

Radosław MIESZKOWSKI*, Sebastian KOWALCZYK*, Marek BARAŃSKI**,
Tomasz SZCZEPAŃSKI*

Zastosowanie metod geofizycznych do rozpoznania powierzchni stropowej gruntów słabo przepuszczalnych oraz wyznaczenia stref rozluźnienia w korpusie zapory ziemnej

Streszczenie: Metody geofizyczne wykorzystywane jako badania uzupełniające przy badaniu podłoża umożliwiają ocenę jakościową zmienności warunków gruntowych w strefie przy powierzchniowej. Informacje te są szczególnie istotne w monitoringu podłoża budowli hydrotechnicznych. W artykule przedstawiono badania geofizyczne wykonane w rejonie zapory ziemnej, mające na celu wskazanie miejsc rozluźnienia gruntów w obrębie zapory oraz określenie głębokości stropu gruntów spoistych występujących pod zaporą. Zastosowano metody: tomografii elektrooporowej (ERT), georadarową (GPR), sejsmiki refrakcyjnej, dające dwuwymiarowy obraz zmian fizycznych w ośrodku oraz sejsmikę fal powierzchniowych – *Continuous Surface Wave System* (CSWS), dzięki której otrzymano profil 1D parametrów sztywności ośrodka w punkcie pomiarowym. Opierając się na rezultatach badań ERT oraz sejsmice refrakcyjnej, odniesione do danych z wierceń, opracowano mapę powierzchni stropowej gruntów słabo przepuszczalnych. Anomalie uzyskane w wyniku interpretacji przeprowadzonych badań geofizycznych pozwoliły na oszacowanie stref rozluźnienia gruntu, które mogą być wywołane procesem sufozji. Zaobserwowane anomalie, na wybranych obszarach, zostały skorelowane z wierceniami oraz sondowaniami statycznymi (CPT), co pozwoliło na zrealizowanie postawionego celu oraz sformułowanie wniosku, że rozkład stref rozluźnienia gruntów oraz zwiększonego przepływu wód gruntowych stwarza zagrożenie dla stateczności korpusu zapory.

Słowa kluczowe: tomografia elektrooporowa (ERT), georadar (GPR), metoda sejsmiki fal powierzchniowych CSWS/SASW, sejsmika refrakcyjna, zapora ziemna

* Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa;

e-mail: r.mieszkowski@uw.edu.pl; s.kowalczyk@uw.edu.pl; Tomasz.Szczepański@uw.edu.pl

** Państwowy Instytut Geologiczny–Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa;

e-mail: marek.baranski@pgi.gov.pl

The use of geophysical methods to identify the roof of cohesive soils and the designation of zones of suffosion relaxation in the body of an earth dam

Abstract: Geophysical methods used as a complementary survey in the investigation of substrate allow for a qualitative assessment of the lateral variability of ground conditions in the near surface zone. They can also permit evaluation of the vertical variation of ground conditions. Such information is particularly important in monitoring the substratum of hydrotechnical engineering constructions. This article presents the geophysical surveys carried out in the area of an earth dam in order to identify places of relaxation of soils within the dam, as well as to determine the depth of the roof of cohesive soils occurring under the dam. The following methods were used: Electrical Resistivity Tomography (ERT), Ground Penetrating Radar (GPR), seismic refraction (providing a two-dimensional image of the physical changes in the medium), and surface wave seismic – Continuous Surface Wave System (CSWS) used together with Spectral Analysis of Surface Waves (SASW). The last method made it possible to analyze the distribution of the stiffness parameters of the medium at the measuring point. Based on the results of ERT studies and seismic refraction, referring to drilling data, a map of the roof surface of cohesive soils was developed. Anomalies identified in the geophysical studies made it possible to estimate the relaxation zone of the soil that could be caused by a process of suffosion. The observed anomalies in selected areas were correlated with drilling and Cone Penetration Testing (CPT), which allowed the completion of the pursued objective and to draw conclusions for the whole dam.

Key words: Electrical Resistivity Tomography, Ground Penetrating Radar, surface wave seismic, seismic refraction, earth dam.

