

# Zastosowanie tomografii elektrooporowej do określenia głębokości zalegania stropu ilów na wybranych obiektach w rejonie Warszawy

Dr inż. Mariusz Lech, dr inż. Marek Bajda, dr inż. Katarzyna Markowska-Lech

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Budowa geologiczna w rejonie Warszawy jest zaliczana powszechnie do ekstremalnie złożonych i trudnych do rozpoznania. Wykonywane dotychczas badania wskazują na duże zróżnicowanie budowy geologicznej, szczególnie w zakresie głębokości zalegania stropu silnie zaburzonych osadów plioceńskich, których właściwości są niejednokrotnie decydujące w projektowaniu geotechnicznym budowli zarówno nadziemnych, jak i podziemnych. W podłożu osadów czwartorzędowych występują utwory pliocenu. Serię tę, nazywaną ilami pstryimi lub poznańskimi, budują głównie ily, ily pylaste, pyły, a także sporadycznie piaski drobne i piaski pylaste. Położenie stropu ilów plioceńskich podlega silnym zagłębieniom i wyniesieniom, co jest związane z występującymi w przeszłości zjawiskami glacitektonicznymi.

Pod względem składu mineralnego i właściwości fizycznych ily plioceńskie są zaliczane do gruntów ekspansywnych, które pod wpływem zmian wilgotności mogą zwiększać lub zmniejszać swoją objętość. Są to nietypowe właściwości, przysparzające problemów przy projektowaniu posadowienia budowli oraz mogące prowadzić do awarii i katastrof budowlanych. Nierozpoznanie gruntów ekspansywnych w podłożu i nieuwzględnienie ich późniejszych zmian objętości prowadzi niekiedy do bardzo poważnych w skutkach konsekwencji [3, 4]. Ponadto, sondowania statyczne wykazały dużą zmienność parametrów wytrzymałościowych ze względu na występowanie licznych przewarstwień piaszczystych i pylastych. W związku z powyższym utwory te wymagają szczególnie dokładnego rozpoznania przy ich ocenie jako podłoża budowlanego [3, 6].

Wykorzystanie kompleksowych badań terenowych obejmujących wiercenia z pobieraniem próbek gruntów o nienaruszonej strukturze za pomocą cienkościennych próbników (np. Shelby, NeSGI), badania dynamiczne (np. DPL, DPH lub SPT z pobraniem próbek gruntów do badań makroskopowych), sondowania CPTU i DMT lub coraz częściej, zwłaszcza w przypadku obiektów budowlanych trzeciej kategorii geotechnicznej, wieloparametryczne sondowania SCPTU i SDMT umożliwiają precyzyjne ustalenie budowy geologicznej oraz parametrów mechanicznych podłoża. W Eurokodzie 7 [9] dopuszcza się również stosowanie nowatorskich metod rozpoznawania podłoża gruntowego, do których należą np. metody geofizyczne polegające na prześwietlaniu profilu gruntowego i pomiarze parametrów fizycznych gruntów bez naruszania ich struktury. Metody te mogą być stosowane na różnych etapach prac terenowych, zarówno jako badania wstępne mające na celu orientacyjne rozpoznanie warunków gruntowych lub jako badania uzupełniające, pozwalające na zagęszczenie punktów pomiarowych oraz w monitoringu.

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW I ZAKRES BADAŃ

Obszar objęty badaniami według regionalizacji fizyczno-geograficznej Polski [5] leży w obrębie Równiny Warszawskiej w granicach Doliny Środkowej Wisły.

