BIULETYN PAŃSTWOWEGO INSTYTUTU GEOLOGICZNEGO 446: 183–190, 2011 R.

ZASTOSOWANIE TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ W BADANIU WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH – WYBRANE PRZYKŁADY Z WARSZAWY I OKOLIC

APPLICATION OF ELECTRICAL RESISTANCE TOMOGRAPHY IN THE RESEARCH ON FLOOD BANKS – SELECTED EXAMPLES FROM WARSAW AND SURROUNDING AREAS

MIROSŁAW KAMIŃSKI[1], MIROSŁAW KRAWCZYK[1], PIOTR ZIENTARA[1], MAGDA DERKACZ[1]

Abstrakt. Powódź w maju 2010 r. była największym kataklizmem zanotowanym w ciągu kilkunastu lat w Polsce. Straty materialne powstałe w jej wyniku są ogromne i w skali kraju wynoszą kilka miliardów złotych. Znaczna część tych strat jest związana z zalaniem terenów położonych w dolinach rzek na skutek przerwania wałów przeciwpowodziowych. Wały, które miały chronić tereny przyległe, w wielu przypadkach nie spełniły swojej roli. Na terenie województwa mazowieckiego zanotowano około 100 miejsc przerwania lub rozmycia wałów. Duże ryzyko przerwania wałów nastąpiło czasie ostatniej powodzi na terenie Warszawy. Wykonano badania geofizyczne mające na celu rozpoznanie budowy wałów przeciwpowodziowych i wskazanie miejsc ich osłabienia.

Słowa kluczowe: wały przeciwpowodziowe, tomografia elektrooporowa, badania geologiczne, powódź, sufozja.

Abstract. The flood in May 2010 was the biggest disaster recorded in the last years in Poland. Material losses arising as a result of the flood were huge and reached several billion PLN in the whole country. Much of these losses was related to the areas located in river valleys as a result of interruption of flood banks. The flood banks, which were supposed to protect adjacent areas, in many cases did not fulfill their role. The Mazowieckie voivodship recorded about 100 points of interruption or damage of flood banks. The high risk of interruption of flood banks during the last flood occurred also in Warsaw area. The geophysical survey was carried out to recognize the construction of the flood banks and to indicate the places of their weakness.

Key words: flood banks, electrical resistance tomography, geological research, flood, suffosion.

WSTĘP

Kilkudniowe intensywne opady deszczu w drugiej połowie maja 2010 r. spowodowały przekroczenia stanów alarmowych większości rzek polskich, jak również niebezpieczne podwyższenie zwierciadła pierwszego poziomu wód podziemnych. W efekcie doszło do przerwania wałów przeciwpowodziowych i wiele miejscowości zostało zalanych falą powodziową, np. w dolinie Wisły rejon Wilkowa, Sandomierza, Połańca i Świniar.

Fala powodziowa, która dotarła do Warszawy, osiągnęła wówczas rekordowy stan 780 cm. Dlatego władze stolicy zdecydowały się zamknąć ponad 120 szkół, przedszkoli i żłobków znajdujących się w rejonach zagrożonych. Przygotowano również plany ewakuacyjne dla Wilanowa i Dolnego Mokotowa na wypadek przerwania wałów przeciwpowodziowych.

Najczęstszymi przyczynami uszkodzeń wałów przeciwpowodziowych są:

– posadowienie wałów na starorzeczach, zbudowanych głównie z piasków rzecznych, przewarstwionych mułkami i iłami tarasów zalewowych; utwory te charakteryzują się znaczną zmiennością litologiczną, co skutkuje zmiennymi właściwościami przewodzenia wody;

– nory i żerowiska zwierząt wodnych (wydry, bobry, piżmaki), kretowiska; w większości przypadków wykrycie takich uszkodzeń bez gruntownych badań geofizycznych jest bardzo trudne; nawet nowo usypane wały w trakcie znacznego wezbrania wód mogą zostać przerwane;

– osłabienie struktury wału korzeniami drzew;

– miejsca przejazdów wałowych i pobocza dróg;

[1] Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa;
miroslaw.kaminski@pgi.gov.pl, miroslaw.krawczyk@pgi.gov.pl, piotr.zientara@pgi.gov.pl, magda.derkacz@pgi.gov.pl

– nadmiar wody w korycie rzeki (stany alarmowe i ostrzegawcze) – zwiększony napór wody;

– rozmiękczenie wału w wyniku nawalnych opadów atmosferycznych;

– osłabienie wału w wyniku nadmiernej suszy;

– mechaniczne uszkodzenia nasypów.

