektrooporowa (ERT), profilowanie elektromagnetyczne (konduktometria) oraz powierzchniowe badania sejsmiczne (np. MASW). Podane metody wykorzystuje się w problematyce geotechnicznej dotyczącej przeważnie oceny stanu środowiska (tomografia elektrooporowa), określaniu granic strukturalnych budowli oraz infrastruktury inżynierskiej (metody georadarowe), a także parametrów odkształceniowych metodami sejsmicznymi (Stokoe i Santamarina 2000, Samouelian i in. 2005, Bajda i in. 2012).

Ze względu na swoje zalety omawiane badania zyskują coraz większe grono zwolenników przy przeprowadzaniu ocen stanu technicznego budowli hydrotechnicznych, stateczności skarp, odkształceń podłoża i korpusu wału czy też do geologiczno-inżynierskiego rozpoznania warunków gruntowych podłoża (Ślusarczyk 2001, Krzywiec i Bestyński 2001, Bajda i in. 2012, Gołębiewski i in. 2012).

Badania z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej, których celem jest skorelowanie pomierzonych wartości oporności z parametrami mechanicznymi gruntu, charakteryzującymi właściwości ośrodka, mogą być wykonywane w formie: badań wstępnych (przy orientacyjnym rozpoznaniu warunków gruntowych), badań uzupełniających oraz monitoringu. Powierzchniowe badania elektrooporowe mogą być bardzo przydatne do szybkiego określenia i wskazania stref osłabienia, uszkodzeń lub w przypadku korpusu i podłoża gruntowego wałów przeciwpowodziowych – stref podatnych na niebezpieczne zjawiska filtracyjne.

Omawiane badania pozwalają również na wstępne rozpoznanie budowy podłoża i wskazanie obszarów do szczegółowego rozpoznania (np. sondowaniami geotechnicznymi), do których można zaliczyć na przykład sondowania DPL, CPTU i SCPTU.

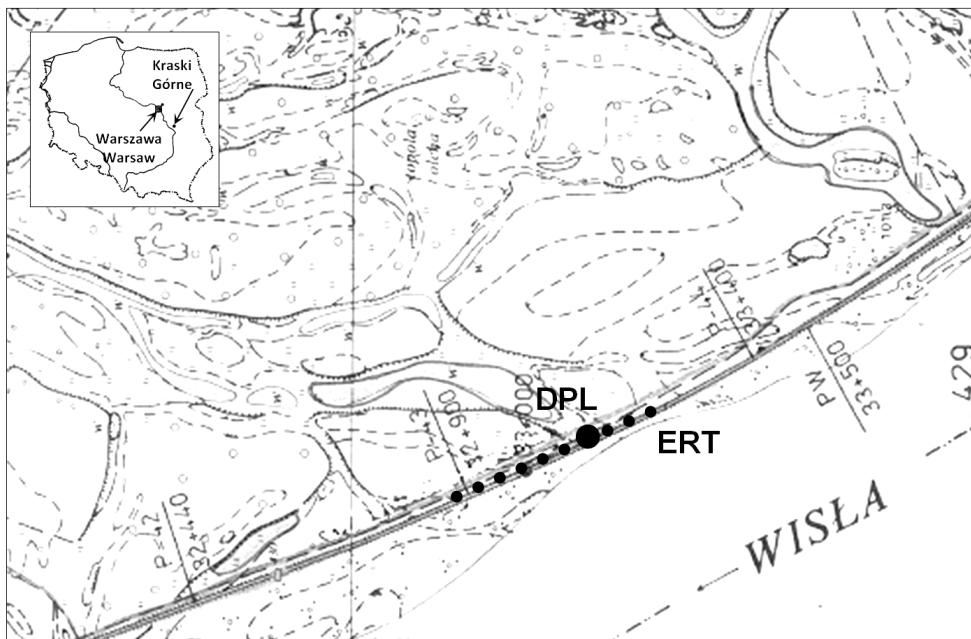
Zakres badań i charakterystyka obiektu

Celem prac badawczych było udokumentowanie możliwości zastosowania powierzchniowych pomiarów elektro-