Pierwszy obiekt badawczy (Stegny) jest zlokalizowany w Warszawie na terenie dzielnicy Mokotów między ulicami Czarnomorską i Warneńską w sąsiedztwie ujęcia wody oligoceńskiej. Obszar badań jest położony na czwartorzędowym tarasie nadzalewowym w odległości około 0,5 km od Skarpy Warszawskiej. W profilu utworów czwartorzędowych, w rejonie badań, do głębokości 1,5 m występuje piasek drobny, pod którym znajduje się warstwa piasku średniego o miąższości 1,0 m. Poniżej, do głębokości 3,0 m p.p.t. leży warstwa piasku drobnego, w którego spągu zalega do głębokości 4,3 m piasek średni. Pod utworami czwartorzędowymi znajdują się osady plioceńskie, które są reprezentowane przez kompleks ilów pstrych z soczewkami i warstwami piasków. Profil tych osadów w strefie rozpoznania rozpoczyna warstwa łu ciemnoszarego i brązowego w stanie twardoplastycznym, zalegająca na głębokości od 4,3 m do 6,8 m p.p.t. Poniżej, do głębokości 7,7 m zalega warstwa łu płomienistego (rdzawo-czerwonego) w stanie twardoplastycznym. W spągu tych osadów występuje wkładka łu pylastego pstrego, koloru żółtego o miąższości około 1,2 m. Od głębokości 8,9 m zaczynają się ily pstry w stanie twardoplastycznym, które na głębokości 10,5 m przechodzą w stan półzwały.

Drugi obiekt (Tamka) objęty badaniami jest zlokalizowany również w Warszawie na terenie Dzielnicy Śródmieście przy ulicy Tamka róg Kruczkowskiego w rejonie zachodniej skarpy wiślanej. Zbudowany jest głównie z czwartorzędowych utworów morenowych (glin zwałowych, piasków wodnolodowcowych, żwirów, miejscami z wkładkami ilów), których podłoża stanowią bardzo silnie zaburzone osady plioceńskie reprezentowane przez ily pstry. Skarpa ma zróżnicowane wysokości i kąty nachylenia, a w wielu miejscach jej naturalny charakter został przekształcony w wyniku działań człowieka [8]. Wykonane dotychczas rozpoznanie wskazuje na zróżnicowanie budowy geologicznej, szczególnie w zakresie głębokości zalegania stropu silnie zaburzonych osadów plioceńskich. Bezpośrednio na stropie tych osadów zalegają utwory holoceniowe, na które składają się trzy grupy, a mianowicie: osady rzeczne, zboczowe i antropogeniczne. Od powierzchni terenu do głębokości kilku metrów występują antropogeniczne grunty nasypowe z elementami starej zabudowy. Osady rzeczne, najczęściej przykryte nasypami, są reprezentowane przede wszystkim przez aluwia tarasów Wisły. Osady zboczowe, głównie koluwalne, ale również deluwialne oraz osady stożków napływowych z cieków i rzek spływających z wysoczyzny uzupełniają warstwy utworów przypowierzchniowych.

Prace polowe na wymienionych obiektach obejmowały: badania tomografem elektrooporowym, sondowania statyczne CPT/CPTU, RCPT oraz sondowania dylatometrem Marchettiego (DMT). Wykorzystano również wyniki badań archiwalnych RCPT i DMT wykonane w latach ubiegłych na terenie poligonu badawczego Stegny [1, 7].

