

ZASTOSOWANIE METOD GEOFIZYCZNYCH PRZY ROZPOZNAWANIU WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH W ŚWIETLE WYNIKÓW PRAC EKSPERYMENTALNYCH

UKD 550.83:627.514

Jedno z zagrożeń naturalnego środowiska przyrodniczego stanowią powodzie. Katastrofy powodziowe od wieków bowiem stanowiły i nadal stanowią zagrożenie nie tylko dla życia ludzkiego, ale również dla całej przyrody ożywionej i infrastruktury terenów dolinnych. W miarę postępującego uprzemysłowienia i rozwoju gospodarczego przynoszą one coraz to większe straty. O wadze tego problemu w naszym kraju niech świadczy chociażby to, że powierzchnia terenów zagrożonych powodziami wynosi ok. 17 000 km², a średnia roczna wartość strat powodziowych za ostatnie 10 lat wyniosła ok. 22 mld zł w cenach 1986 r., przy czym maksymalne roczne straty z 1980 r. wyniosły aż 92 mld zł (5). Poznanie przyczyn tych katastrof, a następnie odpowiednie zapobieganie tym klęskom to jedno z ważnych zadań współczesnej nauki, techniki i działalności gospodarczej.

Z analizy dotychczasowych katastrof powodziowych wynika, że w ok. 50% przypadków przyczyny ich występowania związane były z określonym stanem wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża bądź też z odpowiednimi zjawiskami w nich występującymi. Dla zapobiegania tym katastrofom niezbędne jest więc głębsze poznanie przyczyn je powodujących. Uwzględniając powyższe, w pierwszej połowie lat osiemdziesiątych podjęto w kraju eksperymentalne interdyscyplinarne prace w celu zbadania możliwości określania stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża przy zastosowaniu różnych metod i technik. Jedną z tych technik stanowiły

badania geofizyczne zrealizowane przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych.

Wspomniana grupa przyczyn to określone stany wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża umożliwiające wzmoczone przecieki wody doprowadzające w konsekwencji do rozerwania wałów i powodzi. Jako najczęstsze wymienia się 10 rodzajów przyczyn awarii wałów przeciwpowodziowych. Ze szczegółowej analizy tych przyczyn wynika, że do badania 5 z nich może być uzasadnione zastosowanie metod geofizycznych.

Są to następujące faktyczne i potencjalne przyczyny awarii:

- przejście wałów przez starorzecza,
- istnienie rozluźnień i kawern w wale,
- występowanie uprzywilejowanych dróg filtracji,
- występowanie podłoża o różnej ścisłości,
- brak ciągłości uszczelniającej warstwy madowej.

Określenie możliwości metod geofizycznych w badaniu wyżej wymienionych modeli przyczyn awarii wałów realizowano w dwóch etapach. Etap pierwszy to prace studialno-teoretyczne obejmujące konstrukcję prawdopodobnych modeli i wyznaczenie teoretycznych efektów jakie te modele wywołują w różnych polach fizycznych (1). Etap drugi, podstawowy w rozwiązywaniu postawionego problemu, to badania terenowe na wytypowanych odcinkach wałów dwóch polskich rzek, to jest Wisły i Noteci.

Po przeanalizowaniu potencjalnych możliwości, do badań terenowych zastosowano następujące metody:

elektrooporową, sejsmiczną, grawimetryczną i geotermiczną. Prace te miały dać odpowiedź, które metody i w jakim zakresie okażą się przydatne do rozwiązywania powyższych zagadnień. Przedmiotem badań były więc korpusy wałów i ich podłoże do głębokości kilku metrów. Rzutowało to odpowiednio na metodykę tych prac, którą przedstawiono niżej.

METODYKA BADAŃ TERENOWYCH

Badania elektrooporowe

Badania geofizyczne, w tym i elektrooporowe, prowadzono na trzech profilach zlokalizowanych: na koronie w osi wału i przy podstawie wału po obu jego stronach. Podstawowy zakres badań elektrooporowych stanowiły:

– dwupoziomowe profilowanie symetryczne o rozstawach elektrod $A_1 B_1 = 5$ m i $A_2 B_2 = 12$ lub 15 m, zależnie od wysokości wału,

– sondowania w układzie Schlumbergera o maksymalnych rozstawach $AB = 110$ m.

Uzupełnieniem tych prac były mikrosondowania o maksymalnych rozstawach $AB = 21$ m. Profilowania wykonywano na koronie wału i przy jego podstawie, sondowania – tylko na profilach zlokalizowanych przy podstawie wału. Krok profilowań wynosił 5 m, a sondowań 50 m. Mikrosondowania wykonano tylko na wale na wybranych przekrojach poprzecznych: jedno na koronie wału i po jednym do paru na jego zboczach. Oczywiście we wszystkich tych rodzajach prac układy pomiarowe zawsze zorientowane były równolegle do wału.

Badania sejsmiczne

Podstawową formę badań sejsmicznych stanowiły płytkie profilowania refrakcyjne wykonywane na koronie wału i u jego podstawy. Na koronie odległości między geofonami wynosiły 2 m, a między punktami wzbudzenia energii sejsmicznej 22 m, natomiast na profilach u podstawy wału odległości te wynosiły odpowiednio 3 i 33 m. Fale sejsmiczne wzbudzano uderzeniami młota o wadze 7 kg w żelazną płytę ułożoną na powierzchni ziemi. Uzupełniającą formę pomiarów sejsmicznych stanowiły prześwietlenia sejsmiczne wału oraz badanie jego drgań własnych.

Badania grawimetryczne

Pomiary grawimetryczne wykonywano na trzech wymienionych profilach, stosując krok 5 m. Każdy ciąg pomiarowy dowiązywano do punktów podstawowych, przy czym czas nawiązywania pomiarów wynosił ok. 1 godziny.

W celu osiągnięcia wysokiej dokładności, pomiary na wszystkich punktach wykonano dwukrotnie uwzględniając jednocześnie wysokość statywu grawimetru. Dryft stosowanych grawimetrów nie przekraczał $0,05 \frac{\text{mGal}}{\text{godz}}$.