oporowych do wstępnego rozpoznania budowy i stanu technicznego wybranego fragmentu wałów przeciwpowodziowych. Badania prowadzone były na fragmencie prawobrzeżnego wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie miejscowości Kraski Górne w województwie mazowieckim i obejmowały powierzchniowe badania metodą tomografii elektrooporowej ERT. Analizowany fragment wału wytypowany został do badań na podstawie wizji lokalnej oraz analizy materiałów archiwalnych (wierceń i sondowań wykonanych w ramach projektu przebudowy wału). W miejscu tym wielokrotnie, podczas powodzi, dochodziło do licznych przesiąków przez korpus i podłoże wału. Po zakończeniu badań geofizycznych wykonano sondowanie sondą DPL w celu potwierdzenia uzyskanych wyników. Sondowanie

wykonano zgodnie z wytycznymi zawartymi w PN-B-04452(2002). Mapa dokumentacyjna przedstawiająca zakres i lokalizację przeprowadzonych badań została zamieszczona na rysunku 1.

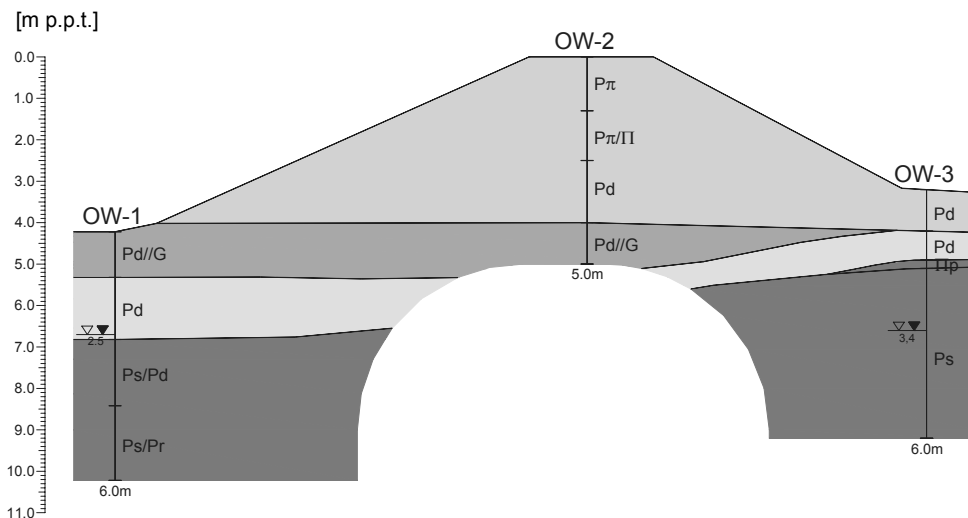
Przedmiotowy fragment obwałowania przebiega w bezpośredniej bliskości Wisły oraz przecina starorzecze. Nasyp obwałowania wznosi się na wysokość od 4 do 5 m, szerokość korony wynosi 3 m, nachylenie skarp około 1 : 2. Korpus wału w analizowanym miejscu uformowany został z piasków pylistych i drobnych, z lokalnymi wkładkami pyłów. Budowa podłoża jest zróżnicowana. Wał zbudowano na madowym tarasie zalewowym Wisły. Tworzą go aluwialne piaski lokalnie nadbudowane warstwą madowych osadów powodziowych. Podłoże w miejscu prowadzonych badań do głębokości rozpoznania (7 m) zbudowa-



RYSUNEK 1. Mapa dokumentacyjna obszaru badań
 FIGURE 1. Location map of tested profiles of the site

ne jest z piasków drobnych (z przewarstwieniami gliniastymi) oraz z piasków średnich. Swobodne zwierciadło wody nawiercono na głębokości 2,5–3,4 m p.p.t. Przekrój geologiczny obszaru badań zamieszczono na rysunku 2.

nia elektrod względem siebie zależy sposób prowadzenia pomiarów i interpretacja wyników badań. Najczęściej wykorzystywanym w praktyce jest układ Wennera, który zastosowano w badaniach. Pomiar oporności elektrycznej (ERT) wykonano



RYSUNEK 2. Schemat budowy geologicznej nasypu i podłoża w rejonie badań
 FIGURE 2. Geological cross-section of tested site

Metodyka badań

Badania geofizyczne na obwałowaniu przeciwpowodziowym przeprowadzono techniką tomografii elektrooporowej (ERT) urządzeniem włoskiej firmy PASI. Urządzenie składa się z jednostki centralnej z zainstalowanym oprogramowaniem, skrzynek połączeniowych, aktywatora, trzydziestu dwóch elektrod oraz zestawu przewodów umożliwiających połączenie całego układu pomiarowego.

