

Przydatność nowej sondy geoelektrycznej do charakterystyki litologicznej iłó warwowych z Plecewic k. Sochaczewa

Piotr Zawrzykraj*



Practicability of new geoelectrical equipment for the lithological characteristic of varved clays from Plecewice near Sochaczew (central Poland). *Prz. Geol.*, 53: 677–681.

Summary. This paper presents the results of the field research using a new, prototypical geoelectrical equipment, that were developed for the soil resistance (Borowczyk & Porzeżyński, 2003). These studies were carried out in Plecewice near Sochaczew, where an open pit with varved clays is situated. Lithological changeability of varved clays was determined by the author through detailed laboratory testing. Then the results of research were compared with those derived from the new geoelectrical equipment tests and were related to varve thickness qualitative and quantitative evaluation of the soils in the vertical profile with the novel method was demonstrated. Further, the geological situation of the investigated area is presented in this paper.

Key words: varved clays, geoelectrical profiling, thickness diagram

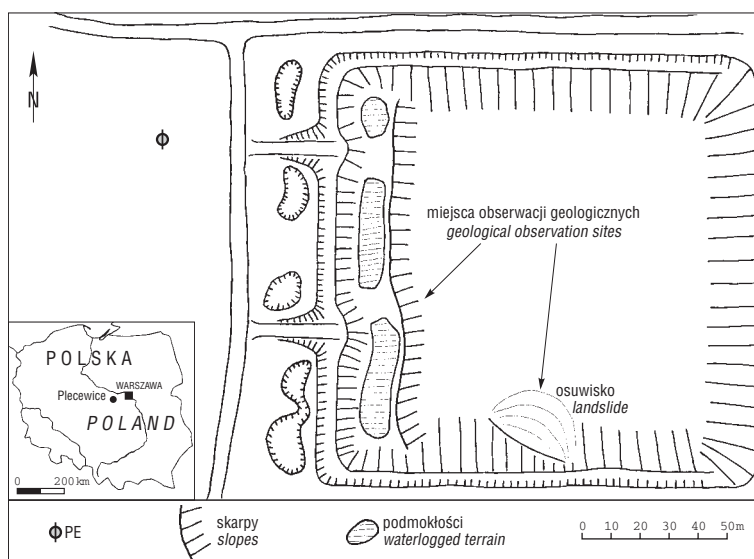
Poprawna identyfikacja gruntów w profilach badawczych jest fundamentalnym celem podczas terenowych badań geologicznych i geologiczno-inżynierskich. Ustalony rodzaj gruntu determinuje dalsze procedury badawcze mające na celu określenie właściwości geologiczno-inżynierskich. Metody geofizyczne od wielu lat są wykorzystywane do interpretacji jakościowej gruntów. Ze względu na wiele czynników wpływających na wartości mierzonego oporu elektrycznego gruntu, dokładność w identyfikacji rodzaju gruntu jest ograniczona. Najczęściej uzyskuje się oporności względne, które można wiązać z rodzajem gruntu w odniesieniu do lokalnych warunków geologicznych. Znacznie lepsze rozpoznanie litologiczne gruntów jest możliwe, gdy wyniki pomiarów oporności odnoszą się do wybranej jednostki litologiczno-stratygraficznej. Taką sytuację przedstawiono w prezentowanym artykule.

Ogólna charakterystyka badanych gruntów

Iły warwowe stanowią wyraźny udział wśród gruntów występujących w obrębie Kotliny Warszawskiej. Przedstawione w artykule wyniki badań dotyczą iłó tzw. poziomu błońskiego, które sedymentowały w zbiorniku zastoiskowym w okresie zlodowacenia wisły. Wówczas w wyniku zahamowania odpływu wód przez czoło lądolodu, na terenie dzisiejszej Kotliny Warszawskiej utworzyło się zastoisko. Ten płytki, rozległy zbiornik o urozmaiconej linii brzegowej był obszarem akumulacji zwięzłych, tłustych iłó warwowych, silnie wapnistych, barwy czekoladowej. Ich charakterystyczna struktura i tekstura (warwowa) wynika ze specyficznych warunków sedymentacji, które istniały w klimacie peryglacjalnym (Myślińska, 1965; Merta, 1978). Omawiane grunty najczęściej składają się z warstewki pylastej, jaśniejszej, której powstanie wiąże się z intensywniejszą dostawą materiału w okresie letnim, oraz warstewki ciemniejszej, tworzącej się w wyniku sedymentacji w okresie zimowym w warunkach redukcyjnych. Układ dwóch warstewek, jaśniejszej i ciemniejszej nazywamy