Miarą uzyskanych dokładności tych pomiarów może być średni błąd kwadratowy pojedynczej obserwacji. Otóż wartość tego błędu zmieniała się od $\pm 0,006$ do $\pm 0,016$ mGal.

Badania geotermiczne

Pomiary geotermiczne prowadzono tylko na dwóch profilach zlokalizowanych przy podstawie wału. Pomiary temperatury wykonywano na głęb. 1,5 m w specjalnie w tym celu wykonanych otworach. Krok pomiarów wynosił 5, a niekiedy 10 m. Pomiary temperatury wyko-

nywano precyzyjnym geotermometrem typu GTP-02 o rozdzielności $0,01^\circ\text{C}$.

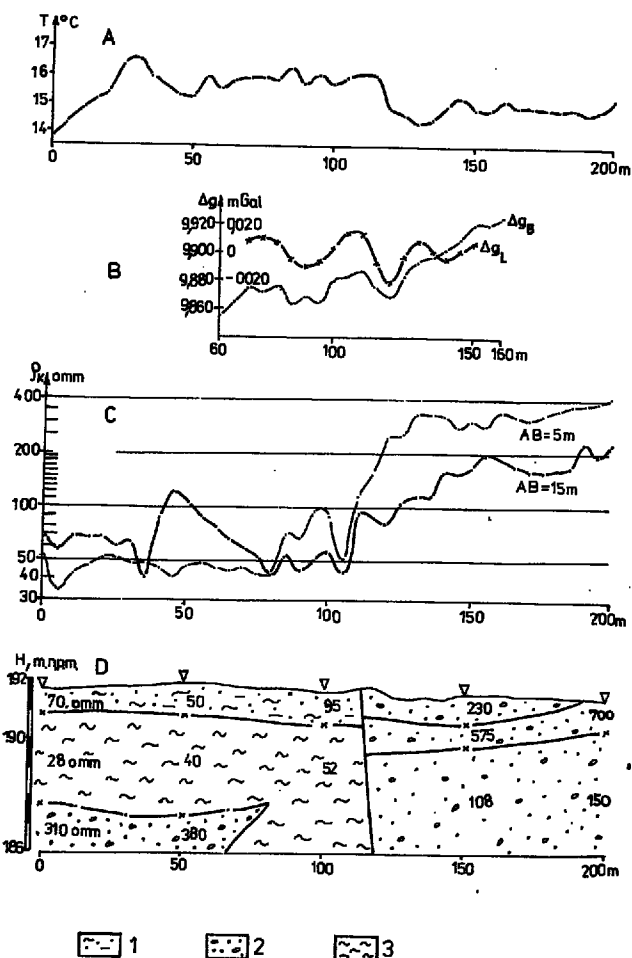
PRZYKŁADY WYNIKÓW BADAŃ

Badania wałów górnej Wisły

Wykonane badania, fragmentów wałów Wisły w rejonie Niepołomic k. Krakowa (2), wykazały silne zróżnicowanie budowy utworów czwartorzędowych stanowiących podłoże wałów, jak i samych wałów na niektórych odcinkach.

Na ryc. 1 przedstawiono wyniki badań elektrooporowych, grawimetrycznych i geotermicznych wykonanych na profilu położonym przy podstawie wału, a więc

PROFIL 6



Ryc. 1. Wyniki kompleksowych badań geofizycznych podłoża wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie Niepołomice; A – wykres zmian pola cieplnego na głębokości 1,5 m; B – wykresy zmian przyspieszenia siły ciężkości: Δg_B – anomalie w redukcji Bouguera, Δg_L – anomalie lokalne; C – wykresy zmian oporu elektrycznego; D – przekrój geoelektryczno-geologiczny

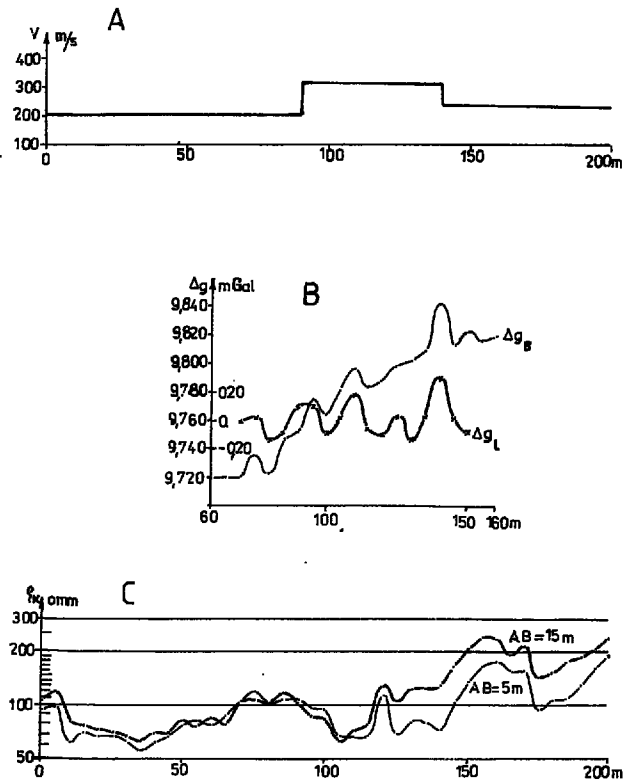
1 – gleba piaszczysta, 2 – piaski, 3 – gliny

Fig. 1. Results of complex geophysical studies of flood embankment basement of Wisła river near Niepołomice; A – diagram of thermal field changes at the depth 1,5 m; B – diagrams of gravity acceleration changes: Δg_B – anomalies in Bouguer reduction, Δg_L – local anomalies; C – diagrams of resistivity changes; D – geoelectric-geological cross-section

1 – sandy soil, 2 – sands, 3 – tills

dotyczących rozpoznania jego podłoża. Pierwszoplanowym efektem badań elektrooporowych jest stwierdzenie istnienia pionowego kontaktu utworów niskooporowych i wysokooporowych. Wynika to przede wszystkim z profi-

