



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ  
I ŚRODOWISKA




Imię i nazwisko autora rozprawy: Paweł Więclawski

Dyscyplina naukowa: Budownictwo.

## ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Prognozowanie pracy pali Vibro obciążonych osiowo z wykorzystaniem wyników sondowania CPT.

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Axially loaded Vibro piles performance prediction using result of Cone Penetration Tests.

Promotor  <i>podpis</i>	Drugi promotor  <i>podpis</i>
Prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała	
Promotor pomocniczy  <i>podpis</i>	Kopromotor  <i>podpis</i>

Gdańsk, rok 2015



## **Spis treści**

1. WSTĘP .....	6
1.1. Teza pracy .....	6
1.2. Cel pracy .....	7
2. CHARAKTERYSTYKA PALI VIBRO .....	8
2.1. Rys historyczny .....	8
2.2. Współczesna technologia pali Vibro .....	14
3. SONDA STATYCZNA CPT .....	18
3.1. Opis sondowania statycznego .....	18
3.2. Praktyczne wykorzystanie wyników badania CPT i CPTU .....	20
4. METODY OBLICZANIA NOŚNOŚCI PALA POJEDYNCZEGO .....	27
4.1. Metody normowe .....	27
4.2. Metody bezpośrednio wykorzystujące wyniki badania CPT .....	39
5. PRÓBNE OBCIĄŻENIA STATYCZNE .....	47
5.1. Ogólna charakterystyka próbných obciążeń statycznych .....	47
5.2. Metody interpretacji próbných obciążeń statycznych .....	53
6. METODA PROGNOZOWANIA KRZYWEJ Q-S NA PODSTAWIE CPT .....	60
6.1. Założenia i opis proponowanej metody .....	60
6.2. Parametry krzywej teoretycznej i rzeczywistej - analiza statystyczna .....	69
6.3. Nośność graniczna obliczeniowa - współczynnik częściowy bezpieczeństwa .....	78
6.4. Przykłady obliczeniowe z zastosowaniem metody .....	79
6.5. Nośność graniczna pali Vibro na podstawie wybranych metod stosowanych na świecie - analiza porównawcza .....	101
7. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE OPRACOWANEJ METODY .....	110
7.1. Prognoza krzywych Q-s dla pali Vibro 406/460mm - Gdańsk, 2014 .....	110
7.2. Prognoza krzywych Q-s dla pali Vibro 406/460mm oraz 560/610mm - Gdynia, 2014. ...	114
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	117
LITERATURA .....	120

## **Spis fotografii**

Fot. 2.1. Osada w Biskupinie [60].....	8
Fot. 2.2. Zamek w Malborku [50].....	9
Fot. 2.3. Pierwszy mobilny kafar spalinowy [51].....	11
Fot. 2.4. Głowica wibracyjna i wibrator pierścieniowy [52].....	16
Fot. 3.5. Sonda statyczna CPT [53].....	18
Fot. 3.6. Budowa sondy a) mechanicznej; b) elektrycznej [62].....	19
Fot. 5.7. Próbne obciążenie statyczne – stanowisko kotwione.....	48
Fot. 5.8. Próbne obciążenie statyczne – stanowisko balastowe.....	49
Fot. 5.9. Próbne obciążenie statyczne - stanowisko balastowo-kotwione.....	50
Fot. 5.10. Badanie nośności pali metodą DLT [2].....	52
Fot. 5.11. Badanie nośności pali metodą PSPLT i STATNAMIC [63].....	52



## Spis rysunków i wykresów

Rys. 2.1. Kafar do wbijania pali Leonardo da Vinci [59].	9
Rys. 2.2. Fundament zamku w Malborku [66].	10
Rys. 2.3. Kafar do wbijania pali (Christoffer Polhem) [60].	10
Rys.2.4. Etapy wykonania pali Raymond'a [61].	12
Rys. 2.5. Pale Simplex [62].	13
Rys. 2.6. Technologia pali Vibro.	15
Rys. 2.7. Konstrukcja pala Vibro.	17
Rys. 3.8. Krzywe penetracji badania CPTU.	19
Rys. 3.9. Klasyfikacja gruntów na podstawie sondowania CPT wg Robertsona [53].	22
Rys. 3.10. Klasyfikacja gruntów na podstawie sondowania CPT wg Marra [53].	23
Rys. 3.11. Zależność stopnia plastyczności $I_L$ od oporu $q_c$ na stożku sondy CPT wg Wiłuna [47].	24
Rys. 4.12. Współczynnik kształtu podstawy pala [46].	36
Rys. 4.13. Objasnienia $q_{c,I}$ , $q_{c,II}$ , $q_{c,III}$ . [51].	38
Rys. 4.14. Schematy obliczeniowe metody Gwizdały - Stępcziewskiego [9], [11].	42
Rys. 4.15. Zależność współczynnika nośności $\psi_1$ od $q_c/P_A$ dla pali wbijanych Vibro [9], [11].	42
Rys. 4.16. Współczynnik nośności $\psi_1$ dla pali wbijanych Vibro, znormalizowany opór stożka [9], [11].	43
Rys. 4.17. Zależność współczynnika nośności $\psi_2$ od $q_c/P_A$ dla pali wbijanych Vibro [9], [11].	43
Rys. 4.18. Współczynnik nośności $\psi_2$ dla pali wbijanych Vibro, znormalizowany opór stożka [9], [11].	44
Rys. 4.19. Sposób wyznaczania średniej wartości $q_c$ pod podstawą pala w metodzie LCPC [11], [27].	45
Rys. 5.20. Stanowisko kotwione do próbnego obciążenia statycznego.	48
Rys. 5.21. Stanowisko balastowe do próbnego obciążenia statycznego.	49
Rys. 5.22. Stanowisko mieszane balastowo - kotwione do próbnego obciążenia statycznego.	50
Rys. 5.23. Zasady obciążeń statycznych według ISSMFE 1985 - zalecane przez PN-EN 1997-1:2008 [11].	51
Rys. 5.24. Wykres zależności uzyskiwany na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego według PN-83/B-02482.	54
Rys. 5.25. Definicja obciążenia granicznego w metodzie B-H 90%.	55
Rys. 5.26. Definicja obciążenia granicznego w metodzie B-H 80%.	56
Rys. 5.27. Definicja obciążenia granicznego w metodzie China.	56
Rys. 5.28. Definicja obciążenia krytycznego w metodzie DAVISSONA.	57
Rys. 5.29. Definicja obciążenia krytycznego w metodzie De Beera.	58
Rys. 5.30. Definicja obciążenia krytycznego w metodzie Nordlunda, Fullera i Hoya.	58
Rys. 5.31. Założenia do metody zmodyfikowanej hiperboli A) parametry pomocnicze krzywej, B) krzywa ogólna.	59
Rys. 6.32. Charakterystyki Q-s dla pali Vibro o średnicy a) 508/560mm; b) 457/520mm; c) 406/460mm;	61
Rys. 6.33. Charakterystyka współpracy pala z podłożem gruntowym.	62
Rys. 6.34. Przykładowa linia trendu dla wyników SPLT.	62
Rys. 6.35. Idea opisu matematycznego krzywej Q-s na podstawie krzywej SPLT.	64
Rys. 6.36. Sposób uśredniania oporów $q_c$ wzdłuż pobocznic i w strefie podstawy pala.	65
Rys. 6.37. Zależność podatności gruntu od parametrów sondowania CPT.	66
Rys. 6.38. Zależność osiadań $s'$ od podatności podłoża gruntowego.	67
Rys. 6.39. Liniowa zależność osiadań $s'$ do $s_s''$ .	68
Rys. 6.40. Zależność empiryczna między $\lambda$ - $Q_s$ .	68
Rys. 6.41. Współczynnik korekcyjny $\eta$ .	69
Rys. 6.42. Ocena rozkładu oraz wykres normalności $s_s''$ .	73
Rys. 6.43. Ocena rozkładu oraz wykres normalności $Q_s$ .	74
Rys. 6.44. Ocena rozkładu oraz wykres normalności $s'$ .	74
Rys. 6.45. Ocena rozkładu oraz wykres normalności współczynnika $\eta$ .	75
Rys. 6.46. Ocena rozkładu oraz wykres normalności wykładnika $\lambda$ .	76
Rys. 6.47. Ocena rozkładu oraz wykres normalności dla zależności $s_s''/s'$ .	76
Rys. 6.48. Zestawienie rozkładów normalnych parametrów metody.	77

Rys. 6.49. Wykres średniej, błędu i odchylenia standardowego parametrów metody.....	77
Rys. 6.50. Interpretacja wartości nośności obliczeniowej według EC7 oraz z zastosowaniem $F_s=1,3$ ....	79
Rys. 6.51. Profil geologiczny oraz wynik badania CPT dla pala Vibro o średnicy 508/560mm i długości L=10.6m.....	79
Rys. 6.52. Zależność analityczna Q-s wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT oraz krzywa rzeczywista dla pala Vibro o średnicy 508/560mm i długości L=10.6m.....	80
Rys. 6.53. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 508/560mm i długości L=10.6m.....	81
Rys. 6.54. Profil geologiczny oraz sondowanie CPT dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=18.5m.....	82
Rys. 6.55. Zależność analityczna Q-s wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT oraz krzywa rzeczywista dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=18.5m.....	83
Rys. 6.56. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=18.5m.....	84
Rys. 6.57. Profil geologiczny oraz sondowanie CPT dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=17.5m.....	85
Rys. 6.58. Zależność analityczna wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=17.5m.....	86
Rys. 6.59. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=17.5m.....	87
Rys. 6.60. Profil geologiczny dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.....	88
Rys. 6.61. Zależność analityczna wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.....	90
Rys. 6.62. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.....	91
Rys. 6.63. Profil geologiczny dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.....	91
Rys. 6.64. Zależność analityczna wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.....	93
Rys. 6.65. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.....	94
Rys. 6.66. Zestawienie krzywych rzeczywistych SPLT z krzywymi analitycznymi.....	100
Rys. 6.67. Porównanie wartości nośności granicznych dla różnych metod.....	105
Rys. 6.68. Porównanie wartości obliczeniowych nośności granicznych.....	109
Rys. 7.69. Lokalizacja sondowań statycznych i plan palowania.....	110
Rys. 7.70. Sondowania statyczne i profil geotechniczny.....	111
Rys. 7.71. Zestawienie krzywych rzeczywistych z SPLT z krzywymi prognozowanymi.....	113
Rys. 7.72. Sondowania statyczne i profil geotechniczny.....	114
Rys. 7.73. Zestawienie krzywych rzeczywistych z SPLT z krzywymi prognozowanymi.....	116
Rys. 7.74. Skuteczność prognozowania nośności granicznej na podstawie metody interpretacji według PN-83/B-02482.....	117
Rys. 7.75. Interpretacja graficzna metody ekstrapolacji (prognozowania) krzywej Q-s z wykorzystaniem wyników sondowania CPT.....	118
Rys. 7.76. Dodatkowy zakres bezpieczeństwa dla nośności obliczeniowej według opracowanej metody w stosunku do EC7.....	119

## Spis tablic

Tablica 2.1. Podział pali ze względu na technologię wykonania.....	14
Tablica 2.2. Parametry młotów hydraulicznych [57]:.....	15
Tablica 2.3. Parametry wibratorów [57]:.....	16
Tablica 3.4. Zależność $I_D$ do $q_c$ według PN-EN:1997-2:2007 [51].	23
Tablica 3.5. Zależność $I_D$ do $q_c$ według Tarnawskiego [35].	24
Tablica 4.6. Współczynniki korelacyjne $\xi$ do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie próbnych obciążeń pali ( $n$ – liczba badanych pali) wg EC 7 [50].	30
Tablica 4.7. Współczynniki korelacyjne $\xi$ do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie próbnych obciążeń pali zaproponowane przez B.Simpsona (według doświadczeń angielskich) [32].	30
Tablica 4.8. Współczynniki częściowe do nośności ( $\gamma_R$ ) dla pali wbijanych [50]:	31
Tablica 4.9. Współczynniki częściowe do oddziaływań lub do efektów oddziaływań [50]:	31
Tablica 4.10. Współczynniki częściowe do parametrów geotechnicznych ( $\gamma_M$ ) [50]:	31
Tablica 4.11. Współczynniki korelacyjne $\xi$ do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie wyników badań podłoża ( $n$ - liczba badanych profili) wg EC 7 [50].	32
Tablica 4.12. Współczynniki korelacyjne $\xi$ do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie wyników badań podłoża zaproponowane przez B. Simpsona (według doświadczeń angielskich) [32].	33
Tablica 4.13. Współczynniki korelacyjne $\xi$ do wyznaczania wartości charakterystycznych na podstawie wyników dynamicznych badań udarowych a,b,c,d,e( $n$ – liczba badanych pali) wg EC 7 [50]:	34
Tablica 4.14. Współczynniki korelacyjne $\xi$ do wyznaczania wartości charakterystycznych na podstawie wyników dynamicznych badań udarowych ( $n$ – liczba badanych pali) B. Simpsona (według doświadczeń angielskich) [32].	34
Tablica 4.15. Jednostkowy opór podstawy pali wierconych $p_b$ (DIN 1054) [51].	35
Tablica 4.16. Jednostkowy opór tarcia poboczniczy pali wierconych $p_s$ (DIN 1054) [51].	35
Tablica 4.17. Wartości $\alpha_p$ i $\alpha_s$ dla piasków i pospółtek [51].	38
Tablica 4.18. Wartości $\alpha_s$ dla iłów, pyłów i torfów [51].	39
Tablica 4.19. Klasyfikacja metod określania nośności pali na podstawie badań in-situ [10], [44].	40
Tablica 4.20. Wartość współczynników $\alpha$ oraz $k_c$ (1982) [27].	45
Tablica 4.21. Zależność współczynnika $\alpha$ i oporu na stożku, materiału pala, stanu gruntu [27].	45
Tab. 5.22. Metody dynamiczne badania pali [7].	51
Tablica 5.23. Sposób określania liczby pali do próbnego obciążenia statycznego [52].	53
Tablica 6.24. Lokalizacja i zestawienie obiektów posadowionych na palach Vibro, liczba próbnych obciążeń statycznych oraz badania podłoża gruntowego.	61
Tablica 6.25. Przykładowe równania analitycznej krzywej Q-s.	63
Tablica 6.26. Parametry opisujące krzywą Q-s z badania SPLT.	70
Tablica 6.27. Parametry opisujące krzywą teoretyczną.	71
Tablica 6.28. Współczynniki zgodność parametrów opisujące krzywą Q-s teoretyczną i rzeczywistą.	72
Tablica 6.29. Wyniki analizy statystycznej parametrów krzywej Q-s.	77
Tablica 6.30. Wartości nośności teoretycznych dla różnych metod obliczeniowych (opis rozdział 3).	101
Tablica 6.31. Wartości obliczeniowych nośności granicznych według PN-EN 1997-1:2004 oraz dla $F_s=1.3$	105

## 1. WSTĘP

Fundamenty palowe znane są już od wieków. Stosuje się ten rodzaj posadowienia we wszystkich gałęziach budownictwa: budownictwie mieszkaniowym, budownictwie przemysłowym, budownictwie mostowym, drogownictwie, budownictwie energetycznym i wielu innych.

Powszechność zastosowania pali uwarunkowana jest koniecznością:

- posadowienia obiektów w skomplikowanych warunkach gruntowych,
- przenoszenia na głębsze warstwy podłoża znacznych obciążeń,
- ograniczenia osiadań obiektów.

Wyszczególniając, fundamenty palowe stosowane są:

- gdy wierzchnie warstwy podłoża stanowią grunty słabonośne o skłonności do znacznej odkształcalności,
- gdy konieczne jest przeniesienie na głęboko zalegające gruntu nośne, znacznych obciążeń działających na konstrukcję,
- ze względu na wymogi stanu granicznego użytkowalności, gdy konieczne jest ograniczenie osiadań lub zapewnienie równomiernego osiadania obiektu,
- jako obudowy głębokich wykopów,
- jako stabilizacja skarp i zboczy,
- do posadowienia obiektów wodnych i morskich;
- do wzmocnienia istniejących fundamentów, które uległy uszkodzeniom bądź w celu przeniesienia nowych, zwiększonych obciążeń.

Wymagania dotyczące fundamentów palowych są dość rygorystyczne. Obecnie wykonawca pali zobowiązany jest do wykonania prac palowych w szybkim tempie, dodatkowo wymaga się, aby w przeciągu nawet kilku tygodni, fundament palowy osiągnął wymaganą nośność, co pozwoli na dalszą realizację budowy. Czynniki te wymuszają przeprowadzenie szczegółowego rozpoznania podłoża gruntowego, przyjęcia odpowiedniej technologii wykonania fundamentu i zastosowania odpowiedniej klasy betonów. Poza tym należy spełnić liczne wymogi budownictwa ekologicznego, bezpieczeństwa i ekonomii. Właśnie do tych czynników przykłada się ogromny nacisk w nowoczesnym, europejskim projektowaniu i wykonawstwie.

### 1.1. Teza pracy

Chcąc uzyskać jak najlepsze rezultaty końcowe procesu projektowania fundamentów palowych, konieczne jest prawidłowe i pełne wykorzystanie wyników badań podłoża gruntowego. W literaturze, w tym w normach krajowych i europejskich, znajdują się propozycje metod pośrednich, w których wykorzystuje się parametry wytrzymałościowe gruntu, oraz bezpośrednich, których ideą jest nieskomplikowane oszacowanie nośności pali na podstawie badań in-situ.

Założono, iż możliwe jest wykorzystanie informacji o oporze stożka  $q_c$  z badania CPT do prognozowania pełnej charakterystyki obciążenie - osiadanie (Q-s) pali Vibro.

## **1.2. Cel pracy**

Celem pracy jest wdrożenie metody oceny nośności pali Vibro posadowionych w gruntach uwarstwionych, bezpośrednio na podstawie wyników z badań CPT.

Takie rozwiązanie pozwoli określić zależność funkcyjną wartości osiadania pala od przyłożonego obciążenia. Dysponując charakterystyką Q-s dla pali na etapie obliczania nośności posadowienia, możliwe będzie optymalne projektowanie również z uwzględnieniem kryteriów osiadania .

## 2. CHARAKTERYSTYKA PALI VIBRO

### 2.1. Rys historyczny

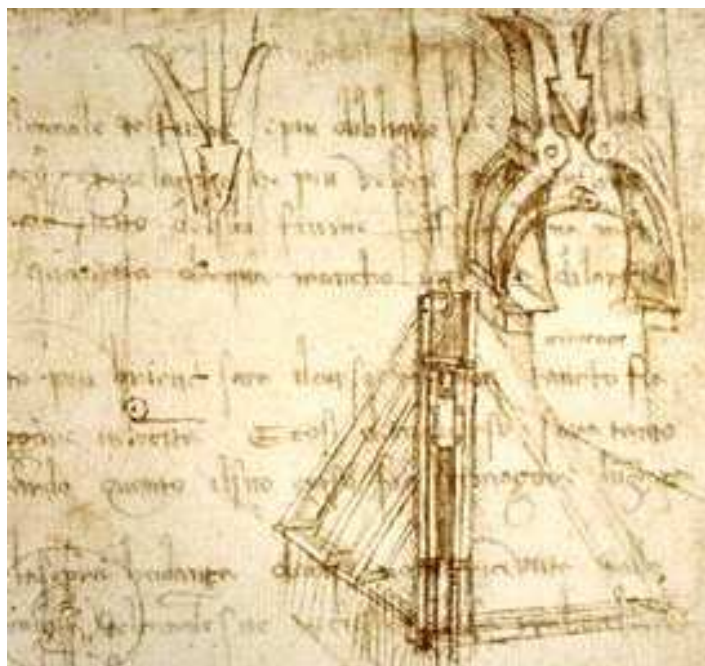
Pierwsze budowle na palach istniały już w czasach prehistorycznych, nawet 6000 lat p.n.e. (Troskoleński, 1973). Wzmianki o zastosowaniu cedrowych pali w Babilonie można odnaleźć między innymi w Biblii. Przez ostatnie dwa stulecia w Europie (od 1854r.), również w Polsce (1933r.) dokonano wielu odkryć tzw. palafitów – osad budowanych na jeziorach i terenach bagnistych, wznoszonych na platformach z pali i rusztów drewnianych – głównie dębowych i sosnowych. Przepuszczalnie czas powstania najstarszej osady w Polsce, Biskupina to druga połowa VIII w. p.n.e., a szacowana liczba pali to kilkaset tysięcy (falochron – 30000 pali wbitych pod kątem 45°).



Fot. 2.1. Osada w Biskupinie [65].

W starożytnym Rzymie, wykorzystywano pale fundamentowe w budownictwie mieszkaniowym, ale przede wszystkim w infrastrukturze komunikacyjnej. Rzymskie drogi w przypadku, gdy przebiegały przez tereny podmokłe, wykonywano je na stelażach posadowionych na drewnianych palach wbijanych. Jeden z pierwszych rzymskich mostów, Pons Sublicius zbudowany na rzece Tybrze pochodził z VI w. p.n.e., został posadowiony na palach.

Powszechnie stosowano fundamenty palowe w budownictwie średniowiecznym i renesansowym. Pale wykorzystano na wielką skalę rozbudowując infrastrukturę Wenecji położonej na 118 wyspach przecinanych licznymi kanałami. Na dębowych palach posadowiono niezliczoną ilość obiektów, zaczynając od budynków mieszkańskich poprzez mosty, bulwary, na pałacach i katedrach kończąc. Udział w budowie Wenecji miał m. in. Leonardo da Vinci, który skonstruował w tym czasie kafar do wbijania pali.



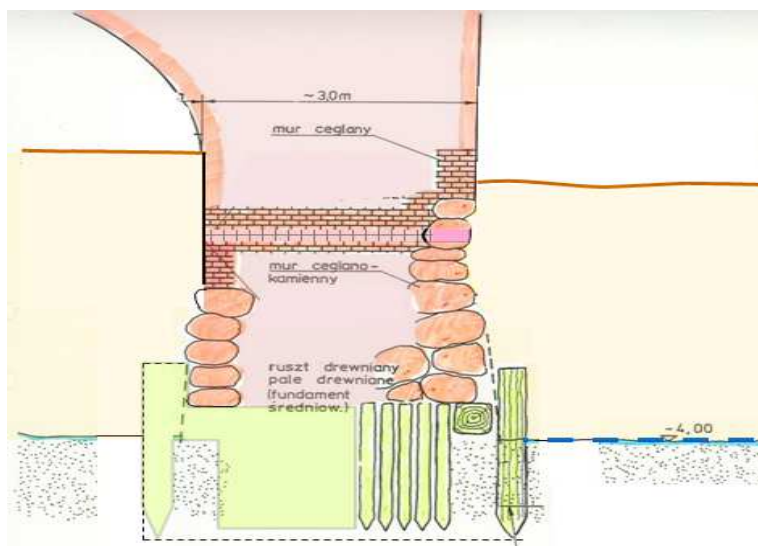
Rys. 2.1. Kafar do wbijania pali Leonardo da Vinci [59].

Inwentaryzacje inżynierskie obiektów z tej epoki dowodzą, że wiele zamków w Polsce posadowionych zostało na palach. Wynikało to z ich położeniach nad brzegami i w deltach rzek. Przykładem może być największy zamek krzyżacki w Polsce, w Malborku.



Fot. 2.2. Zamek w Malborku [55].

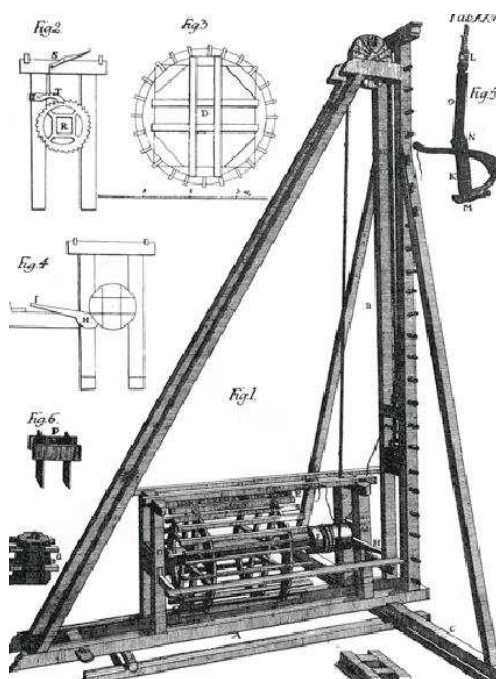




Rys. 2.2. Fundament zamku w Malborku [66].

Ściany zewnętrzne zamku posadowione zostały na dębowych palach wbijanych, na których mocowano drewniany ruszt i kamienną ławę stanowiącą podstawę dla ceglano-mur. Podobny schemat zastosowano przy budowie m.in. Dworu Artusa (1350r.) i obiektów położonych nad brzegiem rzeki Motławy w Gdańsku.

Za początek przełomu w fundamentowaniu głębokim można uznać rok 1740. To w tym roku Christoffer Polhem (1661-1751), inżynier, wynalazca i członek Królewskiej Szwedzkiej Akademii Nauk zaprojektował i skonstruował mechaniczny kafar do wbijania pali.



Rys. 2.3. Kafar do wbijania pali (Christoffer Polhem) [60].

Początkowo przeznaczony do pali drewnianych, mechanizm Polhema został zaadaptowany do pali żelaznych, później stalowych, które od 1800 roku zaczęły dominować nad tradycyjnymi palami drewnianymi. Rozwój dużych miast przyczynił się do rozwoju przemysłu mechanicznego i budowlanego. W 1845 roku zbudowano pierwszy mobilny kafar spalinowy pozwalający na efektywne palowanie na lądzie i na wodzie.





Fot. 2.3. Pierwszy mobilny kafar spalinowy [56].

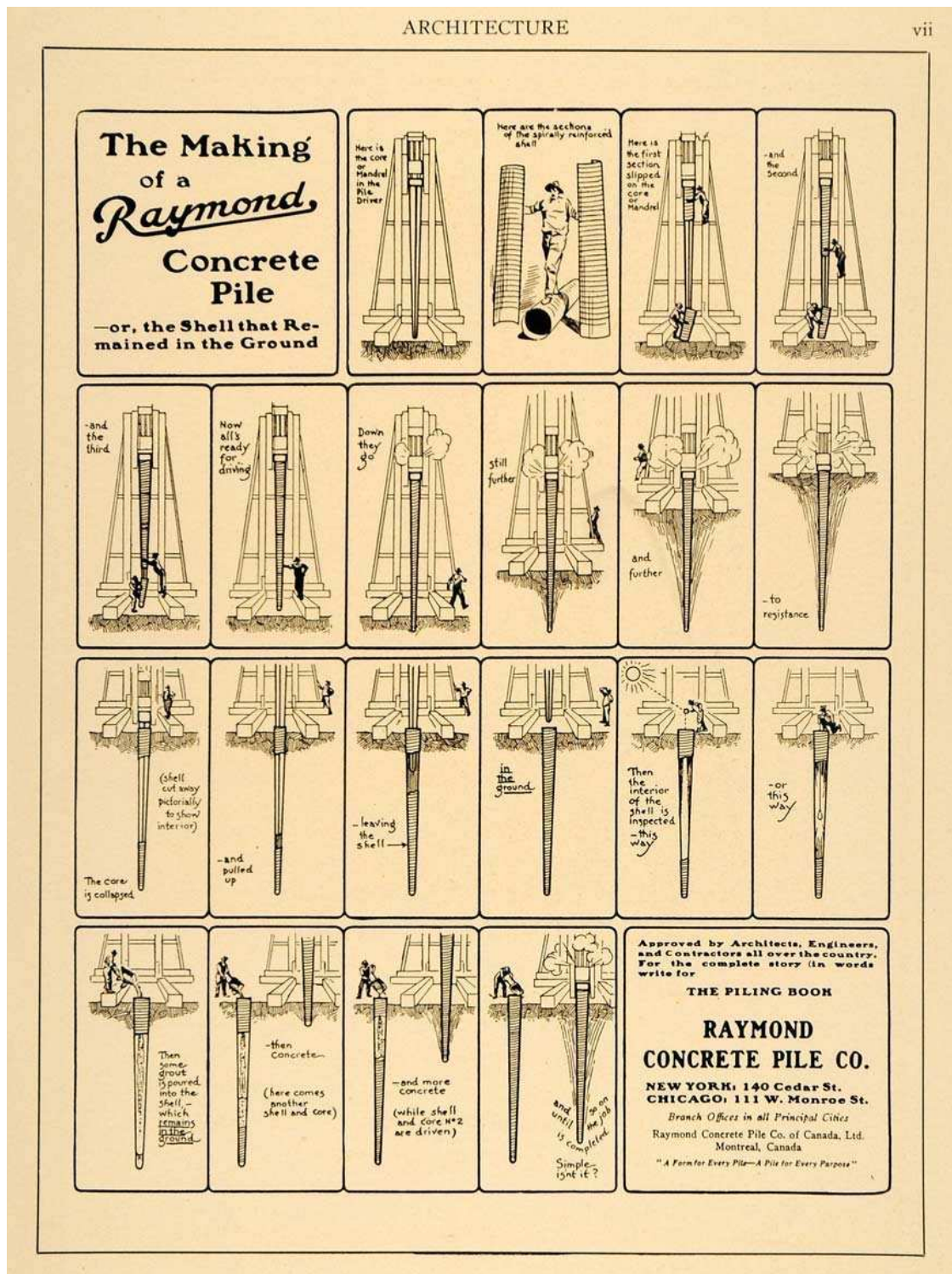
W tym samym czasie bardzo popularny w budownictwie stawał się beton z cementu portlandzkiego (1824 r.). Jako spoiwo hydrauliczne charakteryzował się dużą wytrzymałością na ściskanie, jednak nie przenosił sił rozciągających i był podatny na niszczenie pod wpływem niskich temperatur. W 1867 pojawił się nowy produkt oparty na betonie – żelbet (żelbeton), czyli beton zbrojony. Nowy materiał okazał się przełomowy i około 1900 roku ruszyła produkcja pali żelbetowych. W ciągu kilku lat na rynku budowlanym pojawiły się firmy zajmujące się wyłącznie wykonywaniem żelbetowych pali fundamentowych, proponując własne rozwiązania technologiczne.

W roku 1901, w Stanach Zjednoczonych, A.A. Raymond zaproponował nową technologię wykonawstwa pali o lepszej nośności, trwalszych i tańszych od pali drewnianych.

Etapy wykonania pali Raymonda:

- przygotowanie rdzenia zbudowanego z trzech niezależnych, pionowych segmentów, w postaci cylindrycznych klinów (segmenty po złożeniu tworzyły rurę o liniowo zmiennej średnicy),
- mocowanie wokół rdzenia traconej osłony z cienkiej blachy falistej bądź spiralnej, zakładanej na rdzeń odcinkami,
- wbijanie rdzenia z osłoną z blachy do projektowanej rzędnej,
- rozpychanie segmentów rdzenia „do gruntu” za pomocą rury klinowej,
- wyciąganie rury klinowej i wycofanie segmentów do wnętrza otworu,
- wyciąganie rdzenia,
- kontrola geometrii otworu zabezpieczonego blachą,
- betonowanie pala (beton zagęszczał się grawitacyjnie).

Pale osiągały długości do 22.0m, średnica podstawy 0.25m a średnica głowicy 0.5m. Pal charakteryzował się regularną geometrią dzięki osłonie i bardzo dobrą nośnością poboczniczy.



Rys.2.4. Etapy wykonania pali Raymond'a [61].

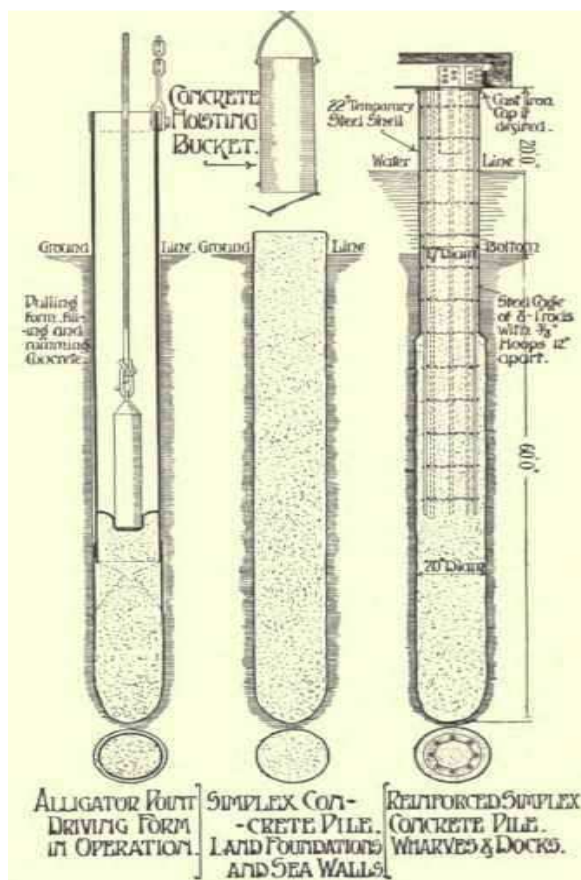
Drugą technologią, konkurencyjną w stosunku do pali Raymonda i bardziej zaawansowaną, była technologia Simplex, opracowana w 1905 roku w Wielkiej Brytanii.

Etapy wykonania pali Simplex:

- o wbijanie za pomocą kafara rury żeliwnej, do projektowanej rzędnej (rura zakończona była tzw. punktem aligatora, przez pojęcie to należy rozumieć zwężenie wykonane z żeliwa, które częściowo zamykało dno rury, uniemożliwiając dostawanie się do jej wnętrza gruntu, a które pozwalało na wprowadzenie betonu poniżej tego punktu),

- o wypełnienie rury betonem około 1.0m powyżej dna, za pomocą wiadra z otwieranym dnem,
- o podniesienie rury na około 0.6m,
- o zagęszczenie betonu ubijakiem 250-300kg, do momentu wypełnienia przestrzeni między dnem otworu i końcem rury,
- o powtarzanie czynności wypełniania rury warstwą betonu i ubijania do momentu uformowania całej długości pala,
- o wprowadzenie zbrojenia do głębokości zalegania gruntu słabonośnego.

Pale Simplex projektowano i wykonywano o długość do 20.0m i o stałej średnicy 0.5 m. Charakterystyczne dla tej technologii było zagęszczenie betonu, które uzyskiwano przez ciężki ubijak i stopniowe podnoszenie rury osłonowej ku górze. Dzięki takiemu procesowi uzyskiwano bardzo dobrą współpracę pal-grunt na całej długości pobocznic. Specyficzny „punkt aligatora” został z czasem zastąpiony traconym butem żeliwnym, co okazało się lepszym rozwiązaniem.



Rys. 2.5. Pale Simplex [62].

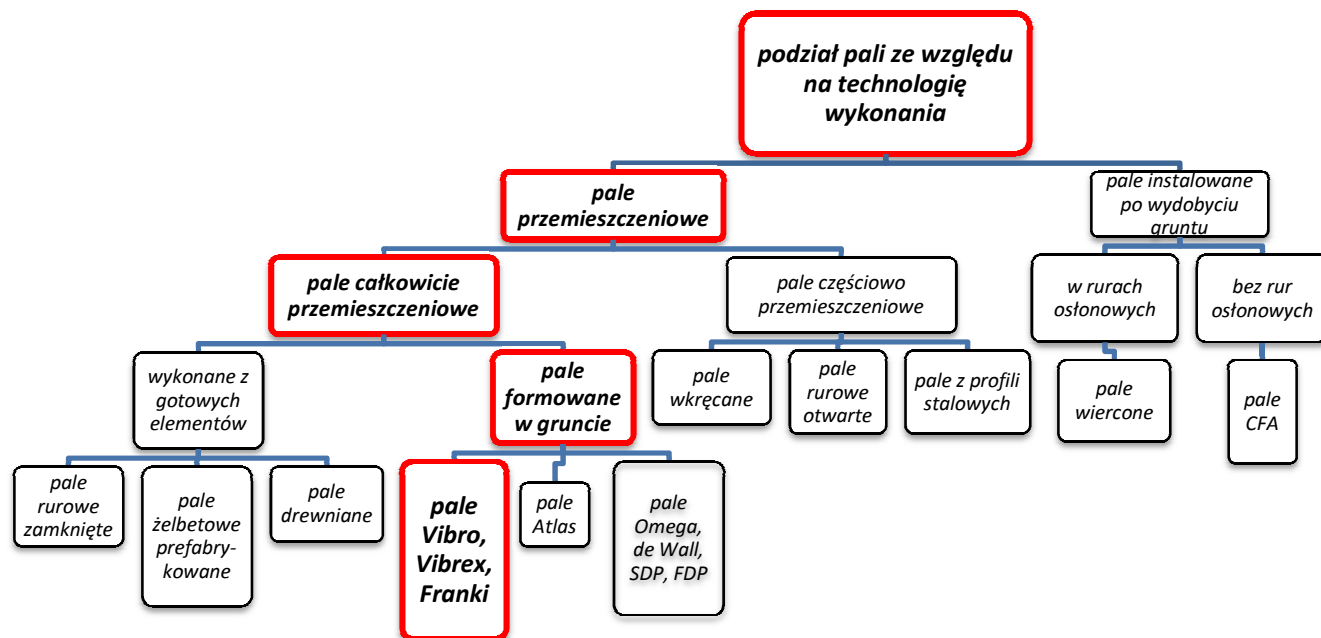
System Simplex jest stosowany do dzisiaj. W nowoczesnej technologii wykonuje się pale o średnicach 0.37, 0.42, 0.51, 0.56 i 0.60 m i długościach odpowiednio od 20.0 do 30.0m. Uzyskuje się pale o nośności pionowej na wciskanie do 4000kN i 1000kN nośności na wyciąganie.

Opisane powyżej technologie pali miały ogromny wpływ na to jak wykonywane są pale obecnie, na początku XXI wieku. Trudno nie zauważyć, że wiele elementów zostało odwzorowanych i zastosowanych we współczesnych technologiach, np. pali Vibro.

## 2.2. Współczesna technologia pali Vibro

Pale Vibro w obecnej formie wykonywano już w latach '60 XX wieku. Obok pali Vibrex, pali Franki, należą do grupy pali w pełni przemieszczeniowych formowanych w gruncie.

Tablica 2.1. Podział pali ze względu na technologię wykonania

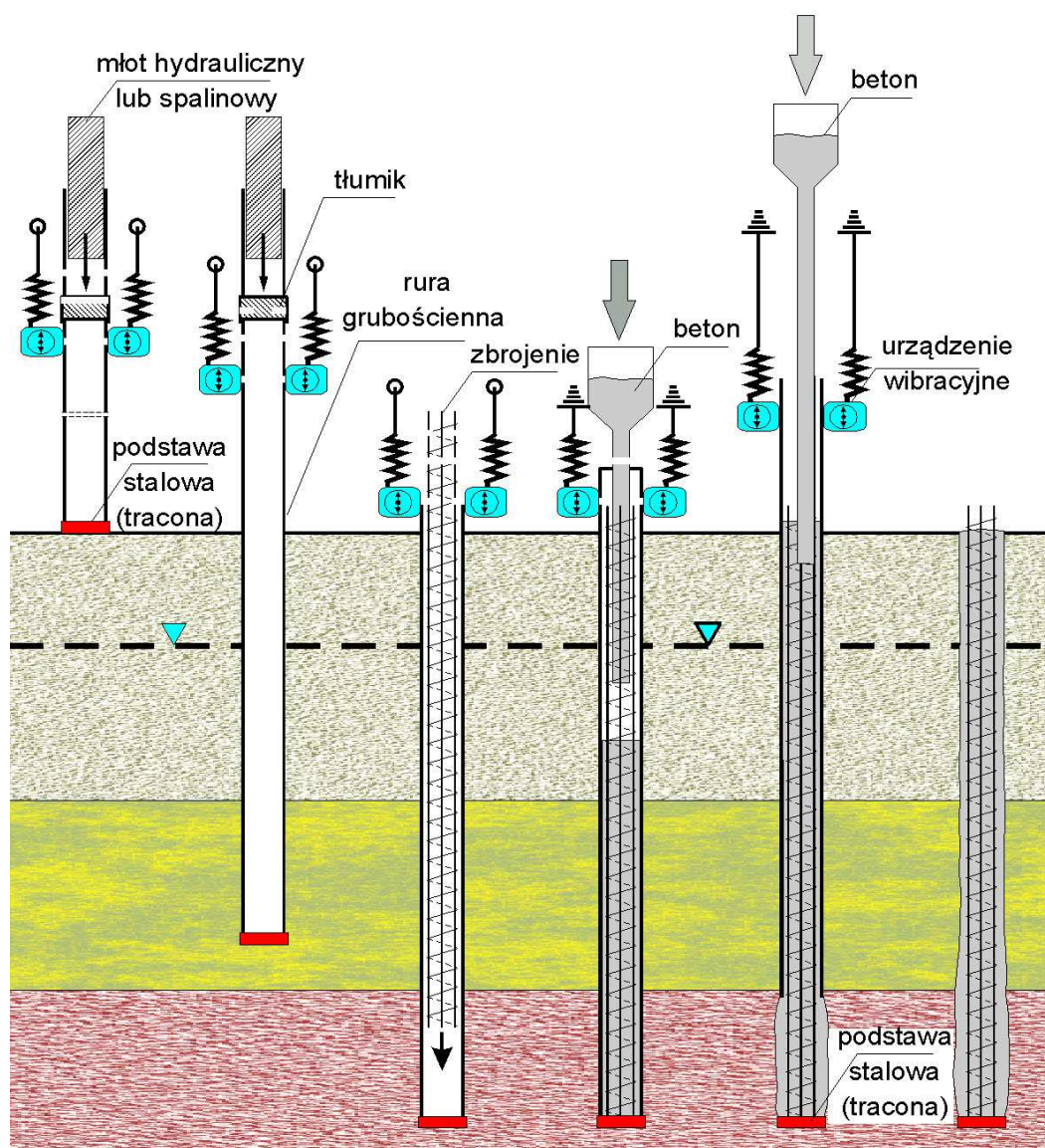


Wykonawstwo polega na wbiciu stalowej rury z uszczelnioną podstawą za pomocą młota spalinowego lub hydraulicznego. Następnie do suchego wnętrza rury wprowadza się zbrojenie i wypełnienia rurę betonem. Wyciągnięcie rury wibratorem powoduje zagęszczenie betonu oraz dobre zespolenie trzonu pala z podłożem.

Technologia pali Vibro obejmuje następujące etapy wykonawstwa:

- wbijanie rury stalowej ze stalowym uszczelnionym butem w podstawie,
- wprowadzenie szkieletu zbrojenia pala do suchego wnętrza rury stalowej,
- wypełnienie wnętrza rury betonem,
- wyciąganie rury za pomocą wibratora, co powoduje zagęszczenie betonu i częściowe dogęszczenie gruntu wokół pala.





Rys. 2.6. Technologia pali Vibro

Zastosowanie młotów hydraulicznych znacznie zredukowało drgania przekazywane poprzez podłoże na sąsiednie konstrukcje. Typowe parametry młotów przedstawiono w tabelicy 2.2.

Tabela 2.2. Parametry młotów hydraulicznych [57]:

<b>Maksymalna energia potencjalna</b>	kJ	36	60	120	160	240	450	600
<b>Maksymalny skok</b>	m	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.500	1.500
<b>Minimalny skok</b>	mm	200	200	200	200	200	200	200
<b>Liczba uderzeń przy maks. skoku</b>	uderzeń/min	40	40	40	40	32	26	22
<b>Masa bijaka</b>	t	3	5	10	13	20	30	40
<b>Masa młota wyłączając prowadnice</b>	t	5,6	9,3	15,3	20	36,5	64	72
<b>Maksymalne ciśnienie</b>	MPa	20	28	28	28	28	28	28
<b>Wymagany przepływ</b>	l/min	160	190	280	320	440	700	800
<b>Długość</b>	mm	5280	5620	6600	6320	8750	11000	11000
<b>Szerokość</b>	mm	850	970	1170	1250	2000	2300	2300
<b>Wysokość</b>	mm	880	1060	1350	1590	2280	2500	2500

Do wyciągania rury osłonowej stosuje się głowice wibracyjne bądź wibratory pierścieniowe. Przykładowe parametry wibratorów przedstawiono w tabelicy 2.3.



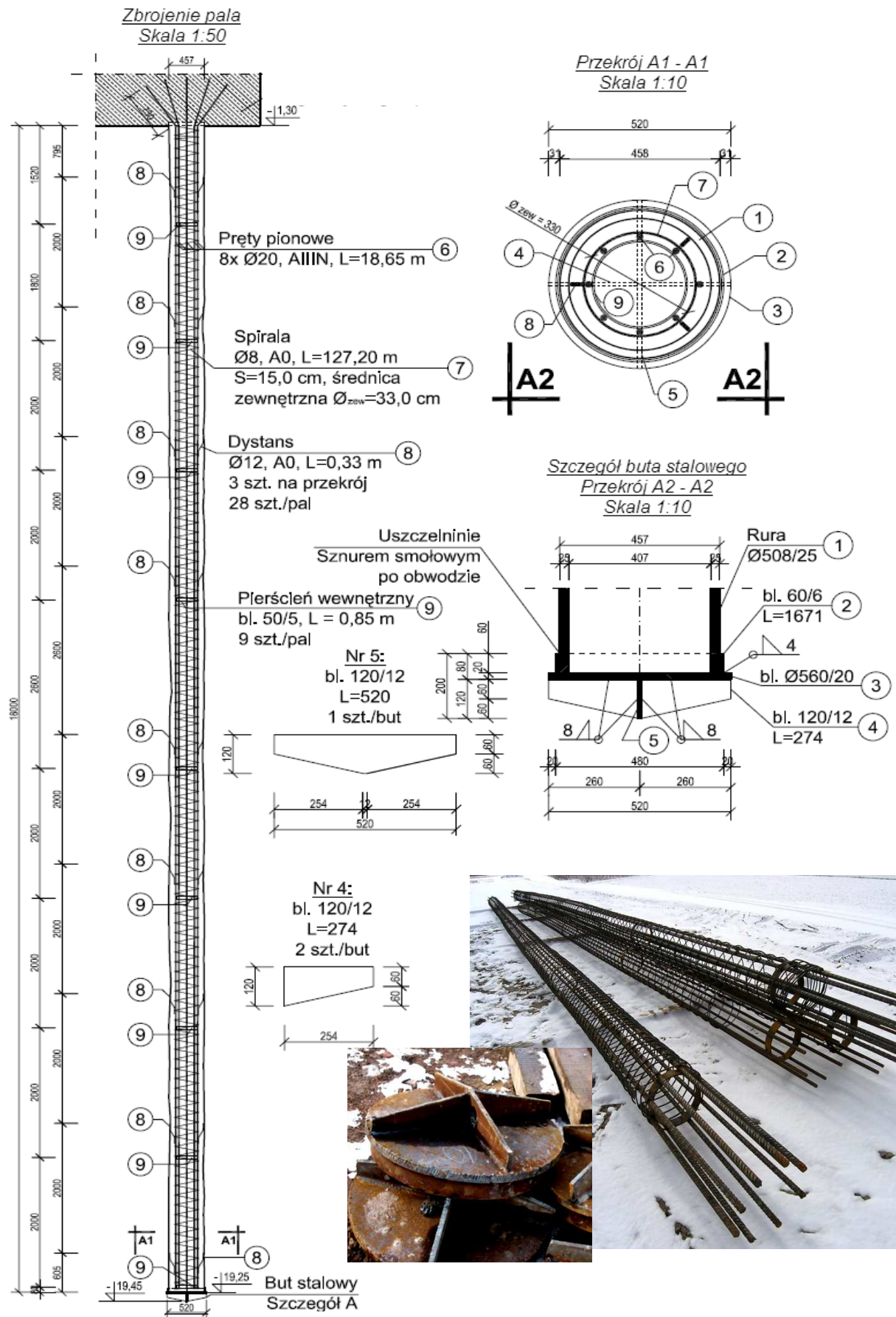
Fot. 2.4. Głowica wibracyjna i wibrator pierścieniowy [57].

Tablica 2.3. Parametry wibratorów [57]:

<b>Moment bezwładności</b>	<b>Częstotliwość</b>	<b>Siła odśrodkowa</b>	<b>Masa</b>
kgm	obr/min	kN	kg
<b>WIBRATORY O WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI ZE ZMIENNYM MOMENTEM OBROTOWYM</b>			
0-70	0-2000	2 960	10 200
0-50	0-2300	2 900	10 000
0-35	0-2300	2 000	6 400
0-40	0-2000	1 750	6 200
0-24	0-2300	1 400	5 800
0-16	0-2300	928	3 000
0-10	0-2300	580	1 900
<b>WIBRATORY O STANDARDOWEJ CZĘSTOTLIWOŚCI</b>			
200	1400	4400	29000
110	1350	2250	12000/13500
80	1700	2570	7900
55	1700	1711	5700
40	1700	1200	5400
30	1700	870	4980

Najczęściej stosowane średnice pali Vibro, w zależności od zewnętrznej średnicy rury osłonowej i buta stalowego, to: 406/460mm, 457/510mm, 508/560mm, 560/610mm, 610/660mm (średnica zewnętrzna rury/średnica buta stalowego). Obecnie wykonuje się pale o długości do 40.0m. Pale Vibro charakteryzują się bardzo dobrą nośnością uzyskiwaną w krótkim czasie od wykonania. Badane pale osiągają nośność rzędu 4000kN przy niewielkich osiadaniach wynoszących około 5.0mm. Dodatkową zaletą technologii jest krótki czas wykonania w różnych warunkach gruntowych, a betonowanie w rurze osłonowej zapewnia ciągłość pala.

Ekonomiczne i ekologiczne aspekty wykonania pali Vibro sprawiają, że jest to technologią bardzo często wybierana do posadowienia wiaduktów drogowych i estakad, szczególnie w nawodnionych gruntach niespoistych.



Rys. 2.7. Konstrukcja pala Vibro.



### 3. SONDA STATYCZNA CPT

#### 3.1. Opis sondowania statycznego

Sondowanie statyczne jest obecnie powszechnie stosowanym badaniem geotechnicznym podłoża gruntowego in-situ. Sonda statyczna została po raz pierwszy użyta w Holandii w 1932 roku, zbudowana była ze stożka umieszczonego na pionowej żerdzi, podłączonego do czujnika zegarowego wskazującego wartość przyłożonego nacisku. Wciskanie stożka odbywało się manualnie z wykorzystaniem siły ludzkich mięśni, uzyskiwano wówczas wartość obciążenia do około 20kN. Sondowanie wykonywano do kilku metrów głębokości i wyłącznie w gruntach słabonośnych, głównie w gruntach organicznych. Wraz z rozwojem mechaniki, hydrauliki i elektroniki pojawiły się urządzenia generujące siłę nacisku rzędu 200kN, sondy zostały wyposażone w system kotwienia, system automatycznego odczytu mierzonych parametrów i wiele innych dodatkowych funkcji.



Fot. 3.5. Sonda statyczna [58].

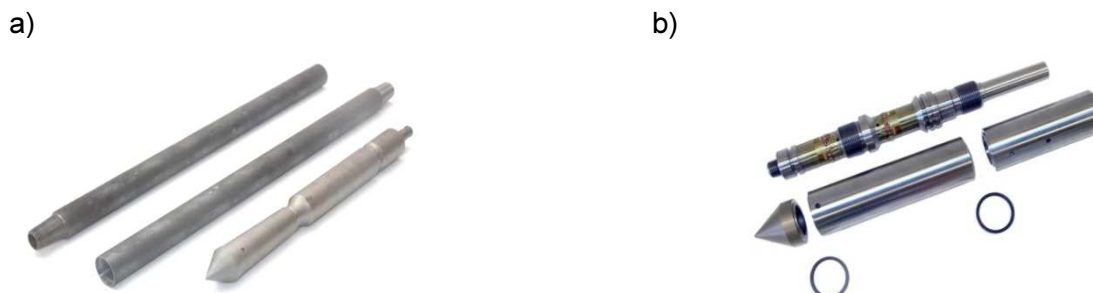
Sondowanie polega na pionowym wciskaniu w grunt stożka zamocowanego na żerdzi stalowej ze stałą prędkością 2 cm/s, siła wciskania jest zależna od rodzaju gruntu.

W zależności od stosowanego stożka możliwe jest przeprowadzenie za pomocą sondy następujących badań:

- CPT, CPTU (cone penetration test),
- SCPTU (seismic cone penetration test),
- CCPTU lub RCPTU (conductivity lub resistivity cone penetration test)
- DCPT (dilatocone penetration test).



