

Przykłady zastosowania sondowań statycznych CPTU do oceny warunków geotechnicznych w sytuacji zagrożenia wystąpieniem awarii budowlanej

Mgr inż. Sławomir Krysiak, mgr inż. Piotr Paprocki
Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., Warszawa

Realizacja obiektów budowlanych w trudnych warunkach geotechnicznych, błędy projektowe i wykonawcze, jak również nieprawidłowa eksploatacja obiektów to główne przyczyny awarii budowlanych. Awaria budowlana to stan uniemożliwiający (ograniczający) użytkowanie obiektu budowlanego w wyniku uszkodzenia jego elementów lub zepsucia się urządzeń technicznych [3]. Do technicznych przyczyn awarii i katastrof budowlanych, mających swoje źródło na etapie projektowania, według publikacji [2], należy zaliczyć między innymi:

- niedostateczne lub błędne oceny właściwości podłoża gruntowych i warunków gruntowo-wodnych,
- błędne oceny dopuszczalnych obciążeń na grunt i dopuszczalnych osiadań danego rodzaju konstrukcji,
- złe rodzaje fundamentowania oraz niewłaściwe ich za-projektowanie.

Popołnienie błędu na etapie dokumentowania i projektowania geotechnicznego może w konsekwencji doprowadzić do wystąpienia stanu awaryjnego. Wystąpienie awarii budowlanej (lub stanu tzw. równowagi granicznej) wymaga ponownej oceny warunków geotechnicznych i doboru parametrów wytrzymałościowych oraz odkształceniowych. W takiej sytuacji parametry mechaniczne gruntu muszą być właściwie dobrane (wyprowadzone) dla konkretnej, często zmienionej w stosunku do danych wyjściowych, sytuacji projektowej i odniesione do warunków *in situ*. Częstokroć warunki wykonania uzupełniających badań geotechnicznych wymagają zastosowania metod badawczych pozwalających na szybką, ale przede wszystkim, prawidłową oceną stanu zagrożenia, wskazania przyczyn oraz skutecznych technicznych sposobów przeciwdziałania. W wieloletniej praktyce inżynierskiej stosowanej w Geoteko, bardzo często w opisanych sytuacjach, jako podstawowe narzędzie badawcze wykorzystuje się sondowania statyczne CPTU. Pozwalają one na określenie układu warstw geotechnicznych, rodzaju gruntu oraz parametrów geotechnicznych. Wynikiem badania jest ciągły profil gruntowy będący obiektywnym odzwierciedleniem warunków gruntowych występujących w podłożu. Sondowanie CPTU może być wykonywane praktycznie w każdym rodzaju gruntu i w każdych warunkach terenowych.

W artykule przedstawiono szerzej dwa przypadki zastosowania sondowań CPTU do analizy warunków gruntowych w sytuacji realnego zagrożenia wystąpienia awarii budowlanej. Podane przykłady były realizowane w ramach prac wykonywanych przez Geoteko Sp. z o.o.

NASYP KOLEJOWY

Przykład budowli ziemnej zagrożonej awarią budowlaną stanowi prezentowany nasyp kolejowy, w którego bezpośrednim sąsiedztwie prowadzono roboty budowlane związane z realizacją innego obiektu budowlanego. W podłożu gruntowym wyróżniono kolejno następujące pakiety gruntów:

- namuły piaszczyste i gliniaste (twardoplastyczne, lokalnie na pograniczu plastycznych) o miąższości dochodzącej do 7,5 m,
- różnoziarniste nawodnione piaski w stanie średnio zagęszczonym o zróżnicowanej miąższości w zakresie 3 ÷ 6 m zalegające poniżej namulów, w ich spągu występują średnio zagęszczone i zagęszczone pospółki i żwiry,
- zastoiskowe i morenowe grunty spoiste wykształcone jako pyły piaszczyste, pyły i piaski gliniaste w stanie twardoplastycznym,