warwą. Obserwacje kontaktu warstewki jasnej i ciemnej pozwalają stwierdzić, że kontakt między górną powierzchnią jasnej i dolną ciemnej jest płynny. Wyróżnienie granicy między warstwą jasną a ciemną jest często subiektywne. Natomiast kontakt między stropem ciemnej a spągciem jasnej jest najczęściej wyraźny i ostry. Zdaniem autora nie ma możliwości jednoznacznego wytyczenia tej granicy. Dodatkowo w zależności od wilgotności odsłoniętego profilu zmieniają się proporcje między miąższością warstwy jasnej i ciemnej w obrębie warwy.

Tekstura warwowa (tekstura rozumiana jako sposób wzajemnego ułożenia składników skały) jest nieodłączną cechą iłó warwowych, która wynika z rytmicznej, najczęściej rocznej sedymentacji. Warstwowanie roczne wykorzystuje się do korelacji lokalnych profili osadów warwowych. Warwogramy ilustrują zmienność strukturalną iłó warwowych. Miąższości poszczególnych warw wskazują na warunki sedymentacji, tj. odległość od brzegów zbiornika czy też dynamikę środowiska sedymentacji. Im mniejsza jest miąższość warw tym sedymentacja przebiegała spokojniej i w większym oddaleniu od brzegu zastoiska. Miąższość warwy bezpośrednio świadczy o ilo-



Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań w Plecewicach
Fig. 1. Location of the study area in Plecewice

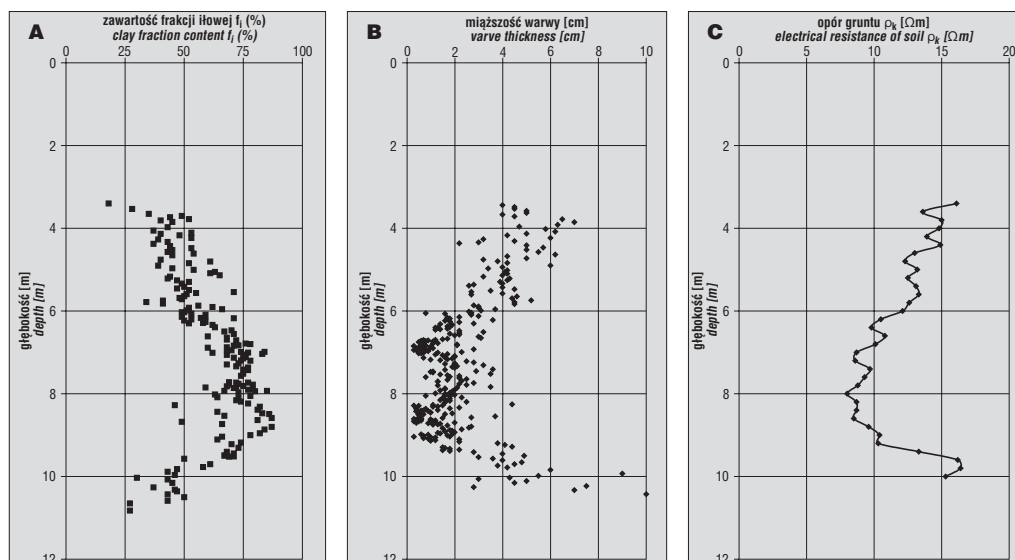
*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; Piotr.Zawrzykraj@uw.edu.pl

ści dostarczanego materiału do zbiornika w ciągu jednego roku.