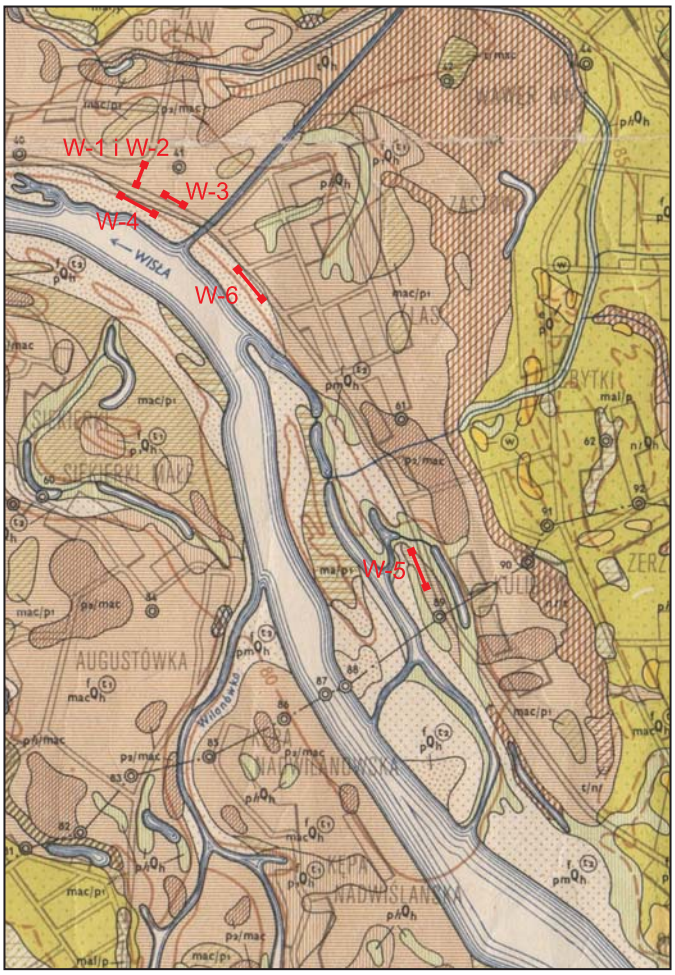
W artykule przedstawiono analizę geologiczno-geofizyczną wybranych fragmentów wałów przeciwpowodziowych w Warszawie i ich podłoża przy zastosowaniu metody tomografii elektrooporowej. Jest to obecnie coraz bardziej popularna metoda geofizyczna, oprócz metody georadarowej, stosowana z dużym powodzeniem do badania wałów przeciwpowodziowych (Farbisz, 2010).

Badaniami objęto fragment Wału Miedzeszyńskiego w rejonie ulic Fieldorfa i Kaszmirowej (Warszawa-Gocław) oraz fragment wału przeciwpowodziowego w okolicy Jeziorka Dziekanowskiego (Łomianki).

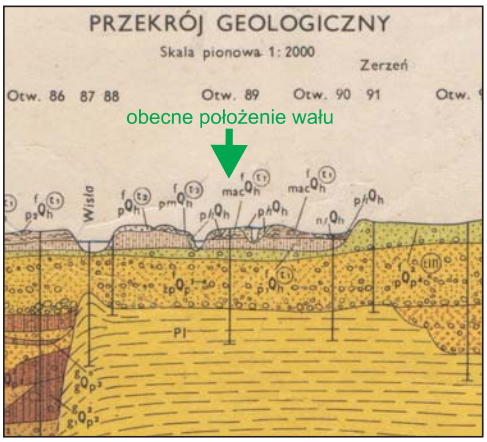
GEOMORFOLOGIA I BUDOWA GEOLOGICZNA TERENU BADAŃ

Dolina Wisły położona jest w przedziale wysokości 80–95 m n.p.m., a jej zwierciadło znajduje się na poziomie 78 m n.p.m. W dolinie Wisły wykształciły się dwa tarasy zalewowe i trzy wyższe tarasy nadzalewowe, akumulacyjne. Charakterystycznym elementem rzeźby tarasów nadzalewowych są formy pochodzenia eolicznego. Wydmy o największych rozmiarach utworzyły się na tarasie otwockim. Wznoszą się na wysokości od 105 do 110 m n.p.m. i tworzą klasyczne formy paraboliczne o dobrze wykształconych ramionach, długości kilku kilometrów i wysokości względnej ponad 20 m.

Znaczna część powierzchni tarasów nadzalewowych została zabudowana, co spowodowało zniszczenie sieci natu-



W-1 – W-6 przekroje tomografii elektrooporowej (ERT)
cross-section of electrical resistance tomography (ERT)



$_{ph}Q_{h}$ piaski i namuły den dolinnych starorzeczy
sands and old river bed sediments

$^{f}_{p}Q^{t2}_{h}$ piaski rzeczne tarasu zalewowego niższego
fluvial sands of the lower river terrace

$^{f}_{mac}Q^{t1}_{h}$ mułki ilaste tarasu zalewowego wyższego
clayey silts of the floodplain higher

$^{f}_{p1}Q^{t1}_{h}$ piaski rzeczne dolne tarasu zalewowego wyższego
fluvial sands of the lower river floodplain higher

$^{f}_{p}Q^{tIII}_{h}$ piaski rzeczne tarasu nadzalewowego niższego
fluvial sands of the lower terrace underfloodplain

$^{f}_{żp}Q^{3\text{-}4}_{p}$ żwiry, piaski, mułki rzeczne
gravels, sands, river silts

Pl iły, mułki i piaski plioceńskie
Pliocene clays, silts and sands

Fig. 1. Mapa geologiczna i przekrój geologiczny rejonu badanego odcinka Wału Miedzeszyńskiego (Sarnacka, 1979)