Wprowadzenie

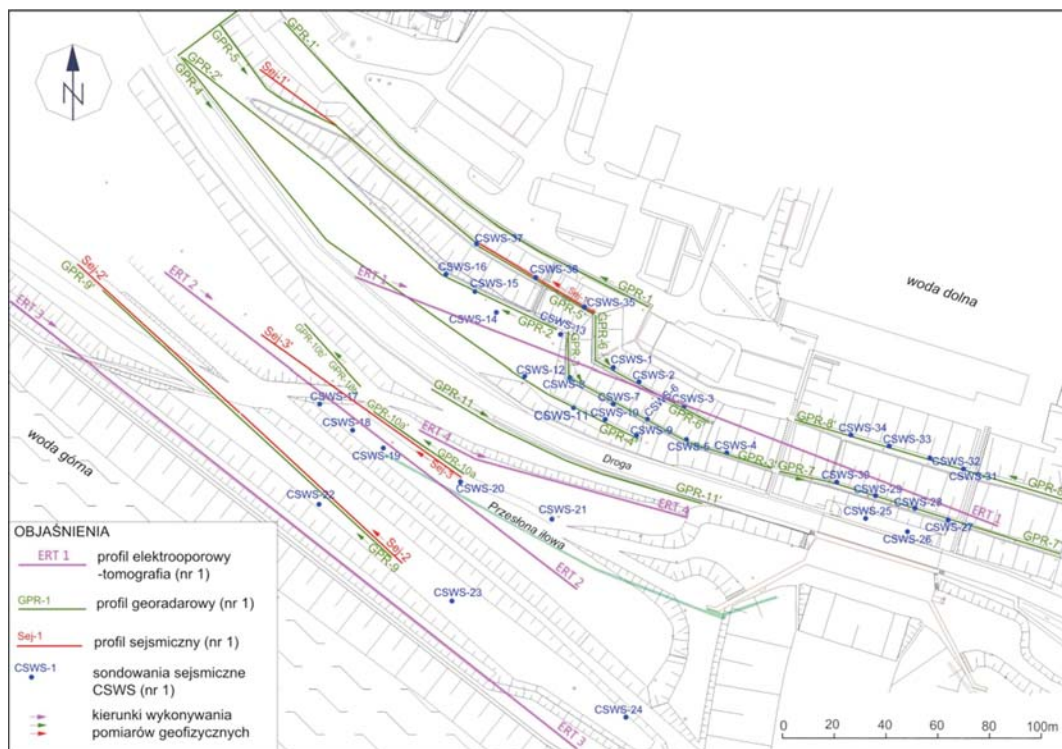
Przedstawione w artykule badania geofizyczne (sejsmika refrakcyjna, badania georadarowe, tomografia geoelektryczna, sejsmika CSWS/SASW – *Continuous Surface Wave System / Spectral Analysis of Surface Waves*) miały na celu ocenę budowy i właściwości gruntów, przede wszystkim pod kątem określenia zróżnicowania głębokości stropu gruntów słabo przepuszczalnych, jak również zlokalizowanie stref rozluźnienia gruntów w obrębie skarpy korpusu zapory, które pośrednio mogą wskazywać na możliwość istnienia bądź wystąpienia procesów sufozyjnych. Rozluźnienia takie, zasygnalizowane wcześniej w wynikach sondowań CPT, mogą stwarzać zagrożenie dla stateczności skarpy zapory ziemnej. Dodatkowym zadaniem, jakie postawili sobie autorzy, była próba lokalizacji stref zwiększonego przepływu wód gruntowych. Liczbę wykonanych badań geofizycznych zestawiono w tabeli 1 zaś lokalizacja profili i punktów badawczych została przedstawiona na rysunku 1.

Proces sufozji jest procesem złożonym i zróżnicowanym. Zróżnicowanie to zależy od charakteru i budowy geologicznej środowiska geologicznego, warunków hydrogeologicz-

TABELA 1. Zakres i rodzaj wykonanych badań geofizycznych

TABLE 1. Type and range of geophysical survey

Lp.	Rodzaj badania	Wykonana liczba badań	Długość profili pomiarowych
1.	Sejsmika refrakcyjna	3 profile	85 m
2.	Badania georadarowe	11 profili	od 33 do 200 m
3.	Tomografia geoelektryczna	4 profile	od 110 m do 280 m
4.	Sejsmika inżynierska CSWS/SASW	37 punktów	–



Rys. 1. Mapa dokumentacyjna obszaru badań z zaznaczeniem położenia profili geofizycznych

Fig. 1. Documentary map of research area with geophysical profiles

nych oraz okresu, w którym ten proces zachodzi (Kowalski 1988). Sufozja polega na rozmywaniu, wymywaniu i odprowadzaniu z ośrodka gruntowego cząstek mineralnych przez wody pod działaniem ciśnienia hydrodynamicznego w wyniku czego następuje wzrost porowatości i rozluźnienie gruntu, a w konsekwencji spadek jego parametrów wytrzymałościowych. Zatem do zaistnienia procesu sufozji konieczne jest spełnienie dwóch warunków: występowanie gruntu podatnego na sufozję, co można stwierdzić badaniami laboratoryjnymi, oraz istnienie odpowiednio dużego ciśnienia sphywowego.

Należy tu wyraźnie zaznaczyć, że metodami geofizycznymi nie da się bezpośrednio stwierdzić zachodzenia procesu sufozyjnego w gruncie oraz jego podatności na ten proces (Bestyński i in. 2008). Można jedynie, poprzez względną ocenę sztywności gruntu bądź istnienie anomalii w obrazie georadarowym, pośrednio wnioskować o efekcie procesu sufozji na podstawie stref rozluźnień w gruncie i przy wystąpieniu innych przesłanek np. wynoszenie drobnych cząstek w drenażu, ocenę sufozyjności gruntów na podstawie badań granulometrycznych.

1. Metodyka badań geofizycznych

1.1. Metoda georadarowa

Badania georadarowe (GPR) są jedną z metod geofizyki stosowanej do ciągłego odwzorowania budowy badanego ośrodka (Karczewski 2007; Jol 2009). Zasięg prospekcji georadarowej jest uzależniony od dwóch głównych czynników: częstotliwości nominalnej anteny nadawczej oraz właściwości elektrycznych badanego ośrodka. Im mniejsza częstotliwość anteny nadawczej tym większa jest głębokość penetracji, ale mniejsza rozdzielczość pomiaru. Z kolei tłumienie fali elektromagnetycznej jest wprost proporcjonalne do przewodności elektrycznej, a odwrotnie proporcjonalne do względnej przenikalności elektrycznej (Karczewski 2007):

$$\alpha = \frac{1,69 \cdot 10^3 \cdot \sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ [dB/m]} \quad (1)$$

gdzie:

- α – współczynnik tłumienia,
- σ – przewodność elektryczna,
- ϵ_r – względna przenikalność elektryczna.

W trakcie prac wykorzystano system radarowy RAMAC GPR produkcji szwedzkiej firmy MalaGeoscience. System przeznaczony jest do przypowierzchniowej prospekcji geofizycznej ośrodka geologicznego za pomocą fal elektromagnetycznych. Badania przeprowadzono z użyciem ekranowanej anteny nadawczej o częstotliwości nominalnej emitowanej fali elektromagnetycznej wynoszącej 100 MHz.