Metodyka przeprowadzonych badań

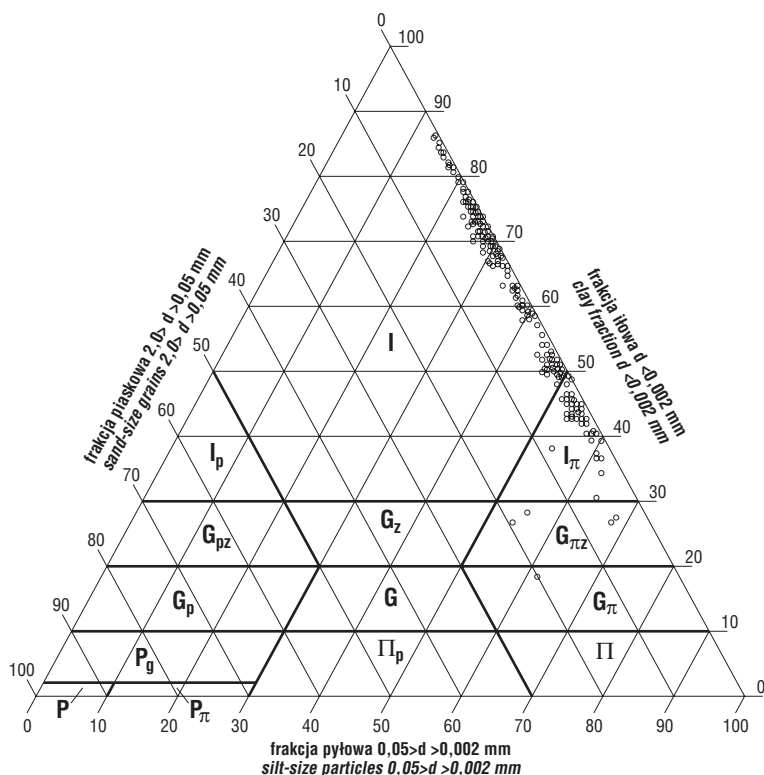
Miejscowość Plecewice znajduje się ok. 6 km na północ od Sochaczewa. Badania zostały przeprowadzone obok wyrobiska wykorzystywanego do niedawna przez cegielnię „Boryszew” (lokalizację terenu badań przedsta-

wia ryc. 1). Miąższość serii osadów zastoiskowych jest zmienna i wynosi od 9 do 16 m (Dzierżek, 2001). W stropie znajdują się piaski rzeczne 2-metrowej miąższości, spąg ograniczają piaski fluwioglacjalne. Iły warwowe charakteryzują się zmienną miąższością warw; od kilku milimetrów do kilku centymetrów. Pod względem granulometrycznym badane grunty stanowią iły oraz w mniejszym stopniu iły pylaste (rodzaj gruntu określono wg PN-86/B-02480). Wilgotność naturalna zmienia się w



Ryc. 2. Porównanie zmienności zawartości frakcji iłowej (a), miąższości warw (b) oraz oporności gruntu (c) w profilu pionowym, Plecewice

Fig. 2. Comparison of clay fraction content (a), varves thickness (b) and soil resistance (c) in vertical profile, Plecewice



Ryc. 3. Wyniki badań uziarnienia na tle trójkąta Fereta dla iłów warwowych z Plecewice

Fig. 3. Results of the grain-size distribution analysis on triangular classification chart for varved clays from Plecewice

granicach 34–41%, natomiast ciężar właściwy szkieletu gruntowego w przedziale 2,74–2,78 G/cm³.