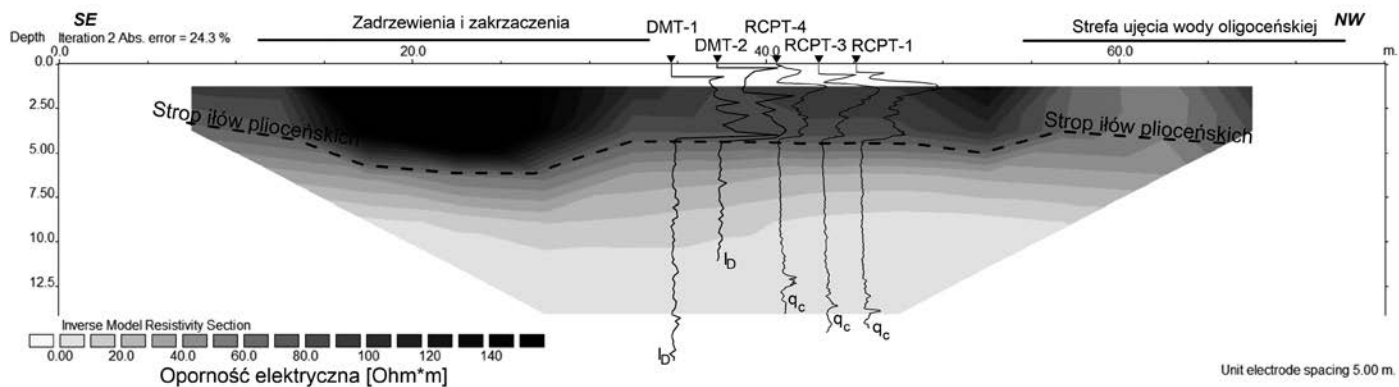
## WYNIKI BADAŃ

Przedstawione poniżej wyniki badań geotechnicznych i geofizycznych podano na przykładzie rozpoznania rejonu ujęcia wody oligoceńskiej na Stegnach i zróżnicowanej budowy strefy przykrawędziowej Skarpy Warszawskiej.

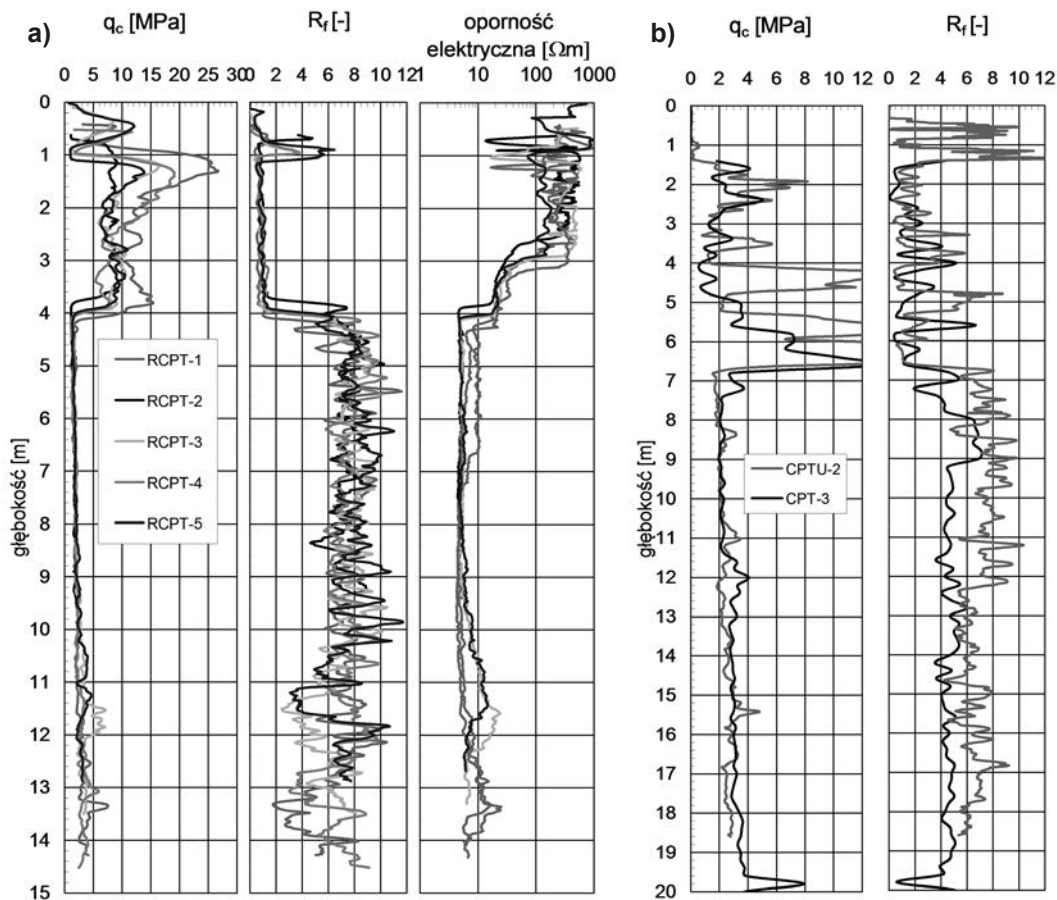
Przekrój podłoża na obiekcie Stegny otrzymany z badań tomografem elektrooporowym pokazano na rys. 1, na którym przedstawiono zmiany oporności elektrycznej w podłożu obiektu do głębokości około 15 m p.p.t. Analiza przekroju pozwala stwierdzić, że grunty niespoiste o oporności elektrycznej dochodzącej do 200  $\Omega\text{m}$  zalegają do głębokości około 6 m. Przy czym, w strefie sondowań (w środku przekroju), spąg utworów

