

ZASTOSOWANIE KOMPLEKSOWYCH METOD GEOFIZYCZNYCH DO NIEINWAZYJNEGO BADANIA STANU TECHNICZNEGO WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH

GOŁĘBIEWSKI T.¹, TOMECKA-SUCHOŃ S.¹, FARBISZ J.²

¹Akademia Górniczo-Hutnicza – Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska – Katedra Geofizyki
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tomgoleb@agh.edu.pl; tomecka@agh.edu.pl

²Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych – Oddział we Wrocławiu
Al. Jaworowa 19, 53-122 Wrocław; j.farbisz@pbg.com.pl

Streszczenie : W artykule przedstawiono możliwość zastosowania wybranych technik geofizycznych do detekcji i monitoringu rozkładu stref niebezpiecznych rozluźnień w wałach przeciwpowodziowych. Standardową na dzień dzisiejszy techniką badania stanu technicznego wałów jest wiercenie otworów i laboratoryjna analiza pobranych z nich próbek oraz punktowe badania geotechniczne. Obie metody badań dają jedynie informacje punktowe o stanie technicznym badanego wału, a przy dużych odległościach pomiędzy punktami wierceń i sondowań informacje te są bardzo ubogie. Nowoczesnym uzupełnieniem badań punktowych mogą być techniki geofizyczne, które dostarczają informacji ciągłych o rozkładzie stref rozluźnień w wałach przeciwpowodziowych. Ważnym aspektem badań geofizycznych jest ich nieinwazyjność, niskie koszty i relatywnie krótki czas uzyskania informacji przestrzennej o stanie technicznym badanych wałów. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań geofizycznych prowadzonych na obwałowaniach rzeki Wisły w rejonie Krakowa oraz Odry w rejonie Wrocławia. Badania prowadzono przy pomocy metod: georadarowej, obrazowania elektrooporowego oraz profilowania elektromagnetycznego. Profile pomiarowe zaprojektowano pomiędzy punktami, w których wykonano wiercenia i sondowania dynamiczne, co pozwoliło na korelację informacji geofizycznych i geotechnicznych. Klasyczna technika pomiarowa w metodzie georadarowej (GPR) relatywnie rzadko daje pozytywne wyniki w badaniu stanu technicznego wałów; wynika to z faktu dużego tłumienia fal elektromagnetycznych w glinach, które stanowią główny budulec wałów ziemnych. W artykule pokazano nowatorskie rozwiązania dla metody GPR, które znacząco ułatwiły interpretację echogramów.

Mots-Clés : Wały przeciwpowodziowe, GPR, obrazowanie elektrooporowe, profilowanie elektromagnetyczne

Abstract : The possibility of using of selected geophysical methods for detection and monitoring of dangerous loose zones in the river embankments was presented in the paper. Presently, standard technique for examination of technical conditions of the river embankments is drilling of boreholes and laboratory analysis of ground samples taken from the boreholes. Additionally geotechnical soundings are carrying out in selected points on the embankment. Both mentioned techniques deliver only punctual information about technical condition of examined embankment and if distances between boreholes and points of geotechnical soundings are large such information is very poor. Modern supplementation of standard, punctual techniques might be geophysical methods which deliver continuous information about technical condition of the river embankments. Important aspects of geophysical methods are: low costs of measurements, relatively short time needed for gathering of spatial information about technical condition of examined embankment and first of all these methods are non-invasive. Selected results of geophysical surveys carried out on the embankments of Vistula river in Cracow and Odra river in Wrocław were presented in the paper. Terrain surveys were conducted using the following methods: GPR, resistivity imaging and electromagnetic profiling. Measurement profiles were designed between boreholes and points of geotechnical soundings which allowed to correlate geophysical and geotechnical information. Standard measurement technique in georadar (GPR) method relatively seldom delivers positive results from surveys conducted on the river embankments; it is caused by high attenuation of electromagnetic wave in the clays which are the main component of ground embankments. New concept of GPR surveys and data processing was presented in the paper which allowed the easier interpretation of radargrams.

Keywords : River embankments, GPR, resistivity imaging, electromagnetic profiling

Wstęp

O tym, jak ważna jest stabilność i odporność na przesiąkanie wałów przeciwpowodziowych, przekonaaliśmy się podczas ostatnich powodzi, które nawiedzały Polskę w 1997 i 2010 roku.

W czasie wspomnianych powodzi, jak również podczas okresowych wyższych stanów wód odnotowywano przerwania oraz liczne przesiąkania i podsiąkania wałów, co wskazuje, że duże odcinki tych obiektów hydrotechnicznych wymagają gruntownej modernizacji; niestety nie ma na to wystarczających funduszy. W tej sytuacji prawidłowa identyfikacja odcinków, które powinny być naprawiane w pierwszej kolejności, staje się problemem istotnym, biorąc pod uwagę ewentualne straty materialne oraz zdrowie i życie ludzi.