Skład uziarnienia badanych gruntów ustalono na podstawie analizy areometrycznej, przy użyciu pirofosforanu sodu. Autor podjął próbę szczegółowego rozpoznania zmienności zawartości frakcji iłowej w profilu pionowym w Plecewicach. Celem takiego podejścia było sprawdzenie możliwości oceny jakościowej i ilościowej gruntu za pomocą profilowania geoelektrycznego. W tym celu profil iłów warwowych w czasie prac terenowych został podzielony na 40 części. Składał się on z próbek brzdowych o średniej miąższości profilu wynoszącym ok. 20 cm. Każda z tych próbek brzdowych była w przybliżeniu równoległością w celu zachowania równych proporcji pomiędzy udziałem gruntu z poszczególnych fragmentów profilu. Następnie każda próbka brzdowa została podzielona na kilkucentymetrowe odcinki, które zawsze obejmowały pełne warwy. W ten sposób autor znacznie zmniejszył zakres wrodzonej zmienności litologicznej iłów warwowych, ponieważ poddano analizie zawartość frakcji iłowej w warwach, bez podziału na warstewki jasne i ciemne. Powszechnie wiadomo, iż w przypadku ośrodków niejednorodnych, wraz ze zmniejszaniem się wymiarów próbek rozrzut parametrów fizycznych staje się coraz większy. Według

autora, taki sposób podejścia do niejednorodności iłów warwowych, polegający na opisie ich parametrów w odniesieniu do warw powoduje, iż nie odbiegają one swoją zmiennością od innych typów gruntów. Wykazują wręcz wyraźne trendy zmian uziarnienia w profilu pionowym (ryc. 2b).

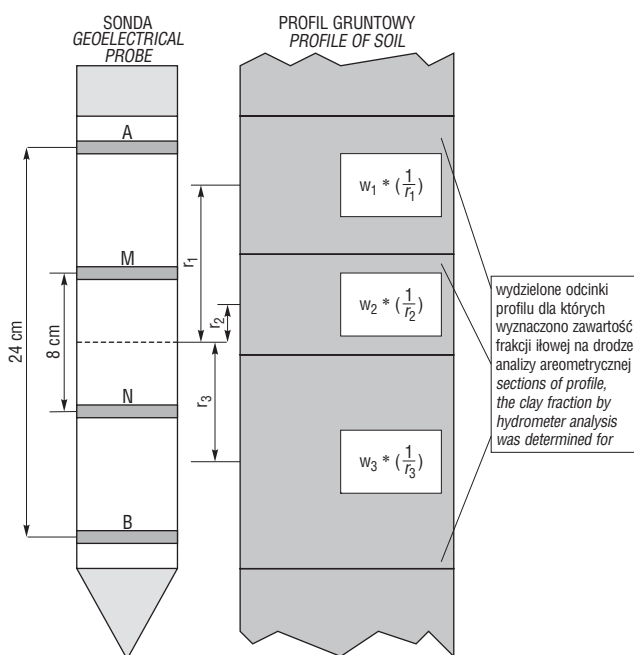
Takie uogólnienie jest konieczne, ponieważ w czasie profilowania geoelektrycznego wartości rejestrowanego



Ryc. 4. Sonda geoelektryczna do pomiarów oporności gruntu.
Fig. 4. Geoelectrical equipment for the soil resistance measurement



Ryc. 5. Cyfrowy miernik geoelektryczny służący do odczytywania wartości oporności gruntu
Fig. 5. Digital geoelectrical gauge for soil resistance reading



Ryc. 6. Schemat wyznaczania wypadkowej zawartości frakcji iłowej dla danego pomiaru oporności gruntu (opis w tekście)
Fig. 6. Chart to determine clay fraction content resultant for given soil resistance (description in text)

oporu elektrycznego odnoszą się do profilu mającego ok. 25 cm miąższości. Średnio jedna analiza granulometryczna obejmowała ok. 5 cm profilu. Łącznie wykonano 185 analiz areometrycznych.

W celu minimalizacji wpływu metodyki badania na otrzymane rezultaty wszystkie analizy areometryczne zostały wykonane przez autora tym samym areometrem. Stosowano podobną naważkę szkieletu gruntowego do analizy.

Wynikającą ze spokojnych warunków sedymentacji horyzontalną jednorodność iłów warwowych w okolicach Sochaczewa, potwierdza doskonała korelacja warwogramów z Plecewicz i Boryszewą przeprowadzona przez Halickiego (1933). Zatem profil w ujęciu poziomej zmienności litologicznej iłów jest bardzo jednorodny. Dlatego też odległość między miejscem sondowania a ścianą gdzie pobierano próbki do analiz areometrycznych, wynosząca kilkadziesiąt metrów, ma minimalny wpływ na zmienność uziarnienia tych gruntów. Wyniki badań uziarnienia przedstawiono na ryc. 2a i 3.