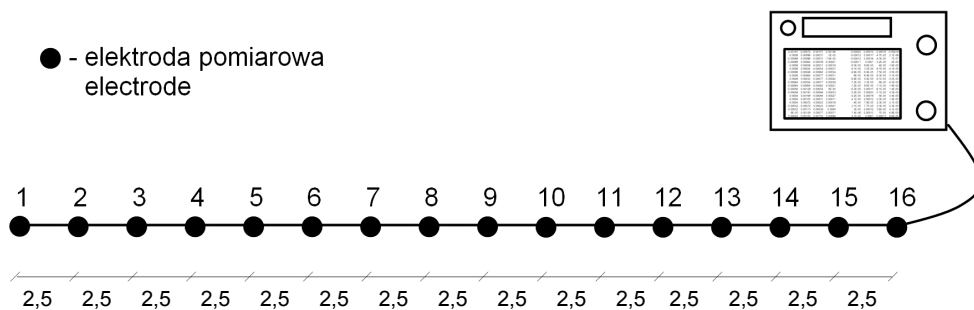
W metodzie tomografii elektrooporowej prąd elektryczny przepływa pomiędzy dwiema elektrodami prądowymi A i B, a elektrody M i N mierzą potencjał pola elektrycznego w gruncie. Od rozmieszcze-

przy użyciu 16 elektrod oddalonych od siebie o 2,5 m, przy całkowitej długości ciągu równej 37,5 m (rys. 3).

Na podstawie przeprowadzonej tomografii elektrooporowej ERT wytypowano miejsce do wykonania kontrolnego badania korpusu wału sondą dynamiczną. Do badań wykorzystano sondę lekką DPL o masie młota 10 kg. Sprzęt oraz metodyka badania były zgodne z wytycznymi zawartymi w PN-B-04452 (2002).

Wyniki badań

Wynik pomiaru techniką obrazowania elektrooporowego (ERT) przedstawiono na rysunku 4. Pierwszy prze-



RYSUNEK 3. Schemat lokalizacji elektrod pomiarowych

FIGURE 3. Electrodes spacing

krój przedstawia wynik bezpośredniego pomiaru, drugi – wartości pomnożone przez stałe geometryczne właściwe dla danej konfiguracji, natomiast trzeci z przekrojów stanowi model elektrooporowy podłoża otrzymany w wyniku inwersji i interpolacji danych.

W trakcie badań zarejestrowano duże wartości oporności elektrycznej w nasypie, co potwierdza występowanie w profilu pomiarowym głównie gruntów piaszczystych.