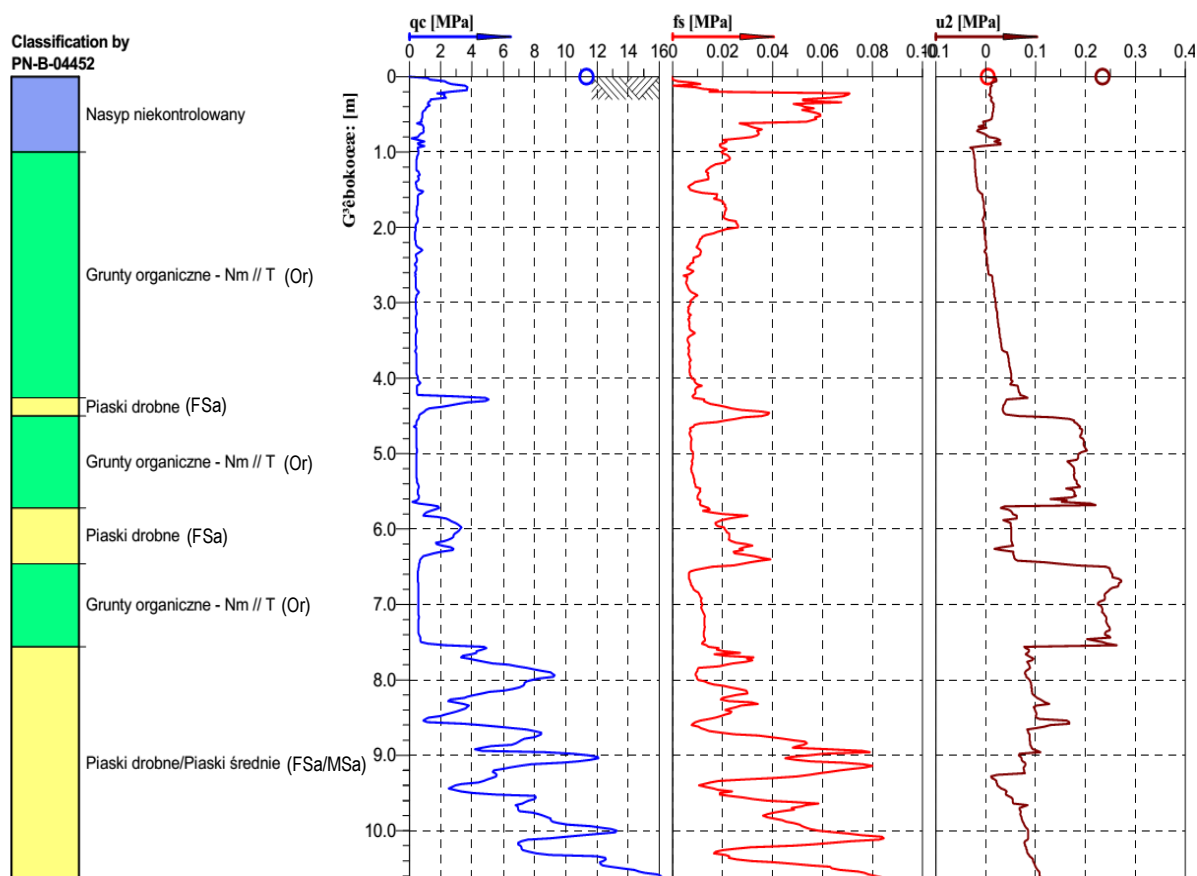
Podstawowymi parametrami uzyskiwanymi w badaniu CPT, z wykorzystaniem stożka mechanicznego Begemanna są : opór na stożku -  $q_c$  [MPa] i tarcie na tulei ciernej -  $f_s$  [MPa]. Zastosowanie piezostożka elektrycznego daje możliwość pomiaru, poza  $q_c$  i  $f_s$ , nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu  $u_c$  [MPa], wyrażonej jako  $u_1$ ,  $u_2$  lub  $u_3$  w zależności czy filtr porowy znajduje się w podstawie stożka czy nad tuleją cierną (badanie CPTU).



Fot. 3.6. Budowa stożka a) mechanicznego (CPT); b) elektrycznego (CPTU) [67].

Obydwie techniki mogą być stosowane zamiennie z zastosowaniem odpowiedniego skalowania. Zaleca się, aby badanie CPT z użyciem stożka mechanicznego wykonywać dla gruntów gruboziarnistych (żwir, pospółki) i skonsolidowanych, natomiast CPTU w gruntach słabonośnych.

Zaletą CPT jest uzyskanie dokładnego, ciągłego rozkładu mierzonych parametrów dla całej głębokości sondowania. Wartości  $q_c$  i  $f_s$  z badania są rzeczywistymi wartościami oporów działających na stożek i tuleję cierną sondy. Sondowanie statyczne jest badaniem standardowym, obok wierceń geotechnicznych i geologicznych, rozpoznania podłoża na etapie przygotowania projektów posadowienia na całym świecie.



Rys. 3.8. Krzywe penetracji badania CPTU.

Badanie SCPTU przeprowadza się w celu określenia prędkości rozchodzenia się w gruncie fali ścinającej ( $V_s$ ) oraz fali kompresyjnej ( $V_p$ ). Pomiar możliwy jest dzięki modułowi sejsmicznemu zainstalowanemu na piezostożku elektrycznym CPTU. W zależności od lokalizacji źródła sygnału wykonuje się badania metodą downhole, gdy źródło znajduje się na powierzchni terenu, oraz metodą cross-hole, gdy nadajnik jest na stożku równoległe wykonywanego sondowania statycznego. Prędkość fal oblicza się z ilorazu różnicy głębokości i przyrostu czasowego, parametry uzyskuje się między kolejnymi położeniami stożka.

Badanie CCPTU lub RCPTU wykonuje się, gdy konieczne jest określenie przewodności elektrycznej nawodnionego, skażonego związkami chemicznymi ośrodka gruntowego. Pomiar zapewnia specjalny moduł instalowany na standardowym stożku do badania CPTU.

DCPT jest to test, na podstawie, którego określa się wstępnie moduł odkształcenia podłoża. Sonda statyczna wyposażona jest w stożek dylatometryczny, zbudowany na bazie podstawowego stożka CPT, firmy A.P. van den Berg. Elementem dodatkowym w konstrukcji przyrządu jest stożkowa tuleja cierna nad podstawową tuleją cierną, nachylona do osi pionowej stożka pod kątem  $2^\circ$ . W odróżnieniu od badań presjometrycznych i dylatometrycznych zastosowanie stożka dylatometrycznego w sondowaniu statycznym daje ciągły obraz zmian odkształceń podłoża z głębokością.

### 3.2. Praktyczne wykorzystanie wyników badania CPT i CPTU

Zakres stosowania wyników z badania CPT do celów projektowych przedstawiono w normie PN-EN:1997-2:2008, *Projektowanie geotechniczne. Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego* [51]. Brakuje w niej jednak precyzyjnego określenia procedury standaryzacji i normalizacji parametrów uzyskanych z badania. Propozycje zawarte w EC7 mogą posłużyć jako narzędzie do wstępnego szacowania, do celów inżynierskich.

Wielkościami mierzonymi w badaniu CPT i CPTU są [25][31][42]:

- opór stożka  $q_c$  - będący ilorazem siły wciskającej żerdzie i stożek ( $Q_c$ ) do pola powierzchni podstawy stożka ( $A_c$ ),

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (1)$$

- tarcie na tulei ciernej  $f_s$  - obliczane jako stosunek siły tarcia na tulei ciernej ( $Q_s$ ) do pola powierzchni poboczniczy tulei ( $A_s$ ),

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad (2)$$

- oraz dla badania CPTU nadwyżka ciśnienia wody w porach gruntu -  $u_1$ ,  $u_2$  lub  $u_3$

Kształt stożka powoduje, że ciśnienie wody w porach gruntu wpływa na wartość parametrów mierzonych [25][31][42]. W celu korekty błędu pomiaru wyznacza się:

- opór stożka skorygowany -  $q_t$ :

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 \quad (3)$$

gdzie:

$q_c$  – opór stożka pomierzony bezpośrednio w badaniu CPTU,

- a – współczynnik powierzchni podstawy stożka netto,
- $u_2$  - ciśnienie wody w porach gruntu pomierzone bezpośrednio w badaniu CPTU,
- tarcie na tulei ciernej skorygowane -  $f_t$ :

$$f_t = f_s - \frac{(u_2 \cdot A_{sb} - u_3 \cdot A_{st})}{A_s} \quad (4)$$

gdzie:

$f_s$  – tarcie na tulei ciernej pomierzone bezpośrednio w badaniu CPTU,

$u_2, u_3$  – ciśnienie wody w filtrze porowym odpowiednio powyżej stożka i powyżej tulei ciernej,

$A_{sb}, A_{st}$  – pole przekroju ściany tulei ciernej odpowiednio nad filtrem porowym powyżej podstawy stożka oraz na krańcu tulei ciernej, w przypadku stałego przekroju tulei ciernej:

$f_t = f_s$ .

- nadwyżka ciśnienia wody w porach gruntu -  $\Delta u$ :

$$\Delta u = u_c - u_0 \quad (5)$$

gdzie:

$u_c$  – ciśnienie wody w porach gruntu:  $u_1, u_2$ , lub  $u_3$ ,

$u_0$  – ciśnienie wody w porach gruntu w poziomie stożka przed rozpoczęciem sondowania,

- współczynnik tarcia -  $R_f$ :

$$R_f = \frac{f_t}{q_t} \cdot 100\% \quad (6)$$

Wartość  $q_t$  ma szczególne znaczenie dla gruntów o małych oporach  $q_c$  i zwykłych ciśnienia wody w porach gruntu, stąd procedura ta pomijana jest dla gruntów niespoistych. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie opór stożka netto  $q_n$  jako korekty oporu  $q_t$  ze względu na głębokość sondowania:

$$q_n = q_t - \sigma_{v0} \quad (7)$$

gdzie:

$q_t$  – opór stożka znormalizowany względem ciśnienia wody w porach gruntu,

$\sigma_{v0}$  – składowa pionowa stanu naprężeń geostatycznych,

Ponadto do wyznaczania parametrów geotechnicznych gruntu konieczne jest określenie parametrów znormalizowanych uwzględniających wpływ głębokości sondowania, poniżej propozycja według Wrotha i Houlsbyego:

- znormalizowany opór stożka -  $Q_t$ :

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (8)$$

gdzie:

$\sigma'_{v0}$  – składowa pionowa stanu naprężeń geostatycznych efektywnych;

- znormalizowany współczynnik tarcia -  $F_r$ :

$$F_r = \frac{f_t}{q_t - \sigma_{vo}} \cdot 100\% \quad (9)$$

W przypadku gruntów mało spoistych, dla których wartość  $R_f = 0.5 \div 1.5\%$ , występują znaczne zwężki ciśnienia wody w porach gruntu, wskazane jest wówczas wyznaczenie parametru ciśnienia  $B_q$ :

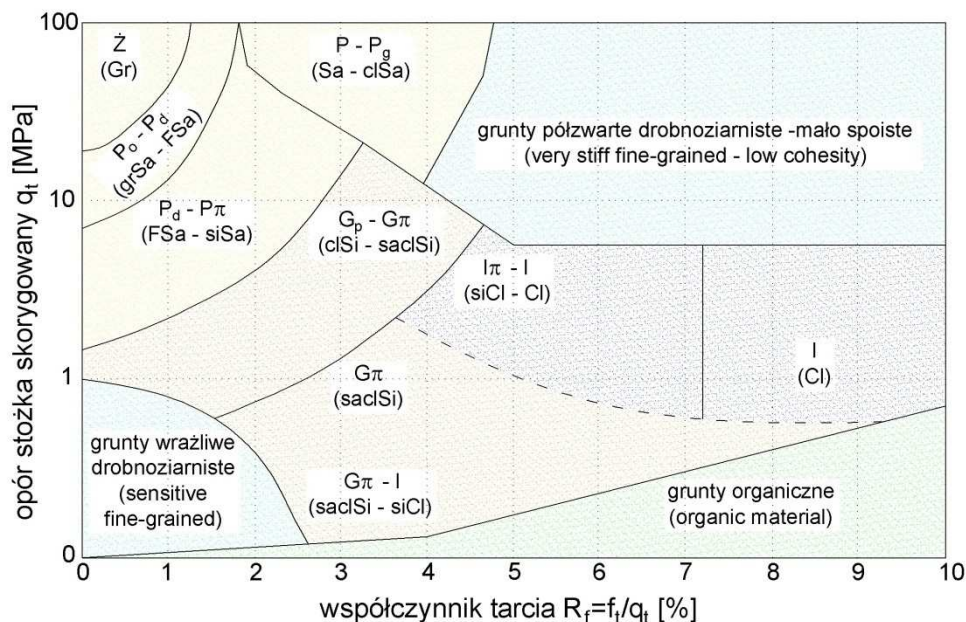
$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_n} \quad (10)$$

gdzie:

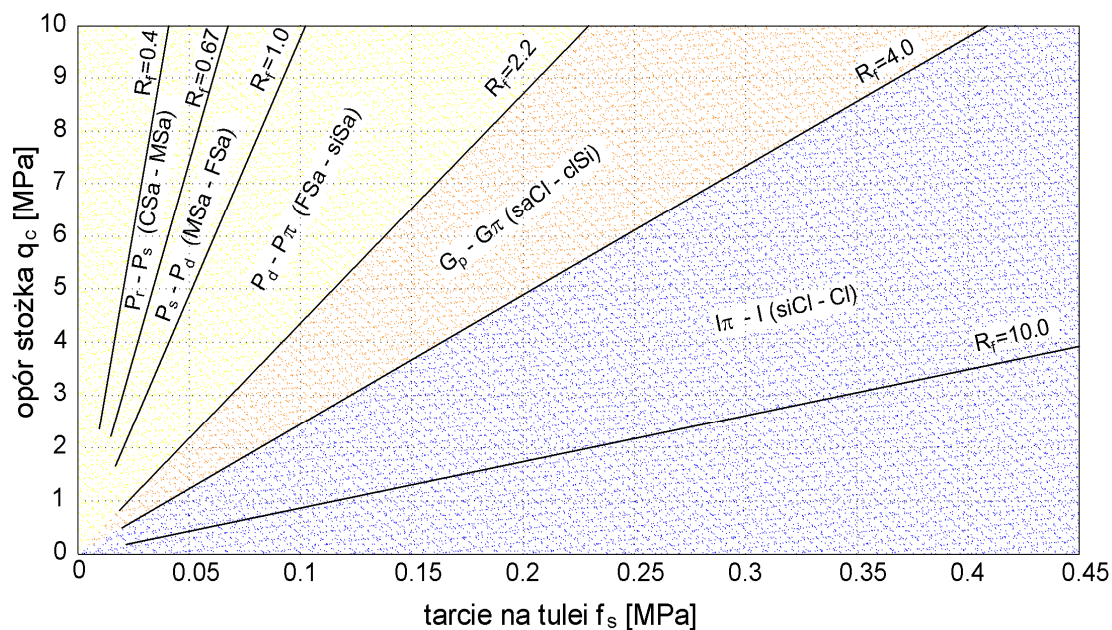
- $q_t$  – opór stożka znormalizowany względem ciśnienia wody w porach gruntu,
- $q_n$  – opór stożka netto, normalizacja względem głębokości sondowania,
- $u_2$  - ciśnienie wody w porach gruntu pomierzone bezpośrednio w badaniu CPTU,
- $u_0$  - ciśnienie wody w porach gruntu in-situ przed badaniem CPTU,
- $\Delta u$  - nadwyżka ciśnienia wody w porach gruntu.

$B_q$  pozwala na właściwą interpretację reakcji gruntu na sondowanie (SBT), wstępne określenie rodzaju gruntu oraz weryfikację stopnia plastyczności dla wyników badania CPTU [25][31][42].

Rodzaj gruntu, na podstawie CPTU, ustala się dla zależności oporu na stożku i tarcia na tulei ciernej. Powszechnie stosowane na całym świecie są diagramy Robertsona i Marra [53]. Obydwie zależności zostały dostosowane do warunków polskich i zaproponowane w normie PN-B-04452:2002, *Geotechnika. Badania polowe* [53].



Rys. 3.9. Klasyfikacja gruntów na podstawie sondowania CPT wg Robertsona [53].



Rys. 3.10. Klasyfikacja gruntów na podstawie sondowania CPT wg Marra [53].

Stosując metody pośrednie do projektowania fundamentów palowych, konieczne jest przygotowanie danych opisujących stan gruntu:

- ✓ stopnia zagęszczenia gruntów niespoistych  $I_D$
- ✓ stopnia plastyczności gruntów spoistych  $I_L$ .

Korelacje pomiędzy parametrami  $I_D$  i  $I_L$  można znaleźć w normie PN-EN:1997-2:2007 [46], w zbiorze publikacji prof. dr hab. inż. Z. Młynarka z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu [24], [25], dr hab. M. Tarnawskiego z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie [34], [35]; i wielu innych.

Do celów inżynierskich, analizy stanu gruntu zalegającego na niewielkich głębokościach, stosuje się przybliżone zależności  $I_D$  od  $q_c$ .

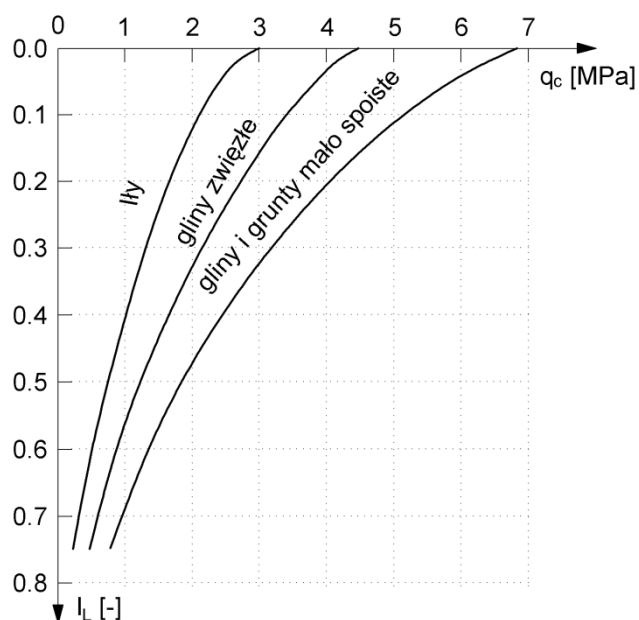
Tablica 3.4. Zależność  $I_D$  do  $q_c$  według PN-EN:1997-2:2007 [51].

Stopień zagęszczenia	Opór stożka $q_c$ [MPa]
Bardzo luźny	0,0 – 2,5
Luźny	2,5 – 5,0
Średnio zagęszczony	5,0 – 10,0
Zagęszczony	10,0 – 20,0
Bardzo zagęszczony	> 20,0

Tablica 3.5. Zależność  $I_D$  do  $q_c$  według Tarnawskiego [35].

opór pod stożkiem $q_c$ [MPa]	stopień zagęszczenia $I_D$	opór pod stożkiem $q_c$ [MPa]	stopień zagęszczenia $I_D$
1	0,12	16	0,65
2	0,22	17	0,66
3	0,30	18	0,67
4	0,36	19	0,68
5	0,41	20	0,69
6	0,44	21	0,70
7	0,48	22	0,71
8	0,50	23	0,72
9	0,52	24	0,73
10	0,54	25	0,74
11	0,56	26	0,75
12	0,58	27	0,77
13	0,60	28	0,78
14	0,62	29	0,79
15	0,64	30	0,80

W przypadku stopnia plastyczności  $I_L$  korelację opracowano dla sondowania CPTU z uwzględnieniem ciśnienia wody w porach gruntu. Według wielu autorów stopień plastyczności zależy od warunków lokalnych i genezy gruntu, stąd zdefiniowanie uniwersalnej zależności  $q_c - I_L$  jest bardzo trudne. Propozycję korelacji, oporu pod stożkiem sondy CPT do stopnia plastyczności, przedstawił m.in. Z Wiłun w *Zarysie Geotechniki* [47].

Rys. 3.11. Zależność stopnia plastyczności  $I_L$  od oporu  $q_c$  na stożku sondy CPT wg Wiłuna [47].

Powyższe zależności nie uwzględniają wpływu czynników i zjawisk, które zachodzą w gruncie, głębokości pomiaru, naprężenia geostatycznego, ciśnienia wody w porach, dlatego należy je stosować w analizie wstępnej do określania przybliżonych, orientacyjnych wartości.

Dysponując parametrami znormalizowanymi mamy możliwość oszacowania stopnia plastyczności według zależności empirycznych szeroko omówionych w pracach dr hab. inż. W. Tschuschke z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu [40], [41], [42]:

$$\begin{aligned}
 I_L &= 1.34 \cdot q_n^{-1.72} \cdot R_f^{-2.04} && \text{(grunty bardzo spoiste)} \\
 &\text{lub} \\
 I_L &= 0.059 \cdot q_n^{-1.89} && \text{(iły plicieńskie)} \\
 &\text{lub} \\
 I_L &= 0.571 \cdot q_n^{-1.44} && \text{(gliny piaszczyste)}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Na podstawie wyników badania CPT możliwe jest wyznaczenie takich parametrów geotechnicznych gruntu jak:

- efektywny kąt tarcia wewnętrznego ( $\varphi'$ ),
- spójność efektywna ( $c'$ ),
- spójność w warunkach bez drenażu ( $C_u$ ),
- wytrzymałość na ścinanie bez odpływu ( $s_u$ ),
- edometryczny moduł ścisłości pierwotnej ( $M_0$ ),
- edometryczny moduł ścisłości wtórnej ( $M$ ),
- moduł odkształcenia postaciowego ( $G_0$ ),
- współczynnik prekonsolidacji gruntu (OCR)

Na bazie badań CPT i CPTU opracowano szereg metod szacowania nośności fundamentów bezpośrednich i fundamentów na palach. Bezpośrednio można określić analogię między pograżaniem stożka i instalacją pali wbijanych. Zgodnie z założeniami teorii sprężystości przyjmuje się, że stożek CPTU i podstawa pala działają jak sztywny stempel na powierzchnię podłoża gruntowego. Przemieszczenie podstawy pod wpływem pionowej siły opisane jest za pomocą rozwiązania Boussinesqa, dodatkowo uwzględnia się zagłębienie podstawy pala. Podobne podejście teoretyczne rozpatruje się przy definiowaniu oporu stożka  $q_c$  w badaniu CPT [11][30][40]. Szczególną uwagę należy zwrócić na metody szacowania nośności pali

na podstawie funkcji transformacyjnych z zastosowaniem parametrów odkształceniowych gruntu.

Do wyznaczania początkowego modułu odkształcenia ( $G_0$ ) wykorzystuje się wyniki badania CPT, CPTU lub SCPTU [11]. Zależność ogólna ma postać:

$$G = \rho \cdot v_s^2 \tag{12}$$

gdzie:

- $\rho$  - gęstość objętościowa gruntu,
- $v_s$  - prędkości fali poprzecznej.

Prędkości rozchodzenia się fali poprzecznej wyznacza się z zależności [11]:

$$v_s = 277 \cdot q_c^{0.13} \cdot \sigma_v'^{0.27} \quad \text{(grunty niespoiste wg Baldiego)} \tag{13}$$

$$v_s = 3,18 \cdot q_c^{0,549} \cdot f_s^{-0,025} \quad (\text{grunty spoiste wg Mayne}) \quad (14)$$

$$v_s = 12,02 \cdot q_c^{0,319} \cdot f_s^{-0,0466} \quad (\text{grunty niespoiste wg Mayne}) \quad (15)$$

Istnieją również zależności umożliwiające bezpośrednie wyznaczenie  $G_0$  [11]:

$$G_0 = 1634 \cdot q_c^{0,250} \cdot \sigma_v'^{0,379} \quad (\text{grunty niespoiste wg Rixa}) \quad (16)$$

$$G_0 = 2,87 \cdot q_c^{1,335} \quad (\text{grunty spoiste wg Mayne}) \quad (17)$$

$$G_0 = 21,5 \cdot q_c^{0,79} \cdot (1 + B_q)^{4,59} \quad (\text{wg Skemptona}) \quad (18)$$

Sondowanie statyczne ze stożkiem CPT nie gwarantuje wiarygodnej interpretacji stanu gruntu spoistego. Wyniki pomiarów są jednak wystarczające do bezpiecznego szacowania parametrów gruntu niezbędnych do celów projektowych. W przypadku skomplikowanych warunków posadowienia obiektów wskazane jest wykonanie badań dodatkowych, odwiertów geologicznych oraz badań laboratoryjnych [42].



## 4. METODY OBLICZANIA NOŚNOŚCI PALA POJEDYNCZEGO

Przystępując do projektowania fundamentów palowych konieczna jest wnikliwa analiza parametrów, zarówno podłoża gruntowego jak i charakterystyk samego pala. W odniesieniu do podłoża gruntowego wymagane jest pełne rozpoznanie warunków w jakich będziemy wykonywać konstrukcję. W odniesieniu do parametrów pali projektant nie ogranicza się jedynie do określenia podstawowych wielkości jakimi są: średnica trzonu i podstawy, długość trzonu. Koniecznie powinny być określone jeszcze:

- jakość mieszanki betonowej zastosowanej do pali;
- sposób wykonania pali;
- możliwość wystąpienia odchyłek od projektowanej średnicy pali spowodowanych wystąpieniem warstw gruntowych o małej wytrzymałości na ścinanie i dużej ściśliwości;
- czas betonowania pali;
- kolejność wykonywania pali, w zależności od rodzaju pala i rodzaju gruntu;
- konieczność zastosowania iniekcji cementowej pod podstawą lub/i wzdłuż poboczniczy pala w celu polepszenia współpracy podłoża z fundamentem;
- rodzaj zastosowanych urządzeń do pogrążania pali w podłoże;
- szorstkość trzonu pala;
- sztywność trzonu pala;
- możliwość wystąpienia w gruncie związków opóźniających wiązanie betonu.

Wszystkie te aspekty sprawiają, że poprawne wykonanie projektu fundamentu palowego wymaga od inżyniera dokładnej analizy wszystkich wymienionych zagadnień.

### 4.1. Metody normowe

- **PN-EN:1997-1:2008, Eurokod7: Projektowanie geotechniczne. Zasady ogólne. [50]**

Ideą projektowania zaproponowaną w EC 7-1 jest metoda stanów granicznych. Dla pali, rozpatrujemy klasyczne stany graniczne, czyli stan graniczny nośności i użyteczności.

Rozdział siódmy normy PN-EN:1997-1, Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne, zawiera wytyczne do projektowania fundamentów palowych. Wytyczne dotyczą zachowań pali wciskanych, stopowych, tarcowych lub wyciąganych, pali obciążonych pionowymi siłami osiowymi, siłami poprzecznymi, pali pogrążanych przez wbijanie, wciskanie, wkręcanie i wiercenie, z możliwością wykonania iniekcji. W postanowieniach normy brakuje jednak analizy zastosowania pali jako elementów mających na celu ograniczenie i wyrównanie osiadań konstrukcji. Nie można, więc opierać się na zależnościach przedstawionych w normie, w przypadku projektowania fundamentu płytowo – palowego, w którym pale pełnią w/w funkcję. Dla pełnej harmonizacji projektu i wykonawstwa pali konieczne jest postępowanie według PN - EN 12699: 2000 – Pale przemieszczeniowe.

Analizując pracę fundamentu palowego w podłożu należy rozpatrywać potencjalne mechanizmy zniszczenia:

- a) utratę ogólnej stateczności;

- b) wyczerpanie nośności fundamentu palowego;
- c) wyciągnięcie albo niedostateczną nośność na wyciągnięcie;
- d) wyczerpanie nośności gruntu wskutek bocznego obciążenia fundamentu palowego;
- e) zniszczenie konstrukcji pala wywołane przez:
  - o ściskanie;
  - o rozciąganie;
  - o zginanie;
  - o wyboczenie;
  - o ścinanie.
- f) łączne wyczerpanie nośności:
  - o podłoża i fundamentu palowego;
  - o podłoża i konstrukcji;
- g) nadmierne osiadania;
- h) nadmierne podniesienia;
- i) nadmierne przemieszczenia boczne;
- j) niedopuszczalne drgania.

Kolejny istotny punkt to oddziaływania jakim poddawana jest konstrukcja posadowienia. Dobierając sytuację obliczeniową w pierwszym kroku należy rozpatrywać te same oddziaływania jak dla fundamentów bezpośrednich. Specyfika posadowienia na palach wymaga dodatkowo szerszej analizy wpływów powodowanych przemieszczaniem się gruntu wzdłuż całej pobocznicy pala. Procesy te mogą być generowane przez konsolidację gruntu, pęcznienie, obciążenie naziomu w bezpośrednim sąsiedztwie fundamentu, pełzanie gruntu, osuwiska czy wstrząsy tektoniczne. Wymienione w EC 7 zjawiska przemieszczania się gruntu zaleca się interpretować jako oddziaływania i analizować ich wpływ na pracę konstrukcji i posadowienia. Wyodrębnia się następujące oddziaływania:

- tarcie negatywne – należy przyjmować wartość maksymalną siły, jaka powstaje w wyniku tarcia przemieszczającego się gruntu na pobocznicy pala, wyznaczając wartość oddziaływania należy uwzględnić opór ścinania gruntu na pobocznicy oraz przemieszczenia gruntu pionowo w dół wywołane odkształceniami od ciężaru własnego i obciążenia naziomu,
- wypiętrzenie podłoża – wpływa negatywnie na nośność fundamentu palowego a przy znacznych wypiętrzeniach może dojść do jego całkowitego zniszczenia, zjawisko to może być wywołane odciążeniem naziomu, odprężeniem gruntu spowodowanym wykonaniem wykopu w bliskim otoczeniu posadowienia, wbijaniem sąsiednich pali, zamrażaniem czy zmianą wilgotności gruntu,
- przemieszczenie poziome podłoża – wartość siły zależy w znacznym stopniu od obciążeń przykładanych na powierzchni terenu, siła pozioma generuje się w podłożu w przypadku nierównomiernego obciążenia naziomu (inne sytuacje, w którym występują oddziaływania poziome to: pełzanie masywu zbczy, działanie gruntu na pale ukośne, ruchy podłoża wywołane wstrząsami sejsmicznymi).

Wykorzystując zasady dobrej praktyki inżynierskiej, w Eurokodzie 7 [45], wskazuje się w zaleceniach na próbne obciążenia pali jako jedyny sposób, na których opierać się powinny podejścia projektowe dla tego rodzaju posadowienia. W normie zaproponowano następujące metody:

- I. na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych, których zgodność została potwierdzona wcześniejszymi badaniami i następnie wykazana za pomocą obliczeń,

- II. na podstawie empirycznych lub/i analitycznych podejść obliczeniowych, których poprawność i wiarygodność została potwierdzona próbnymi obciążeniami statycznymi w porównywalnych warunkach,
- III. na podstawie próbnych obciążeń dynamicznych, których poprawność i wiarygodność została potwierdzona próbnymi obciążeniami statycznymi w porównywalnych warunkach,
- IV. na podstawie obserwacji porównywalnych fundamentów palowych, gdy dane te są oparte na wynikach badań terenowych i badań podłoża.

W celu przybliżenia tematyki związanej z próbnymi obciążeniami pali, stosowanymi w Polsce, w dalszej części rozprawy przedstawiono w skrócie procedury przebiegu badania.

Pale próbne przeznaczone jako badawcze wykonać należy w identyczny sposób jak pale stanowiące fundament właściwy, należy przez to rozumieć, że powinny być posadowione w tych samych warunkach, w tej samej warstwie gruntu, wskazane jest, aby miały tę samą średnicę i długość. W przypadku braku możliwości badanie próbne może być wykonane na palach o mniejszej średnicy, wówczas konieczne jest spełnienie warunków:

- stosunek pala próbnego do konstrukcyjnego nie może być mniejszy od 0,5;
- pal próbny wykonany jest w ten sam sposób co konstrukcyjny;
- urządzenia pomiarowe wykorzystane do badań pali próbnych powinny pozwolić na oddzielną analizę oporu pod podstawą i na pobocznicy.

Otrzymana wartość nośności, z próbnego obciążenia, w przypadku wystąpienia na palu tarcia negatywnego, powinna być zredukowana przez odjęcie od obciążenia zmierzonego na głowicy, pomierzonej lub najbardziej niekorzystnej siły tarcia dodatniego pobocznicy w warstwie ściśliwej i w warstwach powyżej, w których występuje tarcie negatywne. Wykonując badanie na palu konstrukcyjnym zaleca się przyjmować maksymalne obciążenie większe od sumy obliczeniowego obciążenia projektowanego i podwojonej wartości tarcia negatywnego.

Wartość charakterystyczną nośności pala wciskanego określa się na podstawie równania [50]:

$$R_{c;k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;m})_{mean}}{\xi_1}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (19)$$

$\xi_1, \xi_2$  – współczynniki korelacyjne, zależne od liczby próbnych obciążeń pali,  
 $R_{c,m}$  – wartości pomierzone oporu pala na wciskanie,  
 $R_{c,k}$  - wartość charakterystyczna oporu pala na wciskanie.

W przypadku nośność pali zwieńczonych konstrukcją o dużej sztywności:

$$R_{c;k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;m})_{mean}}{\frac{\xi_1}{1,1}}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\frac{\xi_2}{1,1}} \right\} \quad \text{gdy } \xi_1 \geq 1,0 \quad (20)$$

Tablica 4.6. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie próbnych obciążeń pali ( $n$  – liczba badanych pali) wg EC 7 [50].

$\xi$ dla $n =$	1	2	3	4	$\geq 5$
$\xi_1$	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
$\xi_2$	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Wartości współczynników korelacyjnych może zostać ustalona na podstawie doświadczeń i warunków krajowych. Przykładem jest propozycja angielska opracowana przez B. Simpsona.

Tablica 4.7. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie próbnych obciążeń pali zaproponowane przez B. Simpsona (według doświadczeń angielskich) [32].

próbné obciążenie statyczne		
n	wartość średnia	wartość minimalna
	$\xi_1$	$\xi_2$
1	1.55	
2	1.46	1.35
3	1.41	1.23
4	1.38	1.15
$\geq 5$	1.35	1.08

Wyznaczanie wartości charakterystycznej nośności pala wciskanego:

$$R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k} \quad (21)$$

gdzie:

$R_{b;k}$  – charakterystyczna wartość oporu podstawy pala,

$R_{s;k}$  – charakterystyczna wartość oporu poboczniczy pala,

Wyznaczanie wartości obliczeniowej nośności pala wciskanego:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad (22)$$

lub

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (23)$$

gdzie:

$\gamma_b$ ,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_t$  – współczynnik częściowe oporu.

Tablica 4.8. Współczynniki częściowe do nośności ( $\gamma_R$ ) dla pali wbijanych [50]:

Nośność	Symbol	Zestaw			
		R1	R2	R3	R4
Podstawa	$\gamma_b$	1,0	1,1	1,0	1,3
Pobocznicza (przy wciskaniu)	$\gamma_s$	1,0	1,1	1,0	1,3
Całkowita (przy wciskaniu)	$\gamma_t$	1,0	1,1	1,0	1,3
Pobocznicza (przy wyciąganiu)	$\gamma_{st}$	1,25	1,15	1,1	1,6

Wykorzystując do projektowania metody oparte na wynikach badań podłoża zalecane jest w EC 7, aby metody te zostały ustalone na podstawie próbnych obciążeń statycznych i porównywalnych doświadczeń. W przypadku przyjęcia sposobu obliczeń o zbyt wysokim stopniu niepewności, dopuszczalne jest wprowadzenie do analiz współczynnika modelu obliczeniowego, który koryguje błędy systematyczne i ma zapewnić, że oszacowana nośność pala jest bezpieczna. Dodatkowo należy wybrać odpowiednie podejście obliczeniowe oraz odpowiednie dla podejścia współczynniki częściowe stosowane do oddziaływań oraz parametrów gruntu. W EC 7 mamy trzy podejścia obliczeniowe DA1, DA2 (DA2\*), DA3. W przypadku podejścia DA1 mamy do dyspozycji dwie kombinacje:

- kombinacja 1: A1 "+" M1 "+" R1
- kombinacja 2: A2 "+" M2 "+" R1

Tablica 4.9. Współczynniki częściowe do oddziaływań lub do efektów oddziaływań [50]:

Oddziaływanie		Symbol	Zestaw	
			A1	A2
Stałe	Niekorzystne	$\gamma_G$	1,35	1,0
	Korzystne		1,0	1,0
Zmienne	Niekorzystne	$\gamma_Q$	1,5	1,3
	Korzystne		0	0

Tablica 4.10. Współczynniki częściowe do parametrów geotechnicznych ( $\gamma_M$ ) [50]:

Parametr gruntu	Symbol	Zestaw	
		M1	M2
Kąt tarcia wewnętrznego <sup>a</sup>	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Spójność efektywna	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe	$\gamma_{qu}$	1,0	1,4
Ciężar objętościowy	$\gamma_{\gamma}$	1,0	1,0
<sup>a</sup> Współczynnik ten stosuje się do wartości $\tan \varphi'$			

Dla podejściu obliczeniowym DA2 (DA2\*) mamy jeden zestaw współczynników: A1 "+" M1 "+" R2. Współczynniki stosuje się dla oddziaływań oraz nośności podłoża gruntowego. Podejście to stosowane jest powszechnie do posadowienia bezpośredniego na płaskim terenie i fundamentów palowych. Podejście obliczeniowe DA2\*, początkowo nie istniało w EC7, dopiero inicjatywa Niemiec spowodowała, że zostało ogólnie przyjęte. Stanowi pewne uproszczenie podejścia DA2, polegające na ocenie oporu podłoża z uwzględnieniem sił przekazywanych przez fundament na grunt od obciążeń charakterystycznych. Podstawowe zalety tego podejścia, klarowna ocena niezawodności i uproszczenie obliczeń przez rozpatrywanie ogólnego charakteru sił, sprawiły, że zostało zaakceptowane przez szereg państw członkowskich UE.

Do badania stateczności skarp i stateczności ogólnej przyjęto podejście DA 3. Współczynniki stosuje się do oddziaływań konstrukcji oraz parametrów geotechnicznych gruntu, kombinacja: (A1\* lub A2†) "+" M2 "+" R3.

Wartość charakterystyczną nośności wyznacza się z równania (brak przekazywania sił ze „słabych” pali na „mocne”):

$$R_{c;k} = (R_{b;k} + R_{s;k}) = \frac{R_{b;cal} + R_{s;cal}}{\xi} = \frac{R_{c;cal}}{\xi} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{c;cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

gdzie:

$\xi_3, \xi_4$  – współczynniki korelacyjne, zależne od liczby zbadanych profili,  
 $(R_{c;cal})_{mean}$  – wartości średnie oporu na podstawie badań podłoża:

$$(R_{c;cal})_{mean} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{mean} = (R_{b;cal})_{mean} + (R_{s;cal})_{mean} \quad (25)$$

$(R_{c;cal})_{min}$  - wartości najniższe:

$$(R_{c;cal})_{min} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{min} \quad (26)$$

Nośność pali zwieńczonych konstrukcją o dużej sztywności:

$$R_{c;k} = (R_{b;k} + R_{s;k}) = \frac{R_{b;cal} + R_{s;cal}}{\frac{\xi}{1,1}} = \frac{R_{c;cal}}{\frac{\xi}{1,1}} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{mean}}{\frac{\xi_3}{1,1}}; \frac{(R_{c;cal})_{min}}{\frac{\xi_4}{1,1}} \right\}$$

gdym  $\xi_3 \geq 1,0$

Tablica 4.11. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie wyników badań podłoża (n - liczba badanych profili) wg EC 7 [50].

$\xi$ dla $n =$	1	2	3	4	5	7	10
$\xi_3$	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
$\xi_4$	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

Tablica 4.12. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych nośności na podstawie wyników badań podłoża zaproponowane przez B. Simpsona (według doświadczeń angielskich) [32].

badania podłoża		
n	wartość średnia	wartość minimalna
	$\xi_3$	$\xi_4$
1	1.50	
2	1.44	1.39
3	1.40	1.33
4	1.38	1.29
5	1.36	1.26
(6)	(1.34)	(1.23)
7	1.33	1.20
(8)	(1.32)	(1.18)
(9)	(1.31)	(1.17)
$\geq 10$	1.30	1.15

Wartość charakterystyczna wyznacza się z następujących zależności:

$$R_{b;k} = A_b \cdot q_{b;k} \quad (28)$$

$$R_{s;k} = \sum A_{s;i} \cdot q_{s;i;k} \quad (29)$$

gdzie:

$q_{b;k}$  – wartość charakterystyczna oporu podstawy określona na podstawie wartości parametrów gruntu,

$q_{s;i;k}$  – wartość charakterystyczna tarcia na pobocznicy określona na podstawie wartości parametrów gruntu,

$A_b$  - pole powierzchni podstawy pala,

$A_s$  - pole powierzchni pobocznicy pala.

Oceniając wiarygodność przyjętego modelu analitycznego opartego na wynikach badań podłoża, należy wziąć pod uwagę :

- rodzaj gruntu,
- uziarnienie gruntu,
- skład mineralny gruntu,
- stopień zagęszczenia,
- stopień konsolidacji,
- ścisłość gruntu,
- parametry wytrzymałościowe gruntu,
- przepuszczalność gruntu,
- sposób wykonania pala,
- geometrię pala,
- metody badania podłoża.

Kolejna metoda określania nośności to próbne obciążenie dynamiczne. Podobnie jak dla metody wcześniejszej, wymagane jest wykazanie poprawności otrzymanych wyników próbnym obciążeniem statycznym tego samego rodzaju pala w porównywalnych warunkach gruntowych. Stosując badania dynamiczne wskazane jest określanie oporów pala bezpośrednio na miejscu budowy. Energia uderzenia podczas badania powinna być odpowiednio duża, aby możliwa była właściwa interpretacja nośności pala przy jego przemieszczeniu. Wartość charakterystyczną nośności pala wyznacza się ze wzoru:

$$R_{c;k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;m})_{mean}}{\xi_5}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_6} \right\} \quad (30)$$

$\xi_5, \xi_6$  – współczynniki korelacyjne, zależne od liczby badanych pali

Tablica 4.13. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych na podstawie wyników dynamicznych badań udarowych a,b,c,d,e(n – liczba badanych pali) wg EC 7 [50]:

$\xi$ dla $n$	$\geq 2$	$\geq 5$	$\geq 10$	$\geq 15$	$\geq 20$
$\xi_5$	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
$\xi_6$	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

<sup>a</sup> Wartości  $\xi$  podane w tablicy obowiązują dla wyników dynamicznych badań udarowych.

<sup>b</sup> Wartości  $\xi$  można pomnożyć przez współczynnik modelu obliczeniowego równy 0,85, gdy stosuje się dynamiczne badania udarowe z dopasowaniem sygnału.

<sup>c</sup> Wartości  $\xi$  zaleca się pomnożyć przez współczynnik modelu obliczeniowego równy 1,10 przy zastosowaniu wzoru dynamicznego z pomiarem quasi-sprężystego przemieszczenia głowicy pala podczas udaru.

<sup>d</sup> Wartości  $\xi$  należy pomnożyć przez współczynnik modelu obliczeniowego równy 1,20 przy zastosowaniu wzoru dynamicznego bez pomiaru quasi-sprężystego przemieszczenia głowicy pala podczas udaru.

<sup>e</sup> Jeśli w fundamencie występują pale różnych rodzajów, to przy ustalaniu liczby  $n$  badanych pali zaleca się rozpatrywać osobno grupy jednakowych pali.

Tablica 4.14. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych na podstawie wyników dynamicznych badań udarowych (n – liczba badanych pali) B. Simpsona (według doświadczeń angielskich) [32].

próbne obciążenie dynamiczne		
n	wartość średnia	wartość minimalna
	$\xi_5$	$\xi_6$
$\geq 2$	1.74	1.71
$\geq 5$	1.67	1.59
$\geq 10$	1.61	1.49
$\geq 15$	1.57	1.44
$\geq 20$	1.55	1.40

Dla wszystkich proponowanych metod warunków stanu granicznego nośności przedstawia zależność:



$$F_{c;d} \leq R_{c;d} \quad (31)$$

W normie PN-EN 1997-1:2008 zaproponowano dodatkowo dwie metody określania nośności granicznej pali wciskanych:

- przy zastosowaniu wzorów dynamicznych;
- na podstawie analizy sprężystej fali odbitej,

Brakuje jednak bardziej szczegółowych wytycznych do przeprowadzania wymienionych badań. Podejścia i zastosowanie tych metod zależy od zasad przyjętych w poszczególnych krajach.

- **PN-EN 1997-2:2008 (DIN 1054, 2005) [51]**

Korelacja między nośnością podstawy pala  $p_b$  ( $q_{b,k}$ ) wciskanego a oporem zagłębienia stożka sondy  $q_c$  (grunty gruboziarniste) przedstawiona jest w tabelicy poniżej.

Tabela 4.15. Jednostkowy opór podstawy pali wierconych  $p_b$  (DIN 1054) [51].

Znormalizowane osiadanie $s/D_s$ ; $s/D_b$	Jednostkowy opór podstawy $p_b$ , w MPa, przy średniej wartości oporu zagłębienia stożka $q_c$ (CPT) w MPa			
	$q_c = 10$	$q_c = 15$	$q_c = 20$	$q_c = 25$
0,02	0,70	1,05	1,40	1,75
0,03	0,90	1,35	1,80	2,25
0,10 (= $s_g$ )	2,00	3,00	3,50	4,00

UWAGA Wartości pośrednie mogą być interpolowane liniowo.  
W przypadku pali wykonywanych w podłożu z poszerzeniem podstawy pala, wartości należy pomnożyć przez 0,75  
 $s$  - znormalizowane osiadanie głowicy pala  
 $D_s$  - średnica trzonu pala  
 $D_b$  - średnica podstawy pala  
 $s_g$  - graniczne osiadanie głowicy pala

Korelacja między tarciem poboczniczy pala  $p_s$  ( $q_{s,i,k}$ ) wciskanego a oporem zagłębienia stożka sondy  $q_c$  (grunty gruboziarniste) przedstawia tabela poniżej.

Tabela 4.16. Jednostkowy opór tarcia poboczniczy pali wierconych  $p_s$  (DIN 1054) [51].

Średni opór zagłębienia stożka $q_c$ (CPT) MPa	Jednostkowy opór tarcia poboczniczy $p_s$ MPa
0	0
5	0,040
10	0,080
$\geq 15$	0,120

UWAGA Wartości pośrednie mogą być interpolowane liniowo

Drugą propozycją zawartą w EC 7 jest metoda analityczna wymagająca szczegółowych uśrednień oporów wzdłuż poboczniczy pala oraz pod podstawą.

Maksymalna nośność pala wciskanego wyznaczana jest z zależności:

$$F_{max} = F_{max, base} + F_{max, shaft} \quad (32)$$

$$F_{max, base} = A_{base} \cdot p_{max, base} \quad (33)$$

$$F_{max, shaft} = C_p \int_0^{\Delta L} p_{max, shaft, z} dz \quad (34)$$

gdzie:

$A_{base}$  - pole przekroju poprzecznego podstawy,

$C_p$  - obwód części trzonu pala w warstwie, w której umieszczono głowicę pala w m,

$F_{max, base}$  - maksymalny opór podstawy w MN,

$F_{max, shaft}$  - maksymalny opór tarcia pobocznic w MN,

$p_{max, shaft, z}$  - maksymalny, jednostkowy opór tarcia pobocznic, na głębokości  $z$  w MPa,

$p_{max, base}$  - maksymalny, jednostkowy opór podstawy w MPa,

$\Delta L$  - odległość od podstawy pala do spągu pierwszej warstwy powyżej podstawy o  $q_c < 2$  MPa,

$z$  - głębokość,

Maksymalny opór podstawy  $p_{max, base}$  może być określony na podstawie następującego równania:

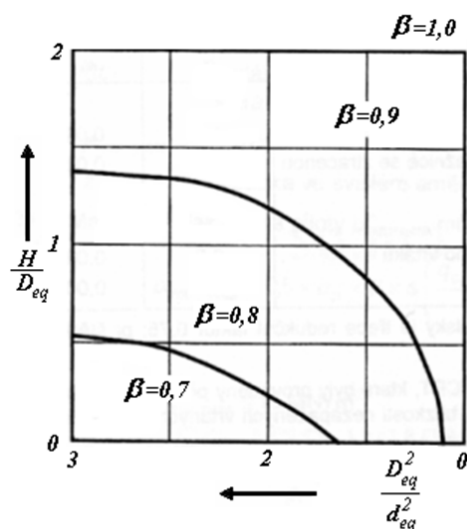
$$p_{max, base} = 0,5\alpha_p \beta S \left\{ \frac{q_{c;I;mean} + q_{c;II;mean}}{2} + q_{c;III;mean} \right\} \quad (35)$$

$$p_{max, base} \leq 15 \text{ MPa} \quad (36)$$

gdzie:

$\alpha_p$  - współczynnik klasy pala,

$\beta$  - współczynnik uwzględniający kształt stopy pala (Rys. 4.12),



Rys. 4.12. Współczynnik kształtu podstawy pala [46].

$D_{eq}$  - zastępcza średnica podstawy, w m

$$D_{eq} = 1,13 \cdot a \sqrt{\frac{b}{a}} \quad (37)$$

gdzie:

a - długość krótszego boku powierzchni podstawy w m,

b - dłuższy bok, w m, przy czym  $b \leq 1,5 \cdot a$ ,

s – współczynnik kształtu podstawy pala dla pali o przekroju prostokątnym:

$$s = \frac{1 + \frac{\sin \varphi'}{r}}{1 + \sin \varphi'} \quad (38)$$

gdzie:

$r = L/B$ ,

L - dłuższy bok prostokątnej podstawy pala,

B - krótszy bok prostokątnej podstawy pala,

$\varphi'$  - efektywny kąt tarcia wewnętrzznego.

$q_{c,I;mean}$  - średnia wartość  $q_{c,I}$  w zakresie głębokości od poziomu podstawy pala do poziomu, którego zagłębienie wynosi przynajmniej 0,8 a najwyżej 4-krotność zastępczej średnicy podstawy pala  $D_{eq}$ ,

$$q_{c,I;mean} = \frac{1}{d_{crit}} \int_0^{d_{crit}} q_{c,I} dz \quad (39)$$

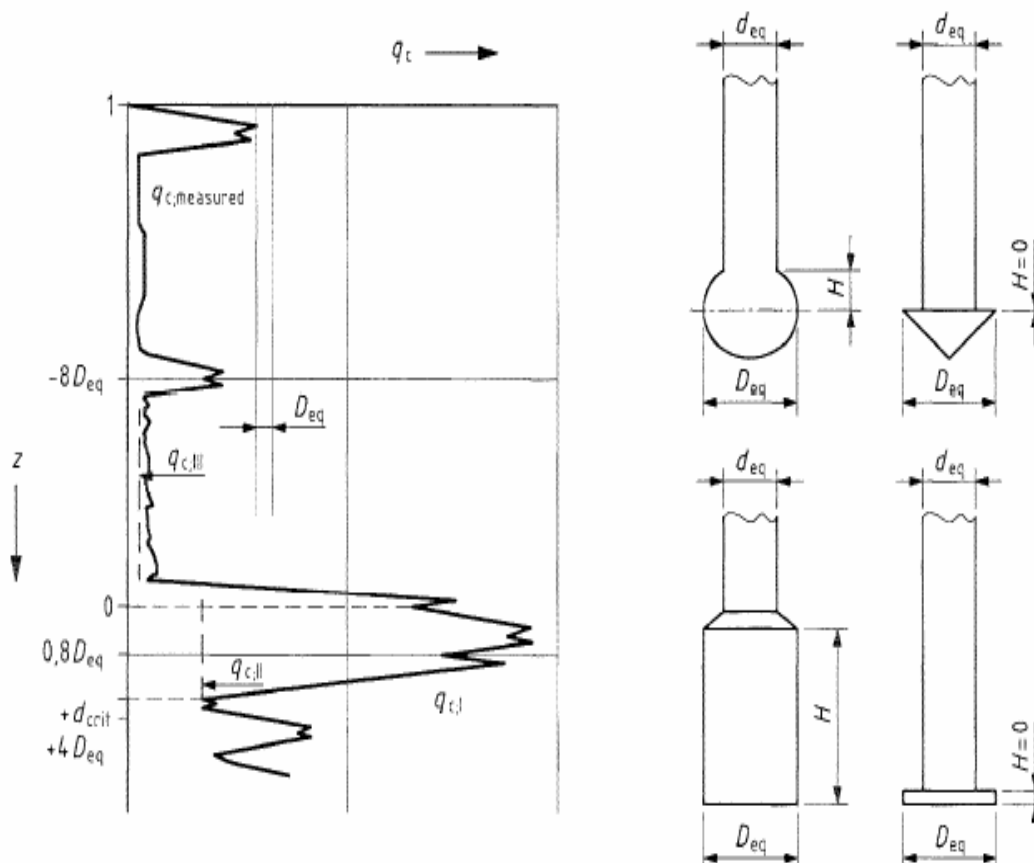
$$0,8 D_{eq} < d_{crit} < 4 D_{eq} \quad (40)$$

$q_{c,II;mean}$  - średnia z najniższych wartości  $q_{c,II}$  w zakresie głębokości mierzonej w górę od głębokości krytycznej do podstawy pala,

$$q_{c,II;mean} = \frac{1}{d_{crit}} \int_{d_{crit}}^0 q_{c,II} dz \quad (41)$$

$q_{c,III;mean}$  - średnia wartość  $q_{c,III}$  w zakresie głębokości mierzonej od poziomu podstawy pala do poziomu, który znajduje się w odległości 8 średnic podstawy pala powyżej lub, w przypadku, gdy  $b > 1,5 \times a$ , do poziomu w odległości  $8 \times a$  powyżej podstawy pala. Ta procedura rozpoczyna się od najniższej wartości  $q_{c,II}$  użytej do obliczenia  $q_{c,II;mean}$

$$q_{c,III;mean} = \frac{1}{8D_{eq}} \int_0^{-8D_{eq}} q_{c,III} dz \quad (42)$$

Rys. 4.13. Objasnienia  $q_{c,I}$ ,  $q_{c,II}$ ,  $q_{c,III}$ . [51]

Maksymalny opór tarcia poboczniczy  $p_{max;shaft;z}$ :

$$p_{max;shaft;z} = \alpha_s \cdot q_{c;z;a} \quad (43)$$

gdzie:

$\alpha_s$  - współczynnik klasy pala,

$q_{c;z;a}$  - wartość  $q_c$  na głębokości  $z$  w MPa,

Tablica 4.17. Wartości  $\alpha_p$  i  $\alpha_s$  dla piasków i pospółek [51].

Klasa lub rodzaj pala	$\alpha_p$	$\alpha_s^a$
Pale przemieszczeniowe, średnica >150 mm		
- prefabrykowane pale zagłębiane w podłożu	1,0	0,010
- pale wykonywane w podłożu poprzez zagłębienie stalowej rury z zamkniętym końcem. Rura stalowa jest odzyskiwana podczas betonowania	1,0	0,012
Pale wykonywane z usunięciem gruntu, średnica >150 mm		
- pale formowane świdrem ciągłym,	0,8	0,006 <sup>b</sup>
- pale wykonywane w otworze wiertniczym (z płuczką wiertniczą)	0,6	0,005
<sup>a</sup> Wartości ważne dla piasków od drobno- do gruboziarnistych. W przypadku piasków bardzo gruboziarnistych konieczny jest współczynnik redukcyjny 0,75; w przypadku żwirów ten współczynnik redukcyjny wynosi 0,5.		
<sup>b</sup> Ta wartość jest wykorzystywana w przypadku zastosowania wyników badania CPT, przeprowadzonych przed wykonaniem pala. Kiedy wykorzystuje się badanie CPT, przeprowadzone w sąsiedztwie pala formowanego świdrem ciągłym, $\alpha_s$ może być zwiększone do 0,01.		