PROFIL 5



Ryc. 2. Wyniki kompleksowych badań geofizycznych wykonanych na koronie wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie Niepolomice; A — wykres zmian prędkości fali sejsmicznej; B — wykresy zmian przyspieszenia siły ciężkości; C — wykresy zmian oporu elektrycznego

Fig. 2. Results of complex geophysical studies from top of Wisła river flood embankment near Niepolomice; A — diagram of velocity changes of seismic wave; B — diagrams of gravity acceleration changes; C — diagrams of resistivity changes

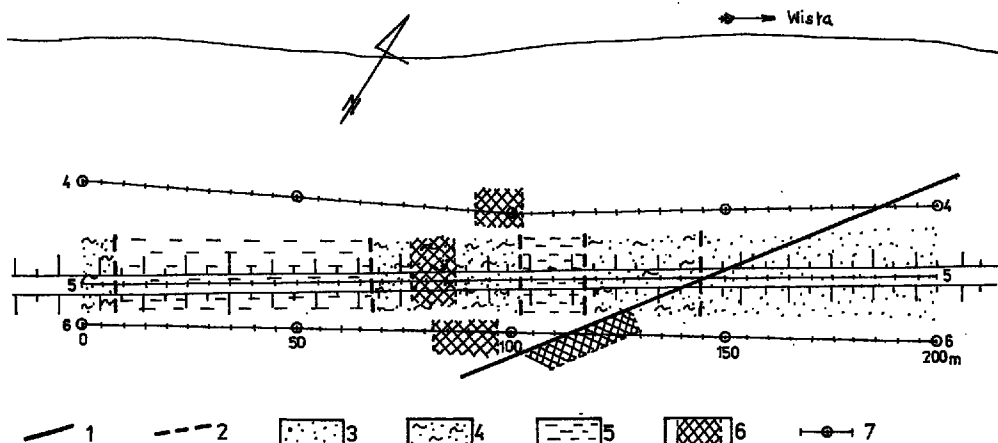
lowania, ale potwierdzają to też i sondowania. Wartości oporów właściwych wskazują, że są to piaski i gliny. Podobnie jak i w innych przypadkach, tak i w tym badaniu elektrooporowe przyniosły informacje dotyczące przede wszystkim litologii utworów.

Dodatkowe i jakże cenne informacje o stanie tych utworów przynoszą badania grawimetryczne i geotermiczne. Z tych pierwszych wynika, że nad strefą przykontaktową występuje anomalia ujemna, a więc że utwory są tu rozluźnione. Wspomniany kontakt zaznacza się również w wynikach geotermicznych, z tym że na odcinku występowania piasków temperatura jest wyraźnie niższa z wtórnym minimum przy kontakcie. Różnica temperatury po obu stronach kontaktu wynosi ok. $1^{\circ}C$.

Z danych elektrooporowych i geotermicznych wynika, że po prawej stronie kontaktu występują piaski nawodnione. Wskazują na to wyższe wartości oporów właściwych i ujemna anomalia geotermiczna stwierdzona pomiarami wykonanymi w okresie lata, co jest właśnie zjawiskiem charakterystycznym dla tego rodzaju przypadku.

Natomiast z danych grawimetrycznych i geotermicznych wynika, że w strefie przykontaktowej występują utwory rozluźnione, przez które następuje zwiększony przepływ wody. Wskazują na to: ujemna anomalia grawimetryczna i ujemna anomalia geotermiczna. Należy dodać, że wykryte na tym profilu dwie wyraźne ujemne anomalie grawimetryczne charakteryzują się amplitudami znacznie przekraczającymi wartość średniego błędu kwadratowego pojedynczego pomiaru, który na tym profilu wynosi $\pm 0,009$ $mGal$. Tak więc te trzy metody przyniosły tu szczególnie interesujące wyniki wzajemnie się uzupełniające i układające w logiczny ciąg informacji.

Z kolei na ryc. 2 są przedstawione wyniki pomiarów na koronie. Wyniki profilowania elektrooporowego są istotnie zróżnicowane, gdyż zarejestrowane opory zmieniają od ok. 60 do ponad 200 omm . Dane te sygnalizują, że korpus wału na tym odcinku jest zbudowany z istotnie różniących się utworów. Należy przyjąć, że na metrażu 10–50 oraz 105–115 są to gliny, na 150–200 piaski a w pozostałej części — to mieszanina tych dwóch utworów. Należy jeszcze podkreślić, że obie krzywe profilowania na metrażu 0–120, praktycznie biorąc,



Ryc. 3. Zbiorcze zestawienie wyników badań geofizycznych wału przeciwpowodziowego i jego podłoża w rejonie Niepolomice

1 — pionowy kontakt w podłożu, 2 — kontakty w wałe, 3 — piaski, 4 — piaski pylaste, gliniaste, 5 — gliny, 6 — strefy rozluźnień, 7 — nr profilu oraz punkty pomiarów

Fig. 3. Comparison of results of geophysical studies of flood embankment and its basement near Niepolomice

1 — vertical contact within basement, 2 — contacts within embankment, 3 — sands, 4 — muddy sands, 5 — tills, 6 — slackness zones, 7 — profile number and measurement points

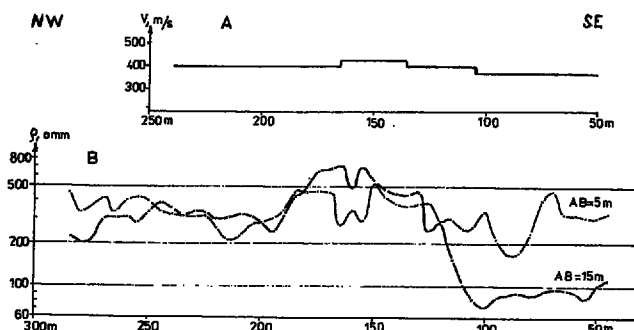
pokrywają się. Oznacza to, że utwory przy koronie i w dolnej części wału są takie same.