Użyty do badań system georadarowy wyposażony był w komputer przenośny typu notebook wraz z fabrycznym oprogramowaniem Ramac GroundVision przeznaczonym do akwizycji danych pomiarowych, ich analizy i uproszczonego przetwarzania bezpośrednio w terenie.

Przeprowadzono pomiary wzdłuż jedenastu profili o długości od około 33 do 200 m. Lokalizację profili przedstawiono na rysunku 1. Na wszystkich wykonanych profilach zastosowano identyczne parametry rejestracji fal odbitych: krok wzbudzenia i rejestracji wynosił 0,03 m, przy 4-krotnym składaniu na trasę. Składanie sygnału stosuje się w celu wzmocnienia słabych amplitud refleksów użytecznych i ograniczenia możliwości rejestracji przypadkowych i niskoamplitudowych szumów. Rejestracja tras prowadzona była w oknie czasowym równym 30 ns.

1.2. Metoda sejsmiki refrakcyjnej

Badania sejsmiczne refrakcyjne wykorzystują fale sejsmiczne refrakcyjne, czyli fale padające na granicę dwóch ośrodków pod kątem granicznym, przy czym ośrodek leżący

nżej charakteryzuje się większymi prędkościami fal sejsmicznych. Pomiary wykonano metodą profilowania 18- i 20-kanalowym rozstawem pomiarowym o długości 85 m. Odległości między kolejnymi geofonami wynosiły 5 m, a fale sejsmiczne, dla każdego rozstawu, wzbudzano na obydwóch jego końcach oraz wzdłuż rozstawu w odstępach co 10–15 m. W pomiarach fale sejsmiczne wzbudzano udarowo, młotem o ciężarze 8 kg, a rejestrowano geofonami o częstotliwości 28 Hz i aparaturą sejsmiczną DMT Summit z zapisem cyfrowym. Zastosowana metodyka pomiarów umożliwiła szczegółowe zróżnicowanie prędkości fal sejsmicznych w przypowierzchniowej warstwie ośrodka oraz ciągłe śledzenie granic sejsmicznych zalegających na głębokości do około 40 m p.p.t.

Na podstawie otrzymanych wartości czasu przyjscia fali refrakcyjnej odwzorowano zmiany prędkości fal sejsmicznych podłużnych wzdłuż granic sejsmicznych. Obliczenia wykonano techniką komputerową z wykorzystaniem licencjonowanego oprogramowania ReflexW.

1.3. Metoda sejsmiki fal powierzchniowych

W metodach sejsmiki fal powierzchniowych wykorzystuje się falę powierzchniową Rayleigha (Matthews i in. 2000). Fala ta rozchodzi się promieniście od miejsca zaburzenia ośrodka blisko jego powierzchni (do głębokości równej około długości fali), z prędkością zależną od częstotliwości (zjawisko dyspersji), właściwości sprężystych i gęstości gruntu.

W systemie *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW) sygnał wzbudza się np. przez uderzenie młotkiem. Generowany jest szeroki zakres częstotliwości. Fala dociera do geofonów rozstawionych w linii prostej od źródła, w znanych odległościach. Sygnał jest analizowany pod kątem zawartości fal o poszczególnych częstotliwościach, ich przesunięcia fazowego, z czego następnie przy znanym rozstawie geofonów możemy obliczyć prędkość fazową rozchodzenia się fali powierzchniowej Rayleigha V_R . Eksperymentalna krzywa dyspersji, obrazująca prędkość fazową fali w zależności od jej długości, jest podstawą interpretacji profilu 1D, prędkości fali poprzecznej V_s . Na podstawie znajomości prędkości fali poprzecznej obliczana jest maksymalna wartość modułu ścinania G_{max} (Lai, Wilmański 2005).

Inną odmianą tej metodyki jest zastosowanie wibratora jako źródła fal. Rozwiązanie to nosi nazwę *Continuous Surface Wave System* (CSWS). W takiej konfiguracji znamy i dowolnie programujemy częstotliwość pracy źródła drgań. Posiadana aparatura produkcji GDS Instruments wyposażona jest w wibrator o masie inercyjnej 63 kg, programowalny w zakresie od 6 do 600 Hz z rozdzielczością 0,1 Hz. Rozwiązanie takie umożliwia m.in. większy wpływ na głębokość badania – im niższa częstotliwość fali powierzchniowej tym większy zasięg strefy odkształceń sprężystych podłoża gruntowego. Zmieniając zatem zakres częstotliwości generowanych fal powierzchniowych uzyskujemy różną głębokość badania (Barański, Szczepański 2006, 2007), próbując uzyskać dane dla całego profilu.

Wynikiem badań są profile 1D sztywności gruntu, tj. rozkład zmienności maksymalnego modułu ścinania G_{max} (lub modułu Younga E_{max}) wraz z głębokością. Głębokość penetracji zależna jest od warunków gruntowych. Przeciętnie dla gruntów jest to do około 10–15 m, maksymalnie sięga 30 m.

Na potrzeby badań przedstawianych w tym artykule, metody SASW i CSWS stosowano komplementarnie i wyniki przedstawiono wspólnie. Ze względu na inne ograniczenia i zalety metody uzupełniają się wzajemnie, pozwalając na uzyskanie pełniejszego, głębszego i bardziej wiarygodnego rozpoznania niż gdy są używane oddzielnie.

