

Możliwości oceny stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych na podstawie badań geofizyki inżynierskiej

Szymon Ostrowski¹, Marcin Lasocki¹



S. Ostrowski



M. Lasocki

Potential of application of near-surface geophysics for floodbank technical condition assessment. *Prz. Geol.*, 62: 671–679.

Abstract. Catastrophic floodings caused by floodbank and dam failures draw attention to urgent need of modernization of these facilities in Poland. The task specified above requires precise and fast methods of technical condition assessment of existing facilities. Present method of assessment of the geotechnical parameters of flood embankments and its geological setting is limited to sampling and geotechnical probing in discrete intervals, which are too sparse to recognize zones of weakening or unfavourable geologic conditions that might constitute critical zones for floodbank stability. This paper presents results and conclusions of experimental survey concluded in 2014 attempting to apply near-surface geophysical methods to floodbank condition assessment. In author's opinion, three techniques applied yielded most reliable results. Moreover the methods – electric resistivity tomography; seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves can be optimised for utilisation for fast surveys on floodbanks. Authors give attention to results of above mentioned three geophysical methods and only briefly discuss the applicability of other near-surface geophysical methods for issues concerning floodbank technical condition.

Keywords: floodbank, near-surface geophysics, electric resistivity tomography, engineering seismics, seismic refraction tomography, MASW

Stan techniczny wałów powodziowych, a także urządzeń hydrotechnicznych, staje się obiektem zainteresowania władz centralnych i lokalnych oraz szerszej opinii publicznej, zwykle przy okazji kolejnych powodzi dotyczących Polskę. W ostatnich latach wystąpiło kilka poważnych sytuacji powodziowych, w trakcie których nastąpiły katastrofalne przerwania wałów powodziowych oraz zniszczenie zapory o konstrukcji ziemnej na zbiorniku retencyjnym Witka. Każde z tych katastrofalnych zdarzeń wiązało się z poważnymi stratami materialnymi, a lokalne społeczności, często jeszcze przez kolejne lata, nie mogą w pełni odtworzyć funkcjonalności infrastruktury i doprowadzić do ponownego zagospodarowania terenów zniszczonych przez powódzie. Dopiero wystąpienie sytuacji nadzwyczajnych – przerwanie wałów, czy konieczność interwencyjnego uszczelniania wałów w warunkach kryzysowych, uświadamia ludziom, w jakim stanie są chroniące ich wały przeciwpowodziowe.

W Polsce istnieje kilka tysięcy kilometrów wałów przeciwpowodziowych kategorii I i II, czyli wałów o najwyższym i wysokim znaczeniu ochronnym. Zgodnie z prawem, nadzorem nad ich stanem technicznym zajmuje się Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór (IMGW OTKZ), dla wałów kategorii I i Regionalne Zarządy Gospodarki Wodnej, dla wałów o niższej kategorii. Ocenę stanu technicznego wałów wykonuje się cyklicznie co kilka lat. Szacuje się, że co roku należy zbadać kilkaset kilometrów tych wałów przeciwpowodziowych, żeby dysponować aktualną wiedzą na temat ich stanu technicznego. Obecnie diagnoza wykonywana jest na podstawie instrukcji (Borys & Mosiej, 2003), w której ocena stanu korpusu (*de facto* parametrów geologiczno-inżynierskich nasypu i płytkiego podłoża) jest

oparta na płytkich wierceniach i sondach dynamicznych, wykonywanych nawet co kilkaset metrów. Tak rozproszone rozpoznanie nie przystaje do zmienności, której można oczekiwać w przypadku antropogenicznych, wąskich i niskich nasypów, jakimi są wały przeciwpowodziowe. Kilkusetmetrowy interwał pomiędzy punktami wierceń czy sondowań nie pozwala w wielu przypadkach prawidłowo rozpoznać zmienności podłoża, formy sedymentacyjne występujące w dolinach rzecznych, mają przeważnie mniejsze wymiary.

Nieadekwatność obecnie stosowanego stopnia rozpoznania parametrów geologiczno-inżynierskich wałów i ich podłoża do możliwej zmienności warunków rzeczywistych jest oczywista dla geologów i staje się również zrozumiała dla osób odpowiedzialnych zawodowo za wykonanie ocen stanu technicznego wałów.

W roku 2014 autorzy mieli okazję uczestniczyć w doświadczalnych badaniach na trzech odcinkach wałów przeciwpowodziowych, które miały na celu przeanalizowanie przydatności różnych metod z zakresu geofizyki inżynierskiej do nieinwazyjnego badania stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych i w perspektywie do wypracowania metodyki ich stosowania dla oceny stanu wałów. Prace były wykonane na zlecenie i we współpracy z IMGW OTKZ.

DLACZEGO GEOFIZYKA INŻYNIERSKA?

Metody geofizyczne, stosowane do rozwiązywania problemów inżynierskich, pozwalają na pomiar parametrów fizycznych ośrodka, takich jak parametry rozchodzenia się fal sejsmicznych i elektromagnetycznych oraz oporność elektryczną. Oczywiście niedogodnością takiego obrazowania jest to, że skład, zawodnienie, parametry sprężyste, czy

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; szymon.ostrowski@pgi.gov.pl; marcin.lasocki@pgi.gov.pl.

zagęszczenie ośrodka są wyznaczane na drodze interpretacji. Jednak w odróżnieniu od metod, w których dochodzi do pobrania próbek ośrodka, metody geofizyczne pozwalają na ciągłe obrazowanie dwuwymiarowe lub trójwymiarowe, parametry zaś mierzone są przeważnie wartościami fizycznymi, a nie normatywnymi.

Ciągłe obrazowanie pozwala wyznaczyć w badanym obiekcie strefy zróżnicowanych lub anomalnych wartości parametrów fizycznych oraz strefy wysokich gradientów tych parametrów, które wskazują na występowanie nieciągłości struktury.

W przypadku zastosowań związanych z diagnozą stanu wałów przeciwpowodziowych, metody geofizyczne mają zasadnicze zalety, wśród których najważniejsze to:

1. Zagęszczenie pomiarów jest na tyle duże, że można uznać pomiar za ciągły; krok pomiarowy standardowo stosowany (5 metrów lub mniej) jest o rząd wielkości mniejszy niż przeciętne rozmiary form sedimentacyjnych w środowiskach rzecznych, np. zakola meandrowe wypełnione osadami organicznymi, odsypy piaszczyste itp., i mniejszy niż przeciętne niejednorodności w konstrukcji wału. Także niejednorodności, o rozmiarach mniejszych niż krok pomiarowy, znajdują swoje odzwierciedlenie w wynikach pomiarów – zostają uśrednione i zmieniają mierzone parametry w odcinkach wałów, co może wskazywać na potrzebę dokładniejszych ekspertyz;

2. Badania geofizyczne nie prowadzą do naruszenia struktury wałów, nawet w przypadku metod sejsmicznych, w których wywołuje się w ośrodku drgania, odkształcenia są na tyle małe, że pozostają w zakresie odkształceń sprężystych nawet dla najsłabszych mechanicznie typów ośrodka;

3. Prędkość wykonania badań, biorąc pod uwagę rozdzielczość rozpoznania, jest wysoka; także efektywność kosztów przy uwzględnieniu zakresu rozpoznania, jest dobra.

ZAKRES PRAC

Pierwotnie zaplanowano wykonanie ciągłych serii badań geofizycznych wzdłuż trzech odcinków wałów przeciwpowodziowych metodami: sejsmicznego profilowania refrakcyjnego z krokiem pomiarowym 5 m; profilowania konduktometrycznego z krokiem pomiarowym 1 m, na dwóch poziomach pomiarowych; georadarową z użyciem anten 100, 200, 400 i 900 MHz; tomografii elektrooporowej z krokiem pomiarowym od 1 do 5 m oraz metodą mikrograwimetryczną z krokiem pomiarowym 5 m.

