

ROLA GEOFIZYKI W REALIZACJI „PROGRAMU WISŁA”

UKD 550.83.004.15:624.131+556.3:627.4:338.984.2(282.243.61)''1960/1980+313''

Realizacja zadań „Programu Wisła” wymagać będzie rozwiązania wielu problemów z zakresu geologii inżynierskiej, hydrogeologii, zanieczyszczeń wód powierzchniowych i podziemnych, prognozowania i wielu innych zagadnień. W działalności tej nie może zabraknąć szerokiego udziału badań geofizycznych. Rozwój i osiągnięcia geofizyki inżynierskiej w ostatnim dwudziestolecu wskazują na konieczność optymalnego jej wykorzystania w rozpoznawaniu budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i własności fizyczno-mechanicznych podłoża budowlanego.

Ze względu na specyfikę warunków geologiczno-inżynierskich dorzecza górnej Wisły oraz Wisły środkowej i dolnej przed badaniami geofizycznymi w tych regionach stawiane są odmienne zadania, których rozwiązanie wymaga zastosowania zróżnicowanej metodyki badań. Dlatego omawianie poszczególnych zagadnień będzie się odbywać w podziale na obszar Karpat obejmujący większość dorzecza górnej Wisły i obszary dorzecza środkowej oraz dolnej Wisły.

DOTYCHCZASOWE BADANIA GEOFIZYCZNE DLA CELÓW BUDOWNICTWA WODNEGO

Pierwsze prace geofizyczne w dolinie Wisły wykonano jeszcze w końcu lat pięćdziesiątych, w rejonach projektowanych już wówczas stopni wodnych w Tczewie i Kwidzynie (1). W wyniku zastosowania metody elektrooporowej określono miąższości i głębokości występowania utworów wodonośnych oraz nieprzepuszczalnych, wydzielono obszary występowania namulów i zlokalizowano głębokie rynny erozyjne. Pozwoliło to na właściwe usytuowanie wierceń i na dokładną interpretację geologiczną między otworami. Doświadczenia zdobyte w tych badaniach umożliwiły ustalenie metodyki pomiarów geoelektrycznych, która stosowana jest na Niżu Polskim do dziś, z niewielkimi zmianami. Wraz z metodą elektrooporową w badaniach w rejonie Tczewa i Kwidzyna zastosowano sejsmiczne profilowanie refrakcyjne, które ze względu na użytą aparaturę i metodykę pomiarów nie w pełni wykazało swoją przydatność. Dlatego w latach następnych prace geofizyczne przede wszystkim opierały się na metodach geoelektrycznych.

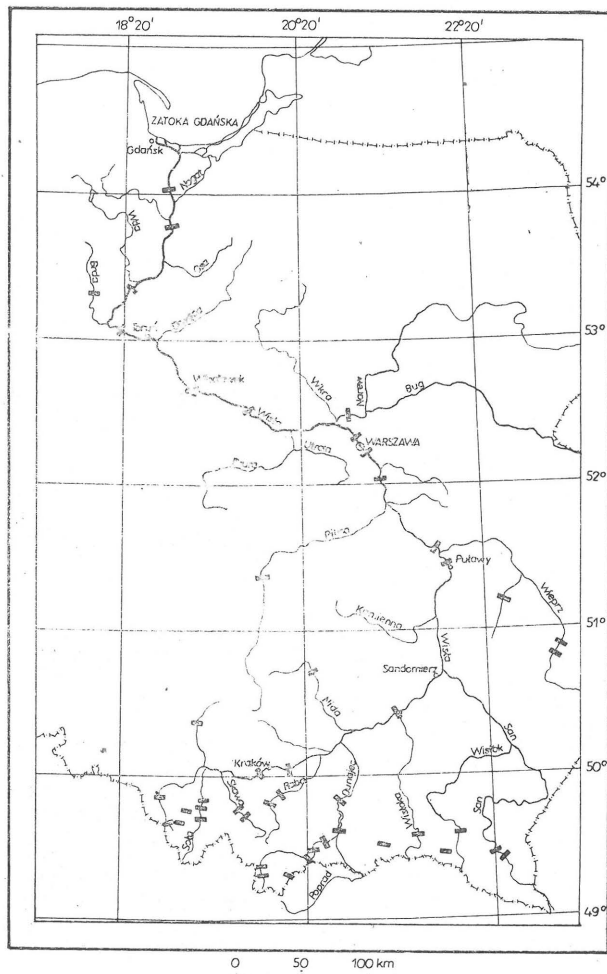
Późniejsze badania geofizyczne dla projektowanych stopni na Wiśle wykonywano podobną metodyką kolejno dla rejonów: Solca Kujawskiego, Chełmna, Płocka, Siekierka, Włocławka, Piotrowic, Puław i Ostrówka koło Połańca. Zbliżone zadania rozwiązywano z użyciem metody elektrooporowej na dopływach Wisły na niżu: w pobliżu Koronowa na Brdzie, Dębego na Bugu, Zemborzyc na Bystrzycy, Nieliszewa na Wieprzu i Sulejowa nad Pilicą.

Prace geoelektryczne stosowane były również dla potrzeb dokumentowania geologiczno-inżynierskiego większości projektowanych stopni wodnych w Karpatach, gdzie głównym celem było określanie miąższości aluwii i koluwiów w dolinach rzek górskich, a także badanie osuwisk. Prace te wykonano m.in. w Wiśle Czarnej, w Jurgowie nad Białką, w Solinie i Myczkowcach nad Sanem, w Tyłmanowej, Kadzycy i Czchowie nad Dunajcem.

W znacznie mniejszym zakresie prowadzono badania specjalistyczne, których zadaniem było określenie parametrów dynamiki wód podziemnych (kierunek spływu, prędkość filtracji, kontakty hydrauliczne), parametrów filtracyjnych utworów przepuszczalnych (współczynnik filtracji, porowatość) i własności fizyczno-mechanicznych, jak: gęstość, wilgotność, stopień zagęszczenia, współczynniki sprężystości itp. Wykorzystano dla tych celów metody geoelektryczne i radiometryczne, akustyczne i ultradźwiękowe, a także metody penetracyjne z użyciem specjalnych aparatów i urządzeń.