1.4. Metoda tomografii elektrooporowej

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metodę tomografii elektrooporowej (ERT), która podobnie jak inne metody elektrooporowe, bazuje na zjawisku przepływu stałego prądu elektrycznego przez ośrodek gruntowy/skalny. W geofizycznych badaniach elektrooporowych przedmiotem rozpoznania jest przestrzeń ośrodka geologicznego pomiędzy dwiema elektrodami uziemianymi w gruncie, do których podłączone jest źródło prądu elektrycznego (Szymanko, Stenzel 1993). Spadek napięcia rejestrowany za pomocą dwóch innych elektrod (elektrody pomiarowe) jest proporcjonalny do oporności elektrycznej ośrodka. Wyznaczona z takiego pomiaru oporność elektryczna określana jest terminem oporności pozornej. Wielkość ta nie określa w sposób ścisły oporności elektrycznej badanego ośrodka, ale dobrze odwzorowuje jego zróżnicowanie.

W tomografii elektrooporowej pomiary odbywają się w jednym procesie kontrolowanym przez aparaturę pomiarową na kilkudziesięciu elektrodach rozmieszczonych równomiernie na całej długości profilu. W trakcie pomiarów system mikroprocesorowy sukcesywnie uaktywnia odpowiednie grupy elektrod zgodnie z wybranym przez operatora układem pomiarowym. W efekcie wyniki pomiarów rejestrowane są wzdłuż rozstawu pomiarowego ze szczegółowością zależną od odległości rozmieszczonych elektrod.

Zasięg głębokościowy metody tomografii elektrooporowej jest zależny od długości stosowanych rozstawów pomiarowych oraz rozkładu oporności elektrycznych w przestrzeni objętej pomiarem (Kirsch 2009). Rezultatem wykonanych pomiarów jest trapezowaty przekrój, którego kształt jest efektem mniejszej liczby pomiarów na początku i na końcu oraz wzrostu odległości między elektrodami biorącymi udział w pomiarze. Uzyskane w wyniku badań przekroje obrazują, za pomocą izolinii, poziomą i pionową zmienność oporności pozornej wzdłuż linii pomiarowej.

Pomiary wykonano urządzeniem ARES czeskiej firmy GF Instruments w układzie elektrod według schematu Wennera. Odstęp między elektrodami wzdłuż linii profilu wynosił 2 m. Długości profili pomiarowych wynosiły od 110 m (ERT 4) do 280 m (ERT 3). Uzyskany w pomiarach zasięg głębokościowy rozpoznania oporności ośrodka wynosił do 40 m.

2. Wyniki badań i ich analiza

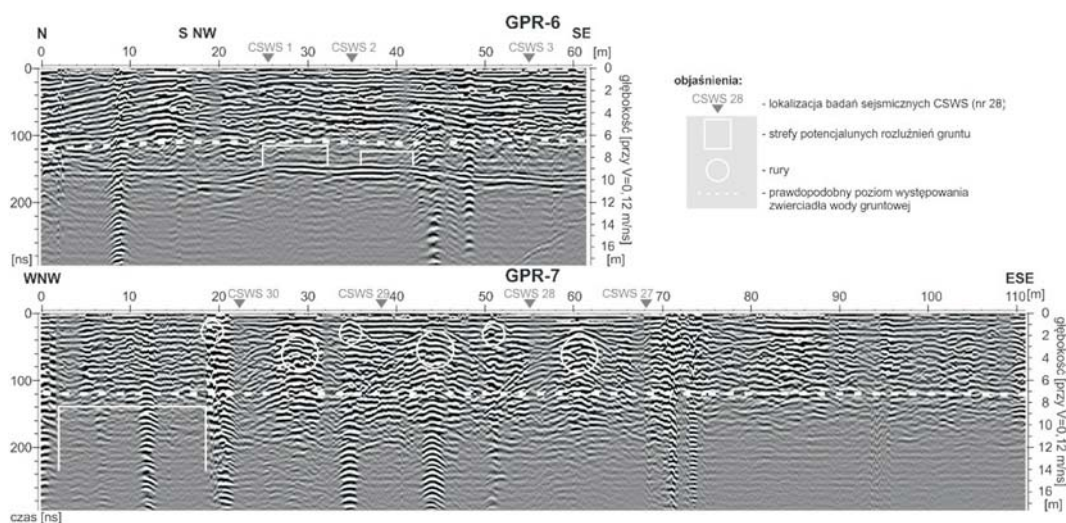
2.1. Metoda georadarowa

Pomiary georadarowe miały za zadanie wskazanie stref rozluźnienia gruntów. W zależności od lokalnych warunków gruntowych zasięg rozpoznania wynosił kilkanaście metrów. Podczas interpretacji profili GPR wykorzystano wyniki badań wykonanych metodą sejsmiki

CSWS oraz archiwalnych sondowań statycznych. Zauważono, że w miejscach, gdzie stwierdzono rozluźnienie gruntu na podstawie wyżej wymienionych badań polowych, na echogramach często zaznaczają się strefy tłumienia fal elektromagnetycznych, objawiające się brakiem refleksów. Może to być spowodowane zmianami wilgotności gruntu lub/i lokalnym nagromadzeniem pyłów.

Wskazane na echogramach potencjalne obszary rozluźnienia gruntów mogą również odnosić się pośrednio do stref występowania procesów sufozyjnych. Założenie to przyjęto do opisu obszarów, w których nie były wykonywane badania polowe.