nieśpoistych znajduje się na głębokości około 4,5 m, natomiast w strefie zadrzewień i zakrzaczeń (określono wyłącznie na podstawie zmian oporności elektrycznej) – na głębokości około 6 m. W tym rejonie strefa gruntów o wyższej oporności elektrycznej sięga nieco głębiej. Może to wynikać z mniejszej wilgotności gruntów w strefie korzeniowej drzew oraz krzewów i interpretacja położenia spągu piasków może być w tym rejonie obciążona błędem. Położenie stropu ilów w tym miejscu powinno być niewątpliwie zweryfikowane za pomocą wierceń lub sondowań. Poniżej utworów nieśpoistych występują grunty charakteryzujące się opornością od kilku do kilkudziesięciu Wm.

Na rys. 1 przedstawiono również w formie wykresów otrzymane wartości oporu stożka  $q_c$  z badań RCPT oraz wskaźnika materiałowego (zmiana wartości  $I_D$  poniżej 0,6 świadcząca



Rys. 1. Wyniki pomiarów tomografem elektrooporowym z oporem stożka  $q_c$  i wskaźnika materiałowego  $I_D$  – Stegny



Rys. 2. Wyniki sondowań a) RCPT (Stegny) i b) CPT, CPTU (Tamka)

o przejściu w grunt ilasty) z badań DMT. Zarówno opór stożka, jak również wskaźnik materiałowy wskazują na zmianę rodzaju gruntu w strefie badań na głębokości  $4,0 \div 4,2$  m p.p.t.

Przykładowe wyniki badań RCPT ze Stegien przedstawiono na rys. 2a. Zmiana współczynnika tarcia  $R_f$  wskazuje na obecność utworów piaszczystych w stropowej części przekroju do głębokości około 4,2 m, natomiast poniżej tej głębokości wskazuje na występowanie utworów spoistych (ilastych). Porównując wykresy przebiegu poszczególnych parametrów widać wyraźnie korelację pomiędzy współczynnikiem tarcia  $R_f$  a zmierzoną w badaniu opornością elektryczną – zależność odwrotna. Ponadto, pomiędzy głębokością na poziomie 2,5 m do 4 m p.p.t. następuje spadek oporności elektrycznej przy niezmiennych wartościach współczynnika tarcia. Jest to związane z położeniem zwierciadła wody gruntowej, które w momencie badania znajdowało się na głębokości około 3 m p.p.t. Analiza sondowań RCPT wyraźnie wskazuje granicę między piaskami i iłami w rejonie badań, która wynosi około 4 m p.p.t. Wartości oporności elektrycznej piasków wahają się w granicach od 100 do kilkuset  $\Omega\text{m}$ , natomiast w iłach wynoszą pomiędzy 4 a 12  $\Omega\text{m}$ .

Przestrzenna informacja o zmianie oporności elektrycznej w połączeniu z wynikami sondowań RCPT i DMT pozwoliła ustalić strop iłów na długości całego przekroju. W analogicznych przypadkach przekrój geofizyczny może dostarczyć również informacji dotyczących ciągłości poszczególnych warstw. Jako granica pomiędzy utworami trzecio- i czwartorzędowymi posłużyła, w tym konkretnym przypadku, wartość 30 Wm.