Geological map and geological cross-section of the studied part of Miedzeszyn flood bank (Sarnacka, 1979)

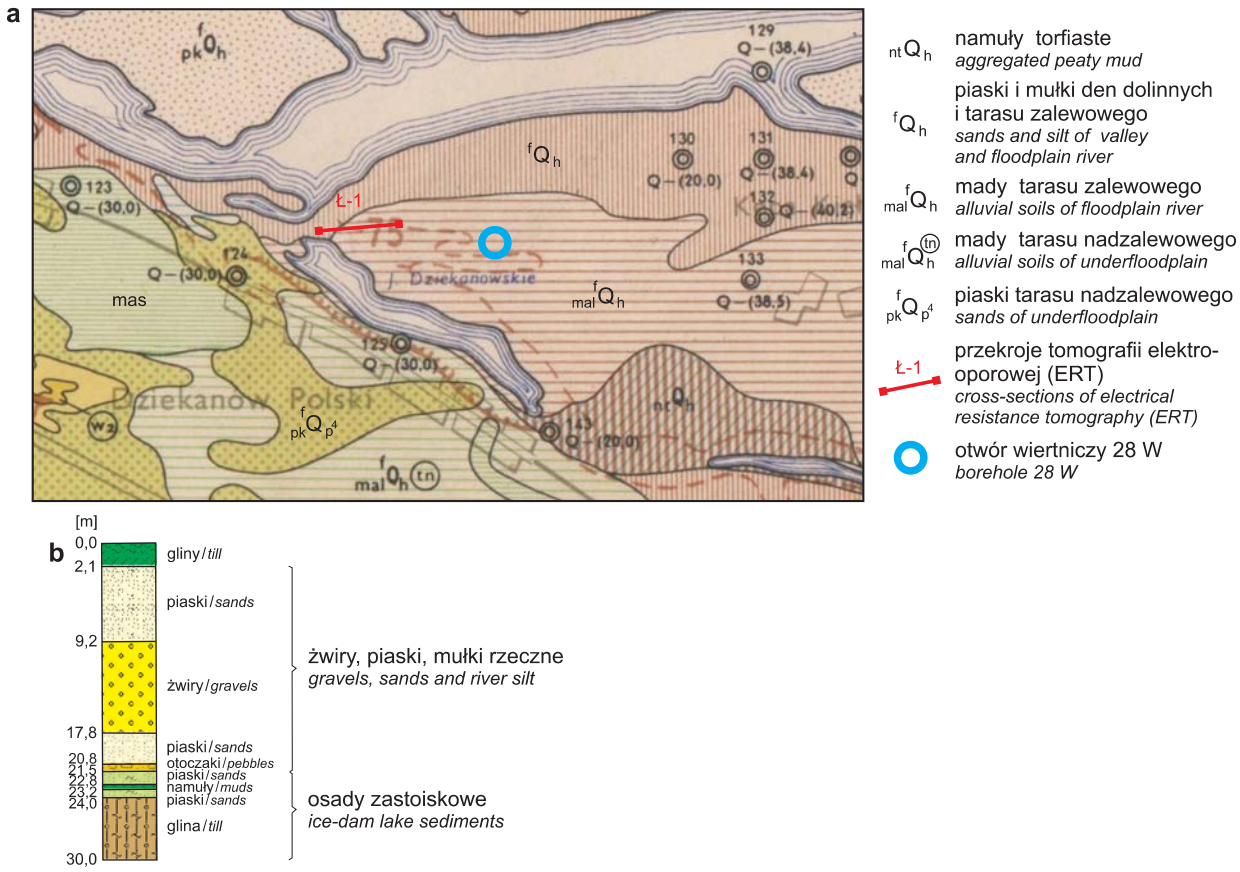


Fig. 2. a – Mapa geologiczna rejonu Jeziorka Dziekanowskiego (Nowak, 1974), b – Profil otworu wiertniczego 28 W (Kulczyński, 1965, zinterpretowany przez M. Krawczyka)

a – Geological map of Dziekanów Lake (Nowak, 1974), **b** – Profile of borehole no. 28 W (Kulczyński, 1965, interpretation after M. Krawczyk)

ralnych form. W obniżeniach nie zachowały się naturalne zbiorniki wodne, natomiast gęstą sieć tworzą kanały i rowy. Na rzeźbę obszaru Warszawy składają się też liczne formy antropogeniczne: wały przeciwpowodziowe, nasypy drogowe, forty, glinianki.

Cały obszar badanego fragmentu Wału Miedzeszyńskiego położony jest w obrębie tarasu zalewowego Wisły, zbudowanego z holoceńskich osadów rzecznych (fig. 1). Są to głównie piaski i żwiry rzeczne znajdujące się bezpośrednio przy korycie Wisły. Osady położone dalej od koryta Wisły to mułki piaszczysto-ilaste (mady ciężkie i lekkie), porozcinane miejscami przez starorzecza, które wypełnione są piaskami humusowymi, namułami piaszczystymi i torfami. Osady tarasu zalewowego podścielone są piaskami i żwirami rzecznymi, które leżą bezpośrednio na iłach, mułkach i piaskach plioceńskich. Osady plioceńskie w otw. 89 stwierdzono na głębokości 22 m (Sarnacka, 1979). Taka budowa geologiczna, zwłaszcza płytkie zaleganie iłów plioceńskich, powoduje występowanie wód pierwszego poziomu wodonośnego na niewielkiej głębokości.

