



Rozpoznanie budowy geologicznej podłoża obiektu ARENA w Krakowie-Czyżynach metodami geofizycznymi pod kątem występowania gruntów organicznych

Bernadetta Pasierb¹, Wiesław Nawrocki²



B. Pasierb



W. Nawrocki

A study of bedrock geological structure of the ARENA object in Kraków-Czyżyny using geophysical methods to detect the presence of organic soil. Prz. Geol., 63: 289–294.

Abstract. Geophysical research assists in clarifying the methodology of future building work. The geological structure in terms of lithological variation of Quaternary and older formations was identified in the area of the proposed garage near the ARENA object in Kraków. In particular, the possibility of the presence of inserts of organic soils was determined. Ground Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) were used for more complete and comprehensive recognition of the ground. As a result of the study of the subsurface, thin interbeds of weak bearing organic soils have been found just outside the outline of the planned building. It was found that the Quaternary formations which were identified by geophysical and geotechnical methods are an appropriate ground for direct foundation of the object.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography (ERT), Ground Penetrating Radar (GPR), organic soil

W budowie podłoża Krakowa ważnym elementem są grunty organiczne związane głównie ze starorzeczami i z obszarem zalewowym Wisły. Występowanie ich prze-warstwień w podłożu ma duży wpływ na planowanie zabudowy terenu oraz na metodykę prowadzonych prac. Grunty organiczne, takie jak torfy i namuły, są gruntami słabonośnymi, o wysokiej wilgotności i miękkoplastycznym lub plastycznym stanie konsystencji. Niskie parametry oporu ścinania i spójności powodują, że nawet przy niewielkich obciążeniach mogą znacznie się odkształcać, co prowadzi do przemieszczenia fundamentów oraz pęknięć w konstrukcji budynków (Rybicki i in., 2009). Na takich gruntach niemożliwe jest bezpośrednie posadowienie obiektów kubaturowych.

W trakcie prac ziemnych wykonywanych dla obiektu ARENA w Krakowie-Czyżynach, w pobliżu projektowanej budowl, na poziomie jej posadowienia stwierdzono występowanie gruntów organicznych. Z powyższych względów istotnego znaczenia nabrało dokładne rozpoznanie utworów pokrywy czwartorzędowej, zwłaszcza określenie położenia i miąższości utworów organicznych na rozpatrywanym terenie. Przeprowadzone wcześniej badania geotechniczne uzupełniono o bezinwazyjne pomiary geofizyczne.

Badania geofizyczne prowadzone na obszarze położonym w dolinie rzeki Wisły i Białuchy, w zasięgu stożka napływowego Prądnika, na niższym z dwóch głównych poziomów tarasowych ciągnących się wzdłuż Wisły, miały na celu rozpoznanie zmienności litologicznej utworów czwartorzędowych i podłoża, a w szczególności wskazanie ewentualnego występowania wkładek namułów i torfów w serii piaszczysto-żwirowej. W pomiarach wykonanych

w rejonie projektowanych garaży przy obiekcie ARENA w Krakowie-Czyżynach wykorzystano dwie metody geofizyczne – georadarową i metodę tomografii elektrooporowej – co pozwoliło na uzyskanie pełniejszych danych.

CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Obszar badań to teren położony w odległości 3,5 km na północny wschód od Rynku Krakowa, w dzielnicy III Śródmieście, jest on zlokalizowany między Alejami Pokoju a ulicami Jana Pawła II i Nowohucką (ryc. 1).

W strefie przypowierzchniowej tego obszaru występują utwory czwartorzędowe, obejmujące sekwencję gruntów charakterystyczną dla niskiego tarasu Wisły. W ich profilu do głębokości rzędu 2–4 m p.p.t. występują mady, wykształcone przeważnie jako gliny pylaste i pyły, z lokalnymi przewarstwieniami pyłów piaszczystych, piasków pylastych oraz glin zwięzłych. Miąższość kompleksu mad jest zmienna, a niekiedy zanikają one całkowicie, powodując występowanie piasków bezpośrednio pod glebą i nasypami. Lokalnie w tym poziomie mogą występować powszechnie, ale nieregularnie, przewarstwienia słabonośnych gruntów organicznych: glin próchnicznych, namułów, a nawet torfów, tworzące cienkie wkładki i przewarstwienia wśród gruntów spoistych lub w ich stropie, przykład zobrazowano na rycinie 2 – otwór nr WP-4 (Adamek & Garecki, 2011). W pogrzebanych starorzeczach miąższość namułów organicznych może osiągać nawet 2–3 m. Wkładki i przerosty gruntów organicznych mogą także występować na większych głębokościach wśród piasków rzecznych.