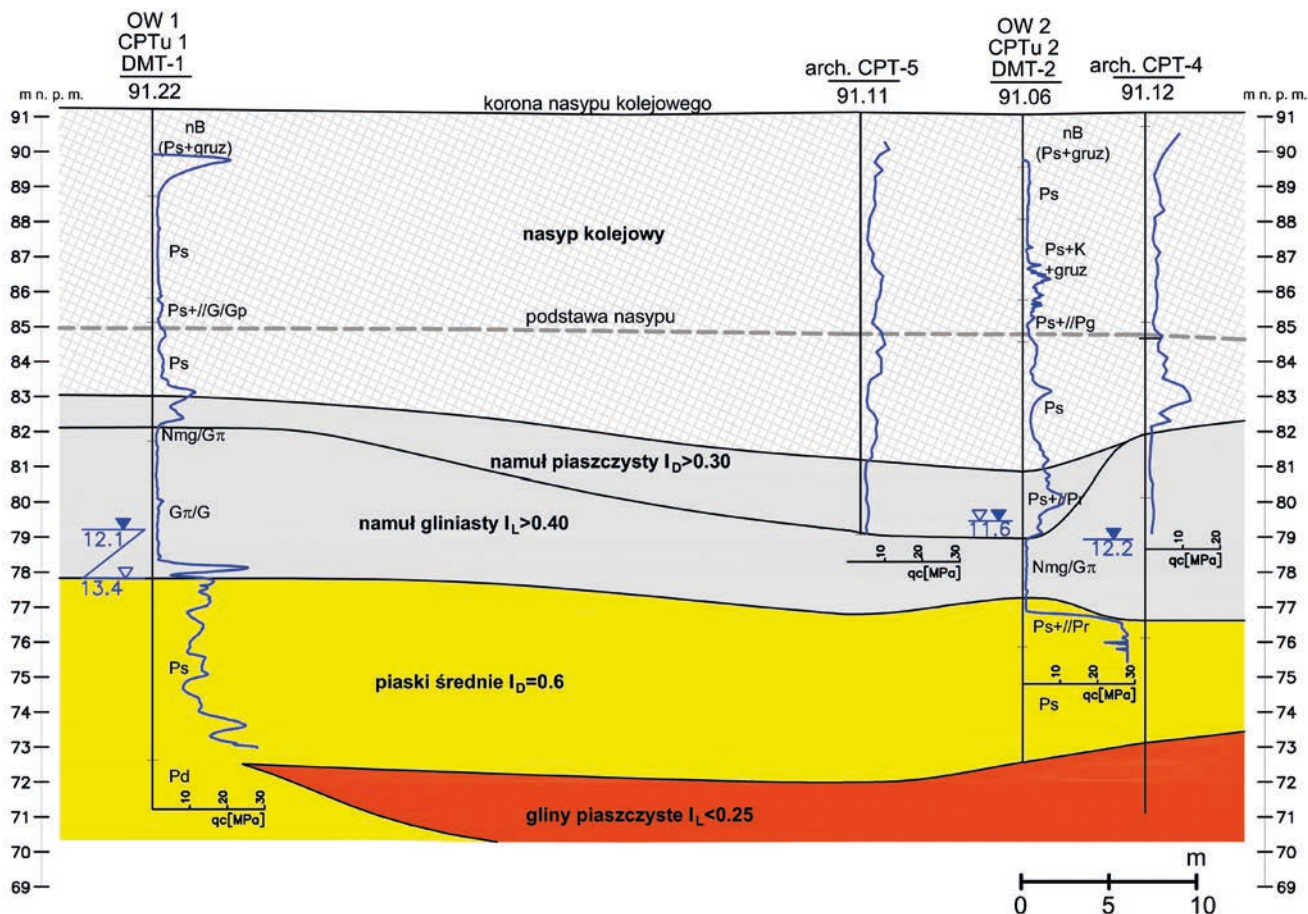
Głębiej w podłożu gruntowym zalegają zagęszczone, nawodnione różnoziarniste piaski oraz neogęskie ły w stanie twardoplastycznym, półzwartym i zwartym.

Warunki geotechniczne w podłożu nasypu przedstawiono na rys. 1.

Zagrożenie wystąpieniem awarii stwierdzono na podstawie geodezyjnych obserwacji nadmiernych osiadań nasypu (sięgających kilkudziesięciu centymetrów) w okresie prowadzenia robót budowlanych w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Wyniki obserwacji osiadań skłoniły Inwestora przedsięwzięcia realizowanego w sąsiedztwie nasypu do oceny jego stateczności. Prawidłowa analiza stateczności wymagała odtworzenia, za pomocą odwzorowania numerycznego, kolejnych wykonanych etapów robót w sąsiedztwie nasypu oraz prognozy zachowania się nasypu przy dalszej realizacji projektowanych robót budowlanych. Warunkiem koniecznym było właściwe rozpoznanie aktualnego stanu gruntów budujących nasyp kolejowy i określenie jego parametrów mechanicznych.