Tablica 4.18. Wartości  $\alpha_s$  dla iłóv, pyłóv i torfóv [51].

Rodzaj gruntu	$q_c$ MPa	$\alpha_s$
ił	> 3	< 0,030
ił	< 3	< 0,020
pył		< 0,025
torf		0

Stosując powyższą metodę należy zwrócić szczególną uwagę na złożony proces uśredniania oporóv stożka  $q_c$ , dodatkowo należy uwzględnić następujące warunki:

- jeżeli  $q_{c;z} \geq 12$  MPa w ciągłym przedziale głębokości, 1-metrowym lub większym, wtedy  $q_{c;z;a} \leq 15$  MPa w tym przedziale,
- jeżeli przedział głębokości, w którym  $q_{c;z;a} > 12$  MPa, jest mniejszy niż 1 m, wówczas w tym przedziale  $q_c \leq 12$  MPa.

## 4.2. Metody bezpośrednie wykorzystujące wyniki badania CPT

Podstawowe znaczenie dla wiarygodności obliczeń ma miarodajne określenie jednostkowych oporóv pod podstawą i poboczniczy pala. Istnieje wiele metod obliczeniowych, które można wykorzystać do praktycznych obliczeń. Przyjęcie miarodajnej metody powinno bazować na analizach porównawczych i zastosowaniu metod statystycznych wykorzystujących wyniki próbných obciążení statycznych w skali naturalnej. Wartości jednostkowych oporóv pod podstawą pali powinny być odniesione do wielkości przemieszczeń i uwzględnić definicję obciążení granicznych zgodnych z założeniami EC 7. Obliczeniowe powierzchnie podstawy i poboczniczy powinny uwzględnić rzeczywiste uwarunkowania technologiczne dla rozpatrywanego rodzaju pala.

Bardzo szeroko wykorzystuje się badania terenowe, in-situ. Są to głównie parametry określane na podstawie testu statycznego sondowania, badań sondami dynamicznymi, badań dylatometrem i presjometrem. Wykorzystuje się tu metody pośrednie i metody bezpośrednie.

Metody oparte na wynikach sondowania należą do grupy metod inżynierskich i bezpośrednich, opierają się na zależnościach empirycznych. Dla wielu metod stosuje się wysokie współczynniki globalnego bezpieczeństwa  $F_s$  (Safety Factor). Dla metod stosowanych w Europie  $F_s$  waha się od 2,0 do 3,5, w zależności od: warunkóv gruntowych, stosowanych pali, rodzaju obiektu. Dla niektórych metod, znajdujemy w literaturze – głównie zagranicznej, wartość współczynnika globalnego  $F_s$  jako 1,5(1,0) do 2,0.

Jeszcze inne podejście do metod opartých na wynikach badań podłoża zaproponowano w normie PN-EN 1997-1:2008. Wyznaczając wartość charakterystyczną nośności korzystamy ze współczynnikoóv korelacyjnych  $\xi_3$  i  $\xi_4$ , dzieląc przez nie wartości nośności, które uzyskaliśmy bezpośrednio z parametróv badania w poszczególných metodach. Przechodząc na wartości obliczeniowe dzielimy wartość charakterystyczną przez odpowiedni współczynnik oporu, zależny od podejścia obliczeniowego (DA)

Tablica 4.19. Klasyfikacja metod określania nośności pali na podstawie badań in-situ [10], [44].

METODY SZACOWANIA NOŚNOŚCI PALI NA PODSTAWIE BADAŃ PODŁOŻA	METODY POŚREDNIE	Grunty niespoiste	Opór pod podstawą	Metoda Vesic'a (1977) Metoda Coyle & Castello (1981)
			Opór na pobocznicę	Metoda $\beta$ (Bowles, 1996) Metoda Coyle & Castello (1981)
		Grunty spoiste	Opór pod podstawą	$q = 9 \cdot c_u$
			Opór na pobocznicę	Metoda $\alpha$ - Tomlinson'a (1971/1995) Metoda $\alpha$ - API (Reese, 1984) Metoda $\beta$ (Reese, 1982; AASHTO, 1996/2000) Metoda $\lambda$ (US Army Corps of Engineers, 1977)
METODY BEZPOŚREDNIE	Wyniki sondowania sondą statyczną CPT		PN-EN 1997-2:2008 Metoda LCPC (Bustamante, Giasenelli; 1982) Metoda Schmertmann'a (1978) Metoda De Ruiter'a & Beringen'a (1978) Metoda Aoki & Velloso (1975) Metoda Penpile (Clisby, 1978) Metoda Gwizdały & Stęczniewskiego (2009)	
PRÓBNE OBCIĄŻENIE STATYCZNE (SPLT)		PN – 83/B – 02482		
		PN-EN 1997-1:2008 PN-EN 1536 : Pale wiercone PN-EN 12699 : Pale przemieszczeniowe		

- **Metoda Gwizdały – Stęczniewskiego (2009) [9], [11]**

Wśród propozycji metod obliczeniowych nośności pali, na podstawie badań podłoża sondą statyczną CPT, znajduje się metoda opracowana przez prof. dr hab. inż. Kazimierza Gwizdałę oraz dr inż. Macieja Stęczniewskiego z Politechniki Gdańskiej [9], [11]. Podstawowe zależności mają postać:

- jednostkowy opór pod podstawą pala:

$$q_{bu} = \psi_1 \cdot \bar{q}_c, \quad (44)$$

- jednostkowe tarcie na pobocznicę pala:

$$q_{sui} = \bar{q}_{csi} / \psi_{2i}, \quad (45)$$

gdzie:

- $q_{bu}$  – jednostkowy graniczny opór pod podstawą pala,
- $q_{sui}$  – jednostkowy graniczny opór na pobocznicę pala w obrębie  $i$  – tej warstwy obliczeniowej,
- $\bar{q}_c$  – uśredniony jednostkowy opór pod stożkiem sondy przy podstawie pala,

$\bar{q}_{csi}$  – uśredniony jednostkowy opór pod stożkiem sondy w obrębie  $i$  – tej warstwy,

$\psi_1$  – współczynnik nośności podstawy, zależny od  $\bar{q}_c$  lub  $\bar{q}_{c,zn}$ ,

$\psi_{2i}$  – współczynnik nośności poboczniczy zależny od  $\bar{q}_c$  lub  $\bar{q}_{c,zn}$ ,

$$\bar{q}_{c,zn} = (q_c - \sigma_v) / \sigma'_v \quad (46)$$

gdzie:

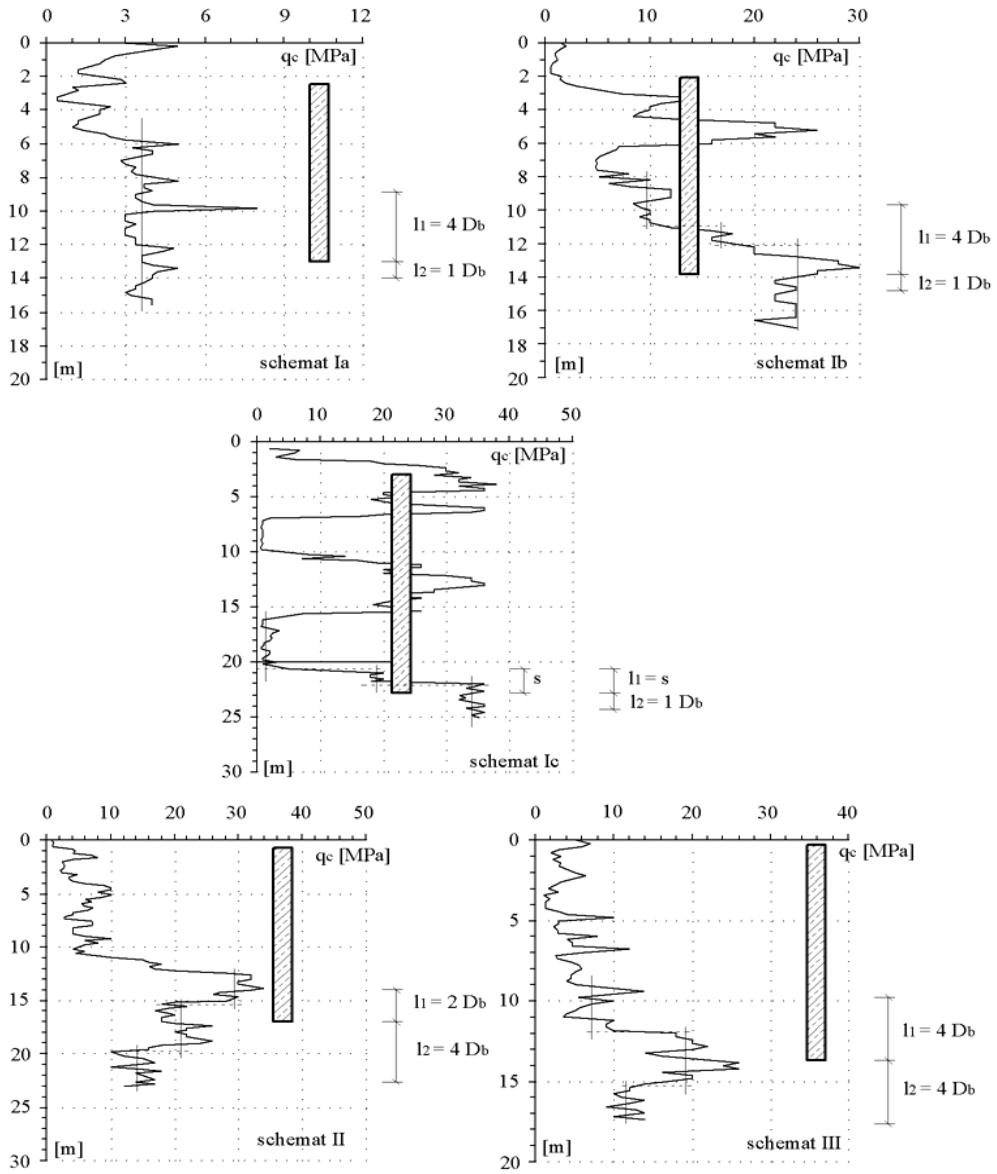
$\sigma_v$  – pionowe naprężenia całkowite,

$\sigma'_v$  – pionowe naprężenia efektywne,

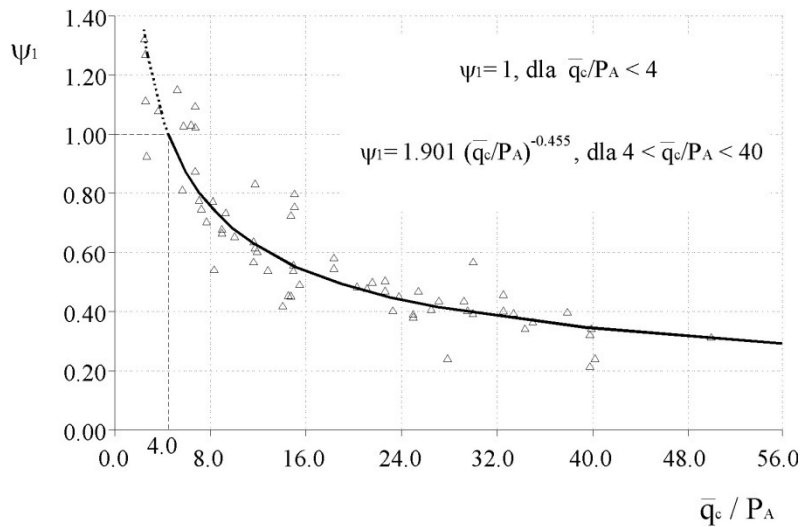
$q_{c,zn}$  – znormalizowany jednostkowy opór pod stożkiem sondy przy podstawie pala,

Istotnym elementem w procesie obliczeniowym, z wykorzystaniem metody Gwizdały – Stęczyńskiego, jest odpowiednie określenie strefy uśrednienia oporu pod podstawą stożka. Autorzy metody zaproponowali 5 schematów obrazujących sposób przyjmowania i zasięg strefy wartości  $q_c$ , który należy przyjąć do obliczeń, w zależności od warunków gruntowych:

- schemat I:
  - a. dla gruntów jednorodnych,
  - b. dla gruntów niejednorodnych – podstawa pala w gruntach o większej wartości  $q_c$ ,
  - c. dla gruntów niejednorodnych – podstawa pala w gruncie o większej wartości  $q_c$ , powyżej warstwa gruntów nienośnych – namulów, torfów.
- schemat II: dla gruntów niejednorodnych – podstawa w gruntach o mniejszej wartości  $q_c$ , powyżej podstawy warstwa o większej wartości  $q_c$ ,
- schemat III: dla gruntów niejednorodnych – podstawa pala w gruncie o większej wartości  $q_c$ , powyżej i poniżej grunty o mniejszej wartości  $q_c$ .

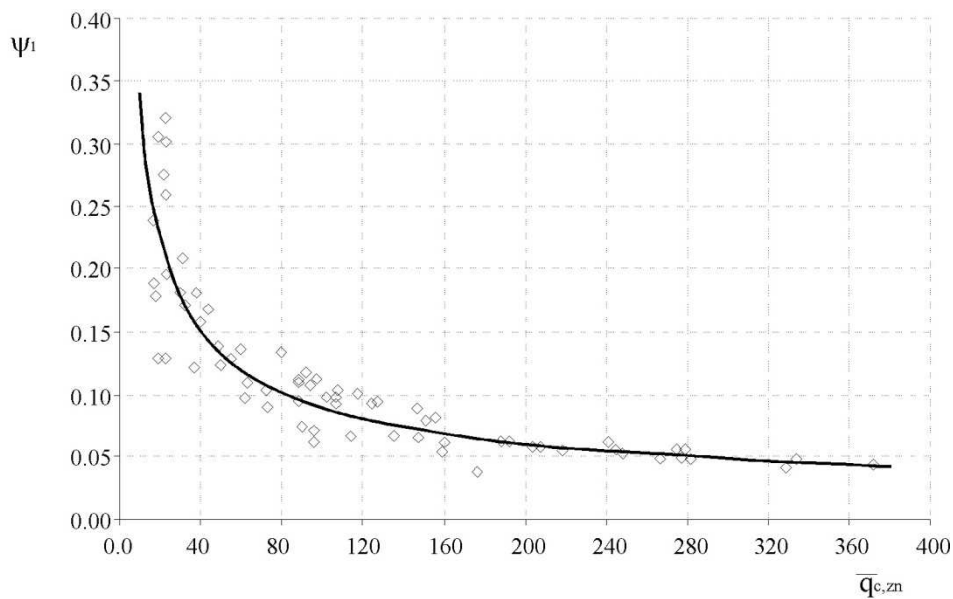


Rys. 4.14. Schematy obliczeniowe metody Gwizdały - Stęczniewskiego [9], [11].

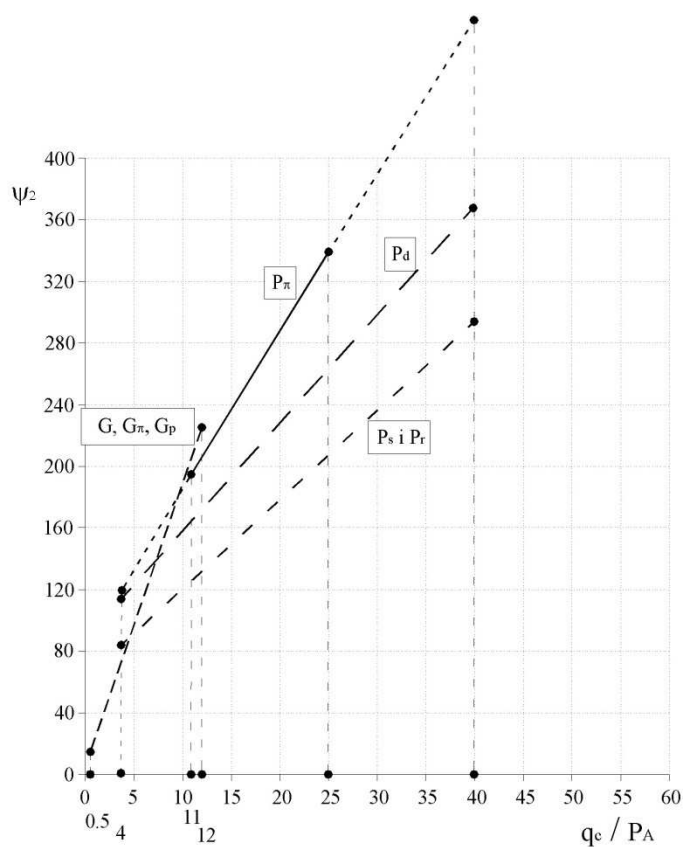


Rys. 4.15. Zależność współczynnika nośności  $\psi_1$  od  $q_c/P_A$  dla pali wbijanych Vibro [9], [11].

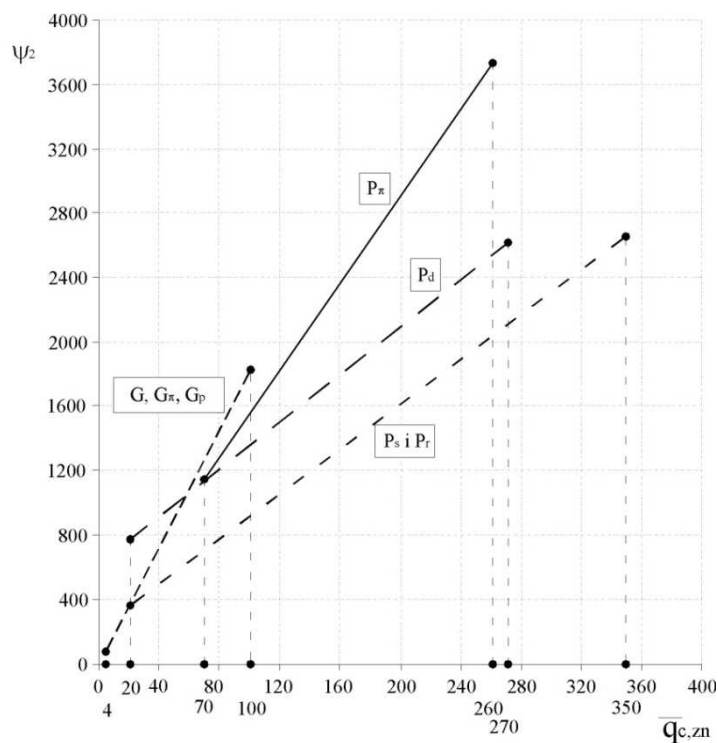




Rys. 4.16. Współczynnik nośności  $\psi_1$  dla pali wbijanych Vibro, znormalizowany opór stożka [9], [11].



Rys. 4.17. Zależność współczynnika nośności  $\psi_2$  od  $q_c/P_A$  dla pali wbijanych Vibro [9], [11].



Rys. 4.18. Współczynnik nośności  $\psi_2$  dla pali wbijanych Vibro, znormalizowany opór stożka [9], [11].

- **Metoda LCPC – Bustamante i Giasenelli (1982, Francja) [11], [27]**

Jedną z najczęściej stosowanych metod w Europie jest metoda francuska LCPC. Opory wyznacza się z następujących zależności:

- jednostkowy opór podstawy pala:

$$p_{max;toe} = k_c \cdot q_{c;a} \quad (47)$$

- jednostkowy opór na poboczniczy pala:

$$p_{max;shaft} = q_{c;z} / \alpha \quad (48)$$

gdzie:

$q_{c;a}$  - uśredniony opór pod podstawą pala,

$q_{c;z}$  - uśredniony opór wzdłuż poboczniczy pala w obrębie ustalonych warstw gruntowych,

$k_c$  - współczynnik nośności zależny od rodzaju gruntu,

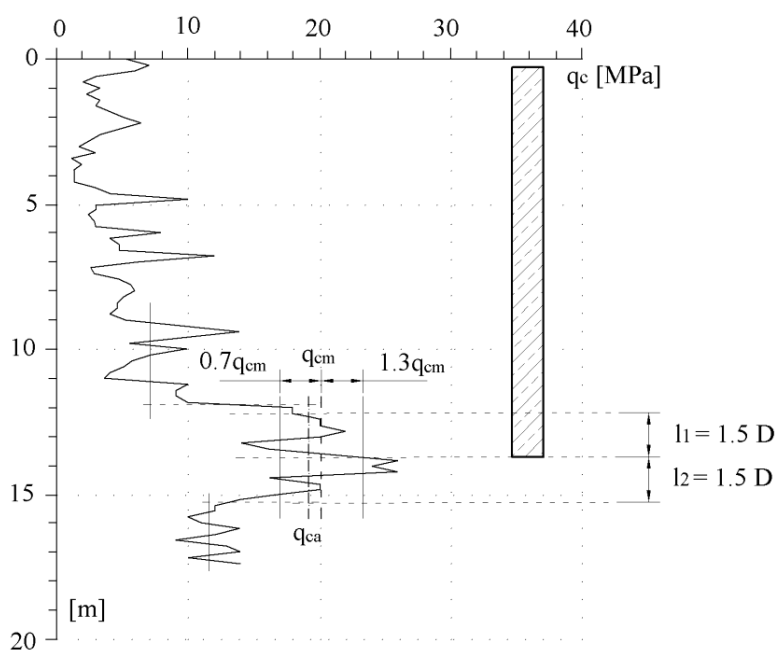
$\alpha$  - współczynnik tarcia uwzględniający stan i rodzaj gruntu, oraz materiał pala,

Tablica 4.20. Wartość współczynników  $\alpha$  oraz  $k_c$  (1982) [27].

Rodzaj gruntu	$q_c$ [MPa]	$k_c$	$\alpha$	Max $p_{shaft}$ [kPa]
spoisłe	$q_c < 1$	0,4	30	15
	$1 < q_c < 5$	0,35	40	80
	$q_c > 5$	0,45	60	80
niespoisłe	$q_c < 5$	0,40	60	35
	$5 < q_c < 12$	0,40	100	120
	$q_c > 12$	0,30	150	150

Tablica 4.21. Zależność współczynnika  $\alpha$  i oporu na stożku, materiału pala, stanu gruntu [27].

Stan gruntu	$q_c$ [MPa]	Rodzaj pala			
		$\alpha_{LCPC}$		Max $p_{shaft}$ [kPa]	
		Pal betonowy	Pal stalowy	Pal betonowy	Pal stalowy
luźny	$q_c < 5$	60	120	35	35
średnio zagęszczony	$5 < q_c < 12$	100	200	80	80
zagęszczony i bardzo zagęszczony	$q_c > 12$	150	200	120	120

Rys. 4.19. Sposób wyznaczania średniej wartości  $q_c$  pod podstawą pala w metodzie LCPC [11], [27].

Całkowita obliczeniowa nośność pala:

$$Q = \frac{Q_s}{2} + \frac{Q_t}{3} \quad (49)$$

gdzie:

$Q_s$  - nośność charakterystyczna pobocznicy,

$Q_t$  - nośność charakterystyczna podstawy.

Wyznaczona, na podstawie metody Gwizdały-Stęczniewskiego i metody LCPC, wartość nośności jest wartością krytyczną zapewniającą bezpieczną pracę pali. Zakłada się, że wartości nośności krytycznej odpowiadają osiadania równe  $0.02D \div 0.05D$ , gdzie  $D$  jest średnicą pala [9], [11].

## 5. PRÓBNE OBCIĄŻENIA STATYCZNE

### 5.1. Ogólna charakterystyka próbnych obciążeń statycznych.

Próbne obciążenia pali wykonuje się głównie jako badania weryfikacyjne. Badanie wykonuje się w celu:

- kontroli nośności pali, zakładanych w projekcie;
- kontroli jakości zastosowanych materiałów, z których wykonane są pale;
- kontroli jakości wykonanych robót palowych;
- określenia współpracy pali z ośrodkiem gruntowym.

Stosuje się trzy rodzaje próbnych obciążeń:

- próbne obciążenia statyczne;
- próbne obciążenia dynamiczne ;
- badanie typu STATNOMIC ( nie jest uwzględnione w PN-EN 1997-1:2008).

Konstrukcje badawcze mogą mieć charakter balastowy, kotwiony bądź mieszany. Poniżej przedstawiono schematy stanowisk badania pali próbnym obciążeniem statycznym.

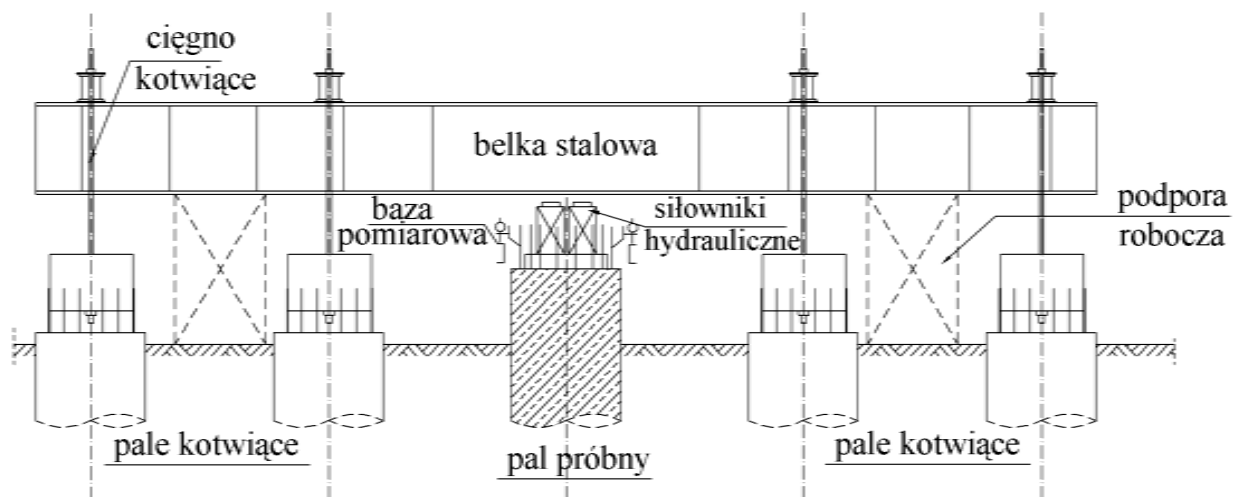
W przywołanej normie brakuje opisu wykonywania badania. Próbne obciążenia powinny być przeprowadzone, gdy:

- stosujemy nowe rodzaje pali lub nowe technologie ich wykonania, dla których brakuje porównywalnych doświadczeń;
- wykonujemy pale w odmiennych warunkach gruntowych; w których wcześniej nie wykonywano badania;
- pale będą poddane oddziaływaniu, dla którego wyniki uzyskane na podstawie teorii i wcześniejszych doświadczeń nie zapewniają odpowiedniej pewności;
- obserwacje podczas wykonania wskazują na zachowanie się pala, odbiegające od przewidywanego.

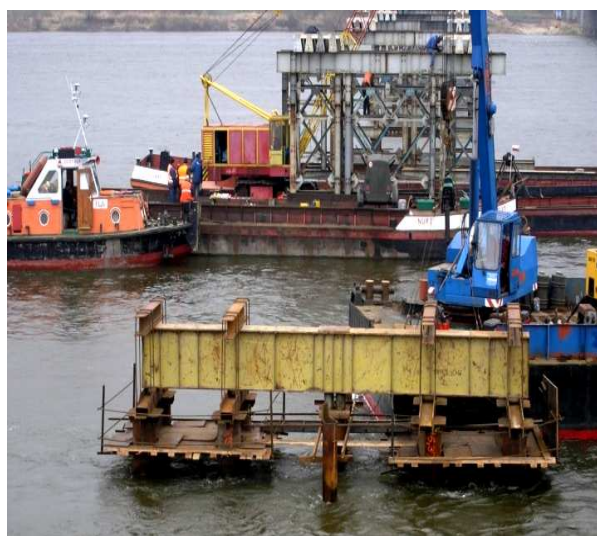
Rozmieszczenie badań powinno być reprezentatywne dla całego fundamentu, a w przypadku, gdy badanie wykonywane jest tylko dla jednego pala należy wybrać jego usytuowanie w miejscu, gdzie spodziewane są najbardziej niekorzystne warunki.

Ustalenie liczby pali, które zostaną zbadane, powinna w pełni zweryfikować założenia projektu, należy przy tym kierować się:

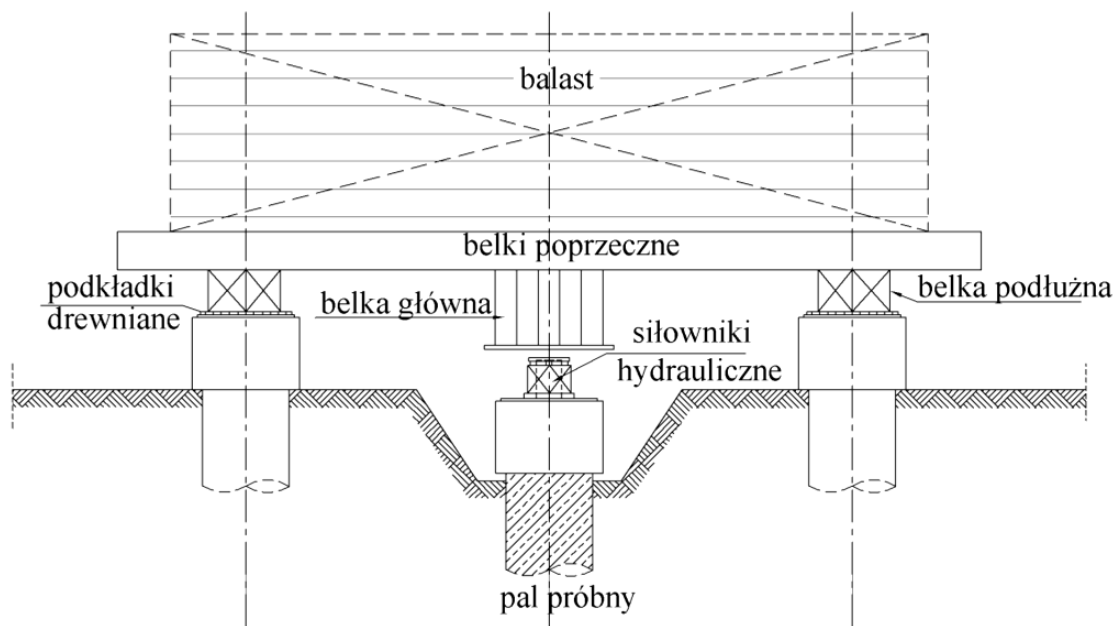
- warunkami gruntowymi;
- kategorią geotechniczną obiektu;
- bazą danych, zawierającą udokumentowane wcześniej badania w podobnych warunkach dla tego samego typu pali;
- całkowitą liczbą pali i ich rodzajem.



Rys. 5.20. Stanowisko kotwione do próbnego obciążenia statycznego.



Fot. 5.7. Próbné obciążenie statyczne – stanowisko kotwione.

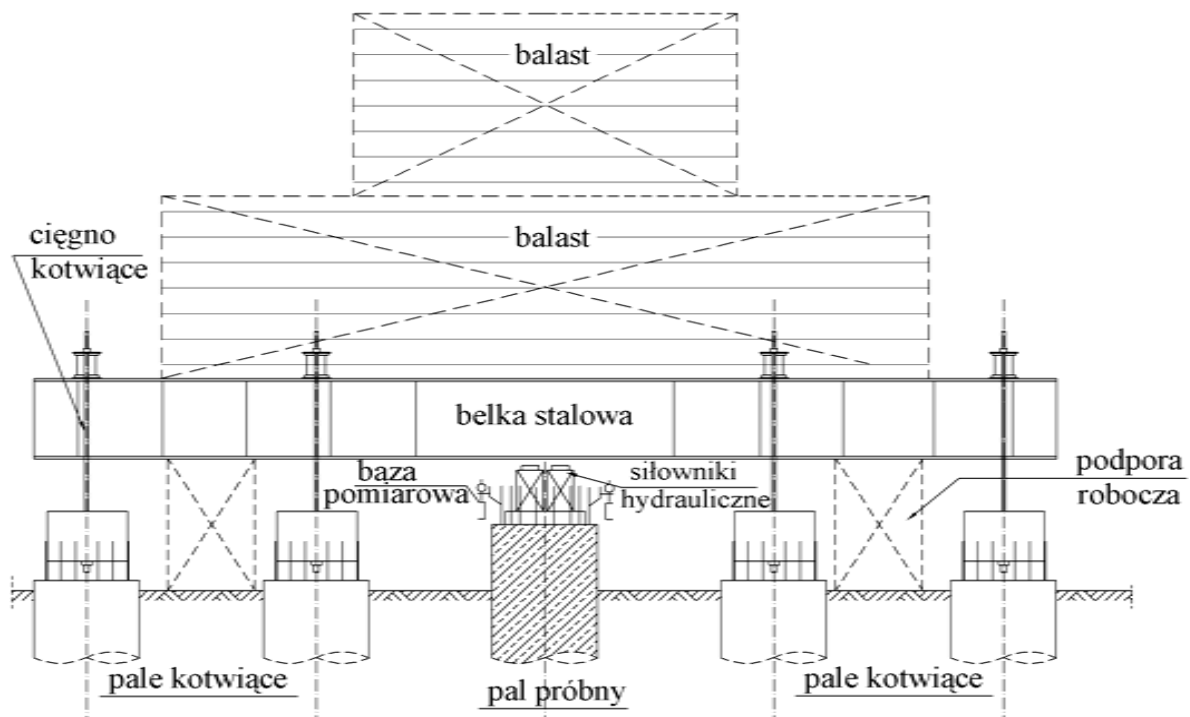


Rys. 5.21. Stanowisko balastowe do próbnego obciążenia statycznego.



Fot. 5.8. Próbné obciążenie statyczne – stanowisko balastowe.





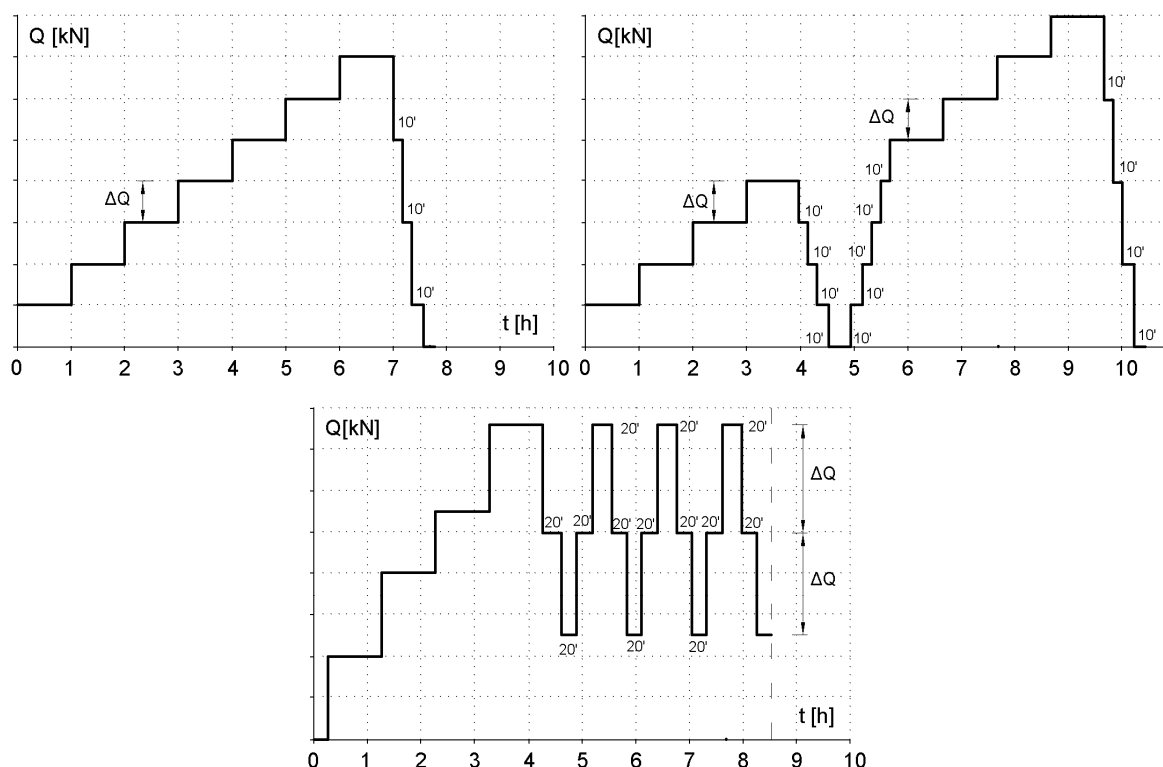
Rys. 5.22. Stanowisko mieszane balastowo - kotwione do próbnego obciążenia statycznego.



Fot. 5.9. Próbné obciążenie statyczne - stanowisko balastowo-kotwione.



W kwestii procedury obciążania pali, liczby stopni obciążeń i czasu ich trwania w normie PN-EN 1997-1:2008 nawiązano do wytycznych zawartych w ASTM oraz ISSMFE.



Rys. 5.23. Zasady obciążeń statycznych według ISSMFE 1985 - zalecane przez PN-EN 1997-1:2008 [11].

Podstawowym wymogiem dla próbnych obciążeń statycznych jest, aby umożliwiły one interpretację wyników w odniesieniu do zjawisk odkształceń, pełzania i odprężenia fundamentu palowego. Badanie należy przeprowadzać tak długo, aż pozwoli ono określić nośność graniczną pala.

Nośność pali oceniać można na podstawie próbnych obciążeń dynamicznych. Terminem „próbne obciążenie dynamiczne” definiuje się wszelkie metody badawcze pali, które wykorzystują fizyczne zjawiska dynamiczne. Badanie opiera się na analizie generowanych naprężeń w głowicy i trzonie pala spowodowanych wymuszeniem w postaci uderzenia spadającej masy. Obecnie stosuje się szereg metod, różniących się od siebie zakresem zastosowania. Wyróżniamy cztery grupy badań dynamicznych:

Tab. 5.22. Metody dynamiczne badania pali [7].

Metody dynamiczne badania pali					
Wysokonapężeniowe (nośność pali)	Niskonapężeniowe (ciągłość i długość pali)	Wysokonapężeniowe - kinetyczne		Wzory dynamiczne  W zależności od technologii wbijania i warunków lokalnych	
Uderzeniowe: DLT, PDA	Uderzeniowe: SIT, PIT	O przedłużonym czasie uderzenia			
Wibracyjne	Ultradźwiękowe	STATNAMIC	PSPLT		DYNATEST
	Wibracyjne				

Do oceny nośności pali fundamentowych najczęściej stosowana jest metoda DLT (Dynamic Load Testing). Polega na wykorzystaniu zjawiska rozchodzenia się fali naprężeń w palu wywołanych uderzeniem młota lub bijaka. Za pomocą zamontowanych czujników, na głowicy pala, następuje pomiar przyspieszenia i naprężeń. Zarejestrowane wielkości po przetworzeniu umożliwiają stworzenie modelu analitycznego układu *Młot – Pal – Grunt* i określenie nośności badanego pala oraz zależność obciążenie – osiadanie.



Fot. 5.10. Badanie nośności pali metodą DLT [2].

Kolejny rodzaj badania nośności pali to metoda kinetyczna STATNAMIC. W normie nie znajdziemy bezpośrednio adnotacji dotyczącej tej metody, jednak jest ona uznawana za pośrednią między obciążeniem statycznym i dynamicznym, czasami za rodzaj badania dynamicznego [14]. Głównymi wielkościami, analizowanymi w tej metodzie, jest siła oraz przemieszczenie głowicy pala, generowane po detonacji ładunku wybuchowego. STATNAMIC stosowana jest do określania nośności pali pionowych, ukośnych, grup palowych, pali wykonywanych na wodzie oraz do badań pali obciążonych siłami poziomymi.



Fot. 5.11. Badanie nośności pali metodą PSPLT i STATNAMIC [68].

W wytycznych zawartych w normie próbne obciążenie dynamiczne ma charakter metody alternatywnej określania nośności pali. Każdorazowo przystępując do projektowania na podstawie wyników próbnego obciążenia dynamicznego konieczne jest przeprowadzenie badań podłoża oraz skalibrowanie metody próbnym obciążeniem statycznym, tego samego rodzaju pala, o tych samych parametrach geometrycznych i w podobnych warunkach gruntowych. Jako samodzielne badanie, próbne obciążenie dynamiczne, może być stosowane w celu określenia wskaźnika powtarzalności cech pali i jako metoda wykrywania pali słabych. Preferowaną, przez PN-EN 1997-1:2008, procedurą przeprowadzania badania są wytyczne zaproponowane w normie ASTM Designation D 4945, Standard Test Method for High – Strain Dynamic Testing of Piles.

## 5.2. Metody interpretacji próbných obciążeń statycznych

- **PN-83/B-02482 [52]**

Według normy PN-83/B-02482 liczba wykonywanych badań próbnego obciążenia statycznego zależy od całkowitej liczby pali pod projektowanym obiektem:

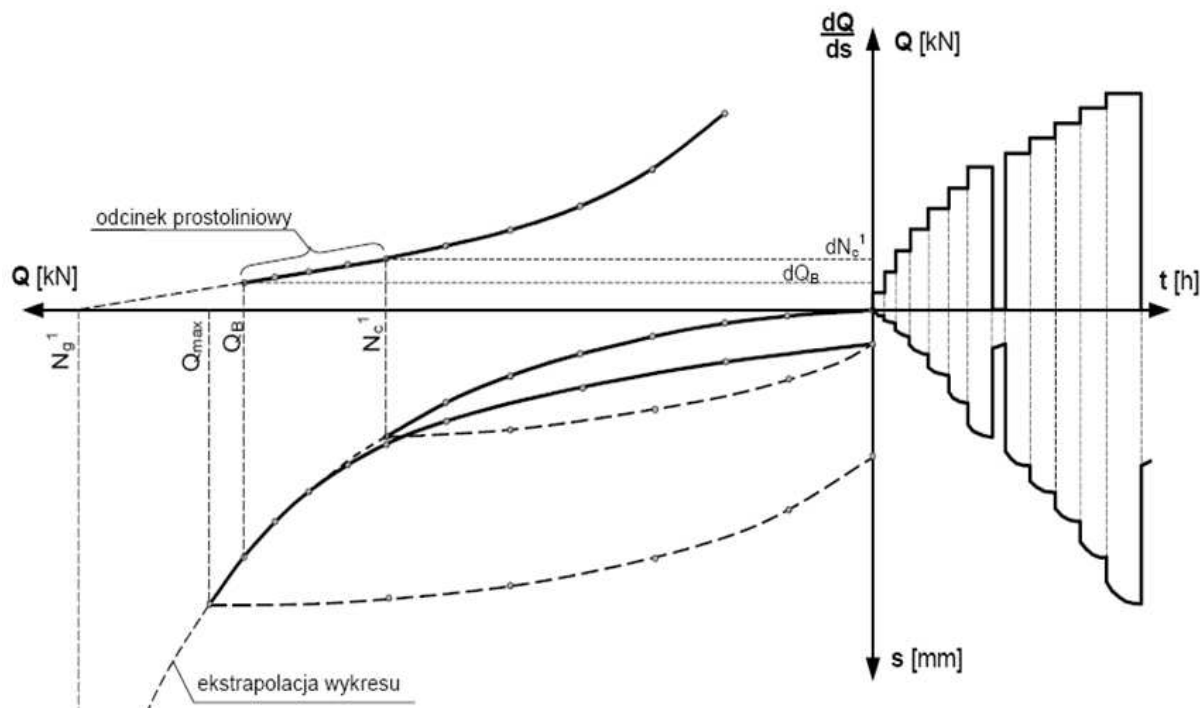
Tablica 5.23. Sposób określania liczby pali do próbnego obciążenia statycznego [52].

Lp.	Liczba pali pod obiektem	Liczba pali przeznaczona do próbnego obciążenia
1	$n_0 < 25$	1
2	$25 \leq n_0 \leq 100$	2
3	$> 100$	$2+n^*$
n* - liczba każdej rozpoczętej setki pali ponad 100		

Wartość siły próbnego obciążenia przykładana jest do pala stopniowo a przyrost powinien wynosić od 1/8 do 1/12 nośności pala, bez względu czy jest to badanie na palu wciskany czy wyciągany. Dokładną wartość przyrostu siły należy dobrać w taki sposób, aby uzyskać co najmniej 10 stopni obciążenia. Każdorazowo obciążenia utrzymujemy dopóki, dopóty nie dojdzie do stabilizacji przemieszczeń pala. Po osiągnięciu siły odpowiadającej nośności projektowanej i stabilizacji przemieszczeń przykładana się do badanego pala obciążenie całkowite a następnie przywraca się wartość wcześniejszą. Po osiągnięciu wartości siły maksymalnej, która wynosi:

- $Q_{\max} \geq 1,5N_t$  – w przypadku próbnego obciążenia na wciskanie, gdzie  $N_t$  jest projektowaną nośnością pala na wciskanie;
- $Q_{\max} \geq 1,8N^w$  – w przypadku próbnego obciążenia na wyciąganie, gdzie  $N^w$  jest projektowaną nośnością pala na wyciąganie;
- $H_{\max} \geq 1,5H_r$  – w przypadku próbnego obciążenia na działanie sił poziomych, gdzie  $H_r$  jest przyjętym w projekcie obciążeniem poziomym; podobnie jak wcześniej, obciąża się pal całkowicie i odczytuje wartość przemieszczenia trwałego końcowego.

Na podstawie wyników próbnego obciążenia określa się zależność osiadanie - obciążenie oraz wykresy obciążenia i osiadania w czasie. Następnie wykreśla się krzywą  $dQ/ds$  i wyznacza wartości sił:  $N_c^1$  oraz  $N_g^1$ .



Rys. 5.24. Wykres zależności uzyskiwany na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego według PN-83/B-02482.

Jeżeli:

- $N_c^1 / N_g^1 \geq 0,4$  – krzywa typu „a”, przyjmuje się  $N_c^0 = N_c^1$  i  $k=1,0$ ;
  - $N_c^1 / N_g^1 < 0,4$  – krzywa typu „b”, przyjmuje się  $N_c^0 = Q_{max}$  i  $k=0,8$ ;
  - brak odcinka prostoliniowego na krzywej  $dQ/ds$  – przyjmuje się  $N_c^0 = Q_{max}$  i  $k=0,9$ .
- Nośność pala sprawdza się wzorem:

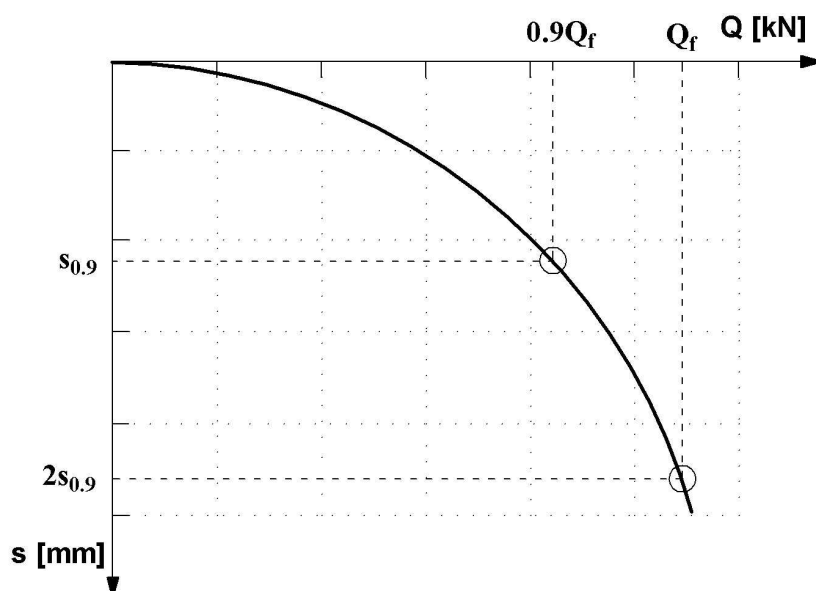
$$N = Q_r \leq k \cdot N_c^0 \quad (50)$$

a osiadania weryfikujemy zależnością:

$$S(Q_r) \leq S_{dop} \quad (51)$$

#### • Metoda Brinch - Hansena [27]

Metoda 90% (1963) - punkt graniczny na krzywej Q-s jako obciążenie, które powoduje przemieszczenie dwa razy większe niż przemieszczenie spowodowane przez 90% tego obciążenia (Rys. 5.25). Metoda szeroko stosowana w krajach skandynawskich ( Swedish Pile Commission, 1970 )



Rys. 5.25. Definicja obciążenia granicznego w metodzie B-H 90%.

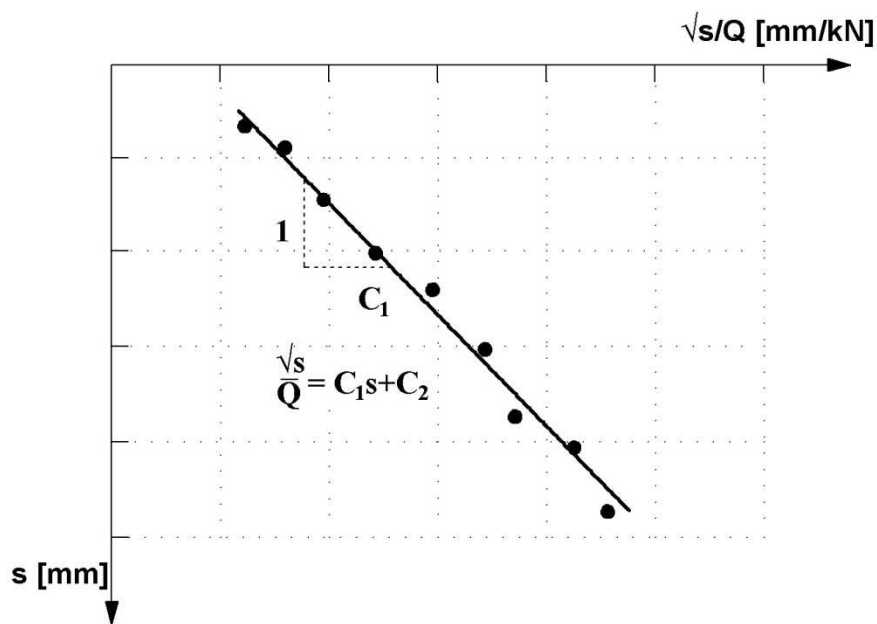
W celu zastosowania metody interpretacji do badania statycznego metodą wolnych stałych stopni obciążenia (Slow ML test) i metodą szybkich stałych stopni obciążenia ( Quick ML test) , Brinch Hansen zasugerował metodę 80 %. Wymaga ona jednak badania wykraczającego poza pracę sprężystą pala. W tej metodzie obciążenie graniczne jest definiowane jako obciążenie które powoduje 4 krotnie większe wyężenie niż 80% tego obciążenia. Obciążenie graniczne  $Q_f$  oraz odpowiadające mu przemieszczenie  $s_f$  jest zdefiniowane na podstawie hiperbolicznej zależności przekształconej krzywej Q-s. (Rys. 5.26). Krzywą wykreślono z zależności pomiędzy  $\sqrt{s}/Q$  i  $s$  , gdzie  $s$ - przemieszczenie ,  $Q$  – obciążenie.

Obciążenie graniczne  $Q_f$ :

$$Q_f = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}} \quad (52)$$

Przemieszczenie graniczne:

$$s_f = \frac{C_2}{C_1} \quad (53)$$

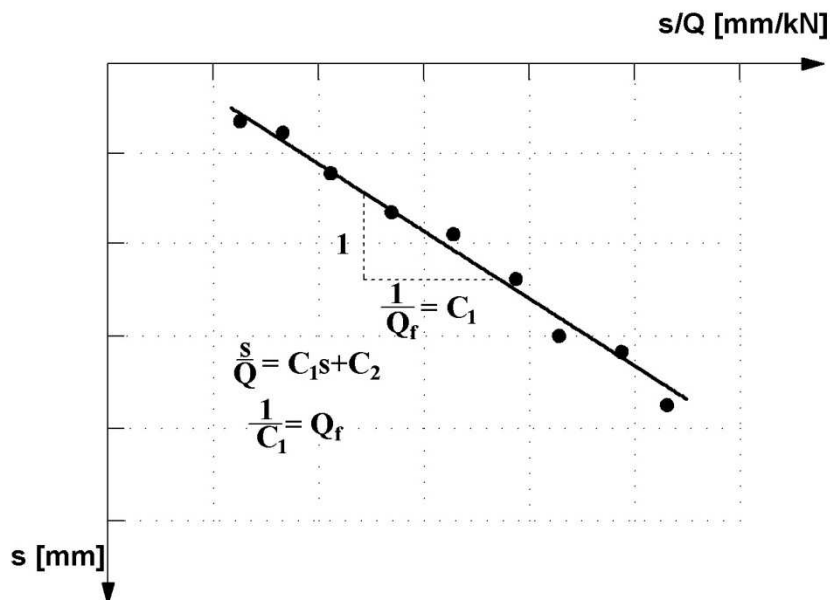


Rys. 5.26. Definicja obciążenia granicznego w metodzie B-H 80%.

- **Metoda China [27]**

Metoda China (1963) bazuje na założeniu, że krzywa  $Q$ - $s$  dla pala jest w przybliżeniu hiperboliczna.

Obciążenie graniczne  $Q_f$  jest zdefiniowane jako odwrotność nachylenia prostej  $Q_f = 1/C_1$  (Rys. 5.27)



Rys. 5.27. Definicja obciążenia granicznego w metodzie China

Metodę China można stosować do wyników badań wykonanych metodą wolnych stałych stopni obciążenia (Slow ML test) i metodą szybkich stałych stopni obciążenia (Quick ML test).