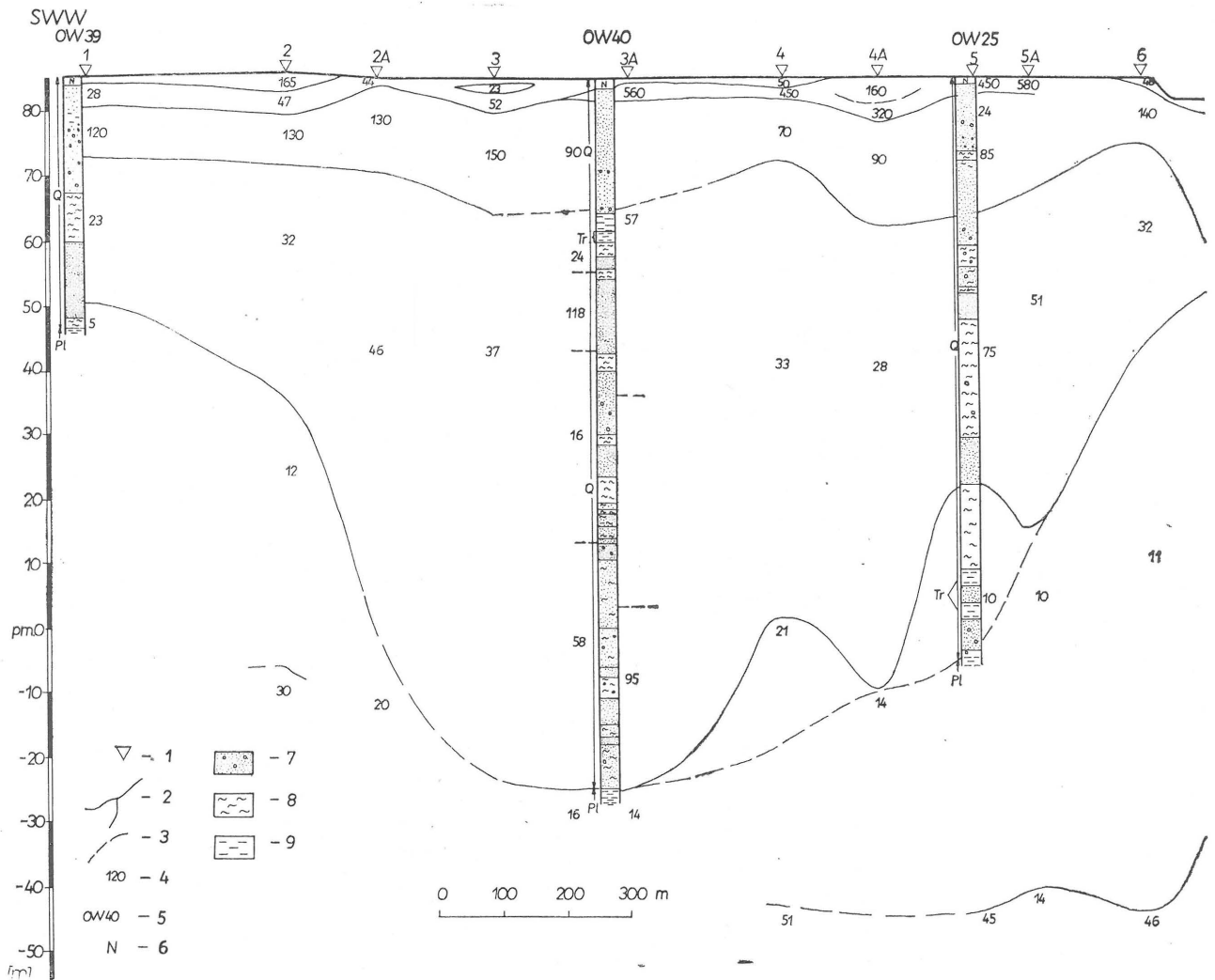
Pod koniec lat sześćdziesiątych wprowadzono do praktyki refrakcyjną metodę sejsmiczną z wykorzystaniem ręcznego sposobu wzbudzania drgań oraz specjalnie przystosowanych do tego celu aparatów (12, 17). Metoda ta wraz z elektrooporową znalazła szerokie zastosowanie w badaniu masywów skalnych w Karpatach dla potrzeb budownictwa wodnego. Wachlarz rozwiązywanych zadań był tu dość szeroki i obejmował wydzielanie zespołów litologicznych, stref spękań i nieciągłości tektonicznych, badanie

Pod koniec lat sześćdziesiątych wprowadzono do praktyki refrakcyjną metodę sejsmiczną z wykorzystaniem ręcznego sposobu wzbudzania drgań oraz specjalnie przystosowanych do tego celu aparatów (12, 17). Metoda ta wraz z elektrooporową znalazła szerokie zastosowanie w badaniu masywów skalnych w Karpatach dla potrzeb budownictwa wodnego. Wachlarz rozwiązywanych zadań był tu dość szeroki i obejmował wydzielanie zespołów litologicznych, stref spękań i nieciągłości tektonicznych, badanie



Ryc. 1. Lokalizacja badań geofizycznych wykonanych dla celów budownictwa wodnego na Wiśle i jej dopływach.

Fig. 1. Location of geophysical surveys in the area of the Vistula River and its tributaries, carried out for the needs of hydrotechnical building.



Ryc. 2. Przekrój geoelektryczny prostopadły do koryta Wisły w rejonie Warszawy (wg B. Jagodzińskiej, 1968).

1 — sondowanie elektrooporowe, 2 i 3 — granice pewne i prawdopodobne warstw o różnej oporności elektrycznej, 4 — wielkość oporności w Ωm , 5 — otwór wiertniczy, 6 — namuły, 7 — piaski z otoczkami, 8 — gliny piaszczyste, 9 — ily.

osuwisk i własności fizyczno-mechanicznych górotworu. Tego typu prace przeprowadzono m.in. w Porąbce-Zar nad Sołą, w Wiśle Malince, w Dobczycach nad Rabą, w Działiszku i Czorsztynie nad Dunajcem, w Klimkówce nad Ropą, w Lipowicy koło Dukli, w Besku nad Wisłokiem.

Mapka na ryc. 1 przedstawia schematyczną lokalizację wszystkich prac, jakie z zastosowaniem metod geofizyki inżynierskiej wykonano w ostatnich 20 latach na Wiśle i jej dopływach dla potrzeb budownictwa hydroenergetycznego. Większość badań zarówno tych rutynowych, jak i metodycznych wykonało Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych, najbardziej wyspecjalizowany obecnie ośrodek w zakresie geofizyki inżynierskiej. Wiele dokumentacji geoelektrycznych dla stopni wodnych, zwłaszcza w pierwszej połowie lat sześćdziesiątych zrealizowało „Hydrogeo”. Specjalistyczne prace badawcze o charakterze metodycznym i wdrożeniowym powstały w IG, Instytucie Techniki Jądrowej AGH, OBRTG, a także w innych ośrodkach badawczych i rozwojowych.

Większość uzyskanego materiału dokumentacyjnego można wykorzystać bezpośrednio, natomiast część ze względu na dopływ nowych danych geologicznych, zwłaszcza wiertniczych, wymaga reinterpretacji.

W przypadku kiedy nowo projektowane obiekty w ramach „Programu Wisła” będą lokalizowane według dawnych założeń lub mieć będą niewielkie przesunięcia, stare materiały mogą i powinny być

uwzględnione w stopniu maksymalnym. W przypadku gdy niektóre zadania geologiczno-inżynierskie nie były dotychczas rozwiązane, a są aktualnie możliwe do rozwiązania metodami geofizycznymi, to powinny być podjęte badania uzupełniające. Lokalizując obiekty budownictwa w nowych rejonach należy przeprowadzić nowe badania o zakresie wynikającym z potrzeb projektowania, budowy i eksploatacji obiektu.

PROBLEMATYKA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKA BUDOWNICTWA HYDROTECHNICZNEGO ROZWIĄZYWANA METODAMI GEOFIZYCZNYMI

Większość problemów rozwiązywana jest na etapie projektowania obiektu budowlanego. Istnieją również takie zagadnienia, które mogą być rozpoznawane metodami geofizycznymi na etapie budowy i eksploatacji. Szczegółowe podstawy fizyczne metod, a także metodyka prac polowych i interpretacji podane są w podręcznikach (15, 16) i w czasopiśmie fachowych. W niniejszym artykule szczególną uwagę zwrócono na zakres zastosowań metod, na ich dobór przy rozwiązywaniu różnych zadań, jak również na stopień ich dopracowania i wdrożenia.

Badania utworów luźnych

Posadowienie obiektu na gruntach luźnych dotyczy takiej sytuacji, gdy w zasięgu bezpośredniego oddziaływania budowli nie występują skały zwięzłe.