Z uwagi na badawczy cel prac, autorzy wykonali dodatkowo na odcinkach wałów badania sejsmiczne: metodą wielokanałowej analizy fal powierzchniowych (MASW), z krokiem pomiarowym 4 m, refrakcyjnej tomografii sejsmicznej, z krokiem pomiarowym 2 m, oraz badania elektromagnetyczne metodą VLF (*very low frequency*), z krokiem pomiarowym 5 m.

Szerokie spektrum zastosowanych metod badawczych pozwoliło na miarodajne porównanie wyników, oszacowanie przydatności każdej z metod do diagnozowania stanu wałów przeciwpowodziowych, tak pod względem merytorycznym, jak i efektywności kosztów i tempa prac.

W niniejszej publikacji, autorzy koncentrują się jedynie na wynikach części metod, które uznają za optymalne do rozpoznania stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych z punktu widzenia możliwości interpretacji para-

metrów geologiczno-inżynierskich i interpretacji budowy geologicznej podłoża – tomografii elektrooporowej, sejsmicznej tomografii refrakcyjnej i metody wielokanałowej analizy fal powierzchniowych. Do pozostałych metod autorzy odnoszą się jedynie w kontekście porównania ich do wyników metod, komentowanych szerzej.

METODY

Metody geofizyki inżynierskiej, które autorzy uznają za perspektywiczne do wykorzystania w ocenie stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych, można podzielić na dwie grupy, w zależności od mierzonego parametru:

– metody elektrooporowe, których efektem jest określenie oporności elektrycznej konstrukcji wału (i przeważnie także podłoża); w tym przypadku zastosowano metodę stałoprądową – tomografię elektrooporową;

– metody sejsmiczne, które wykorzystują pomiar charakterystyki fal sejsmicznych do określenia parametrów sprężystości ośrodka.

Metody elektrooporowe

Pomiary oporności ośrodka skalnego metodami elektrooporowymi (Zhdanov & Keller, 1994) opierają się na podstawowym równaniu: $\rho = V/I$, gdzie ρ odpowiada oporności, V – napięciu, I – natężeniu. W metodach elektrooporowych stosuje się pośredni sposób wyznaczania oporności skał, dlatego podstawowe równanie jest zmodyfikowane o współczynnik opisujący geometrię układu. Wartości oporności uzyskane metodami geofizycznymi są określane opornością pozorną (ρ_a) i opisane wzorem: $\rho_a = (V/I)k$, gdzie współczynnik k jest zależny od geometrii układu pomiarowego. W pojedynczym pomiarze oporności używa się zestawu czterech elektrod; dwóch zasilających, o znanym natężeniu i dwóch elektrod pomiarowych rozmieszczonych symetrycznie pomiędzy zasilającymi, między którymi mierzy się napięcie. Wynik pomiaru oddaje w przybliżeniu średnią oporność ośrodka skalnego w półprzestrzeni ośrodka poniżej elektrod. Kolejne pomiary, o zwiększonym zasięgu głębokościowym, uzyskuje się, powiększając rozstaw elektrod. Usunięcie efektu płytszych pomiarów (inwersja opornościowa) pozwala w efekcie na obliczenie oporności rzeczywistej głębszej „warstwy”. Wielokrotne powtórzenie procedury pomiaru z coraz większą głębokością i inwersji pozwala na uzyskanie profilu opornościowego. Profile takie mogą służyć do stworzenia przekroju opornościowego. Optymalną metodą do diagnozowania stanu technicznego i podłoża budowli hydrotechnicznych jest tomografia elektrooporowa (Ostrowski & Pacanowski, 2011).

W metodzie tomografii elektrooporowej (ERT) (por. Loke, 2000) kilkadziesiąt elektrod rozmieszczonych jest równomiernie wzdłuż profilu i połączone z aparaturą pomiarową. Odległość między elektrodami dobiera się w zależności od oczekiwanej rozdzielczości. Aparatura pomiarowa automatycznie dokonuje pomiaru, używając wszystkich kombinacji elektrod, które spełniają warunki geometryczne układu pomiarowego. Inwersja opornościowa jest prowadzona wspólnie dla całej macierzy wyników, co pozwala na wyznaczenie oporności rzeczywistej dla bloków pomiarowych i, po interpolacji, utworzenie ciągłego przekroju zmian oporności ośrodka.

Oporność elektryczna ośrodka zależy w głównej mierze od jego składu litologicznego oraz zawodnienia. Skały i materiały o drobnej frakcji mają ogólnie niższą oporność niż materiały gruboziarniste i skały lite. Zawodnienie ośrodka w oczywisty sposób obniża oporność elektryczną. Metoda ERT jest z powodzeniem stosowana do określania składu budowy ziemnych, rozpoznania stref niejednorodności i zwiększonej filtracji (Ostrowski & Pacanowski, 2011) oraz do rozpoznania budowy geologicznej podłoża (Ostrowski i in., 2010; Ostrowski i in., 2013).

Metodyka i technika pomiarów. W badaniach zastosowano podstawowy rozstaw pomiarowy z elektrodami rozmieszczonymi co 5 m i długością rozstawu pomiarowego, który pozwolił na rozpoznanie ośrodka gruntowego do głębokości około 19 m. Przyjęcie takiej geometrii układu pomiarowego zapewniło głębokość prospekcji całkowicie wystarczającą do rozpoznania szczegółów budowy podłoża geologicznego, które mogły mieć realny wpływ na stabilność wałów przeciwpowodziowych, jednak uzyskana rozdzielczość pozwoliła na wykrycie tylko szczególnie dużych anomalii w samym korpusie. W celu określenia optymalnych parametrów układu pomiarowego, część pomiarów tomografii elektrooporowej wykonano, stosując układ o mniejszych odległościach między elektrodami – 2, 3 i 4 m. Wszystkie z tych układów pomiarowych pozwoliły na osiągnięcie głębokości nie mniejszej niż 12 m, więc wciąż dwukrotnie większej niż szacunkowa głębokość, na której podłoże może mieć istotny wpływ na stan techniczny wałów przeciwpowodziowych. Równocześnie rozdzielczość wzrosła, pozwalając na wyznaczenie anomalii w korpusie.

Do pomiarów zastosowano układ pomiarowy Schlumbergera, który cechuje się odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne i gęstym pokryciem punktów pomiarowych.

Metody sejsmiczne

Wszystkie metody sejsmiczne stosowane w geofizyce inżynierskiej opierają się na fakcie, że prędkość fal sejsmicznych jest zależna od właściwości sprężystych ośrodka. Właściwości sprężyste skał wynikają głównie z ich litologii, zagęszczenia i stopnia zniszczenia pierwotnej struktury. Na podstawie pomiarów sejsmicznych można wyznaczyć prędkości fali sejsmicznej w podłożu oraz granice nieciągłości lub zniszczenia pierwotnej struktury. (Bestyński & Thiel, 2005; Ostrowski i in., 2013). Poznanie rozkładu wartości prędkości fal sejsmicznych pozwala na oszacowanie parametrów mechanicznych podłoża.