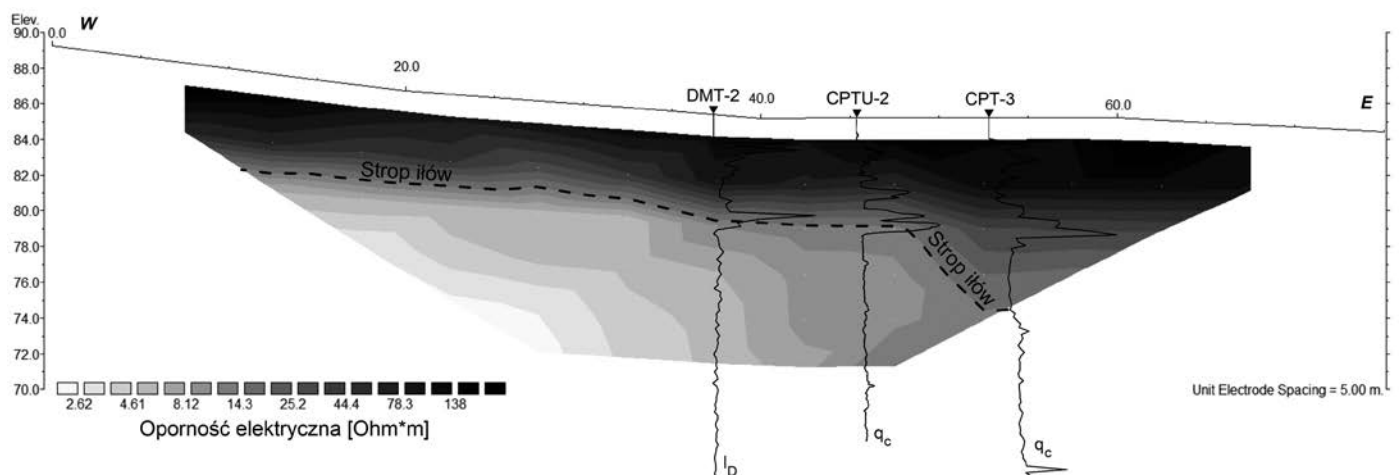
Sytuację na drugim obiekcie badawczym (Tamka) przedstawiono na rys. 3. W celu określenia stropu iłów wykonano przekrój elektrooporowy i wykreślono wartości oporu stożka i wskaźnika dylatometrycznego. W części stropowej całego przekroju (do 2 m p.p.t.) można zaobserwować wysokie wartości oporności elektrycznej sięgające 200 Wm, które są charakterystyczne dla utworów niespoistych. W miarę zwiększania głębokości wartości te maleją do kilku Wm, co wskazuje na obecność gruntów spoistych. Przesuwając się w prawą stronę przekroju, można zaobserwować upad izolinii oporności w kierunku wschodnim zgodnie z nachyleniem terenu.

Wykonanie w tym rejonie sondowania statycznego CPT/CPTU (rys. 2b) i DMT pozwoliło na bardzo dokładne rozpoznanie zróżnicowanej budowy osadów koluwalno-deluwial-

nych zalegających w strefie przyskarpowej. Dzięki ciągłemu zapisowi wyników sondowań było możliwe wychwycenie przewarstwień nawet o niewielkiej miąższości oraz głębokości zalegania stropu niezaburzonych iłów plioceńskich - warstwy istotnej do bezpiecznego posadowienia obiektów budowlanych w strefie przykrawędziowej Skarpy Warszawskiej. Zmiana oporu stożka i wskaźnika dylatometrycznego pozwoliła stwierdzić obecność stropu iłów na głębokości  $6 \div 6,5$  m p.p.t. (DMT-2, CPTU-2) w zachodniej i centralnej części przekroju. W przypadku sondowania CPT-3 (wschodnia część przekroju) pomiar oporu stożka wykazał znaczne zróżnicowanie parametru, a zatem znaczne zróżnicowanie parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych, wynikające z występowania licznych przewarstwień w osadach koluwalno-deluwialnych zalegających w strefie przyskarpowej [2]. Analizując opór stożka sondowania CPT-3, na rys. 2A można stwierdzić występowanie dwóch stref (przy czym parametr  $R_f$  nie oddawał tej różnicy): od 7,5 do 11 m – strefę o oporze stożka w zakresie  $1 \div 2$  MPa (iły w strefie koluwiów) i drugą strefę poniżej 11 m o oporze stożka około 3 MPa. Różnica ta w pomierzonym oporze stożka zdecydowała o przyjęciu głębokości 11 m jako strop nienaruszonych iłów i spąg osadów koluwalno-deluwialnych.