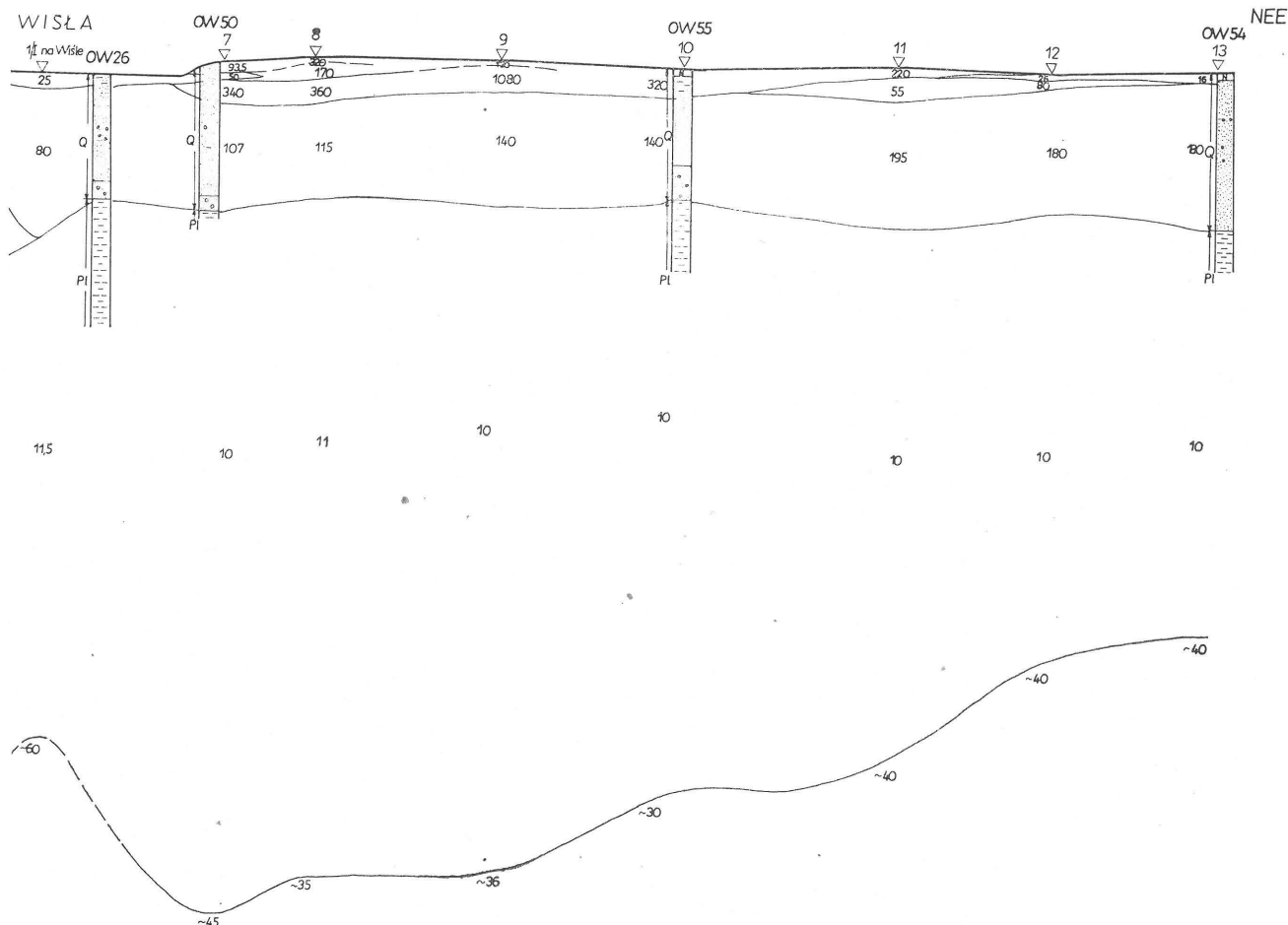


Fig. 2. Geoelectric section perpendicular to Vistula River channel in the Warsaw area (after B. Jagodzińska, 1968).

1 — electric resistance profiling, 2-3 — controlled and inferred boundaries of beds differing in electric resistance, 4 — value of resistance in Ωm , 5 — borehole, 6 — aggregations, 7 — sands and gravels with pebbles, 8 — sandy tills, 9 — clays.

A zatem rozpoznaniem będą objęte utwory czwartorzędu, a w niektórych przypadkach i trzeciorzędu.

Przy budowie stopni wodnych i obiektów towarzyszących metody geofizyczne stosuje się do:

- rozpoznawania budowy geologicznej,
- badania dynamiki wód i parametrów filtracyjnych,
- badania stateczności zboczy i osuwisk,
- określania własności fizyczno-mechanicznych podłoża.

Rozpoznawanie budowy geologicznej

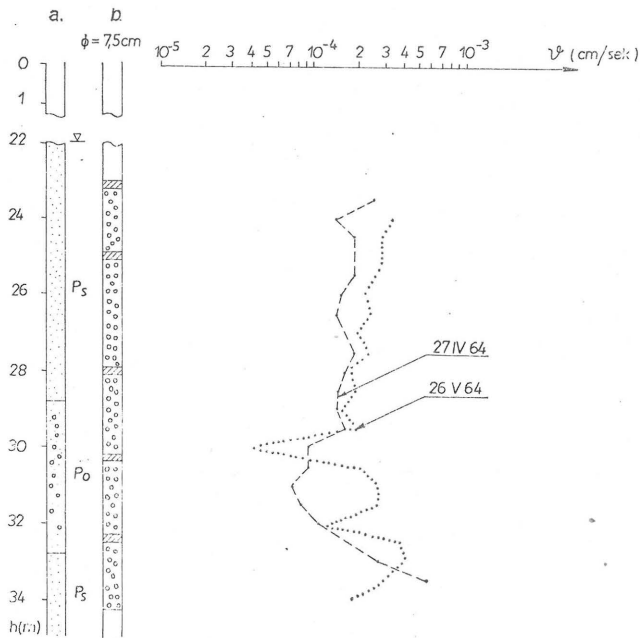
Metody geofizyczne, a zwłaszcza najczęściej stosowane dla tego celu sondowania elektrooporowe umożliwiają określenie litologii i geometrii warstw. Wydzielane są kompleksy utworów piaszczysto-żwirowych, glin zwałowych i iłów. Ich miąższości nie mogą być zbyt małe w porównaniu z głębokością ich występowania, aby metoda elektrooporowa była w stanie zasygnalizować te kompleksy. Liczne drobne przewarstwienia warstw przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, a także ich wyklinowywanie się lub nagłe zmiany miąższości rejestrowane są jako jeden kompleks o uśrednionej oporności elektrycznej.

Jeżeli zachodzi konieczność wydzielenia warstw o małej miąższości wskazane jest stosowanie sondy uniwersalnej (4) lub metod geofizyki wiertniczej. W pierwszym przypadku można wyznaczyć przewarstwienia o miąższości powyżej 20 cm do głębokości 10-15 m bez potrzeby wierceń, w drugim natomiast podobne informacje można otrzymać dla całego profilu otworu wiertniczego.

Przy badaniu budowy geologicznej dolin rzecznych jednym z podstawowych zadań jest wyznaczenie miąższości aluwów i ich rozprzestrzenienia, a także morfologii podłoża nieprzepuszczalnego. Pomiary prowadzi się na profilach prostopadłych do osi doliny, na których punkty sondowań znajdują się w odległościach 50-200 m. Profile przebiegające wzdłuż osi zapory albo w jej pobliżu powinny wychodzić poza przyczółki zapory, a profile na projektowanym zbiorniku poza jego boczne obwałowania lub naturalne zbocza doliny aż na wysoczyznę. Dobre rozpoznanie geofizyczne w pasie obrysu zbiornika i na przyczółkach zapory jest szczególnie ważne w celu właściwego zabezpieczenia przed przeciekami i osuwiskami.

Na ryc. 2 podano przykład wyników badań geoelektrycznych. Jest to przekrój geoelektryczny prostopadły do koryta Wisły w rejonie Warszawy (wg B. Jagodzińskiej, 1968). Szczególnie ciekawym elementem jest tu głęboka rynna erozyjna na lewym brzegu rzeki, wyżłobiona w utworach plicenu. Wykorzystując dane wiertnicze rozwiązano badaniami geoelektrycznymi następujące zadania:

- określono miejsca i miąższości przypowierzchniowej warstwy niskooporowej odpowiadającej namułom,
- wyznaczono dwa główne kompleksy litologiczne w utworach czwartorzędu, jeden wysokooporowościowy (70-200 Ωm) odpowiadający zawadnionym utworom piaszczysto-żwirowym i drugi o opornościach 20-50 Ωm wykształcony w postaci naprzemianległych utworów piaszczysto-żwirowych i gliniastych wypełniających rynnę erozyjną,
- określono morfologię stropu iłów pliceniowych o opornościach 10-20 Ωm .