W tym celu na koronie nasypu zaplanowano i wykonano badania geotechniczne w dwóch profilach badawczych. W każdym profilu badawczym wykonano wiercenie lekkim zmechanizowanym sprzętem wiertniczym, sondowania statyczne CPTU [4] oraz badania dylatometrem Marchettiego (DMT). W pierwszej kolejności wykonano sondowania CPTU, następnie w promieniu około 2 m od miejsca wykonania sondowania wykonano badanie DMT, jako ostatnie badanie, po śladzie sondowania CPTU, wykonano otwór badawczy. Za minimalną głębokość badań przyjęto osiągnięcie spągu nasypu, maksymalnie badania zaplanowano do głębokości 20 m p.p.t. Sondowania statyczne CPTU wykonano przy wykorzystaniu urządzenia hydraulicznego firmy Pagani model tg 63_150 z zastosowaniem stożka elektrycznego – bezprzewodowy system firmy GEOTECH AB. Wykonano 2 sondowania (CPTU-1 i CPTU-2) odpowiednio do głębokości 18,3 m i 15,6 m. Interpretacje wyników badań przeprowadzono przy wykorzystaniu oprogramowania firmy GEOSOFT – CPT-pro. Na podstawie wierceń stwierdzono, że nasyp jest zbudowany z piasków średnich z wkładkami piasków gliniastych oraz lokalnie gruzu. Interpretacji ilościowej stanu zagęszczenia nasypu dokonano na podstawie formuły Baldiego (1986) dla normalnie skonsolidowanych piasków:

$$I_D = 0,41 \cdot \ln(q_t / (157 \cdot \sigma'_{vo})^{0,55}) \quad [1]$$



Rys. 1. Przekrój geotechniczny wzdłuż analizowanego odcinka nasypu kolejowego

Wykresy zmienności pomierzonych wartości q_c w funkcji głębokości (w obu wykonanych sondowaniach) zamieszczono na przekroju geotechnicznym (rys. 1).

Na podstawie wykonanych sondowań CPTU stwierdzono, że grunty budujące nasyp znajdują się w stanie luźnym – stopień zagęszczenia $I_D < 0,3$. Dodatkowo ustalono, że pomierzone w trakcie sondowania w obrębie nasypu wartości q_c są bardzo niskie i zawierają się w przedziale od 2 do 3 MPa. Świadczy to o wyjątkowo słabym zagęszczeniu nasypu spowodowanym rozluźnieniem jego struktury. W badaniu CPTU-2 do głębokości około 12 m poniżej poziomu korony nasypu stwierdzono piaski średnie w stanie luźnym. Pomiędzy wykonanymi sondowaniami stwierdzono istotne różnice w miąższości poszczególnych warstw gruntów naturalnych, jak również w zakresie ich stanu plastyczności/zaęszczenia, natomiast układ i następstwo warstw potwierdziły budowę geologiczną analizowanego obszaru, znaną z wcześniejszych badań geotechnicznych wykonanych w tym rejonie.

Na podstawie badań CPTU określono również kąt tarcia wewnętrznego według formuły (Schmertmanna (1978):

$$\phi' = 0,125 \cdot I_D + 28 \text{ (dla piasków średnich)} [1]$$

Wyprowadzone na podstawie badań CPTU wartości kąta tarcia wewnętrznego posłużyły do obliczeń stateczności. Obliczenia stateczności nasypu kolejowego wykonano metodą elementów skończonych, stosując procedurę redukcji parametrów wytrzymałościowych c i ϕ . Obliczenia wykonano etapowo, stosując model sprężysto-idealnie plastyczny z warunkiem

plastyczności Coulomba-Mohra, przy zastosowaniu programu Z_Soil v. 2009 firmy Zace. Etapowość obliczeń uwzględniała zakres wykonanych robót budowlanych i zmiany geometrii przekroju. Wyniki wraz z opisem geometrii nasypu i stanu robót budowlanych w sąsiedztwie nasypu (tabl. 1) jednoznacznie wskazują, że analizowany fragment nasypu kolejowego znajdował się w stanie odpowiadającym podanej we wstępie definicji awarii budowlanej (wariant II), a kontynuacja prac bez wykonania dodatkowych robót zapewniających stateczność groziła utra-