- **Metoda Davissona [27]**

Metoda Davissona (1972) - obciążenie krytyczne pala zdefiniowano jako obciążenie, które powoduje przemieszczenie równe sumie sprężystego odkształcenia pala oraz odkształcenia empirycznego zależnego od geometrii pala:

$$s_f = \frac{QL}{AE} + 0.00381 \cdot B_R + \frac{1}{3.05} \cdot \frac{D}{B_R} \quad (54)$$

gdzie :

$s_f$ - przemieszczenie graniczne

Q- przyłożone obciążenie

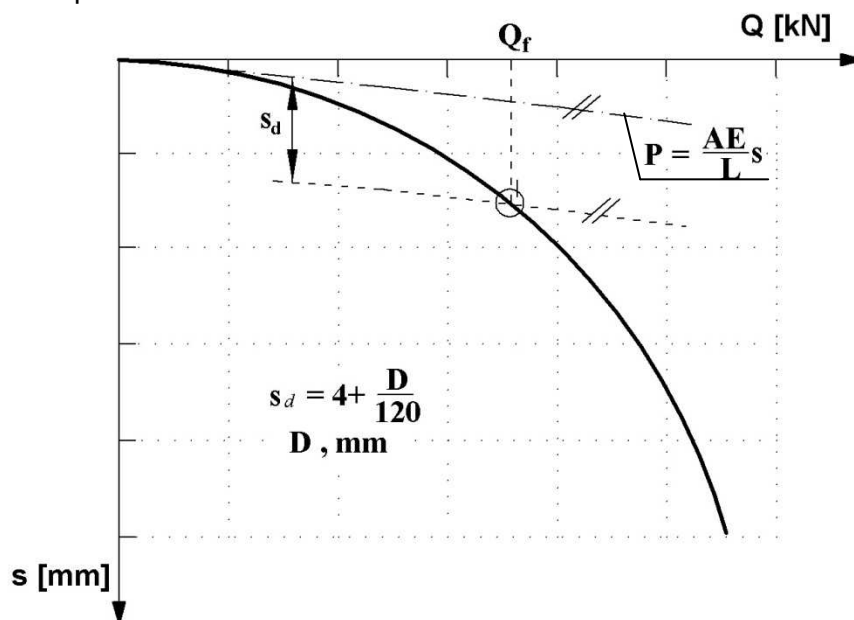
L- długość pala

E- moduł Younga pala

A – pole powierzchni pala

$B_R$ - długość referencyjna równa 1.0m

D- średnica pala

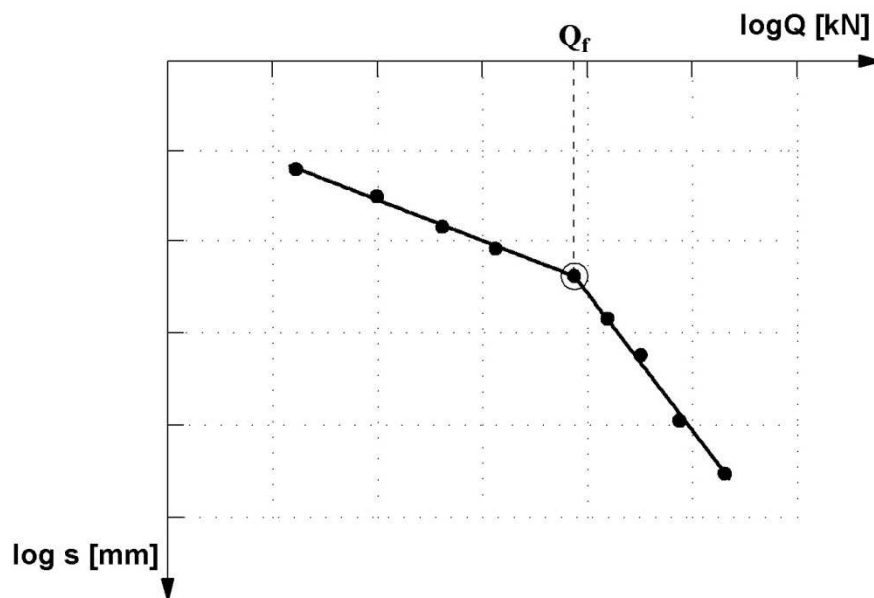


Rys. 5.28. Definicja obciążenia krytycznego w metodzie Davissona

Metoda Davissona daje najlepsze wyniki dla badania metodą szybkich stałych stopni obciążenia ( Quick ML test).

- **Metoda De Beera [27]**

Metoda De Beera (1967) - obciążenie krytyczne jako obciążenie, które odpowiada punktowi maksymalnej krzywizny na krzywej Q-s. Metoda zaproponowana dla badania statycznego metodą wolnych stałych stopni obciążenia. W tej metodzie krzywa Q-s została wykreślona w podwójnej skali logarytmicznej, natomiast obciążenie graniczne odpowiada punktowi przecięcia prostych.

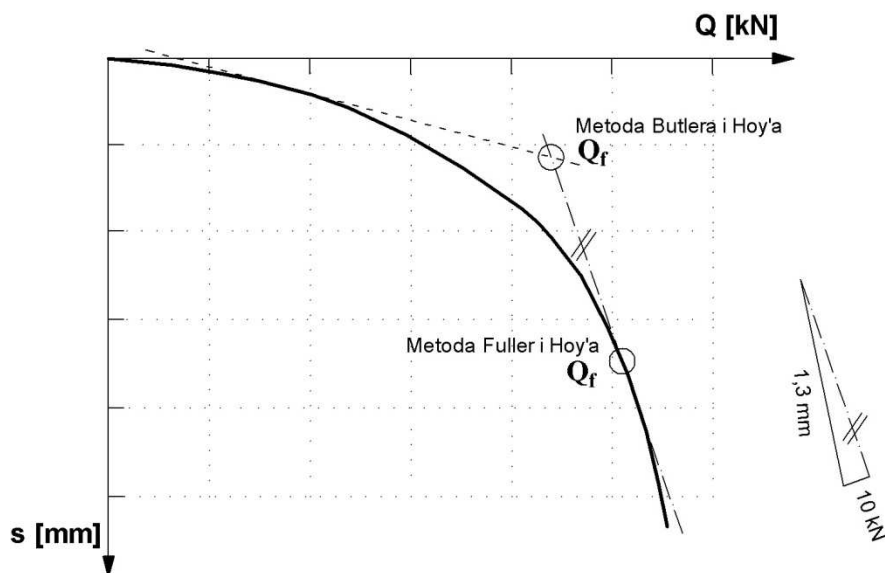


Rys. 5.29. Definicja obciążenia krytycznego w metodzie De Beera

- **Metoda Nordluna, Fullera oraz Hoya [27]**

W metodzie Nordluna, Fullera oraz Hoya (1970) obciążenie graniczne określa się na podstawie dwóch prostych, stycznych do krzywej Q-s. Pierwsza linia styczna to linia sprężystego ściskania, druga styczna, do krzywej Q-s nachylona jest w stosunku 1,3mm na 10kN. Obciążenie graniczne jest w punkcie przecięcia drugiej stycznej z krzywą Q-s (Rys. 5.30).

Butler i Hoy (1977) definiują obciążenia krytyczne jako punkt przecięcia dwóch stycznych (Rys.5.30) .



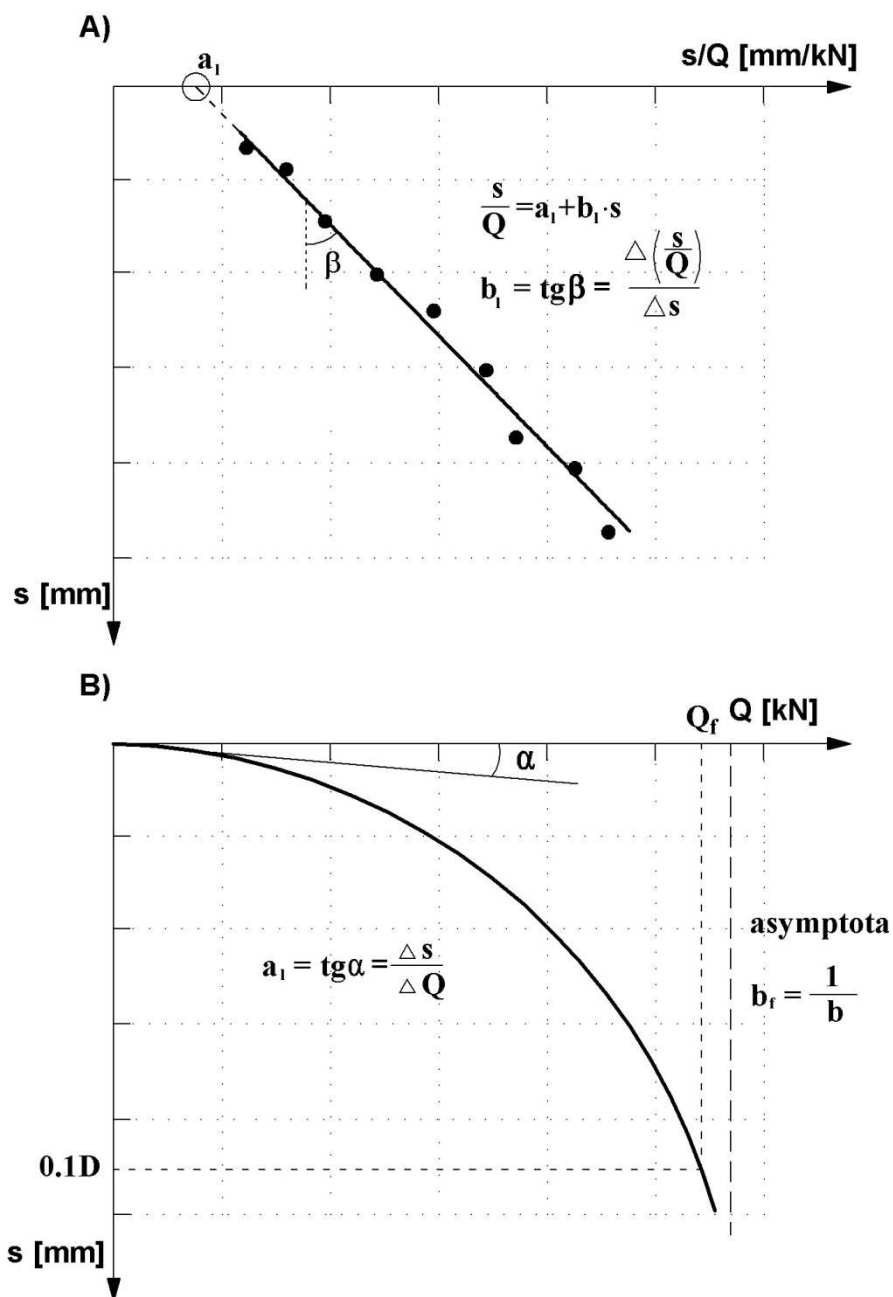
Rys. 5.30. Definicja obciążenia krytycznego w metodzie Nordlunda, Fullera i Hoya.



- **Metoda zmodyfikowanej hiperboli Gwizdały [14]**

W metodzie zmodyfikowanej hiperboli na podstawie pomiarów terenowych określa się parametry pomocnicze  $a_1$  i  $b_1$  (rys 5.31.A, B) wykorzystując wartości obciążenia  $Q$  i osiadań  $s$ . Wykorzystując parametry pomocnicze wyznacza się asymptotę  $b_f$  krzywej o równaniu:

$$Q(s) = \frac{s}{a_1 + b_1 \cdot s} \quad (55)$$

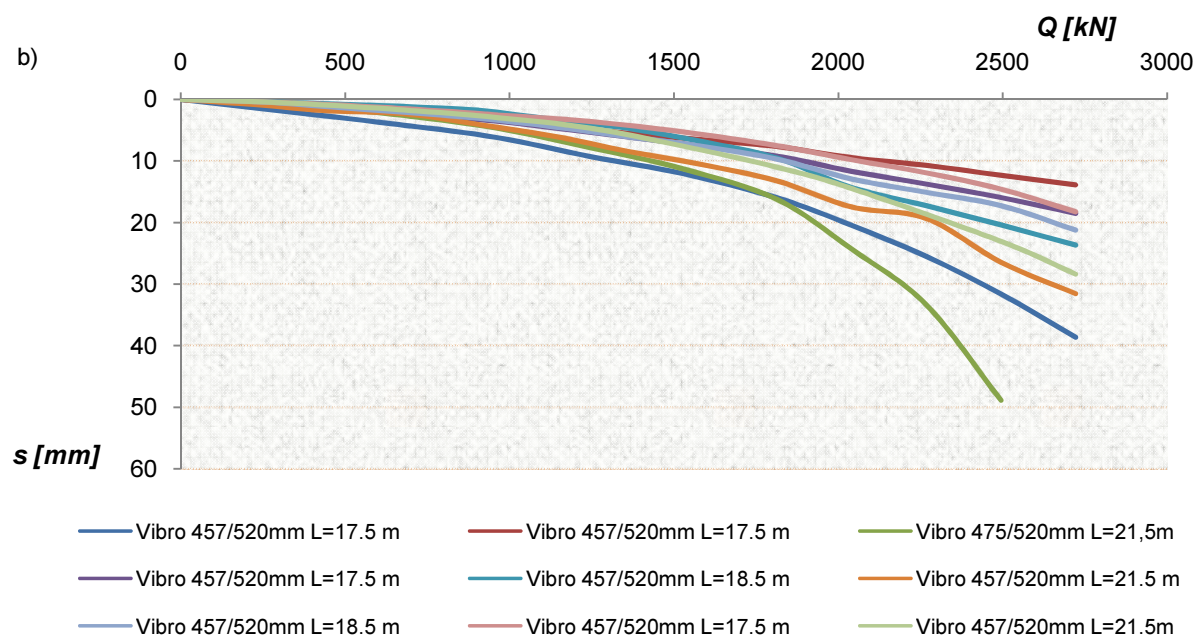
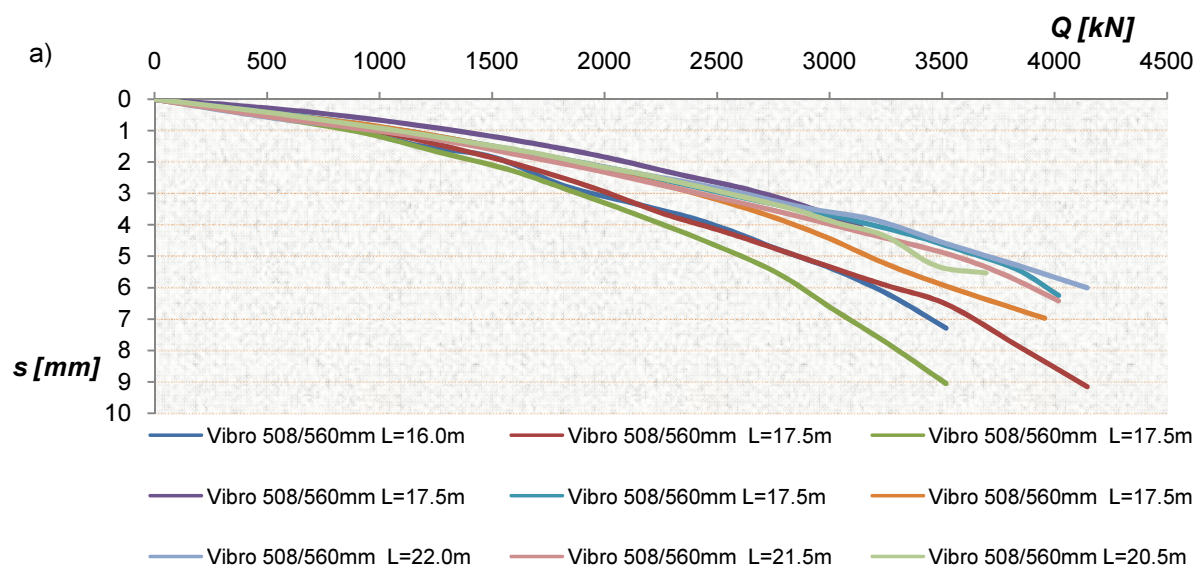


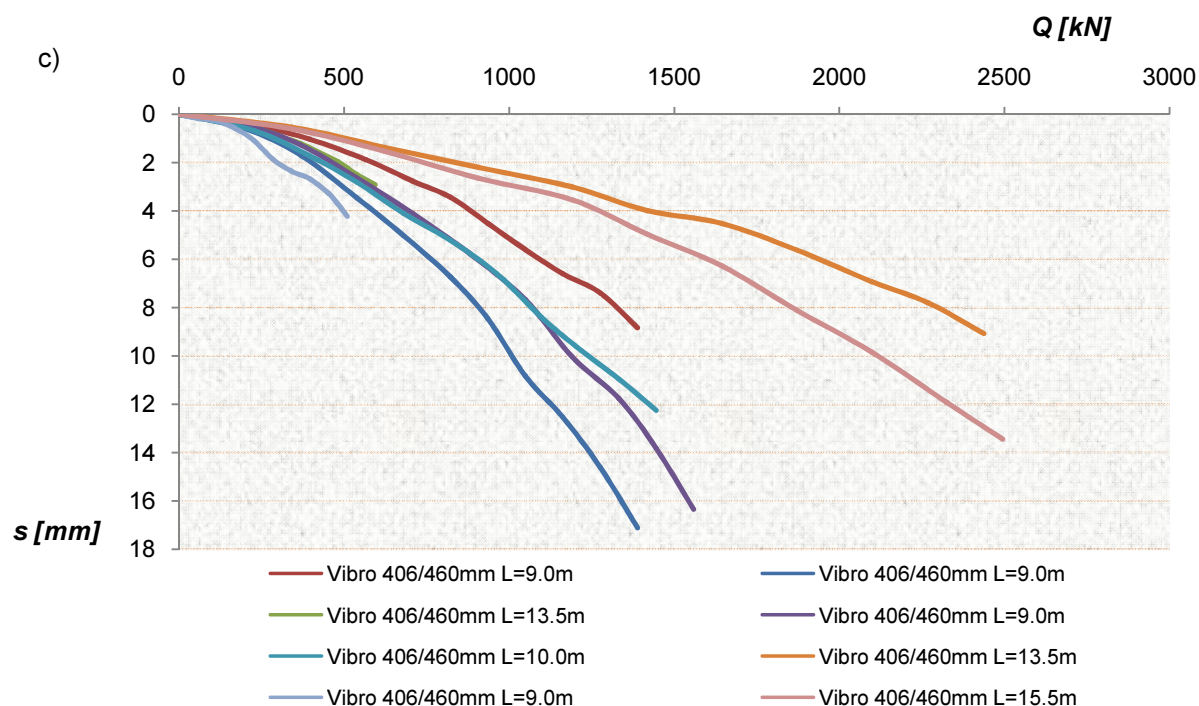
Rys. 5.31. Założenia do metody zmodyfikowanej hiperboli A) parametry pomocnicze krzywej, B) krzywa ogólna.

## 6. METODA PROGNOZOWANIA KRZYWEJ Q-S NA PODSTAWIE CPT

### 6.1. Założenia i opis proponowanej metody

Analizę wykonano na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych przeprowadzonych dla pali Vibro o średnicach: 406/460mm, 457/520(510)mm, 508/560mm, 610/660mm oraz długości  $L=9.0\div 22.0$ m. Poniżej zestawienie charakterystyk Q-s dla pali o różnych średnicach:





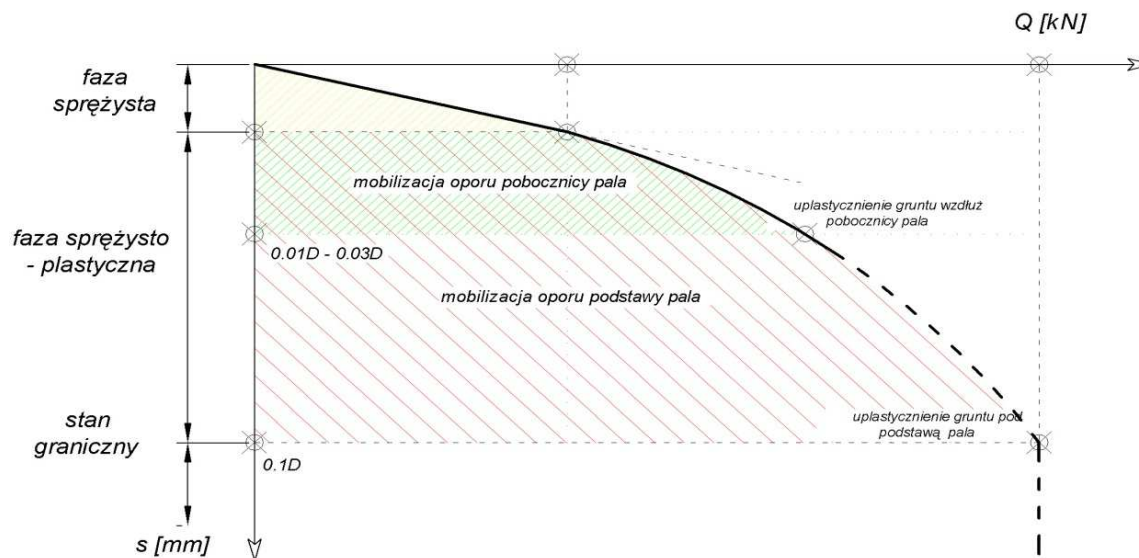
Rys. 6.32. Charakterystyki Q-s dla pali Vibro o średnicy a) 508/560mm; b) 457/520mm; c) 406/460mm;

Tablica 6.24. Lokalizacja i zestawienie obiektów posadowionych na palach Vibro, liczba próbnych obciążeń statycznych oraz badania podłoża gruntowego.

Lokalizacja obiektów	Ozn.	Opis	Liczba pali	Badanie podłoża		
	1	Hajnówka, podpory mostu przez rz. Leśna	4	OG		
	2	Szczecin, Nab. Katowickie, baza magazynowo-przeładunkowa	9	CPT, OG		
	3	Olsztynek - Nidzica, droga eksp. S7, wiadukt drogowy WD-15 i WD-16,	44	OG		
	4	Szczecin, zakład produkcji i montażu konstrukcji stalowych	4	CPT, OG		
	5	Szczecin, Nabrże Słowackie, silosy zbożowe	13	OG		
	6	Grudziądz, autostrada A1, estakada mostu MA-91,	2	CPT, OG		
	7	Grudziądz, autostrada A1, wiadukt drogowy WD-95,	14	CPT, OG		
	8	Gdańsk, Trasa Sucharskiego wiadukty drogowe WD-7 i WD-8	9	CPT, OG		
	9	Wrocław, autostrada A8, estakady E-1 i E-3, most przez rz. Odre	16	CPT, OG		
	10	Szczecin, terminal LPG	3	CPT, OG		
Podsumowanie:	Liczba pali: 118 szt.		Pale Vibro + CPT: 57 szt.		Pale Vibro + OG: 61 szt.	
CPT - sondowanie statyczne sondą CPT,		OG - odwiert geotechniczny				



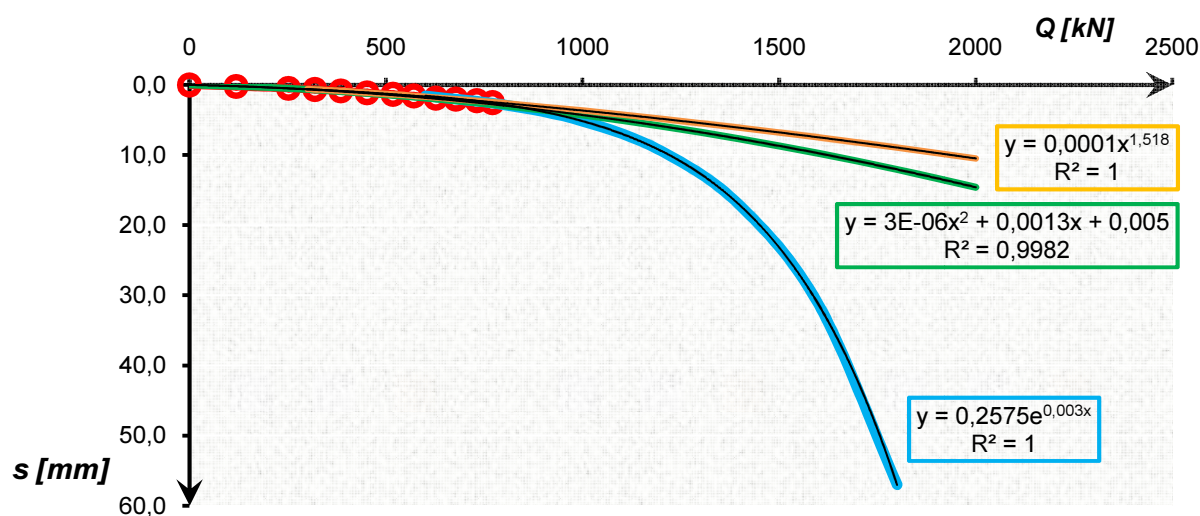
Pale Vibro, których podstawa znajduje się w gruntach niespoistych zagęszczonych i średnio zagęszczonych ( $I_D \geq 0.5$ ,  $q_c \geq 8,0\text{MPa}$ ), charakteryzują się bardzo dobrą nośnością. W takich warunkach gruntowych charakterystyka Q-s, określona na podstawie próbnego obciążenia statycznego, składa się z liniowej fazy sprężystej współpracy pal - grunt, oraz nieliniowej fazy sprężysto-plastycznej, która może wskazywać rzeczywisty przebieg pełnej krzywej Q-s do poszukiwanej wartości nośności granicznej i osiadania granicznego.



Rys. 6.33. Charakterystyka współpracy pala z podłożem gruntowym.

Zakłada się, że wraz ze wzrostem obciążenia następuje mobilizacja oporów gruntu wzdłuż poboczniczy pala do wartości maksymalnej odpowiadającej osiadaniom pala równym  $0.01D \div 0.03D$ . Po uplastycznieniu się gruntu wzdłuż poboczniczy obciążenie przenoszone jest przez podstawę pala. Według wytycznych aktualnej normy PN-EN:1997-2008, wartość graniczną nośności przyjmujemy dla osiadań  $0.1D$ .

Uwzględniając powyższe założenia dokonano interpretacji krzywych Q-s, wydzielając fazę sprężystą o charakterystyce liniowej, oraz nieliniową fazę sprężysto-plastyczną. W celu uzyskania opisu matematycznego krzywych, każdą z faz przedstawiono w postaci funkcji liniowej:  $s(Q) = tg\alpha \cdot Q$ ; i funkcji wykładniczej:  $s(Q) = s \cdot e^{-\lambda Q}$ , wykorzystując do opisu linię trendu krzywej rzeczywistej.



Rys. 6.34. Przykładowa linia trendu dla wyników SPLT.

Przykładowe równania opisujące zależność Q-s na podstawie opisanej procedury przedstawiono w tabelicy poniżej. Otrzymane równania określono dla rzeczywistych charakterystyk pali:

Tabela 6.25. Przykładowe równania analitycznej krzywej Q-s.

Nr pala	Geometria pala			Funkcja s(Q)	
	D	D <sub>b</sub>	L	funkcja wykładnicza	funkcja liniowa
	[mm]	[mm]	[m]	s(Q)=s·e <sup>λQ</sup>	s(Q)=tgα·Q
1.1	508	560	7,5	s(Q) = 0,42 · e <sup>0,0023 Q</sup>	s(Q) = 0,00263 · Q
1.2	508	560	7,5	s(Q) = 0,20 · e <sup>0,0035 Q</sup>	s(Q) = 0,00190 · Q
1.3	508	560	7,5	s(Q) = 0,47 · e <sup>0,0025 Q</sup>	s(Q) = 0,00319 · Q
1.4	508	560	7,5	s(Q) = 0,23 · e <sup>0,0029 Q</sup>	s(Q) = 0,00181 · Q
2.1	457	520	17,5	s(Q) = 2,87 · e <sup>0,0007 Q</sup>	s(Q) = 0,00546 · Q
2.2	457	520	17,5	s(Q) = 3,00 · e <sup>0,0009 Q</sup>	s(Q) = 0,00734 · Q
2.3	457	520	17,5	s(Q) = 2,98 · e <sup>0,0006 Q</sup>	s(Q) = 0,00486 · Q
2.4	457	520	18,5	s(Q) = 3,50 · e <sup>0,0007 Q</sup>	s(Q) = 0,00666 · Q
2.5	457	520	18,5	s(Q) = 2,54 · e <sup>0,0008 Q</sup>	s(Q) = 0,00553 · Q
2.6	457	520	18,5	s(Q) = 1,46 · e <sup>0,0009 Q</sup>	s(Q) = 0,00357 · Q
2.7	457	520	21,5	s(Q) = 2,21 · e <sup>0,0010 Q</sup>	s(Q) = 0,00601 · Q
2.8	457	520	18,5	s(Q) = 0,88 · e <sup>0,0016 Q</sup>	s(Q) = 0,00383 · Q
2.9	457	520	21,5	s(Q) = 1,85 · e <sup>0,0010 Q</sup>	s(Q) = 0,00502 · Q
3.1	610	660	11	s(Q) = 0,55 · e <sup>0,0006 Q</sup>	s(Q) = 0,00090 · Q
3.2	610	660	11	s(Q) = 0,66 · e <sup>0,0005 Q</sup>	s(Q) = 0,00090 · Q
3.3	610	660	13	s(Q) = 0,53 · e <sup>0,0005 Q</sup>	s(Q) = 0,00073 · Q
3.4	610	660	7	s(Q) = 0,81 · e <sup>0,0005 Q</sup>	s(Q) = 0,00110 · Q
3.5	610	660	10	s(Q) = 0,52 · e <sup>0,0005 Q</sup>	s(Q) = 0,00071 · Q
3.6	610	660	5,5	s(Q) = 0,84 · e <sup>0,0006 Q</sup>	s(Q) = 0,00137 · Q
3.7	610	660	7	s(Q) = 0,56 · e <sup>0,0007 Q</sup>	s(Q) = 0,00107 · Q
3.8	610	660	7,7	s(Q) = 0,32 · e <sup>0,0010 Q</sup>	s(Q) = 0,00088 · Q
3.9	610	660	9	s(Q) = 0,26 · e <sup>0,0009 Q</sup>	s(Q) = 0,00063 · Q
3.10	610	660	10,5	s(Q) = 0,45 · e <sup>0,0009 Q</sup>	s(Q) = 0,00109 · Q

Zgodnie z przyjętymi założeniami faza sprężysta współpracy pala z ośrodkiem gruntowym opisana jest zależnością:

$$s(Q) = \text{tg}\alpha \cdot Q = \frac{s_s''}{Q_s} \cdot Q \quad (56)$$

gdzie:

$\text{tg}\alpha \approx \alpha$  - współczynnik kierunkowy funkcji liniowej, opisującej fazę sprężystą współpracy pal - grunt;

$Q$  - obciążenie pionowe działające osiowo na głowicę pala, [kN].

$$\text{tg}\alpha = \frac{s_s''}{Q_s} \quad (57)$$

$s_s''$  - wartość osiadań pala w punkcie przejścia krzywej  $Q$ - $s$  z fazy sprężystej w fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal - grunt, [mm].

$Q_s$  - wartość przyłożonego obciążenia powodująca osiadania  $s_s''$ , obciążenie inicjujące fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal-grunt [kN];

$\frac{s_s''}{Q_s}$  - podatność ośrodka gruntowego w fazie sprężystej współpracy pal - grunt, [mm/kN].

Faza sprężysto-plastyczna opisana jest zależnością:

$$s(Q) = s' \cdot e^{\lambda \cdot Q} \quad (58)$$

gdzie:

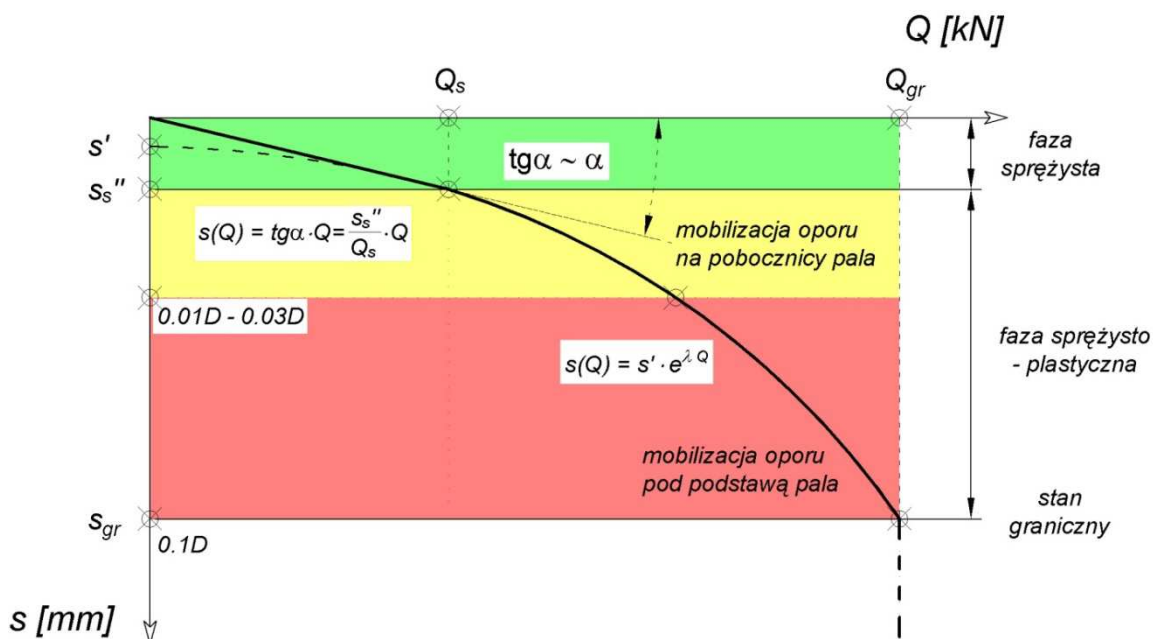
$s'$  - punkt przecięcia wykładniczej linii trendu, opisującej fazę sprężysto-plastyczną, z osią rzędnych  $s$ ; punkt początkowy funkcji wykładniczej (dla  $Q = 0$  kN), [mm],

$\lambda$  - wykładnik funkcji wykładniczej, opisującej fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal - grunt [1/kN],

$Q$  - obciążenie pionowe działające osiowo na głowicę pala, [kN],

$e$  - podstawa funkcji wykładniczej, liczba Eulera,

Powyższe zależności stanowią podstawę do prognozowania pełnej krzywej  $Q$ - $s$  dla analizowanej technologii pali. Poniżej przedstawiono interpretację graficzną i współzależność zdefiniowanych wielkości (Rys. 6.35).



Rys. 6.35. Idea opisu matematycznego krzywej  $Q$ - $s$  na podstawie krzywej SPLT.



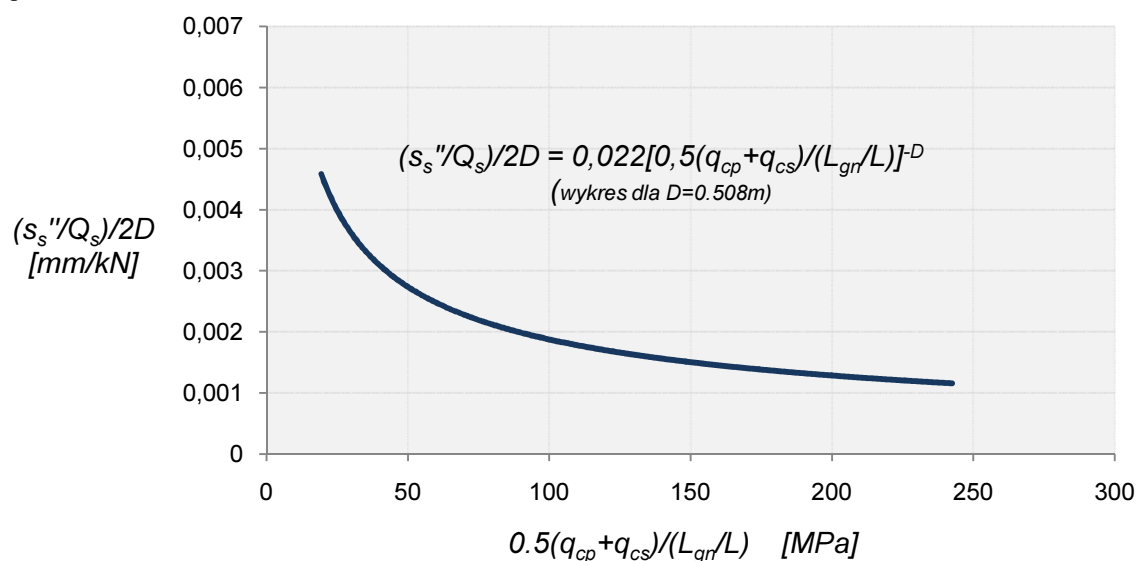
- budowę bazy danych - zestawienie parametrów opisujących krzywe z badań terenowych z parametrami opisującymi parametry gruntu i parametrami geometrycznymi pali,
- transformację danych - generowanie dodatkowych zmiennych do analizy korelacji,
- ustalenie siły korelacji między parametrami krzywej, uśrednionymi wartościami oporów  $q_c$  i geometrii pali, z wykorzystaniem metody współczynnika korelacji Pearsona,
- ustalenie siły korelacji między parametrami krzywej, uśrednionymi wartościami oporów  $q_c$  i geometrii pali, z wykorzystaniem metody współczynnika korelacji rang Spearmana.

Szczególne znaczenie, w przypadku proponowanej metody, ma ścisła zależność empiryczna pomiędzy podatnością podłoża  $s_s''/Q_s$ , która determinuje kierunek i kształt krzywej Q-s, i parametrami podłoża wokół pala, czyli średnią wartością oporów stożka sondy CPT wzdłuż pobocznic -  $q_{cs}$  i pod podstawą pala -  $q_{cp}$ . Zależność zdefiniowana została na podstawie analizy regresji nieliniowej między parametrami gruntu oraz parametrami charakterystyk Q-s według rys.6.35 i ma postać:

$$\frac{s_s''}{Q_s} = 2D \left\{ 0,022 \left[ \frac{(q_{cp} + q_{cs})L}{2L_{gn}} \right]^{-D} \right\} \quad (59)$$

gdzie:

- $\frac{s_s''}{Q_s}$  - podatność ośrodka gruntowego w fazie sprężystej współpracy pal - grunt, [mm/kN],  
 $q_{cs}$  - wartość średnia oporów stożka sondy CPT wzdłuż pobocznic [MPa] wg rys.6.36  
 $q_{cp}$  - wartość średnia oporów stożka sondy CPT pod podstawą pala [MPa] wg rys.6.36  
 $D$  - średnica trzony pala [m]  
 $L$  - długość całkowita pala [m]  
 $L_{gn}$  - zagłębienie pala w gruncie nośnym [m] wg rys. 6.36



Rys. 6.37. Zależność podatności gruntu od parametrów sondowania CPT.

Wyrażenie  $2D$ , które występuje w zależności (59) należy traktować jako współczynnik niemianowany, zależny od średnicy pala. Celem zdefiniowania członu  $2D$  jest uniwersalizacja



zależności (59) do stosowania dla pali o innych średnicach niż typowa ( $D=0.508\text{m}$ ) dla której zdefiniowano zależność i wykres (rys.6.37) Dodatkowo należy pamiętać, aby wartość  $D$ , czyli średnicę trzonu pala, wyrażać w metrach. Wyrażenie  $2D$  wynika z przekształcenia zależności:

$$2D \approx \frac{D}{D_0} [-], \quad \text{gdzie } D_0 = 0.508[\text{m}] \quad (60)$$

Kolejny parametr potrzebny do zdefiniowania krzywej Q-s to  $s'$  czyli punkt początkowy funkcji wykładniczej (dla  $Q=0$  kN), określany jako punkt przecięcia funkcji wykładniczej, opisującej fazę sprężysto-plastyczną, z osią osiadań  $s$ .

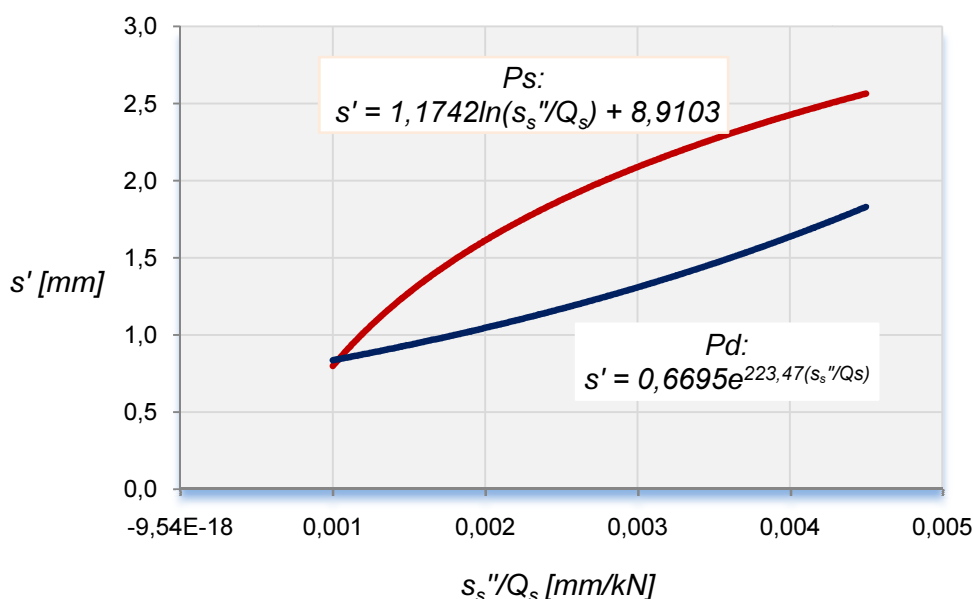
Wykorzystując metodę rang Spearmana do określania siły korelacji pomiędzy parametrami bazowymi ustalono, że wartość osiadań  $s'$ , należy określić na podstawie podatności podłoża  $s_s''/Q_s$  z uwzględnieniem rodzaju gruntu pod podstawą pala. Według powyższych założeń otrzymano następujące zależności:

dla piasków drobnych:

$$s' = 0,6695 \cdot e^{223,47 \frac{s_s''}{Q_s}} \quad (61)$$

dla piasków średnich:

$$s' = 1,1742 \ln\left(\frac{s_s''}{Q_s}\right) + 8,9103 \quad (62)$$



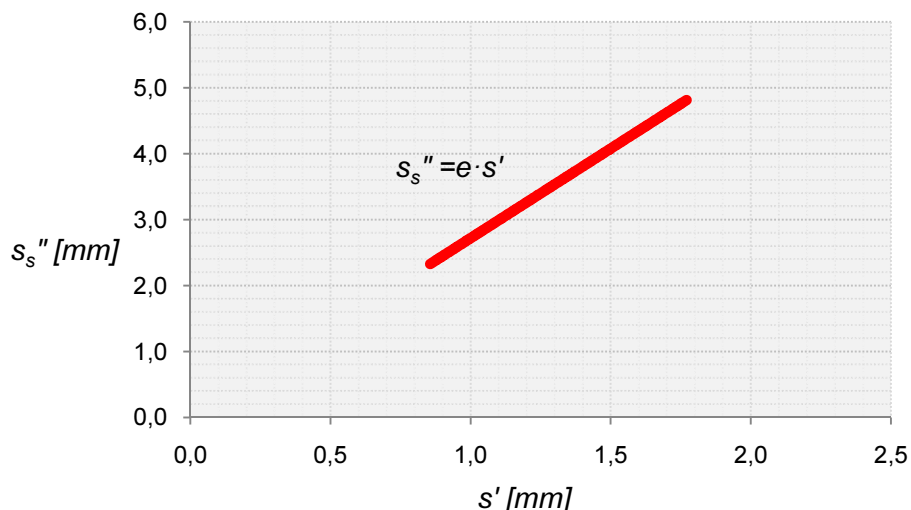
Rys. 6.38. Zależność osiadań  $s'$  od podatności podłoża gruntowego.

Dla analizowanej bazy parametrów krzywych osiadania zaobserwowano, że pomiędzy wartością  $s'$  i  $s_s''$  zachodzi stała relacja:

$$\frac{s_s''}{s'} \cong e = \text{const.} \quad (63)$$

Po przekształceniu powyższej zależności otrzymujemy:

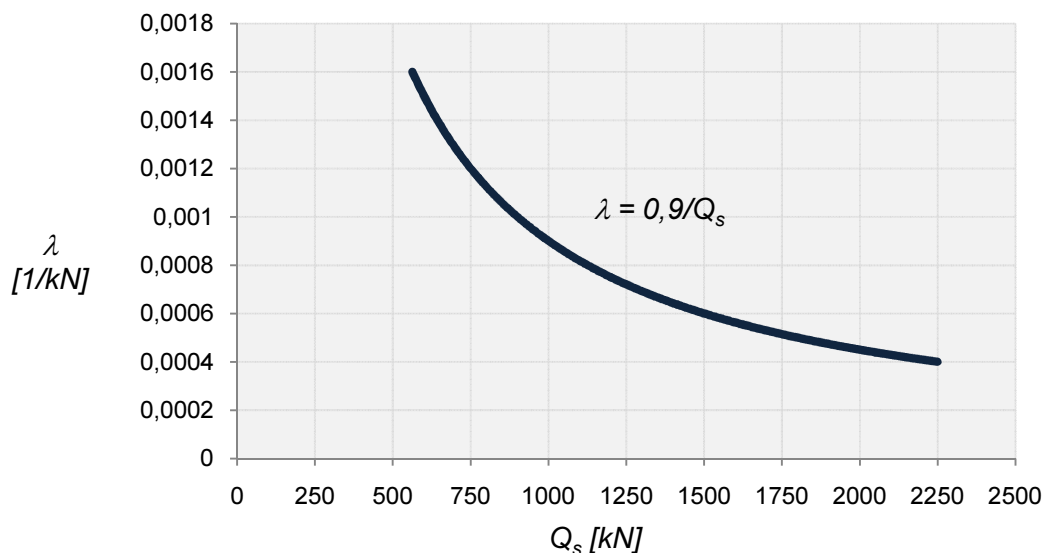
$$s_s'' = e \cdot s' \quad (64)$$

Rys. 6.39. Liniowa zależność osiadań  $s'$  do  $s_s''$ .

Dysponując wartościami  $s'$ ,  $s_s''$  możliwe jest wyznaczenie wartości  $Q_s$  - wartość przyłożonego obciążenia powodującego osiadania  $s_s''$ .  $Q_s$  jest obciążeniem inicjującym fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal-grunt. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie wykładnika  $\lambda$ . Bazując na bezpośredniej korelacji nieliniowej według metody rang Spearmana między  $Q_s$  i  $\lambda$ , z równań opisujących krzywe rzeczywiste, otrzymano zależność:

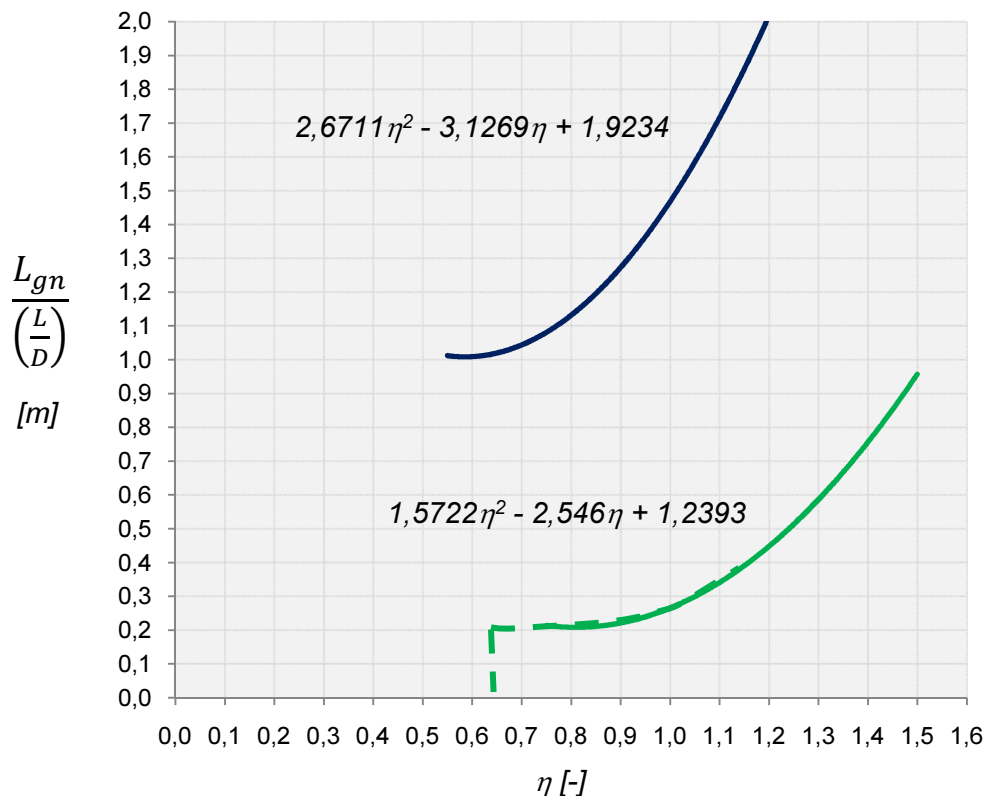
$$\lambda = C_1 \frac{1}{Q_s} \quad (65)$$

gdzie:  $C_1$  - współczynnik proporcjonalności,  $C_1=0.9$ , wartość jest wynikiem analizy optymalizacji przebiegu krzywej teoretycznej osiadania pali.

Rys. 6.40. Zależność empiryczna między  $\lambda$  -  $Q_s$ .

Na podstawie przeprowadzonej analizy zaobserwowano, że znaczący wpływ na wartość nośności granicznej ma zgłębienie pala w gruncie nośnym ( $L_{gn}$ ) oraz jego smukłość ( $L/D$ ). Uwzględniając te czynniki, zdefiniowany został współczynnik korekcyjny  $\eta$ , którego wartość uzależniona jest od parametrów geometrycznych pala (długość  $L$  i średnica trzonu  $D$ ) oraz

zgałębienie pala w gruncie nośnym ( $L_{gn}$ ). Ze względu na złożoną postać funkcji możliwe jest odczytywanie wartości współczynnika  $\eta$  z wykresu bądź wyznaczanie drogą iteracyjną.



Rys. 6.41. Współczynnik korekcyjny  $\eta$ .

Ostatecznie praca sprężysto - plastyczna pala w gruncie opisana jest równaniem:

$$s(Q) = s' \cdot e^{\eta \cdot \lambda \cdot Q} \quad (66)$$

gdzie:

$\eta$  - współczynnik korekcyjny, zależny od geometrii pala i zagłębienia podstawy w gruncie nośnym, zdefiniowany na podstawie procesu dopasowania krzywych teoretycznych i krzywych rzeczywistych.

Krzywa Q-s wyznaczona na podstawie przedstawionej procedury, według nazewnictwa z EC7, jest krzywą wyznaczoną bezpośrednio na podstawie wyników badań podłoża. Wartość nośności, która odpowiada osiadaniom 0.1D, jest nośnością graniczną na podstawie wyników badań podłoża gruntowego i oznaczona -  $Q_{gr,cal}$ .

## 6.2. Parametry krzywej teoretycznej i rzeczywistej - analiza statystyczna

Postępując według założeń przedstawionych w podrozdziale 6.1 dokonano weryfikacji parametrów krzywej teoretycznej w stosunku do krzywej rzeczywistej.

W tabelicy (Tablica 6.26) znajdują się przykładowe wartości poszczególnych parametrów krzywych Q-s z próbnego obciążenia statycznego dwudziestu siedmiu pali Vibro, dla których zgromadzono pełną dokumentację geotechniczną badań podłoża gruntowego.

Tablica 6.26. Parametry opisujące krzywą Q-s z badania SPLT.

Grunt	nr pala	SPLT					
		s''	Qs	s'	$\lambda$	$\eta$	(s''/s')/e
[-]	[-]	[mm]	[kN]	[mm]	[1/kN]	[-]	[-]
Piasek drobny	2.8	2,39	625	0,88	0,0016	0,60	1,001
	2.7	6,01	1000	2,21	0,001	0,75	1,000
	2.9	5,02	1000	1,85	0,001	0,80	0,998
	2.4	8,70	1428	3,20	0,0007	0,80	1,000
	2.5	6,91	1250	2,54	0,0008	0,85	1,001
	7.11	3,43	1666	1,26	0,0006	1,20	1,002
	2.1	7,80	1428	2,87	0,0007	0,95	0,999
	7.5	11,30	3333	4,16	0,0003	1,40	0,999
	8.2	3,24	2000	1,19	0,0005	0,75	1,002
	8.1	2,58	1666	0,95	0,0006	0,75	1,000
	8.6	2,66	2000	0,98	0,0005	0,95	0,999
	8.8	2,80	2500	1,03	0,0004	0,85	1,000
8.7	2,60	2500	0,96	0,0004	0,98	0,996	
Piasek średni	2.2	8,15	1111	3,00	0,0009	0,47	1,000
	7.7	5,34	2000	1,96	0,0005	1,00	1,002
	7.9	5,28	2500	1,94	0,0004	0,80	1,000
	2.3	8,10	1666	2,98	0,0006	0,80	1,000
	7.14	4,38	2500	1,61	0,0004	1,00	1,000
	7.4	3,90	2500	1,44	0,0004	0,88	0,996
	7.6	4,10	2500	1,50	0,0004	1,45	1,006
	7.1	3,33	2500	1,22	0,0004	1,00	1,003
	8.3	2,95	1666	1,09	0,0006	0,60	0,995
	7.8	3,80	3333	1,40	0,0003	1,40	0,998
	8.5	2,20	2000	0,81	0,0005	0,95	0,999
	8.9	2,26	2000	0,83	0,0005	0,85	1,002
8.4	1,27	1428	0,47	0,0007	0,80	0,995	
7.2	1,88	2000	0,69	0,0005	0,93	1,002	

W tabelicy (Tablica 6.27) zostały umieszczone parametry opisujące krzywą teoretyczną obliczone w oparciu o zależności (59) ÷ (66).

Tablica 6.27. Parametry opisujące krzywą teoretyczną.