Standardową na dzień dzisiejszy techniką badania stanu technicznego wałów jest analiza laboratoryjna próbek pobranych z rzadkiej sieci otworów oraz punktowe badania geotechniczne, wykonywane najczęściej techniką sondowania dynamicznego. Obie metody badań dają jedynie informacje punktowe o stanie technicznym badanego wału, a przy dużych odległościach pomiędzy punktami wierceń i sondowań informacje te są bardzo ubogie (Fig. 1) i w skrajnych sytuacjach mogą prowadzić do niepoprawnej interpretacji, co pokazano na przykładach zamieszczonych w dalszej części artykułu. Oczywiście można byłoby zwiększyć dokładność badań klasycznych poprzez zagęszczenie miejsc sondowań i odwiertów. Jednak z punktu widzenia ekonomii badania w gęstej sieci otworów (np. co kilka metrów) stają się nieopłacalne.

Nowoczesnym rozwiązaniem problemu ciągłego monitoringu stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych mogą być metody geofizyczne, które są znacznie szybsze od technik klasycznych, relatywnie tanie, a co najważniejsze są badaniami nieinwazyjnymi, co ma kluczowe znaczenie w badaniu konstrukcji, które z natury muszą być szczelne (np. wały). Dużym atutem metod geofizycznych jest dostarczanie informacji o rozkładzie anomalii w badanym ośrodku z dokładnością centymetrów, a w skrajnych przypadkach metrów.

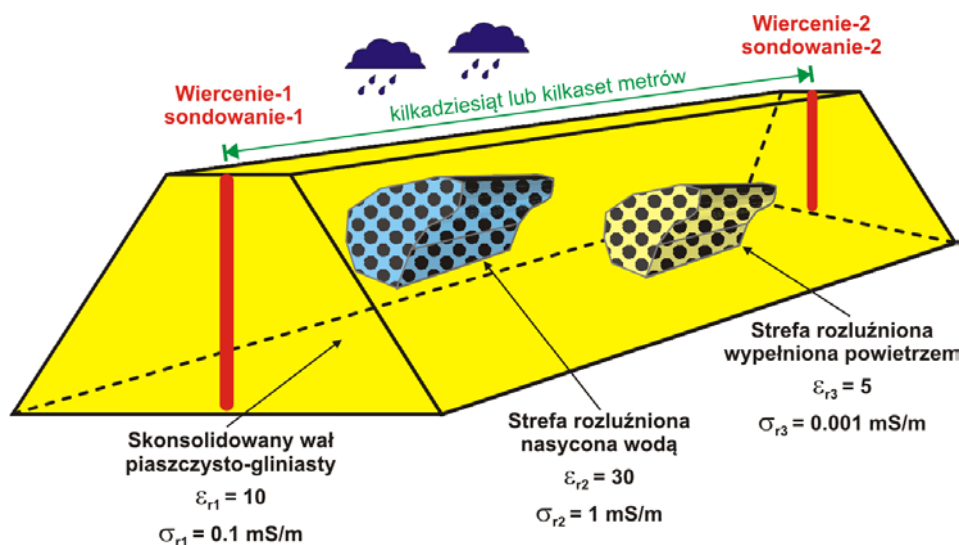


Fig. 1. Przykład niedostatecznego rozpoznania stanu technicznego wału klasycznymi technikami punktowymi (wiercenia, sondowania) oraz zmiany parametrów elektromagnetycznych w różnych częściach wału

Rozluźnione (zniszczone) części wałów przeciwpowodziowych, charakteryzować się będą większą porowatością w stosunku do części lepiej skonsolidowanych, a więc cechować się będą niską wartością współczynnika zagęszczenia I_D [-]. Niska wartość I_D będzie wskaźnikiem miejsc w wale, gdzie w rozluźnieniach będą mogły znajdować się wody wsiąkowe (z opadów i topnienia śniegu) lub powietrze. Obecność tych mediów w przestrzeni porowej wpłynie na zmianę w badanym ośrodku parametrów elektromagnetycznych (Fig. 1), tj. względnej stałej dielektrycznej ϵ_r [-] oraz elektrycznej przewodności właściwej σ [S/m], która jest odwrotnością oporności właściwej ośrodka ρ [Ω m].

Tworzenie się kontrastów (różnic) parametrów elektromagnetycznych pomiędzy zniszczoną a skonsolidowaną częścią wału, zwłaszcza po opadach (Fig. 1), daje duże szanse na wykrycie stref rozluźnień przy pomocy wybranych metod geofizycznych. Odpowiednie formuły matematyczne

i wyniki badań petrofizycznych, potwierdzające istnienie wspomnianych kontrastów parametrów elektromagnetycznych, przedstawiono m.in. w artykułach [1] i [2].

Spośród szerokiej gamy technik pomiarowych stosowanych w geofizyce, optymalnymi do detekcji stref rozluźnień w wałach przeciwpowodziowych są techniki bazujące na zmianach opisanych parametrów elektromagnetycznych, tj. metoda georadarowa (GPR - ang. *Ground Penetrating Radar* lub *Ground Probing Radar*), obrazowanie elektrooporowe nazywane również tomografią elektrooporową oraz profilowania elektromagnetyczne nazywane konduktometrią.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań z zastosowaniem wymienionych technik geofizycznych, przeprowadzonych po powodzi w 2007r. na obwałowaniach Odry w rejonie Wrocławia [3] oraz po powodzi w 2010r. na wałach wiślanych w Krakowie [4].