Tabl. 1. Wyniki obliczeń stateczności

Numer wariantu	Opis geometrii przekroju i stanu robót budowlanych	Współczynnik stateczności
Wariant I	Nasyp kolejowy przed rozpoczęciem robót budowlanych w jego sąsiedztwie	1,89
Wariant II	Wbicie ścianki szczelnej z grodzic stalowych w skarpe nasypu; rozebranie dolnej części nasypu od podstawy do ścianki szczelnej; wykonanie ściany szczelinowej; wykonanie iniekcji pomiędzy ścianką szczelną i ścianą szczelinową – stan nasypu w trakcie wykonania badań geotechnicznych	1,01
Wariant III	Wykonanie wykopu pomiędzy ścianką szczelną i ścianą szczelinową – kolejny przewidywany etap robót budowlanych	< 1
Wariant IV	Wykonanie wykopu pomiędzy ścianką szczelną i ścianą szczelinową z uwzględnieniem projektowanych dwóch poziomów zastrzałów (podparcia) – stan projektowany	1,23

tą stateczności (wariant III). Stwierdzone rozluźnienie korpusu nasypu powodujące osiadania rzędu kilkudziesięciu centymetrów nie mogło być wywołane zmianami cech mechanicznych gruntów nasypu lub podłoża, wiązało się natomiast ze zmianami geometrycznymi pod wpływem działania czynników zewnętrznych (roboty budowlane w sąsiedztwie nasypu), które w konsekwencji spowodowały stan zagrożenia awarią budowlaną.

Obserwowane znaczne przemieszczenia nasypu spowodowane zmianą warunków podparcia nasypu (w wyniku prowadzenia robót budowlanych) były przyczyną zmiany stanu naprężenia, co z kolei doprowadziło do mobilizacji parcia czynnego. Sondowania CPTU w sposób jednoznaczny określiły stan zagęszczenia nasypu i wykazały dodatkowo znaczne rozluźnienie struktury (bardzo niskie opory wciskania stożka), co wskazało na konieczność podjęcia działań zapewniających utrzymanie stateczności nasypu.

NASYP DROGOWY

Kolejny przykład budowli ziemnej zagrożonej awarią budowlaną stanowi nasyp drogowy trasy ekspresowej. Na odcinku drogi o długości 100 m poprowadzonej na nasypie o wysokości około 5 m na kilka tygodni przed oddaniem trasy od użytku stwierdzono osiadania nawierzchni, które osiągnęły maksymalnie wartość około 10 cm. Dodatkowym zagrożeniem było bezpośrednie sąsiedztwo zbiornika wód deszczowych. Badania geotechniczne wykonane na potrzeby projektu budowlanego przeprowadzono w tym rejonie do maksymalnej głębokości 6 m. Stwierdzono występowanie warstwy gruntów organicznych występujących lokalnie do głębokości 4 m. W związku