Z pomiarów grawimetrycznych szczególnie wyraźnie zaznacza się na tym odcinku strefa zwiększonego gradientu poziomego określona krzywą Ag_p . Na odcinku ok. 60 m różnica przyspieszenia siły ciężkości wg pomiarów na koronie wynosi ok. 0,10 mGal. Zjawisko to potwierdzają też pomiary wykonane przy podstawie wału, z tym że różnica wynosi tu 0,05 mGal. Dane te wskazują więc na istnienie niegłęбоkiego kontaktu gęstościowego. Wykres anomalii lokalnej Ag_L na koronie wykazuje niewielkie zmiany, spośród których najbardziej wiarygodna to anomalia ujemna na metrażu 77–87 mogąca sugerować rozluźnienie utworów. Zbiórce zestawienie wyników badań geofizycznych tego odcinka przedstawiono na ryc. 3 w formie mapy zawierającej geofizyczną charakterystykę budowy wału i jego podłoża.

W świetle badań geofizycznych wyłania się bardzo złożona budowa zarówno podłoża, jak i wału. Oprócz zmienności litologicznej badania te wskazują na zmiany parametrów fizyko-mechanicznych występujących tu utworów. Szczególnie jest tu ważna zmiana stopnia zagęszczenia, o czym można pośrednio wnosić głównie z danych grawimetrycznych. Otóż na podstawie tych danych zlokalizowano 4 miejsca o dużym prawdopodobieństwie zwiększonego rozluźnienia utworów i to zarówno podłoża, jak i wału w środkowej części badanego odcinka. Badania geotechniczne wykonane na setnym metrze profilu 4 potwierdziły wskazane tu geofizycznie większe rozluźnienia utworów.

Z elementów budowy podłoża szczególnie efektywnie zaznacza się kontakt różnych litologicznie utworów potwierdzony na podstawie badań trzech profili. Po jego prawej stronie do kilku metrów występują piaski, po lewej zaś gliny; np. na setnym metrze profilu 6 jej występowanie potwierdził wykonany do 5,6 m otwór. Biorąc pod uwagę wyniki elektrooporowe oraz wspomniany efekt geotermiczny na profilu 6 można wnioskować, że wykryta badaniami geofizycznymi po prawej stronie tego kontaktu forma – to starorzecze.

Charakteryzując ogólnie wyniki badań geofizycznych w rejonie Niepołomic należy przede wszystkim podkreślić bardzo dużą zmienność parametrów fizycznych charakteryzujących utwory korpusu wałów i ich podłoża. Na przykład opory właściwe zmieniają się od kilku do kilku tysięcy ometrów, przedział zmienności temperatury utworów wyniósł aż 4°C, prędkość rozchodzenia się fal



Ryc. 4. Wyniki pomiarów geofizycznych na koronie wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie Płocka; A – wykres prędkości fali sejsmicznej; B – wykres zmian oporu elektrycznego

Fig. 4. Results of geophysical studies from top of Wisła river flood embankment near Plock; A – diagram of velocity changes of seismic wave; B – diagram of resistivity changes

sejsmicznych wynosiła 200–2050 m/s, stwierdzono też wiele wyraźnych lokalnych anomalii grawimetrycznych.

Wynikające z badań geofizycznych takie elementy jak:

– intensywna zmienność horyzontalna korpusu wałów,

– silna pionowa i pozioma zmienność budowy geologicznej podłoża,

– występowanie w podłożu pionowego kontaktu najprawdopodobniej na granicy starorzecza,

– występowanie stref o prawdopodobnym zřaczonym rozluźnieniu utworów i potencjalnych dróg wzmożonej filtracji wody

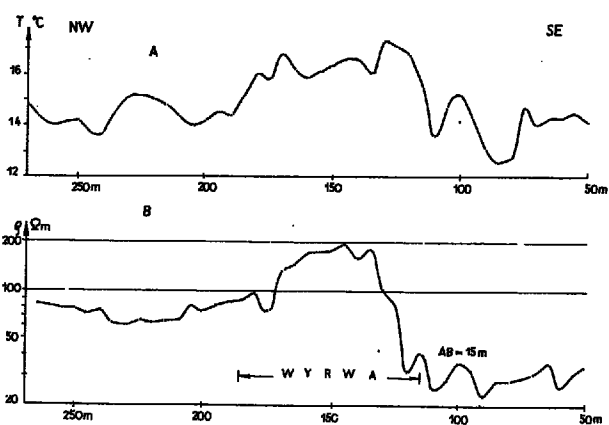
sprawiają, że prawdopodobieństwo awarii wału i stopień zagrożenia powodziowego w tym rejonie w czasie wysokiej wody należy uznać jako duże.

Badania wałów środkowej Wisły

Kolejny przykład to fragment wyników badań wałów środkowej Wisły w rejonie Płocka (4). Badaniami objęto tu 300-metrowy odcinek wału, w środku którego leży jedna z wyrw powstałych zimą 1982 r., co doprowadziło do wielkiej powodzi w tym rejonie.

Z badań wykonanych na koronie wału (o wysokości 3–4 m) najciekawsze wyniki przyniosły pomiary elektrooporowe (ryc. 4). Szczególną uwagę należy zwrócić na wynik profilowania przy $AB = 15$ m, a więc podstawowego dla rozpoznania utworów korpusu wału. Uzyskana krzywa jest trójdzielna: w środku anomalia dodatnia to zasypana suchym piaskiem wyrwa, lewe i prawe skrzydło objęły nie naruszony stary wał. Z krzywej jasno wynika, że występuje tu kontakt utworów o różnych oporach. O ile bowiem na skrzydle NW opory wynoszą ok. 300, to na SE ok. 90 omm, a więc pęknięcie wału nastąpiło na kontakcie różnych utworów.