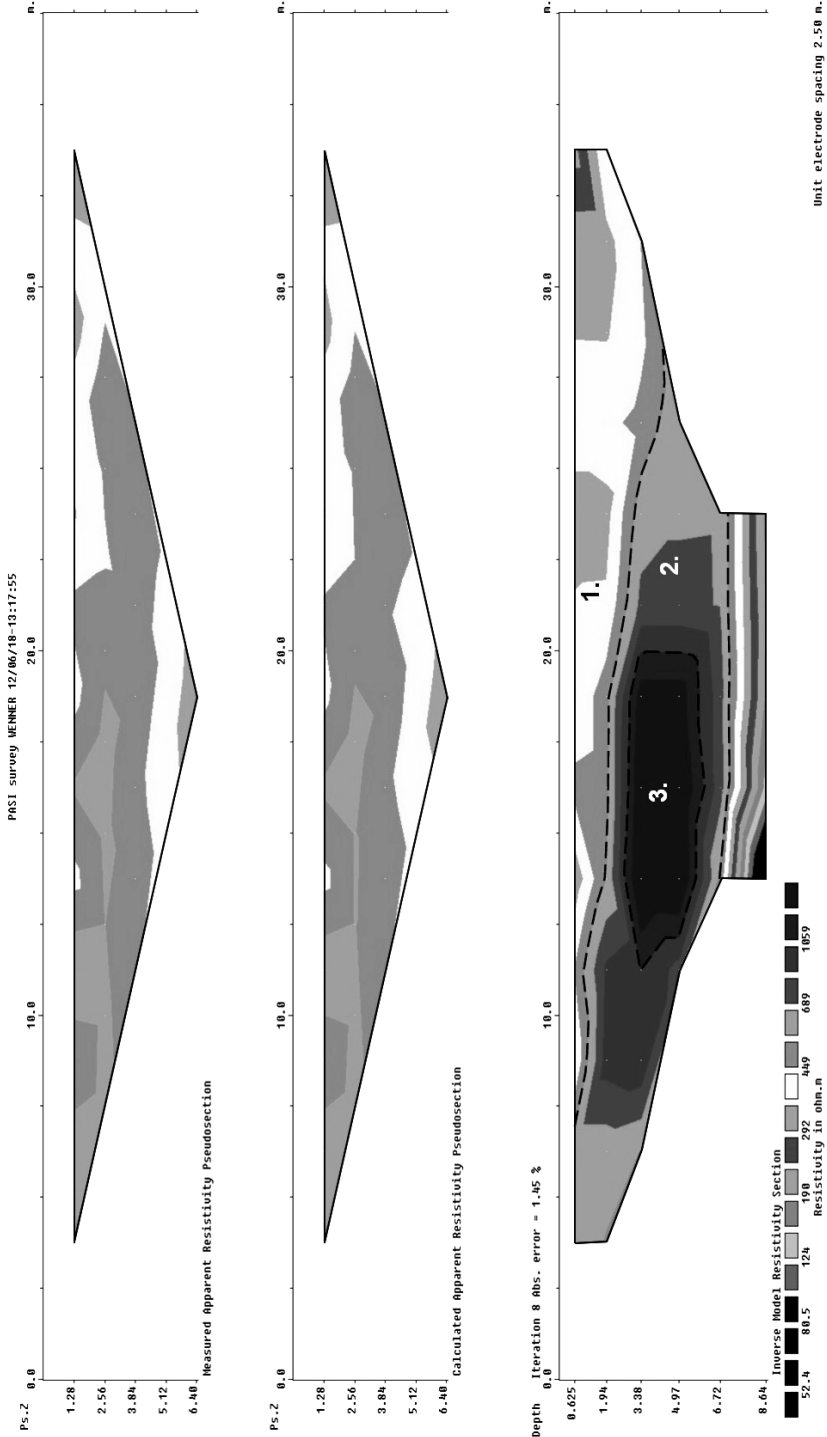
W przekroju uzyskanym z badań ERT wyróżnić można trzy strefy rozkładu oporności elektrycznej w nasypie (rys. 4). W strefie nr 1, znajdującej się w przypowierzchniowej warstwie nasypu, wartości oporności elektrycznej wynoszą od 300 do 450 Ωm . W strefie nr 2, znajdującej się poniżej strefy nr 1, zarejestrowano wartości oporności w przedziale 600–1000 Ωm . W strefie nr 3, znajdującej się w środku profilu, zaobserwowano wartości oporności rzędu 1100 Ωm . Taki rozkład oporności elektrycznej wyraźnie wskazuje na znajdującą się w tym obszarze strefę rozluźnienia. Duże wartości oporności oznaczają utrudniony przepływ prądu w podłożu, co może być spowodowane rozluźnieniem materiału w tym obszarze. Pozwala to przypusz-

czać, że to właśnie w obrębie strefy nr 3 występowały największe przesiąki przez korpus wału.

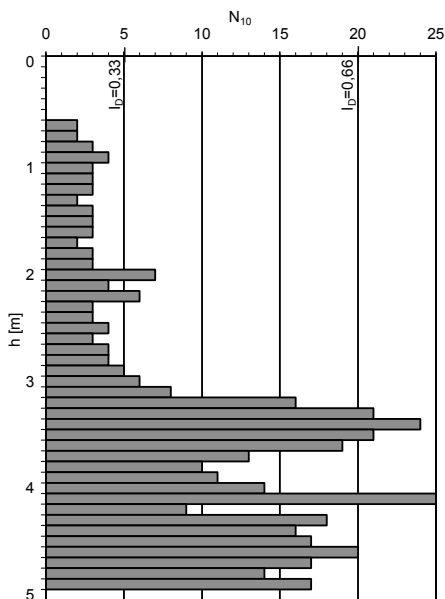
W celu weryfikacji wyników otrzymanych z badań elektrooporowych z faktycznym stanem gruntów wbudowanych w nasyp wykonano badanie kontrolne sondą DPL w rejonie wskazującym na największe rozluźnienie w korpusie wału (największa wartość oporności elektrycznej). Wyniki sondowania przedstawiono na rysunku 5.