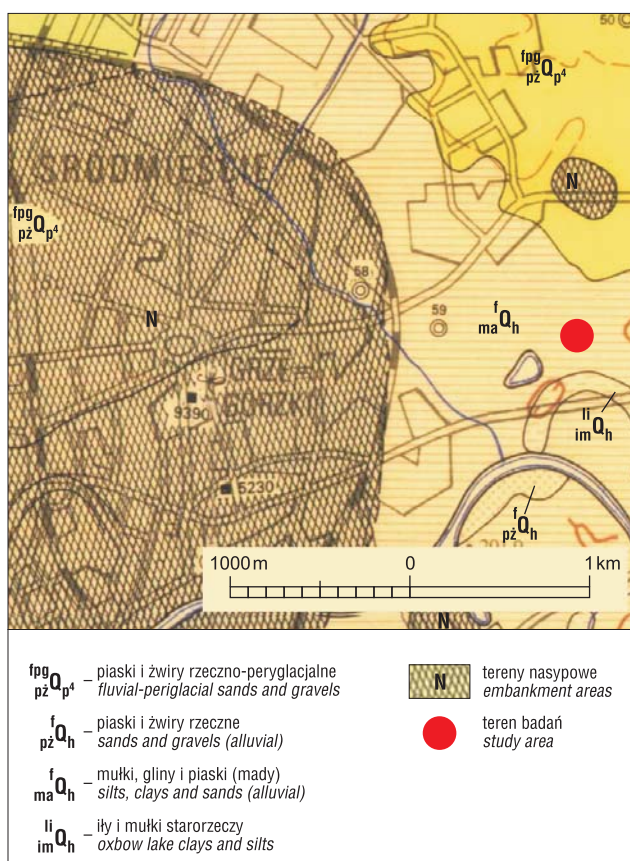
¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; bettka@pk.edu.pl.

² Zakład Badań Nieniszczących KPG, ul. Pod Strzechą 19, 31-352 Kraków; zbn@zbn-krakow.pl.



Ryc. 1. Położenie obszaru badań na tle ortofotomapy (www.google.pl 2012)

Fig. 1. Location of study area on the orthophotomap (www.google.pl 2012)



Ryc. 2. Lokalizacja terenu badań na Szczegółowej Mapie Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000 (powiększenie), arkusz Kraków – 973 (opr. Rutkowski, 1992)

Fig. 2. Location of the study area on the Detailed Geological Map of Poland 1 : 50 000 (magnified), sheet Cracow – 973 (by Rutkowski, 1992)

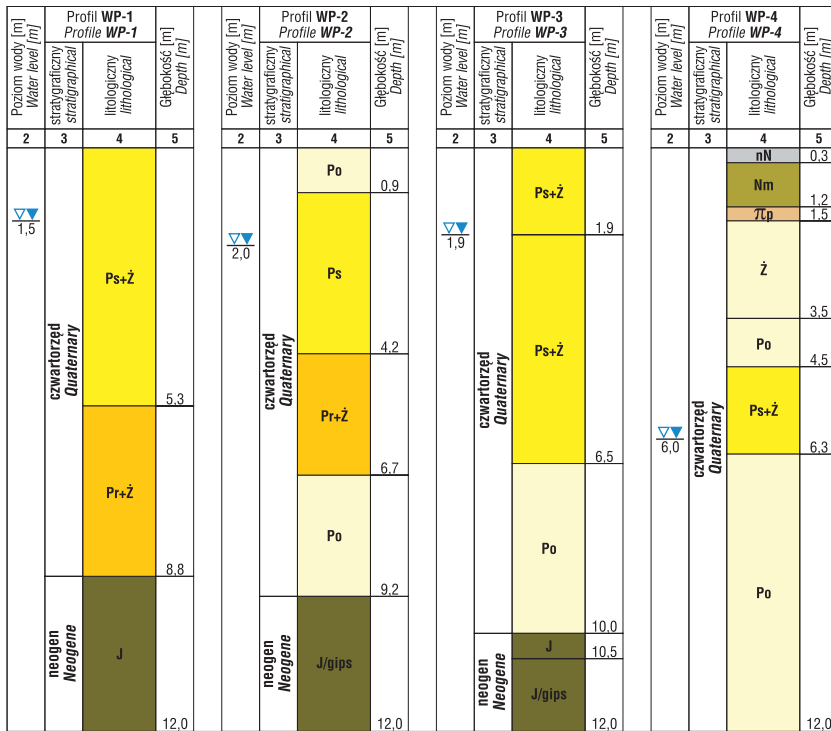
Najstarszymi skałami budującymi podłoże obszaru badań są wapienne kompleksy utworów skalistych jury. Podłoże osadów czwartorzędowych stanowią pochodzące z neogenu miocenijskie utwory zapadliska przedkarpackiego, głównie ily i ily pylaste szare, miejscami z przewarstwieniami gipsu i z wkładkami glin, piasków gliniastych,

pyłów i piasków pylastych. Zalegają one na głębokości 9–15 m p.p.t., z nieznacznym spadkiem wzdłuż biegu doliny (ryc. 3, otwór nr WP-2). Miąższość iłów wynosi kilkadziesiąt metrów. W strefie przypowierzchniowej występują utwory czwartorzędowe, obejmujące sekwencję gruntów charakterystyczną dla niskiego tarasu Wisły. Stanowią je głównie piaski, pospółki z przewarstwieniami żwirów i glin, osiągające średnią miąższość 10–12 m. Sporadycznie występują też namuły, gliny zawierające substancje organiczne oraz torfy, tworzące cienkie wkładki i soczewki. Na terenach zabudowanych, zwłaszcza przemysłowych, oraz wzdłuż ciągów głównych ulic, linii kolejowych itp. występują nasypy o miąższości do ok. 5 m.