Obraz zmian oporności elektrycznej podłoża oraz badania szczegółowe pozwoliły wykreślić strop iłów, zakładając, że granica stropu osadów plioceńskich przebiega wzdłuż izolinii 15 Wm. Strop nienaruszonych osadów plioceńskich układa się równoległe do nachylenia powierzchni terenu, a następnie gwałtownie upada (pomiędzy 40 a 50 m przekroju) w kierunku Wisły.

Na podstawie dwóch przeanalizowanych przypadków można stwierdzić, że przeprowadzone badania metodą tomografii elektrooporowej umożliwiły określenie orientacyjnego przebiegu stropu iłów w obu przekrojach. Należy jednak podkreślić, że badania geofizyczne, w tym elektrooporowe, nie mogą służyć jako samodzielne narzędzie badawcze i powinny być każdorazowo weryfikowane za pomocą innych powszechnie uznawanych metod badawczych. Granicę przebiegu stropu iłów w omawianych przypadkach poprowadzono przy założeniu dwóch różnych oporności elektrycznych, wykorzystując do tego celu badania szczegółowe i ze wskazaniem lokalizacji miejsc, gdzie takie szczegółowe rozpoznanie powinno być dodatkowo przeprowadzone. Ponadto, stosując badania geofizyczne w zagadnieniach geologiczno-inżynierskich, należy zwrócić uwagę na



Rys. 3. Wyniki pomiarów tomografem elektrooporowym z oporem stożka  $q_c$  i wskaźnika materiałowego  $I_D$  – Tamka

wiele czynników, które mogą mieć wpływ na interpretację danych pomierzonych w terenie.

## PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki dowiodły, że zastosowanie metod geofizycznych może być użyteczne przy opracowaniu rzeczywistego modelu budowy geologicznej podłoża i może stanowić cenną pomoc dla inżynierów dokumentujących warunki posadowienia budowli. Porównanie wyników otrzymanych z badań z danymi otrzymanymi z sondowań pokazuje, że badania nieinwazyjne charakteryzują się wystarczającą dokładnością pomiarów i mogą stanowić podstawę do lokalizacji miejsc, w których powinno się wykonać szczegółowe inwazyjne badanie geotechniczne.

## LITERATURA

1. Bajda M.: Wykorzystanie sondowań statyczno-sejsmicznych do oceny parametrów mechanicznych gruntu. Rozprawa doktorska, SGGW, 2002.

2. Bajda M., Koda E.: Badania geotechniczne do oceny warunków posadowienia w strefach przykrawędziowych Skarpy Warszawskiej. Przegląd Naukowy WBiŚ nr 22(2), SGGW, Warszawa, 2013, 126-136.

3. Frankowski Z.: Iły plioceniowe Warszawy, Seminarium, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2004, 5-13.

4. Garbulewski K., Lech M.: Znaczenie badań in situ w projektowaniu geotechnicznym. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura; 12 (4), 2013, 61-73.

5. Kondracki J.: Geografia regionalna Polski. PWN. Warszawa 2001.

6. Kaczyński R. i in.: Litogeneza mikrostruktury i geologiczno-inżynierskie właściwości ilów plioceniowych rejonu Warszawy. Projekt badawczy PB KBN nr 9T12B00516. Warszawa 2000.

7. Lech M.: Zastosowanie metody elektryczno-oporowej do rozpoznania warunków przepływu wody w ośrodku gruntowym. Rozprawa doktorska, SGGW, Warszawa 2007.

8. Wysokiński L. z zespołem: Warszawska Skarpa Śródmiejska od Al. Jerozolimskich do ul. Sanguszkii. Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa 1999.

9. PN-EN 1997-2: 2009. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2. Rozpoznanie i badania podłoża gruntowego.