Ryc. 3. Wyniki dwóch pomiarów prędkości filtracji wykonanych metodą elektrolityczną w odstępie miesięcznym w jednym z piezometrów w rejonie Puław.

a — profil geologiczny, b — sposób zafiltrowania piezometru.

Fig. 3. Results of two measurements of filtration velocity, taken with the use of electrolytic method in one month interval by one of piezometers in the Puławy area.

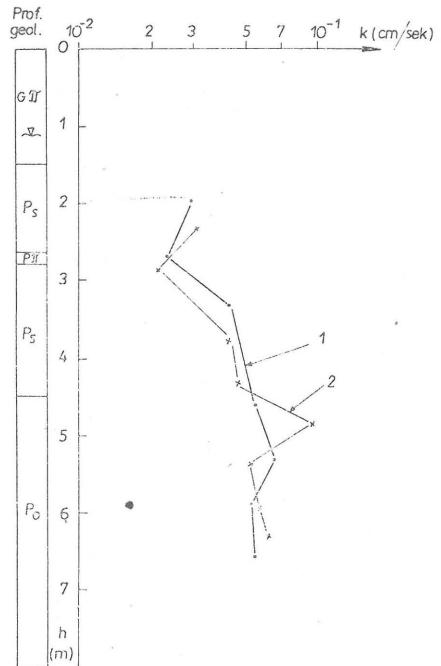
a — geological section, b — the mode of filtration of piezometer.

Badanie dynamiki wód i przepuszczalności gruntów

Głównymi parametrami określającymi ruch wód podziemnych jest kierunek przepływu wód, prędkość filtracji i prędkość rzeczywista, a także układ połączeń hydraulicznych oraz uprzywilejowanych dróg krążenia. Informacje o tych parametrach są wykorzystywane bezpośrednio lub służą do oceny własności filtracyjnych ośrodka.

W badaniu parametrów ruchu wód stosowane są zarówno metody powierzchniowe, jak i otworowe. Do grupy pierwszej należy metoda potencjałów własnych. Polega ona na śledzeniu anomalii pola elektrycznego na powierzchni Ziemi. Anomalie te wywoływane są przez potencjały filtracyjne powstające przy przepływie płytkich wód podziemnych. Analiza danych pozwala wyznaczyć uprzywilejowane drogi krążenia wód. Metody otworowe wykorzystują jako znaczniki wód izotopy promieniotwórcze oraz roztwory solne zmieniające przewodnictwo wód podziemnych. Do tej grupy metod zaliczyć należy: 1) metodę naładowanego ośrodka określającą kierunek przepływu i prędkość rzeczywistą; 2) metodę rozcieńczenia do wyznaczania prędkości filtracji i 3) metody odcinkowe do pomiaru prędkości rzeczywistej, połączeń hydraulicznych i śledzenia dróg krążenia (9, 5).

Pomiar prędkości filtracji w pojedynczym otworze polega na śledzeniu zmian koncentracji wprowadzonej do wody znacznika, powodowanych przepływającą przez otwór (filtr) wodą podziemną. Najlepsze wyniki otrzymuje się z pomiarów w piezometrach z odpowiednio skonstruowanym filtrem. Przykład pomiaru z użyciem roztworu solnego podano na ryc. 3. Pomiar wykonano w pradolinie Wisły w rejonie Puław (8). Znajomość prędkości filtracji w przekroju poprzecznym do pradliny oraz pola powierzchni utworów przepuszczalnych umożliwiła określenie ilości wody przepływającej pradoliną w jednostce czasu.



Ryc. 4. Wyniki pomiarów współczynnika filtracji w dolinie Wisły w rejonie Jabłonna.

1 — metoda zalewania, 2 — metoda szczyrpywania.

Fig. 4. Results of measurements of filtration coefficient in the Vistula River valley, Jabłonna area.

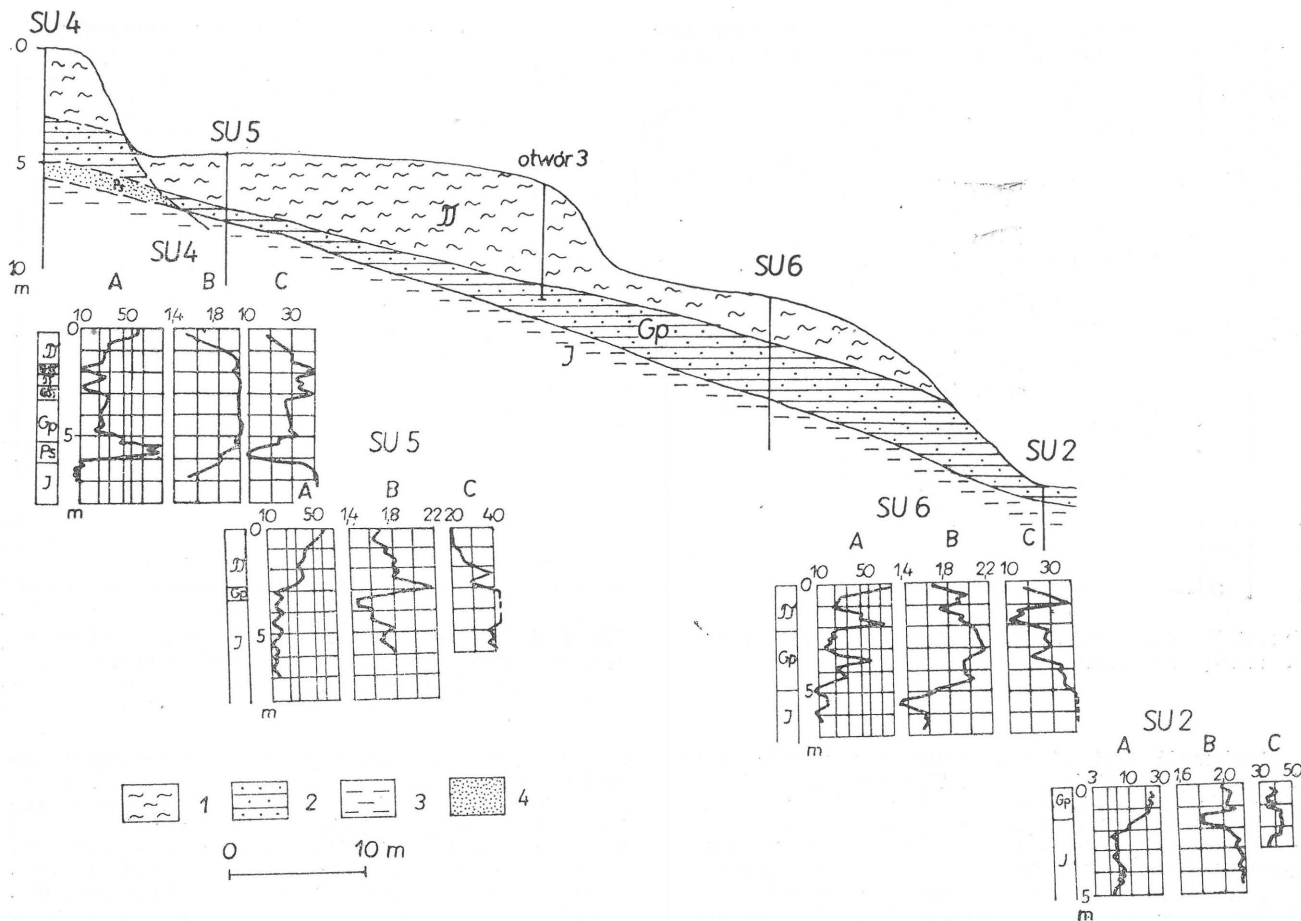
1 — overflooding method, 2 — water drawing method.