Zwierciadło wody w rzece przy normalnych i niskich przepływach jest utrzymywane sztucznie na poziomie 199,0 m n.p.m. – powyżej stopnia wodnego „Dąbie” i na rzędnej 195,3 m n.p.m. – poniżej tego stopnia, aż po stopień „Przewóz” (Laskosz, 2011). Dla omawianego terenu głównym odbiornikiem wód powierzchniowych i drenażu dla wód podziemnych pozostaje rzeka Białucha, która uchodzi do Wisły poniżej stopnia wodnego w Dąbiu, na rzędnej ok. 195,3 m n.p.m. W górę biegu Białuchy, ku północy zwierciadło wód gruntowych stopniowo się wznosi. Główny poziom wodonośny w utworach czwartorzędowych, piaskach i żwirach wyścielających dno doliny Wisły, utrzymuje się na zróżnicowanych głębokościach, najczęściej rzędu 2–5 m p.p.t. Zwierciadło wód gruntowych może mieć charakter swobodny bądź lekko napięty, a warstwa wodonośna obejmuje serię piaszczysto-żwirową do stropu iłów. Na potrzeby prac budowlanych poziom wód gruntowych został obniżony, z zastosowaniem pomp, do rzędnej ok. 194 m n.p.m. Na rycinie 3 przedstawiono profile litologiczne. Dla otworów kontrolnych WP-1, WP-2 i WP-3 profile zostały wykonane po usunięciu ok. 3 m warstwy nasypów, glin i pyłów.

METODYKA BADAŃ

W celu dokładnego określenia budowy geologicznej podłoża, a w szczególności miejsc występowania gruntów organicznych, badania geofizyczne przeprowadzono dwiema uzupełniającymi się metodami – metodą tomografii elektrooporowej i georadarową. Metoda tomografii elektrooporowej należy do grupy metod geoelektrycznych, której podstawą jest badanie zmian pola elektrycznego, wytworzonego w podłożu przez układ elektrod zasilanych prądem stałym (Dzwiniel, 1978). Skały i grunty przewodzą prąd elektryczny w różnym stopniu, w zależności od składu mineralnego, struktury, wilgotności, stopnia spękania. Dlatego na podstawie wyników badań elektrooporowych można określić różne rodzaje skał występujące w badanym przekroju oraz sposób ich ułożenia względem siebie. Metoda tomografii elektrooporowej jest kombinacją sondowań i profilowań elektrooporowych, ze względu na pomiary prowadzone wzdłuż profilu i z powodu wzrastającego zasięgu głębokościowego w trakcie badań. Seria ciągłych pomiarów jest wykonywana na podstawie automatycznego doboru typu układu elektrod, spośród wszystkich podłączonych do kabla wzdłuż profilu. Pomiary są



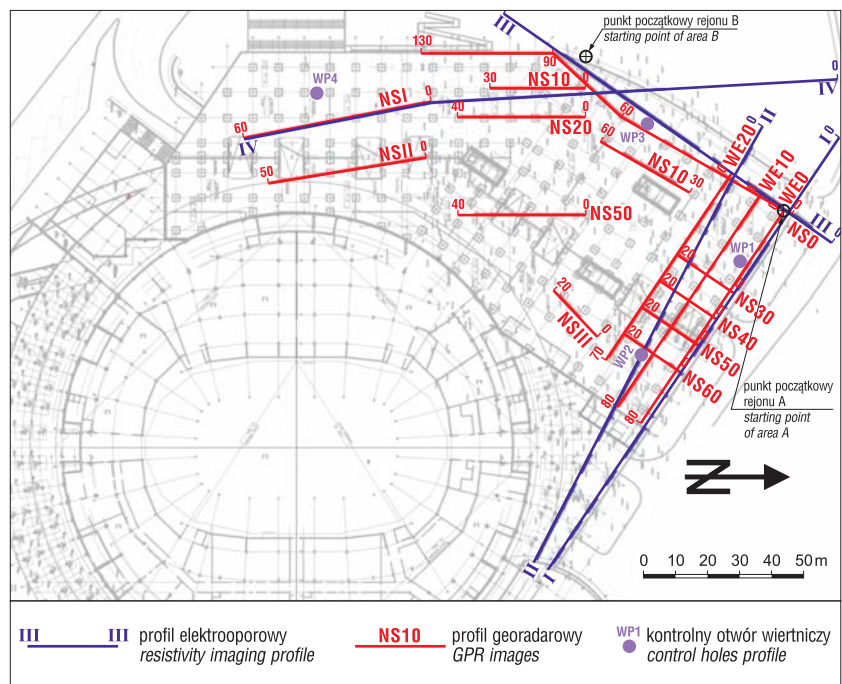
Ryc. 3. Profile litologiczne otworów kontrolnych: WP-1, WP-2, WP-3 i WP-4 (Adamek & Garecki, 2011)