Profilowanie oporu elektrycznego (PE) polega na ciągłym pomiarze wzdłuż otworu oporu pozornego ρ_k skał tworzących ściany otworu wiertniczego. Pomiar ten wykonuje się za pomocą sondy pomiarowej w układzie cztero-elektrodowym (dwóch elektrod zasilających AB i dwóch elektrod pomiarowych MN). W wyniku przepływu prądu wytwarza się pole elektryczne obejmujące swym zasięgiem otwór wiertniczy i skały otaczające. Mierzac natężenie prądu zasilającego I oraz różnice potencjałów ΔU na elektrodach pomiarowych określa się opór elektryczny ośrodka objętego polem elektrycznym.

Ponieważ mierzone parametry I i ΔU pola elektrycznego zależą od takich czynników jak: wartość oporu właściwego skał objętych polem, sposób ich ułożenia, średnica odwiertu, wielkość i rodzaj stosowanej sondy, itp., mierzyony na podstawie wzoru:

$$\rho = k \left(\frac{\Delta U}{I} \right)$$

gdzie: k — współczynnik wpływu rozstawu elektrod, opór elektryczny jest oporem pozornym.

Pomiary oporu elektrycznego gruntu wykonywano sondą pomiarową przykręconą do pierwszej żerdzi z zestawu sondy CPT. Sonda była wciskana w grunt za pomocą siłowników hydraulicznych o maksymalnym nacisku 5 ton. Sonda stosowana do pomiarów oporu gruntu miała symetryczne umieszczenie elektrod, tzn. 4-elektrodowe — dwie elektrody pomiarowe (MN) i dwie elektrody zasilające (AB) (ryc. 4).

Do pomiarów oporności gruntu w otworach zastosowano cyfrowy miernik geoelektryczny (ryc. 5). Przyrząd ten umożliwia szybkie i dokładne wykonanie cyfrowych pomiarów oporności gruntu (bezpośrednio) w profilowaniach elektrooporowych. Z racji wysokiej odporności na zakłócenia przemysłowe może być stosowany na obszarach o rozwiniętej infrastrukturze przemysłowej.

W czasie wciskania sondy w grunt opór mierzono co 20 cm. Wynikiem pomiarów jest wykres zmian oporu elektrycznego z głębokością. Na ryc. 2c przedstawiono wyniki profilowania oporu gruntu w opisywanym punkcie badawczym.

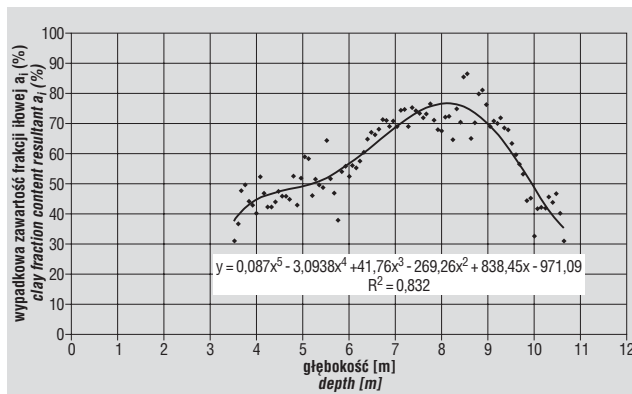
Zaskakująco dobre wyniki identyfikacji jakościowej gruntu, uzyskane na profilu iłów plicieńskich na poligonie badawczym „Stegny” w Warszawie, skłoniły autora do podjęcia próby znalezienia korelacji między rodzajem gruntu (zawartością frakcji iłowej) a wartością oporności

iłów warwowych. Na podstawie badań uziarnienia przeprowadzonych na drodze 185 analiz areometrycznych otrzymano zawartości frakcji iłowej dla całego profilu iłów warwowych w Plecewicach. Szczegółowe wyniki badań oraz zakresy profilu, dla których określono zawartość frakcji iłowej znajdują się w archiwum autora. Wyniki te porównano następnie z rezultatami wykonanego profilowania elektrooporowego.