Fragment wału przeciwpowodziowego w rejonie Jeziorka Dziekanowskiego usytuowany jest również w obrębie tarasu zalewowego Wisły, który w rejonie między korytem rzeki a jeziorkiem zbudowany jest z piasków i mułków oraz mad lekkich (fig. 2). Piaski i mułki tarasu zalewowego są to piaski frakcji od mułkowatej do średnioziarnistej, barwy ciemnoszarej, z częściami humusowymi. Miąższość ich dochodzi na tarasie Wisły do 8 m. Mady lekkie są to piaski pylaste i mułkowate z wkładkami mułków, żółto-brązowe do brązowych. Często są przeławicane soczewkami piasków do 0,5 m. Miąższość ich waha się od 0,3 do 3 m. Osady te spoczywają na piaskach i żwirach rzecznych i rzeczno-lodowcowych. Geneza ich związana jest ze spływem wód rzekami z południa i z północy, od czoła lodowca w okresie zlodowacenia wisły (Nowak, 1978). Osady piaszczysto-żwirowe podścielają osady zastoiskowe, rozpoznane do głębokości 30 m (Kulczyński, 1965).

Jak wykazała analiza archiwalnych materiałów kartograficznych, przed budową wału Jeziorko Dziekanowskie sięgało dalej na północny zachód i miało stałe wodne połączenie z Wisłą. Należy przypuszczać, że w tym rejonie na powierzchni występują osady starorzeczy w postaci namułów torfiastych lub antropogeniczne osady z zasypania zbiornika w trakcie budowy wału. Osady te nie są uwzględnione na Szczegółowej mapie geologicznej Polski w skali 1:50 000 ark. Legionowo (fig. 2).

METODA BADAŃ

Tomografia elektrooporowa ERT (*Electrical Resistance Tomography*), lub inaczej obrazowanie elektrooporowe, jest metodą praktycznie bezinwazyjną, znacznie szybszą, biorąc pod uwagę liczbę wykonywanych pomiarów, i dokładniejszą niż metody stosowane wcześniej do pomiarów oporności właściwej skał (pośrednio rozpoznania litologii). Łączy w sobie stosowane od początków XX wieku metody sondowań i profilowań elektrooporowych. Prąd elektryczny jest wpuszczany w ziemię za pomocą pary elektrod, a indukowany potencjał elektryczny jest mierzony za pomocą innej pary elektrod. Sondowania elektrooporowe pozwalają uzyskać jednowymiarowy (1D) model ośrodka, nie uwzględniający zmian poziomych. W tej metodzie centralny punkt rozstawu elektrod pozostaje stały, ale odległość między elektrodami jest zwiększana, aby prąd mógł popłynąć głębiej i dać informację o oporach na większych głębokościach. Profilowania dają informację o zmianach poziomych, bez uwzględnienia zmian pionowych. W tym przypadku odległości między elektrodami pozostają stałe, a zestaw jako całość jest przesuwany wzdłuż profilu.

W badaniach tomografii elektrooporowej duża liczba elektrod jest rozmieszczona wzdłuż linii prostej i połączona kablami wielożyłowymi z selektorem, czyli jednostką przełączającą, służącą do automatycznego wybierania odpowiednich czterech elektrod do pojedynczego pomiaru, i miernikiem. Odległości między elektrodami pozostają stałe. Po kontroli prawidłowości podłączeń program komputerowy automatycznie wybiera odpowiednie elektrody do pomiaru, a po wykonaniu pomiaru zapisuje wynik. I powtarza tę procedurę, aż do wypełnienia wszystkich punktów na przekroju.

Warto zauważyć, że wraz ze wzrostem odległości między elektrodami maleje liczba pomiarów, co powoduje, że wynikowy przekrój ma kształt trapezu. Punkty wzdłuż linii poziomych odpowiadają klasycznym profilowaniom elektrooporowym, a punkty wzdłuż linii pionowych – klasycznym sondowaniom. W wyniku pomiarów i późniejszej obróbki komputerowej uzyskujemy przekrój oporności gruntu.

WYNIKI BADAŃ

Badania w rejonie **Wału Miedzeszyńskiego** polegały na wykonaniu pięciu przekrojów geofizycznych, których celem było wykrycie ewentualnych nieszczelności w wale.