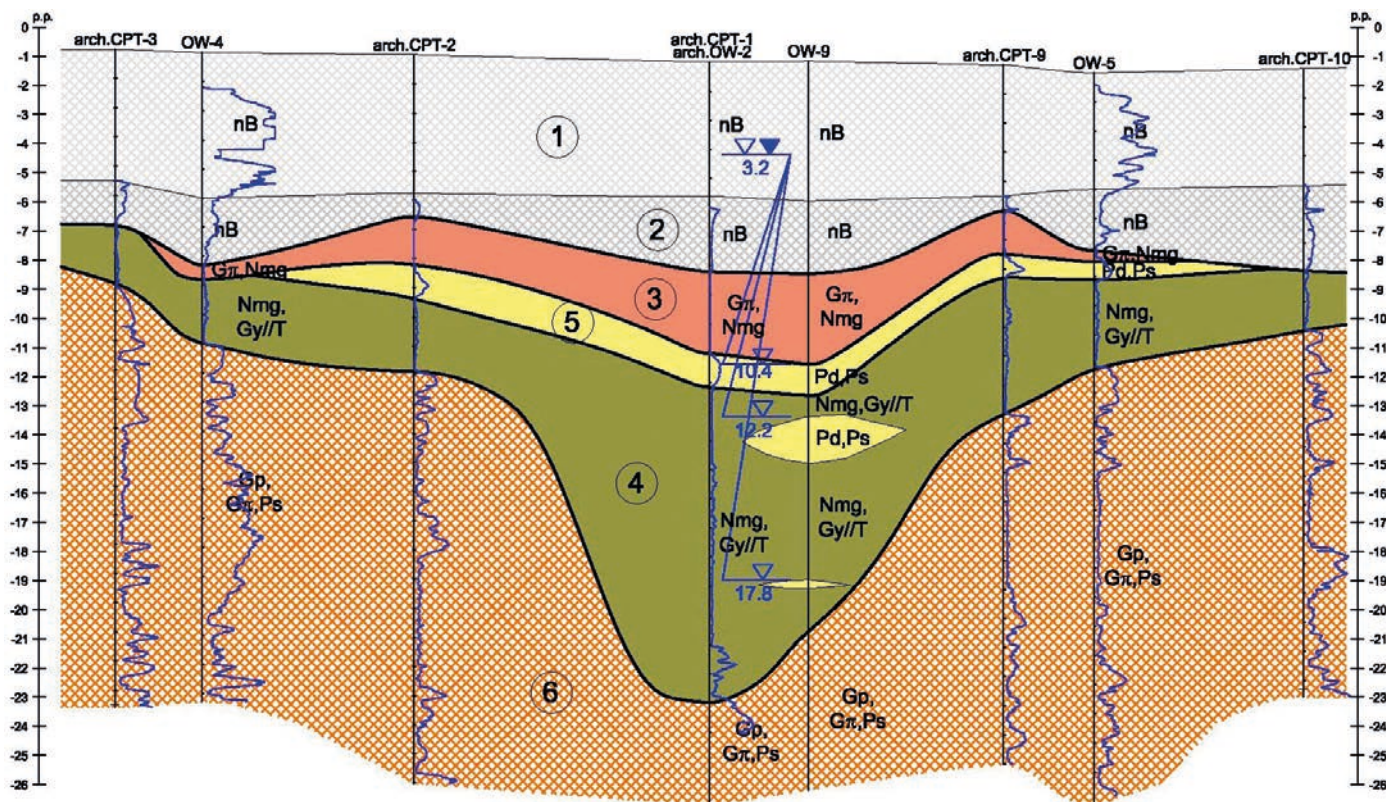
z tym przed wykonaniem nasypu drogowego z podłoża należało usunąć warstwę gruntów organicznych.

Po stwierdzeniu wystąpienia znacznych osiadań nasypu wykonano serię badań geotechnicznych, w tym 22 sondowania statyczne CPTU [4], w celu oceny warunków geotechnicznych do maksymalnej głębokości 25 m. Na podstawie badań opracowano model podłoża gruntowego przedstawiony na rys. 2. Stwierdzono występowanie w środkowej części analizowanego odcinka głębokiego wcięcia erozyjnego w obrębie glin zwałowych wypełnionych skonsolidowanymi osadami organiczno-mineralnymi (warstwa nr 4), dla których pomierzony w trakcie sondowania CPTU opór na stożku q_c wskazywał wartości $1,5 \div 2,5$ MPa. Ponadto wykazano, że tuż pod nasypem znajduje się warstwa gruntów spolistych (warstwa nr 3) o bardzo niskich parametrach - pomierzony opór na stożku q_c wskazywał niskie wartości, tj. $0,4 \div 0,6$ MPa.

Do tak przygotowanego modelu gruntowego wykonano obliczenia osiadań metodą elementów skończonych w płaskim stanie odkształcenia, wykorzystując do obliczeń program Z_Soil firmy Zace. Parametry przyjęte do obliczeń pokazano w tabl. 2.

Obliczenia wykazały, że całkowite osiadania nasypu, z dodatkowym obciążeniem od ruchu drogowego, mogą osiągnąć wartość około 17 cm. Za główną przyczynę nadmiernych osiadań uznano pozostawienie w podłożu gruntów warstwy nr 3, która nie była wymieniona całkowicie przed wykonaniem nasypu.