1. Podstawy teoretyczne zastosowanych technik geofizycznych

Metoda georadarowa (GPR) jest techniką geofizyczną wykorzystującą fale elektromagnetyczne do rozpoznania budowy geologicznej i poszukiwania naturalnych i antropogenicznych obiektów podziemnych. W zależności od rozmiarów poszukiwanych obiektów jak również w zależności od przyjętej głębokości poszukiwań stosuje się anteny pomiarowe o różnych konstrukcjach i częstotliwościach. Jedną z technik pomiarowych stosowanych w metodzie GPR jest krótko-offsetowe profilowanie refleksyjne. Przez pojęcie „offset” określana jest odległość pomiędzy anteną nadawczą i odbiorczą, która w przypadku badań krótko-offsetowych wynosi najczęściej od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów. W niestandardowych badaniach georadarowych (tzw. pomiary zmienno-offsetowe) wykorzystuje się offsety rzędu kilku i kilkunastu metrów. Podczas profilowania refleksyjnego obie anteny przesuwają się wzdłuż profili, gdzie antena nadawcza emituje w głąb badanego ośrodka fale elektromagnetyczne, natomiast antena odbiorcza rejestruje fale odbite od granic geologicznych i obiektów podziemnych. Odbicie fali zachodzi w miejscach, gdzie zmienia się znacząco w badanym ośrodku wartość względnej stałej dielektrycznej ϵ_r . W innej technice pomiarowej, tzn. w technice tomograficznej, antena nadawcza przemieszcza się w jednym otworze emitując fale elektromagnetyczne, natomiast antena odbiorcza przemieszczana jest w drugim otworze rejestruje tzw. fale bezpośrednie. Analizując czasy przejścia oraz zmiany amplitud dla fal bezpośrednich konstruuje się w odpowiedni sposób mapy rozkładu prędkości i tłumienia w strefie między otworami. Wyniki pomiarów, tzw. echogramy lub mapy poddaje się odpowiedniemu, cyfrowemu przetwarzaniu i wizualizacji w celu jak najlepszego wydobywania z rejestracji użytecznych informacji.

W metodzie obrazowania elektrooporowego (ERT) wykorzystuje się przepływ prądu elektrycznego w ośrodku geologicznym pomiędzy elektrodami zasilającymi, natomiast pomiar polega na mierzeniu różnicy potencjałów lub gradientu potencjału pomiędzy elektrodami pomiarowymi. W metodzie ERT wbija się do gruntu wzdłuż profilu pomiarowego kilkadziesiąt małośrednicowych elektrod (tj. prętów ze stali nierdzewnej) o długościach najczęściej kilkudziesięciu centymetrów. Poprzez odpowiednie zaprogramowanie procesu pomiarowego, komputer sterujący aparaturą odpowiednio wybiera, które spośród kilkudziesięciu elektrod mają być w danym momencie pomiaru elektrodami prądowymi, a które pomiarowymi i wykonywany jest pojedynczy pomiar. Poprzez komputerowe sterowanie pomiarem wybierane są różne kombinacje elektrod, a w efekcie wykonywana jest bardzo duża ilość pojedynczych pomiarów, w celu przeprowadzenia pełnej akwizycji danych, czyli dla wyczerpania wszystkich możliwych kombinacji elektrod pomiarowych i prądowych. Na etapie komputerowego opracowania wyników składa się wszystkie pojedyncze pomiary razem, a korzystając z prawa Ohma oraz z algorytmów inwersyjnych, wykonuje się obrazowanie rozkładu oporności ośrodka ρ , w badanym rejonie. Przepływ prądu elektrycznego w badanym ośrodku oraz mierzone różnice potencjałów czy gradientu potencjału na elektrodach pomiarowych będą zmienne w różnych fragmentach ośrodka

i będą zależeć od zmiany oporności elektrycznej ρ , które to zmiany związane będą ze zmianami w budowie geologicznej i obecnością różnych ciał i stref anomalnych.

Badania techniką profilowania elektromagnetycznego (EMP) polegają na wytworzeniu w badanym ośrodku pola elektromagnetycznego przez cewkę nadawczą i pomiarze przez cewkę odbiorczą wtórnego pola. Pomiar prowadzi się konduktometrem, w którym cewki (nadawcza i odbiorcza) przemieszczają się wzdłuż profilu równocześnie ze stałym offsetem i zawsze w czasie pomiaru są ustawione współpłaszczyznowo, albo pionowo albo poziomo. Konduktometr mierzy pozorną przewodność elektryczną ośrodka, a głębokość penetracji pola elektromagnetycznego zależy od: częstotliwości cewek, przewodności elektrycznej ośrodka, offsetu oraz orientacji cewek. Na etapie komputerowej analizy rejestracji wykorzystuje się algorytm inwersji jednowymiarowej, w którym uwzględnia się różne offsety, częstotliwości i orientacje cewek i w efekcie uzyskuje się rozkład przewodności elektrycznych σ w badanym ośrodku, który to rozkład jest zależny od typu i położenia anomalii w badanym ośrodku.

2. Badania geofizycznych na obwałowaniach Wisły w Krakowie

Do przeprowadzenia badań geofizycznych wybrano fragment wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie elektrociepłowni na Łęgu i Lasku Łagowskiego w Krakowie (Fig. 2). Informacje z punktów sondowań dynamicznych wskazywały, że wał w rejonie badań jest silnie rozluźniony (Fig. 2 – wartości współczynnika I_D).