Tomografia sejsmiczna (STR) (por. Watanabe i in., 1999) jest rozszerzeniem metody sejsmicznych profilowań refrakcyjnych – metody wykorzystującej występowanie zjawiska refrakcji sejsmicznej fali podłużnej na granicach ośrodka o różnych parametrach mechanicznych. W metodzie tej wykorzystuje się fale o częstotliwości od kilkudziesięciu do kilkudziesięciu herców. Kolejne elementy aparatury pomiarowej (geofony) rejestrują czas i amplitudę fali przemieszczającej się przez ośrodek, wywołanej w sposób kontrolowany w dokładnie określonym punkcie. W metodzie wykorzystuje się fale refrakcyjne z wielu kontrolowanych źródeł. Dzięki wielokrotnej rejestracji licznych fal sejsmicznych wzbudzonych w serii punktów wzdłuż profilu pomiarowego, przestrzeń pomiarowa pokryta zostaje gęstą

siatką promieni sejsmicznych. Dla każdego punktu wzbudzenia przeprowadza się analizę prędkości fali refrakcyjnej dochodzącej do każdego z geofonów. Integracja wyników z wszystkich punktów wzbudzenia polega na obliczeniowym, iteracyjnym dopasowaniu modelu prędkości w ośrodku, o najmniejszym sumarycznym błędzie. Efektem pomiarów jest ciągły przekrój prędkości fali sejsmicznej w badanym ośrodku. Metoda może być stosowana do wykrywania nieciągłości i anomalnych stref prędkości, zwłaszcza w budowlach ziemnych, istnienie których wskazuje na występowanie stref o anomalnym zagęszczeniu lub obecności rozluźnień, czy na przykład obiektów betonowych. Metoda STR jest z powodzeniem stosowana dla rozpoznania sytuacji geologicznej w rejonach budowy planowanych obwałowań i zbiorników wody (Isiaka i in., 2012) i przy rozpoznaniu obszarów o znacznych kontrastach prędkości fali sejsmicznej, jak na przykład rejon występowania krasu (Sheehan i in., 2005a).

Metoda wielokanałowej analizy fal powierzchniowych (ang. *Multichannel Analysis of Surface Waves* – MASW) to relatywnie nowa metoda stosowana w geofizyce inżynierskiej (Park & Miller, 2004). W metodzie mierzy się zależność prędkości poprzecznych fal powierzchniowych od ich częstotliwości. Metoda wykorzystuje fale o niskiej częstotliwości, z zakresu od 2 do 30 Hz. Fale powierzchniowe, w zależności od częstotliwości fali, dochodzą do różnej głębokości. Prędkość fal o danej częstotliwości niesie więc informację o uśrednionej prędkości fali do głębokości propagacji. Procedura obliczeniowa – inwersja – pozwala, na podstawie serii danych dotyczących uśrednionej prędkości, określić profil prędkościowy ośrodka. Prędkość fali poprzecznej jest parametrem ściśle powiązanim z właściwościami sprężystymi ośrodka, decydującymi o wytrzymałości ośrodka.

Metodyka i technika pomiarów. Do badań metodą sejsmicznej tomografii refrakcyjnej (SRT) zastosowano układ pomiarowy złożony z 24 kanałów, o odległościach pomiędzy kanałami wynoszących 2 m. Dla zapewnienia najwyższej możliwej rozdzielczości, zastosowano rejestrację dla 16 punktów wzbudzenia i metodę kroczącą (ang. *roll-along*), gdzie przy każdym kolejnym odcinku pomiarowym powtarza się pomiary połowy poprzedniego odcinka. W takim układzie efektywna ilość rejestrowanych punktów wzbudzenia nieznacznie przewyższa ilość kanałów – uzyskuje się maksymalne zagęszczenie promieni sejsmicznych. Uzyskana głębokość rozpoznania ośrodka gruntowego, dla metody sejsmicznej tomografii refrakcyjnej, wyniosła nie mniej niż 12 m.

Do przetwarzania wyników sejsmicznej tomografii refrakcyjnej wykorzystuje się informację zawartą w czasach pierwszego wstąpienia, jednak dzięki zastosowaniu znacznej ilości danych i algorytmu obliczeniowego stosującego równanie eikonalne (najbardziej zaawansowane równanie opisujące propagację frontu fali) można stworzyć model subtelnych różnic w rozkładzie prędkości fali wzdłuż przekroju pod profilem pomiarowym (Sheehan i in., 2005b).

W metodzie wielokanałowej analizy fal powierzchniowych (MASW) zastosowano 2 warianty układu pomiarowego. W pierwszym przypadku układ pomiarowy był identyczny z układem opisanym powyżej dla STR – te same dane pomiarowe zostały przetworzone obiema metodami. W drugim przypadku zastosowano układ pomiarowy

typowo stosowany w technice MASW – tzw. *land-stre-amer* (Inazaki, 2002). W tym przypadku układ składał się z 12 geofonów niskoczęstotliwościowych (4,5 Hz), punkt wzbudzenia znajdował się 10 m od pierwszego geofonu, a geofony rozmieszczone były co 2 m. Cały układ pomiarowy przesuwany był o 4 m, osiągając maksymalną rozdzielczość metody MASW. W warunkach gruntowo-geologicznych układ pomiarowy w drugiej konfiguracji pozwolił na osiągnięcie głębokości wiarygodnego rozpoznania około 8–10 m.

Przetwarzanie danych metody MASW opiera się na wyznaczeniu krzywej zależności prędkości fali od częstotliwości fali (krzywe dyspersji), a następnie przeprowadzeniu procedury inwersji. W przypadku bieżących badań procedurę inwersji prowadzono dla kilkudziesięciu krzywych dyspersji, w przestrzeni dwuwymiarowej.

POŁOŻENIE I PODŁOŻE WAŁÓW

Rzeka Narew (Pułtusk, Popławy). Odcinek rzeki Narew, wzdłuż którego wykonywane były badania (ryc. 1A), położony jest w geograficznym makroregionie Nizina Północnomazowiecka, mezoregionie Dolina Dolnej Narwi. W rejonie badań Dolina Dolnej Narwi kontaktuje bezpośrednio z Wysoczyzną Ciechanowską – samo miasto Pułtusk położone jest już na skraju Wysoczyzny (Kondracki, 2002).

Podłoże wałów, zarówno prawego, jak i lewego, zbudowane jest z holocenijskich osadów dna doliny – tarasu zalewowego (Nowak, 1956). Są to przede wszystkim piaski i mulki, ze sporadycznymi wkładkami żwirów. Osady te mają niewielką miąższość, dochodzącą do 5–7 m. Są one podścielone osadami tarasu nadzalewowego wykształconymi w postaci piasków i żwirów, a głębiej – piasków tarasu wydmyowego. Utwory starszych tarasów, w osiowej części doliny podścielające utwory tarasu zalewowego, odsłaniają się na powierzchni w dnie doliny na wschodnim (lewym) brzegu rzeki Narwi, gdzie miejscami stanowią podłoże

wału lewego. Szczególnie na północnym odcinku lewego wału, podłoże zbudowane jest z utworów piaszczystych tarasu wydmyowego, a lokalnie nawet z piasków eolicznych.

Wał prawy przebiega w zasadzie w całości po utworach piaszczystych i mułkowych tarasu zalewowego, jedynie w rejonie zamku i parku zamkowego, wał jest zbudowany na utworach tarasu nadzalewowego, a w granicach zabudowy miejskiej można spodziewać się obecności nasypów antropogenicznych na osadach tarasu zalewowego. W podłożu wypełnień dolinnych Narwi występują osady plejstoceńskie, wykształcone jako gliny zwałowe zlodowaceń północnopolskich, piaski i żwiry rzeczne interstadiałów i łą warwowe późniejszych stadiałów zlodowaceń północnopolskich. Skały te są przykryte mięszymi holocenijskimi utworami rzecznyymi; ich wpływ na stan wałów można przyjąć za zanedbywalny. Jedynie w najbardziej północnym fragmencie wału prawego, gdzie korpus wału przylega do stromej, naturalnej skarpy, występowanie łą warwowych (w krawędzi skarpy) może stanowić potencjalny czynnik ryzyka (ryzyko procesów osuwiskowych, które naruszają skrajny fragment wału).

Rzeka Elbląg (Nowakowo). Odcinek rzeki Elbląg, wzdłuż którego wykonywane były badania (ryc. 1B), położony jest w makroregionie geograficznym Pobrzeże Gdańskie, mezoregionie Żuławy Wiślane, bezpośrednio przy granicy z Wysoczyzną Elbląską. (Kondracki, 2002). Rzeka na tym odcinku uchodzi do Zatoki Elbląskiej, kontaktując z nią na długim odcinku przez pas płyczn i szuwarowisk.