W wielu miejscach na echogramach stwierdzono istnienie zaburzeń obrazu spowodowane przebiegiem podziemnych instalacji. Utrudniały one, a nawet miejscami uniemożliwiały, interpretacje zapisu georadarowego. Poza tym analiza echogramów wykazała istnienie kilku granic refleksyjnych: poziom wody gruntowej oraz nieciągłe granice w obrębie gruntów niespoistych. Wybrane rezultaty przetworzonych i zinterpretowanych pomiarów georadarowych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Profile GPR nr 6 i 7

Fig. 2. GPR profiles number 6 and 7

2.2. Metoda sejsmiki refrakcyjnej

Celem pomiarów sejsmicznych było określenie głębokości stropu gruntów o małej przepuszczalności. Z uwagi na drgania wywołane obecnością pracującej hydroelektrowni oraz drogi o dużym natężeniu ruchu, otrzymane sejsmogramy charakteryzowały się dużym szumem, który utrudniał przetwarzanie sygnału i rzutował na dokładność otrzymanych wyników.

Na wszystkich profilach wyodrębniono trzy warstwy, różniące się prędkością rozchodzenia się fal podłużnych (tab. 2). Pierwszą warstwę, o małej prędkości około 312–430 m/s,

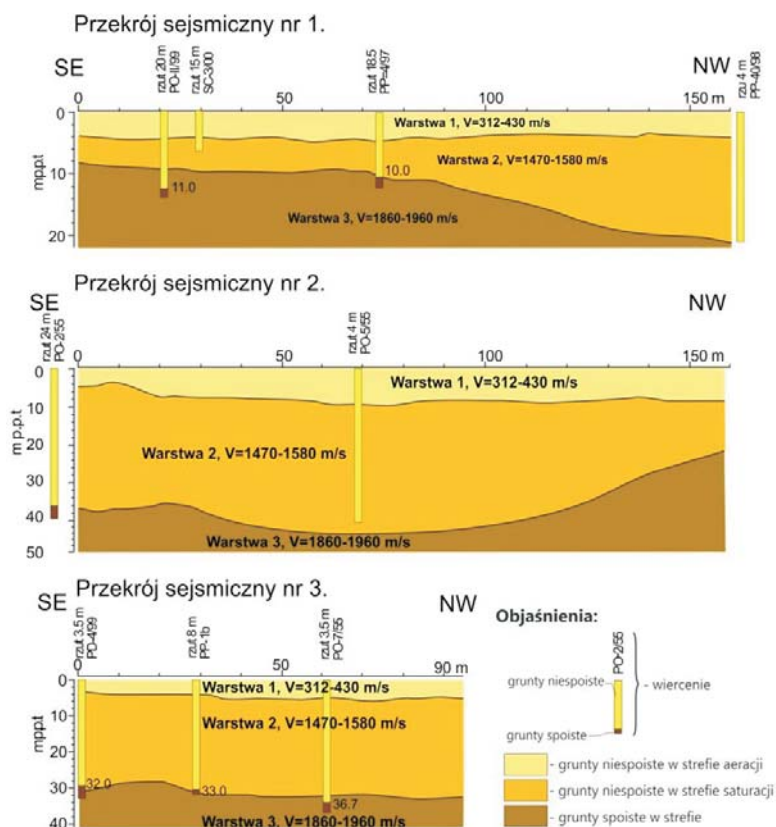
TABELA 2. Wartości prędkości fal sejsmicznych

TABLE 2. Values of P-wave velocity

Nr warstwy	Zakres zmian prędkość fali podłużnej [m/s]
1	312–430
2	1 470–1 580
3	1 860–1 960

generalnie należy korelować z warstwą gruntów niespoistych w strefie aeracji. Drugą warstwę, o prędkości w przedziale 1470–1580 m/s, należy odnieść do zawodnionych gruntów niespoistych. Granica trzeciej warstwy, charakteryzująca się prędkościami 1860–1960 m/s, odpowiada stropowi gruntów spoistych. Rezultaty przetwarzania i interpretacji pomiarów sejsmicznych zostały przedstawione na rysunku 3.

Wydzielone granice sejsmiczne odpowiadają w przybliżeniu granicom nawierconym w otworach wiertniczych, zlokalizowanych w pobliżu profili sejsmicznych. Pewne rozbieżności występują na profilu nr 1, co może być spowodowane szumami zakłócającymi rejestrację.