Na odcinku tym wykonano również badania na profilu przy podstawie wału po stronie odpowietrznej. Interesujące są wyniki profilowania elektrooporowego (przy $AB = 15$ m) i geotermicznego z tego profilu (ryc. 5). Charakter wykresu profilowania elektrooporowego jest podobny do wyników profilowania wykonanego na koronie wału. Na profilu zlokalizowanym przy podstawie



Ryc. 5. Wyniki geofizycznych badań podłoża wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie Płocka; A – wykres zmian pola cieplnego na głębokości 1,5 m; B – wykres zmian oporu elektrycznego

Fig. 5. Results of geophysical studies of flood embankment basement of Wisła river near Plock; A – diagram of thermal field changes at the depth 1,5 m; B – diagram of resistivity changes

wału zarejestrowano bowiem również znacznie wyższe opory po NW stronie wyrwy, a niższe po stronie SE — odpowiednio ok. 75 i 30 omm. Na części profilu odpowiadającej lokalizacyjnie występowaniu wyrwy występuje wyraźna dodatnia anomalia elektrooporowa. Dane te, a także ilościowa interpretacja krzywych sondowań sugeruje występowanie tu starej doliny rzecznej wypełnionej piaskami. Silnie zróżnicowany obraz przyniosły również badania geotermiczne. Wspomnianej dodatniej anomalii elektrooporowej odpowiada również wyraźna dodatnia anomalia geotermiczna. Wiązać ją należy z występowaniem suchych piasków, które w okresie długotrwałej suszy i gorącego lata uległy większemu nagrzeniu niż sąsiadujące utwory. Anomalie ujemne stwierdzone na metrażu 80–90, 108–113, 200–210 oraz 240–264 wiążą się z pewnością z najwyższym w tych miejscach zawilgoceniem utworów. Należy dodać, że w obrębie anomalii na metrażu 108–113 jest zlokalizowana pompownia.

W rejonie Płocka podobne badania doświadczalne wykonano na innych odcinkach wałów obejmujących pozostałe wyrwy powstałe zimą 1982 r. Stwierdzono, że wszystkie wyrwy wystąpiły w miejscach zarejestrowanych anomalii geofizycznych, przede wszystkim elektrooporowych wskazujących na zmiany budowy nie tylko wałów, ale również i ich podłoża.

Badania wałów Noteci

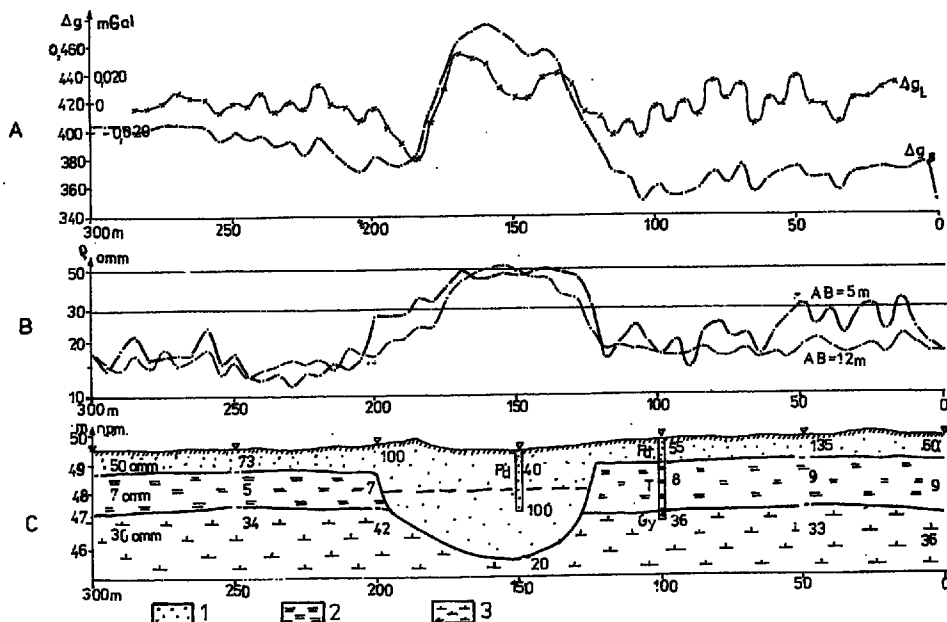
Badania te przeprowadzono na wałach o zasadniczo odmiennej budowie w stosunku do obiektów analogicznych badań z rejonu środkowej i górnej Wisły. Mianowicie wały Noteci są budowane przede wszystkim z torfu, a ich podłożem jest również torf (na niewielkim tylko odcinku wał zbudowano z piasku). Odmienne są też warunki hydrogeologiczne, gdyż badane odcinki wałów leżą na torfiastych łąkach, a więc podłoża jest całkowicie zawodnione, przy czym poziom wód gruntowych zależy

od opadów i poziomu wody w Noteci. Ze względu na całkowite przestrzenne zawodnienie podłoża zaszła tu konieczność częściowej zmiany metodyki badań. Warunki powyższe nie uzasadniały stosowania badań geotermicznych, kompleks badań tworzyły trzy pozostałe metody, spośród których podstawowymi okazały się metoda elektrooporowa i grawimetryczna.

Jako przykład tych badań przedstawia się wyniki uzyskane na odcinkach obejmujących starorzecze (ryc. 6). Budowę podłoża wału przedstawia podany przekrój geologiczno-geofizyczny, tworzą go trzy warstwy: pierwsza to namuły piaszczyste o zmiennym oporze 50–135 omm, druga to torfy o niskim i mało zmiennym oporze, bo wynoszącym 5–9 omm, wreszcie trzecia to gytia o oporze wynoszącym średnio nieco ponad 30 omm (3).

Występujące w środkowej części starorzecza wypełnione piaskiem przerywa ciągłość warstwy drugiej. Powyższy układ w sposób jednoznaczny wynika z sondowań i profilowań elektrooporowych, wykres profilowania jest bardzo efektywny z racji znacznych kontrastów oporu utworów wypełniających starą dolinę rzeczną w stosunku do utworów, w których ta dolina występuje. O ile bowiem po obu jej stronach wartości oporu wynoszą na ogół kilkanaście omm, to w centrum anomalie wzrastają do 50. Starorzecze powoduje również wyraźną dodatnią anomalię grawimetryczną. Z profilu grawimetrycznego daje się również, zauważyć różnicę poziomu wartości po lewej i prawej stronie starorzecza. Sugeruje to istnienie w podłożu, ale głębiej niż obejmuje przekrój, kontaktu gęstościowego. Wyznaczenie jego dokładnego położenia jest jednak niemożliwe ze względu na zaburzenie krzywej starorzeczem.