Stwierdzenie istnienia związku hydraulicznego między różnymi warstwami wodonośnymi jest możliwe również z wykorzystaniem znaczników radioaktywnych. Pomiar polega na wprowadzeniu wskaźnika do jednej z warstw wodonośnych i stwierdzeniu jego obecności w drugiej warstwie, w której zazwyczaj obniża się ciśnienie piezometryczne, np. drogą próbnego pompowania. W tym celu potrzebna jest dobra znajomość budowy geologicznej miejsca badań.

Metody potencjałów własnych i naładowanego ośrodka są stosowane przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych i inne komórki geofizyczne przy przedsiębiorstwach geologicznych. Stosowanie pozostałych metod znacznikowych wymaga posiadania odpowiedniej aparatury, specjalnych konstrukcji piezometrów oraz skrupulatnego przestrzegania właściwej metodyki pomiarów. Dlatego prowadzenie tych badań jest możliwe przy dużym doświadczeniu personelu w stosowaniu tych metod i znajomości prac rządzących ruchem wód podziemnych. Pomiaru takie wykonywał OBRTG, Energopomiar i niektóre ośrodki w instytutach badawczych.

Niezwykle ważnym problemem dla prawidłowej eksploatacji wszelkich zbiorników przy zaporach, oczyszczalniach ścieków itp. jest lokalizacja oraz śledzenie stref infiltracji i ucieczek wód przez zapory ezołowe i boczne, obwałowania i dno zbiorników. Dla tych celów stosowane są: metoda znaczników radioaktywnych, metoda elektrooporowa i potencjałów własnych, a ostatnio również geotermiczna i mikrogramimetryczna (20).

Z parametrów filtracyjnych najważniejszy jest współczynnik filtracji, charakteryzujący przepuszczalności ośrodka gruntowego. Jego określenie jest możliwe przez dokonanie pomiaru prędkości filtracji i gradientu hydraulicznego albo pomiaru wymuszonych ruchów pionowych w otworach wiertniczych (7). Znając prędkość filtracji i spadek hydrauliczny wyznaczony drogą niwelacji zwierciadła wody w przynajmniej 3 otworach można obliczyć na podstawie wzoru Darcy'ego współczynnik filtracji. Podstawowym wa-



Ryc. 5. Przekrój podłużny przez osuwisko w Słupczy (wg M. Borowczyka i Z. Frankowskiego, 3). SU4 — punkt pomiaru sondą uniwersalną, A, B, C — wyniki pomiarów kolejno oporności elektrycznej w Ωm , gęstości objętościowej w g/cm^3 , wilgotności objętościowej w %.

1 — pyły, 2 — gliny piaszczyste, 3 — iły, 4 — piaski średnie.

runkiem dobrego pomiaru prędkości filtracji jest wyeliminowanie ruchów pionowych wody w otworze poprzez zastosowanie odpowiednich zamknięć.

Wyznaczenie współczynnika filtracji z wykorzystaniem ruchów pionowych oparte jest na pomiarze prędkości pionowego przepływu, powstającego wskutek różnicy ciśnień piezometrycznych na różnych głębokościach bądź wymuszonego pompowaniem wody z otworu lub do otworu. Do pomiaru prędkości pionowej wykorzystywana jest sól jako znacznik oraz aparatura rezystywimetryczna. Metoda ta umożliwia warstwowe wyznaczenie współczynnika filtracji. Według wiadomości posiadanych przez autora nie była ona jednak dotychczas stosowana w Polsce.

Oprócz metod pomiaru przepuszczalności gruntów piaszczysto-zwirowych omówionych powyżej, przy których wykorzystywana jest aparatura geofizyczna opracowano i opatentowano metodę bezpośredniego pomiaru współczynnika filtracji (10). Metoda ta jest stosowana w praktyce przez „Geoprojekt”. Polega ona na pomiarze ilości wody wtłoczonej w jednostce czasu pod własnym ciśnieniem do specjalnie skonstruowanego piezometru zaopatrzonego w filtr i wbitego na żadaną głębokość przy użyciu wibromłota. Przykład pomiaru w dolinie Wisły w rejonie Jabłonny podaje ryc. 4. Dla porównania przytoczono wyniki pomiarów metodą szczyrpywania.

Badanie stateczności zboczy i osuwisk

Stateczność zboczy, to jedno z ważniejszych zagadnień dla bezpieczeństwa i właściwej eksploatacji budowli wodnych. Jest to również jedno z trudniejszych zadań geologiczno-inżynierskich, w tym rów-

Fig. 5. Longitudinal section through landslide at Słupczy (after M. Borowczyk and Z. Frankowski, 3).

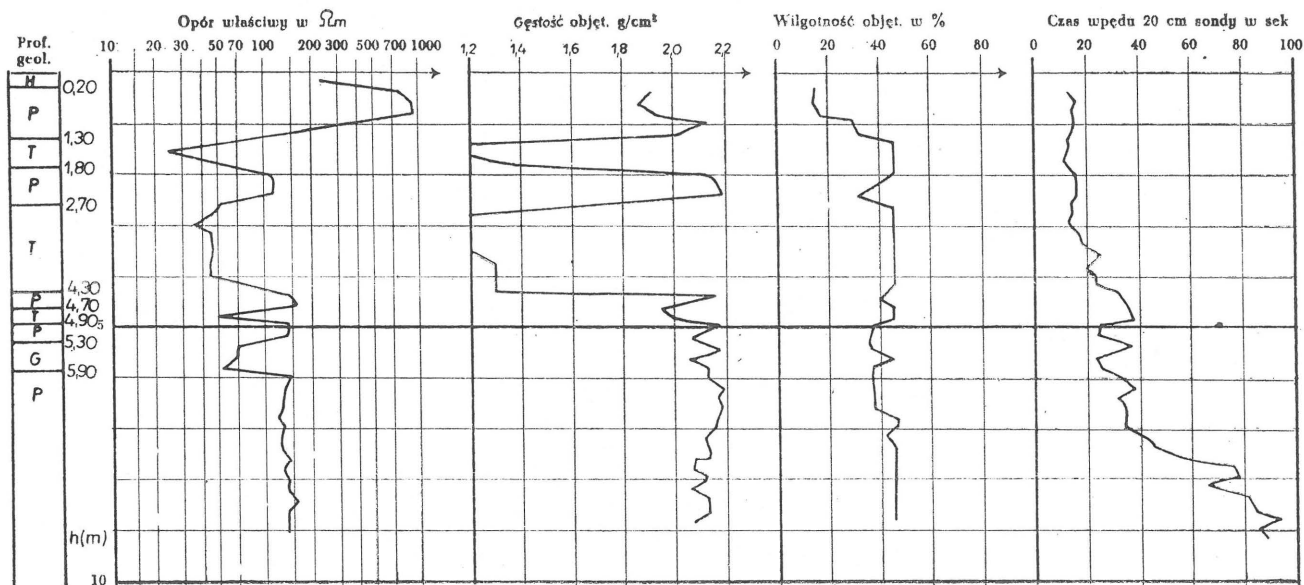
SU4 — point measurement taken with the use of universal sounder, A, B, C — results of successive measurement of electric resistance (in Ωm), volume density (in g/cm^3), and volume moisture (in %). 1 — silts, 2 — sandy loams, 3 — clays, 4 — medium-grained sands.

niez i dla metod geofizycznych. Zarówno przy prognozowaniu zachowania się zbocza doliny lub tarasu w zmienionych warunkach, jak i przy badaniu istniejącego osuwiska podstawowe znaczenie ma dokładne, nawet drobiazgowo rozpoznanie litologii i własności fizycznych gruntu, zwłaszcza wilgotności. W wielu przypadkach informacji takich może dostarczyć zastosowanie wspomnianej już wyżej sondy uniwersalnej. Niemal punktowy pomiar oporności elektrycznej umożliwia śledzenie zmian litologicznych, a pomiar gęstości, wilgotności i szybkości pogrążania sondy daje wskazówki dla lokalizacji czynnych bądź potencjalnych powierzchni zsuwu.