Badania geofizyczne na omawianym fragmencie wału wiślanego przeprowadzono przy pomocy metody georadarowej, gdzie wzdłuż profilu nr 1 prowadzono klasyczne pomiary techniką refleksyjną, natomiast wzdłuż profilu nr 2 zastosowano niestandardowe badania zmienno-offsetowe. Wyniki badań, w formie rozkładu energii sygnałów GPR dla profilu nr 1 pokazano na Fig. 3, natomiast w formie rozkładu amplitud refleksów (tzn. rejestracji dla fal odbitych) na Fig. 4. Echogramy normalizowano do max. amplitudy tzw. bezpośredniej fali powietrznej, co pozwoliło pominąć na figurach skalę kolorów.

Rzadka sieć otworów i punktów sondowań w rejonie badań (Fig. 2) nie daje możliwości lokalizacji małych stref silnie rozluźnionych, zaznaczających się na echogramach na Fig. 3 jako obszary zaznaczone kolorem fioletowym i czerwonym. Dodatkowo na Fig. 3B widać pionową strefę naruszenia struktury korpusu wału w wyniku odwiercenia otworu WL11F, co potwierdza tezę przedstawioną we wstępie do artykułu, że zagęszczanie otworów z jednej strony dostarczy oczywiście dokładniejszych informacji o stanie technicznym wału, z drugiej zaś strony niestety znacząco naruszy strukturę korpusu wału.

Rozkład anomalii na Fig. 3 pokazuje jeszcze jeden niedostatek badań punktowych; jeśli otwory badawcze czy punkty sondowań zaprojektowane zostałyby w miejscach lepiej skonsolidowanych, np. na „x” równym 20m, 120m i 240m (Fig. 3), to interpretacja, że wał na tym odcinku jest w dobrym stanie technicznym byłaby całkowicie błędna.

Często, gdy w korpusie wału dominuje materiał ilasty z małym udziałem materiału piaszczystego, jak ma to na przykład miejsce w rejonie otworu WL12 (Fig. 2), klasyczna krótko-offsetowa technika refleksyjna rzadko daje pozytywne wyniki badań (Fig. 4A). W takich sytuacjach znacznie lepsze wyniki uzyskuje się dla badań zmienno-offsetowych (Fig. 4B), co dokładnie przeanalizowano w pracach [1] i [5]. Na Fig. 4B nie zamieszczono skali głębokościowej, ponieważ głębokość wyznacza się na podstawie analizy modelu dwuwarstwowego.

W przypadku, gdy wał ma dużą wysokość i nie można z poziomu korony wału przebadać technikami geofizycznymi zarówno korpusu jak i podłoża wału, należy przeprowadzić profilowania przy stopie wału od strony odpowietrznej i odwodnej oraz wykonać badania w technice tomografii georadarowej wraz z uzupełniającymi badaniami techniką tomografii sejsmicznej.