Wykonane na wałach Noteci kompleksowe badania geofizyczne przyniosły interesujący materiał wynikowy pozwalający na szczegółowe rozpoznanie budowy wałów i ich podłoża. Badania te pozwoliły również na wy-



Ryc. 6. Wyniki geofizycznych badań podłoża wału przeciwpowodziowego Noteci; A — wykresy zmiany przyspieszenia siły ciężkości; B — wykresy zmian oporu elektrycznego; C — przekrój geoelektryczno-geologiczny

1 — piasek, 2 — torf, 3 — gytia

Fig. 6. Results of geophysical studies of flood embankment basement of Notec river; A — diagrams of gravity acceleration changes; B — diagrams of resistivity changes; C — geoelectrical-geological cross-section

1 — sands, 2 — peat, 3 — gyttja

znaczenie wielkości parametrów fizycznych charakteryzujących występujące tu utwory.

I tak z badań elektrooporowych wynika, że torfy charakteryzują się oporem wynoszącym 6–13 omm, a gytie 28–40 omm. Prędkość bezpośredniej fali sejsmicznej w wale wynosi 135–260 m/s, a w pierwszej warstwie sejsmicznej podłoża 240–290 m/s. Tak mała prędkość, mniejsza od prędkości fali głosowej jest charakterystyczna właśnie dla suchych piasków i torfów.

Badania geofizyczne pozwoliły na określenie rodzaju wałów występujących na poszczególnych odcinkach (piaskowe, piaskowo-torfowe i torfowe) i granic je rozdzielających, na rozpoznanie budowy podłoża, w tym miąższości torfów i głębokości stropu gytii, wykazały one również możliwość wykrywania zasypanych starorzeczy.

OCENA WYNIKÓW ZASTOSOWANYCH METOD GEOFIZYCZNYCH

Badania elektrooporowe wykonano na wszystkich obiektach doświadczalnych będących przedmiotem kompleksowych badań prowadzonych w aspekcie oceny stanu technicznego wałów i ich podłoża, a więc w rejonie Niepołomic, Warszawy, Jabłonny, Płocka i Białosłwiwa. Pomiar wykonano latem przy znacznym wysuszeniu szczególnie wałów Wisły.

Wykonane na tych obiektach i w tych warunkach badania elektrooporowe przyniosły interesujące wyniki oraz bogaty materiał dokumentalny dla szczegółowego rozpoznania budowy wałów i ich podłoża, a także w zakresie oceny możliwości tej metody w rozwiązywaniu nakreślonej problematyki. Ogólnie można stwierdzić, że metoda elektrooporowa pozwoliła na rozpoznanie wielu elementów budowy wałów i ich podłoża, a w szczególności na:

- wykazanie zróżnicowania budowy,
- wydzielenie zasadniczych typów utworów o różnej litologii,
- lokalizację pionowych kontaktów w wałach i podłożu, czyli ostrych horyzontalnych zmian,
- określenie budowy podłoża, a w szczególności rozpoznanie 2–3 warstw do głębokości kilku metrów,
- określenie zasięgu i geometrii lokalnych niejednorodności,
- wykazanie możliwości lokalizowania starorzeczy,
- wykazanie, że wyrwy w wałach w rejonie Płocka, prowadzące do wielkiej powodzi na tym obszarze w 1982 r., powstały na kontaktach lub odcinkach o zmiennej budowie wałów,
- określenie miąższości obsypki piaskowej na wałach torfowych,
- wykazanie możliwości śledzenia granicy torf – gytia,
- wykazanie możliwości rozróżniania wałów piaskowych od torfowych czy gliniastych.

Ze zdobytych doświadczeń wynika ponadto, że bardzo niekorzystne dla interpretacji wyników jest prowadzenie badań tą metodą w okresie długotrwałej suszy. W warunkach takich dochodzi bowiem do silnego wysuszenia, szczególnie utworów budujących wał. Przesuszone utwory tracą swoją normalną charakterystykę oporową i ich identyfikacja na tej podstawie staje się utrudniona bądź niemożliwa. Dotyczy to w szczególności takich utworów, jak gliny, ropy i pyły, które po wysuszeniu mają opór znacznie wyższy niż w warunkach normalnych i mogą być wtedy błędnie identyfikowane np. z piaskami.

W zakresie badań grawimetrycznych należy podkreś-

lić, że zastosowane grawimetry i metodyka pomiarów pozwoliły na bardzo dokładne wyznaczenie różnic wartości przyspieszenia siły ciężkości. O wysokiej dokładności świadczą bowiem średnie błędy kwadratowe pojedynczych pomiarów wynoszące od kilku do kilkunastu tysięcznych mGala. Z obliczeń teoretycznych i przeprowadzonej analizy wyników prac eksperymentalnych wynika, że metoda grawimetryczna jest przydatna w badaniach stanu technicznego wałów, szczególnie do badania rozluźnień wału i podłoża oraz podłoża o różnej ściśliwości. Najwyższe anomalie powoduje obecność torfu w glinach czy też w piaskach.

Na wałach torfowych z obsypką piaskową wyniki pomiarów grawimetrycznych bardzo zależą od miąższości tej obsypki. Wszędzie tam, gdzie grubość obsypki będzie mniejsza uzyskuje się ujemne anomalie tego samego rzędu, a nawet większe niż anomalie pochodzące od rozluźnień. Stąd też dla tego typu wałów stosowanie metody grawimetrycznej nie jest uzasadnione, gdyż w przypadku konieczności rozpoznania grubości tej obsypki właściwsze jest zastosowanie metody elektrooporowej. Badania geotermiczne przeprowadzono w rejonie Niepołomic, Warszawy, Jabłonny oraz Płocka. Wszystkie pomiary wykonano latem przy niskich stanach wody w Wiśle i znacznym wysuszeniu wałów. W warunkach tych we wszystkich rejonach stwierdzono znaczne zróżnicowanie temperatury utworów podłoża, jak i charakteru zlokalizowanych anomalii; dotyczy to zarówno ich amplitudy, jak i szerokości.