Ustalenie przyczyn nadmiernych osiadań nie byłoby możliwe bez przeprowadzenia sondowań statycznych CPTU, które pozwoliły w bardzo krótkim czasie (3 dni) na jakościową ocenę warunków geotechnicznych. Z kolei ustalenie wartości parametrów odkształceniowych podłoża i w konsekwencji wykonanie wiarygodnych obliczeń osiadań było możliwe dzięki wykorzy-



Rys. 2. Przekrój geotechniczny wzdłuż analizowanego odcinka nasypu drogowego

Tabl. 2. Wyprowadzone wartości parametrów gruntowych

Wydzielenia geotechniczne			Parametry na podstawie sondowań CPT i badań arch				
Numer warstwy	Rodzaj gruntu	$I_L / (I_D)$ [–]	γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ' [°]	Spójność c' [kPa]	Moduł odkształcenia E [MPa]	Współczynnik Poissona ν [–]
1	nB	(> 0,8)	19,0	35	0	140	0,3
2	nB	(0,3 ÷ 0,4)	17,5	29	0	40	0,3
3	Nm, Nmg	0,5 ÷ 0,6	18,0	0	15	1	0,4
4	Gy, Nm, Nmg, T	0,1 ÷ 0,4	16,0	0	45	10	0,35
5	Pd, Ps	(0,4)	18,0	31	0	40	0,3
6	Pozostałe grunty mineralne		19,0	33	0	60	0,3

staniu regionalnych korelacji pomiędzy oporem na stożku q_c a modułem odkształcenia E .

PODSUMOWANIE

W przedstawionych przypadkach wystąpienia awarii budowlanej należy podkreślić szczególną rolę sondowań statycznych CPTU w szybkiej identyfikacji zagrożeń wynikających z uwarunkowań geotechnicznych. Analiza oporów sondowania pozwala, w sposób jednoznaczny i obiektywny, wyodrębnić z profilu warstwy gruntów charakteryzujących się najniższymi parametrami. Na podstawie wieloletnich doświadczeń autorów niniejszego artykułu w wykonywaniu i interpretacji sondowań CPTU przyjęto następujące (uproszczone) kryteria oceny najsłabszych gruntów (tabl. 3), których występowanie w podłożu wskazuje na potencjalną możliwość wystąpienia awarii budowlanej.

Badanie podłoża metodą statycznego sondowania CPTU, pomimo czterdziestoletniej obecności tej metody w Polsce, pozostaje nadal domeną tylko najlepszych ośrodków badawczych. Szacunkowa liczba firm oferujących takie usługi nie przekracza 50, podczas gdy liczba wszystkich firm oferujących usługi w zakresie geologii i geotechniki najprawdopodobniej już dawno przekroczyła 500. Warto zatem propagować tę metodę, w szczególności wśród inżynierów projektantów, podkreślając jednocześnie konieczność poprawnej oceny i interpretacji wyników badań CPTU.

Tabl. 3. Uproszczone kryteria oceny gruntów na podstawie wyników badań CPTU

Opór na stożku q_c [MPa]	Rodzaj gruntu	Potencjalne zagrożenie
$\leq 0,5$	grunty spoiste	możliwość utraty stateczności/nośności podłoża, wystąpienie znacznych osiadań, utrudnione lub niemożliwe prowadzenie robót ziemnych,
$\leq 0,8$	grunty organiczne	możliwość utraty stateczności/nośności podłoża, wystąpienie znacznych osiadań, utrudnione lub niemożliwe prowadzenie robót ziemnych,
$\leq 2,0$	grunty niespoiste	możliwość utraty stateczności i nośności podłoża (w tym upłynnienie), wystąpienie znacznych osiadań

LITERATURA

1. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. 1997.
2. Runkiewicz L.: Awarie budowlane. Przegląd budowlany, nr 9/2008.
3. Wierzbicki S. M.: Rola eksperta w przypadku wystąpienia awarii budowlanej. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje 24-27 maja 2011.
4. PN-EN ISO 22476-1 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania Polowe. Część 1: Badania sondą statyczną ze stożkiem elektrycznym lub stożkiem piezo-elektrycznym.