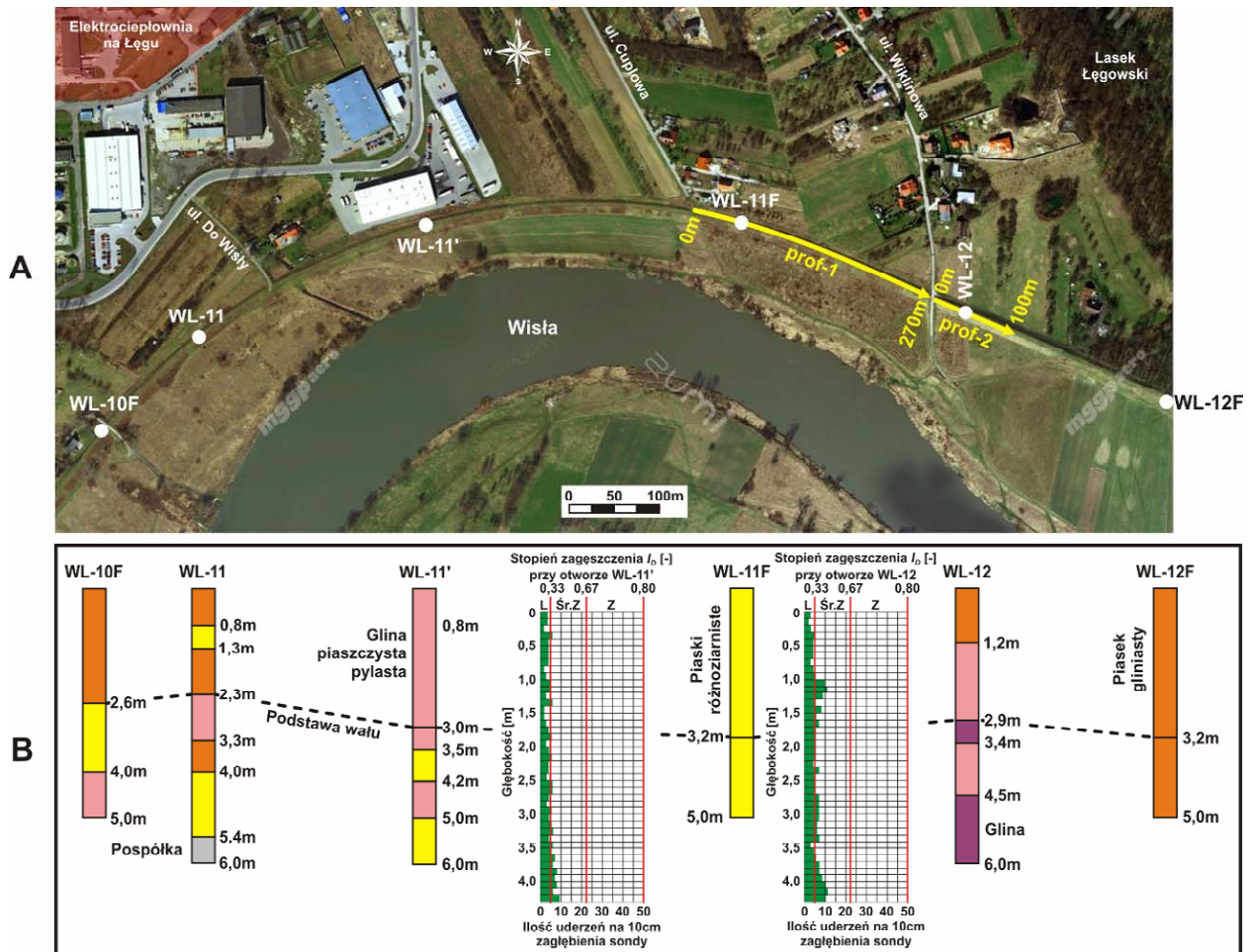


Fig. 2. A) Rejon badań georadarowych, B) Informacje z otworów oraz z sondowań dynamicznych

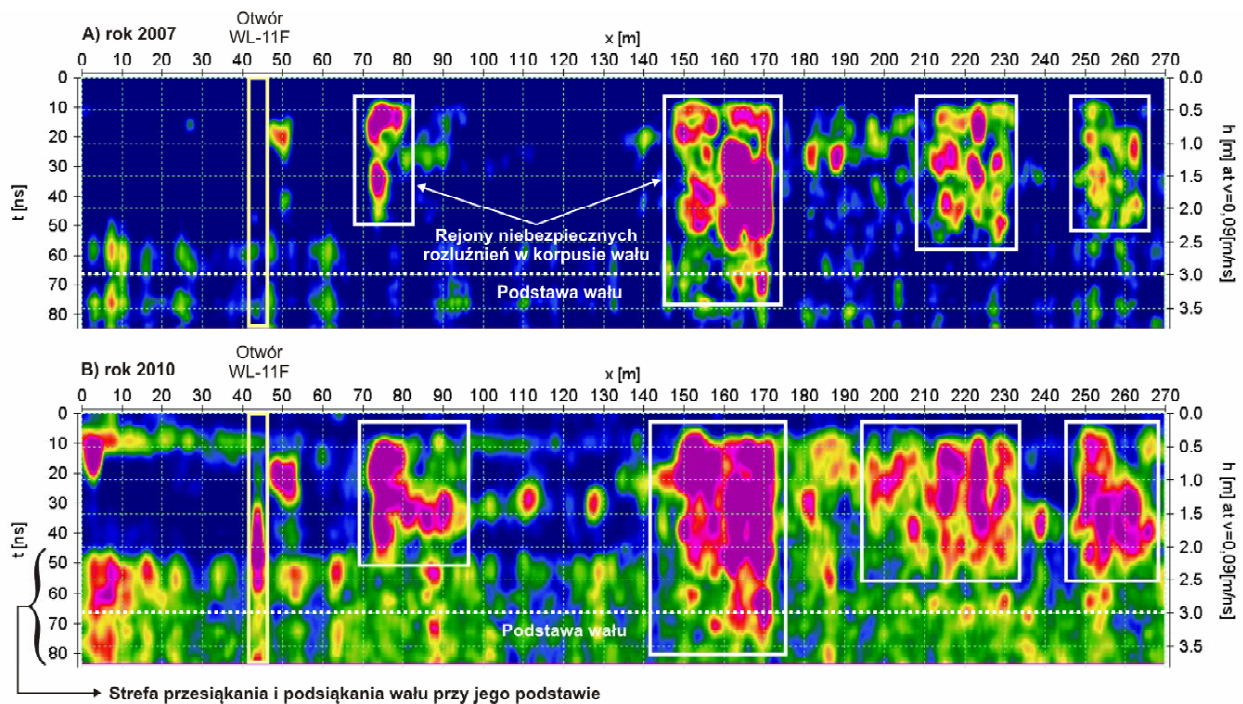


Fig. 3. Wyniki badań GPR wzdłuż profilu nr 1: A) jesień 2007 po opadach, B) maj 2010, kilka dni po powodzi

Na Fig. 4C pokazano metodykę badań w technice tomograficznej, natomiast na Fig. 4D przedstawiono przykładową mapę zmienności prędkości fali elektromagnetycznej w rejonie międzyotworowym, uzyskaną z badań tomograficznych.