Fig. 3. Lithological sections of control boreholes: WP-1, WP-2, WP-3 i WP-4 (Adamek & Garecki, 2011)

przeprowadzane kolejnymi sekwencjami – układami – o coraz większych rozstawach, z zadaniem krokiem wzdłuż wyznaczonego profilu, aż do wyczerpania wszystkich zaprogramowanych kombinacji. Średnia głębokość penetracji pomiaru wynosi, w zależności odadanego układu pomiarowego, od 1/3–1/6 odległości między skrajnymi elektrodami. Liczba możliwych do zarejestrowania pomiarów jest stosunkowo duża i może wynosić nawet kilka tysięcy (Pasierb, 2012). Procedurę przetwarzania danych i interpretację wykonuje się, stosując inwersję 2D. Celem inwersji jest iteracyjna minimalizacja błędów dopasowania parametrów stworzonego modelu teoretycznego z parametrami pomiarowymi (Loke & Barker, 1996). Wyniki pomiarów są przedstawiane w postaci przekrojów obrazujących rozkład oporności pozornej na płaszczyźnie pionowej, wzdłuż profilu pomiarowego i w zależności od głębokości. Do badań metodą tomografii elektrooporowej wykorzystano aparaturę ARES firmy GF Instruments. Zastosowano układ pomiarowy Schlumbergera z odległością między elektrodami wynoszącą 5 m. Poprowadzono profile o długości 126 i 165 m. Przetwarzanie i analizę danych przeprowadzono za pomocą programu Res2dinv firmy Geotomo Software.

Badania georadarowe wykonano georadarem ZOND 12e lotewskiej firmy Radar System Inc. Metoda georadarowa opisywana skrótem GPR (Ground Penetrating Radar) należy do grupy elektro-

magnetycznych metod geofizycznych. Jest to nieniszcząca metoda pomiaru zmian ciągłości i niejednorodności ośrodka, wykorzystująca wysokoczęstotliwościowe zmienne pole elektromagnetyczne. W badaniach zastosowano refleksyjną metodę pomiarów georadarowych, polegającą na wysyłaniu przez antenę nadawczą w głąb badanego ośrodka geologicznego fal elektromagnetycznych o wysokich częstotliwościach. Układ anten nadawczo-odbiorczych przesuwany z ustaloną prędkością wzdłuż linii profilu rejestruje w zadanym interwale czasowym fale odbite od poszczególnych granic niejednorodności lub warstw geologicznych, różniących się wartością stałej dielektrycznej. Amplituda odbitego impulsu elektromagnetycznego jest proporcjonalna do wielkości współczynnika odbicia od granicy dwóch różnych ośrodków i jest tym większa im większa jest różnica stałych dielektrycznych po obu stronach granicy odbijającej. Wynikiem pomiaru jest przekrój badanego ośrodka w formie obrazu zarejestrowanych odbić fal elektromagnetycznych. Zasięg głębokościowy badań, zależny od częstotliwości fal elektromagnetycznych wysyłanych przez antenę oraz właściwości elektrycznych ośrodka i związanego z nimi tłumienia, wynosi od kilkudziesięciu centymetrów do kilkudziesięciu metrów. Stosowanie anten o wysokiej częstotliwości zmniejsza zasięg głębokościowy metody, wskutek większego tłumienia fal elektromagnetycznych, umożliwia natomiast rejestrowanie zmian w podłożu z wyższą roz-



Ryc. 4. Mapa dokumentacyjna badań geofizycznych przeprowadzonych w rejonie planowanej hali widowiskowo-sportowej w Czyżynach

Fig. 4. Documentary map of geophysical research conducted in the region of the planned arena in Czyżyny

dzielczością. W pomiarach zastosowano anteny ekranowane o częstotliwości 100 MHz (Georadar Zond-12, 2007). Teoretyczne parametry zasięgu głębokościowego aparatury przyjęto dla 15–20 m. W rzeczywistości, z uwagi na poziom wód gruntowych, zasięg ten nie przekraczał kilku metrów. Otrzymane echogramy podczas analizy były poddane obróbce komputerowej, w tym wzmacnianiu i osłabianiu rejestrowanych odbić na różnych głębokościach. Dla gruntów występujących powyżej wód gruntowych przyjęto stałą dielektryczną równą 5, a dla piasków i żwirów zawodnionych stała dielektryczna wyniosła 16 (Skolnik, 1990). Interpretacja wyników koncentrowała się na określeniu rzeczywistej głębokości prospekcji, wydzieleniu horyzontów warstw i zlokalizowaniu zakłóceń, które są widoczne w ich naturalnym układzie jako załamania fali elektromagnetycznej przy przechodzeniu do kolejnych utworów.

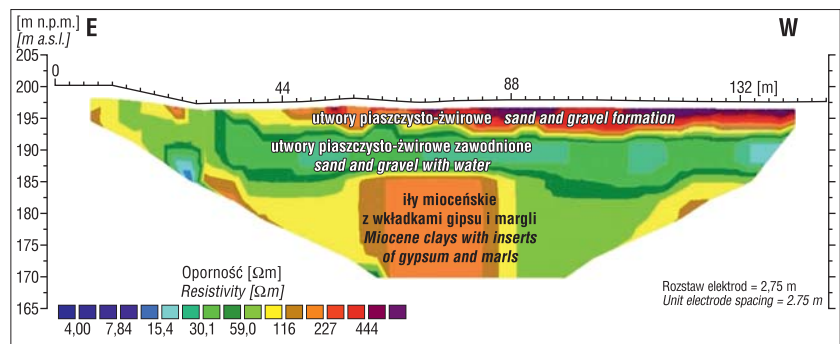
WYNIKI BADAŃ

Badania metodą tomografii elektrooporowej przeprowadzono na obszarze projektowanego parkingu podziemnego dla obiektu ARENA w Krakowie-Czyżynach (ryc. 1 i 4). Miały one na celu rozpoznanie budowy geologicznej podłoża oraz określenie miejsc występowania gruntów organicznych w czwartorzędowej serii utworów piaszczysto-żwirowych.