Przekroje W-1 i W-2 wykonano wzdłuż ulicy Fieldorfa (fig. 3). Uchwycono na nich wysoki stan wód podziemnych, który spowodował w tym rejonie zjawisko sufozji (*scouring*). Jest to zjawisko geologiczne i hydrogeologiczne, polegające na mechanicznym wypłukiwaniu ziaren (cząstek minerałów) z osadu przez wody podziemne wsiąkające w skałę lub glebę. W efekcie doszło do zapadnięcia się fragmentu ulicy Fieldor-

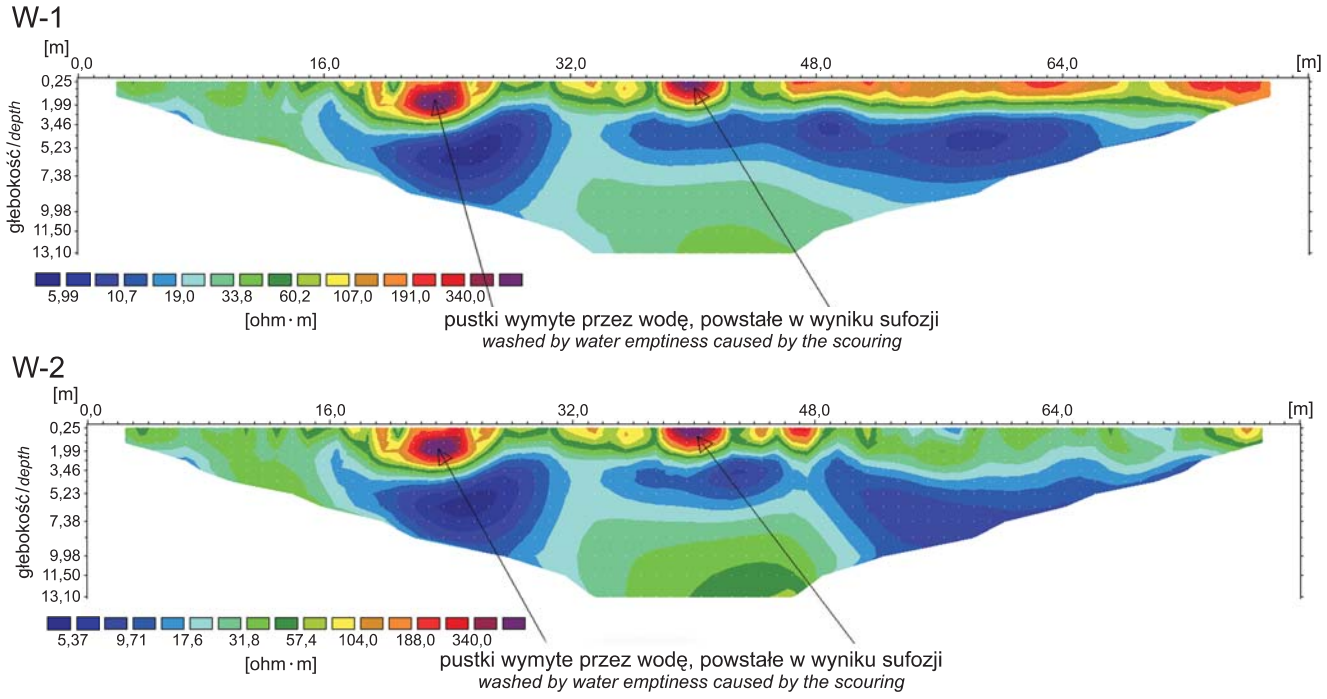


Fig. 3. Przekroje geofizyczne wzdłuż ulicy Fieldorfa

Geophysical cross-sections along the Fieldorf street

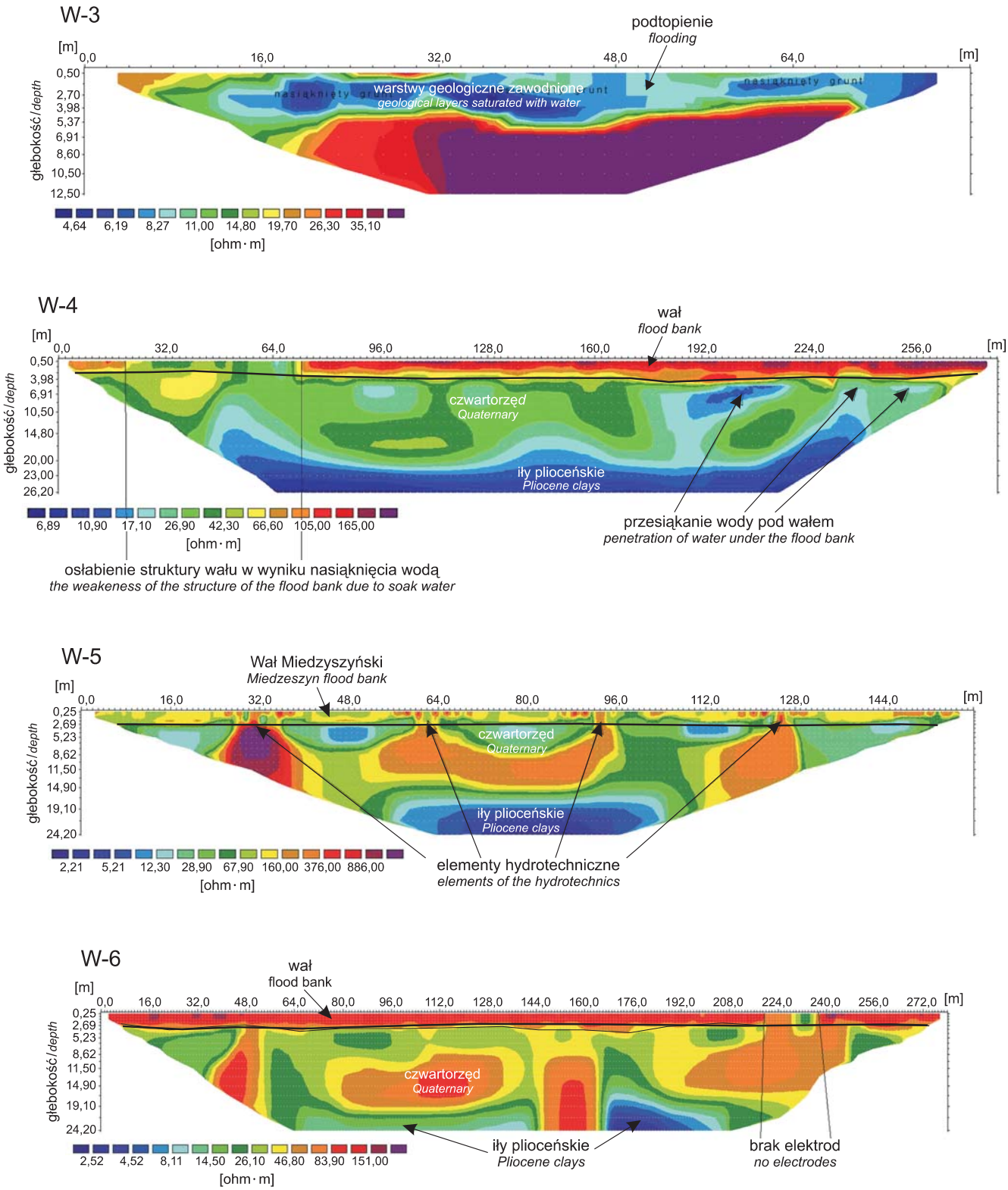


Fig. 4. Przekroje geofizyczne: W-3 wzdłuż Wału Miedzyszyńskiego, W-4 wzdłuż korony wału, W-5 rejon ulicy Kaszmirowej, W-6 między Trasą Łazienkowską a ulicą Narodową

Geophysical cross-sections: W-3 along Miedzeszyn flood bank, W-4 along the crown of the flood bank, W-5 geophysical cross-section by Kaszmirowa street, W-6 between Trasa Łazienkowska and Narodowa street

fa. Na obrazie elektrooporowym tereny takie charakteryzowały się dużą opornością, znacznie odbiegającą od mniejszych wartości oporności litologii skał otaczających. Wypłukany materiał przemieszcza się w przestrzeniach porowych i szczelinach.

Na przekroju W-3 udokumentowano wysoki stan wód podziemnych, dochodzący do powierzchni, powodujący lokalne podtopienia. Przekrój W-4 wykonano wzdłuż korony wału. Badania tomografią elektrooporową pozwoliły zlokalizować strefę obniżonej oporności, związanej najprawdopodobniej z przesiąkaniem wody, oraz miejsca przesiąkania wody pod wałem. Natomiast przekrój W-6 wzdłuż Wału Miedzeszyńskiego między Trasą Łazienkowską a ulicą Narodową wykazał niezaburzoną konstrukcję wału (fig. 4).

Przekrój W-5 wykonany wzdłuż Wału Miedzeszyńskiego w rejonie ulicy Kaszmirowej przedstawia regularność rozmieszczenia stref wysokooporowych u podstawy wału