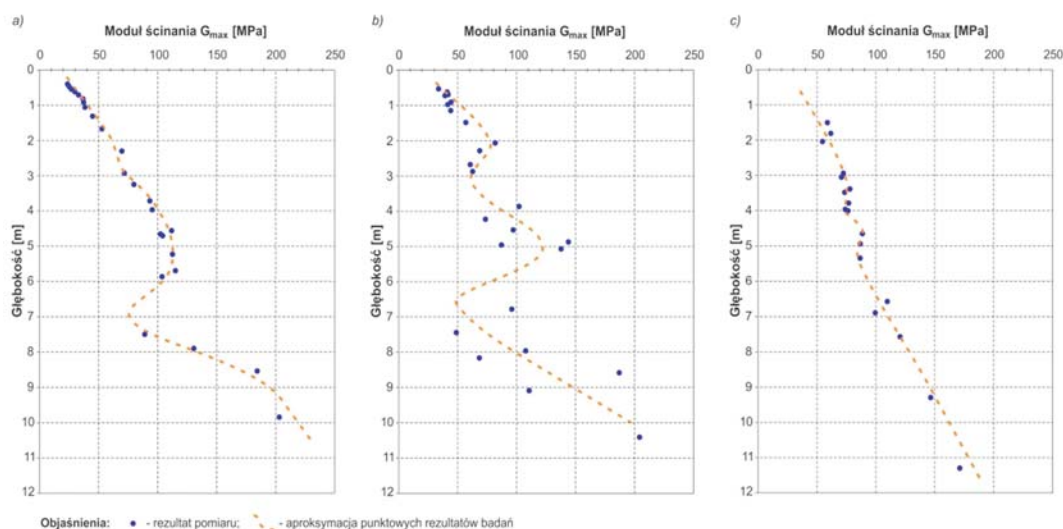


Rys. 3. Interpretacja przekrojów sejsmicznych 1–3

Fig. 3. Interpretation of seismic cross sections 1–3

2.3. Metody sejsmiczne CSWS/SASW

Głównym celem badań tymi metodami była próba lokalizacji i weryfikacji wcześniej zlokalizowanych za pomocą archiwalnych sondowań statycznych gruntów stref przypuszczalnego rozluźnienia typu sufozyjnego w obrębie korpusu zapory. Głębokość rozpoznania zmian modułu ścinania gruntów budujących korpus zapory sięgnęła do około 11 m p.p.t. Wybrane wykresy rozkładu wartości modułu ścinania G_{\max} przedstawiono na rysunku 4.



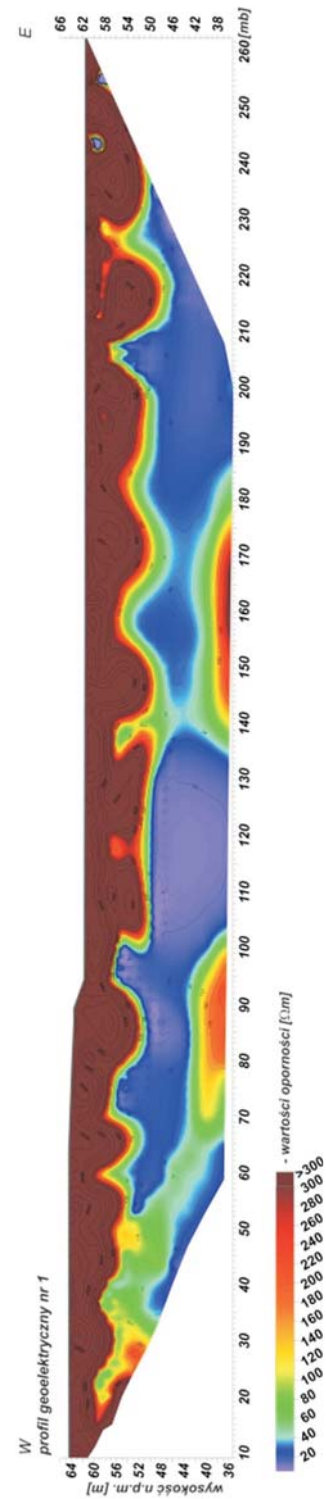
Rys. 4. Wykresy rozkładu modułu ścinania G_{\max} otrzymane metodami CSWS/SASW sondowanie nr 1 – a; sondowanie nr 2 – b; sondowanie nr 19 – c

Fig. 4. Distribution of shear modulus G_{\max} obtained by CSWS/SASW point number 1 – a; point number 2 – b; point number 19 – c

Wyniki pomiarów modułu ścinania G_{\max} zarejestrowane w sondowaniu nr 1 (rys. 4a) wykazują wyraźne zmniejszenie wartości modułu w zakresie 6–8 m p.p.t. Ta anomalia może sugerować lokalne rozluźnienie gruntów. W sondowaniu nr 2 (rys. 4b) stwierdzono występowanie dwóch stref anomalnych w rozkładzie modułu G_{\max} , w przedziale głębokości 2–4 m p.p.t oraz 6–8 m p.p.t. Strefy te również mogą odnosić się do stref rozluźnienia gruntów. Sondowanie nr 19 (rys. 4c) pokazuje zbliżony do liniowego przyrost wartości modułu G_{\max} wraz z głębokością. Na krzywej tej nie zaobserwowano żadnych anomalii rozkładu modułu. Oznacza to, że w miejscu wykonania sondowania nr 19 nie stwierdzono rozluźnienia gruntów.

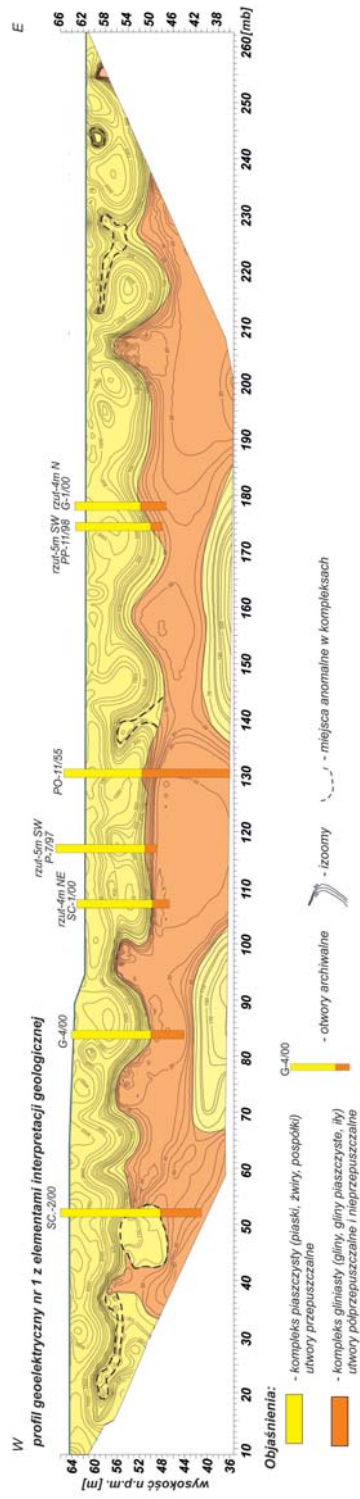
2.4. Metoda tomografii elektrooporowej

Pomiary wykonane metodą tomografii elektrooporowej objęły swoim zasięgiem korpus zapory. Wybrane wyniki pomiarów przedstawiono na przekroju elektrooporowym (rys. 5)