Grunt	nr pala	METODA				
		$s''_M$	$Q_{sM}$	$s'_M$	$\lambda_M$	$\eta_M$
[-]	[-]	[mm]	[kN]	[mm]	[1/kN]	[-]
Piasek drobny	2.8	5,7953	1118,1095	2,1320	0,0008	0,8400
	2.7	5,7891	1117,9478	2,1297	0,0008	0,9300
	2.9	5,7323	1116,4921	2,1088	0,0008	0,8300
	2.4	5,2939	1107,9330	1,9475	0,0008	0,9100
	2.5	5,2939	1107,9330	1,9475	0,0008	0,9100
	7.11	3,5267	1191,2409	1,2974	0,0008	1,1900
	2.1	5,4512	1110,4044	2,0054	0,0008	0,8800
	7.5	2,4738	1800,8581	0,9101	0,0005	0,9400
	8.2	2,5226	1726,4289	0,9280	0,0005	0,9300
	8.1	2,6962	1532,9084	2,6962	0,0006	1,0500
	8.6	2,4835	1785,0885	0,9136	0,0005	0,9200
	8.8	2,5617	1674,4097	0,9424	0,0005	1,0000
8.7	4,8371	1105,7832	1,7795	0,0008	0,8900	
Piasek średni	2.2	3,9411	1139,8177	1,4498	0,0008	1,4500
	7.7	3,0040	1339,4916	1,1051	0,0007	1,0400
	7.9	6,8085	1593,1369	2,5047	0,0006	0,8900
	2.3	4,7053	2127,9319	1,7310	0,0004	1,0600
	7.14	3,2498	2318,8448	1,1955	0,0004	0,6500
	7.4	6,1322	1773,5213	2,2559	0,0005	1,4500
	7.6	4,9049	2083,7465	1,8044	0,0004	0,9600
	7.1	2,6319	2279,0848	0,9682	0,0004	0,6500
	8.3	5,4826	1943,5349	2,0170	0,0005	1,2800
	7.8	4,1265	2237,2200	1,5181	0,0004	1,1300
	8.5	3,3892	2314,9659	1,2468	0,0004	0,8900
	8.9	2,4968	1764,3159	0,9185	0,0005	0,9600
	8.4	3,1915	2319,2234	1,1741	0,0004	0,6500
7.2	5,7953	1118,1095	2,1320	0,0008	0,8400	

\* Indeks M - oznacza parametry określone na podstawie zaproponowanej metody.

W tabelicy (Tablica 6.28.) przedstawiono stosunek parametrów opisujących krzywą rzeczywistą i parametrów krzywej teoretycznej. Otrzymane wartości obrazują wzajemną relację pomiędzy danymi wprowadzonymi do analizy a parametrami uśrednionymi, na których opiera się proponowana metoda. Można przyjąć, że wzajemny stosunek parametrów rzeczywistych i teoretycznych stanowi o zgodności i dokładności proponowanej metody, w stosunku do wyników badań terenowych.

Tablica 6.28. Współczynniki zgodność parametrów opisujące krzywą Q-s teoretyczną i rzeczywistą.

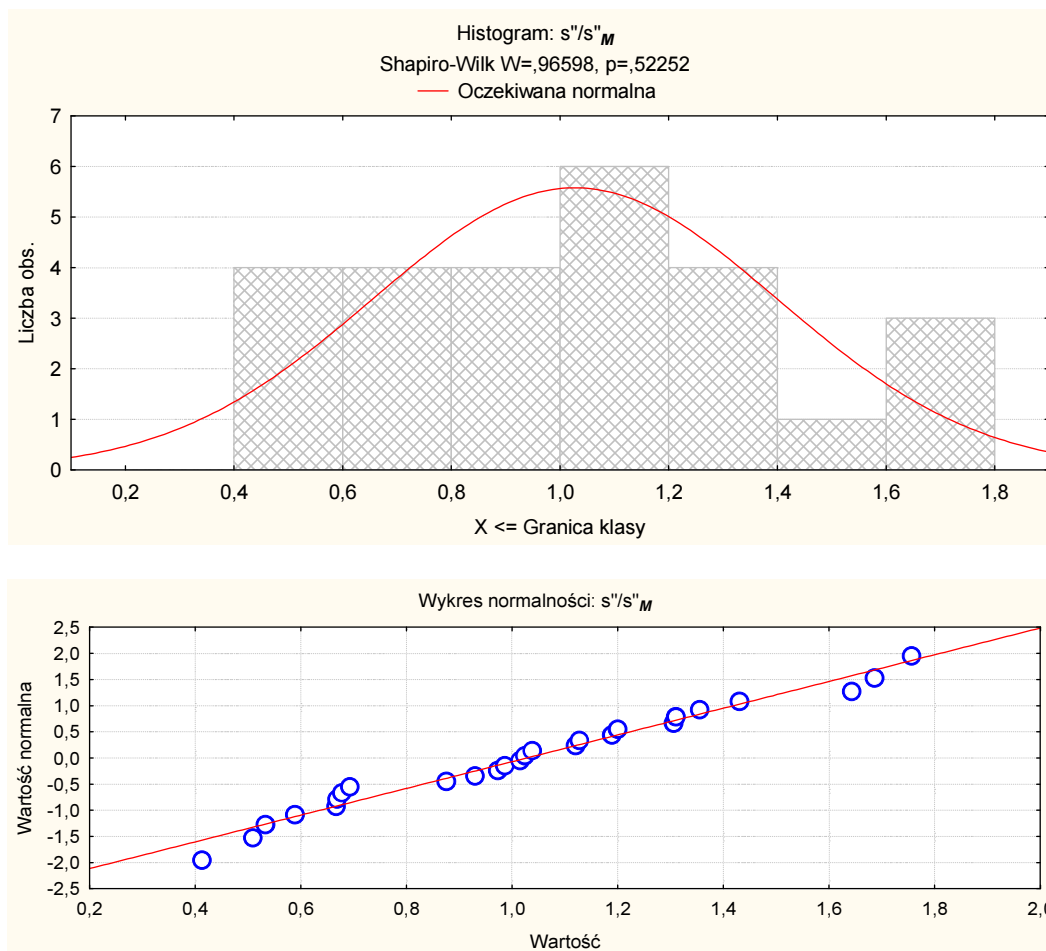
Grunt	nr pala	SPLT/METODA					
		$s''/s''_M$	$Q_s/Q_{sM}$	$s'/s'_M$	$\eta/\eta_M$	$s''/s'/e$	$\lambda/\lambda_M$
Piasek drobny	2.8	0,4131	0,5590	0,4128	0,7143	1,0007	1,9878
	2.7	1,0382	0,8945	1,0377	0,8065	1,0004	1,2422
	2.9	0,8757	0,8957	0,8773	0,9639	0,9982	1,2405
	2.4	1,6427	1,2889	1,6431	0,8791	0,9998	0,8617
	2.5	1,3057	1,1282	1,3042	0,9341	1,0012	0,9848
	7.11	0,9731	1,3985	0,9712	1,0084	1,0020	0,7942
	2.1	1,4303	1,2860	1,4311	1,0795	0,9994	0,8636
	7.5	1,3097	1,1106	1,3076	0,7979	1,0016	1,0005
	8.2	1,0236	0,9650	1,0237	0,8065	1,0000	1,1510
	8.1	0,9866	1,3047	0,3635	0,9048	0,9985	0,8516
	8.6	1,1274	1,4005	1,1274	0,9239	1,0001	0,7934
	8.8	1,0150	1,4931	1,0187	0,9800	0,9963	0,7442
8.7	1,6859	1,0047	1,6859	0,5281	1,0000	1,1058	
<b>średnia (piaski drobne)</b>		<b>1,0951</b>	<b>1,1437</b>	<b>1,0432</b>	<b>0,8999</b>	<b>0,9999</b>	<b>1,0430</b>
Piasek średni	2.2	1,3550	1,7547	1,3519	0,6897	1,0023	0,6332
	7.7	1,7560	1,8664	1,7555	0,7692	1,0003	0,5953
	7.9	1,1892	1,0457	1,1898	0,8989	0,9995	1,0621
	2.3	0,9298	1,1748	0,9301	0,9434	0,9997	0,9457
	7.14	1,2001	1,0781	1,2045	1,3538	0,9963	1,0306
	7.4	0,6686	1,4096	0,6649	1,0000	1,0055	0,7882
	7.6	0,6779	1,1998	0,6761	1,0417	1,0026	0,9261
	7.1	1,1204	0,7310	1,1258	0,9231	0,9952	1,5194
	8.3	0,6930	1,7149	0,6941	1,0938	0,9984	0,6478
	7.8	0,5331	0,8940	0,5336	0,8407	0,9992	1,2429
	8.5	0,6668	0,8639	0,6657	0,9551	1,0017	1,2861
	8.9	0,5090	0,8094	0,5117	0,8333	0,9948	1,3722
	8.4	0,5891	0,8624	0,5877	1,4308	1,0023	1,2885
	7.2	0,4131	0,5590	0,4128	0,7143	1,0007	1,9878
<b>średnia (piaski średnie)</b>		<b>0,9696</b>	<b>1,1721</b>	<b>0,9698</b>	<b>0,9501</b>	<b>0,9999</b>	<b>1,0317</b>
<b>średnia</b>		<b>1,0275</b>	<b>1,1590</b>	<b>1,0037</b>	<b>0,9269</b>	<b>0,9999</b>	<b>1,0369</b>

\* Indeks **M** - oznacza parametry określone na podstawie zaproponowanej metody.

W oparciu o powyższe zestawienia wykonano analizę statystyczną, w ramach której sprawdzono: odchylenia standardowe, błędy standardowe, rozkłady oraz normalność, analizowanych parametrów. W przypadku określenia typu rozkładu posłużono się testem Shapiro - Wilka (poziom prawdopodobieństwa  $p=0.05$ ), który umożliwia ustalenie podobieństwa rozkładu danej zmiennej do rozkładu normalnego. Dla próby  $N=27$  pali, założonego poziomu prawdopodobieństwa  $p = 0,05$ , wartość krytyczna testu S-W wynosi  $W_{p,N}=0,920$ . Zgodnie z założeniami testu, jeżeli wartość określona  $W \leq W_{p,N}$  ( $p \leq 0,05$ ), to stwierdza się, że dana cecha nie posiada rozkładu zgodnego z normalnym. Dodatkowo przedstawiono wykresy normalności reszt analizowanych zmiennych. Zależność ta tworzona jest w oparciu o założenie, że dane pochodzą z populacji o rozkładzie normalnym. Jeśli punkty na wykresie normalności układają się wzdłuż linii prostej to podlegają one rozkładowi normalnemu, jeśli określona

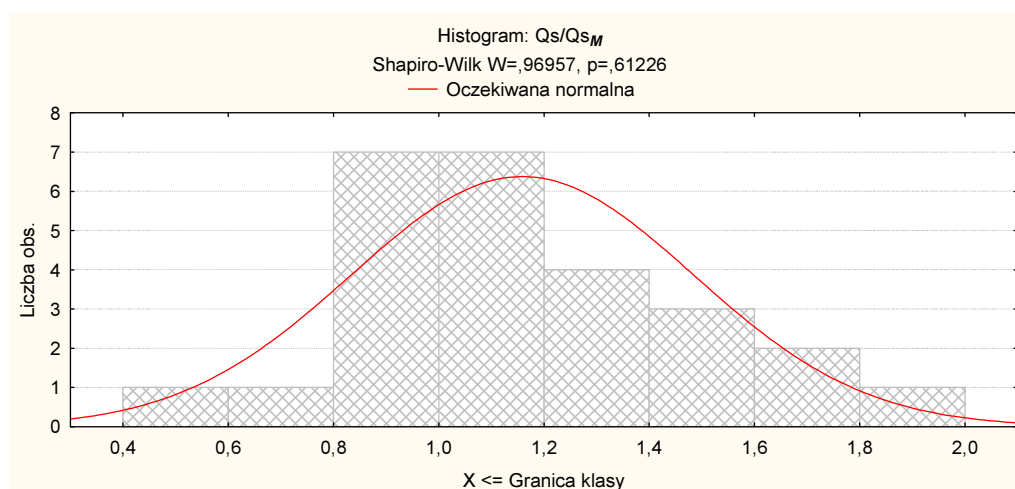
wartość odchyła się od prostej wówczas zmienna nie podlega rozkładowi normalnemu. Poniżej obliczenia wykonane za pomocą pakietu STATISTICA oraz MS Office.

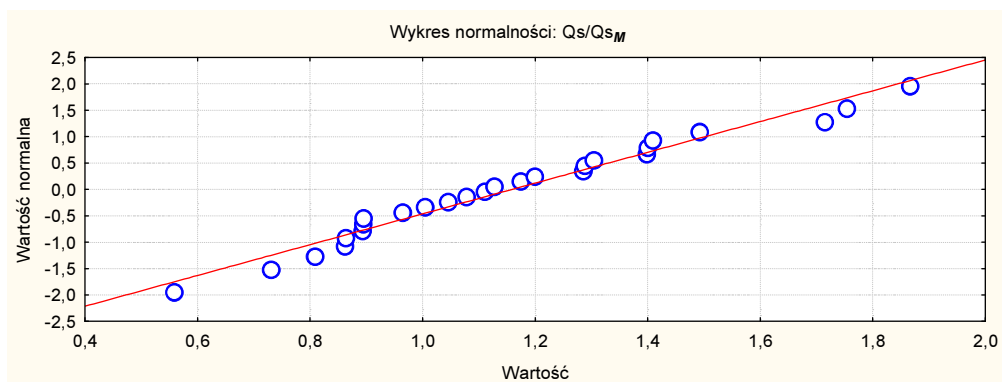
- $s_s''$  - wartość osiadań pala w punkcie przejścia krzywej Q-s z fazy sprężystej w fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal - grunt, [mm].



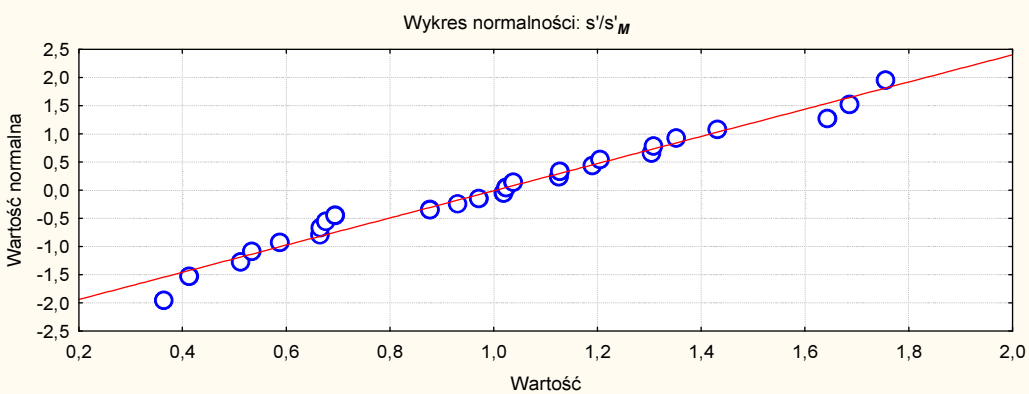
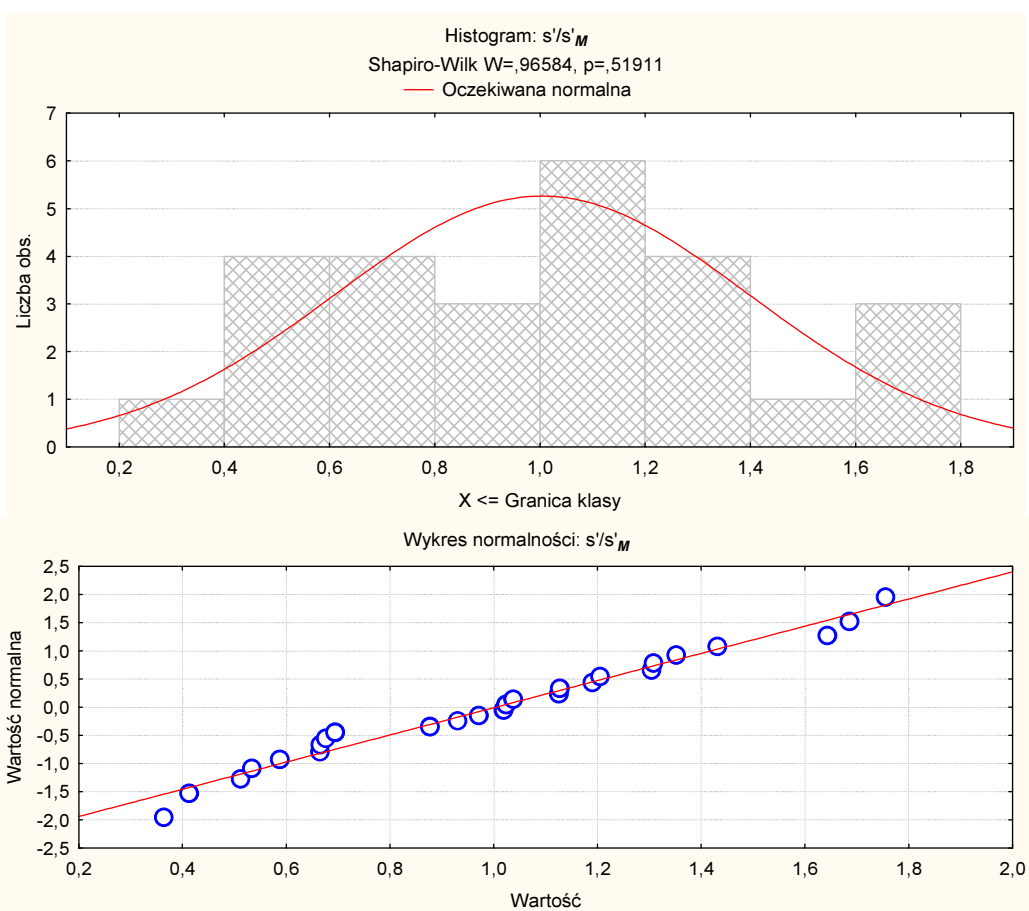
Rys. 6.42. Ocena rozkładu oraz wykres normalności  $s_s''$

- $Q_s$  - wartość przyłożonego obciążenia powodująca osiadania  $s_s''$ , obciążenie inicjujące fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal-grunt [kN];



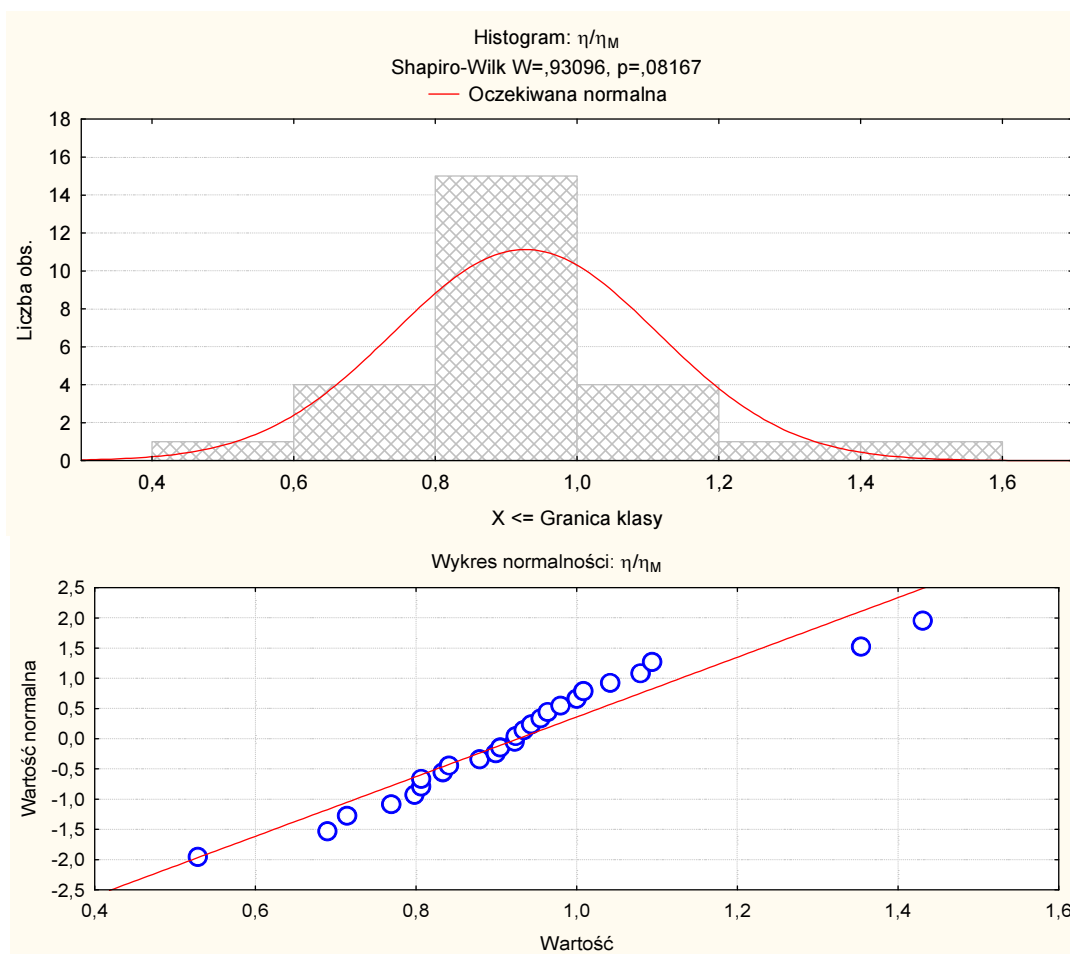
Rys. 6.43. Ocena rozkładu oraz wykres normalności  $Q_s$ .

- $s'$  - punkt przecięcia wykładniczej linii trendu, opisującej fazę sprężysto-plastyczną, z osią rzędnych  $s$ ; punkt początkowy funkcji wykładniczej (dla  $Q=0$  kN), [mm]

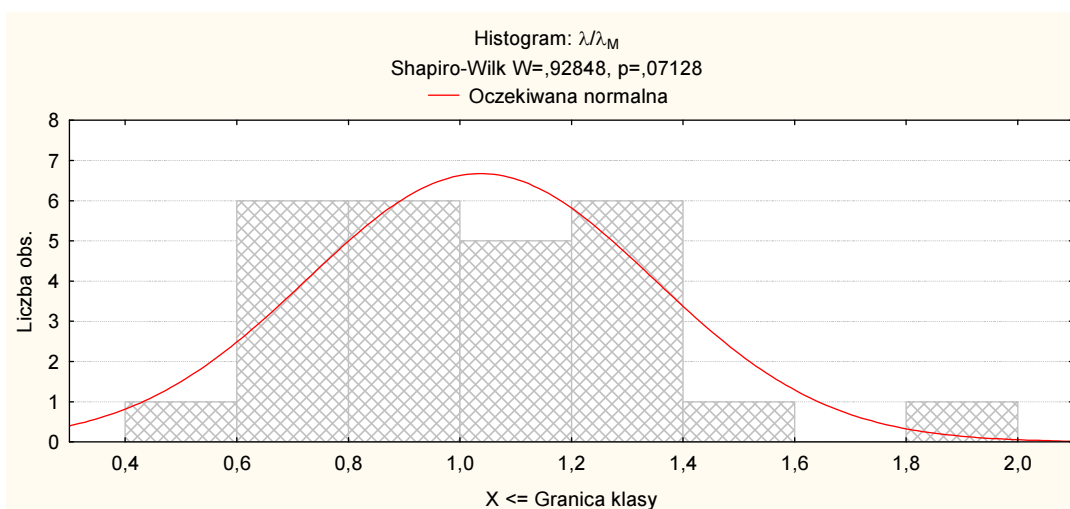
Rys. 6.44. Ocena rozkładu oraz wykres normalności  $s'$ .

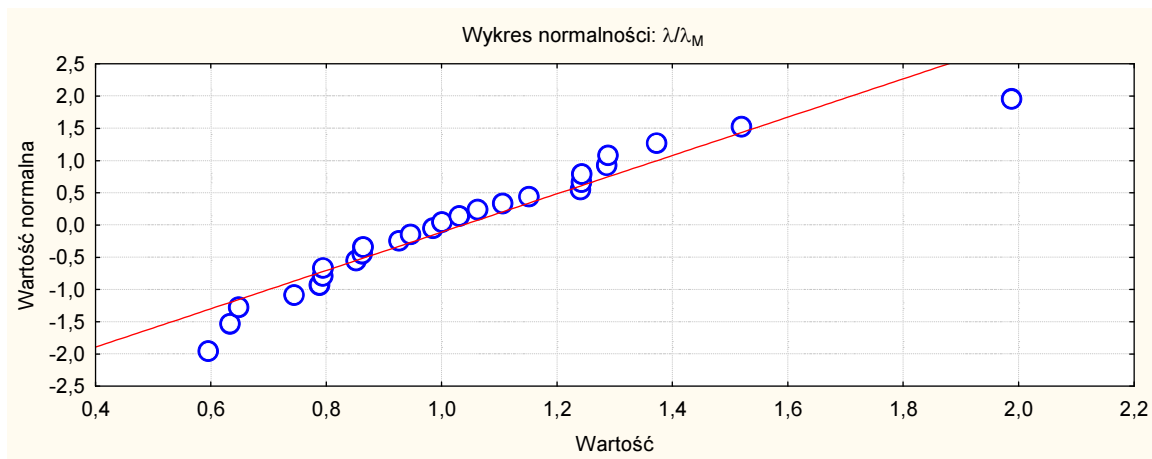


- $\eta$  - współczynnik korekcyjny, zależny od geometrii pala i zagłębienia podstawy w gruncie nośnym,

Rys. 6.45. Ocena rozkładu oraz wykres normalności współczynnika  $\eta$ .

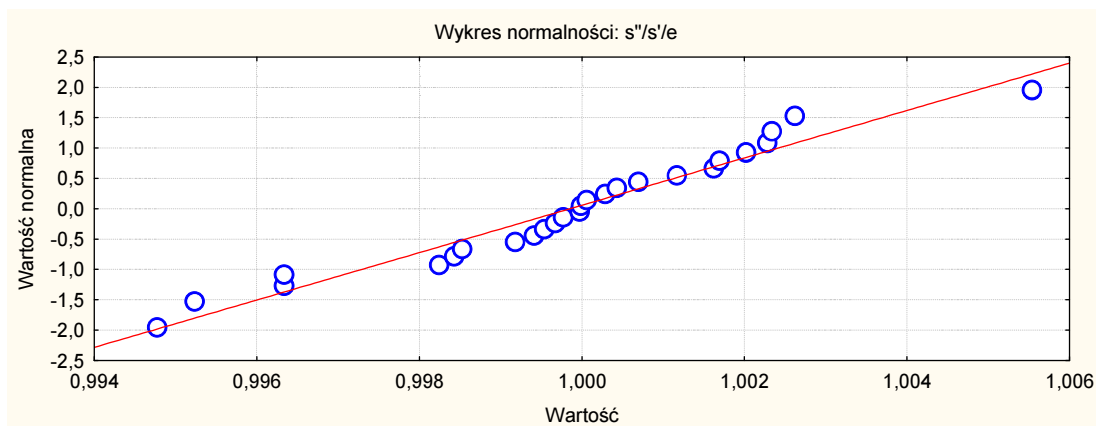
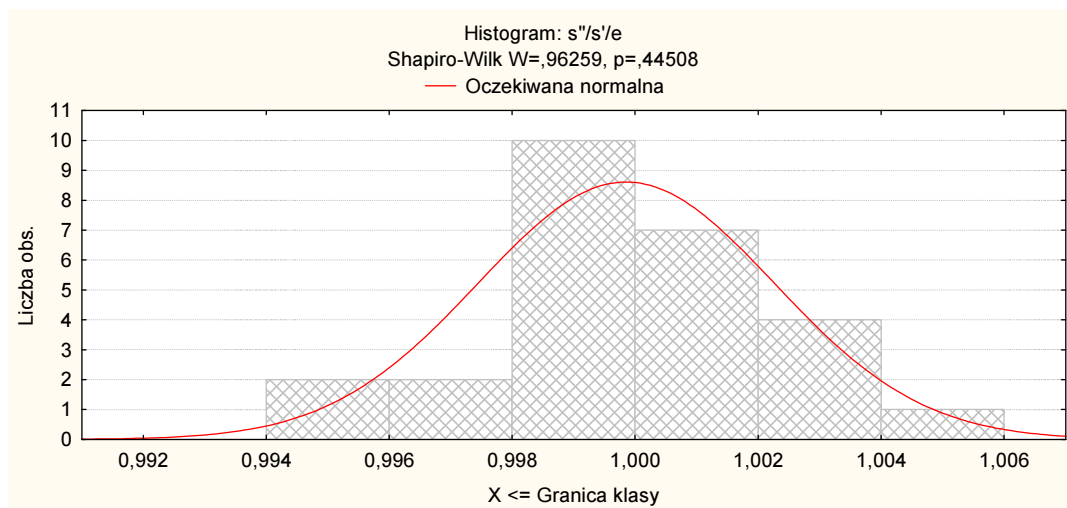
- $\lambda$  - wykładnik funkcji wykładniczej, opisującej fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal - grunt,





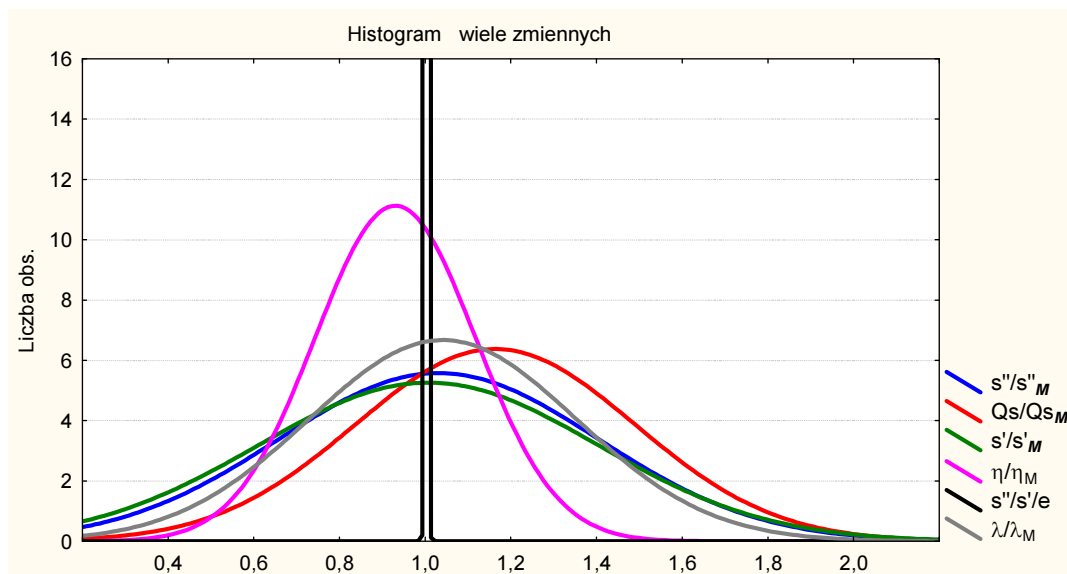
Rys. 6.46. Ocena rozkładu oraz wykres normalności wykładnika  $\lambda$ .

•  $\frac{s_s''}{s'} \cong e$



Rys. 6.47. Ocena rozkładu oraz wykres normalności dla zależności  $s_s''/s'$ .

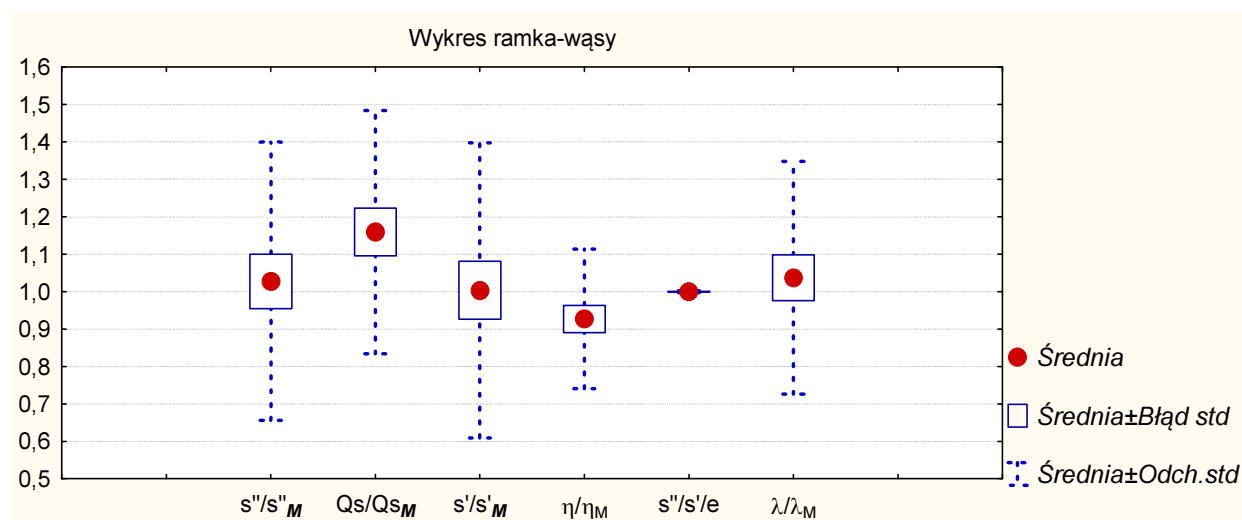
## Podsumowanie analizy statystycznej:



Rys. 6.48. Zestawienie rozkładów normalnych parametrów metody.

Tablica 6.29. Wyniki analizy statystycznej parametrów krzywej Q-s.

Zmienna	Średnia	Odch. stand.	Błąd stand.	Typ rozkładu
$s''$ [mm]	1.027	0.372	0.073	normalny
$Q_s$ [kN]	1.159	0.325	0.064	normalny
$s'$ [mm]	1.004	0.394	0.077	normalny
$\eta$ [-]	0,927	0.186	0.036	normalny
$\lambda$ [1/kN]	1.037	0.310	0.061	normalny
$s''/s' (e)$ [-]	0.9998	0.002	0.00047	normalny



Rys. 6.49. Wykres średniej, błędu i odchylenia standardowego parametrów metody.

Na podstawie analizy statystycznej wykazano, że dokładność zmiennych obliczonych w stosunku do parametrów opisujących krzywe rzeczywiste posiada rozkład normalny. Pomijając takie czynniki jak: określona odległość sondowania CPT od analizowanego pala czy wpływ czasu na przyrost nośności, otrzymane wyniki można traktować jako miarodajne do dalszych analiz.

### 6.3. Nośność graniczna obliczeniowa - współczynnik częściowy bezpieczeństwa.

Dla proponowanej metody zaleca się stosowanie globalnego współczynnika bezpieczeństwa  $F_S=1.3$ . Wartość współczynnika jest wynikiem analiz przeprowadzonych na wartościach nośności otrzymanych według zależności z rozdziału 6.1, badana próba zawierała 40 obserwacji. Współczynnik  $F_S$  uwzględnia:

- błędy wynikające z uśrednień poszczególnych parametrów, w fazie generowania danych;
- zmienność warunków gruntowych w stosunku do wyników sondowania;
- odległość pali od sondowania CPT, która nie jest ściśle określona i w przypadku analizowanych pali, waha się od 20.0m (obiekty ciągłe) do 2.0m (podpory mostowe);
- czynniki technologiczne, nie ma dwóch takich samych pali;
- błędy analizy statystycznej.

Według normy PN-EN:1997-1:2008, obliczoną nośność graniczną należy traktować jako  $R_{c, cal}$ :

$$R_{c, cal} = Q_{gr, c} \quad (67)$$

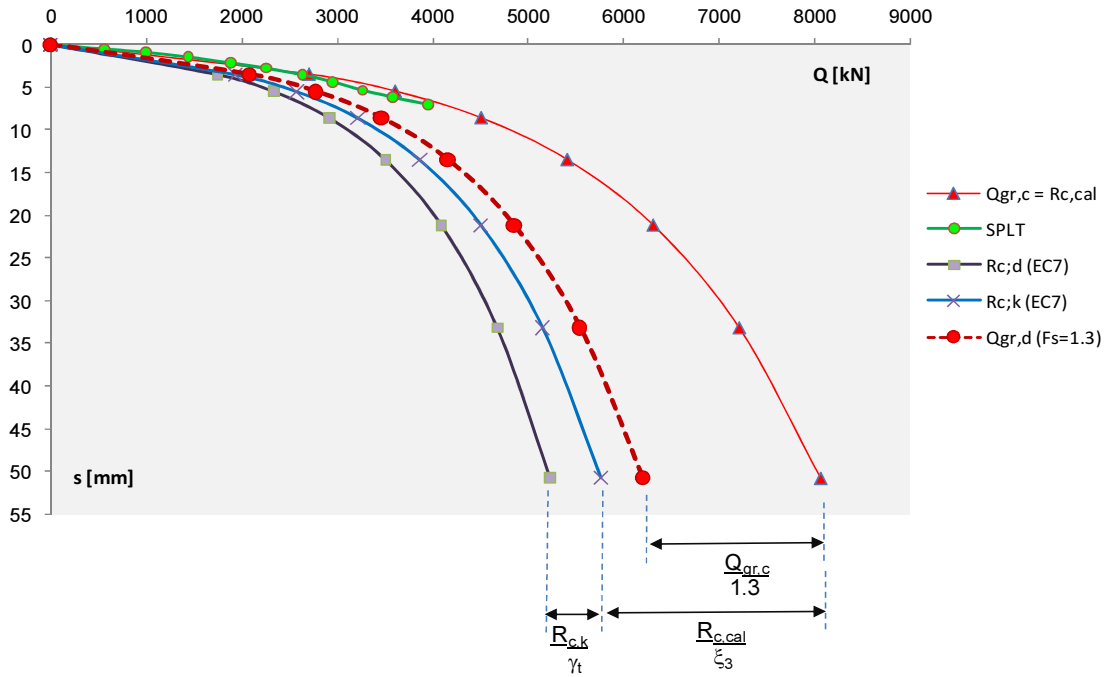
Wykorzystując do projektowania metody na podstawie badań podłoża zalecono w Eurokodzie 7, aby metody te zostały ustalone na podstawie próbnych obciążeń statycznych i porównywalnych doświadczeń. Warunki te zostały spełnione w przeprowadzonej analizie.

W przypadku przyjęcia sposobu obliczeń o zbyt wysokim stopniu niepewności, dopuszczalne jest wprowadzenie do analiz współczynnika modelu obliczeniowego, który koryguje błędy systematyczne i ma zapewnić, że oszacowana nośność pala jest bezpieczna. Dodatkowo należy wybrać odpowiednie podejście obliczeniowe oraz odpowiednie dla podejścia współczynniki częściowe stosowane do oddziaływań oraz parametrów gruntu. Dla pali i fundamentów palowych przyjęto podejście obliczeniowe DA2, dla którego mamy jeden zestaw współczynników. Współczynniki stosuje się dla oddziaływań oraz nośności podłoża gruntowego.

Szczegółowa procedura postępowania opisana jest w podrozdziale 4.1 rozprawy.

Na przykładach przedstawiono ścieżkę obliczeniową dla proponowanej metody. Wartości nośności obliczeniowej wyznaczono dla dwóch podejść, stosując:

- ✓ współczynnik globalny bezpieczeństwa  $F_S = 1.3$ ;
- ✓ współczynniki bezpieczeństwa wg Eurokodu 7 zgodne z podejściem obliczeniowym DA2 ( $\xi_{3,4} = 1.4$ ,  $\gamma_t = 1.1$ ).



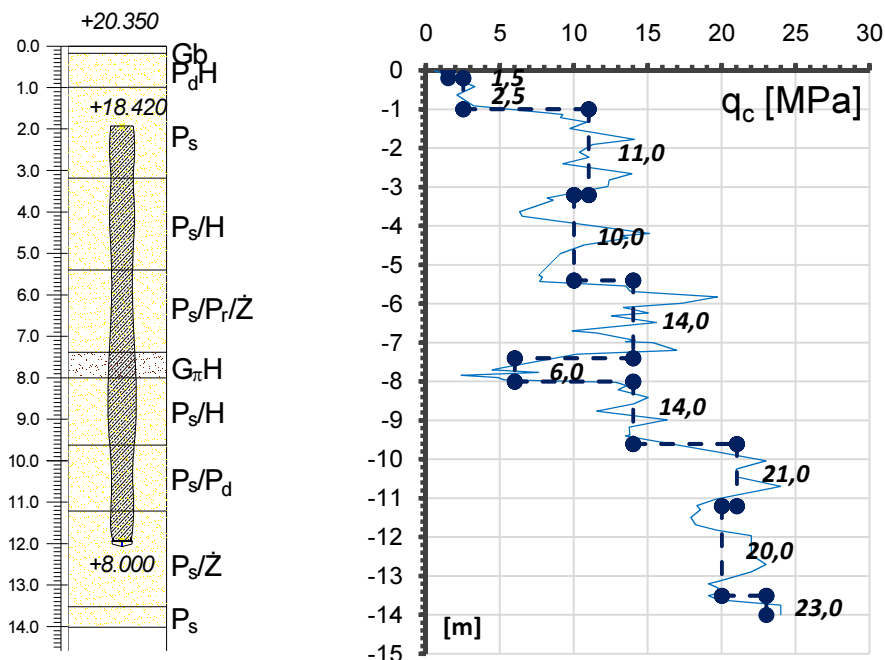
Rys. 6.50. Interpretacja wartości nośności obliczeniowej według EC7 oraz z zastosowaniem  $F_s=1,3$ .

### 6.4. Przykłady obliczeniowe z zastosowaniem metody

#### Przykład 1.

Pał Vibro o średnicy 508/560mm i długości  $L=10.6m$ , z podstawą w piaskach średnich, wykonany pod posadowienie wiaduktu drogowego w Gdańsku.

Profil i sondowanie CPT:



Rys. 6.51. Profil geologiczny oraz wynik badania CPT dla pała Vibro o średnicy 508/560mm i długości  $L=10.6m$ .

Charakterystyka pala, podłoża gruntowego oraz parametry krzywej Q-s na podstawie zależności (59)+(66):

Lp	oznaczenie pala	D	L	L <sub>gn</sub>	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>	L(q <sub>cp</sub> +q <sub>cs</sub> )/2L <sub>gn</sub>	s''/Q <sub>s</sub>	s'	s''	Q <sub>s</sub>	λ
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[1/kN]
7	7.6	0,508	10,6	4,6	20	14,5	39,75	0,0034	2,25	6,12	1777,3	0,00051

### Rozwiązanie:

Równanie krzywej Q-s:

$$s(Q)=Q*(s''/Q_s), \text{ dla } Q \in <0; Q_s> \quad s(Q)=s' * e^{iQ}$$

$$s(Q)=0,0034Q; \\ \text{dla } Q \in <0; 1777>$$

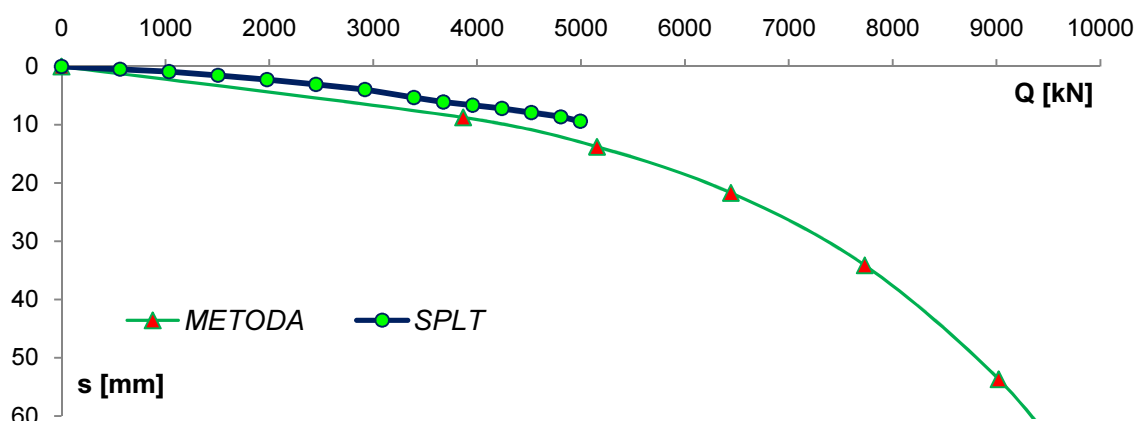
$$s(Q)=2,25 * e^{0,00051Q}$$

METODA

SPLT

Lp	Q <sub>fi</sub>	s <sub>i</sub>	Q <sub>fi</sub>	s <sub>i</sub>	L <sub>gn</sub> /L/D	η	Q <sub>c</sub>	s <sub>i</sub>	Q <sub>c</sub>	s <sub>i</sub>
[-]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[m]	[-]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
1	0	0	0	2,25	0,85	1,0	0	0	0	0
2	1777,3	6,118	1777,3	6,11			3865,61	8,76	1036	0,88
3			2665,9	8,76		5154,15	13,78	1507	1,51	
4			3554,6	13,78		6442,68	21,69	1978	2,27	
5			4443,2	21,69		7731,22	34,13	2449	3,06	
6			5331,9	34,13		9019,76	53,69	2920	3,95	
7			6220,5	53,69				3391	5,33	
8			6809	72,49				3674	6,11	
9								3956	6,66	
10								4239	7,21	
11								4522	7,91	
12								4804	8,64	
13								4993	9,4	
14										

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznej zdefiniowanej na podstawie zależności (59)+(66):



Q	[kN]	0	565	1036	1507	1978	2449	2920	3391	3674	3956	4239	4522	4804	4993
s (SPLT)	[mm]	0	0,47	0,88	1,51	2,27	3,06	3,95	5,33	6,11	6,66	7,21	7,91	8,64	9,4
s (METODA)	[mm]	0	1,92	3,52	5,12	4,51	5,32	6,28	7,42	8,19	9,05	9,99	11,04	12,19	13,03
Δs/s(SPLT)	[mm]	-	3,09	3,00	2,39	0,99	0,74	0,59	0,39	0,34	0,36	0,39	0,40	0,41	0,39

Δs - różnica między wartością osiadań teoretycznych i rzeczywistych, zakres obciążenia Q według SPLT

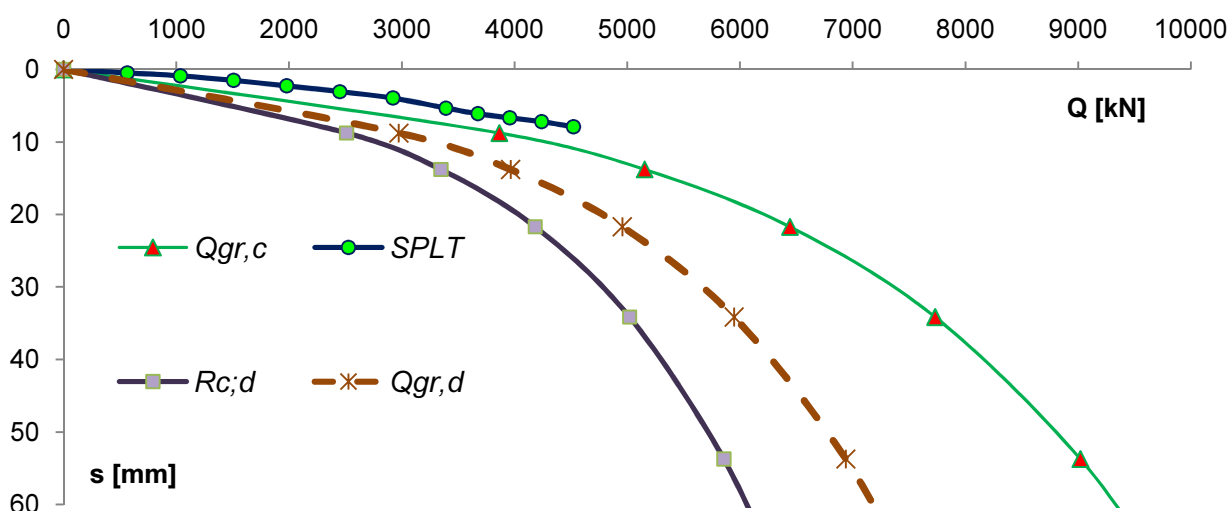
Rys. 6.52. Zależność analityczna Q-s wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT oraz krzywa rzeczywista dla pala Vibro o średnicy 508/560mm i długości L=10.6m.

Wartości obliczeniowe nośności według PN-EN:1997 oraz z zastosowaniem współczynnika  $F_S=1.3$ :

Lp	METODA				PN-EN 1997:2008				SPLT	
	$Q_{gr,c}$	$F_S$	$Q_{gr,d}$	$s_i$	$\xi_{3,4}$	$R_{c;k}$	$\gamma_t$	$R_{c;d}$	$Q_c$	$s_i$
[-]	[kN]	[-]	[kN]	[mm]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	[mm]
1	0,00	1,3	0	0,00	1,4	0,00	1,1	0	0	0,00
2					1,4	0,00	1,1		565	0,48
3	3865,61	1,3	2973,55	8,76	1,4	2761,15	1,1	2510,14	1036	0,89
4	5154,15	1,3	3964,73	13,79	1,4	3681,54	1,1	3346,85	1507	1,52
5	6442,69	1,3	4955,91	21,69	1,4	4601,92	1,1	4183,56	1978	2,27
6	7731,23	1,3	5947,10	34,13	1,4	5522,31	1,1	5020,28	2449	3,07
7	9019,77	1,3	6938,28	53,70	1,4	6442,69	1,1	5856,99	2920	3,95
8	9873,05	1,3	7594,65	72,50	1,4	7052,18	1,1	6411,07	3391	5,34
9									3674	6,11
10									3956	6,66
11									4239	7,21
12									4522	7,92

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznych zdefiniowanych na podstawie zależności (59)+(66):

- o krzywej wyznaczonej na podstawie wyników badań podłoża gruntowego wg opracowanej metody ( $Q_{gr,c}$ );
- o krzywej obliczeniowej, współczynniki bezpieczeństwa według PN-EN:1997 ( $R_{c,d}$ );
- o krzywej obliczeniowej, współczynnik globalny bezpieczeństwa  $F_S=1.3$  ( $Q_{gr,d}$ ).



$Q_{gr,c}$  – krzywa wyznaczona na podstawie parametrów podłoża wg proponowanej METODY

$Q_{gr,d} = \frac{Q_{gr,c}}{F_S}$  – krzywa obliczeniowa dla  $F_S = 1.3$

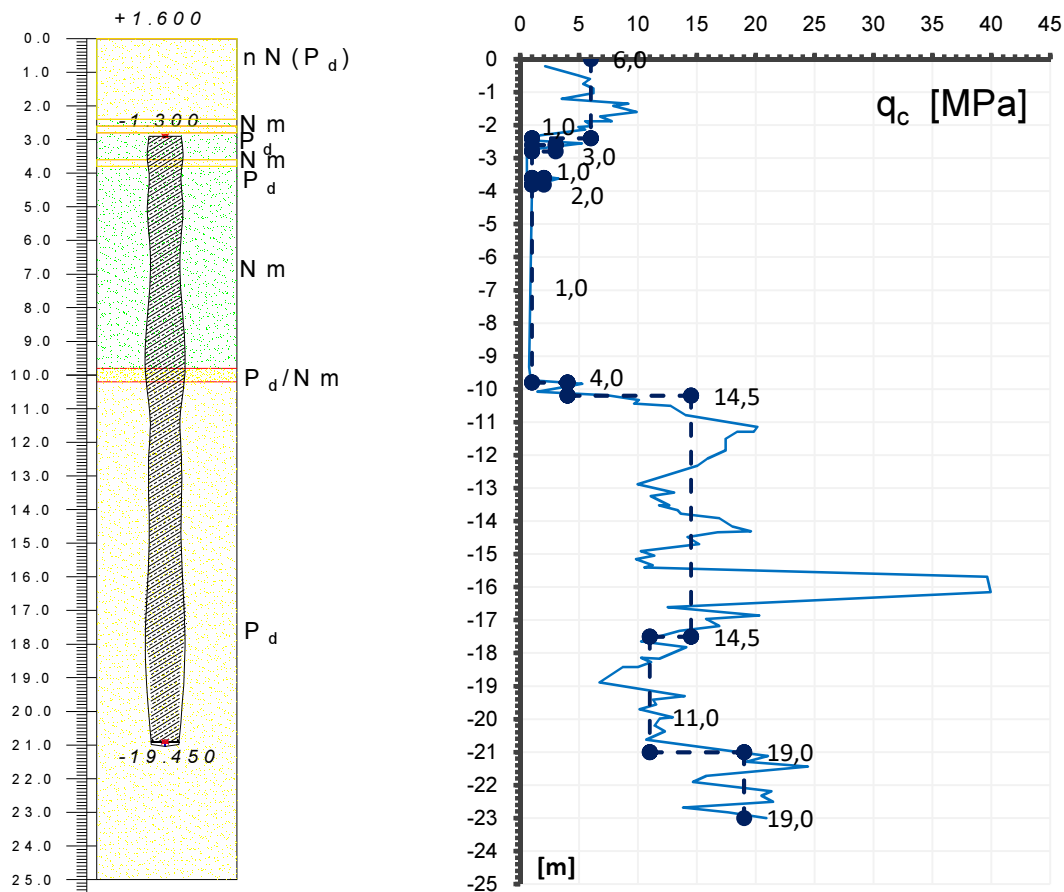
$R_{c,d} = \frac{Q_{gr,c}}{\xi_{3,4} \cdot \gamma_t}$  – krzywa obliczeniowa wg procedur PN – EN 1997: 2008 – 1

Rys. 6.53. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 508/560mm i długości L=10.6m.

**Przykład 2.**

Pał Vibro o średnicy 457/520mm i długości  $L=18.5\text{m}$ , z podstawą w piaskach drobnych, wykonany pod posadowienie zbiornika kwasu siarkowego w Szczecinie.

Profil i sondowanie CPT:



Rys. 6.54. Profil geologiczny oraz sondowanie CPT dla pała Vibro o średnicy 457/520mm i długości  $L=18.5\text{m}$

Charakterystyka pała, podłoża gruntowego oraz parametry krzywej Q-s na podstawie zależności (59)÷(66).