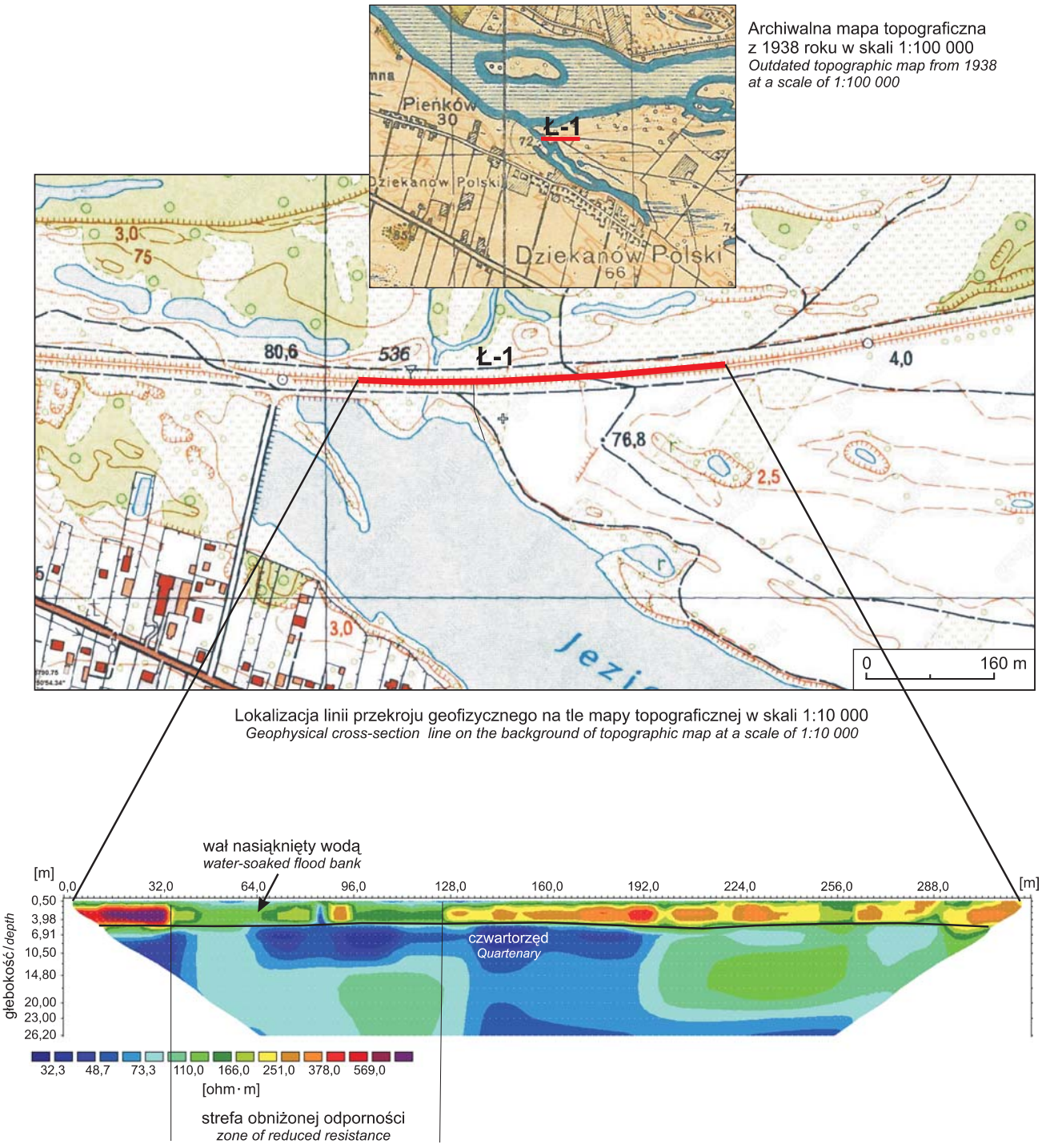


Fig. 5. Przekrój geofizyczny Ł-1 przez wał przeciwpowodziowy w rejonie Jeziorka Dziekanowskiego w Łomiankach

Geophysical cross-section Ł-1 through the flood bank near Dziekanów Lake in Łomianki

i poniżej, co sugeruje związek z działalnością człowieka (fig. 4). Niskooporowa strefa zaczynająca się na głębokości ok. 20 m wykazuje obecność iłów plioceńskich, które są udokumentowanie geologicznie wierceniami.

Badania geofizyczne przeprowadzone na koronie wału przeciwpowodziowego w rejonie **Jeziorka Dziekanowskiego** w Łomiankach wykazały istnienie dwóch stref o obniżonej oporności, które są najprawdopodobniej związane ze strefami silnie nasiąkniętymi wodą (fig. 5). W tych miejscach istniało największe ryzyko pęknięcia wału. Podłożem geologicznym strefy pierwszej są namuły torfiaste lub osady antropogeniczne. Miejsce starorzecza jest naturalną pułapką wód. Z powodu braku izolacji między starorzeczem a wałem może dojść do infiltracji wody w strukturę wału, powodując jego osłabienie. Dodatkowo namuły torfiaste lub osady antropogeniczne stanowią niestabilne podłoże dla wału.

Niskie opory w granicach poniżej 35 ohm.m w tej części profilu są zapewne odzwierciedleniem przebiegającego w tym rejonie dawnego koryta rzeki. Pionowe granice oporności na 130 i 190 m odzwierciedlają granice dawnego koryta. Wysokie opory osadów wału w środkowej części (250–400 ohm.m) świadczą o stabilnej konstrukcji wału. Brak podsiąknięć wody z podłoża może być spowodowany oddzieleniem nawodnionych osadów piaszczystych, korytowych od wału słabo przepuszczalnymi osadami mułkowymi budującymi taras zalewowy, stanowiącymi w tym rejonie warstwę izolującą wał od podłoża.

Strefa druga osłabienia konstrukcji wałowej między 250 a 260 i 290–300 m spowodowana jest najprawdopodobniej osłabieniem wału w czasie powodzi. Niewykluczone, że w tym rejonie w podłożu wału również istnieje starorzecze (niskie opory na głębokości 7–14 m) osłabiające konstrukcję wału i powodujące podsiąkanie wód. Niestety, w trakcie badań autorzy nie mieli dostępu do dokumentacji geologiczno-inżynierskiej budowy wału w tym rejonie. Wyjaśnienie tego problemu wymagać będzie szczegółowych badań terenowych.

DYSKUSJA I WNIOSKI

Badania geofizyczne wykonane metodą tomografii elektrooporowej okazały się być bardzo przydatne do szybkiej lokalizacji uszkodzeń i stref podatnych na przesiąkanie wody, a w rezultacie na przerwanie wału przeciwpowodziowego.