Wykonane sondowanie potwierdziło wyniki uzyskane z tomografii elektrooporowej. W profilu pomiarowym do głębokości około 3 m zalega piasek w stanie luźnym o $I_D \cong 0,25$. Świadczy to o wyraźnym osłabieniu konstrukcji wału w analizowanym miejscu i potwierdza istnienie warunków sprzyjających przesiąkom na analizowanym odcinku wału. Poniżej głębokości 3 m średni stopień zagęszczenia gruntów budujących obwałowanie jest większy i wynosi około 0,5, co również nie jest wartością spełniającą normy przewidziane dla tego rodzaju budowli.

Badany odcinek wałów zbudowany jest z jednorodnych, suchych gruntów niespoistych, co pozwala wyeliminować wpływ wilgotności oraz rodzaju gruntu



RYSUNEK 4. Wynik pomiarów metodą tomografii elektrooporowej (ERT)
 FIGURE 4. ERT test results



RYSUNEK 5. Wynik sondowania DPL
 FIGURE 5. DPL test results

na uzyskane wyniki i odnieść je tylko do stanu gruntów budujących nasyp.

Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że w podłożu występują wyraźne strefy o różnej oporności, korelujące ze stanem badanych gruntów niespoistych. Dla piasków pylastych budujących nasyp stan luźny odpowiada wartościom oporności elektrycznej z przedziału 1000–1300 Ωm , stan średniozagęszczony, o $I_D \cong 0,5$, odpowiada wartościom oporności elektrycznej z przedziału 650–1000 Ωm , natomiast stan zagęszczony, o $I_D \cong 0,7$, odpowiada wartościom oporności elektrycznej z przedziału 300–450 Ωm .

Otrzymane wyniki wskazują na konieczność przeprowadzenia modernizacji analizowanego odcinka wału (w rejonie, w którym uzyskano największe wartości oporności).

Podsumowanie

Rozwój technik badawczych w zakresie metod geofizycznych, w tym tomografii elektrooporowej, pozwala na wykorzystanie tych metod w zagadnieniach geotechnicznych. Przedstawione w artykule wyniki badań pozwalają na wstępną ocenę stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. Wyniki badań geofizycznych, mimo uśrednień pomiarów wynikających z ich nieinwazyjnego charakteru, korelują ze stanem gruntów określonym na podstawie standardowych badań geotechnicznych – sondowania DPL.

Uzyskane z badań duże wartości oporności elektrycznej podłoża potwierdzają występowanie w profilu pomiarowym głównie gruntów niespoistych – piasków.

Jednorodna budowa wału (piaski drobne i pylaste) oraz położenie zwierciadła wody gruntowej poniżej podstawy wału umożliwia odniesienie uzyskanych wyników oporności tylko do stanu gruntów wbudowanych w nasyp.

Otrzymany rozkład oporności w korpusie wału charakteryzuje się mniejszymi wartościami oporności na powierzchni i większymi wartościami uzyskanymi w środku przedmiotowego profilu, co wyraźnie wskazuje na występowanie strefy rozluźnienia materiału gruntowego, budującego korpus wału w tym obszarze.

Zarejestrowana większa wartość oporności świadczy o utrudnionym przepływie prądu w podłożu, prawdopodobnie związanym z niedostatecznym zagęszczeniem gruntu w tym obszarze na etapie budowy lub na skutek przejścia fali wezbraniowej. Potwierdzają to zaobserwowane na analizowanym od-

cinku intensywnie przesiąki wody przez korpus wału podczas ostatnich wezbrań powodziowych.