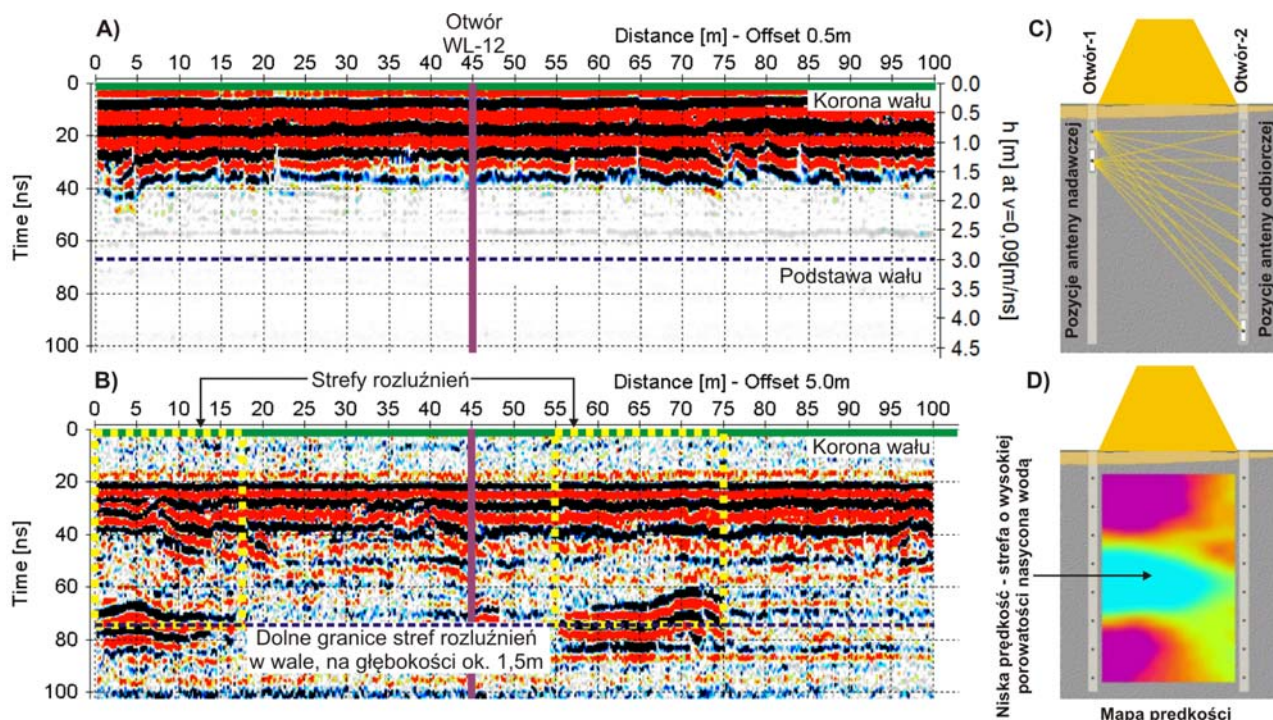


Fig. 4. Wyniki badań georadarowych wzdłuż profilu nr 2, technikami: A) krótko-offsetową, B) szeroko-offsetową. Technika georadarowych badań tomograficznych (C) oraz uzyskiwana dla tej techniki mapa rozkładu prędkości (D)

Strefa obniżonej prędkości na Fig. 4D będzie wskazywać na istnienie rejonu o podwyższonej porowatości, który może być przyczyną podsiąkania wału. Badania prędkościowe można również zastosować dla pomiarów prowadzonych po koronie wału, co opisano w pracy [2].

3. Badania geofizycznych na obwałowaniach Odry w rejonie Wrocławia

Badania geofizyczne na obwałowaniach Odry realizowano przy pomocy techniki obrazowania elektrooporowego (Fig. 5A) w rejonie Nowej Soli (Fig. 6A) oraz przy pomocy profilowania elektromagnetycznego - konduktometrii (Fig. 5B) w rejonie wsi Łomy (Fig. 6B).

Na Fig. 5 przedstawiono wybrane wyniki badań technikami ERT i EMP wraz z umieszczeniem pod rejestracjami wyników interpretacji geologiczno-inżynierskiej. Wyniki interpretacji zamieszczono również na Fig. 6B odpowiednimi kolorami wraz z opisem, natomiast punkty o różnych kolorach na Fig. 6A oznaczają odpowiednio: kropka czerwona – osłabienia korpusu wału korzeniami drzew, k. zielona – rampy wałowe, k. różowa - bunkry w korpusie wału, k. niebieska – ścieżki pieszce, k. ciemno-szara – starorzecza, k. zielona – mechaniczne uszkodzenia wałów, k. jasno-szara – nory zwierząt.

Wyniki badań techniką obrazowania elektrooporowego (Fig. 5A) wskazują na istnienie w centralnej części profilu strefy wysokooporowej, którą zinterpretowano jako rejon z dużą zawartością piasków w korpusie wału. Trudno odpowiedzieć na pytanie dlaczego wał w tym rejonie został zbudowany lub wyremontowany przy użyciu piasku, cechującego się małą spoistością, co w przypadku powodzi może spowodować łatwe wymycie materiału z korpusu wału i w efekcie przerwanie wału w tym miejscu. Obecność w podłożu utworów cechujących się niską wartością oporności (Fig. 5A) i obrazujących się w formie ośrodka jednorodnego pozwala domniemywać, że nie powinny pojawiać się podsiąkania wału w analizowanym rejonie.