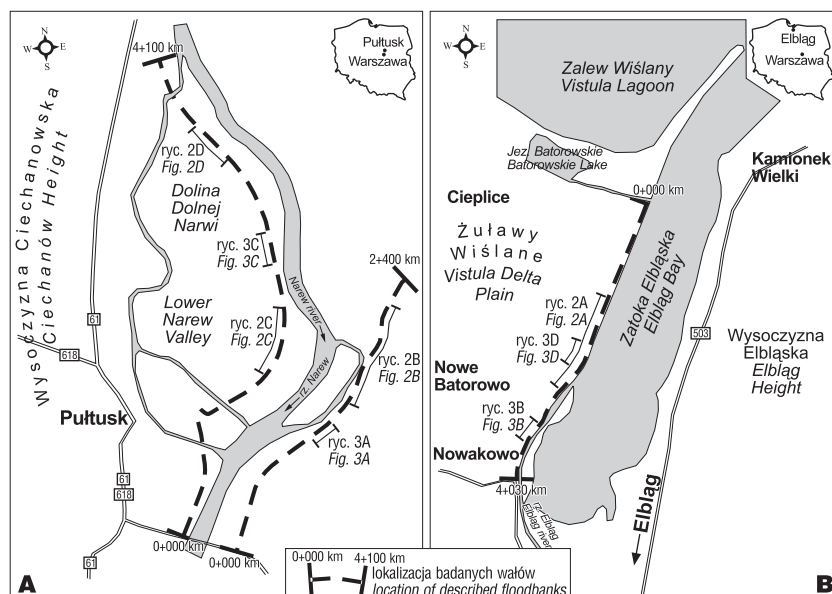
Wał przeciwpowodziowy zbudowany jest na obszarze, którego podłoże stanowią mulki, łą, miejscami mady i torfy holocenijskie genety jeziornej, pokryte piaskami rzecznyymi najmłodszego etapu akumulacji rzecznej, prawdopodobnie o charakterze odsypu wzdłuż-korytowego, o nieznaczącej miąższości (Makowska, 1987). Miąższość osadów drobno-klastycznych wynosi w rejonie badań około 10–15 m. W podłożu najmłodszych utworów jeziornych i rzecznych wstępują wczesnholocenijskie piaski i żwiry o rzecznej genezie. Różnią się one od przykrywających osadów mniejszym udziałem frakcji drobno-klastycznych i osadów organicznych. Holocenijskie utwory tworzące podłoże Żuławy są osadzone w obniżeniu powstałym na skutek erozji rzecznej dolnej Wisły. Poniżej osadów holocenijskich występują osady plejstoceńskie, wykształcone w postaci glin zwałowych zlodowaceń północnopolskich i starsze osady rzeczne. Osady te odpowiadają utworom budującym Wysoczyznę Elbląską. Osady starsze niż holocenijskie piaski rzeczne nie zostały rozpoznane w bieżących badaniach, jednak ich wpływ na stabilność wału można uznać za zanedbywalny.

Wyniki metody tomografii elektrooporowej najlepiej sprawdzają się w rozpoznaniu szczegółów budowy geologicznej podłoża. Dobrym przykładem może być rozpoznanie podłoża wału rzeki

WYNIKI BADAŃ

Wyniki tomografii elektrooporowej

Wyniki metody tomografii elektrooporowej najlepiej sprawdzają się w rozpoznaniu szczegółów budowy geologicznej podłoża. Dobrym przykładem może być rozpoznanie podłoża wału rzeki



Ryc. 1. Lokalizacja doświadczalnych odcinków wałów, na których wykonano opisywane badania. **A** – Rzeka Narew w okolicy Pułtuska; **B** – rzeka Elbląg przy ujściu do Zatoki Elbląskiej

Fig. 1. Location of experimental floodbank sites described in the text. **A** – Narew river, near Pułtusk; **B** – Elbląg river and its outlet to Elbląg Bay

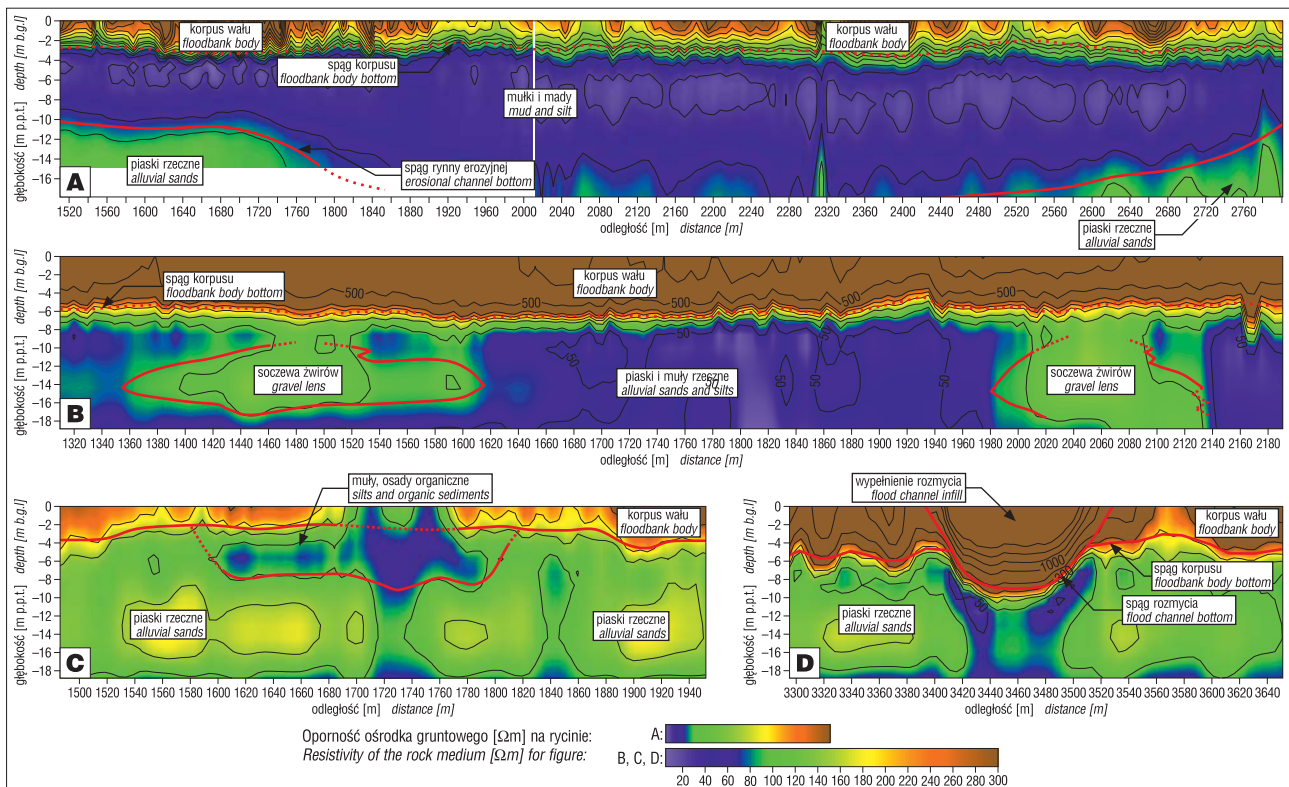
Elbląg (ryc. 2A). W podłożu wału można wyróżnić 2 warstwy, przypowierzchniową, która stanowi bezpośrednie podłoże korpusu wału, o oporności 10–20 Ωm , o miąższości 7–15 m, oraz podścielającą, o oporności 30–40 Ωm . Warstwa wyższa może być zbudowana z mady, mułów i ilów z wkładkami torfów. Warstwa głębsza jest prawdopodobnie zbudowana z dolnoholoceńskich piasków rzecznych z dużym udziałem materiału drobnoklastycznego. Ciekawy jest przebieg granicy pomiędzy tymi dwoma warstwami – granica położona jest na głębokości około 7 m pod powierzchnią terenu, a w centralnej części (pomiędzy 1700 a 2800 m) tworzy obniżenie do około 15 m p.p.t. Zagłębienie ma kształt rynny i prawdopodobnie powstało jako efekt rzecznej erozji wgłębnej (kopalne koryto rzeki), w późniejszych etapach wypełnionej osadami jeziornymi. Miąższość osadów wyższej warstwy powoduje, że występowanie rynny erozyjnej nie ma wpływu na stabilność konstrukcji wału.