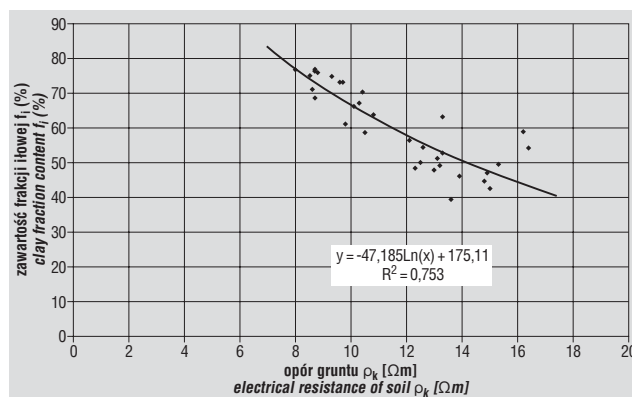
Ponieważ stopień dokładności rozpoznania jakościowego gruntu w przypadku analiz uziarnienia jest znacznie większy niż w przypadku sondy geoelektrycznej, należało w odpowiedni sposób zestawzić uzyskane parametry. Przyjęta metoda porównawcza opierała się na obliczeniu średniej ważonej zawartości frakcji iłowej dla danego pomiaru oporności gruntu (patrz ryc. 6).

W chwili pomiaru prąd płynie w przestrzeni gruntowej, kształtem zbliżonej do kuli (elipsoidy). Jej średnica w przypadku opisywanej sondy wynosi ok. 25 cm. Zatem każdy pomiar oporności, odnosi się do strefy gruntowej o takim właśnie kształcie wokół sondy pomiarowej. Dla takich fragmentów profilu przeprowadzono obliczenia wypadkowej zawartości frakcji iłowej oznaczonej jako a_i . Krok pomiarowy wynosił 8 cm. Zatem była to częstość z jaką dokonywano wyznaczenia wartości średniej ważonej zawartości frakcji iłowej.

$$a_i = \frac{\sum(w_i \cdot \alpha_i)}{\sum \alpha_i}$$



Ryc. 7. Aproksymacja danych wielomianem piątego stopnia
Fig. 7. Approximation of data by polynomial of degree 5



Ryc. 8. Zależność oporu elektrycznego od zawartości frakcji iłowej w iłach warwowych — Plecewice
Fig. 8. Relationship between electrical resistance and clay fraction content in varved clay — Plecewice

gdzie:

a_i — wypadkowa zawartość frakcji iłowej dla danej głębokości pomiaru oporności pozornej gruntu,

w_i — zawartość frakcji iłowej dla danego zakresu profilu ustalona na podstawie analizy areometrycznej,

$\alpha_i = \frac{1}{r_i}$ współczynnik wpływu odległości między środ-

kiem układu pomiarowego a środkiem zakresu profilu na wartość pozornego oporu elektrycznego,

r_i — odległość środka układu pomiarowego elektrod od środka zakresu profilu dla którego określono zawartość frakcji iłowej za pomocą analizy areometrycznej (ryc. 6).

O wartości oporności gruntu w chwili pomiaru decyduje głównie warstwa znajdująca się pośrodku układu elektrod pomiarowych. Wraz z oddalaniem się od środka układu elektrod wpływ warstw gruntu staje się coraz mniejszy. Zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna do odległości od środka układu elektrod.