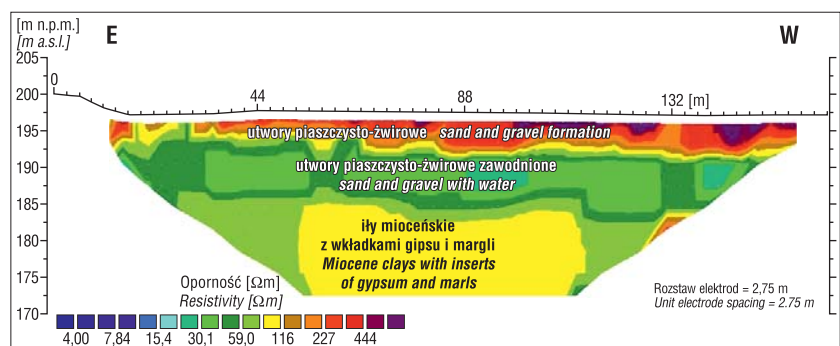
Pomiary geofizyczne metodą tomografii elektrooporowej wykonano wzdłuż linii czterech profili I–IV, a pomiary metodą georadarową wzdłuż 17 profili. Usytuowanie profili badawczych oraz kierunek ich wykonania przedstawiono na rycinie 4. Oznaczenia profili przyjęto w sposób następujący: WE oznacza profil wykonany z zachodu na wschód, NS profil poprowadzony z północy na południe, liczba arabska przy profilach georadarowych informuje o odległości od profilu przechodzącego przez punkt 0,0. Pojedyncze profile, jak również profile wykonane metodą tomografii elektrooporowej, oznaczono liczbą rzymską. Początek i koniec każdego profilu domierzono sytuacyjnie w nawiązaniu do wyznaczonych punktów zewnętrznego obrysu parkingu. Niwelację punktów wszystkich profili wykonano w odniesieniu do reperu roboczego (znak na słupie latarni) o rzędnej 202,436 m n.p.m.

Na przekrojach I i II, o długościach 165 m, poprowadzonych w rejonie A wzdłuż linii W–E, w przybliżeniu równoległej do Alei Pokoju, warstwę przypowierzchniową stanowią utwory piaszczysto-żwirowe, wykazujące w począt-

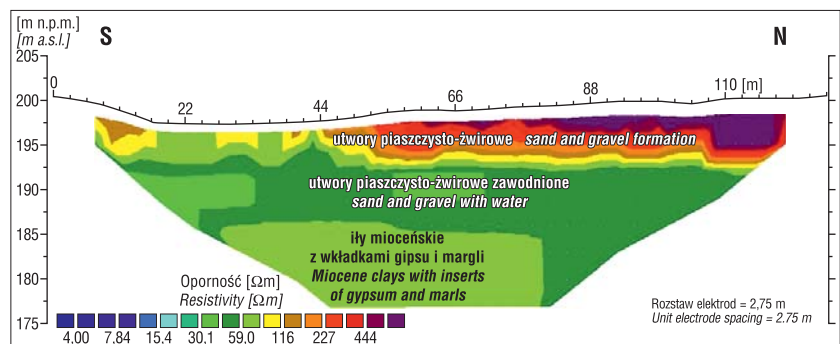
kowej części profilu oporność rzędu 60–100 Ωm , a w dalszej wyższej – rzędu 160–700 Ωm (ryc. 5 i 6). Różnice w oporności mogły być spowodowane zmiennym zawodnieniem związanym z położeniem zwierciadła wód grunto-



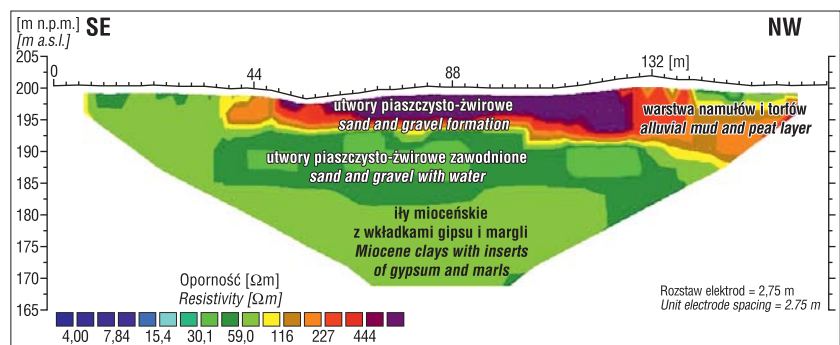
Ryc. 5. Przekrój geoelektryczny I – wykonany metodą ERT
Fig. 5. Resistivity imaging cross-section I – made by ERT



Ryc. 6. Przekrój geoelektryczny II – wykonany metodą ERT
Fig. 6. Resistivity imaging cross-section II – made by ERT