W związku z zadaniem jakie postawiono przed badaniami geotermicznymi i uwzględniając okres w jakim te badania wykonano – przedmiotem zainteresowania i analizy były anomalie ujemne, gdyż tylko takie anomalie mogą być związane ze strefami zwiększonego nawodnienia utworów czy też w ogóle ze zwiększoną filtracją wody w okresie letnim. Zresztą za taką przyczyną ujemnych anomalii geotermicznych przemawia również to, że nad przepustami wodnymi czy też w bezpośrednim ich sąsiedztwie takie właśnie anomalie występowały.

Występowanie wody w skałach powoduje odpowiednie, nieraz bardzo znaczne zmiany określonych parametrów wyznaczonych za pomocą metod geofizycznych (opór w metodzie elektrooporowej, prędkość w sejsmicznej). Jednakże efekty takie w równym stopniu mogą być wywołane zmianą litologii. Odróżnienie efektu wodnego od efektu litologicznego, szczególnie jeśli to dotyczy bardzo małych stref, bywa w tych dwóch metodach niekiedy trudne, a nawet niemożliwe.

W badaniach metodą geotermiczną, ogólnie biorąc, na wartość obserwowanej temperatury utworów większy wpływ ma efekt wodny od efektu litologicznego. Dlatego też metoda geotermiczna ma przewagę nad dwoma wyżej wymienionymi metodami. Stąd też do lokalizowania stref zwiększonej filtracji wody celowe jest stosowanie właśnie metody geotermicznej. Uzasadniają to również wcześniej omówione przykłady wyników tych badań.

Charakteryzując przeprowadzone badania sejsmiczne należy stwierdzić, że przyniosły one wyniki poniżej oczekiwań, szczególnie w odniesieniu do badania korpusu wału. Mianowicie wykazały one małe zróżnicowanie prędkości sejsmicznej wzdłuż wału. Były to na ogół zmiany zawierające się w granicach błędów wynikającego z właściwości metody. Wyniki takie uzyskiwano również i tam, gdzie inne metody wykazywały znaczne zróżnicowanie. W praktyce okazało się więc trudne lub wręcz niemożliwe wykorzystanie wyników sejsmicznych do oceny stopnia zagęszczenia utworów wału, jak również do

określenia litologii i jej zmian. W podłożu metodą sejsmiczną określano zwykle jedną granicę na głębokości do kilku metrów między utworami powierzchniowymi — luźnymi i głębszymi — o większej związłości. Granica ta była określana również metodą elektrooporową.

Biorąc powyższe dane pod uwagę oraz czynnik ekonomiczny, uzyskane wyniki sejsmiczne nie uzasadniają więc stosowanie tej metody do badania wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania geofizyczne wykazały, że pozwalają one na wykrywanie wielu anomalnych zjawisk i elementów budowy wałów i podłoża stanowiących istotne zagrożenia dla ich stabilności oraz właściwego spełniania przez nie funkcji przeciwpowodziowych. W szczególności badania geofizyczne umożliwiają:

1. Lokalizowanie starorzeczy. Starorzecza mogą być wykrywane i lokalizowane przede wszystkim metodą elektrooporową i grawimetryczną; warunkiem wykrycia zamaskowanego starorzecza jest zróżnicowanie oporowe lub gęstościowe utworów występujących w tej formie i otoczeniu. Starorzecza w wynikach tych metod mogą się manifestować dodatnimi lub ujemnymi anomaliami, a na głębokościowym przekroju geoelektrycznym również charakterystyczną doliną erozyjną.

2. Wykrywanie pionowych kontaktów litologicznych w wale i podłożu. Do wykrywania tych elementów mogą służyć również dwie wyżej wymienione metody. Elementy te w obu metodach na wykresach pomiarowych zaznaczają się w postaci charakterystycznego stopnia.

3. Wykrywanie stref rozluźnień i kawern w wale i podłożu. Praktycznie biorąc, strefy te mogą być wykrywane jedynie metodą grawimetryczną, gdyż o ich obecności mogą świadczyć ujemne anomalie przyspieszenia siły ciężkości.

4. Lokalizowanie uprzywilejowanych dróg filtracji. Strefy istniejącej wzmoczonej filtracji w podłożu mogą być lokalizowane głównie metodą geotermiczną. Manifestują się one ujemnymi anomaliami geotermicznymi latem, a dodatnimi zimą. Natomiast przy znacznie obniżonym poziomie wód gruntowych można wykrywać jedynie prawdopodobne, potencjalne drogi filtracji. Takimi potencjalnymi drogami wzmoczonej filtracji mogą być wykrywane metodą elektrooporową i grawimetryczną strefy rozluźnień, kontakty w wale i podłożu, starorzecza itp.

5. Badania podłoża o różnej ściśliwości. Zagadnienie to może być rozwiązywane metodą grawimetryczną i elektrooporową drogą pośrednią poprzez określanie zróżnicowania litologicznego utworów: szczególnie istotne jest wykrywanie i rozpoznawanie torfów występujących w otoczeniu innych utworów takich jak gliny czy piaski.