Uzyskane, na podstawie wyżej zaprezentowanej metody, wartości zawartości frakcji iłowej zostały następnie przedstawione na wykresie względem głębokości (ryc. 7). W kolejnym etapie przeprowadzono aproksymację uzyskanych danych wielomianem piątego stopnia. W ten sposób dokonano przybliżenia zmienności jakościowej gruntu, wyrażonej udziałem frakcji iłowej, za pomocą funkcji. W końcowym etapie poszukiwania korelacji między oporem a rodzajem gruntu określono za pomocą uzyskanego wzoru wielomianu zawartość frakcji iłowej dla głębokości na których pomierzono opór gruntu. Uzyskano w ten sposób zbiór punktów reprezentujących poszukiwaną zależność. Aproksymacja funkcją logarytmiczną $y = -47,2 \cdot \ln(x) + 175,1$ otrzymanego zbioru dała współczynnik korelacji $R^2 = 0,75$ (ryc. 8). Zależność ta została wyznaczona dla zawartości frakcji iłowej z przedziału 20–100%.

Podsumowanie

Na podstawie obserwacji terenowych (miąższości warw), profilowania geoelektrycznego i przeprowadzonych analiz areometrycznych wyraźnie widać, iż wraz ze wzrostem miąższości warwy wzrasta udział frakcji grubszych (ryc. 2). Wydaje się, że grubość warw jest w dużym stopniu determinowana przez udział frakcji pylasto-piaszczystych. Na stałą miąższość warstwy ciemnej przy zmieniającej się miąższości warstwy jasnej w profilach zwrócił uwagę już Merta (1978). Można wnioskować, iż zawiesina ilasta jest bardziej równomiernie rozproszona w basenie niż osad piaszczysto-pylasty. Zależność tą obserwowano w odkrywcę cegielni w Plecewicach, gdzie warwy są bardzo dobrze wykształcone i jest możliwość prześledzenia ich zmienności w profilu.

Podsumowując chciałbym podkreślić, iż miąższości warw w profilu pionowym dają się korelować z zawartością w nich frakcji iłowej. Zatem, dla danego profilu, od miąższości warwy zależy jej skład granulometryczny. Iły warwowe w Plecewicach wykazują bardzo wyraźną zależność miąższości warwy od zawartości frakcji iłowej. Wraz ze wzrostem miąższości spada zawartość frakcji iłowej. Przykład stanowią przedstawione na ryc. 2 wykresy z Plecewic.

Próba zastosowania sondy geoelektrycznej do określania rodzaju gruntu na podstawie wartości oporu elektrycznego w iłach warwowych dała pozytywne rezultaty. Otrzymano zależność oporu elektrycznego gruntu od

zawartości frakcji ilowej w ogólnej postaci $\Omega=f(\ln f_i)$, i o współczynniku korelacji $R^2=0,75$. Tak dobra korelacja potwierdza przyjętą metodykę badawczą i właściwe podejście do problemu niejednorodności ilów warwowych.

Wskazuje to ponadto na dużą wrażliwość opisywanej sondy do pomiaru oporu gruntu na zmienność uziarnienia badanych gruntów oraz jej przydatność jako polowego narzędzia do jakościowej i ilościowej oceny podłoża gruntowego. Rozmiary sondy pozwalają na prognozowanie wypadkowej zawartości frakcji ilowej na odcinku ok. 25 cm linii profilu. Należy jednak pamiętać, iż pomierzony opór jest zależny od wielu czynników, takich jak (Borowczyk & Królikowski, 1959; Fajkiewicz, 1972):

□ wilgotność gruntu — wraz ze wzrostem wilgotności spada opór gruntu,

□ skład mineralny szkieletu gruntowego — niektóre minerały mogą być dobrymi przewodnikami prądu,

□ mineralizacja wód porowych — większa mineralizacja ułatwia przepływ prądu elektrycznego,

□ rodzaj gruntu — czyli uziarnienie, z którego bezpośrednio wynikają różnice w porowatości i wilgotności.