Rys. 5. Rozkład oporności wyinterpretowanej w wyniku inwersji w korpusie zapory (profil nr 1)

Fig. 5. The distribution of the resistivity in the body of the dam (profile nr 1)



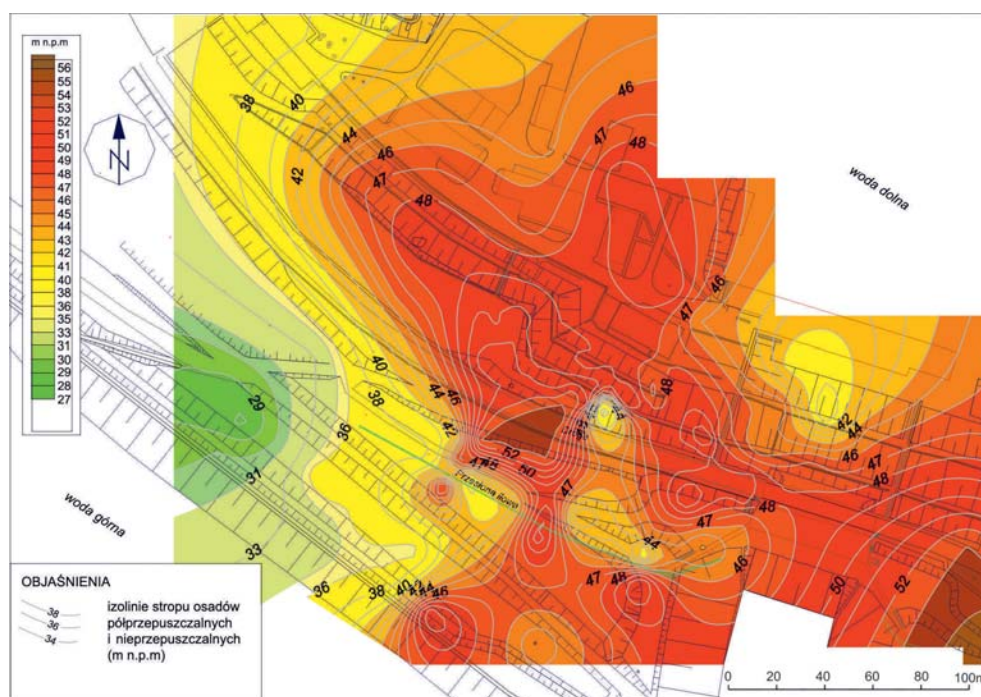
Rys. 6. Przekrój geoelektryczny z elementami budowy geologicznej w korpusie zapory (profil nr 1)

Fig. 6. Interpretation of DC survey in the body of the dam (profile nr 1)

i przekroju z interpretacją geologiczną (rys. 6), na których zaznaczono granice ośrodków o różnych właściwościach elektrycznych.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku pomiarów geoelektrycznych na badanym odcinku ośrodek mierzony jest w bardzo wielu punktach. Na wybranym profilu uzyskano wartości oporności w 1590 punktach. Zastosowanie tego typu pomiarów w dowiązaniu do istniejących archiwalnych otworów wiertniczych, dało bardzo dobre rozpoznanie budowy geologicznej. Na rysunku 6 zaznaczono archiwalne wiercenia geologiczne oraz zrzutowano wiercenia znajdujące się w pobliżu linii przekroju.

W obrazie geoelektrycznym można wyróżnić dwa kompleksy osadów różniących się opornościami elektrycznymi. Najwyżej leżący kompleks cechuje się opornościami, wyinterpretowanymi w wyniku inwersji, powyżej 200 Ωm miejscami przekraczającymi 1000–3000 Ωm w stropie kompleksu. Kompleks ten, odzwierciedlający utwory piaszczyste budujące zaporę, jest mało zróżnicowany w poziomie, a oporność wzrasta ku jego stropowi, co prawdopodobnie związane jest ze spadkiem wilgotności. Mięszczość kompleksu, wyznaczona na podstawie badań geoelektrycznych, koreluje się z danymi z otworów badawczych zaznaczonych na przekrojach geoelektrycznych. Osady leżące poniżej wymienionej warstwy zinterpretowano jako utwory o małej przepuszczalności, zbudowane głównie z utworów gliniastych, lokalnie z glin piaszczystych, pyłów, ilów. W przypadku tego



Rys. 7. Mapa stropu gruntów półprzepuszczalnych i nieprzepuszczalnych wyznaczona na podstawie interpretacji pomiarów geoelektrycznych, sejsmiki refrakcyjnej oraz danych z otworów wiertniczych

Fig. 7. Map of the depth of the roof surface of cohesive soils based on interpretation of resistivity survey, seismic refraction and data from borehole

kompleksu również zachodzi dobra korelacja przebiegu granicy, wyznaczonej na podstawie badań elektrooporowych z otworami archiwalnymi (rys. 6). Badania geoelektryczne mogą stanowić podstawę wyznaczenia przebiegu granicy pomiędzy utworami przepuszczalnymi oraz nieprzepuszczalnymi. Przestrzenne zróżnicowanie powierzchni stropowej utworów słabo przepuszczalnych przedstawiono na rysunku 7. Na uwagę zasługują zmierzone w profilu nr 1 na rzędnych 36–42 m n.p.m. (rys. 5 i 6) wyraźne dwie strefy o podwyższonych opornościach elektrycznych, które odpowiadają niespoistym gruntom zawodnionym. Przez tę strefę może zachodzić przepływ wód podziemnych pod zaporą.