$L_p$	oznaczenie pała	$D$	$L$	$L_{gn}$	$q_{cp}$	$q_{cs}$	$L(q_{cp}+q_{cs})/2L_{gn}$	$s''/Q_s$	$s'$	$s''$	$Q_s$	$\lambda$
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[1/kN]
5	2.5	0,457	18,5	11,4	19	8,6	22,39	0,00486	1,98	5,39	1109,3	0,000811



**Rozwiązanie:**Równanie krzywej Q-s:

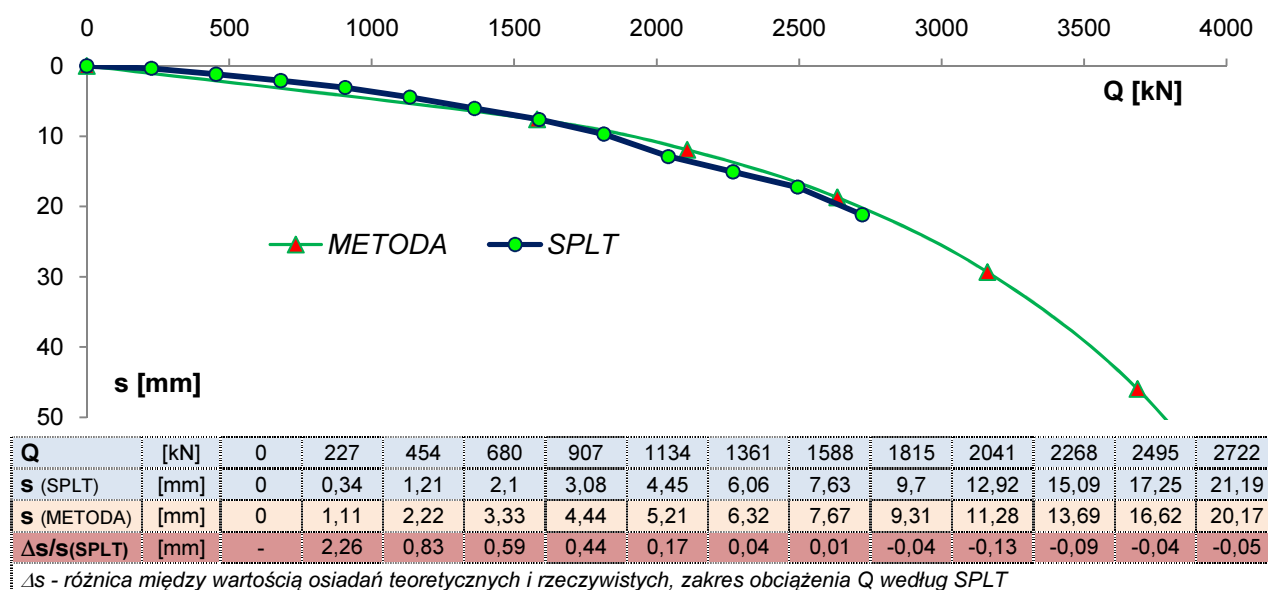
$$s(Q) = Q^*(s''/Q_s), \text{ dla } Q \in <0; Q_s> \quad s(Q) = s' * e^{lQ}$$

$$s(Q) = 0,0049Q; \\ \text{dla } Q \in <0; 1109>$$

$$s(Q) = 1,98 * e^{0,00081Q}$$

Lp	Q <sub>f,i</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]	Q <sub>f,i</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]	L <sub>gn</sub> /L/D [m]	η [-]	METODA		SPLT	
							Q <sub>c</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]	Q <sub>c</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]
1	0	0	0	1,98	1,35	0,95	0	0	0	0
2	1109,3	5,388	1109,3	5,39			227	0,34		
3			1664	7,62			454	1,21		
4			2218,6	11,94			680	2,10		
5			2773,3	18,72			907	3,08		
6			3328	29,33			1134	4,45		
7			3882,6	45,97			1361	6,06		
8			4437,3	72,04			1588	7,63		
9							1815	9,70		
10							2041	12,92		
11							2268	15,09		
12							2495	17,25		
13							2722	21,19		

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznej zdefiniowanej na podstawie zależności (59)+(66):



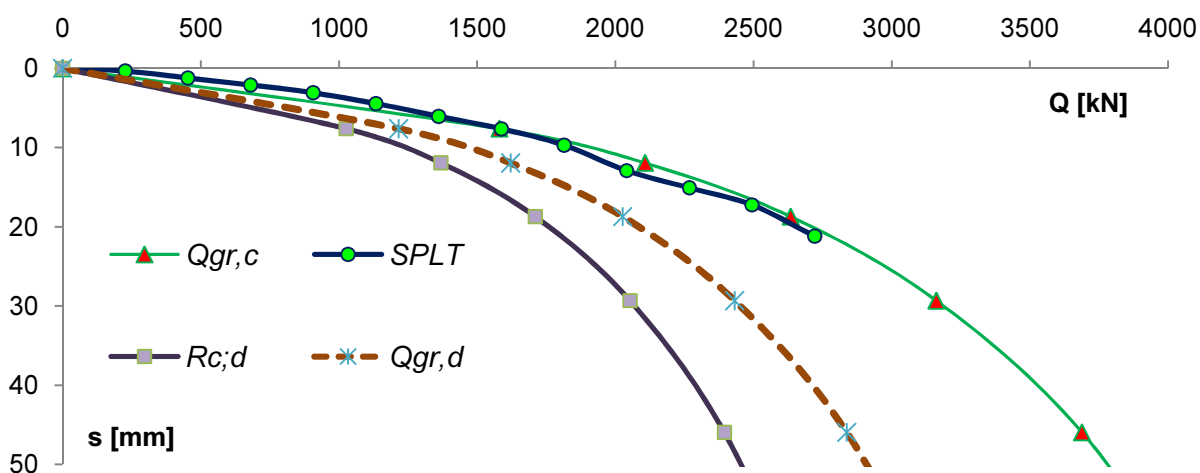
Rys. 6.55. Zależność analityczna Q-s wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT oraz krzywa rzeczywista dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=18.5m

Wartości obliczeniowe nośności według PN-EN:1997 oraz z zastosowaniem współczynnika  $F_S=1.3$ :

Lp	METODA					PN-EN 1997			SPLT	
	$Q_{gr,c}$	$F_S$	$Q_{gr,d}$	$s_i$	$\xi_{3,4}$	$R_{c,k}$	$\gamma_t$	$R_{c,d}$	$Q_c$	$s_i$
[-]	[kN]	[-]	[kN]	[mm]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	[mm]
1	0,00	1,3	0	0,00	1,4	0,00	1,1	0	0	0,0
2									227	0,3
3	1580,78	1,3	1215,98	7,62	1,4	1129,13	1,1	1026,48	454	1,2
4	2107,70	1,3	1621,31	11,94	1,4	1505,50	1,1	1368,64	680	2,1
5	2634,63	1,3	2026,64	18,72	1,4	1881,88	1,1	1710,8	907	3,1
6	3161,56	1,3	2431,97	29,33	1,4	2258,25	1,1	2052,96	1134	4,4
7	3688,48	1,3	2837,29	45,97	1,4	2634,63	1,1	2395,12	1361	6,1
8	4215,41	1,3	3242,62	72,04	1,4	3011,01	1,1	2737,28	1588	7,6
9									1815	9,7
10									2041	12,9
11									2268	15,1
12									2495	17,2
13									2722	21,2

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznych zdefiniowanych na podstawie zależności (59)+(66):

- o krzywej wyznaczonej na podstawie wyników badań podłoża gruntowego wg opracowanej metody ( $Q_{gr,c}$ )
- o krzywej obliczeniowej, współczynniki bezpieczeństwa według PN-EN:1997 ( $R_{c,d}$ );
- o krzywej obliczeniowej, współczynnik globalny bezpieczeństwa  $F_S=1.3$  ( $Q_{gr,d}$ ).



$Q_{gr,c}$  – krzywa wyznaczona na podstawie parametrów podłoża wg proponowanej METODY

$Q_{gr,d} = \frac{Q_{gr,c}}{F_S}$  – krzywa obliczeniowa dla  $F_S = 1.3$

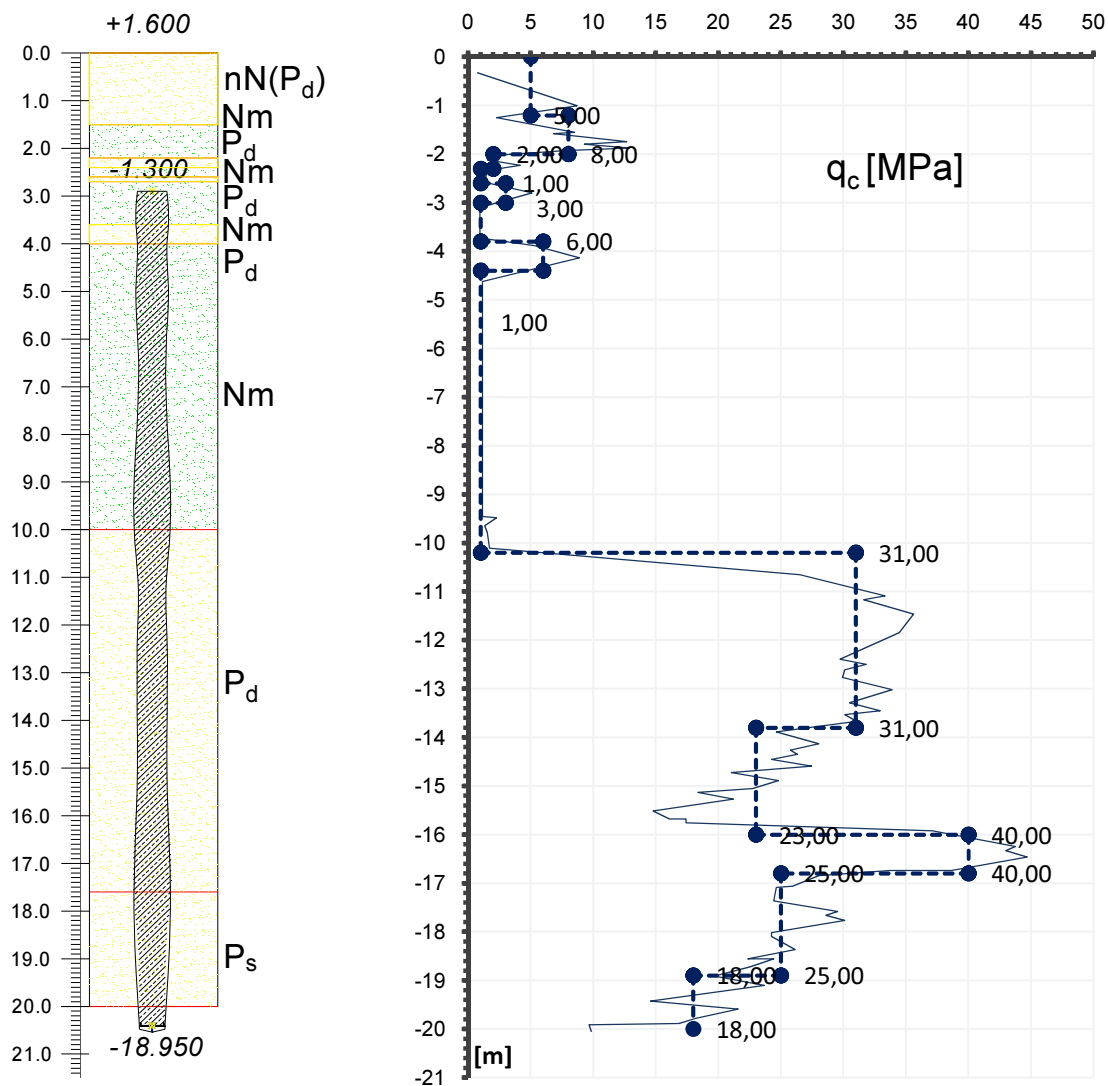
$R_{c,d} = \frac{Q_{gr,c}}{\xi_{3,4} \cdot \gamma_t}$  – krzywa obliczeniowa wg procedur PN – EN 1997: 2008 – 1

Rys. 6.56. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=18.5m.

**Przykład 3.**

Pał Vibro o średnicy 457/520mm i długości  $L=17.5\text{m}$ , z podstawą w piaskach średnich, wykonany pod posadowienie zbiornika kwasu siarkowego w Szczecinie.

Profil i sondowanie CPT:



Rys. 6.57. Profil geologiczny oraz sondowanie CPT dla pała Vibro o średnicy 457/520mm i długości  $L=17.5\text{m}$

Charakterystyka pała, podłoża gruntowego oraz parametry krzywej Q-s na podstawie zależności (59)+(66).

$L_p$	oznaczenie pała	$D$	$L$	$L_{gn}$	$q_{cp}$	$q_{cs}$	$L(q_{cp}+q_{cs})/2L_{gn}$	$s''/Q_s$	$s'$	$s''$	$Q_s$	$\lambda$
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[1/kN]
4	2.3	0,457	17,5	10,5	18	16,2	28,50	0,00435	2,53	6,87	1578,1	0,00057

**Rozwiązanie:****Równanie krzywej Q-s:**

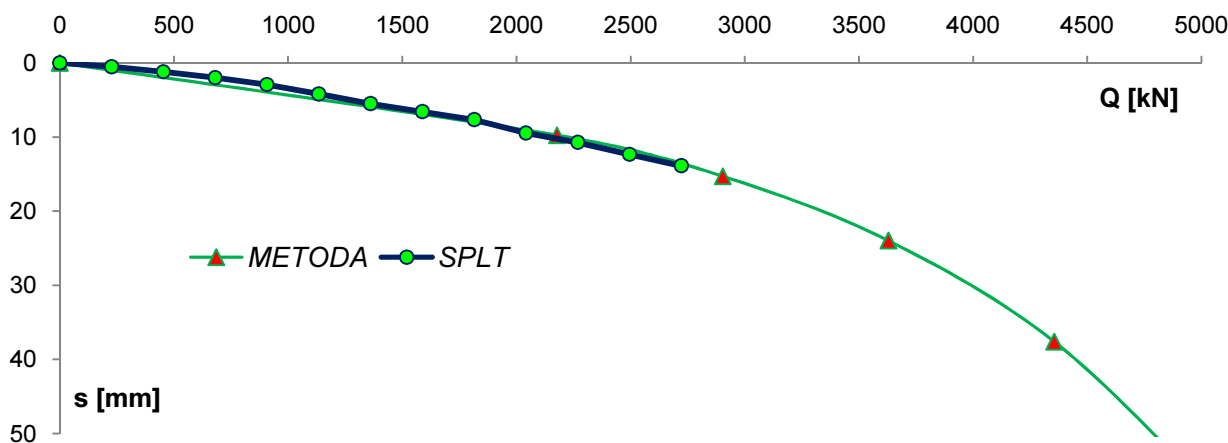
$$s(Q) = Q \cdot (s''/Qs), \text{ dla } Q \in \langle 0; Q_s \rangle \quad s(Q) = s' \cdot e^{\lambda Q}$$

$$s(Q) = 0,0044Q; \\ \text{dla } Q \in \langle 0; 1279 \rangle$$

$$s(Q) = 2,53 \cdot e^{0,00057Q}$$

Lp	Q <sub>f,i</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]	Q <sub>f,i</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]	L <sub>gn</sub> /L/D [m]	η [-]	METODA		SPLT		
							Q <sub>c</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]	Q <sub>c</sub> [kN]	s <sub>i</sub> [mm]	
1	0	0	0,00	2,53	1,3	1,0	0	0	0	0	
2	1578,1	6,865	1578	6,87			226,82	0,52			
3			2367	9,75		2177,82	9,75	453,65	1,20		
4			3156	15,29		2903,76	15,29	680,47	1,99		
5			3945	23,98		3629,70	23,98	907,29	2,92		
6			4734	37,59		4355,64	37,59	1134,11	4,20		
7			5523	58,94		5081,58	58,94	1360,94	5,50		
8							0,92			1587,76	6,57
9										1814,58	7,66
10										2041,41	9,46
11										2268,23	10,71
12										2495,05	12,33
13										2721,88	13,87

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznej zdefiniowanej na podstawie zależności (59)-(66):



Q	[kN]	0	226,8	453,7	680,5	907,3	1134	1361	1588	1815	2041	2268	2495	2722
s (SPLT)	[mm]	0	0,52	1,2	1,99	2,92	4,2	5,5	6,57	7,66	9,46	10,71	12,33	13,87
s (METODA)	[mm]	0	1,00	2,00	2,99	3,99	4,99	5,88	6,77	7,79	8,96	10,31	11,87	13,66
Δs/s(SPLT)	[mm]	-	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Δs - różnica między wartością osiadań teoretycznych i rzeczywistych, zakres obciążenia Q według SPLT

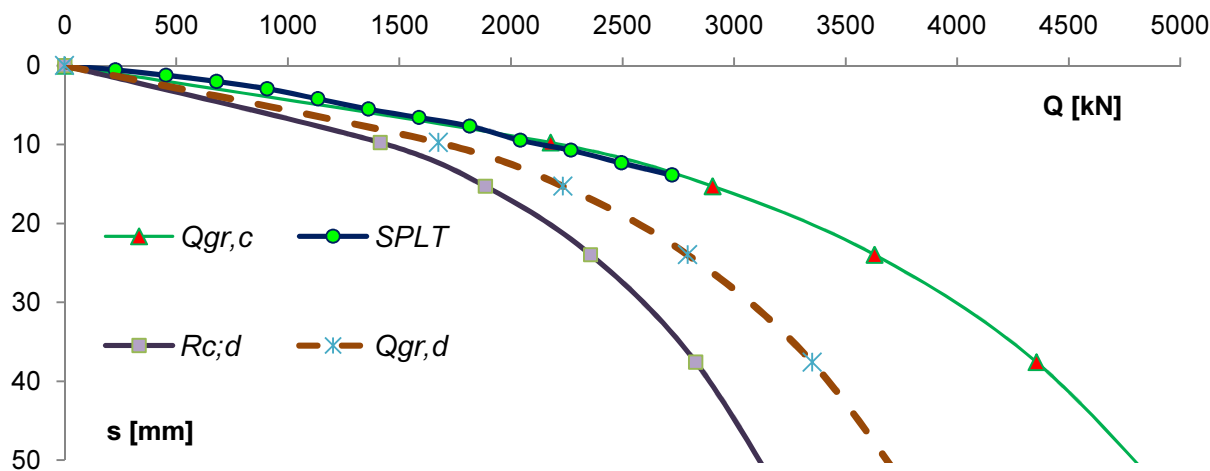
Rys. 6.58. Zależność analityczna wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT dla pala Vibro o średnicy 457/520mm i długości L=17.5m.

Wartości obliczeniowe nośności według PN-EN:1997 oraz z zastosowaniem współczynnika  $F_S=1.3$ :

Lp	METODA					PN-EN 1997			SPLT	
	$Q_{gr,c}$	$F_S$	$Q_{gr,d}$	$s_i$	$\xi_{3,4}$	$R_{c,k}$	$\gamma_t$	$R_{c,d}$	$Q_c$	$s_i$
[-]	[kN]	[-]	[kN]	[mm]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	[mm]
1	0,00	1,3	0,00	0,00	1,4	0,00	1,1	0	0	0
2									226,82	0,52
3	2177,82	1,3	1675,25	9,75	1,4	1555,59	1,1	1414,17	453,65	1,20
4	2903,76	1,3	2233,66	15,29	1,4	2074,12	1,1	1885,56	680,47	1,99
5	3629,70	1,3	2792,08	23,98	1,4	2592,65	1,1	2356,95	907,29	2,92
6	4355,64	1,3	3350,50	37,59	1,4	3111,17	1,1	2828,34	1134,11	4,20
7	5081,58	1,3	3908,91	58,94	1,4	3629,70	1,1	3299,73	1360,94	5,50
8									1587,76	6,57
9									1814,58	7,66
10									2041,41	9,46
11									2268,23	10,71
12									2495,05	12,33
13									2721,88	13,87

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznych zdefiniowanych na podstawie zależności (59)+(66):

- o krzywej wyznaczonej na podstawie wyników badań podłoża gruntowego wg opracowanej metody ( $Q_{gr,c}$ );
- o krzywej obliczeniowej, współczynniki bezpieczeństwa według PN-EN:1997 ( $R_{c,d}$ );
- o krzywej obliczeniowej, współczynnik globalny bezpieczeństwa  $F_S=1.3$  ( $Q_{gr,d}$ ).



$Q_{gr,c}$  – krzywa wyznaczona na podstawie parametrów podłoża wg proponowanej METODY

$Q_{gr,d} = \frac{Q_{gr,c}}{F_S}$  – krzywa obliczeniowa dla  $F_S = 1.3$

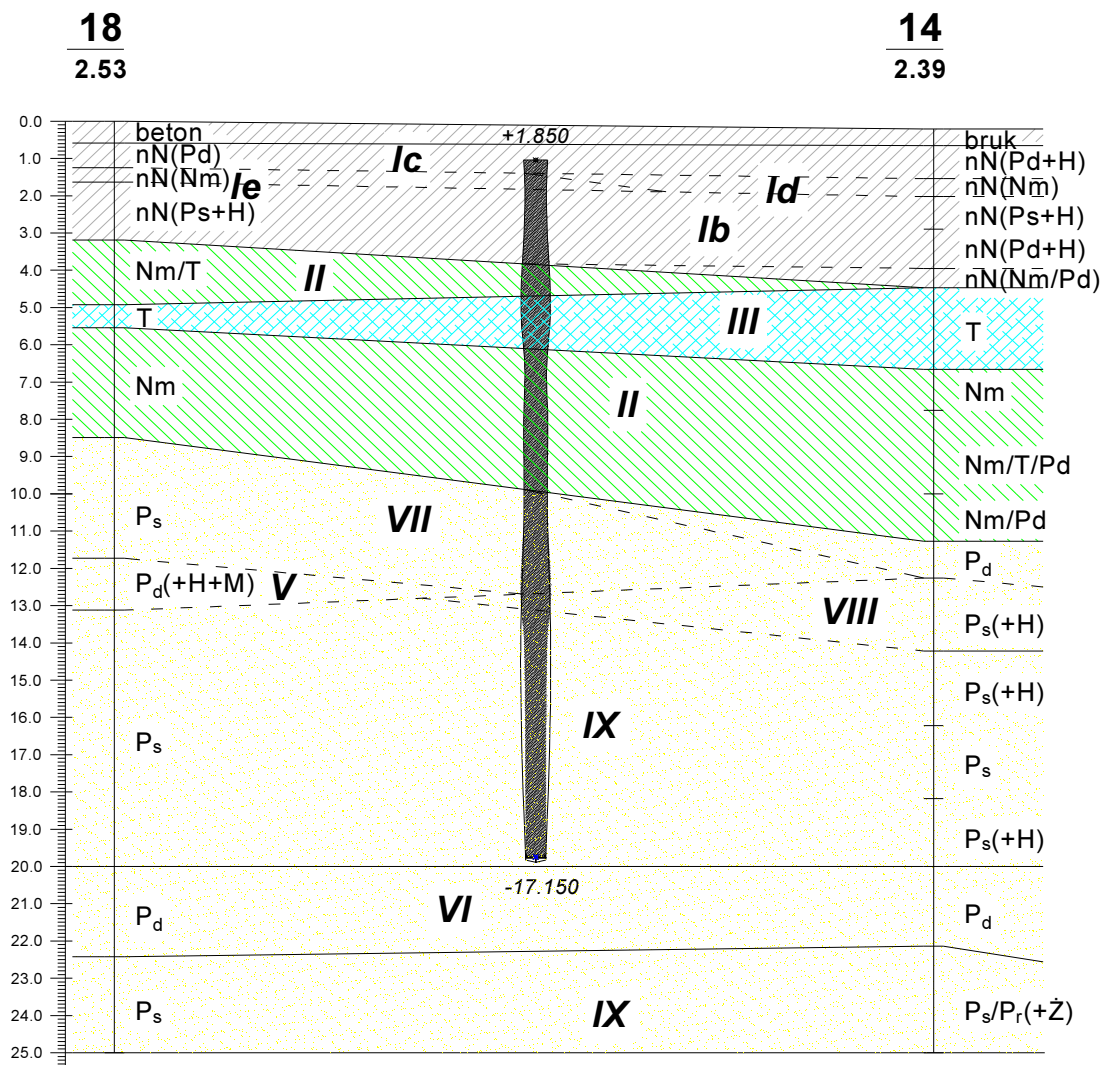
$R_{c,d} = \frac{Q_{gr,c}}{\xi_{3,4} \cdot \gamma_t}$  – krzywa obliczeniowa wg procedur PN – EN 1997:2008 – 1

Rys. 6.59. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pali Vibro o średnicy 457/520mm i długości  $L=17.5m$ .

**Przykład 4.**

Pał Vibro o średnicy 408/460mm i długości  $L=19.0\text{m}$ , z podstawą w piaskach drobnych, wykonany pod posadowienie silosu na materiały sypkie w Szczecinie. Krzywa Q-s wyznaczona na podstawie otworu badawczego, wartość oporów na stożku sondy CPT ( $q_c$ ) określono na podstawie korelacji ze stopniem zagęszczenia ( $I_D$ ) wg Tarnawskiego [35].

Profil geotechniczny:



Rys. 6.60. Profil geologiczny dla pała Vibro o średnicy 408/460mm i długości  $L=19.0\text{m}$ .

## Rozwiązanie:

nazwa gruntu	symbol gruntu	miąższość warstwy	$I_D$	$q_c$
[-]	[-]	[m]	[-]	[MPa]
nN(Pd)	Ic	0,1	0,50	15
nN(Nm/T)	Ie	0,3	-	2
nN(Pd)	Ib	1,6	0,30	10,5
Nm/T	II	1,8	-	2
T	III	0,6	-	1
Nm	II	3	-	3
Ps	VII	3,2	0,45	13,5
Pd	V	1,4	0,61	21,5
Ps/Pr	IX	7	0,73	24
Pd	VI	2	0,77	27

Charakterystyka pala, podłoża gruntowego oraz parametry krzywej Q-s na podstawie zależności (59)÷(66):

$L_p$	oznaczenie pala	D	L	$L_{gn}$	$q_{cp}^*$	$q_{cs}^*$	$L(q_{cp}+q_{cs})/2L_{gn}$	$s''/Q_s$	$s'$	$s''$	$Q_s$	$\lambda$
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[1/kN]
	5.4	0,408	20	8,4	24	6,9	36,79	0,00414	2,47	6,71	1619,2	0,000556

## Równanie krzywej Q-s:

$$s(Q)=Q*(s''/Q_s), \text{ dla } Q \in <0; Q_s>$$

$$s(Q)=s' * e^{\lambda Q}$$

$$s(Q)=0,0042Q;$$

dla  $Q \in <0; 1197>$

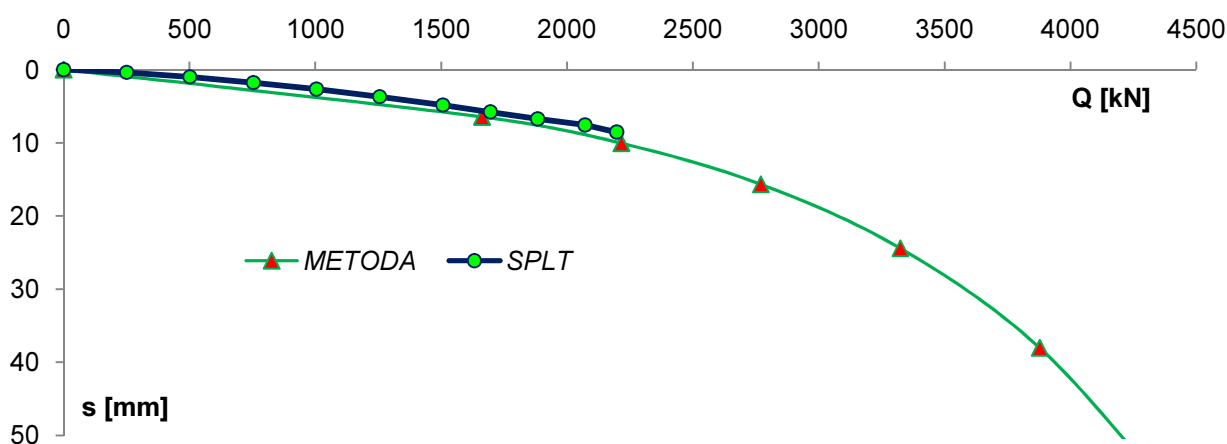
$$s(Q)=1,71 * e^{0,0008Q}$$

METODA

SPLT

$L_p$	$Q_{f,i}$	$s_i$	$Q_{f,i}$	$s_i$	$L_{gn}/L/D$	$\eta$	$Q_c$	$s_i$	$Q_c$	$s_i$
[-]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[m]	[-]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
1	0	0	0	1,71	1,43	1,0	0	0	0	0,00
2	1107,9	4,639	1107,9	4,639			251	0,37		
3			1661,8	6,462102		1661,82	6,46	502	1,00	
4			2215,8	10,06545		2215,76	10,06	754	1,79	
5			2769,7	15,67806		2769,71	15,67	1005	2,68	
6			3323,7	24,42033		3323,65	24,42	1256	3,71	
7			3877,6	38,03739		3877,59	38,03	1507	4,85	
8			4431,5	59,24749		4431,53	59,24	1696	5,79	
9			4985,5	92,2846				1884	6,74	
10			5539,4	143,7436				2072	7,57	
			6093,4	223,8967			2198	8,56		
			6647,3	348,7441						

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznej zdefiniowanej na podstawie zależności (59)+(66):



Q	[kN]	0	251	502	754	1005	1256	1507	1696	1884	2072	2198
s (SPLT)	[mm]	0	0,37	1	1,79	2,68	3,71	4,85	5,79	6,74	7,57	8,56
s (METODA)	[mm]	0	1,05	2,11	3,17	4,22	4,67	5,71	6,64	7,72	8,97	9,92
$\Delta s/s(\text{SPLT})$	[mm]	-	1,84	1,11	0,77	0,57	0,26	0,18	0,15	0,15	0,18	0,16

$\Delta s$  - różnica między wartością osiadań teoretycznych i rzeczywistych, zakres obciążenia Q według SPLT

Rys. 6.61. Zależność analityczna wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.

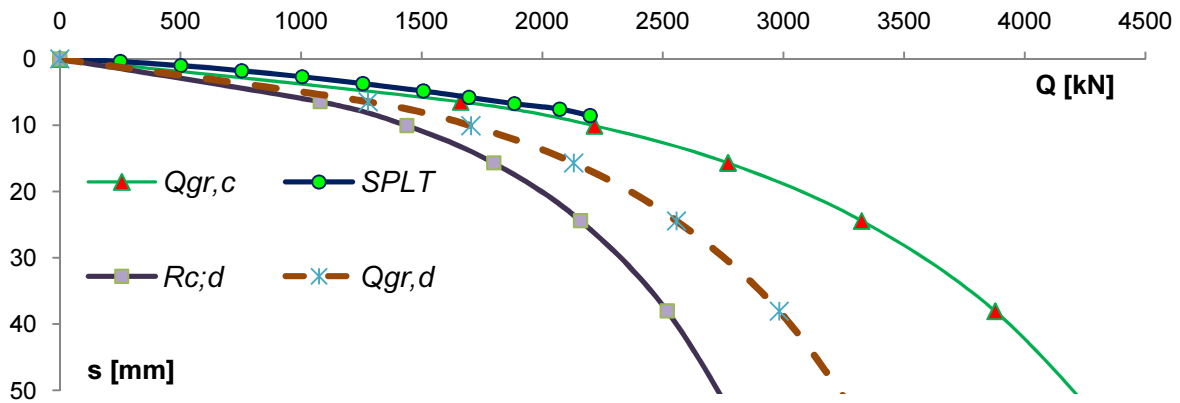
Wartości obliczeniowe nośności według PN-EN:1997 oraz z zastosowaniem współczynnika  $F_S=1.3$ :

Lp	METODA				PN-EN 1997			SPLT		
	$Q_c$	$F_s$	$Q_{gr,d}$	$s_i$	$\xi_{3,4}$	$R_{c,k}$	$\gamma_t$	$R_{c,d}$	$Q_c$	$s_i$
[-]	[kN]	[-]	[kN]	[mm]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	[mm]
1	0,00	1,3	0	0,00	1,4	0,00	1,1	0	0	0,0
2									251	0,4
3	1661,83	1,3	1278,33	6,46	1,4	1187,02	1,1	1079,11	502	1,0
4	2215,77	1,3	1704,44	10,07	1,4	1582,69	1,1	1438,81	754	1,8
5	2769,71	1,3	2130,55	15,68	1,4	1978,37	1,1	1798,51	1005	2,7
6	3323,65	1,3	2556,66	24,42	1,4	2374,04	1,1	2158,22	1256	3,7
7	3877,60	1,3	2982,77	38,04	1,4	2769,71	1,1	2517,92	1507	4,8
8	4431,54	1,3	3408,88	59,25	1,4	3165,38	1,1	2877,62	1696	5,8
9	4985,48	1,3	3834,98	92,28	1,4	3561,06	1,1	3237,32	1884	6,7
10	5539,42	1,3	4261,09	143,74	1,4	3956,73	1,1	3597,03	2072	7,6
11	6093,36	1,3	4687,20	223,90	1,4	4352,40	1,1	3956,73	2198	8,6

Zestawienie krzywych Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznych zdefiniowanych na podstawie zależności (59)+(66):

- o krzywej wyznaczonej na podstawie wyników badań podłoża gruntowego wg opracowanej metody ( $Q_{gr,c}$ );
- o krzywej obliczeniowej, współczynniki bezpieczeństwa według PN-EN:1997 ( $R_{c,d}$ );
- o krzywej obliczeniowej, współczynnik globalny bezpieczeństwa  $F_S=1.3$  ( $Q_{gr,d}$ ).





$Q_{gr,c}$  – krzywa wyznaczona na podstawie parametrów podłoża wg proponowanej METODY

$Q_{gr,d} = \frac{Q_{gr,c}}{F_s}$  – krzywa obliczeniowa dla  $F_s = 1.3$

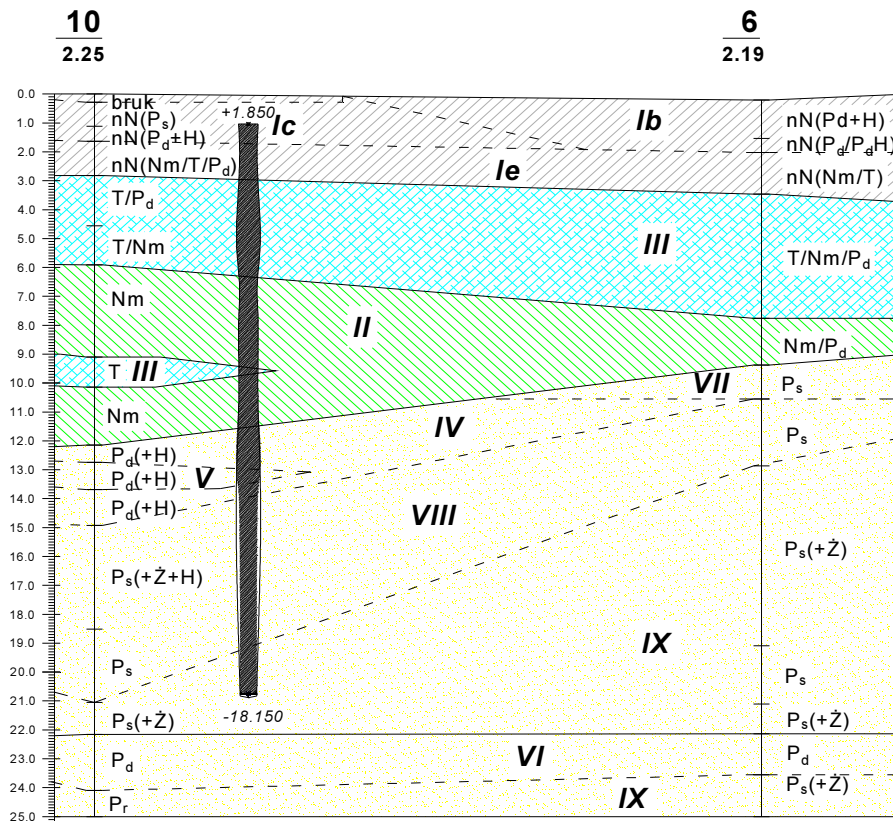
$R_{c,d} = \frac{Q_{gr,c}}{\xi_{3,4} \cdot \gamma_t}$  – krzywa obliczeniowa wg procedur PN – EN 1997:2008 – 1

Rys. 6.62. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości  $L=19.0m$ .

### Przykład 5.

Pał Vibro o średnicy 408/460mm i długości  $L=20.0m$ , z podstawą w piaskach średnich, wykonany pod posadowienie silosu na materiały sypkie w Szczecinie. Krzywa  $Q-s$  wyznaczona na podstawie otworu badawczego, wartość oporów na stożku sondy CPT ( $q_c$ ) określono na podstawie korelacji ze stopniem zagęszczenia ( $I_D$ ) wg Tarnawskiego [35].

Profil geotechniczny:



Rys. 6.63. Profil geotechniczny dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości  $L=19.0m$ .

## Rozwiązanie:

nazwa gruntu	symbol gruntu	miąższość warstwy	$l_D$	$q_c$
[-]	[-]	[m]	[-]	[MPa]
nN(Ps)	lc	0	0,50	8
nN(Pd)	lc	0,9	0,50	8
nN(Nm/T)	le	1,3	-	2
T/Pd	III	1,6	-	2
T/Nm	III	0,8	-	1
Nm	II	3	-	3
T	III	2,3	-	2
Nm	II	1,7	-	3
Pd	IV	0,7	0,48	7
Pd	V	1	0,61	14
Pd	IV	1,2	0,48	7
Ps	VIII	4,5	0,58	12
Ps	IX	1	0,73	24

Charakterystyka pala, podłoża gruntowego oraz parametry krzywej Q-s na podstawie zależności (59)÷(66).

$L_p$	oznaczenie pala	D	L	$L_{gn}$	$q_{cp}^*$	$q_{cs}^*$	$L(q_{cp}+q_{cs})/2L_{gn}$	$s''/Q_s$	$s'$	$s''$	$Q_s$	$\lambda$
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[1/kN]
	5.4	0,408	20	8,4	24	6,9	36,79	0,00414	2,47	6,71	1619,2	0,000556

## Równanie krzywej Q-s:

$$s(Q)=Q^*(s''/Q_s), \text{ dla } Q \in <0; Q_s>$$

$$s(Q)=s' * e^{lQ}$$

$$s(Q)=0,0041Q;$$

dla  $Q \in <0; 1620>$

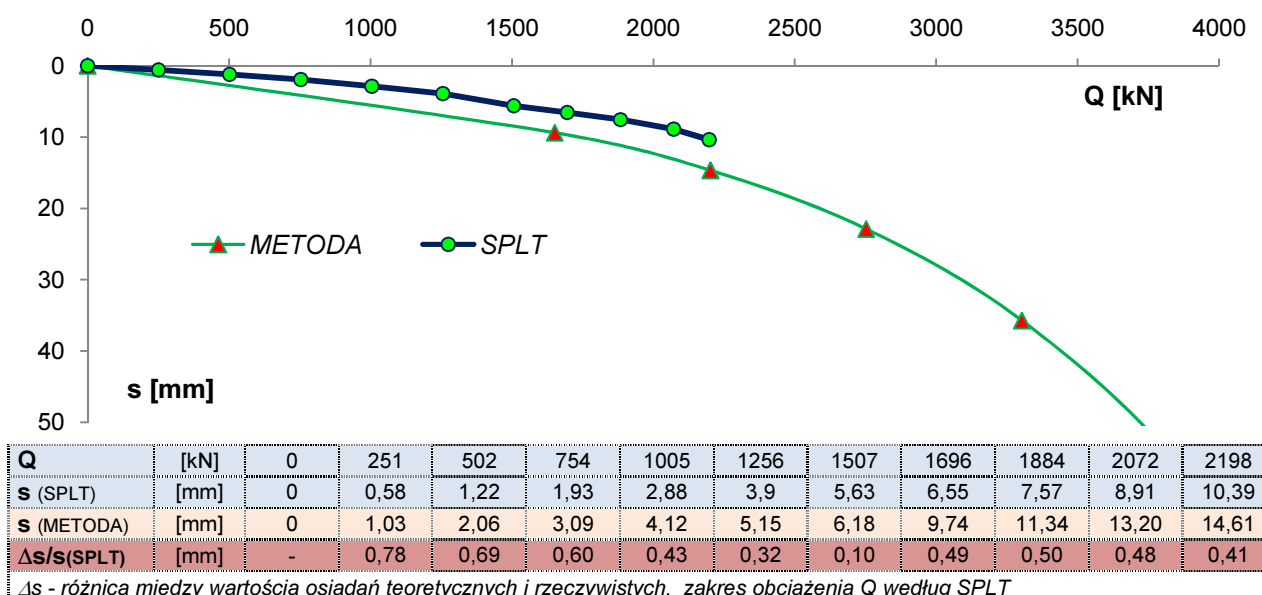
$$s(Q)=2,47 * e^{0,00055Q}$$

METODA

SPLT

$L_p$	$Q_{f,i}$	$s_i$	$Q_{f,i}$	$s_i$	$L_{gn}/L/D$	$\eta$	METODA		SPLT	
							$Q_c$	$s_i$	$Q_c$	$s_i$
[-]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[m]	[-]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
1	0	0	0	2,47	1,03	1,0	0	0	0	0,0
2	1619,2	6,710	1619,2	6,71			251	0,58		
3			2428,8	9,39		1651,59	9,39	502	1,22	
4			3238,4	14,66		2202,12	14,66	754	1,93	
5			4048	22,88		2752,65	22,88	1005	2,88	
6			4857,6	35,72		3303,18	35,72	1256	3,90	
7			5667,2	55,76		3853,71	55,76	1507	5,63	
8			6476,8	87,049				1696	6,55	
9			8096	212,09				1884	7,57	
10			10525	806,64				2072	8,91	
			11334	1259,12			2198	10,39		
			12144	1965,39						

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznej zdefiniowanej na podstawie zależności (59)+(66):



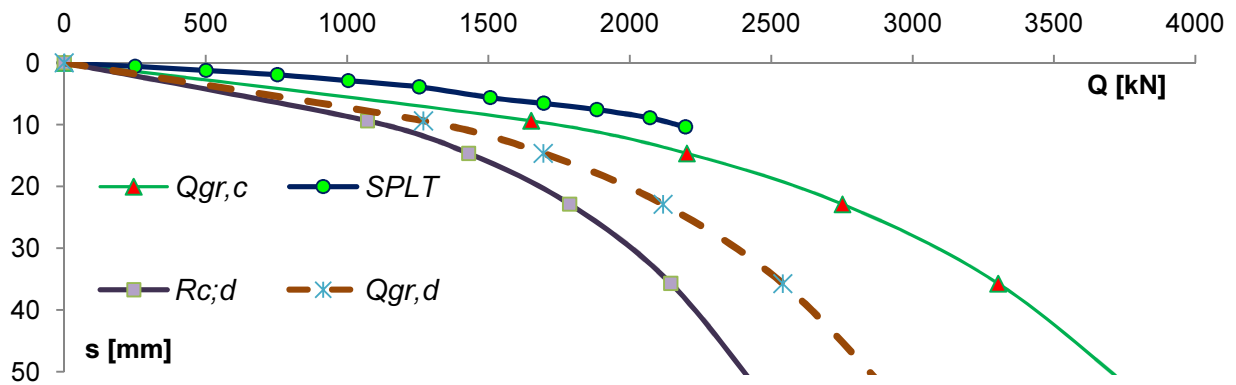
Rys. 6.64. Zależność analityczna wyznaczona na podstawie wyników sondowania CPT dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.

Wartości obliczeniowe nośności według PN-EN:1997 oraz z zastosowaniem współczynnika  $F_s=1.3$

Lp	METODA					PN-EN 1997			SPLT	
	Q <sub>c</sub>	F <sub>s</sub>	Q <sub>gr,d</sub>	s <sub>i</sub>	x <sub>3,4</sub>	R <sub>c;k</sub>	g <sub>t</sub>	R <sub>c;d</sub>	Q <sub>c</sub>	s <sub>i</sub>
[-]	[kN]	[-]	[kN]	[mm]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	[mm]
1	0,00	1,3	0	0,00	1,4	0,00	1,1	0	0	0,0
2									251	0,6
3	1651,59	1,3	1270,46	9,39	1,4	1179,71	1,1	1072,46	502	1,2
4	2202,12	1,3	1693,94	14,66	1,4	1572,94	1,1	1429,95	754	1,9
5	2752,65	1,3	2117,43	22,89	1,4	1966,18	1,1	1787,44	1005	2,9
6	3303,18	1,3	2540,91	35,73	1,4	2359,42	1,1	2144,92	1256	3,9
7	3853,71	1,3	2964,40	55,77	1,4	2752,65	1,1	2502,41	1507	5,6
8	4404,25	1,3	3387,88	87,05	1,4	3145,89	1,1	2859,90	1696	6,6
9	5505,31	1,3	4234,85	212,10	1,4	3932,36	1,1	3574,87	1884	7,6
10	7156,90	1,3	5505,31	806,65	1,4	5112,07	1,1	4647,34	2072	8,9
11	7707,43	1,3	5928,79	1259,12	1,4	5505,31	1,1	5004,82	2198	10,4

Zestawienie charakterystyki Q-s z próbnego obciążenia statycznego (SPLT) i teoretycznych zdefiniowanych na podstawie zależności (59)+(66):

- o krzywej wyznaczonej na podstawie wyników badań podłoża gruntowego wg opracowanej metody (Q<sub>gr,c</sub>);
- o krzywej obliczeniowej, współczynniki bezpieczeństwa według PN-EN:1997 (R<sub>c,d</sub>);
- o krzywej obliczeniowej, współczynnik globalny bezpieczeństwa F<sub>s</sub>=1.3 (Q<sub>gr,d</sub>).



$Q_{gr,c}$  – krzywa wyznaczona na podstawie parametrów podłoża wg proponowanej METODY

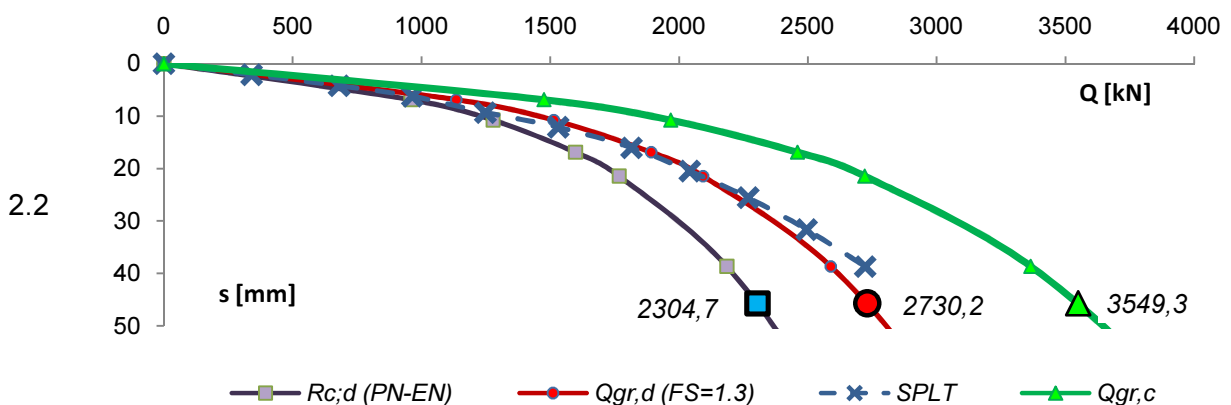
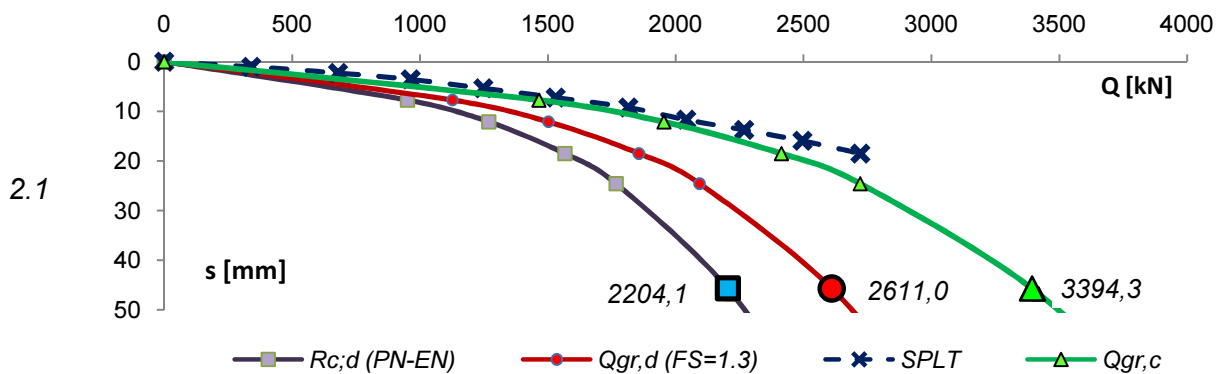
$Q_{gr,d} = \frac{Q_{gr,c}}{F_s}$  – krzywa obliczeniowa dla  $F_s = 1.3$

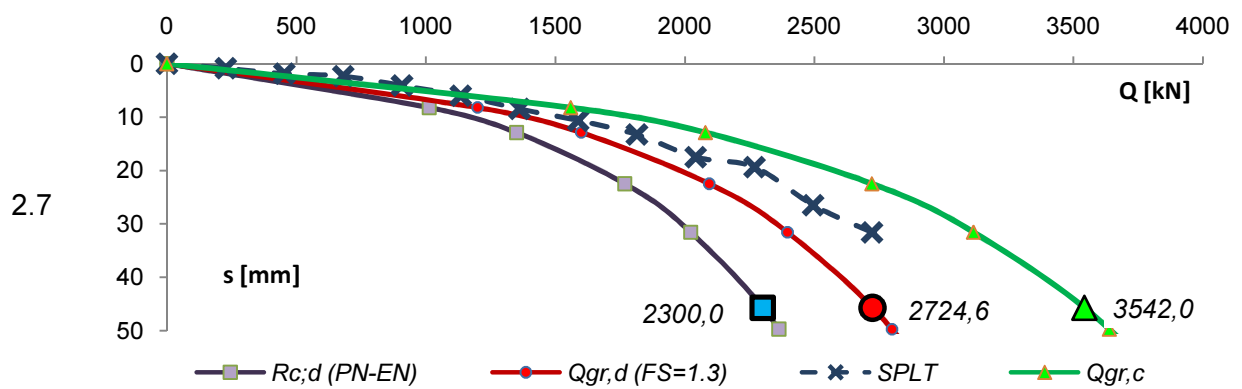
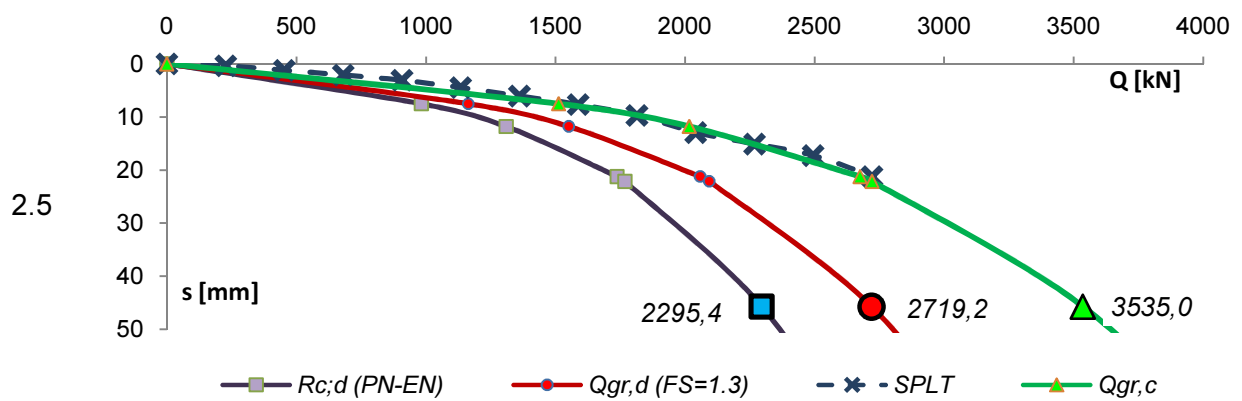
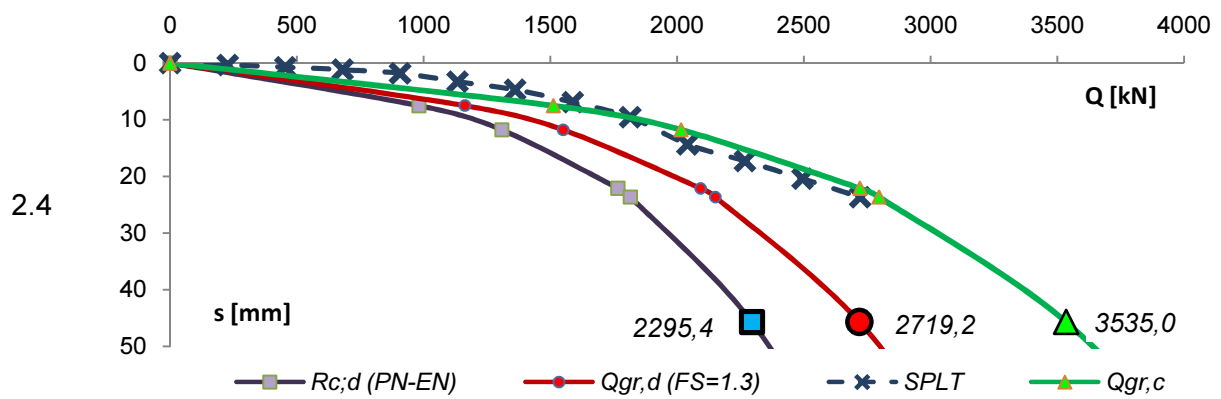
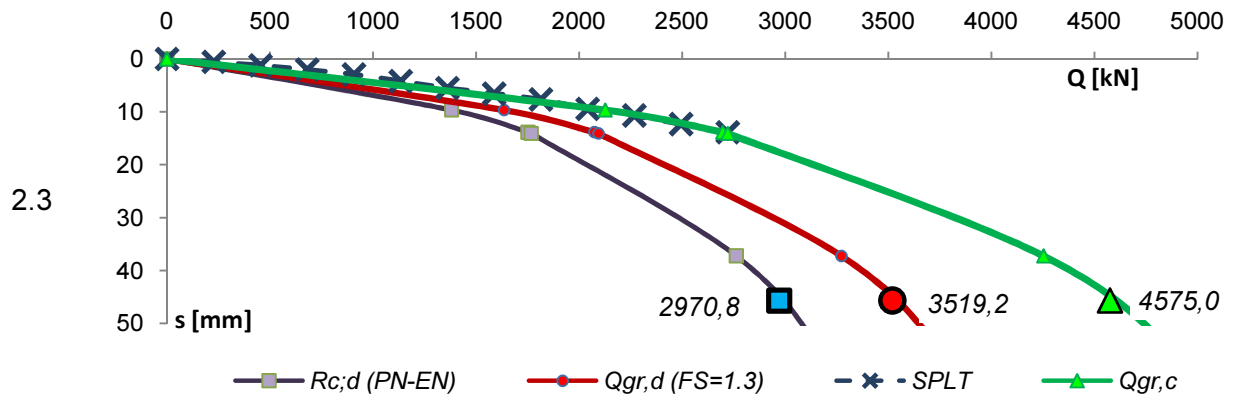
$R_{c,d} = \frac{Q_{gr,c}}{\xi_{3,4} \cdot \gamma_t}$  – krzywa obliczeniowa wg procedur PN – EN 1997:2008 – 1

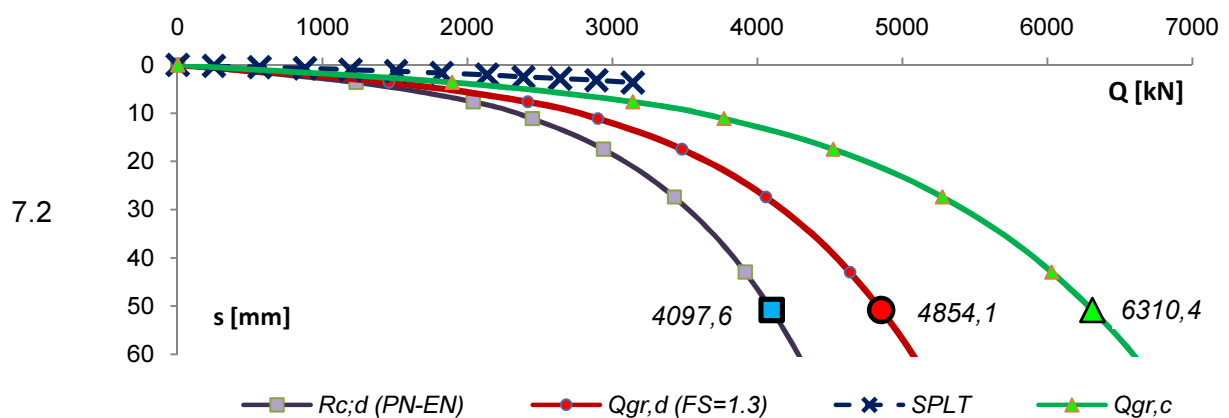
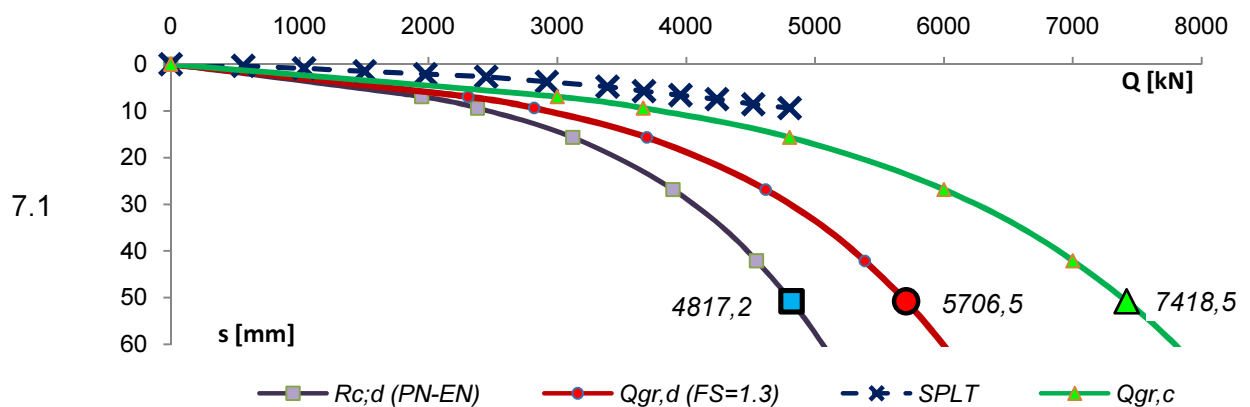
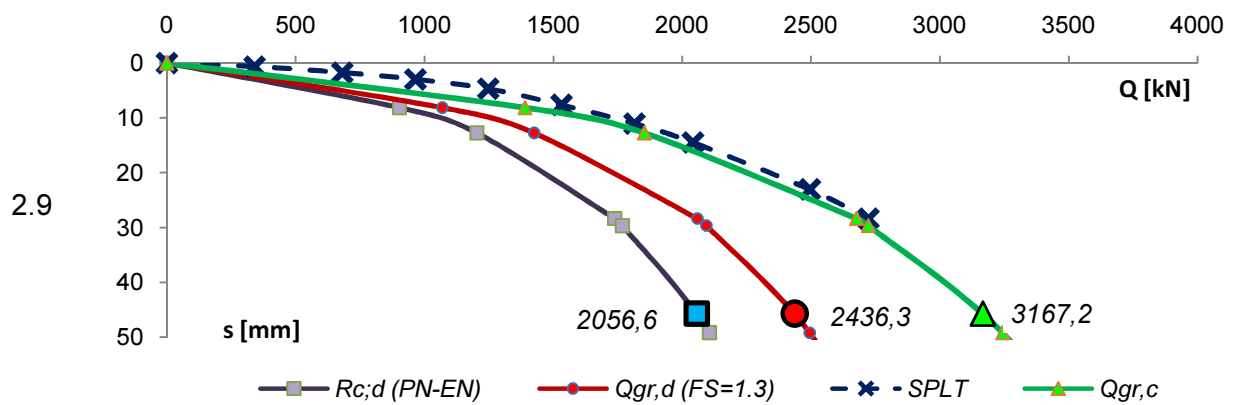
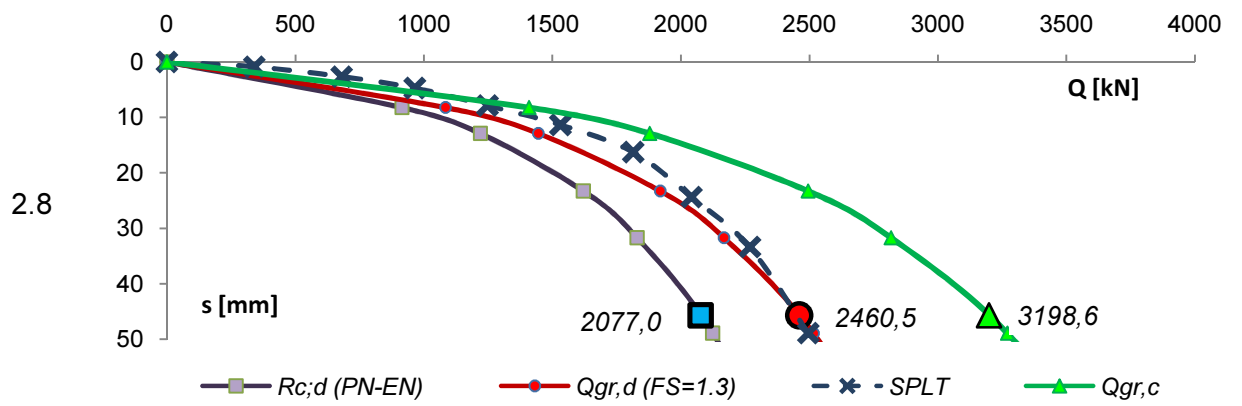
Rys. 6.65. Zestawienie zależności analitycznych i krzywej rzeczywistej dla pala Vibro o średnicy 408/460mm i długości L=19.0m.