Na przekrojach można obserwować również drobne szczegóły budowy geologicznej. Na odcinku przekroju geoelektrycznego lewego wału Narwi (ryc. 2B) zwraca uwagę obecność dwóch stref o podwyższonej oporności (powyżej 100 Ωm) na 1380–1580 i 2000–2140 m. Oś obu stref znajduje się na głębokości około 14 m. Pierwsza z wymienionych stref koreluje się przestrzennie z występowaniem przesiaków. Można przypuszczać, że obie strefy są pochodzenia naturalnego, są to soczewki piasków lub żwirów. Mogą one stanowić potencjalne strefy migracji wody

i stanowić strefę ryzyka dla wystąpienia przebicia hydraulicznego. Anomalia niskooporowa na odcinku 1680–1760 m prawego wału Narwi (ryc. 2C) nie koreluje się z obiektami hydrotechnicznymi. Występujące przesiaki i obecność strefy niskooporowej w podłożu mogą świadczyć o występowaniu warstwy gruntów organicznych obniżających stabilność wału.

Dla pełnego wykorzystania metody ERT do rozpoznania struktury korpusu i ewentualnych zabiegów uszczelniających, przeważnie konieczne jest zastosowanie zagęszczonego kroku pomiarowego. W większości przypadków badania elektrooporowe pozwalają na wyznaczenie spągu korpusu wału. Niestety, obraz korpusu wału zlewa się z występującymi w podłożu warstwami o podobnej charakterystyce opornościowej, co może prowadzić do mylnych wniosków na temat miąższości korpusu. Metoda elektrooporowa pozwala natomiast z dużą pewnością określić rodzaj materiału, z którego wykonany jest korpus, oraz wyznaczyć odcinki o różnym jego składzie. Końcowy odcinek wału prawego Narwi, pomiędzy 3900–4060 m, w odróżnieniu od pozostałej części tego wału, jest zbudowany z materiału niskooporowego. Prawdopodobnie odzwierciedla to oporność materiału lokalnego, z którego był budowany. W sąsiedztwie występuje skarpa zbudowana z ilów. Przypuszczalnie materiał z ich dużym udziałem był użyty do budowy korpusu na tym odcinku.

Lokalnie można obserwować wyraźne anomalie w korpusie wałów. Przykładem może być strefa pomiędzy



Ryc. 2. Wyniki badań wałów i ich podłoża metodą ERT, wraz z interpretacją. **A** – rynna erozyjna wypełniona osadami jeziornymi, podłoże wału rzeki Elbląg; **B** – soczewki żwirowe w obrębie osadów drobnoklastycznych. Podłoże wału lewego rzeki Narew; **C** – osady starorzeczna w podłożu prawego wału rzeki Narew; **D** – rozmycie w wale prawym rzeki Narew, powstałe w trakcie przerwania powodziowego, wał naprawiony

Fig. 2. The results of investigation of floodbanks by means of ERT method. **A** – erosion channel infilled by lacustrine sediments, river Elbląg floodbank; **B** – Gravel and coarse sand lenses in fine grain sediments, left floodbank of Narew river; **C** – sediments of abandoned meander, right floodbank of Narew river; **D** – erosional channel within floodbank (filled and repaired) caused by catastrophic flood and floodbank breakdown, right floodbank of Narew river

3400–3510 m prawego wału Narwi (ryc. 2D), o rynnowym kształcie i podwyższonych opornościach, przekraczających 1000 Ω m, która jest efektem wypełnienia wyrwy w wale, powstałej w czasie powodzi w 1979 roku.

Wyniki metod sejsmicznych

Wynikiem refrakcyjnej tomografii sejsmicznej (SRT) są przekroje prędkości fali P. Rozdzielczość badań jest zbliżona do maksymalnej rozdzielczości możliwej do osiągnięcia metodami sejsmicznymi (w tym przypadku około 1 m w pionie, 2 m w poziomie). Na podstawie obecności stref anomalnych prędkości można bezpośrednio wyznaczać strefy o obniżonym zagęszczeniu, z obecnością pustek lub zasypanych obiektów betonowych itp. Stosując bezpośrednią interpretację rozkładu prędkości na przekrojach, można wyznaczyć obecność oraz charakter stref stanowiących zagrożenie dla stabilności wałów przeciwpowodziowych.

Na odcinku lewego wału Narwi (ryc. 3A), za pomocą metody sejsmicznej tomografii refrakcyjnej (STR) zarejestrowano horyzontalny rozkład prędkości fali P (V_p) z lokalnymi odchyleniami. Odchylenie (strefa anomalna niskich prędkości) występuje w warstwie podłoża, na głębokości 10–16 m.

Maksymalny gradient V_p przebiega w przybliżeniu na głębokości 8 m. Strefa anomalnie niskich prędkości w podłożu, jest prawdopodobnie efektem obecności niewielkiej formy wypełnionej osadami organicznymi (przypuszczalnie pogrzebane starorzecze wypełnione osadami organicznymi). W płytszych partiach, rozkład prędkości jest horyzontalny i brak jest anomalii niskoprędkościowych w wyższej części profilu, wynika z tego, że zmiana w podłożu nie wpływa na stabilność wału.

Drugi prezentowany odcinek badań, wykonany na wale rzeki Elbląg (ryc. 3B), przebiega przez przepust przepompowni. Rozkład prędkości jest bardzo niejednorodny, co związane jest z obecnością starego kanału naturalnego, elementów konstrukcji przepustu i prawdopodobną zmianą w strukturze wału w sąsiedztwie przepustu.

Na przekroju SRT zaznaczają się znaczne niejednorodności zarówno w podłożu, jak i w obrębie korpusu. Obniżenie wartości V_p na odcinku 3310–3350 m, do głębokości około 10 m, może być spowodowane naturalną obecnością słabo skonsolidowanego wypełnienia starego kanału. Obniżenie prędkości w podłożu na odcinku 3360–3380 m nie jest tak znaczne i rozkład pola prędkości jest zdecydowanie bardziej jednorodny. Niejednorodności w wypełnieniu kanału mogą mieć związek z instalacją samego przepustu (zmieniona, wzmocniona konstrukcja wału). Lokalne zmiany (wzrost V_p) w korpusie w centralnej części profilu są efektem obecności betonowych elementów przepustu.

Wynikiem metody MASW są przekroje prędkości fali S. Tak jak w przypadku metody SRT, wyniki cechują się wysoką rozdzielczością, choć niższą od SRT, z uwagi na wykorzystywanie fal dłuższych (o niższej częstotliwości). Występowanie anomalnych stref prędkości może wskazywać na rozluźnienia lub zagęszczenia gruntów, podatność na upłynnienia i inne. Wykazanie takich stref jest kluczowe do oceny stanu technicznego wałów oraz wyznaczenia stref szczególnego ryzyka dla ich stabilności.