Ryc. 7. Przekrój geoelektryczny III – wykonany metodą ERT
Fig. 7. Resistivity imaging cross-section III – made by ERT



Ryc. 8. Przekrój geoelektryczny IV – wykonany metodą ERT
Fig. 8. Resistivity imaging cross-section IV – made by ERT

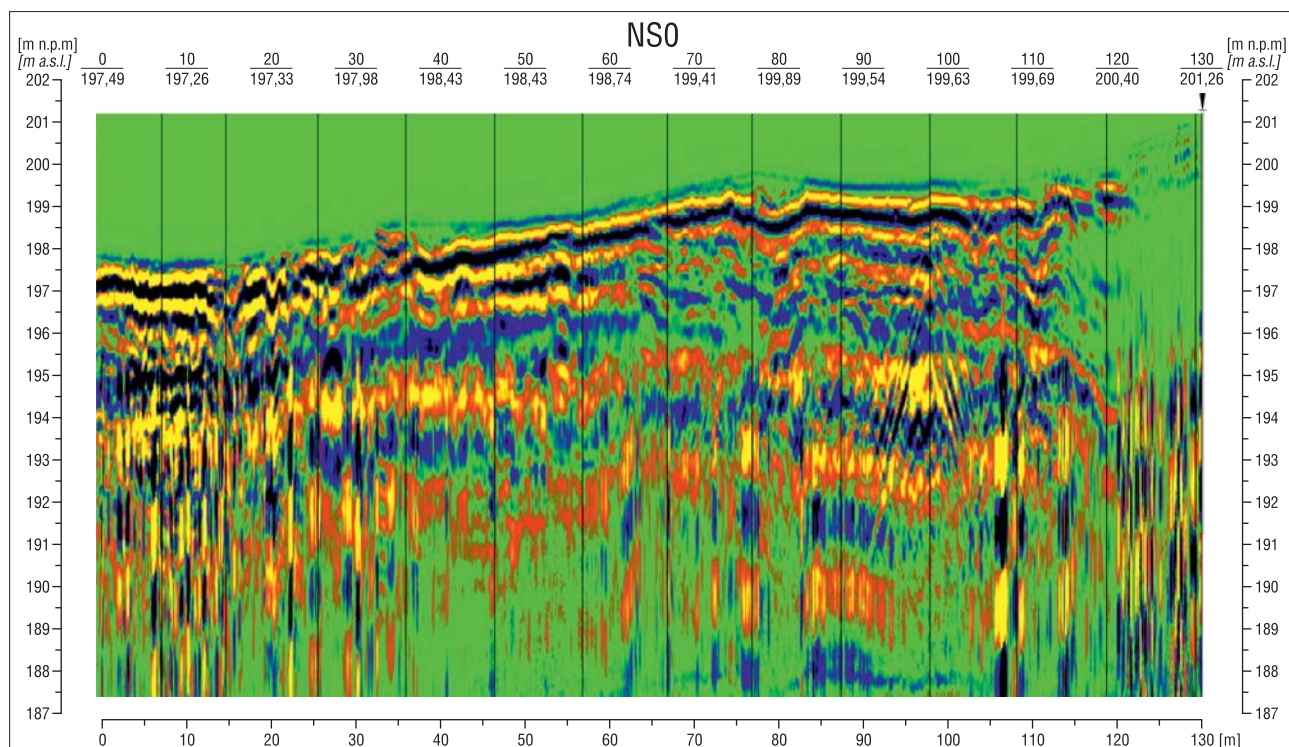
wych. Na odcinku do 50 m długości przekroju I utwory przypowierzchniowe niewiele różnią się opornością od niżej leżącej warstwy, gdyż stanowią tę samą serię piaszczysto-żwirową. Utwory występują poza zasięgiem lejka depresyjnego, wywołanego sztucznym obniżaniem zwierciadła wód gruntowych za pomocą pomp. Miąższość tej warstwy zmienia się średnio od ok. 3 do 7 m. Niżej zalegająca warstwa charakteryzuje się znacznie niższą opornością, rzędu 20–60 Ωm i miąższością ok. 10–15 m oraz 5–9 m na profilu II, odpowiada zawodnionym żwirom i piaskom. Spąg tej warstwy to bardzo prawdopodobna granica między utworami żwirowo-piaszczystymi, a występującymi w podłożu łałami z wkładkami margli i gipsu.

Przekrój III o długości 126 m przebiega prawie prostopadle do dwóch poprzednich. Warstwa przypowierzchniowa wykazuje oporność rzędu 60–150 Ωm w początkowej części profilu, w części dalszej oporność rośnie do 160–650 Ωm (ryc. 7). Odpowiada ona utworom piaszczysto-żwirowym o różnym stopniu zawodnienia i zmieniającej się miąższości od ok. 2 m, w części początkowej profilu, do maksymalnie 8 m, w części dalszej. Zalegająca poniżej warstwa o oporności ok. 30–60 Ωm odpowiada zawodnionym piaskom i żwirom. Podłoże stanowią ły z wkładkami gipsów i margli o oporności rzędu 60–80 Ωm , zbliżonej do oporności żwirów i piasków w strefie zawodnienia.