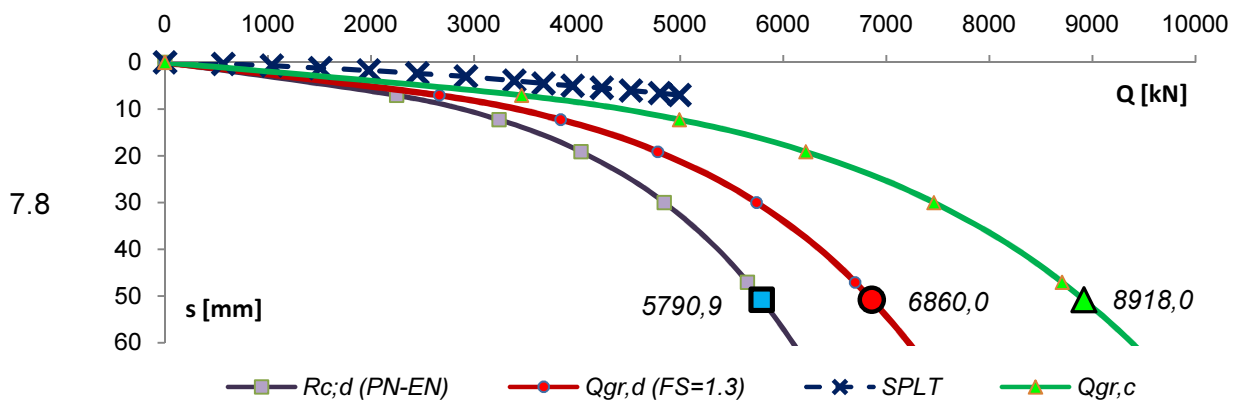
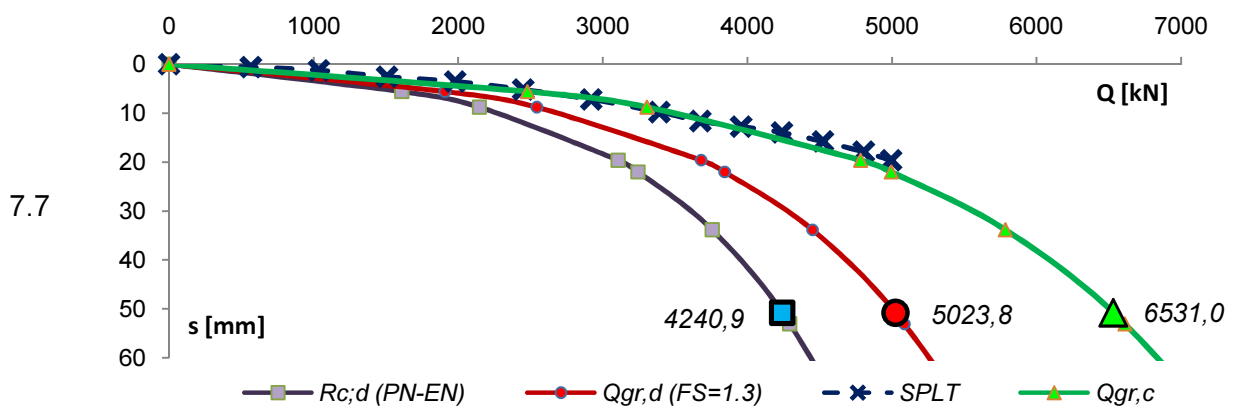
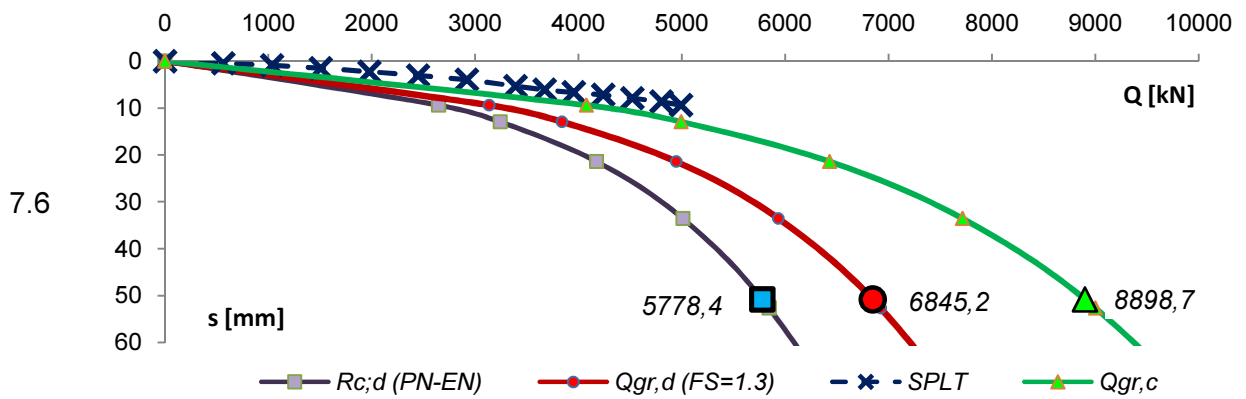
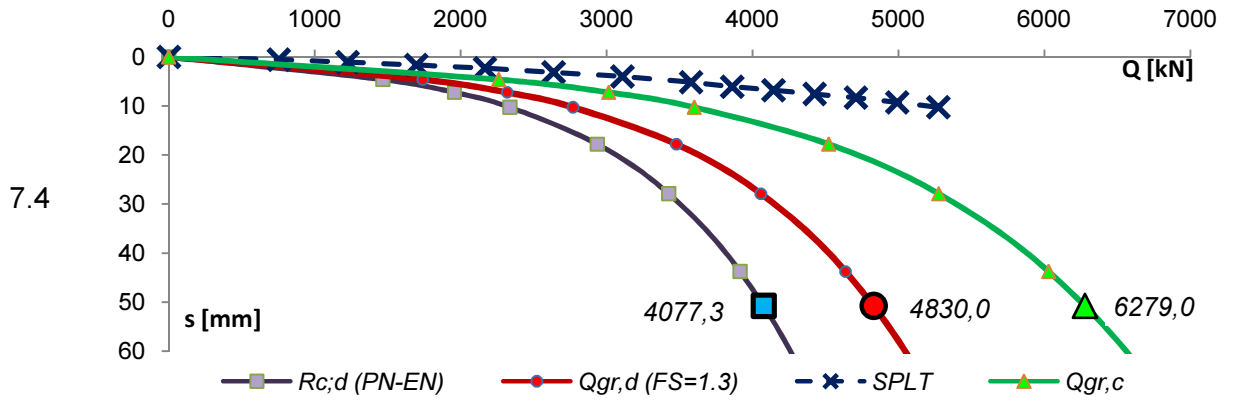
Poniżej zestawiono zbiór zależności Q-s z próbnymi obciążeniami statycznymi i teoretycznymi otrzymanymi z procedury proponowanej w pracy. Przedstawione krzywe pochodzą z trzech placów budowy:

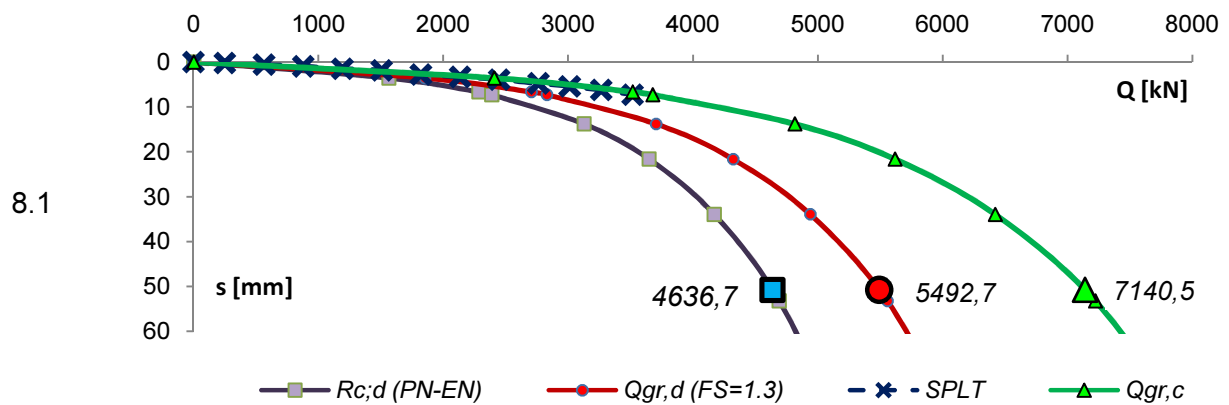
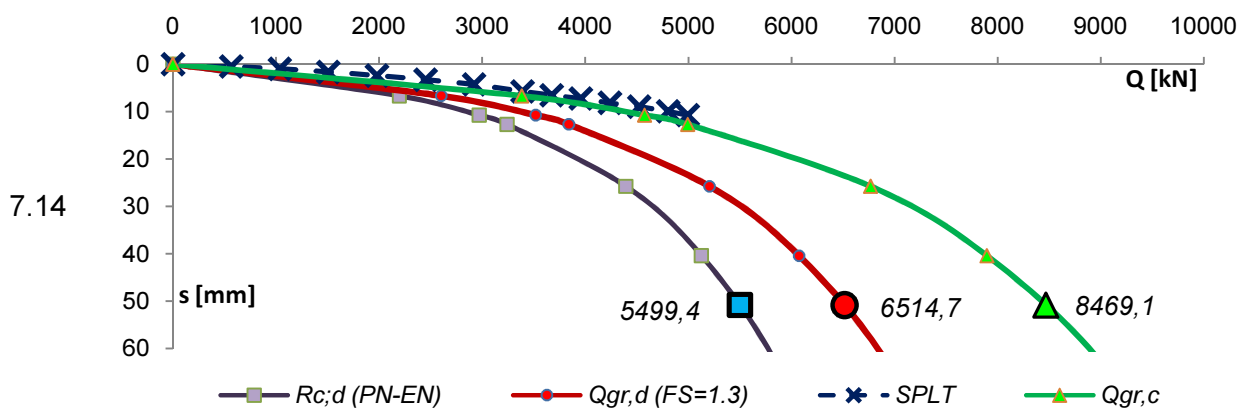
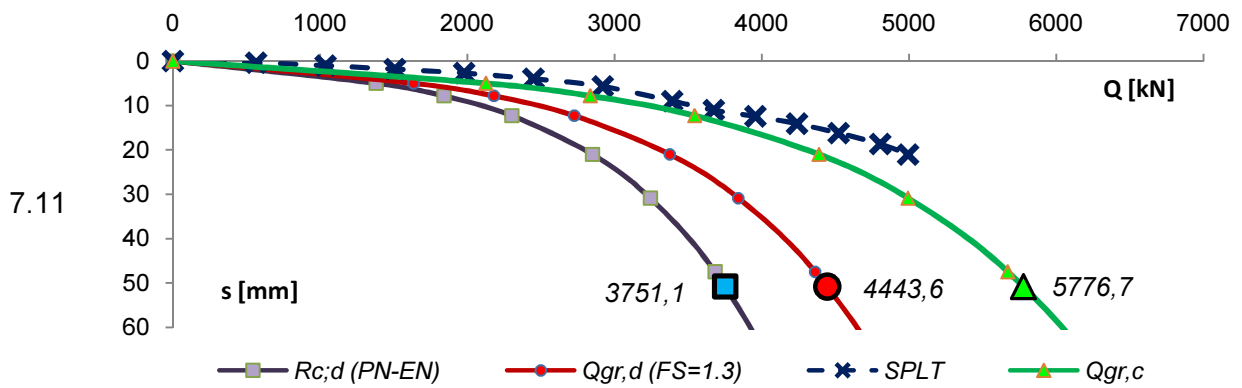
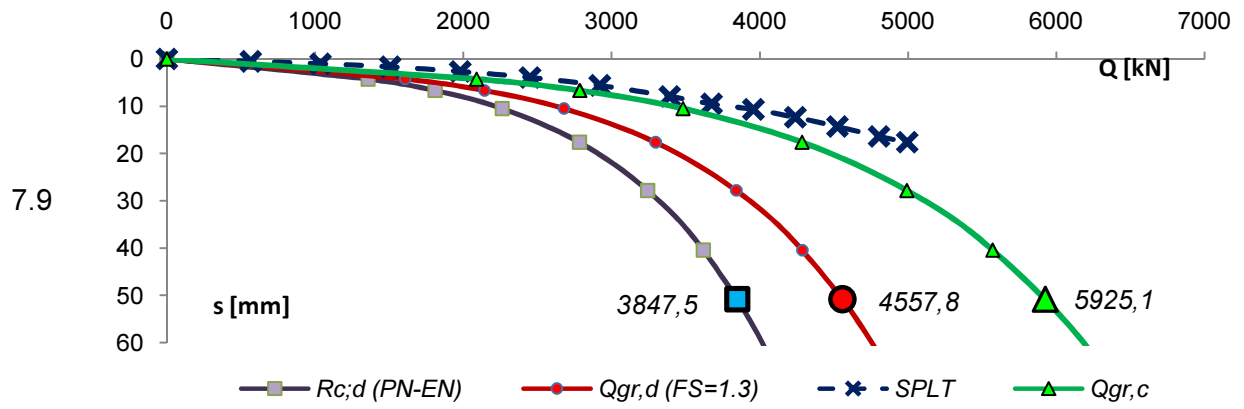
- Nabrzeża Katowickiego w Porcie Szczecin (*nr pala: 2.1 ÷ 2.9*);
- autostrady A1 w okolicach Grudziądza (*nr pala: 7.1 ÷ 7.14*);
- Trasy Sucharskiego w Gdańsku (*nr pala: 8.1 ÷ 8.9*);



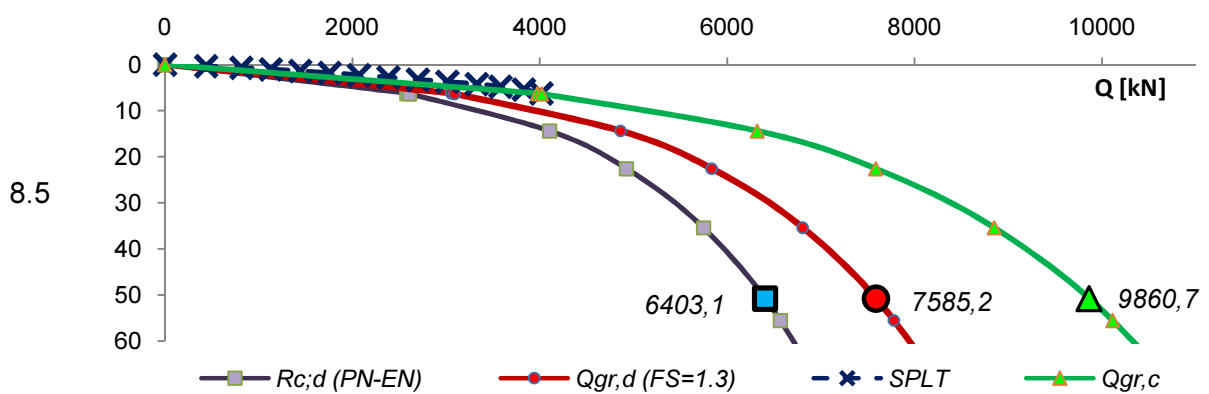
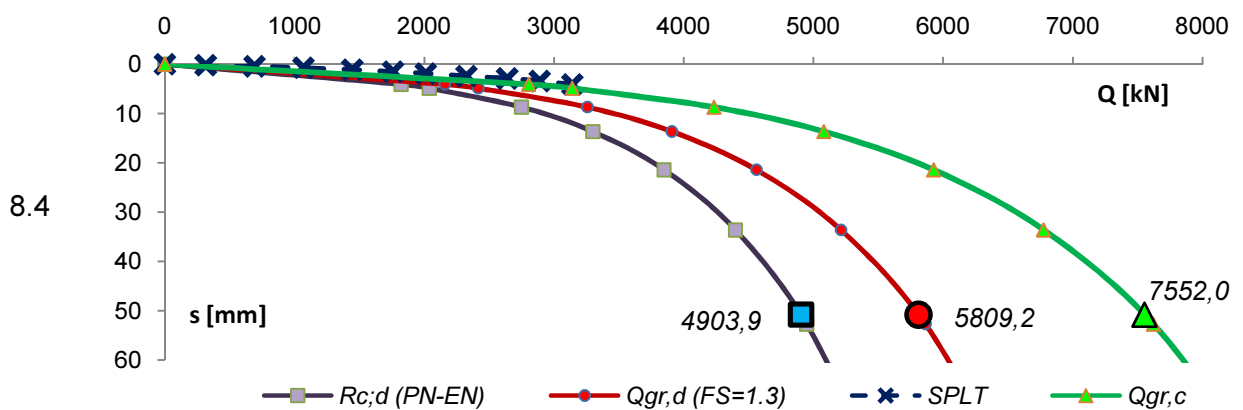
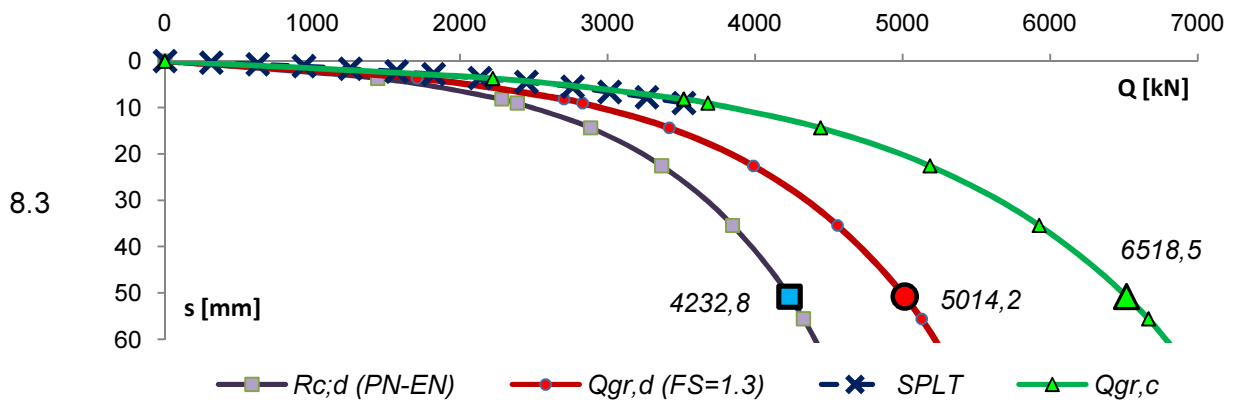
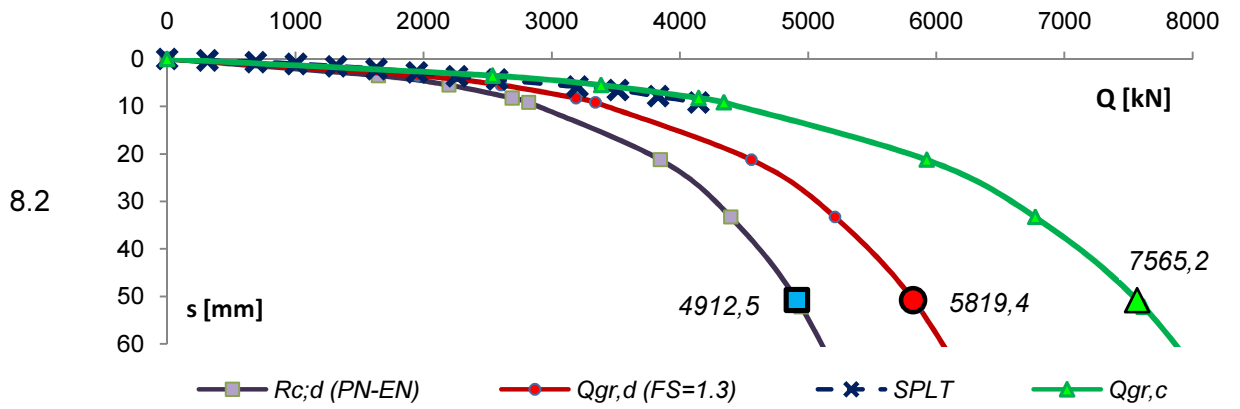


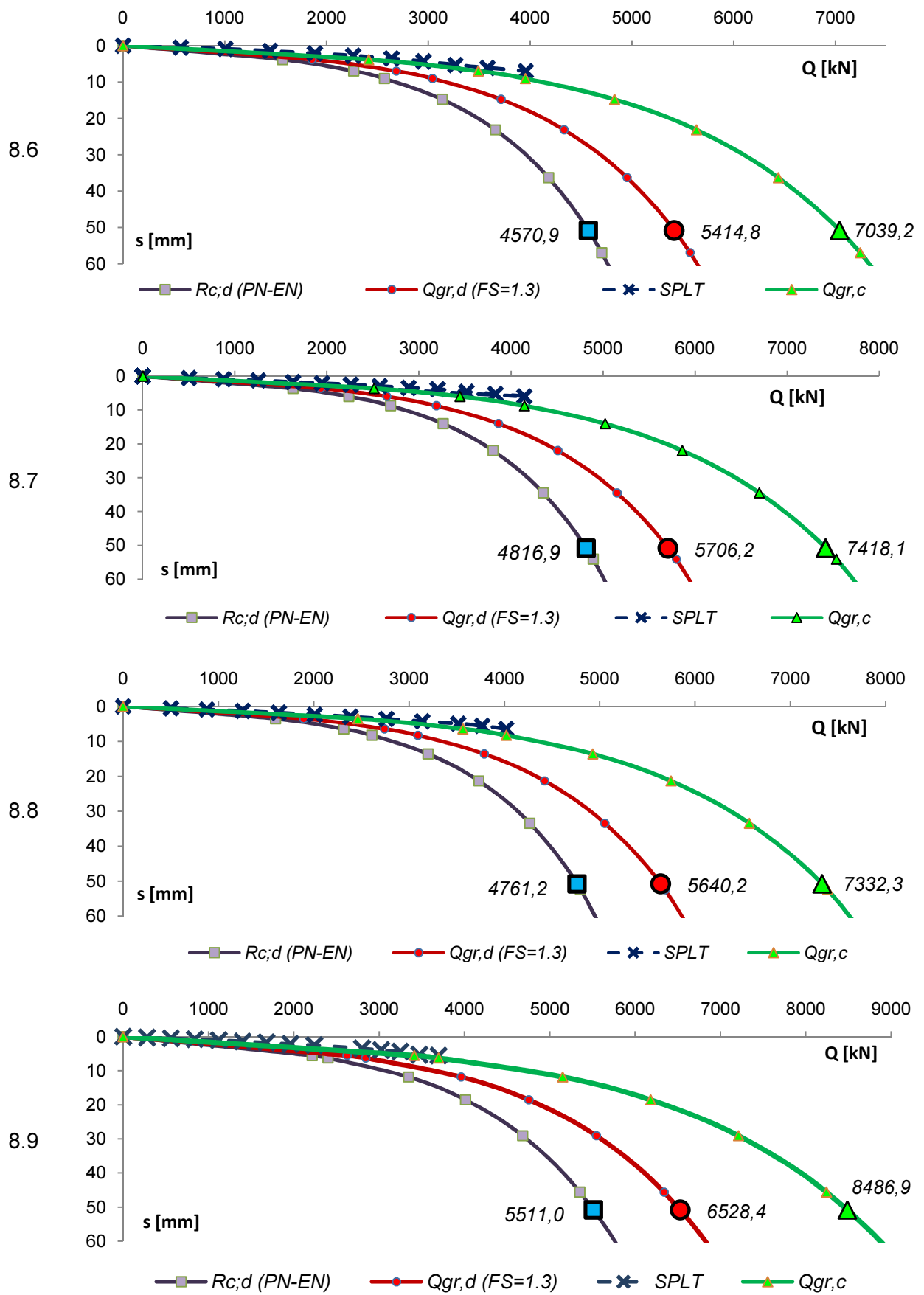












Rys. 6.66. Zestawienie krzywych rzeczywistych SPLT z krzywymi analitycznymi.

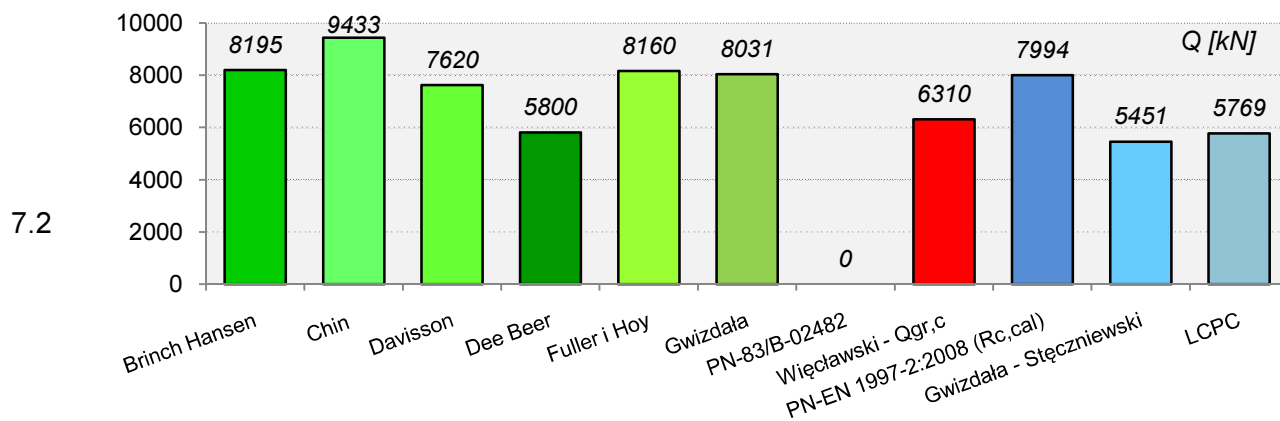
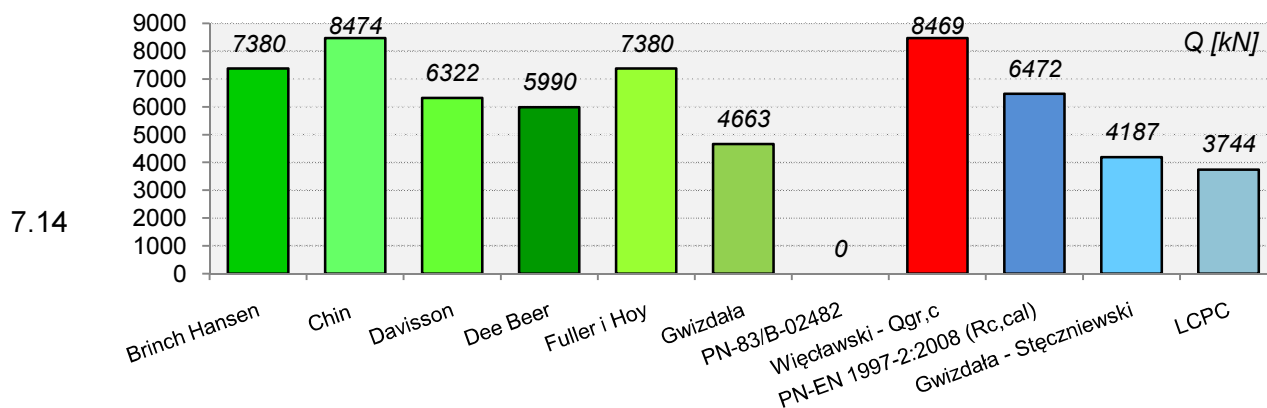
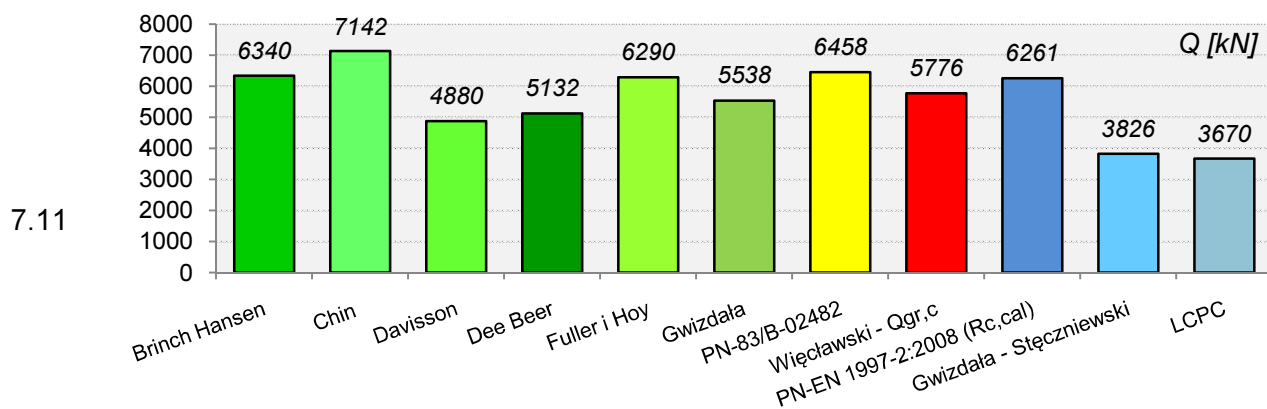
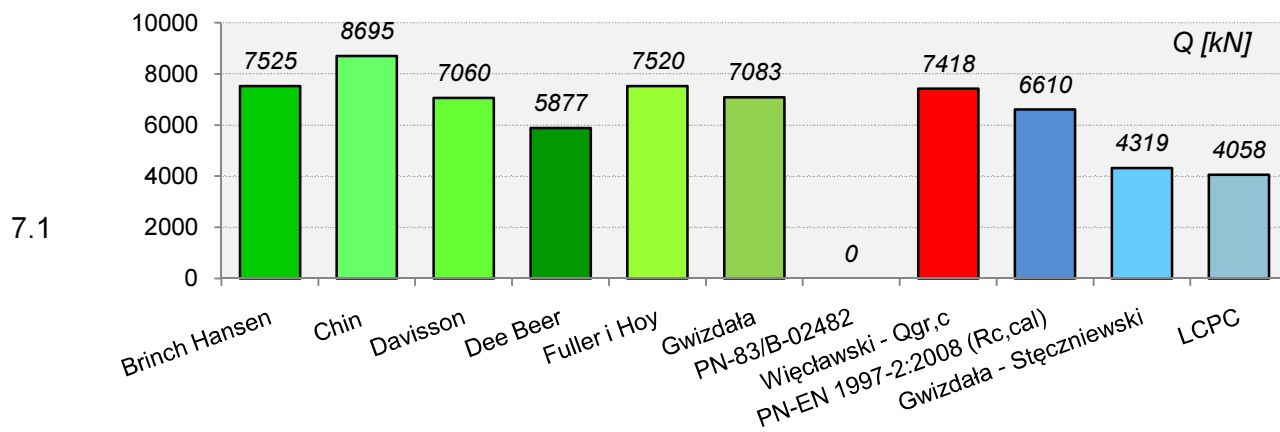
## 6.5. Nośność graniczna pali Vibro na podstawie wybranych metod stosowanych na świecie - analiza porównawcza.

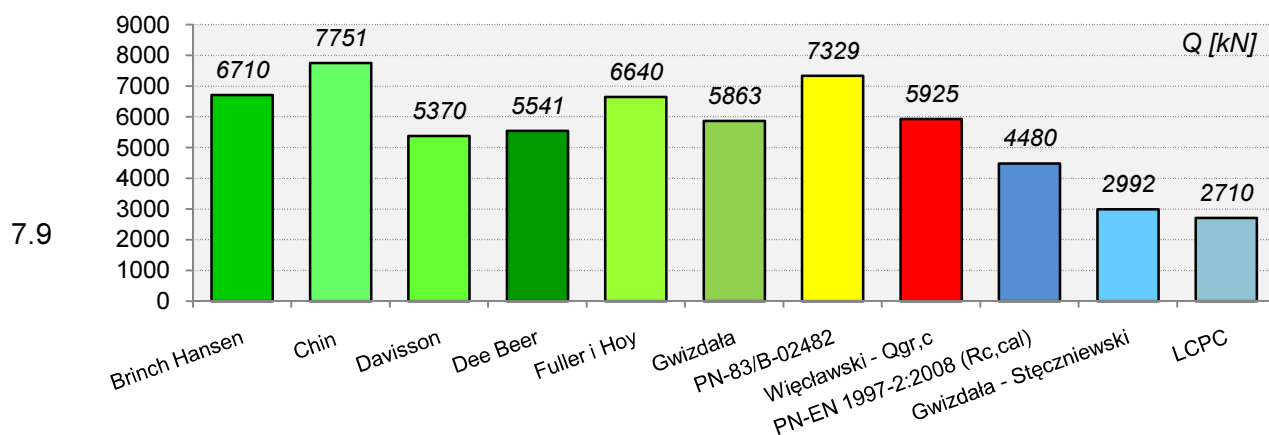
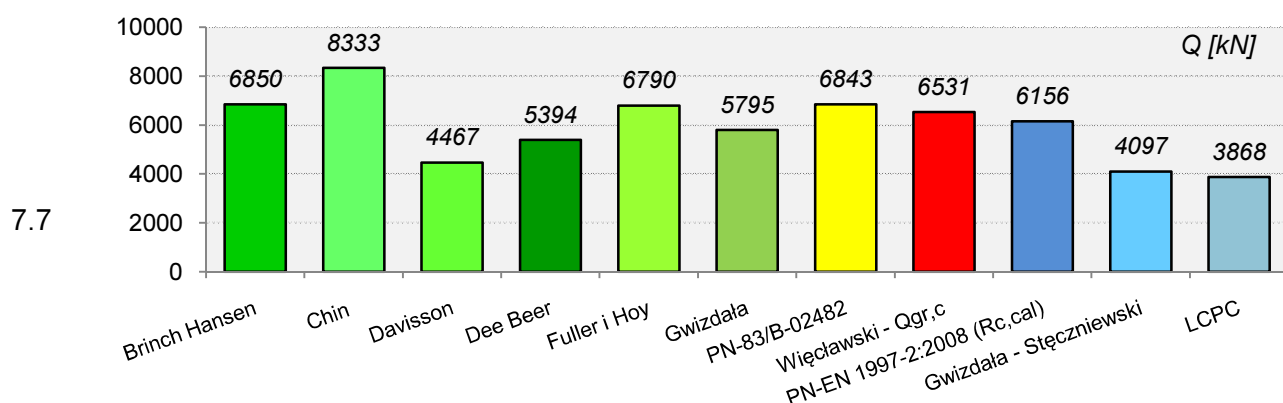
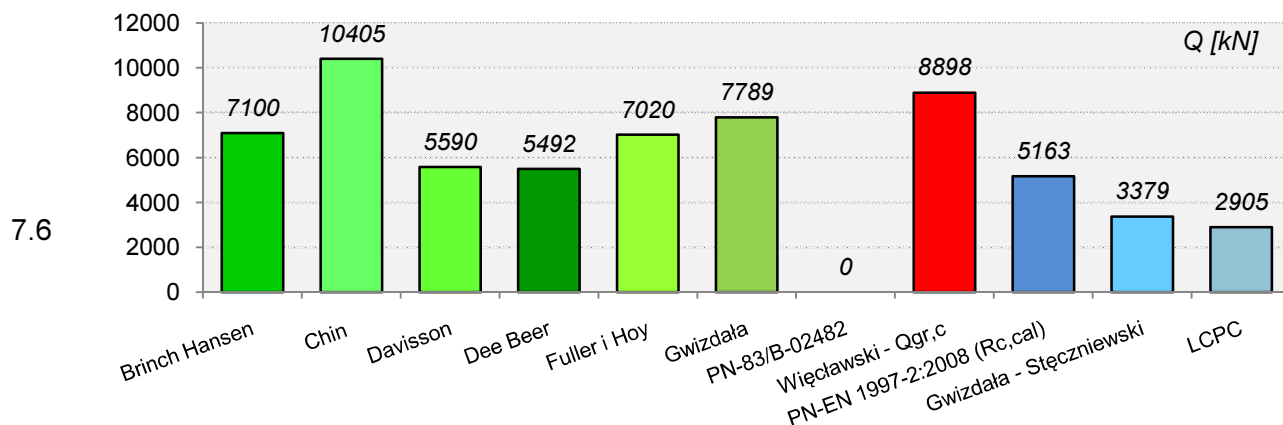
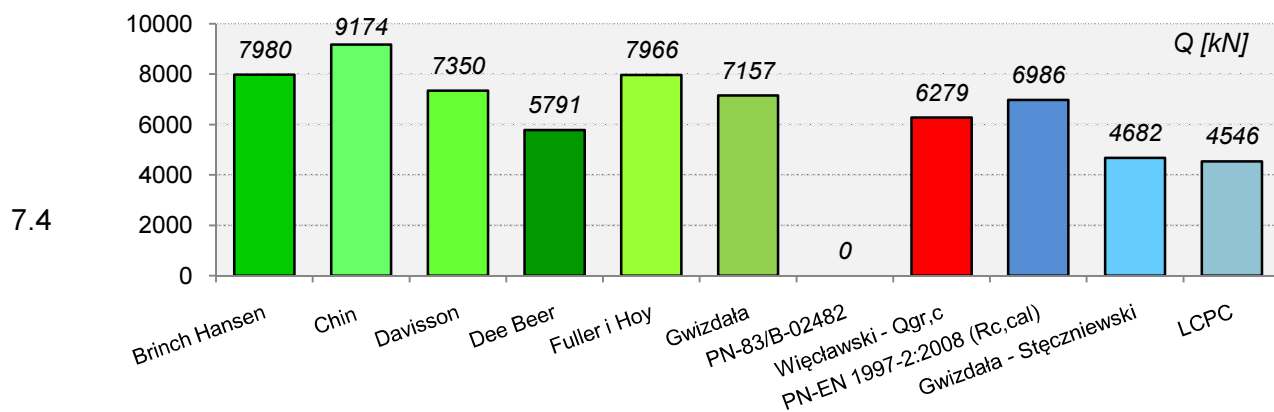
W celu weryfikacji wartości nośności charakterystycznych, obliczonych wg proponowanej procedury, dokonano analizy porównawczej z wynikami innych metod. Zestawienie stanowią:

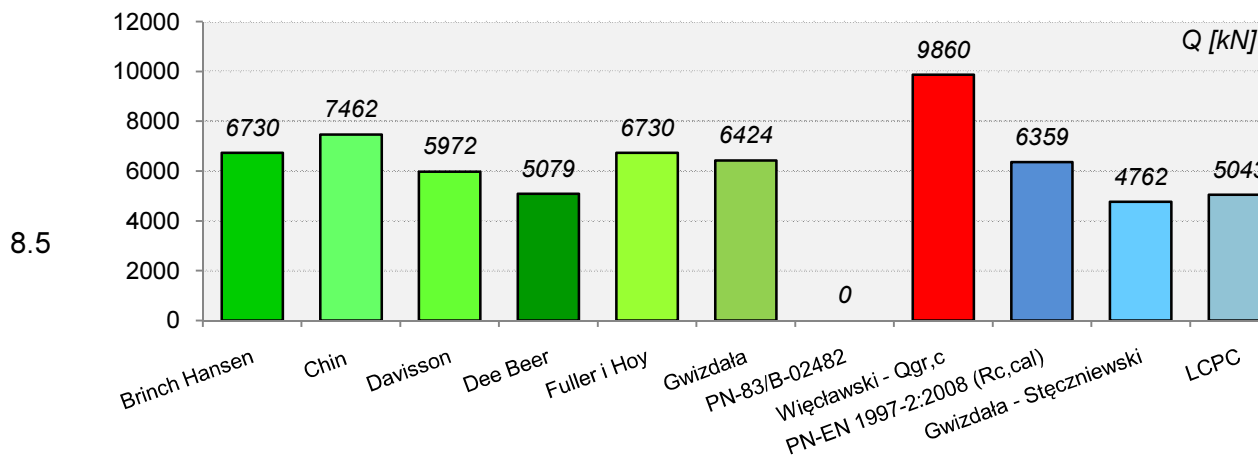
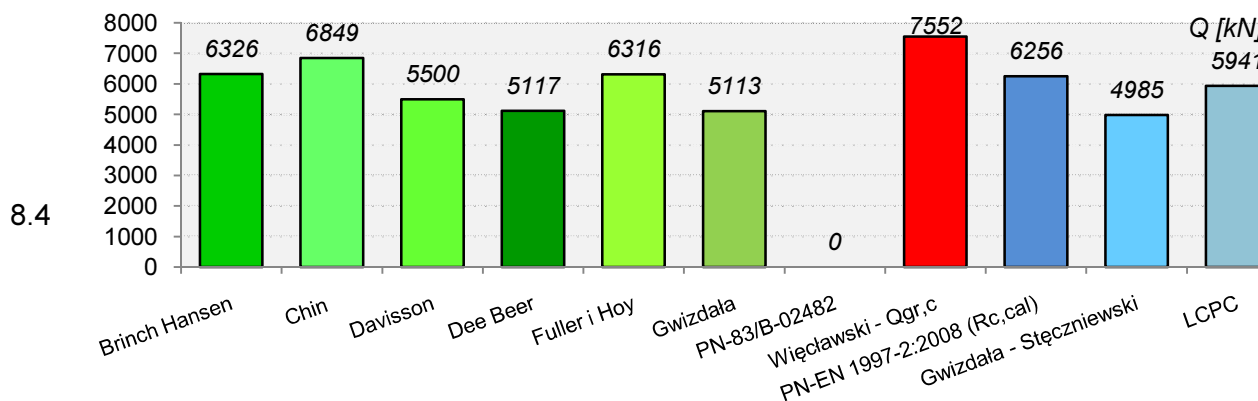
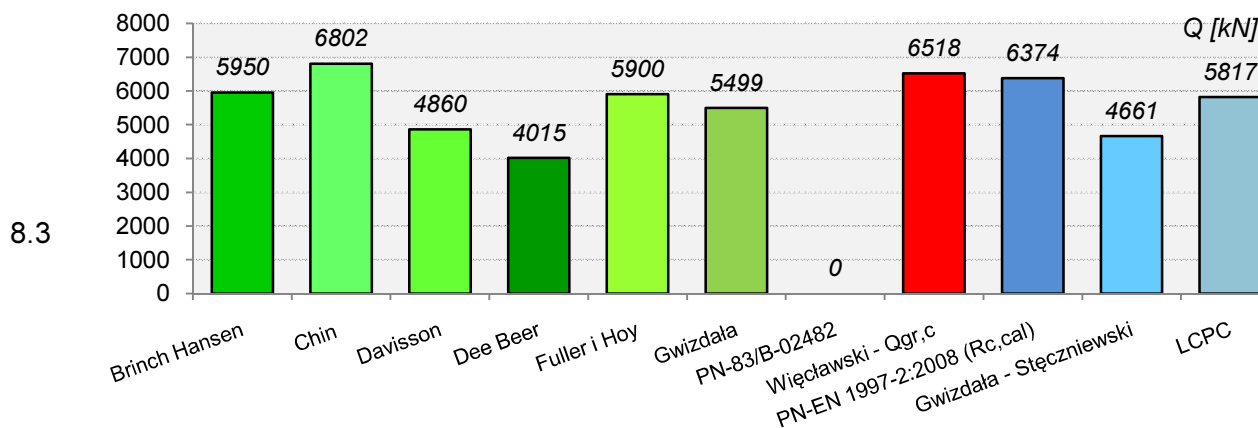
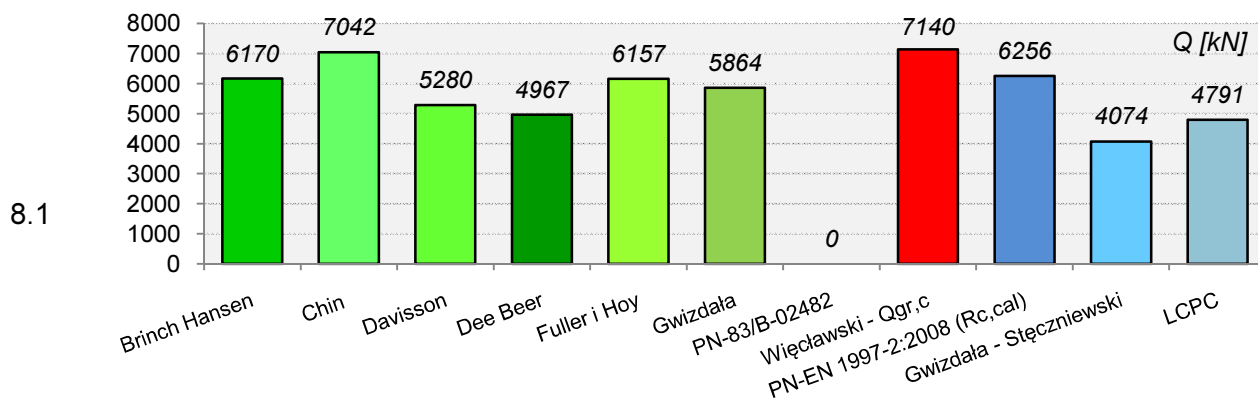
- A. metody interpretacji próbnego obciążenia statycznego, których idea jest ekstrapolacja krzywej Q-s w oparciu o wartości osiadań i obciążeń, również wartość tych wielkości po transformacjach, dla fragmentu krzywej uzyskanej z badania. Wynikiem jest pełna krzywa Q-s. Szczegółowy opis metod w rozdziale 3.
- B. metody bezpośrednie określania nośności na podstawie sondowania statycznego CPT. Do analizy wybrano metody, których rozwiązanie jest najbliższe nośności granicznej uzyskanej z interpretacji próbnego obciążenia statycznego (SPLT) zgodnie z PN-83/B-02482, wg *Obliczeniowe i ekonomiczne aspekty posadowienia na palach wg EC7* [43]. Szczegółowy opis w rozdziale 3.