Badania metodą MASW, przeprowadzone na odcinku prawego wału Narwi (ryc. 3C) wykazały warstwowy układ prędkości fali poprzecznej (V_s), przy czym w przypowierzchniowej warstwie (korpusie) mamy do czynienia ze wzrostem prędkości, poniżej natomiast występuje spadek V_s (inwersja prędkości), z osią minimalnej wartości V_s na głębokości około 7–8 m. Obecność takiej inwersji może wskazywać na występowanie warstwy o parametrach mechanicznych słabszych od otoczenia, np. gruntów organicznych. Strefa inwersji wyklinowuje się ku północy. Możliwość występowania warstwy gruntów organicznych współgra z obserwacjami terenowymi (w sąsiedztwie występuje starorzecze) oraz dobrze koreluje się z obrazem uzyskanym metodą ERT (występowanie soczewy niskooporowych osadów w podłożu wału). Strefa inwersji w bezpośrednim podłożu korpusu wału może stanowić czynnik ryzyka przebiccia hydraulicznego i osiadania wału.

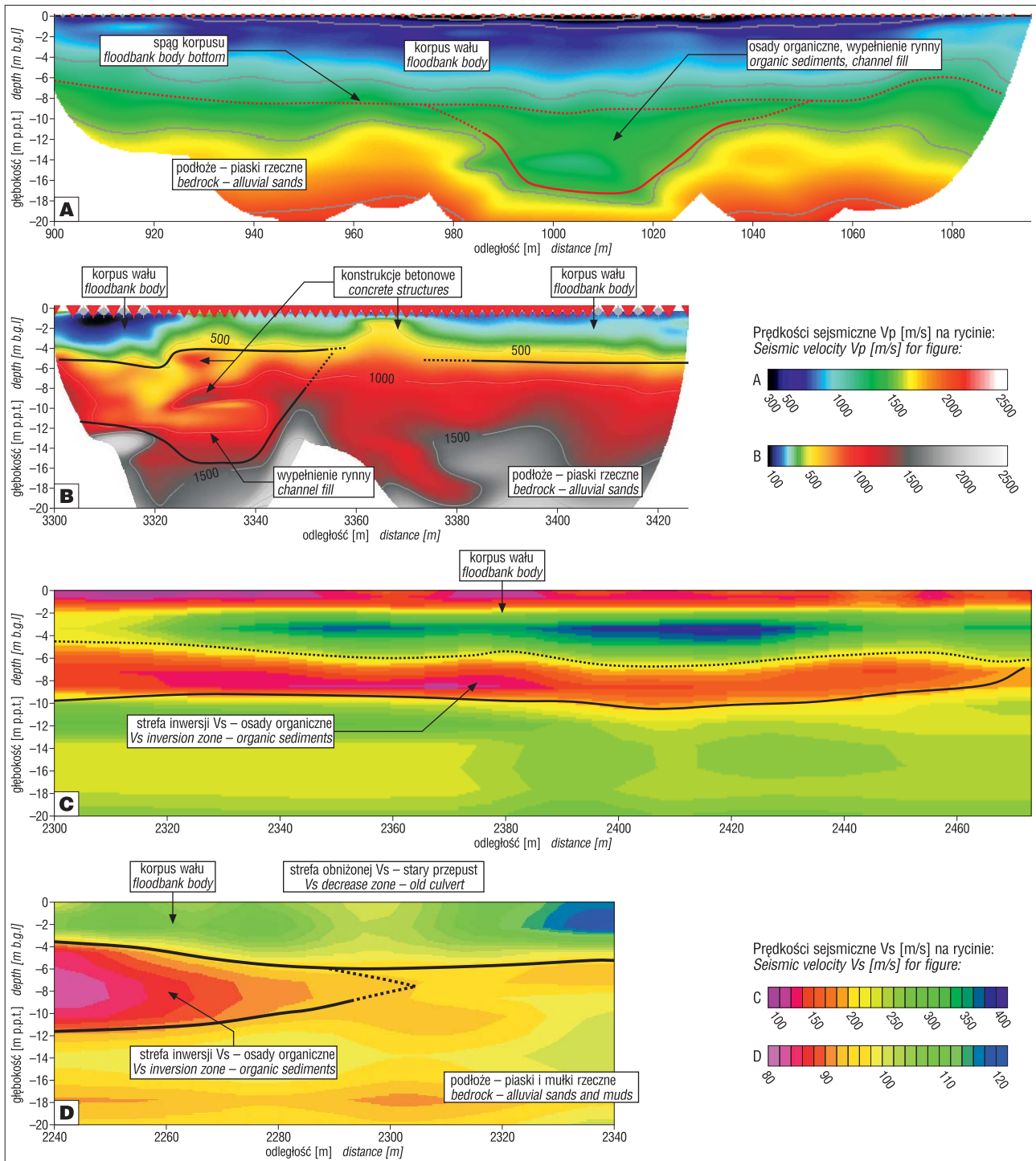
Prezentowany odcinek profilu został wykonany metodą MASW na wale rzeki Elbląg (ryc. 3D), w rejonie nieczynnego przepustu. Sam przepust prawdopodobnie został zarejestrowany jako nieznaczne obniżenie wartości V_s na 2300 m w korpusie wału. Uwagę zwraca fakt występowania inwersyjnego rozkładu V_s . Korpus wału charakteryzuje się prędkościami wyższymi niż podłoże, co jest związane ze słabą konsolidacją osadów jeziornych budujących podłoże. Strefa na początku profilu w podłożu wału charakteryzuje się bardzo niskimi wartościami V_s . Może to być związane z przechodzeniem w tym miejscu starego kanału naturalnego. Występowanie strefy osłabionej w bezpośrednim korpusie wału, w połączeniu z przebiegającą w kontakcie z wałem drogą (na której generowane są wibracje niskoczęstotliwościowe), może stanowić element ryzyka dla stabilności odcinka, szczególnie przy wysokim stanie wód.

Dyskusja możliwości zastosowania innych metod geofizyki inżynierskiej

Pomimo że do badań wałów przeciwpowodziowych najczęściej stosowaną metodą geofizyczną jest metoda georadarowa (Gołębiowski, 2010; Gołębiowski i in., 2012), autorzy uznali, na podstawie własnych badań, wyniki metody georadarowej za mało istotne lub niejednoznaczne, a co za tym idzie nieefektywne w rozpoznaniu stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. Określenie natury refleksów wyznaczonych na podstawie badań georadarowych jest często wysoce niejednoznaczne. Dodatkowo wiązka elektromagnetyczna tylko w niewielkim stopniu przenika przez grunty zawadnione, co ogranicza skuteczną głębokość rozpoznania metody do głębokości występowania poziomu wód gruntowych (Karczewski, 2007).

Badania mikrograwimetryczne teoretycznie mogą wykazać obecność stref ubytków masy (Fajkiewicz, 2007; Jacoby & Smilde, 2009), równoznacznych z występowaniem stref rozluźnień w wałach przeciwpowodziowych. Jednak skuteczna realizacja takich badań wiązałaby się z tak szerokim zakresem prac, że zastosowanie tej metody do oceny stanu wałów przeciwpowodziowych byłoby nieekonomiczne.