Przykładem skutecznego zastosowania takiej metodyki jest zbadanie osuwiska w Słupczy koło Sandomierza. Na ryc. 5 podano przekrój podłużny przez czynne osuwisko wraz z wynikami sondowań, które były podstawą do sporządzenia przekroju. Powierzchnią poślizgu był tu strop ilów, na których znajdowało się drobne przewarstwienie piaszczyste. Strefa ta zaznacza się wyraźnie na krzywej oporności jako granica litologiczna, a na wykresie gęstości nieoczekiwanym zmniejszeniem do $1,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ i zwiększeniem wilgotności powyżej 40%, co autorzy badań (3) uważają za elementy charakterystyczne dla powierzchni poślizgu.

Wyznaczanie własności fizyczno-mechanicznych podłoża

Metody geofizyczne pozwalają samodzielnie wyznaczać następujące własności podłoża: gęstość objętościową, wilgotność objętościową i dynamiczne parametry sprężystości.



Ryc. 6. Wyniki pomiaru parametrów fizycznych gruntu sondą uniwersalną w dolinie Wisły, w rejonie Jeziornej.

Fig. 6. Results of measurements of soil physical parameters with the use of universal sounder in the Vistula River valley, Jeziorna area.

Znajomość gęstości i wilgotności wystarcza dla obliczenia porowatości gruntu. Ten parametr z kolei umożliwia określenie stopnia zagęszczenia dla gruntów sypkich, jeśli dostępne są próbki do laboratoryjnego wyznaczania wskaźnika maksymalnej i minimalnej porowatości. Spośród parametrów sprężystości wyznaczany jest moduł sprężystości podłużnej (Younga), współczynnik Poissona i dynamiczny współczynnik podatności podłoża.

Gęstość objętościowa i wilgotność objętościowa są przedmiotem pomiarów z użyciem metod radiometrycznych. Najdokładniejszych wyników dostarcza stosowana od wielu lat sonda uniwersalna (4). Pomiar gęstości objętościowej oparty jest na znanej zależności tego parametru od natężenia rozproszonego promieniowania gamma, zaś wilgotności objętościowej na związku między zdolnością ośrodka do spowalniania neutronów a zawartością w nim wodoru. Dokonuje się tych pomiarów przy użyciu małych średnicowych sond opuszczanych do wnętrza rurek o średnicy 38 mm, wbitych wibromotem do żądanej głębokości.

Maksymalny zasięg głębokościowy, zależnie od rodzaju gruntu i jego stanu wynosi od kilku do kilkunastu metrów. W gruntach aluwialnych osiągnięte głębokości są znacznie większe niż w utworach spoistych pochodzenia polodowcowego. Błąd pomiaru gęstości wynosi dla gruntów sypkich $\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$, a dla spoistych $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$. Wyznaczanie wilgotności objętościowej obarczone jest błędem $\pm 3\%$ (w przedziale 0–39%; 2). Ryc. 6 przedstawia przykład pomiarów sondą uniwersalną wykonanych w dolinie Wisły, w rejonie Jeziornej. Profil geologiczny wyinterpretowano na podstawie zmian zmierzonych parametrów fizycznych. Sonda uniwersalna zapewnia najdokładniejsze wyniki pomiarów wymienionych parametrów fizycznych gruntów.

Jeśli zachodzi potrzeba określania tych parametrów na większych głębokościach, do tego celu mogą być wykorzystane pomiary geofizyki wiertniczej w odwierconych otworach. Dokładność pomiarów jest w tym przypadku mniejsza ze względu na wpływ otworu.

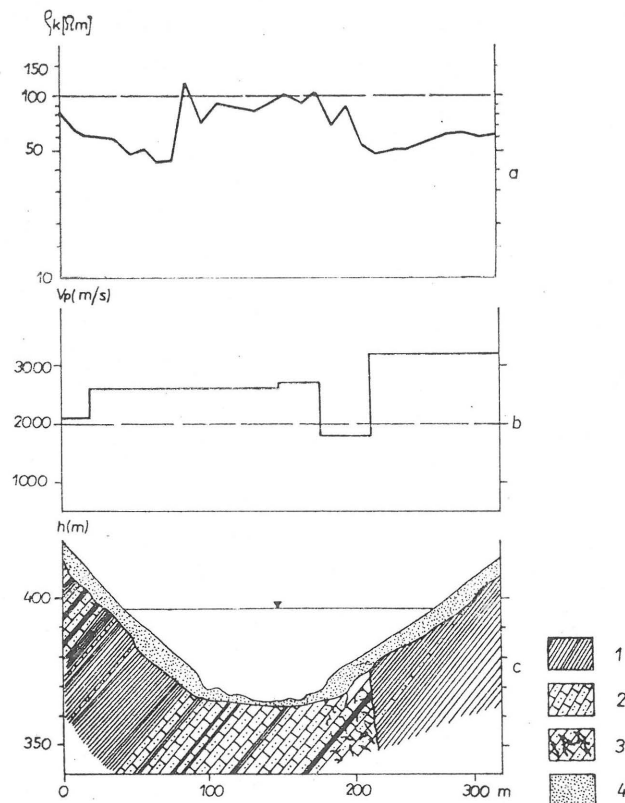
Omówione powyżej pomiary gęstości i wilgotności objętościowej, a także porowatości gruntów w stanie naturalnym wykonuje się na etapie projektowania. Jednak równie ważną rolę spełniają te metody zarówno na etapie budowy, jak i eksploatacji obiektów. Rejestracja zmian porowatości w procesie odwodnienia, wykonywania wykopów fundamentowych,

a zwłaszcza zagęszczania podłoża podfundamentowego i ponownego zawodnienia — dostarcza wiele przydatnych informacji do oceny zachowania się ośrodka gruntowego po zakończeniu budowy. Możliwa i bardzo ważna jest również stała kontrola zmian porowatości podłoża pod fundamentem podczas eksploatacji obiektu o dynamicznym oddziaływaniu. Takie okresowe pomiary można wykonywać w rurekach wbitych na stałe w podłoże w czasie budowy lub nawet po jej zakończeniu.

Należy jeszcze wspomnieć o radiometrycznych pomiarach gęstości objętościowej na powierzchni gruntu. Znajdują one zastosowanie przy kontroli powierzchniowego zagęszczania gruntu w trakcie wykonywania nasypów.

Przechodząc do omówienia badań parametrów sprężystości gruntu należy zauważyć ich zależność od czasu trwania naprężeń. Przy krótkotrwałych naprężeniach mamy do czynienia z dynamicznymi parametrami sprężystości, a do ich wyznaczania stosuje się metody geofizyczne (6), a te z kolei przyjęło się dzielić na sejsmiczne i dynamiczne (14). Badania sejsmiczne opierają się na pomiarze prędkości rozchodzenia się i intensywności pochłaniania fal sprężystych w gruntach. Jako źródło fal wykorzystuje się uderzenia spadającej masy lub wybuchy detonatorów. Czas przebiegu mierzy się jedno- lub wielokanałową aparaturą sejsmiczną. Znajomość prędkości fal podłużnych i poprzecznych, a także gęstości gruntu wystarcza do wyznaczenia parametrów sprężystości modułu Younga i współczynnika Poissona. Analiza zapisanego przebiegu fal na różnych punktach badanego profilu pozwala również oznaczyć częstotliwość drgań własnych i współczynnik tłumienia gruntu. Zależą metod sejsmicznych jest badanie własności sprężystych ośrodka o wymiarach projektowanego obiektu budowlanego (13).