Do interpretacji geologicznej przekrojów geologicznych posłużono się danymi ze Szczegółowej mapy geologicznej Polski (SMGP) w skali 1:50 000, ark. Warszawa Wschód i Legionowo, a także wierceniami archiwalnymi. Niestety, dane zawarte na arkuszach SMGP skali 1:50 000 okazały się mało dokładne do analizy budowy geologicznej podłoża wałów w skali 1:10 000 lub jeszcze dokładniejszej.

Zdaniem autorów badania geofizyczne powinny być uzupełnione szczegółowym kartowaniem geologicznym w skali 1:10 000 podłoża wałów przeciwpowodziowych oraz w miarę możliwości wierceniami geologicznymi. Dzięki wierceniom możliwe jest dokładne rozpoznanie litologii osadów budujących podłoże wałów. Ponadto dane takie stanowić mogą punkt odniesienia do rzetelnej interpretacji geologicznej przekrojów geofizycznych. Również wskazana jest analiza materiałów archiwalnych: dokumentacji geologiczno-inżynierskich, zdjęć lotniczych, map topograficznych.

Dane geofizyczne otrzymane metodą tomografii elektrooporowej można zweryfikować za pomocą metody georadarowej lub płytkiej sejsmiki refleksyjnej. Jednakże płytką sejsmikę można stosować jedynie na wałach, gdzie nie odbywa się ruch uliczny. Drgania gruntu wywołane przez ruch samochodów wpływają negatywnie na wynik badania tą metodą.

Badania geofizyczne wałów przeciwpowodziowych Wisły w rejonie Warszawy potwierdziły, że tomografia elektrooporowa jest metodą geofizyczną szczególnie przydatną do rozpoznania struktury wałów oraz ich podłoża. Dzięki tym badaniom możliwe było: określenie materiału użytego do budowy obwałowań i jego charakterystyka geologiczno-inżynierska, identyfikacja nieciągłości w strukturze obwałowań narażonych na przebicia hydrauliczne, zlokalizowanie starorzeczy w podłożu nasypów, stwarzających szczególne zagrożenie ucieczki wody w stanach powodziowych.

LITERATURA

FARBISZ J., 2010 — Metody geofizyczne – skuteczna pomoc w ocenie stanu środowiska przed i po powodzi. Materiały archiwalne. Seminarium na AGH, Kraków.

KULCZYŃSKI J., 1965 — Karta otworu wiertniczego 28/W. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa.

NOWAK J., 1974 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000, ark. Legionowo. Inst. Geol., Warszawa.

NOWAK J., 1978 — Objaśnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000, ark. Legionowo. Inst Geol., Warszawa.

SARNACKA Z., 1979 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000, ark. Warszawa Wschód. Inst. Geol., Warszawa.

SUMMARY

Heavy rainfalls in the second half of May 2010 caused that the water in most Polish rivers exceeded the alarm level. The dangerous increase of groundwater table was also observed. As a result the flood banks were damaged and many areas were flooded, such as in the Vistula River valley (Wilków, Sandomierz, Polaniec and Świniary).

The flood in May 2010 was the biggest disaster recorded in the last years in Poland. Material losses arising as a result of the flood were huge and reached several billion PLN in the whole country. Much of these losses was related to the areas located in river valleys as a result of interruption of flood banks. The flood banks, which were supposed to protect adjacent areas, in many cases did not fulfill their role. The Mazowieckie voivodship recorded about 100 points of interruption or damage of flood banks. The high risk of interruption of flood banks during the last flood occurred also in Warsaw area. The geophysical survey was carried out to recognize the construction of the flood banks and to indicate the places of their weakness.

The article presents geological and geophysical analysis of selected parts of the flood banks in Warsaw and their bed using the method of electrical resistance tomography. It is now an increasingly popular method in addition to geophysical method (ground penetration radar GPR), used successfully to study the flood banks (Farbisz, 2010).

Electrical resistance tomography is virtually non-invasive method, much faster, taking into account the number of measurements and more accurate than previous methods used to measure the resistivity of rocks.

The geophysical survey was performed on flood banks in Warsaw and Łomianki region. These studies have indicated that this method is useful for rapid fault location and for indication the areas susceptible to water penetration resulting in the interruption of the flood banks.

Geological data was taken from The Detailed Geological Map of Poland (SmgP) in 1:50 000 scale, sheets: Legionowo (Nowak, 1974), East Warsaw (Sarnacka, 1979) with explanations by Nowak (1978).

According to the authors, geophysical survey should be accompanied by detailed geological mapping at scale of 1:10 000 of flood banks bed and geological drillings. In addition, such data could provide a reference point for reliable interpretation of geophysical and geological cross-sections. The analysis of archival material is also shown, such as: engineering geological documentation, aerial photographs and topographic maps.

The experience on testing the flood banks of the Vistula River in Warsaw area, during the flood in May 2010, has led to the following conclusions: electrical resistance tomography is a method of geophysics particularly predisposed to recognize the structure of flood banks and their geological substrate, so it is possible to determine the material build into the flood banks and its geological and engineering characteristics; it facilitates the identification of discontinuities in the structure of flood banks subjected to hydraulic breakdown; the method allows to locate old river beds under the flood banks which may cause the escape of flood waters.