Także podstawowy wariant sejsmicznej metody refrakcyjnej – sejsmiczne profilowanie refrakcyjne (SP) – nie przyniosło oczekiwanych rezultatów. Wynik SP ogranicza



Ryc. 3. Wyniki badań wałów i ich podłoża metodami STR (A i B) i MASW (C i D). **A** – rynna erozyjna wypełniona osadami organicznymi i drobnoklastycznymi w podłożu wału lewego Narwi; **B** – strefa zmienności wartości V_p w sąsiedztwie kanału przepompowni; **C** – inwersja wartości V_s w podłożu wału prawego Narwi spowodowana występowaniem w podłożu osadów organicznych; **D** – obniżenie wartości V_s w podłożu wału rzeki Elbląg spowodowana występowaniem soczewy osadów organicznych i obecnością zasypanego przepustu

Fig. 3. The results of investigation of floodbanks with seismic methods seismic refraction tomography (A and B) and MASW (C and D): **A** – erosional channel filled with fine grained and organic sediments, Narew river, left floodbank; **B** – significant changes in seismic velocity near concrete construction near pump station, Elbląg river; **C** – V_s inversion caused by organic sediments in the base of floodbank, Narew river, right floodbank; **D** – local decrease of V_s caused by occurrence of organic sediment lens and buried culvert

się do wykresu głębokości warstwy, na której zachodzi refrakcja (z dodatkowymi informacjami dotyczącymi uśrednionych prędkości w warstwach) i nie pozwala na samodzielne wyznaczenie stref stanowiących zagrożenie dla stabilności wału. Jedynie zestawienie tych informacji z wynika-

mi innych badań (szczególnie tomografii elektrooporowej) pozwala niekiedy wyciągać wnioski dotyczące podłoża wałów. Zmienność prędkości notowana w obrębie samego korpusu i stopień uśrednienia tej wartości nie daje wymaganej rozdzielczości koniecznej do diagnozowania stanu wałów.

Wyniki metod elektromagnetycznych, w większości przypadków, w przybliżeniu korelują się z przekrojami tomografii elektrooporowej (ERT), jednak ich użycie do określenia zmienności parametrów elektrycznych ośrodka w zastępstwie ERT jest niemożliwe. Wartości z poszczególnych anten konduktometru są uśrednieniem wartości oporności występujących w gruncie do pewnej (teoretycznej) głębokości. Zwłaszcza w przypadku warstwowego układu oporności, jaki występuje w badanych obiektach, uśrednienie powoduje powstanie sztucznych wartości, które można rozpatrywać wyłącznie jako orientacyjne do wyznaczania stref anomalnych. W przypadku metody VLF wyników nie można nawet wprost przeliczyć na parametry elektryczne ośrodka, choć metoda ta jest skutecznie stosowana do zagadnień hydrogeologicznych (Kowalska i in., 2012) w połączeniu z innymi metodami geofizycznymi. Dodatkową wadą metod elektromagnetycznych jest ich wysoka czułość na wszechobecne zakłócenia elektromagnetyczne. W trakcie badań zanotowano występowanie zakłóceń uniemożliwiających przeprowadzenie badań, spowodowało je sąsiedztwo małych transformatorów sieci elektroenergetycznej, przebieg w sąsiedztwie ogrodzeń elektrycznych, a nawet obecność na koronie wału betonowych płyt ze zbrojeniem stalowym.

WNIOSKI

Metody geofizyki inżynierskiej, z uwagi na swoją bezinwazyjność i możliwość ciągłego obrazowania zmian parametrów fizycznych, znajdują coraz szersze zastosowanie w geologii inżynierskiej i ekspertyzach stanu technicznego budowli. Wspomniane cechy predestynują metody obrazowania geofizycznego do badań budowli hydrotechnicznych, w szczególności do wykrywania zagrożeń związanych z budową podłoża geologicznego oraz do wykrywania stref niejednorodności w obrębie wałów przeciwpowodziowych.

Prezentowane w artykule metody nie obejmują wszystkich możliwych technik stosowanych w geofizyce inżynierskiej, jednak pozwalają na dobrą ocenę stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych zarówno w skali przeglądowej („badania przesiewowe”), jak i szczegółowej, w miejscach o szczególnym znaczeniu lub wytypowanych na podstawie badań przeglądowych.

Metody elektrooporowe, zwłaszcza tomografia elektrooporowa (ERT), są szczególnie przydatne do określania zmienności w podłożu wałów. Dobrym przykładem skutecznego zastosowania techniki ERT jest wykrywanie starorzeczy i pogrzebanych soczew osadów organicznych w podłożu. Przykładem, jak istotne dla stabilności budowli geotechnicznych może być dobre rozpoznanie podłoża, mogą być badania wykonanie na zaporze ziemnej w Przewycach (Ostrowski i in., 2010), gdzie w podłożu wykazano istnienie nie notowanych wcześniej plastycznych wypełnień krasowych.

W przypadku korpusu wałów, wyniki badań elektrooporowych nie są tak jednoznaczne. Duża niejednorodność opornościowa korpusu niekoniecznie musi się wiązać z występowaniem ryzyka stabilności. Dobrym przykładem może być drastyczna zmiana oporności prawego wału Narwi na końcowym odcinku. Prawdopodobnie jest ona wywołana zmianą materiału konstrukcyjnego z piaszczy-

stego na bardziej ilasty, co samo w sobie nie wpływa negatywnie na stan techniczny wału.

Dodatkowo zastosowanie metody ERT wymaga, w przypadku rozpoznania detali budowy korpusu wału, znacznego zagęszczenia kroku pomiarowego, optymalnie do 1 m.

Należy jednak podkreślić, że dane uzyskane techniką ERT zawierają często bardzo wartościowe informacje, zwłaszcza jeśli interpretowane są wspólnie z wynikami badań sejsmicznych.

Alternatywą dla techniki ERT, znacznie przyspieszającą tempo akwizycji terenowej, może być system pomiaru oporności oparty na sprzężeniu pojemnościowym (ang. *Capacitive Coupling Resistivity system* – CCR) stosowany z powodzeniem do szybkiej akwizycji danych elektrooporowych (Timoteev i in., 1994; Shima i in., 1995; Yamashita i in., 2004). W technice tej stosuje się do 10 kanałów z krokiem pomiarowym rzędu 1 m, ciągnięte po ziemi. Technika nie wymaga kontaktu elektrycznego z podłożem, co znacznie przyspiesza tempo pomiarów. Taki układ pomiarowy pozwala uzyskać dane z 10 poziomów głębokości, co jest wystarczające do przeprowadzenia inwersji. System jest bardziej odporny na zakłócenia elektromagnetyczne niż typowe metody elektrooporowe.

Metody sejsmiczne, szczególnie sejsmiczne metody wysokorozdzielcze, dają najdokładniejsze rezultaty, mające jednoznaczne przełożenie na parametry mechaniczne ośrodka i stan techniczny wałów przeciwpowodziowych. Rozdzielczość tych metod jest w pełni dostosowana do anomalii występujących w badanych obiektach.

Sejsmiczna tomografia refrakcyjna (SRT) daje najlepsze rezultaty w przypadku dużej zmienności horyzontalnej, np. betonowych obiektów hydrotechnicznych. Metoda ta może mieć duże zastosowanie w określaniu obecności rozluźnień przy obiektach, wyznaczaniu położenia starych obiektów hydrotechnicznych itp. Mankamentem metody SRT jest to, że w przypadku gruntów zawodnionych, nawet o niskich parametrach mechanicznych, prędkości fali P są zbliżone do prędkości fali sejsmicznej w wodzie. Powoduje to, że poniżej zwierciadła wód gruntowych, zobrażowane są wyłącznie obiekty o wartości V_p wyższej niż V_p dla wody. W warunkach panujących w większości dolin rzecznych takie wartości V_p są osiągane dopiero w głębszym podłożu (np. podłożu doliny, gliny zwałowe), co ogranicza zastosowanie techniki SRT głównie do korpusu wału i warstwy podłoża stanowiącej taras nadzalewowy. Szerokie stosowanie techniki SRT jest też ograniczone przez wysoką pracochłonność w trakcie akwizycji i przetwarzania, co ogranicza znacząco możliwe tempo prac. Akwizycja może być w pewnym stopniu zoptymalizowana, jednak efektywność czasowa może zostać podniesiona tylko nieznacznie.