Na przekroju IV w początkowej części oporność warstwy przypowierzchniowej wynosi 50–80 Ωm , nie różni się więc od oporności niżej leżącej warstwy (ryc. 8). Dopiero od 30 m profilu oporność pierwszej warstwy rośnie znacząco od 120 do ponad 700 Ωm , co odpowiada utworom piaszczysto-żwirowym o zróżnicowanym zawodnieniu. Miąższość warstwy zwiększa się od 3 do (lokalnie) 12 m. Od ok. 130 m na przekroju IV w strefie przypowierzchniowej stwierdzono występowanie cienkiej warstwy gruntów organicznych, o oporności rzędu 60–100 Ωm . Podobnie jak na poprzednich

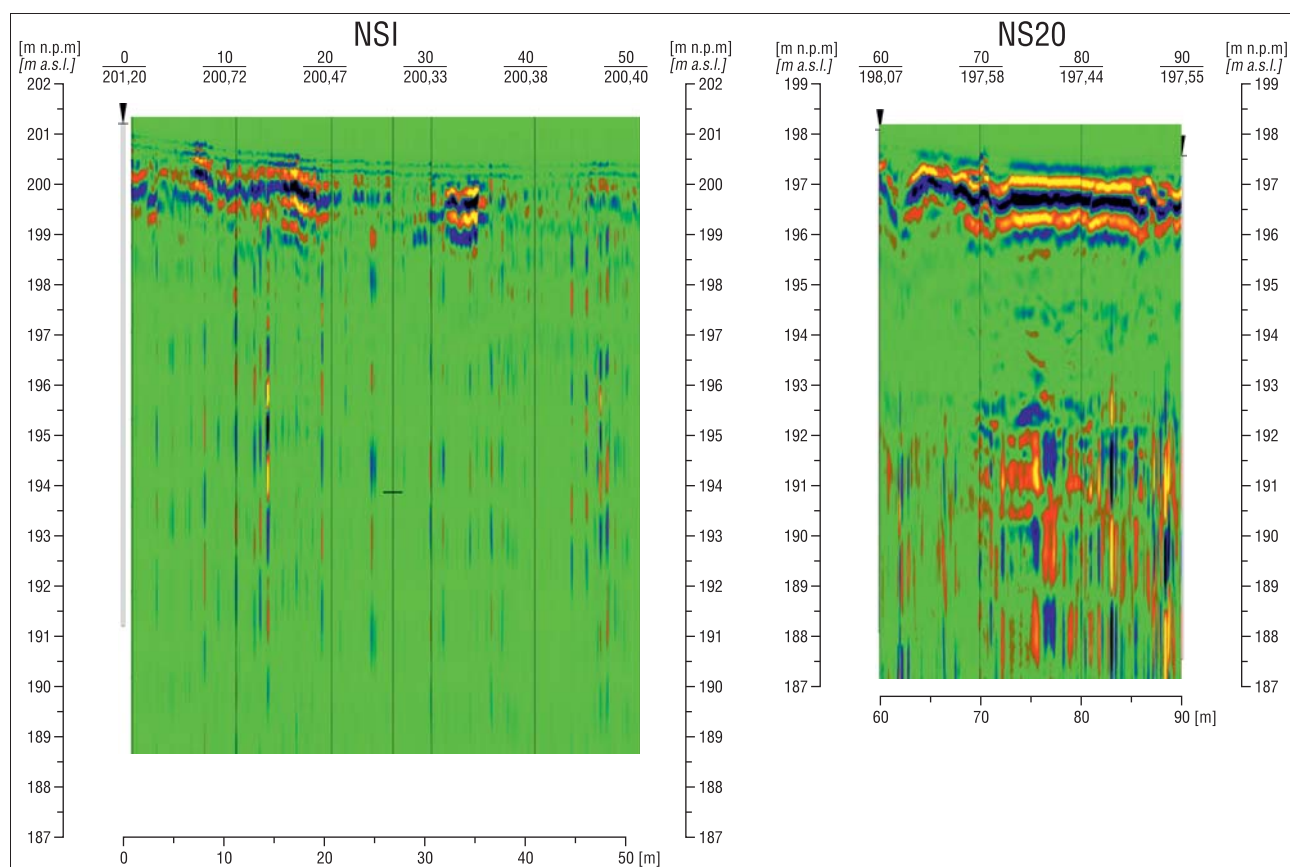
profilach, poniżej występuje warstwa zawodnionych piasków i żwirów o niskiej oporności – rzędu 20–60 Ωm i miąższości ok. 9 m. Najbardziej widoczna jest ona w strefie występowania wysokooporowych utworów przypowierzchniowych, natomiast prawie niewidoczna na początku i końcu profilu. Granica stropu łał zaznacza się słabo. Utwory podłoża charakteryzują się opornością 50–100 Ωm .