Z przeprowadzonych powierzchniowych badań geofizycznych analizowanego odcinka wału przeciwpowodziowego wynika, że przeprowadzone badania mają charakter wskaźnikowy, a uzyskane wyniki stanowią jedynie wstęp do przeprowadzenia oceny stanu technicznego. Mogą one posłużyć do zaplanowania zakresu szczegółowych badań geotechnicznych, szczególnie w miejscach, w których stwierdzono anomalie strukturalne i strefy o zwiększonej (na tle całości) oporności materiału budującego nasyp.

Badania te, dzięki ciągłości profili pomiarowych, umożliwiają zlokalizowanie stref nieciągłości (rozluźnień), które mogą być pominięte podczas standardowej kontroli stanu wału na podstawie punktowych, rzadko zlokalizowanych wierceń i sondowań.

Niewątpliwą zaletą techniki ERT jest jej nieinwazyjność, dzięki której można uzyskać informacje na temat stanu technicznego wału, bez konieczności dogęszczania siatki otworów znacząco naruszających strukturę korpusu obwałowania.

Przeprowadzane badania metodą tomografii elektrooporowej wymagają dalszej analizy w celu wyostrenia otrzymanego obrazu budowy wału i podłoża oraz możliwości wykorzystania uzyskanych wyników do oceny stanu technicznego nasypu w praktyce inżynierskiej.

Literatura

BAJDAM., MARKOWSKA-LECHK., LECHM., SZYMAŃSKI A. 2012: Wykorzystanie badań geofizycznych do rozpoznania budowy podłoża gruntowego. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 33, 4: 308–313.

- GOŁĘBIEWSKI T., TOMECKA-SUCHOŃ S., FARBISZ J. 2012: Zastosowanie kompleksowych metod geofizycznych do nieinwazyjnego badania technicznego stanu wałów przeciwpowodziowych. Sympozjum Europejskie „Współczesne problemy ochrony przeciwpowodziowej”. Paryż - Orlean: 1–8.
- KRZYWIEC P., BESTYŃSKI Z. 2001: Sejsmika refleksyjna w płytkich badaniach geologicznych – przykłady zastosowań. Konferencja „Geofizyka w inżynierii i ochronie środowiska dla potrzeb samorządności lokalnej”. PIG, Kraków: 73–84.
- PN-EN 1997-1 2008: Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2 2009: Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badania podłoża gruntowego.
- PN-B-04452 2002: Geotechnika. Badania polowe.
- 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.
- STOKOE K.H., SANTAMARINA J.C. 2000: Seismic – wave – based testing in geotechnical engineering. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000, Melbourne.
- ŚLUSARCZYK R. 2001: Możliwości zastosowania geofizyki inżynierskiej w problematyce budownictwa lądowego i wodnego. Konferencja „Geofizyka w inżynierii i ochronie środowiska dla potrzeb samorządności lokalnej”. PIG, Kraków: 109–124.

Streszczenie

Wykorzystanie powierzchniowych badań elektrooporowych do oceny stanu technicznego budowli ziemnych. W artykule przedstawiono wyniki badań geofizycznych metodą tomografii elektrooporowej, mające na celu określenie stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. Badania terenowe przeprowadzono na wybranym odcinku obwałowań Wisły. Powierzchniowe pomiary elektrooporowe pozwoliły na wyznaczenie w korpusie nasypu stref o zróżnicowanych wartościach oporności elektrycznej,

wynikających z różnego stanu zagęszczenia materiału wbudowanego w nasyp. Uzyskane wyniki pomiarów porównano z wynikami wierceń i sondowań DPL. W podsumowaniu omówiono uzyskane wyniki oraz wykazano, że wyniki pomiarów elektrooporowych ERT umożliwiają zlokalizowanie stref nieciągłości (rozluźnień) w konstrukcji obwałowania.

Summary

The use of surface electric resistivity tomography for examination of technical conditions of the earth structures. In this study a geophysical investigation using electric resistivity tomography (ERT) was undertaken to characterize the condition of earth

levees. The field measurements were conducted on Vistula levees near Kraski Górne. The ERT method allowed mapping electric resistivity structures along levees and so relatively high and low resistivity zones in the levee body could be easily read. The results were compared to borehole drillings and DPL test. As a conclusion it can be said that the ERT method can be used to identify failure risks areas with a relatively high resolution.

Authors' address:

Marek Bajda, Mariusz Lech, Kinga Kronik
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: marek_bajda@sggw.pl