Zatem uzyskane zależności należy traktować jako narzędzie do lokalnego rozpoznawania uziarnienia gruntów. W przypadku ilów warwowych Kotliny Warszawskiej ostatniego zlodowacenia mamy do czynienia z monotonyminym składem mineralnym oraz mało zróżnicowaną mineralizacją wód porowych (Bojakowski, 1979, 1982; Myślińska, 1974). Wspomniane grunty mają taką samą genezę, powstawały w podobnych warunkach i okresie geologicznym, charakteryzują się podobnymi właściwościami fizyczno-mechanicznymi. Dlatego też autor uważa, iż są doskonałym ośrodkiem badawczym dla przedstawionej sondy geoelektrycznej, która powinna być powszechnie wykorzystywana dla jakościowego i ilościowego prognozowania zawartości frakcji ilowej, jej zróżnicowania w obrębie wydzielenia oraz wilgotności naturalnej ilów warwowych. Poprzez stosowanie odpowiedniej metodyki badawczej oraz aparatury do badań polowych należy spodziewać się obiecujących perspektyw w związku z wykorzystaniem przedstawionej sondy geoelektrycznej.

Ze względu na mały zakres przestrzeni gruntowej objętej pojedynczym pomiarem, sonda charakteryzuje się dużą rozdzielczością i pozbawiona jest błędów wynikających z wpływu warstw sąsiednich. Umożliwia szybką identyfikację rodzaju gruntu w profilu pionowym. Zakres stosowania omawianej sondy obejmuje niezlitifikowane osady klastyczne, z wyłączeniem kamieni, pospółek i żwirów.

Literatura

- BOJAKOWSKI, T. 1979 — Charakterystyka geologiczno-surowcowa osadów zastoiska warszawskiego oraz ocena ich przydatności dla ceramiki budowlanej. Arch. Wydz. Geol. UW.
- BOJAKOWSKI T. 1982 — Charakterystyka geologiczno-surowcowa osadów zastoiska warszawskiego oraz ocena ich przydatności dla ceramiki budowlanej. Biul. Inst. Geol., 336: 131–188.
- BOROWCZYK M. & FRANKOWSKI Z. 1979 — Wytyczne wykonywania badań lessów metodami polowymi. Instr. i Met. Badań Geol., 40. Wyd. Geol.
- BOROWCZYK M. & KRÓLIKOWSKI, C. 1965 — Sonda uniwersalna do pomiarów właściwości fizycznych gruntu. Arch. Hydrotech., 12: .
- BOROWCZYK M. & PORZEŻYŃSKI S. 2003 — Uściślenie litologii gruntów z wykorzystaniem pomiarów elektrooporowych. Arch. Zakł. Geol. Inż. Wydz. Geol. UW.
- DZIERŻEK J. (red.). 2001 — Rzeźba i osady czwartorzędu środkowo-wschodniej Polski — przewodnik do ćwiczeń terenowych z geomorfologii i geologii czwartorzędu. Wyd. Geol. UW: 41–53.
- FAJKIEWICZ Z. (red.) 1972 — Zarys geofizyki stosowanej. Wyd. Geol.
- FRANKOWSKI Z. 1980 — Metody ustalania własności gruntów słabonośnych na przykładzie utworów facji powodziowej doliny Wisły koło Karczewa. Biul. Inst. Geol., 324: 55–103.
- HALICKI B. 1933 — Iły wstęgowe w Plecewicach nad Bzurą. Zabytki Przyrody Nieożywionej, 2: 86–90.
- IGNUT R., KLĘBEK A. & PUCHALSKI R. 1973 — Terenowe badania geologiczno-inżynierskie. Wyd. Geol.: 93–103.
- MERTA T. 1978 — Extraglacial varved deposits of the Warsaw Ice-Dammed Lake (younger Pleistocene), Mazovia Lowland, Central Poland. Acta Geol. Pol., 28: 241–271.
- MYŚLIŃSKA E. 1965 — Wpływ warunków sedymentacji i diagenety ilów warwowych zlodowacenia środkowopolskiego na obszarze Mazowsza na ich własności inżyniersko-geologiczne. Biul. Geol. UW, 7: 3–106.
- MYŚLIŃSKA E. 1974 — Wody porowe gruntów spoistych. Biul. Geol. UW, 17: 73–167.
- ZAWRZYKRAJ P. 2004 — Analiza skonsolidowania ilów warwowych w rejonie Sochaczewa i Radzymina. Arch. Wydz. Geol. UW.