Wyniki badań konduktometrycznych (Fig. 5B) zostały przeliczone z rozkładu przewodności na rozkład oporności dla zunifikowania wyników. Wyniki na Fig. 5B wskazują jednoznacznie, że w badanym rejonie korpus wału zbudowany jest z materiału sypkiego i mało spoiowego, co może spowodować przy podwyższonym stanie wód łatwe przesiąkanie korpusu wału, a w skrajnych sytuacjach nawet przerwanie wału, przede wszystkim w centralnej części profilu.

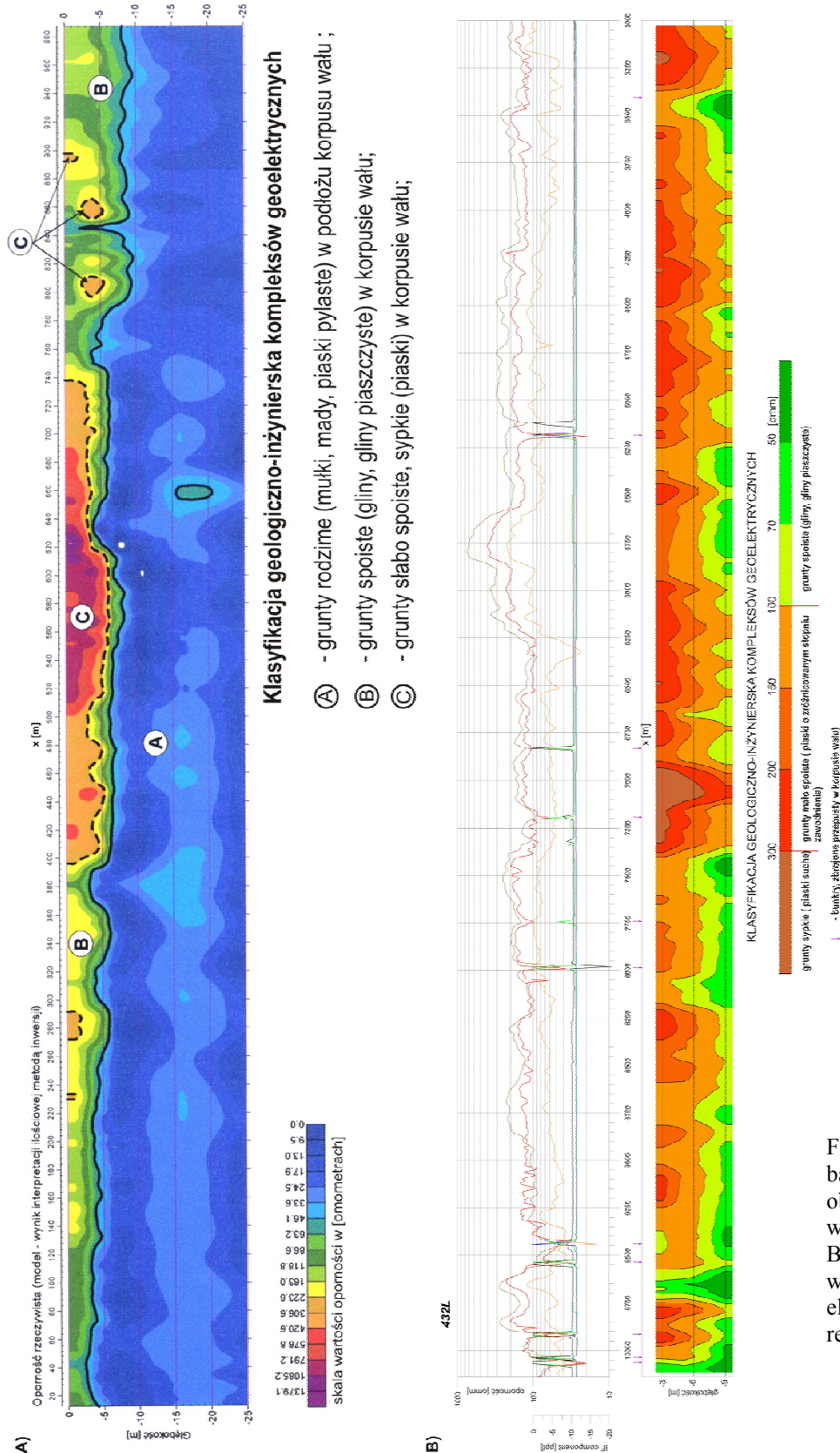


Fig. 5. A) Przykładowy wynik badania wału technika obrazowania elektrooporowego w rejonie Nowej Soli, B) Przykładowy wynik badania wału techniką profilowania elektromagnetycznego w rejonie wsi Łomy