Badania dynamiczne opierają się na ustaleniu dynamicznych charakterystyk układu „fundament—grunt” poddawanego drganiom wymuszonym (wibracyjnym) lub drganiom swobodnym (uderzenie, wybuchy). Przy zastosowaniu drgań wymuszonych przez wibratory z ekscentrycznie zawieszonymi masami i zmienną częstotliwością obrotów, wyznacza się krzywe zależności amplitudy od częstotliwości drgań. Z zależności tych określa się dynamiczny współczynnik podatności podłoża i współczynnik tłumienia układu. Badania z wibratorami, chociaż najbardziej metodycznie opracowane, są kosztowne i kłopotliwe do prowadzenia, ze względu na duże ciężary wibrato-



Ryc. 7. Przykład kompleksowych pomiarów geofizycznych na rzece Ropie koło Klimkówki (wg J. Trojana, 17).

a — wykres oporności elektrycznej podłoża uzyskany z profilowania geoelektrycznego, b — wykres prędkości fal podłużnych podłoża na podstawie badań sejsmicznych, c — przekrój geologiczny na podstawie danych geofizycznych, 1 — łupki, 2 — piaskowce i łupki, 3 — strefa spękań, 4 — zwietrzelina.

Fig. 7. An example of complex geophysical measurements at the Ropa River near Klimkówka (after J. Trojan, 17).

a — graph of electric resistance of bedrock, based on geoelectric profiling, b — graph of velocity of longitudinal waves in bedrock, based on seismic surveys, c — geological section based on geophysical data, 1 — shales, 2 — sandstones and shales, 3 — fracture zone, 4 — regolith.

rów. Metoda bardziej uproszczona i łatwiejsza w wykonaniu bazuje na drganiach swobodnych. Polega na wywołaniu drgań gruntu uderzeniem w blok fundamentowy i pomiarze drgań bloku i gruntu przy użyciu aparatury typu sejsmicznego. W rezultacie wyznacza się te same parametry, co przy drganiach wymuszonych. Przeprowadzone badania współczynnika podłoża metodą dynamiczną wykazały jego zależność od stopnia zagęszczenia gruntów sypkich oraz od modułu presjometycznego (11).

Omówione powyżej sposoby wyznaczania własności fizyczno-mechanicznych są stosowane przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych.

Badania podłoża skalnego

Poniżej przedstawiono możliwości metod geofizycznych w rozwiązywaniu problemów geologiczno-inżynierskich w warunkach płytkiego występowania skał litych. Dotyczy to przede wszystkim obszaru Karpat, gdzie podłoże skalne tworzy flisz oraz niektórych rejonów środkowej Wisły, gdzie również można się spotkać z płytko występującym starszym podłożem skalnym. Szczególnie bogate doświadczenie zebrano w wyniku licznych badań wykonanych przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych w rejonie projektowanych i realizowanych budowli wodnych

Lp.	Kompleks litologiczny	% piaskowców		Oporność Ωm	
		od	do	od	do
1	łupkowy	0	25	5	40
2	piaskowcowo-łupkowy	25	75	40	130
3	piaskowcowy	75	100	130	300

na rzekach karpaccich (17, 18, 12). Opracowany kompleks metod pozwala rozwiązać wiele problemów, z których najważniejsze omówiono poniżej.

Badania nadkładu i strefy wietrzenia

Nadkład w dolinach górskich rzek zbudowany z utworów aluwialnych i koluwiów wyraźnie różni się pod względem własności elektrycznych i sprężystych od zwięzłego, starszego podłoża. Warstwa ta wraz z silnie zwietrzałą częścią utworów podłoża daje się dokładnie wydzielić metodami — sejsmiczną i elektrooporową; sejsmiczna w wersji profilowania refrakcyjnego odtwarza morfologię stropu podłoża skalnego, zaś sondowania elektryczne poza miąższością informują o litologii nadkładu, wyróżniając strefy piaszczysto-żwirowe od glin i zwietrzliny skalnej.

Badania litologii i tektoniki podłoża

Doświadczenia zastosowania metod sejsmicznych wskazują, że w zwięzłym podłożu śledzi się często druga granica sejsmiczna, rozdzielająca strefę blokowego spękania skał od ośrodka niespękanego. Rozpoznanie tego zjawiska ma duże znaczenie praktyczne dla właściwego zaprojektowania fundamentów obiektu.

Ponieważ utwory fliszu zbudowane są z kolejno ułożonych warstw piaskowców i łupków ilastych o zmiennych miąższościach w kierunku prostopadłym do biegu warstw, można z użyciem metod geoelektrycznych śledzić występowanie kompleksów skalnych o znacznej przewodności piaskowców bądź łupków. Nagromadzone wyniki badań geofizycznych i geologicznych pozwoliły ustalić ogólną zależność oporności elektrycznej od procentowej zawartości piaskowców w skale (tab.). Przy znacznym upadzie warstw najlepszą metodą dla rozpoznania litologicznego jest profilowanie elektrooporowe bądź radiofalowe (19).

Strefom spękań i uskokom towarzyszą na ogół zmiany oporności i prędkości fal. Jeżeli prędkość fal sejsmicznych jest mniejsza od 2000 m/s, to masyw fliszowy jest silnie spękany i zwietrzały. Dlatego te formy tektoniczne wykrywane są również metodą sejsmiczną i geoelektryczną.

Przykład kompleksowych badań geofizycznych na jednym z profilów w rejonie Klimkówki na Ropie podano na ryc. 7.

Badania osuwisk na zboczach dolin rzecznych

O predyspozycjach zboczy dolin rzek górskich do powstania osuwisk świadczyć może ich budowa geologiczna, badana metodami geofizycznymi przy wykorzystaniu wszelkich danych geologicznych. Szczególnie istotne jest określenie miąższości utworów koluwialnych, upadu i biegu warstw podłoża skalnego, a także jego litologii.

Materiał skalny, który w wyniku ruchów osuwiskowych zmienia swoje własności fizyczne, takie jak porowatość i przepuszczalność, stwarza szansę dla powstania anomalii geofizycznych. Doświadczenia badań w Karpatach wskazują (18), że głębokość stropu podłoża najskuteczniej określa metoda sejsmiczna, natomiast okonturowanie osuwiska zapewnia metoda elektrooporowa, ponieważ oporność elektryczna koluwiów zwiększa się lub zmniejsza w stosunku do otoczenia, zależnie od tego czy podłoże jest piaskowcowe czy łupkowe.

Do wyznaczania dynamicznego modułu sprężystości i współczynnika Poissona stosowana jest metoda sejsmiczna. Podobnie jak w badaniach gruntów luźnych, wynikiem pomiarów powinno być określenie prędkości fali podłużnej i poprzecznej, z których obliczane są parametry sprężystości. Bardzo przydatne są również w tych badaniach pomiary akustyczne prowadzone w otworach wiertniczych. Pozwalają one na szczegółową stratyfikację skał pod względem charakterystyki prędkościowej. Ułatwia to w znacznym stopniu analizę sejsmicznych pomiarów powierzchniowych.

Liczne pomiary przeprowadzone w dolinach rzek karpackich wskazują, że dynamiczny moduł sprężystości fliszu zawiera się w przedziale 400 000—2 000 000 N/cm², a współczynnik Poissona w przedziale 0,31—0,38. Najniższe wartości modułu z podanego przedziału charakteryzują skały silnie spękane i zwietrzałe. W takich skałach prędkość rozchodzenia się fal podłużnych jest na ogół mniejsza niż 2000 m/s. Wykrycie i dokładne zlokalizowanie takich stref ma duże znaczenie w projektowaniu budowli wodnych.

ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

Przedstawione powyżej informacje i oceny wykazują, że szerokie zastosowanie badań geofizycznych na wszystkich etapach budownictwa hydrotechnicznego jest celowe, uzasadnione i konieczne. Za takim traktowaniem geofizyki (w tym przypadku geofizyki inżynierskiej) przemawiają następujące fakty:

— wieloletnie stosowanie geofizyki dla budownictwa hydrotechnicznego dostarczyło bogatego materiału potwierdzającego przydatność metod geofizycznych;

— geofizyka inżynierska dysponuje podstawowym sprzętem i aparaturą na dobrym europejskim poziomie, a także wyspecjalizowaną kadrą o dużym doświadczeniu;

— stosowanie metod geofizyki inżynierskiej nie narusza środowiska naturalnego, w tym ochrony wód podziemnych;

— metody geofizyczne określają własności skał w naturalnych warunkach ich występowania;

— zastosowanie metod geofizycznych ogranicza kosztowne, czaso- i energochłonne roboty wiertnicze oraz górnicze, umożliwiając ich prowadzenie w bezpieczniejszych warunkach.

Przedstawione zalety badań geofizycznych nie przesłaniają ich ograniczeń, najczęściej wynikających z wieloznaczności interpretacji i nie zawsze wystarczająco wysokiej rozdzielności. Niektóre z tych ograniczeń opisano powyżej. Dlatego ważnym czynnikiem jest prawidłowe projektowanie badań, które powinno zapewniać nie tylko optymalny dobór metod i metodyki pomiarów dla postawionego zadania, ale także właściwą kolejność prac i ich powiązanie z badaniami geologiczno-inżynierskimi, hydrogeologicznymi, geotechnicznymi i innymi. Natomiast istotną potrzebą jest dalszy rozwój metodyczny geofizyki inżynierskiej, umożliwiający podejmowanie nowych i trudnych zadań, które wyłonią się podczas realizacji tak obszernego i złożonego zamierzenia, jakim jest „Program Wisła”.

LITERATURA

1. Bażyński J., Białostocki R., Pepel A. — Wyniki badań geologicznych dla celów budowlanych w dolinie dolnej Wisły w rejonie Kwidzyna i Tczewa. Biul. Inst. Geol. nr 198 1976.
2. Borowczyk M. — Określenie błęd pomiaru ciężaru objętościowego i wilgotności gruntów przy zastosowaniu sondy uniwersalnej. Arch. IG 1971.
3. Borowczyk M., Frankowski Z. — Metody polowe do określania własności fizyko-mechanicznych gruntów dla potrzeb prognozowania stateczności zboczy. Symp. I.AEG nt. Zmiany środowiska geologicznego pod wpływem działalności człowieka, t. I Polska, 1979.

4. Borowczyk M., Królikowski C. — Sonda uniwersalna do pomiaru właściwości fizycznych gruntu. Arch. Hydrot. 1965 z. 2.
5. Czurajew N. W., Ilin N. J. — Radioindykatoryjne metody badania podziemnych wód. Atomizdat, Moskwa 1967.
6. Frankowski Z., Królikowski C., Linowski H. — Badania parametrów dynamicznych gruntu. Inż. Bud. 1973 nr 12.
7. Grünbaum J. J. — Geofizyckieskije metody opredielienija filtracjonnych swojstw gornych porod. Izd. „Niedra”, Moskwa 1965.
8. Królikowski C. — Zastosowanie metod geofizycznych w rozwiązywaniu niektórych problemów hydrogeologicznych pradoliny Wisły w rejonie Kolonia—Góra Puławska. Mat. Symp. nt. Hydrogeol. i inż.-geol. problemy zagospod. Wisły Środkowej. SITG — Katowice 1965.
9. Królikowski C. — Wyznaczanie parametrów filtracyjnych piaszczysto-żwirowych warstw wodonośnych metodą elektrolityczną przy użyciu prądu stałego. Biul. Inst. Geol. nr 231 1970.
10. Królikowski C. — Szybki sposób określania współczynnika filtracji dla celów geologiczno-inżynierskich. Kwart. Geol. 1972 nr 1.
11. Królikowski C. — Badania parametrów dynamicznych gruntów aluwialnych. Mat. Konf. Naukowej nt. Ocena zmian własności gruntów przy zastosowaniu wibroflotacji, pali piaszczystych i materiałów wybuchowych. Arch. IG 1974.
12. Linowski H. — Badania geofizyczne w geologii inżynierskiej i w górnictwie. Dwadzieścia lat Przedsiębiorstwa Poszukiwań Geofizycznych w służbie geologii. Wyd. Geol. 1972.
13. Linowski H., Duszyńska M. — Wytyczne do stosowania metod geofizycznych przy rozpoznawaniu podłoża gruntowego w związku z projektowaniem obiektów hydrotechnicznych na gruntach luźnych. Arch. P.B.G. 1977.
14. Lorentz H. — Grundbaudynamik. Springer-Verlag, Berlin—Göttingen—Heidelberg 1960.
15. Praca zbiorowa pod red. Z. Fajkiewicz — Zarys geofizyki stosowanej. Wyd. Geol. 1972.
16. Stenzel P., Szymańko J. — Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wyd. Geol. 1973.
17. Trojan J. — Rola badań geofizycznych w rozpoznawaniu warunków posadowienia obiektów hydrotechnicznych na terenie Karpat fliszowych. Sem. Nauk.-Inż. P.B.G. 1972.
18. Trojan J. — Metody geofizyczne w badaniach podłoża budowli wodnych. Arch. Hydrol. 1975 z. 2.
19. Wybraniec S. — Metoda infradługich fal radiowych w kartowaniu geologicznym. Biul. Inst. Geol. nr 307 1979.
20. Madej J. — Badania metodą mikrogravimetryczną rozkładu mas w zaporach ziemnych jako elementu oceny stopnia ich zagrożenia. Pr. dokt. Arch. Wyzd. Geologiczno-Poszukiwawczego AGH 1980.

SUMMARY

On the basis of analysis of results of previous surveys, the effectiveness of geophysical methods used for the needs of hydrotechnical building was estimated taking into account wide and complex aims of the „Wisła Programme”.

The first part of the paper deals with geophysical surveys carried out in the last twenty years in connection with designing cascades on the Vistula River and its tributaries. In discussing history of developments in engineering geophysics, references are made to major geological-engineering problems usually solved with the use of geoelectric, seismic and radiometric methods. A general location of the completed surveys is given.

The range of geophysical methods used for recognition of geological structures of foundation soils, in studies on groundwater dynamics, and determination of physico-mechanical properties of soil medium is given. A special attention is paid to selection of the used methods, degree of their accuracy and mastering, advantages and disadvantages as well

as possibilities of use. With reference to surveys of non-cohesive rocks and bedrock, attention is paid to specific nature of works carried out in the Polish Lowlands and Carpathians as it influences the techniques and methods of taking measurements.

The final part of the paper deals with the major advantages of geophysical surveys, predestinating them to wide use at various stages of designing, construction and use of hydrotechnical structures within the framework of the „Wisła Programme”.

РЕЗЮМЕ

На основании анализа результатов проведенных до сих пор исследований была дана оценка эффективности геофизических методов, применяемых для нужд гидротехнического строительства в аспекте широких и сложных замыслов содержащихся в „Программе Висла”.

В первой части работы рассмотрены геофизические исследования, проведенные на протяжении последнего двадцатилетия в рамках подготовливаемых проектов водных ступеней на р. Висле и ее притоках. Показывая историческое развитие ин-

женерной геофизики, сигнализируются главные геолого-инженерные проблемы, решаемые чаще всего с применением геоэлектрических, сейсмических и радиометрических методов. Представлена схематическая локализация до сих пор проведенных исследований.

В следующей главе представлен диапазон применения геофизических методов, как в изучении геологического строения грунтового основания, так и в изучении динамики подземных вод и определении физико-механических особенностей грунтовой среды.

В частности рассмотрен подбор методов, степень их разработки и освоения, преимущества и ограничения, а также исполнительные возможности. Выделяя проблематику изучения рыхлых образований и скального основания, подчеркнута особенность работ на Польской низменности и в Карпатах, которые отражаются на технике и методике измерений.

В заключении уточнено главное достоинство геофизических исследований, предрасполагающие их для широкого использования на этапах проектирования, строительства и эксплуатации объектов гидростроительства в рамках „Программы Висла”.