Wielokanałowa analiza fal powierzchniowych (MASW) daje najlepsze rezultaty w warunkach, w których występuje zmienność pionowa wartości prędkości fali S. Metoda dobrze wykrywa nawet cienkie warstwy o zróżnicowanych wartościach V_s , takie jak soczewy torfów, mad itp. Zdolność ta jest szczególnie istotna w wykrywaniu układów inwersyjnych, które często wskazują na obecność wkładek słabszego podłoża – sytuacji szczególnie groźnych w kontekście wystąpienia przebiecia hydraulicznego lub niekontrolowanego osiadania konstrukcji wału. Rozdzielczość pozioma techniki MASW jest zbliżona do połowy długości

rozstawu pomiarowego, więc jest kilkukrotnie mniejsza od rozdzielczości SRT, jednak metoda ta pozwala na wykrycie małoskalowych zmian V_s w korpusie wału, wywołanych zniszczeniami i niejednorodnością materiału.

Szczególnie korzystną cechą metody MASW jest fakt, że mierzony parametr (V_s) jest bezpośrednio przekładalny na wartości zagęszczenia (stopień i współczynnik zagęszczenia). Wartości stopnia i współczynnika zagęszczenia są już coraz powszechniej zastępowane przez bardziej obiektywny parametr V_s , także do projektowania budynków, turbin wiatrowych itp. (patrz: American Society [...], 2005).

Fale poprzeczne (fala S) nie rozchodzą się w wodzie. W przypadku zawodnionego ośrodka gruntowego fala przenoszona jest przez szkielet mineralny, a nie medium (wodę) wypełniające przestrzeń międzyziarnową. Skutkuje to tym, że w przypadku ośrodka zawodnionego można określić parametry mechaniczne podłoża, a położenie zwierciadła wód gruntowych nie wpływa na mierzone wartości. Metoda jest także czuła nawet na cienkie warstwy, w których występuje upłynnienie materiału – fala S nie propaguje przez taki ośrodek gruntowy (jej prędkość spada do zera). Obie te cechy są szczególnie korzystne w przypadku rozpoznania stanu wałów przeciwpowodziowych oraz ich podłoża.

Optymalizacja techniki MASW, w szczególności dobór odpowiednich rozstawów geofonów i kroku pomiarowego oraz częściowa automatyzacja akwizycji, może przyczynić się do wielokrotnego przyspieszenia tempa badań terenowych, co pozwoliłoby na standardowe wykonywanie pomiarów MASW do diagnozowania stanu technicznego wałów.

Zdaniem autorów, zastosowanie wysokorozdzielczych metod sejsmicznych, wspartych obrazowaniem elektrooporowym, dałoby najbardziej obiektywny obraz geofizyczny wałów przeciwpowodziowych. Metodę MASW można dostosować do stosunkowo szybkiej akwizycji długich odcinków wałów i wykonywać ją jako badania standardowe. Także zastosowanie zmodyfikowanej metody określania oporności pozwoliłoby znacznie przyspieszyć tempo badań.

LITERATURA

- AMERICAN SOCIETY of Civil Engineers and Structural Engineering Institute. 2005 – Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. NO. 1 (ASCE 7-05).
- BESTYŃSKI Z. & THIEL K. 2005 – Geophysical investigations of the Carpathian slide slopes. Proceedings of the Conference Mass Movements Hazard and Various Environments. Pol. Geol. Inst., Spec. Pap., 20: 35–39.
- BORYS M. & MOSIEJ K. 2003 – Wytyczne wykonywania ocen stanu technicznego i bezpieczeństwa wałów przeciwpowodziowych. Wyd. IMUZ Falenty: 1–89.
- FAJKLEWICZ Z. 2007 – Grawimetria stosowana. Wyd. Nauk. AGH w Krakowie: 1–432.
- GOŁĘBIEWSKI T. 2010 – Velocity analysis in the GPR method for loose-zones detection in the river embankments, XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, 21–25 June 2010, Lecce, Italy, Materiały konferencyjne: 428–433.
- GOŁĘBIEWSKI T., TOMECKA-SUCHOŃ S. & FARBISZ J. 2012 – Zastosowanie kompleksowych metod geofizycznych do nieinwazyjnego badania stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. Sympozjum Europejskie – Współczesne problemy ochrony przeciwpowodziowej. Paris–Orleans 28–30.03.2012. Materiały konferencyjne: 1–8.
- INAZAKI T., 2002 – Utilization of S-wave Land Streamer surveying for the high resolution profiling of levees. 106th SEGJ Conference. Materiały konferencyjne: 55–58.
- ISIAKA A.I., OSAZUWA I.B. & LAVAL K.M. 2012 – 2D seismic refraction tomography investigation of a sewage treatment site. J. Environ. Earth Sci., 2 (10): 1–14.
- JACOBY W. & SMILDE P.L. 2009 – Gravity Interpretation. Fundamentals and Application of Gravity Inversion and Geological Interpretation. Springer. 1–413.
- KARCZEWSKI J. 2007 – Zarys metody georadarowej. Uczelniane Wyd. Nauk.-Dyd. AGH, Kraków: 1–246.
- KONDRACKI J. 2002 – Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- KOWALSKA A., KONDRACKA M. & MENDECKI M.J. 2012 – VLF mapping and resistivity imaging of contaminated Quaternary formations near to “Panewniki” coal waste disposal (Southern Poland). Acta Geodynam. Geomater., 9, 4 (168): 473–480.
- LOKE M.H. 2000 – Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: 1–59.
- MAKOWSKA A. 1987 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1: 50 000; arkusz Elbląg północ. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- NOWAK J. 1956 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50000; arkusz Pułtusk. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- PARK C.B. & MILLER R.D. 2004 – MASW to map shear-wave velocity of soil. KGS Open – file Report 2004-30. Kansas Geol. Surv.: 1–21.
- OSTROWSKI S. & PACANOWSKI G. 2011 – Płytkie badania geofizyczne z wykorzystaniem sejsmiki inżynierskiej oraz tomografii elektrooporowej. Biul. Państw. Inst. Geol., 446: 215–224.
- OSTROWSKI S., LASOCKI M. & PACANOWSKI G. 2010 – Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping. 72nd EAGE Conference & Exhibition. Conference Abstracts.
- OSTROWSKI S., RYBAK-OSTROWSKA B. & LASOCKI M. 2013 – Wykorzystanie przypowierzchniowych badań geofizycznych w rozpoznaniu budowy geologicznej na przykładzie stref osuwiskowych w Karpatach. Prz. Geol. 61 (1): 67–73.
- SHEEHAN J.R., DOLL W.E., WATSON D.B. & MANDELL W.A. 2005a – Application of seismic refraction tomography to Karst Cavities. [W:] Kuniansky E.L. (red.). U.S. Geological Survey Karst Interest Group proceedings, Rapid City, South Dakota, September 12–15, 2005: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5160: 29–38.
- SHEEHAN J. R., DOLL W. E. & MANDELL W. 2005b – An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis. J. Environ. Engineer. Geoph. 10: 21–34.
- SHIMA H., TEXIER B., KOBAYASHI T. & HASEGAWA N. 1995 – Fast imaging of shallow resistivity structures using a multichannel capacitive electrode system. 65th Ann. Internat. Mtg: Soc. Expl. Geophys. Materiały konferencyjne: 377–380.
- TIMOFEEV V.M., ROGOZINSKI A.W., HUNTER J.A. & DOUMA M. 1994 – A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics. International Conference SAGEEP, EEGS Materiały konferencyjne: 701–715.
- WATANABE T., MATSUOKA T. & ASHIDA Y. 1999 – Seismic traveltome tomography using Fresnel volume approach. SEG Expanded Abstracts 18, s. 1402.
- YAMASHITA Y., GROOM D., INAZAKI T. & HAYASHI K. 2004 – Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system: OhmMapper. 7th SEGJ International Symposium – Imaging Technology 24–26.11.2004 Sendai, Japan. Abstrakt dostępny na www.segji.org.
- ZHDANOV M.S. & KELLER G.V. 1994 – The geoelectrical methods in geophysical exploration. Elsevier: 1–873.