Wyniki badań georadarowych zamieszczone na echogramach (ryc. 9 i 10), odwzorowują ukształtowanie warstw w strefie przypowierzchniowej. W przeprowadzonych pomiarach, mimo że teoretyczny zasięg głębokościowy był ustawiony w aparaturze na głębokość 15–20 m, w istniejących warunkach budowy podłoża maksymalny zasięg podlegający interpretacji nie przekraczał 7–8 m. Było to spowodowane tłumieniem fali elektromagnetycznej przez wody gruntowe, występujące na głębokości od ok. 2 do 6 m pod powierzchnią terenu, co wykazały wyniki kontrolnych odwiertów geotechnicznych. Silne tłumienie fali elektromagnetycznej powodowały także występujące gliny, pyły i grunty organiczne na odcinkach profili georadarowych, wzdłuż których nie usunięto jeszcze górnych warstw gruntów nasypów, glin i pyłów. Efekt ten zaobserwowano na echogramach profilu NS0 (ryc. 9) w odległości 110 m od początku profilu, na odcinku 20 m. Również silne tłumienie pojawiło się na profilu NS20 na długości 20 m od dwudziestego metra profilu oraz na całej długości profilu NSI (ryc. 10). Wszystkie omawiane miejsca na profilach znajdowały się w części rejonu B. Interpretacja i szczegółowa analiza echogramów wykazała, że grunty te znajdują się bezpośrednio pod powierzchnią terenu i nie sięgają głębiej niż do rzędnej ok. 199,0 m n.p.m. Na pozostałych profilach georadarowych nie stwierdzono występowania silnego tłumienia fal elektromagnetycznych, mogącego pochodzić od utworów organicznych, glin oraz pyłów występujących do głębokości ok. 3 m poniżej poziomu wód gruntowych.



Ryc. 9. Echogram – przekrój georadarowy NS0

Fig. 9. Echogram – GPR images NS0



Ryc. 10. Echogramy – przekroje georadarowe NSI i NS20

Fig. 10. Echograms – GPR images NSI and NS20

Wyniki badań geofizycznych zostały zweryfikowane przez korelację z profilami litologicznymi, których lokalizację zaznaczono na rycinie 4. Z wykonanych przez firmę GEOMIX odwiertów wynika, że zwierciadło wody gruntowej, obniżone za pomocą pomp, znajduje się obecnie na rzędnej 194,5–196,0 m n.p.m. Iły występują na głębokości 188,0 m n.p.m, a nad nimi, do głębokości 199 m n.p.m. występują utwory czwartorzędowe, wykształcone głównie jako: piaski średnie, żwiry i pospółki. Szczegółowa analiza profili otworów wiertniczych uzyskanych zarówno z danych archiwalnych, jak i profili otworów kontrolnych wykazała, że namuły i inne słabonośne grunty organiczne występują jedynie w dwóch otworach, położonych poza konturem projektowanego obiektu. W innych otworach nie zaobserwowano kontynuacji tych wklędek.

PODSUMOWANIE

Na podstawie szczegółowej analizy danych otrzymanych z badań elektrooporowych, georadarowych i profili wiertniczych można wnioskować, że słabonośne grunty organiczne występują jedynie w cienkich przewarstwiach przy powierzchni w części rejonu B, jednak już poza konturem projektowanego obiektu. Wykazano również, że seria otworów czwartorzędowych, leżących na miocen-skich iłach, jest wykształcona jako piaski, żwiry i pospółki w różnym stopniu nasycone wodą. W obszarze badań, w serii czwartorzędowej stwierdzono brak przesłanek wskazujących na występowanie przewarstwień namułów i pyłów, zawierających substancje organiczne. Znajdujące się w podłożu czwartorzędowe piaski, żwiry i pospółki

nie eliminują zatem podłoża budowlanego pod względem nośności. Stanowią one podstawową serię osadową dla posadowienia obiektów budowlanych. Na podstawie wcześniejszego rozpoznania geotechnicznego, uzupełnionego badaniami geofizycznym, można stwierdzić, że w planowanym miejscu budowy jest możliwe bezpośrednie posadowienie obiektu.

Autorzy pragną podziękować Recenzentom za poświęcony czas oraz wnikliwą i konstruktywną recenzję niniejszej pracy.

LITERATURA

- ADAMEK K. & GARECKI J. 2011 – Hala widowiskowo-sportowa w Czyżynach – karty profili geotechnicznych otworów wykonane przez firmę „GEOMIX”. Wojewódzkie Archiwum Geologiczne w Krakowie.
- DZWINEL J. 1978 – Metody geoelektryczne. Wyd. Geol., Warszawa.
- GEORADAR ZOND-12, 2007 – Handbook for Exploration, Radar Systems, Inc., Riga, Latvia.
- LASKOSZ E. & Wykonawca (Asta Plan – pracownia urbanistyczno-architektoniczna) 2011 – Prognoza oddziaływania na środowisko do projektu miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego obszaru Mogilska-Chałpnika.
- LOKE M.H. & BARKER R.D. 1996 – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131–152.
- PASIERB B. 2012 – Techniki pomiarowe metody elektrooporowej. *Czasopismo Techniczne Ś-2*: 192–199.
- RUTKOWSKI J. 1992 – Szczegółowa Mapa Polski w skali 1 : 50 000, arkusz 973 Kraków. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- RYBICKI S., KROKOSZYŃSKI P. & HERZIG J. 2009 – Charakterystyka warunków geologiczno-inżynierskich podłoża Krakowa z uwzględnieniem nawarstwień historycznych. *Geologia*, 35: 57–65.
- SKOLNIK M. 1990 – Radar handbook, McGraw-Hill Inc., New York.

Praca wpłynęła do redakcji 5.11.2012 r.
Akceptowano do druku 23.03.2015 r.