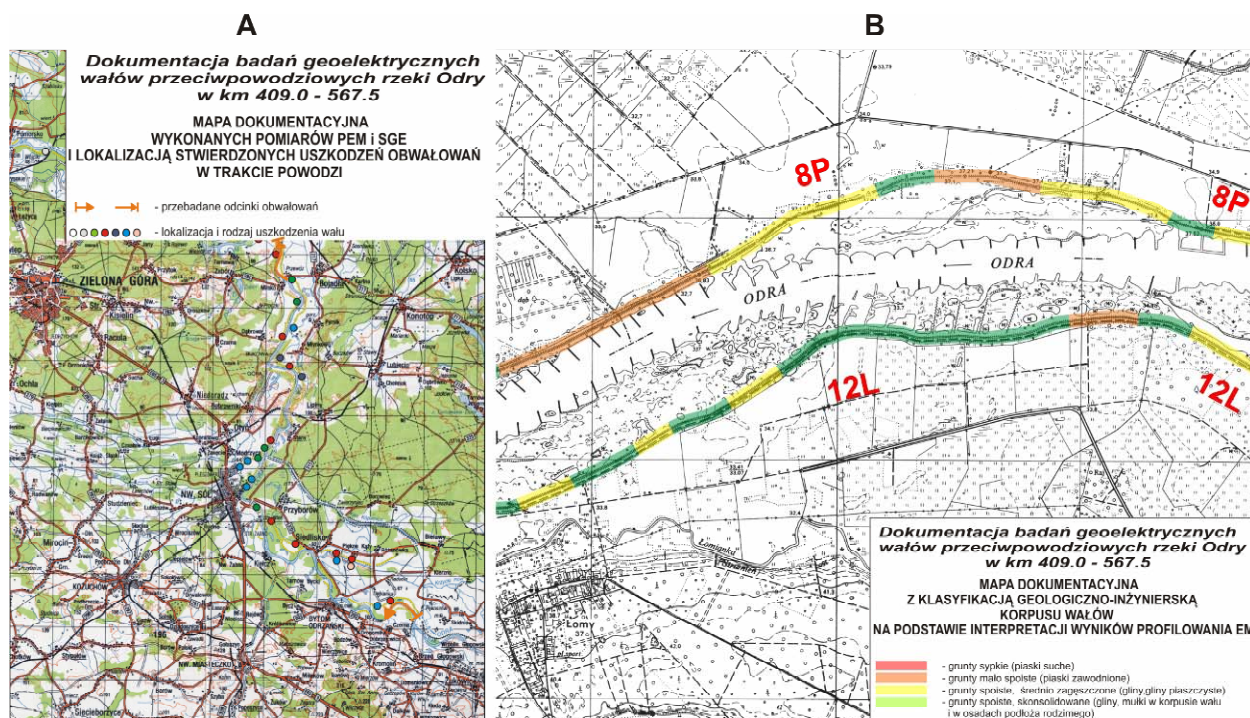


Fig. 6. A) Rejon badań techniką obrazowania elektrooporowego, B) Rejon badań techniką konduktometryczną

Conclusion

Nowoczesna metodyka oceny stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych, jak również innych obiektów hydrotechnicznych, powinna być realizowana zgodnie ze schematem:

- Rekonesansowe badania geofizyczne, które pozwolą na wyznaczenie najważniejszych stref anomalnych w wałach i ich podłożu; badania powinny być realizowane z użyciem metody GPR (w technice refleksyjnej) oraz konduktometrycznej;
- Uzupełniające badania geofizyczne w miejscach, wytypowanych na podstawie badań rekonesansowych; badania powinny być prowadzone przy pomocy techniki obrazowania elektrooporowego, mikro-grawimetrii oraz z użyciem specjalistycznych technik georadarowych i sejsmicznych;
- Wiercenia geologiczne, badania laboratoryjne próbek z odwiertów oraz badania geotechniczne w miejscach, wytypowanych na podstawie badań geofizycznych;
- Projekt techniczny sposobu naprawy, wzmocnienia, rekonstrukcji wybranych, newralgicznych fragmentów wałów, sporządzony w oparciu o wyniki badań geofizycznych, geologicznych, geotechnicznych i laboratoryjnych.

BIBLIOGRAFIA

- Marcak H., Gołębiowski T., Tomecka-Suchoń S., Analiza możliwości wykorzystania georadarowych fal refrakcyjnych do lokalizacji zmian w budowie wałów przeciwpowodziowych, *Kwartalnik AGH Geologia*, Tom 31, No. 3-4, 2005, str. 259–274.
- Gołębiowski T., Velocity analysis in the GPR method for loose-zones detection in the river embankments, *Proc. of XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*, 21–25 June 2010, Lecce, Italy, pp. 428–433.
- Farbisz J., Badania geofizyczne wałów przeciwpowodziowych Odry po powodzi 1997r., *Materiały sympozjum "Metody geofizyczne – skuteczna pomoc w ocenie stanu środowiska przed i po powodzi"*, 15 lipiec 2010, AGH WGGiOŚ, Kraków – materiał niepublikowany.
- Gołębiowski T., Ocena stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych przy pomocy metody GPR, *Materiały sympozjum "Metody geofizyczne – skuteczna pomoc w ocenie stanu środowiska przed i po powodzi"*, 15 lipiec 2010, AGH WGGiOŚ, Kraków – materiał niepublikowany.
- Gołębiowski T., Changeable-offset GPR profiling for loose zones detection in the levees, *Proc. of 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 15–17 September 2008, Cracow, Poland, pp. 1–5.