6. Brak ciągłości warstwy madowej. Stwierdzenie braku ciągłości warstwy madowej może być dokonywane w zasadzie wyłącznie metodą elektrooporową przy wykorzystaniu do tego celu zarówno sondowań, jak i profilowań.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń z metod geofizyki powierzchniowej jako uzasadnione należy uznać stosowanie do rozpoznawania wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża metody elektrooporowej, grawimetrycznej oraz geotermicznej. Metoda pierwsza jest szczególnie przydatna do litologicznego charakteryzowania występujących utworów oraz określania ich parametrów geometrycznych. Metoda druga reaguje na zmiany gęstości utworów, która z kolei zależy od porowa-

tości i stopnia ich zagęszczenia, a ten ostatni parametr jest jednym z podstawowych przy rozpoznawaniu stanu technicznego podłoża i wałów. I wreszcie odnośnie do metody geotermicznej należy stwierdzić, że rozkład pola cieplnego w utworach występujących poniżej zasięgu dobowych zmian temperatury silnie zależy od stopnia ich zawodnienia. Wynika to z dwóch niezwykle istotnych właściwości wody, to jest z jej dużego ciepła właściwego oraz zdolności do filtracji. Metoda geotermiczna reagując silnie na płytki reżim wód podziemnych pozwala na jego rozpoznawanie. Biorąc pod uwagę tylko względy merytoryczne wskazane byłoby kompleksowe stosowanie trzech wyżej wymienionych metod na wszystkich badanych odcinkach wałów.

W przypadku jednak gdyby badania realizowane tak nakreślonej metodyką uznano za zbyt kosztowne, za dopuszczalny można uznać przedstawiony niżej wariant oszczędniejszy. Mianowicie na wałach i podłożu zbudowanych z takich utworów jak gliny, ily, mady i piaski na wszystkich badanych odcinkach należy wykonać tylko pomiary elektrooporowe. Natomiast pomiary grawimetryczne i geotermiczne tylko na tych partiach, gdzie badania elektrooporowe sygnalizują znaczące zmiany budowy, dla uzyskania dodatkowych informacji i opracowania pełniejszej charakterystyki odcinków anomalnych. Na wałach torfowych z obryską piaskową oraz piaskowych leżących na torfach proponuje się stosować tylko metodą elektrooporową. Ponadto odnośnie do stosowania metod geofizyki powierzchniowej należy dodać pewną uwagę ogólną. Mianowicie metodą elektrooporową i geotermiczną nie należy prowadzić w okresie długotrwałej suszy, a także, z innych już powodów, w czasie wysokiego stanu wód przy dużym zagrożeniu powodziowym.

Oprócz badań metodami geofizyki powierzchniowej, dla detalizacyjnego rozpoznania utworów wału i podłoża w wybranych punktach i przekrojach celowe jest stosowanie w płytkich otworach pomiarów radiometrycznych i oporności. Pozwalają one bowiem na wykrycie cienkich przewarstwień i określenie ich litologii, w tym gęstości, porowatości i stopnia nawodnienia a więc ważnych parametrów przy rozpoznawaniu stanu technicznego badanych obiektów.

W celu uzyskiwania wyższej efektywności badań geofizycznych, jak i kompleksowych, prace geofizyczne należy odpowiednio powiązać z geotechniczno-wiertniczymi realizując poszczególne fazy tych prac w następującej kolejności:

1. Wykonanie terenowych pomiarów geofizycznych.

2. Wstępna interpretacja wyników pomiarów geofizycznych i zaproponowanie na tej podstawie lokalizacji wierceń kontrolno-badawczych i prac geotechnicznych.

3. Opracowanie wyników prac wiertniczo-geotechnicznych.

4. Przeprowadzenie ostatecznej interpretacji danych geofizycznych w nawiązaniu do wyników wykonanych prac geotechniczno-wiertniczych.

Na zakończenie można stwierdzić, że dotychczasowe doświadczenia wykazują, iż metody geofizyczne mogą okazać istotną pomoc w rozpoznawaniu stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża, co jest niezbędne do podejmowania odpowiednich prac zabezpieczających, a zgodnie z „Narodowym Programem Ochrony Środowiska Przyrodniczego do 2010 r.” szacuje się, że w Polsce ok. 5800 km obwałowań wymaga przebudowy i modernizacji (5).

4. Bała M. — Probl. CPBR 1.5, cel. realizacyjny 1.37, temat — Model interpretacji zdjęć obrazu falowego dla określenia parametrów sprężystych, litologii i własności zbiornikowych skał piaskowcowych. Cz. II, Bibl. IGNiG, Kraków, 1988.
5. Bała M. — Z. Nauk. AGH, Geof. Stosowana, 1989 nr 3.
6. Ciecchanowska M., Zalewska J., Szafer T. — Określenie parametru nasycenia i innych własności skał zbiornikowych jednostki śląskiej. Zlec. V-36/78, Kom. Rzeczozn. SITP Naft. Kraków, 1978.
7. Domenico S.N. — Geoph., 1984 vol. 49 nr 8.
8. Eastwood R.L., Castagna J.P. — 24 Ann. Log. Symp. June 27—30 SPWLA Calgary, 1983.
9. Jasnowski M., Rożkowski J. — Probl. Res. IG 5.1.2. zad. 3. Arch. Budokop, Mysłowice, 1986.
10. Nowak J., Marek S., Kossowicz R. — Probl. CPBP 03.01, temat 21, etap II, Bibl. MIG AGH, 1987.

S U M M A R Y

Here are presented some attempts in sedimentary rock classification on grounds of their Young modulus of elasticity, volume and shape distortion and Poisson coefficients.

These modulus were estimated on base of quantitative interpretation of wave images, registered during acoustic sensing in bore holes. They inform about rock elasticity parameters in natural conditions, which could be used in studies of orogen mechanics and deposits exploitation. There were discussed variability intervals of modulus of elasticity for various lithologic types and of such reservoir parameters as porosity and water hydrogen saturation coefficients.

Р Е З Ю М Е

В статье представлены попытки классификации осадочных пород на основании их модулей упругости — Юнга, объемной деформации, деформации внешнего вида и коэффициента Пуассона. Эти модули были рассчитаны на основании количественной интерпретации волновых изображений, зарегистрированных при акустическом каротаже в буровых скважинах. Они подставляют информацию о упругих параметрах пород в условиях их природного залегания, используемых при решении вопросов механики горных пород и эксплуатации месторождений.

Приведены интервалы изменчивости модулей упругости для пород о различной литологии, а также коллекторных параметров — коэффициента пористости и насыщения водой, или углеводородами.