Analiza wszystkich wyników badań geofizycznych pozwoliła na zlokalizowanie obszarów rozluźnienia gruntów oraz stref zwiększonego przepływu wód podziemnych, co zostało przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Mapa lokalizacji stref rozluźnienia gruntów oraz zwiększonego przepływu wód gruntowych

Fig. 8. Location map of relaxation zones of soils and increased groundwater flow

Podsumowanie

W artykule omówiono wyniki czterech metod geofizycznych (sejsmiki CSWS/SASW, sejsmiki refrakcyjnej, tomografii elektrooporowej oraz GPR). Zastosowane metody geofizyczne pozwoliły na uszczegółowienie budowy geologicznej między otworami wiertniczymi, a wykorzystanie informacji geologicznej z wierceń pozwoliło na bardziej jednoznaczną interpretację przeprowadzonych pomiarów geofizycznych.

Kompleksowe zastosowanie metod geofizycznych umożliwiło wskazanie sześciu stref rozluźnienia gruntu oraz dwóch stref zwiększonego przepływu wody gruntowej. Wyznaczono również położenie stropu osadów półprzepuszczalnych (glin polodowcowych) przede wszystkim opierając się na interpretacji pomiarów tomografii elektrooporowej oraz sejsmiki refrakcyjnej skorelowanych z danymi z otworów wiertniczych. Przetwarzanie oraz interpretacja sejsmogramów było utrudnione ze względu na drgania wywołane obecnością pracującej hydroelektrowni oraz drogi o dużym natężeniu ruchu, które emitowały szum. Metoda ERT umożliwiła również wykrycie dwóch stref o podwyższonych opornościach poniżej osadów półprzepuszczalnych. Strefy te należy korelować z osadami niespoistymi, przez które może infiltrować woda podziemna pod hydroelektrownią. Pomiarzy wykonane metodą sejsmiczną CSWS/SASW umożliwiły określenie zmienności wartości modułu ściskania. W gruntach o nienaruszonej strukturze, w których nie zachodzą deformacje filtracyjne, wartość modułu G_{max} wzrasta wraz z głębokością. Natomiast w miejscach gdzie zachodzą te procesy zauważono wyraźne anomalie w rozkładzie wartości modułu G_{max} . Badania georadarowe okazały się mało efektywne ze względu na liczną infrastrukturę techniczną obecną w gruncie, która powodowała duże zakłócenie na echogramach GPR. Niemniej w strefach gdzie zachodził proces sufozji, charakteryzujących się podwyższoną wilgotnością gruntu, zauważono charakterystyczne zniekształcenia fal na obrazie falowym.

Analiza wszystkich wyników badań geofizycznych pozwoliła na zlokalizowanie (rys. 8.) obszarów rozluźnienia gruntów oraz stref zwiększonego przepływu wód podziemnych. W korpusie zapory daje się wyróżnić sześć obszarów, w obrębie których grunty są rozluźnione. Obszary A i B są niewielkie i nie stanowią zagrożenia dla stateczności zapory. Obszary: C, D, E i F są bardziej rozległe i występują w bezpośrednim sąsiedztwie infrastruktury technicznej zapory oraz urządzeń hydrotechnicznych. Należy podkreślić, że najbardziej rozległa jest strefa D. W strefie tej występują również miejsca zwiększonego przepływu wód podziemnych. Według danych archiwalnych w obrębie strefy D i E, w roku 1997, powstało osuwisko, które zniszczyło część infrastruktury technicznej hydroelektrowni. Zniszczone fragmenty hydroelektrowni zostały naprawione, niemniej interpretacja uzyskanych wyników wskazuje, że w dalszym ciągu skarpa zapory jest narażona na utratę równowagi. Rozkład stref rozluźnienia gruntów oraz zwiększonego przepływu wód gruntowych stwarza zagrożenie dla stateczności korpusu zapory.

Literatura

- [1] Barański, M. i Szczepański, T. 2006. Wykorzystanie metod sejsmiki powierzchniowej (CSWS, SASW) do wyznaczenia parametrów sprężystych gruntu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo* 28, 9–18.
- [2] Barański, M. i Szczepański, T. 2007. *Zastosowanie metod sejsmiki powierzchniowej do oceny modułu G gruntu*. Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1-Ś/2007, 17–25.
- [3] Bestyński, Z., Hrabowski, W. i Pacanowski, G. 2008. *Ocena skuteczności uszczelnienia obwałowań przeciwpowodziowych metodami geofizycznymi*. PPKG, Abstrakty, Polskie Towarzystwo Geologiczne, Kraków, 11.
- [4] Jol, H.M., ed. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Application*, 1st ed., Elsevier.
- [5] Lai, C.G. i Wilmański, K. 2005. *Surface waves in geomechanics: Direct and Inverse modelling for soils and rocks*. *CISM Courses nad lecture* No. 481, Springer, Wiedeń, New York 2005.
- [6] Karczewski, J. 2007. *Zarys metody georadarowej*. Wydawnictwa AGH, Wydanie 1, Kraków.

- [7] Kirsch, R., ed. 2009. *Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology*, 2en ed., Springer 2009.
- [8] Kowalski, W.C. 1988. *Geologia inżynierska*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- [9] Matthews, M.C., Clayton, C.R.I. and Own, Y. 2000. The use of geophysical techniques to determine geotechnical stiffness parameters. *Proc. Instn. Civ. Engrs Geotech. Engng.* 143, 31–42.
- [10] Szymanko, J. i Stenzel, P. 1973. *Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.