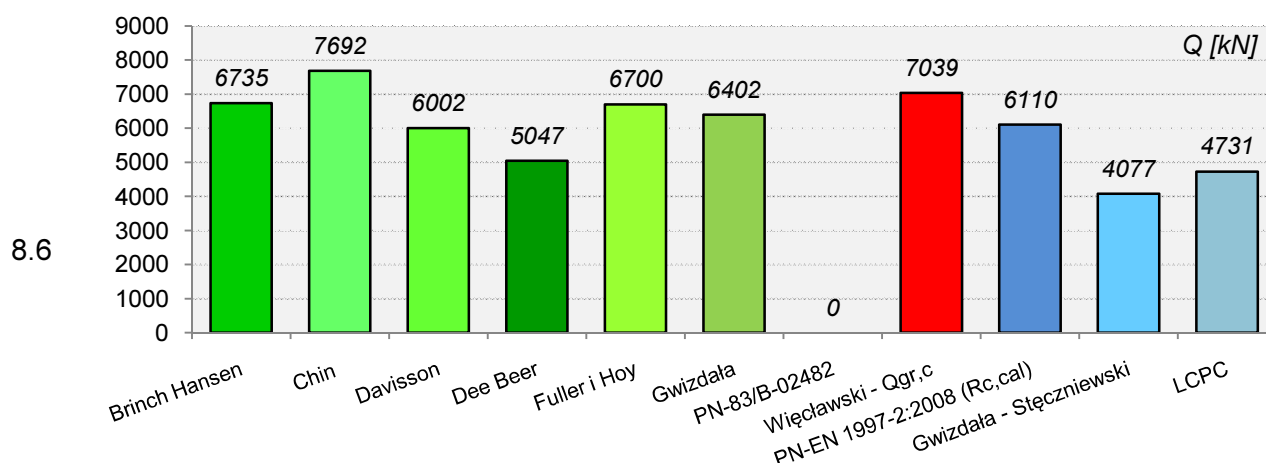
Tablica 6.30. Wartości nośności teoretycznych dla różnych metod obliczeniowych (opis rozdział 3).

nr pala	SPLT							METODA	CPT		
	nośność graniczna								nośność krytyczna		
	Brinch Hansen	Chin	Davissou	Dee Beer	Fuller i Hoy	Gwizdała	PN-83/B-02482	Więclawski	PN-EN 1997-2:2008	Gwizdała - Stępcziewski	LCPC
[-]	[kN]										
7.1	7525	8695	7060	5877	7520	7083	-	7418	6610	4319	4058
7.11	6340	7142	4880	5132	6290	5538	6458	5776	6261	3826	3670
7.14	7380	8474	6322	5990	7380	4663	-	8469	6472	4187	3744
7.2	8195	9433	7620	5800	8160	8031	-	6310	7994	5451	5769
7.4	7980	9174	7350	5791	7966	7157	-	6279	6986	4682	4546
7.6	7100	10405	5590	5492	7020	7789	-	8898	5163	3379	2905
7.7	6850	8333	4467	5394	6790	5795	6843	6531	6156	4097	3868
7.9	6710	7751	5370	5541	6640	5863	7329	5925	4480	2992	2710
8.1	6170	7042	5280	4967	6157	5864	-	7140	6256	4074	4791
8.3	5950	6802	4860	4015	5900	5499	-	6518	6374	4661	5817
8.4	6326	6849	5500	5117	6316	5113	-	7552	6256	4985	5941
8.5	6730	7462	5972	5079	6730	6424	-	9860	6359	4762	5043
8.6	6735	7692	6002	5047	6700	6402	-	7039	6110	4077	4731









Rys. 6.67. Porównanie wartości nośności granicznych dla różnych metod.

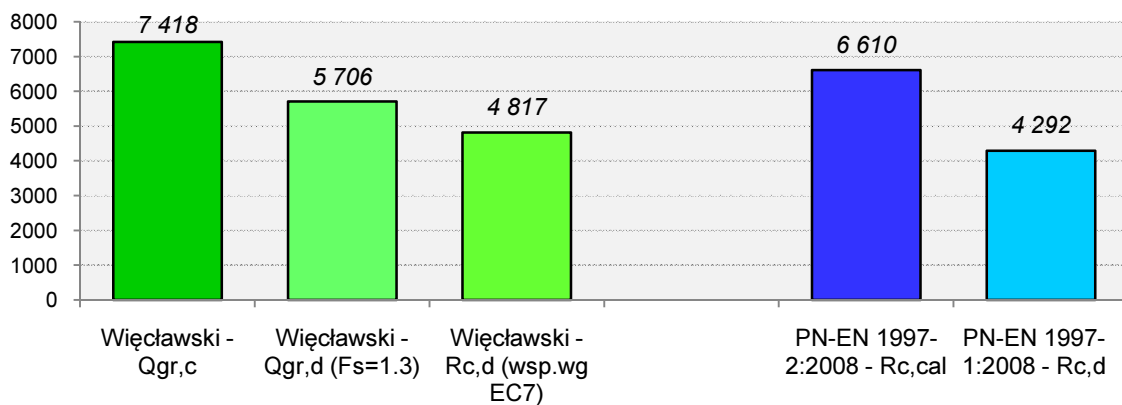
Głównym celem proponowanej metody jest wykorzystanie wartości nośności granicznej, z prognozowanej krzywej Q-s dla osiadań  $s_{gr} \approx 0.1D$ , w procesie projektowania posadowienia na palach Vibro. Na etapie projektowania do wymiarowania fundamentu wykorzystywane są wartości obliczeniowe (projektowe). Poniżej zestawiono nośności:

- ✓ na podstawie wyników badań podłoża gruntowego wyznaczone wg proponowanej metody -  $Q_{gr,c}$ ;
- ✓ obliczone wg Eurokodu 7, na podstawie metody wykorzystującej CPT -  $R_{c,cal}$
- ✓ obliczeniowe, z zastosowaniem współczynnika globalnego bezpieczeństwa  $F_S=1.3$ , do wartości otrzymanych proponowaną metodą -  $Q_{gr,d}^{(F_S=1.3)}$ ;
- ✓ obliczeniowe, z zastosowaniem współczynników bezpieczeństwa wg Eurokodu 7 zgodnych z podejściem obliczeniowym DA2 ( $\xi_{3,4} = 1.4$ ,  $\gamma_t = 1.1$ ), do wartości otrzymanych proponowaną metodą -  $R_{c,d}^{(EC7)}$ ;
- ✓ obliczeniowe, dla metody zaproponowanej w Eurokodzie 7 i podejścia obliczeniowego DA2 ( $\xi_{3,4} = 1.4$ ,  $\gamma_t = 1.1$ ).

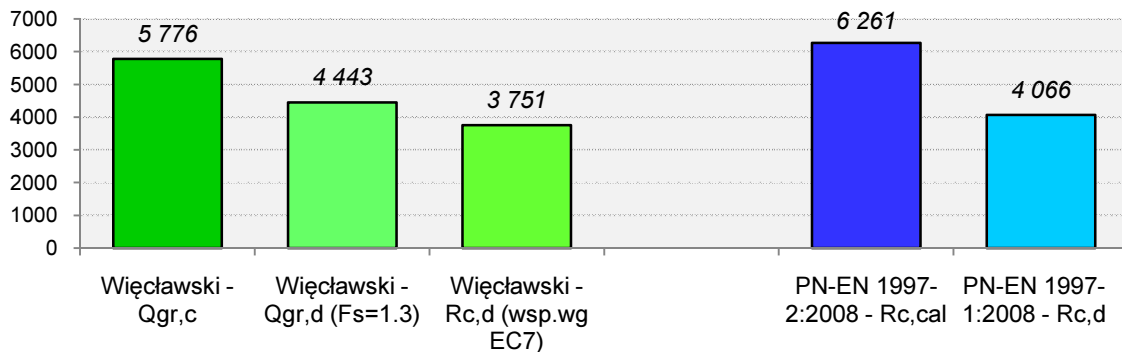
Tablica 6.31. Wartości obliczeniowych nośności granicznych według PN-EN 1997-1:2004 oraz dla  $F_S=1.3$ 

METODA			CPT	
Więclawski $Q_{gr,c}$	Więclawski $Q_{gr,d}$ ( $F_S=1.3$ )	Więclawski $R_{c,d}$ ( $\xi_{3,4}=1.4$ , $\gamma_t=1.1$ )	PN-EN 1997-2:2008 $R_{c,cal}$	PN-EN 1997-1:2008 $R_{c,d}$
[kN]				
7418	5706	4817	6610	4292
5776	4443	3751	6261	4066
8469	6515	5499	6472	4203
6310	4854	4097	7994	5191
6279	4830	4077	6986	4536
8898	6845	5778	5163	3353
6531	5024	4241	6156	3997
5925	4558	3847	4480	2909
7140	5492	4636	6256	4062
6518	5014	4232	6374	4139
7552	5809	4904	6256	4062
9860	7585	6403	6359	4129
7039	5415	4571	6110	3968

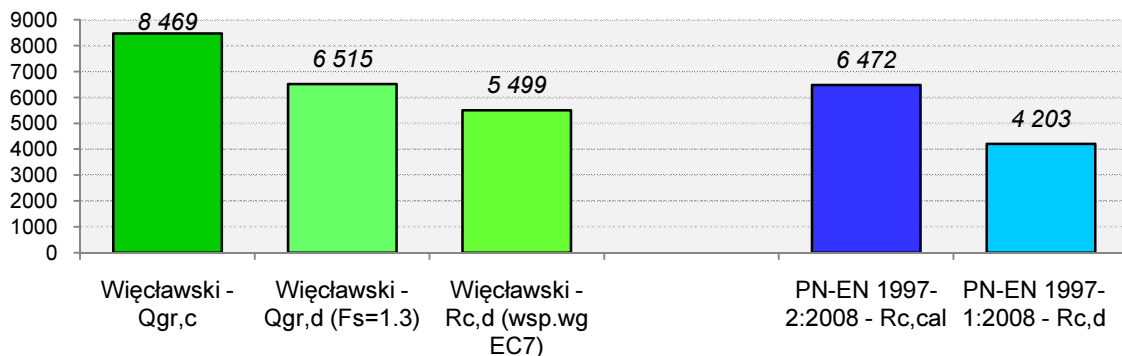
7.1



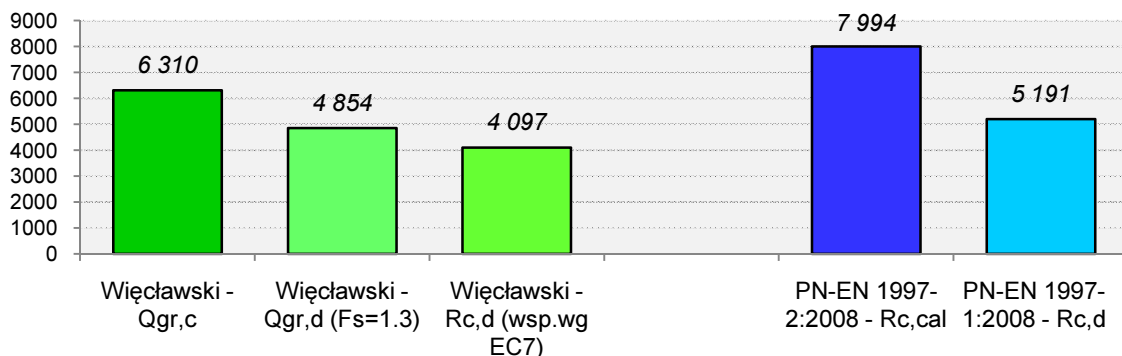
7.11



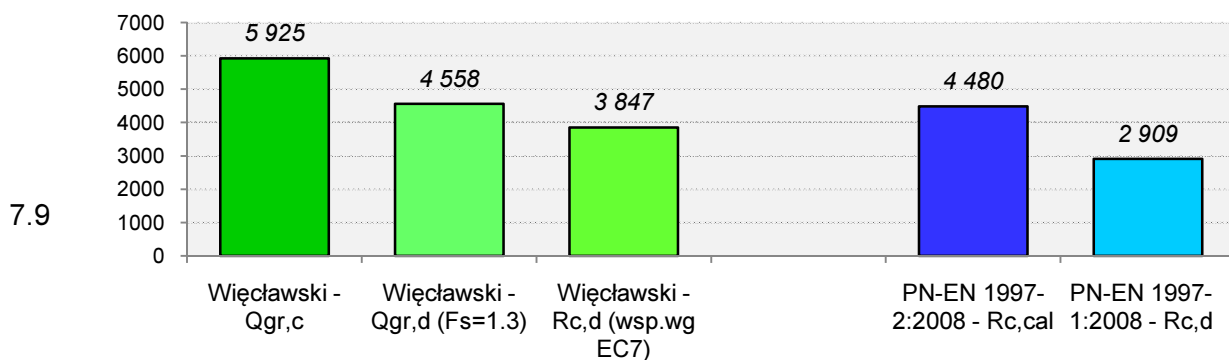
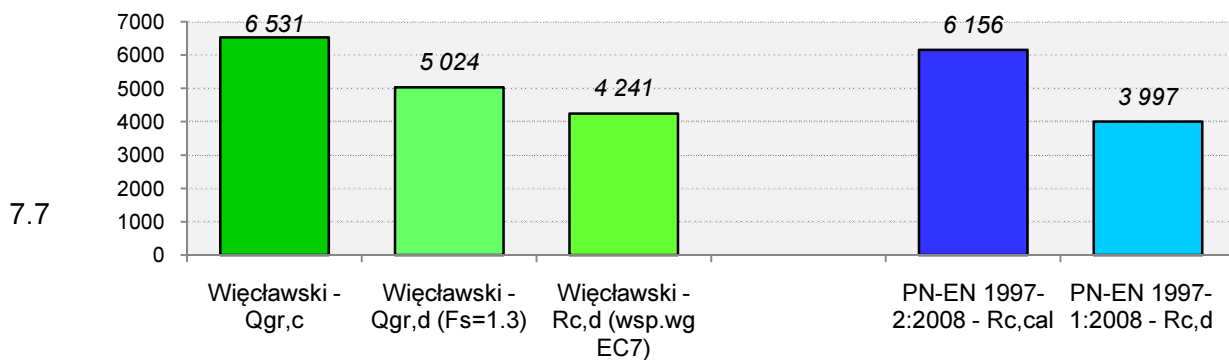
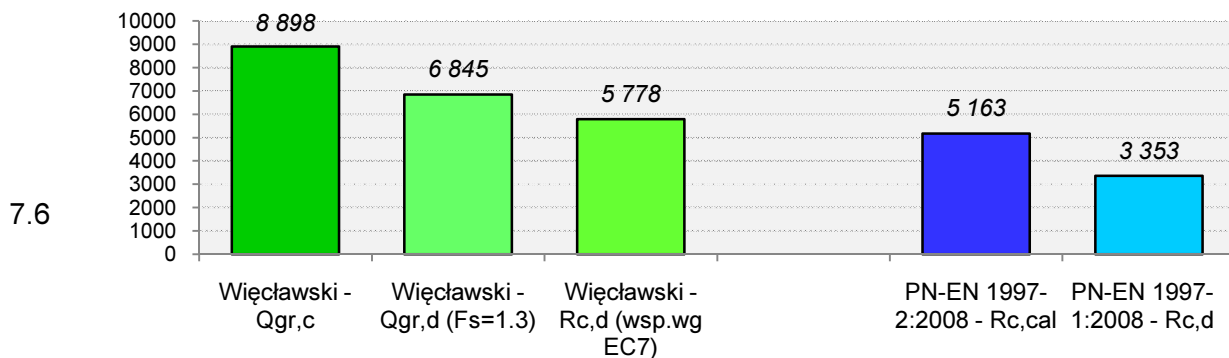
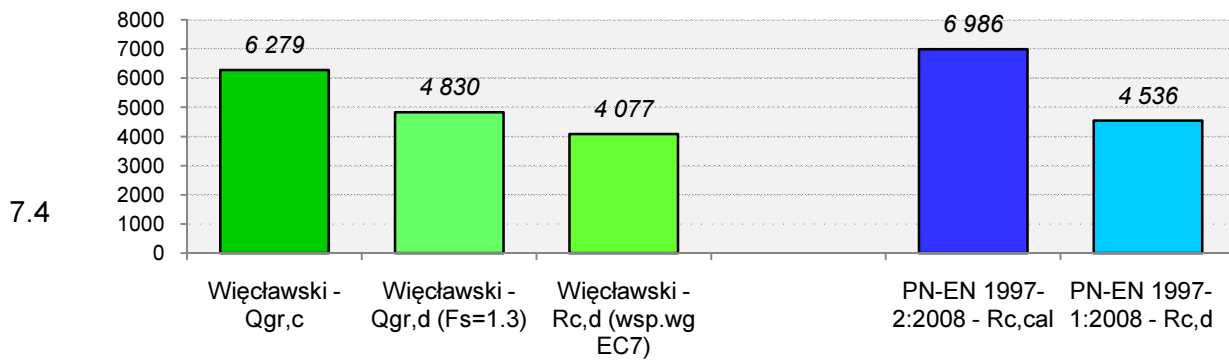
7.14

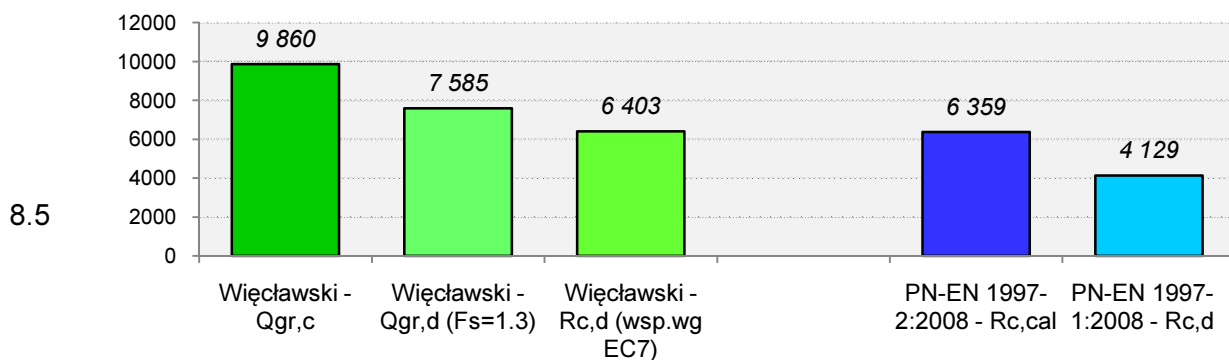
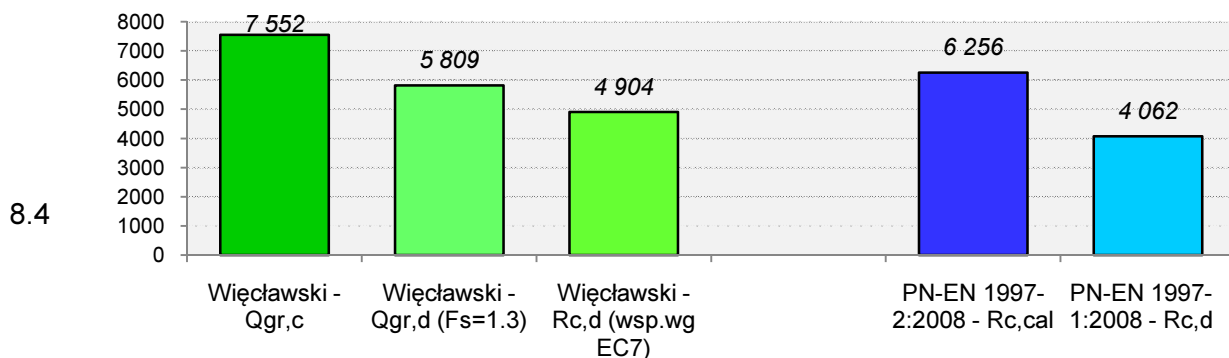
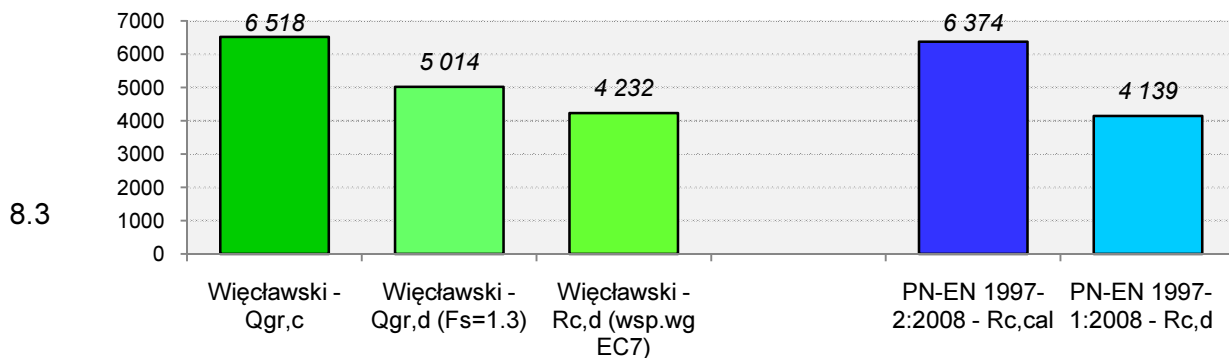
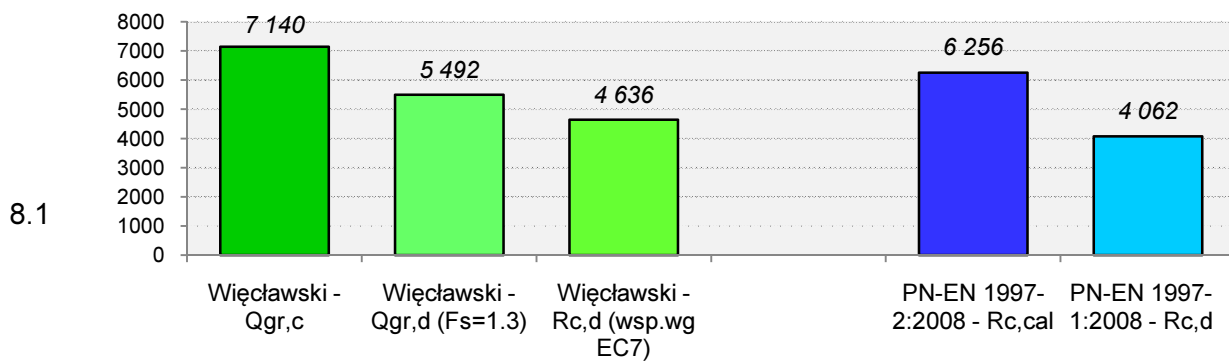


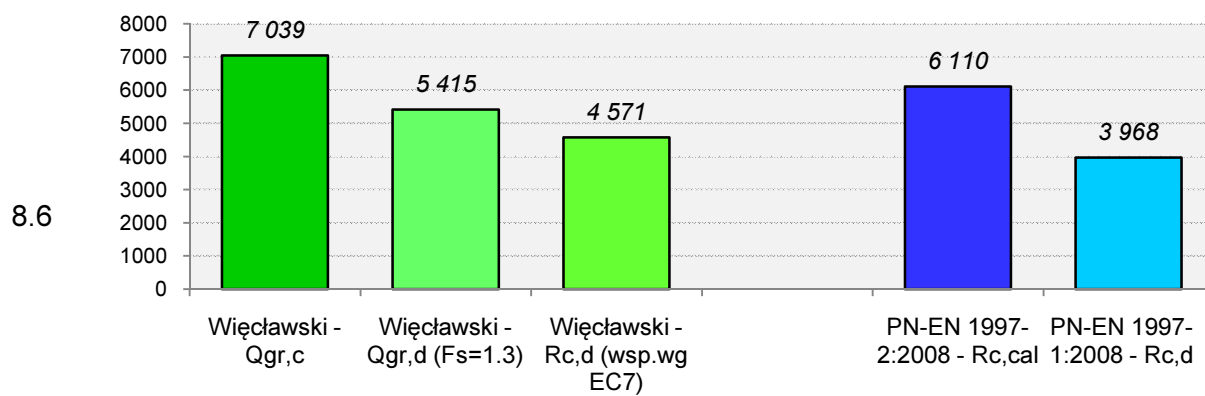
7.2











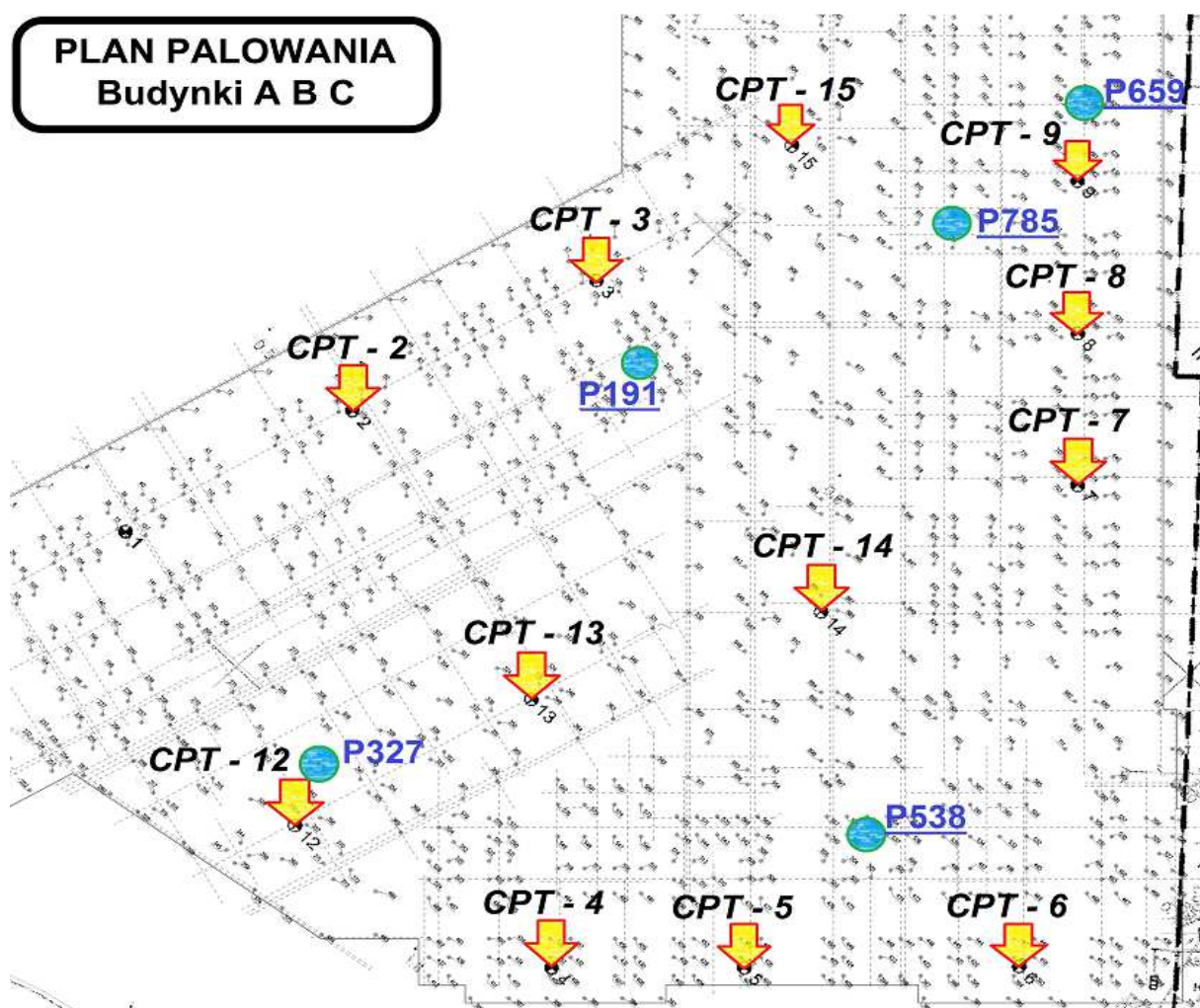
Rys. 6.68. Porównanie wartości obliczeniowych nośności granicznych.

## 7. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE OPRACOWANEJ METODY

Głównym celem przeprowadzonej analizy, niezależnie od aspektów poznawczych i naukowych, jest opracowanie metody, która znajdzie zastosowanie praktyczne w procesie projektowania fundamentów palowych. Weryfikacji procedury dokonano na palach Vibro, które nie były włączone do wcześniejszych analiz. Na podstawie dokumentacji geotechnicznej rozpoznania podłoża, zawierającej sondowania statyczne CPT określono teoretyczny kształt krzywej osiadania pali a następnie porównano z wynikami próbnego obciążenia statycznego.

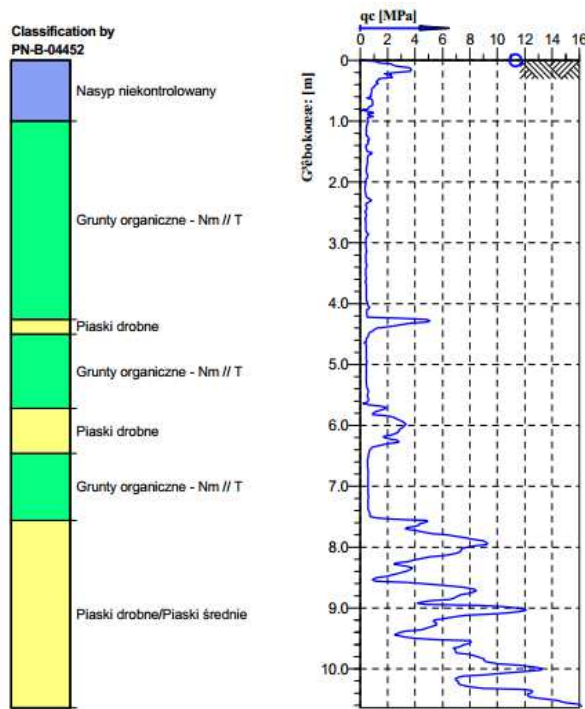
### 7.1. Prognoza krzywych Q-s dla pali Vibro 406/460mm - Gdańsk, 2014.

Procedury przedstawione w pracy zostały wykorzystane do prognozy krzywej Q-s pali Vibro 406/460mm, wykonanych jako posadowienie zespołu budynków mieszkalno-usługowych w Gdańsku.

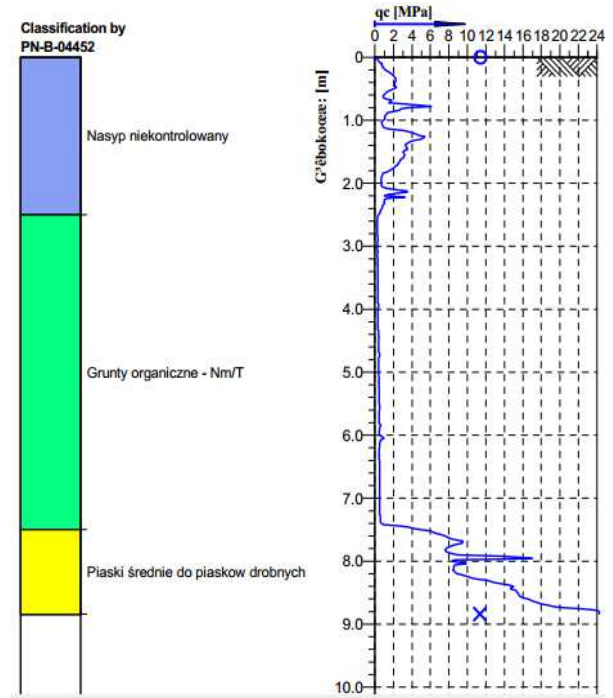


Rys. 7.69. Lokalizacja sondowań statycznych i plan palowania.

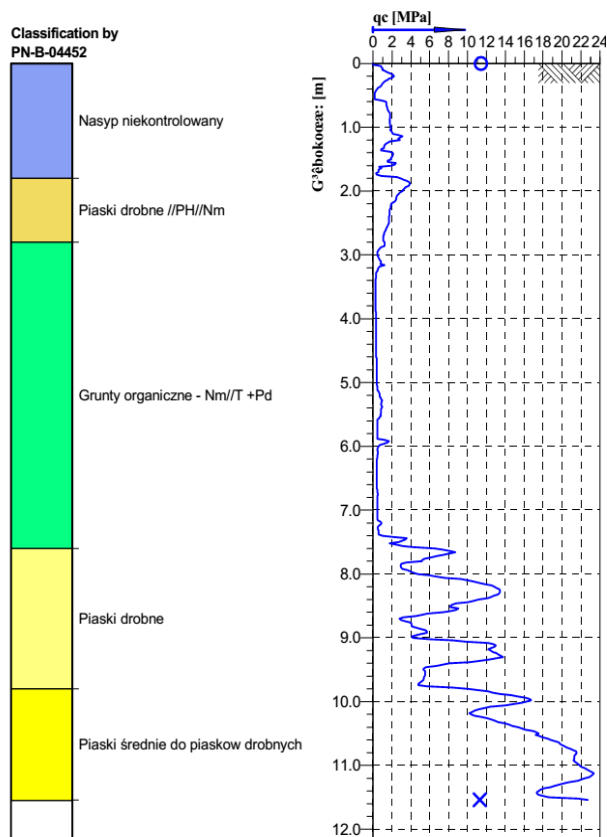
**CPT - 3**



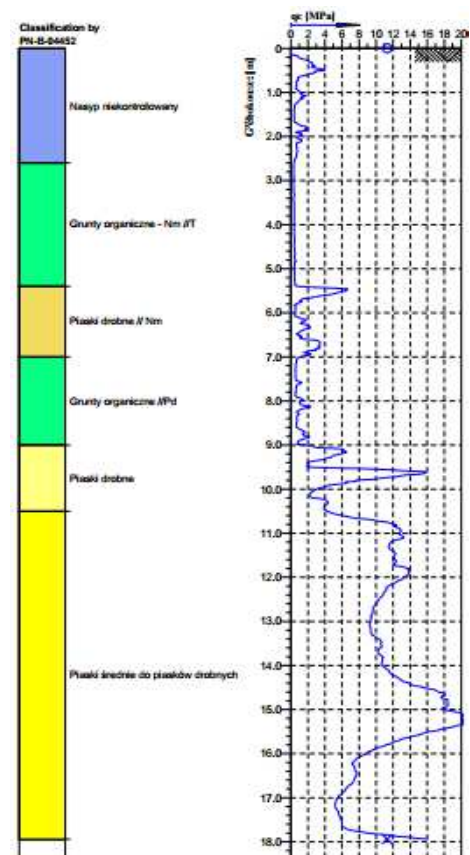
**CPT - 12**



**CPT - 6**

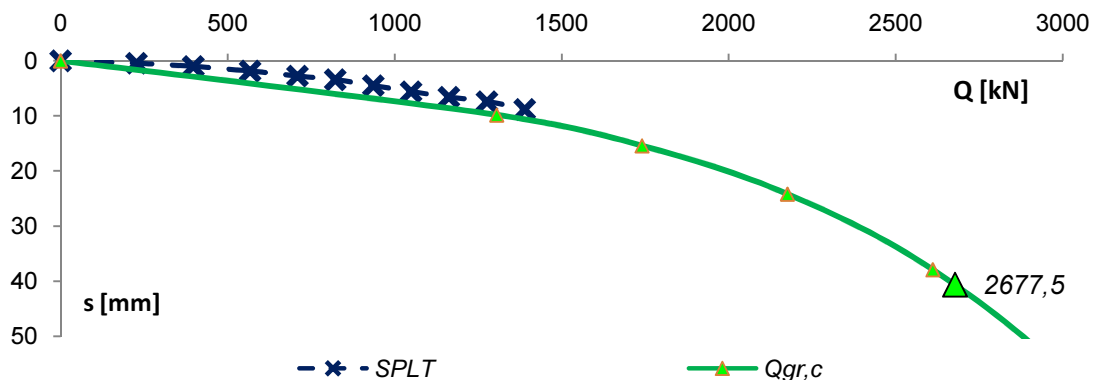


**CPT - 9**

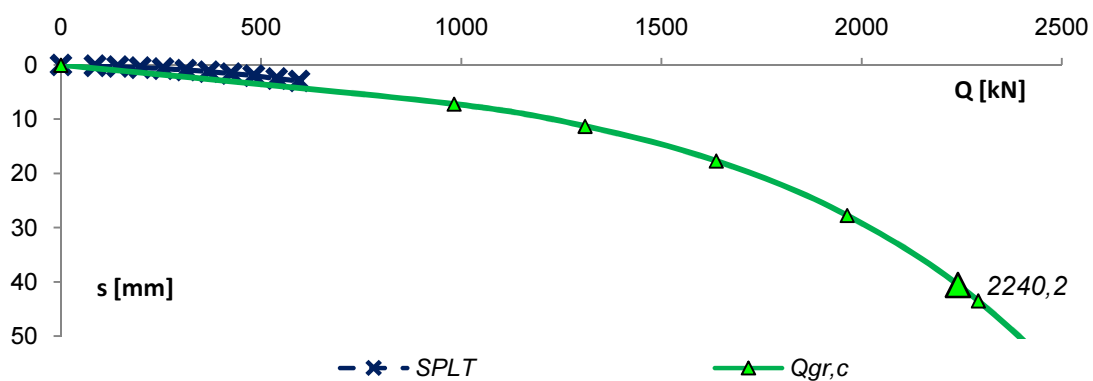


Rys. 7.70. Sondowania statyczne i profil geotechniczny.

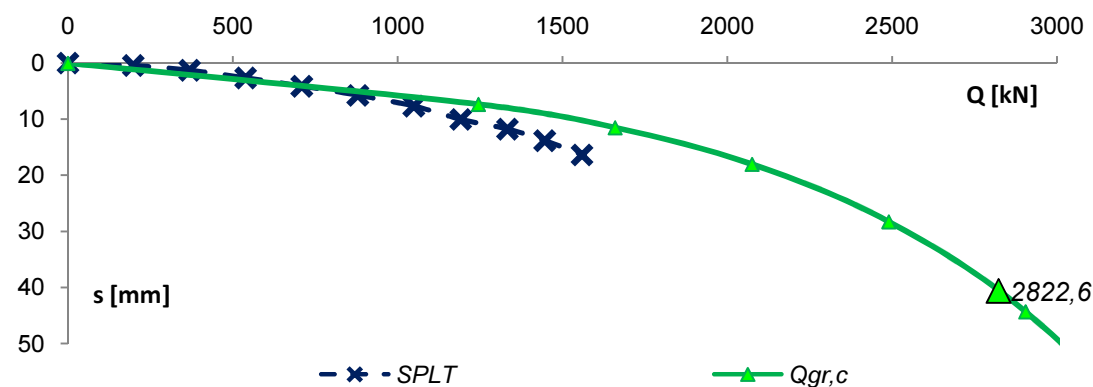
nr sondowania	nr pala	D	D <sub>b</sub>	L <sub>gn</sub>	L	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
CPT - 3	P191	0,406	0,46	1,4	9	6,0	2,0



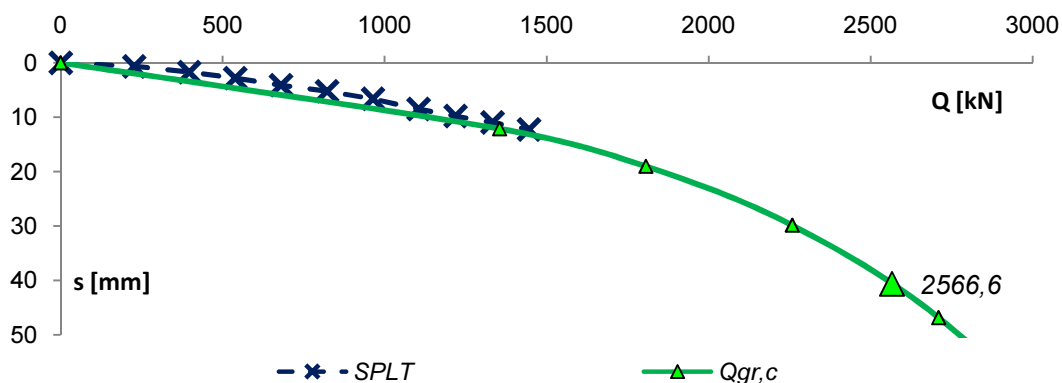
nr sondowania	nr pala	D	D <sub>b</sub>	L <sub>gn</sub>	L	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
CPT - 12	P327	0,406	0,46	5,9	13,5	18,0	6,9



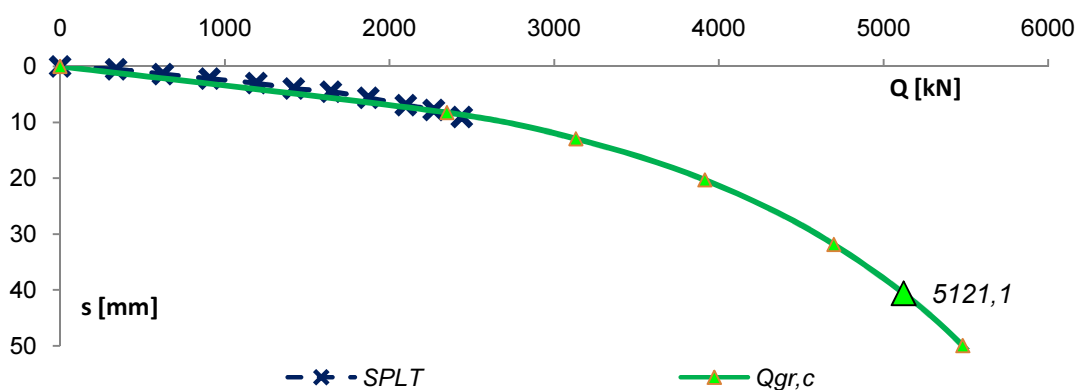
nr sondowania	nr pala	D	D <sub>b</sub>	L <sub>gn</sub>	L	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
CPT - 6	P538	0,406	0,46	1,2	9,0	6,0	1,5



nr sondowania	nr pala	D	D <sub>b</sub>	L <sub>gn</sub>	L	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>
[H]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
<b>CPT - 9</b>	<b>P659</b>	0,406	0,46	1,1	10,0	6,0	1,5



nr sondowania	nr pala	D	D <sub>b</sub>	L <sub>gn</sub>	L	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>
[H]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
<b>CPT - 9</b>	<b>P785</b>	0,406	0,46	4,2	13,5	10,0	3,0

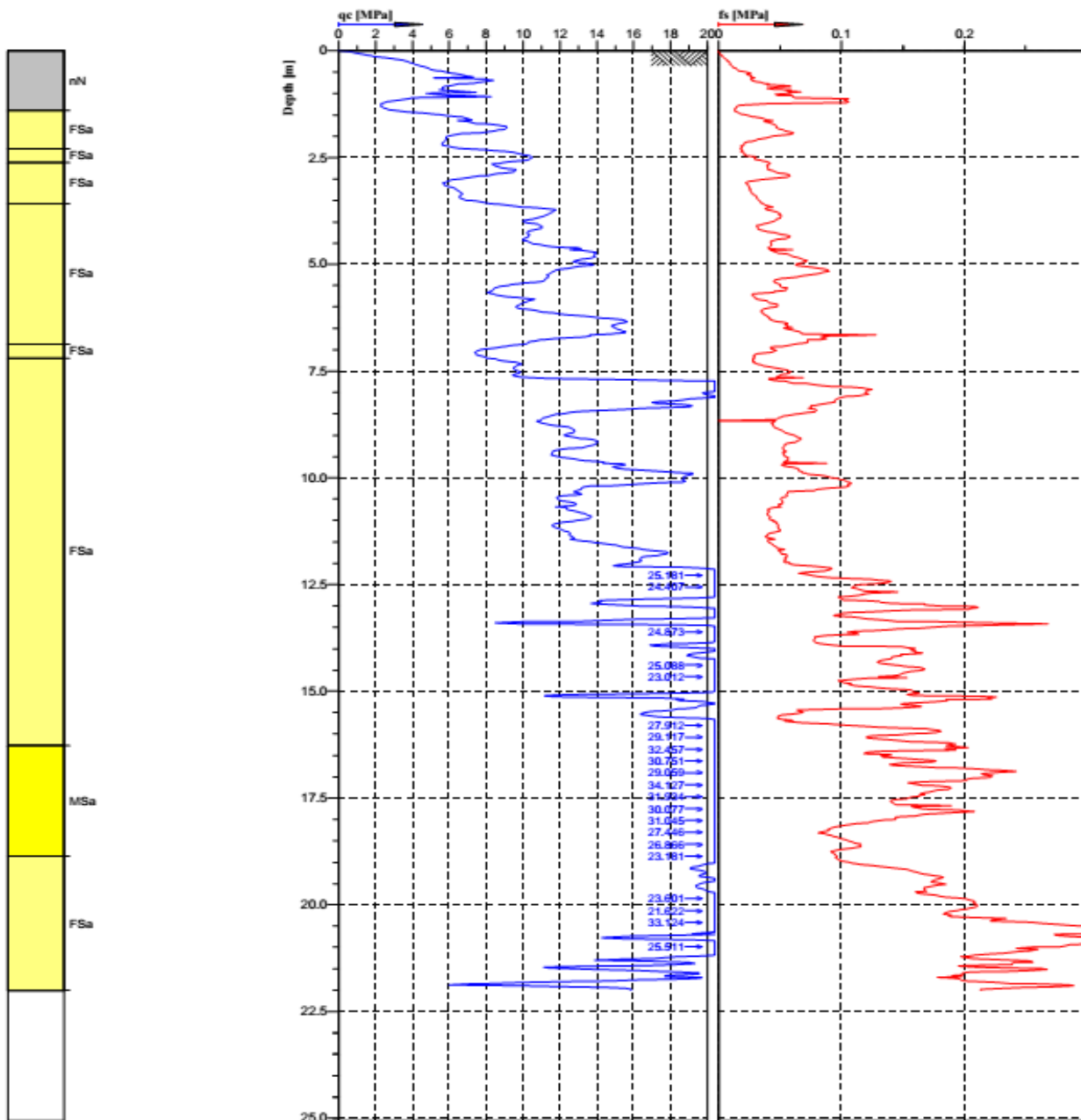


Rys. 7.71. Zestawienie krzywych rzeczywistych z SPLT z zależności prognozowanymi.

## 7.2. Prognoza krzywych Q-s dla pali Vibro 406/460mm oraz 560/610mm - Gdynia, 2014.

Poniżej prognoza krzywej Q-s pali Vibro 406/460mm oraz 560/610, wykonanych jako posadowienie Nabrzeża Bułgarskiego w Gdyni.

Wyniki sondowania CPT:

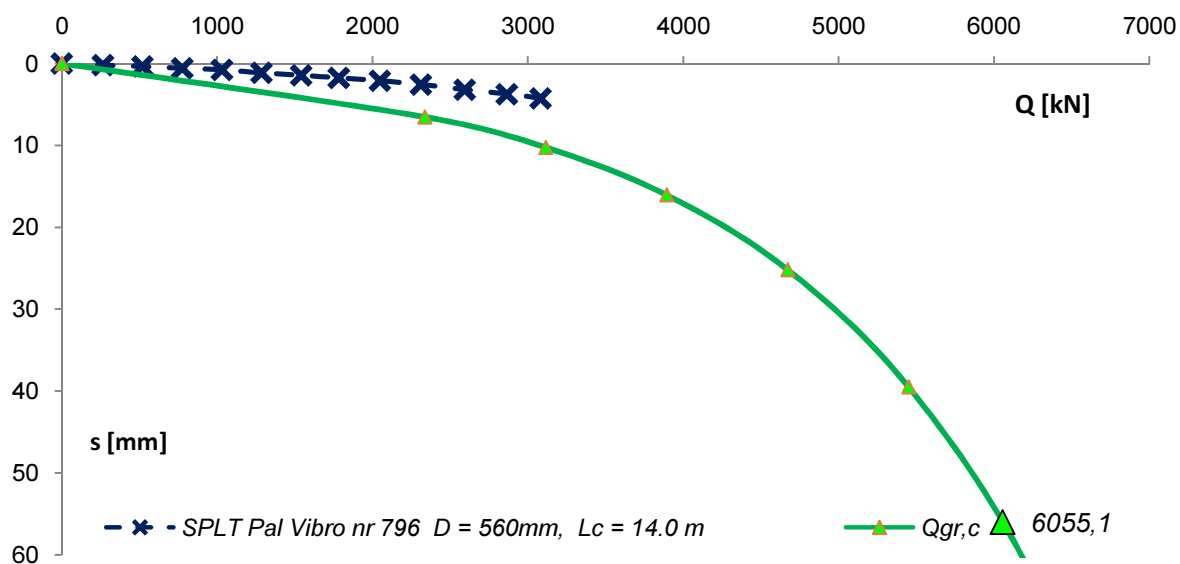


Rys. 7.72. Sondowania statyczne i profil geotechniczny



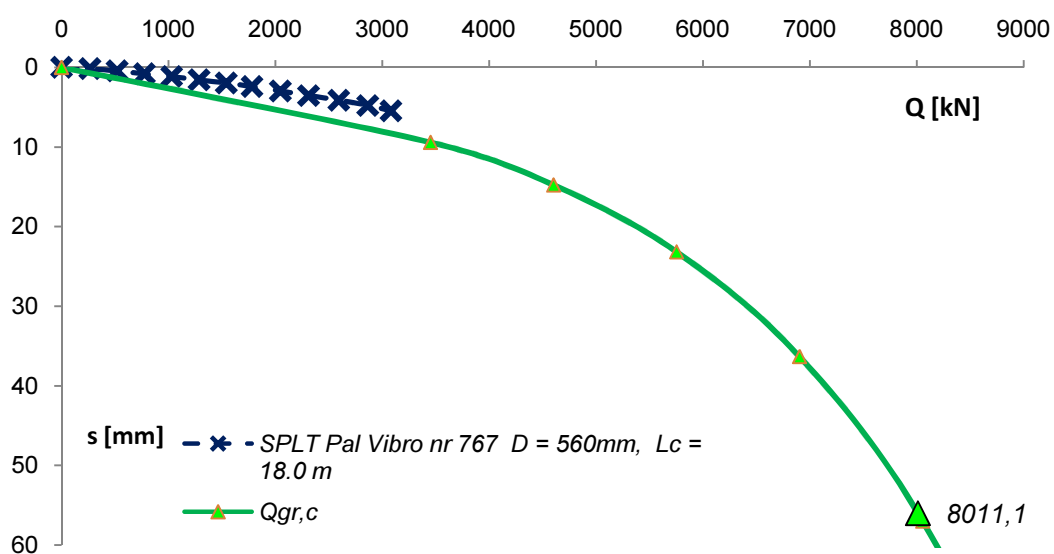
- Analiza do pala Vibro 560/610mm, długości  $L=14.0\text{m}$  z podstawą w piaskach drobnych (FSa):

oznaczenie pala/CPT	$D$	$D_b$	$L_{gn}$	$L$	$q_{cp}$	$q_{cs}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
Pal Vibro nr 796 560/610mm $L=14,0\text{m}/\text{CPT}2$	0,56	0,61	14	14	23,0	16,3

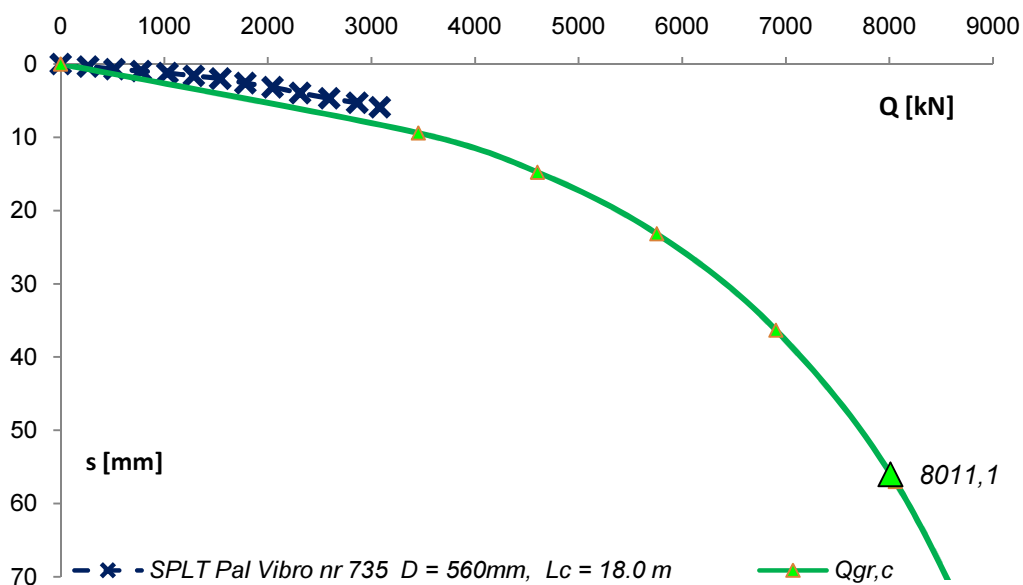


- Analiza do pali Vibro 560/610mm, długości  $L=18.0\text{m}$  z podstawą w piaskach średnich (MSa):

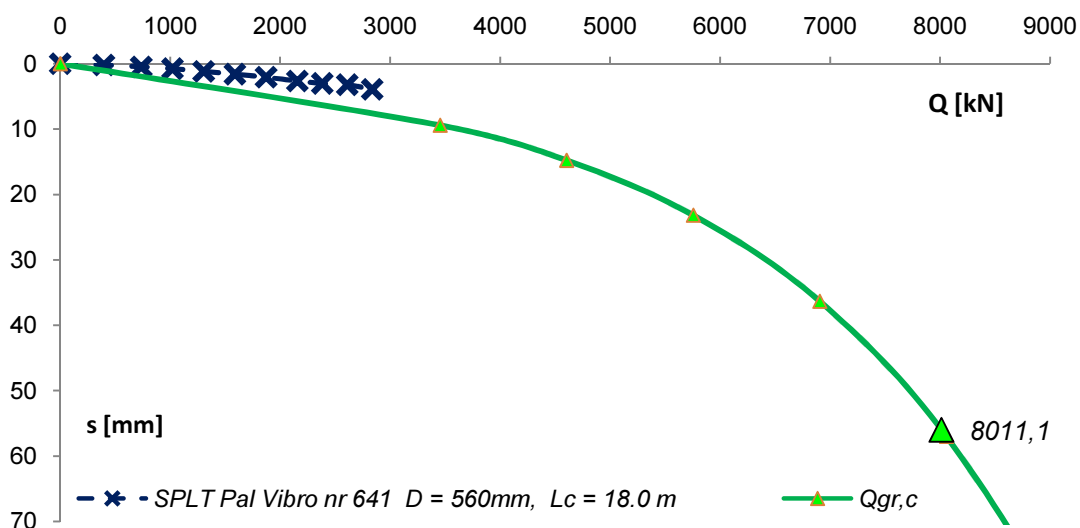
oznaczenie pala/CPT	$D$	$D_b$	$L_{gn}$	$L$	$q_{cp}$	$q_{cs}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
Pal Vibro nr 767 560/610mm $L=18,0\text{m}/\text{CPT}2$	0,56	0,61	18	18	22,0	19,0



oznaczenie pala/CPT	D	D <sub>b</sub>	L <sub>gn</sub>	L	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
Pal Vibro nr 735 560/610mm L=18.0m/CPT2	0,56	0,61	18	18	22,0	19,0



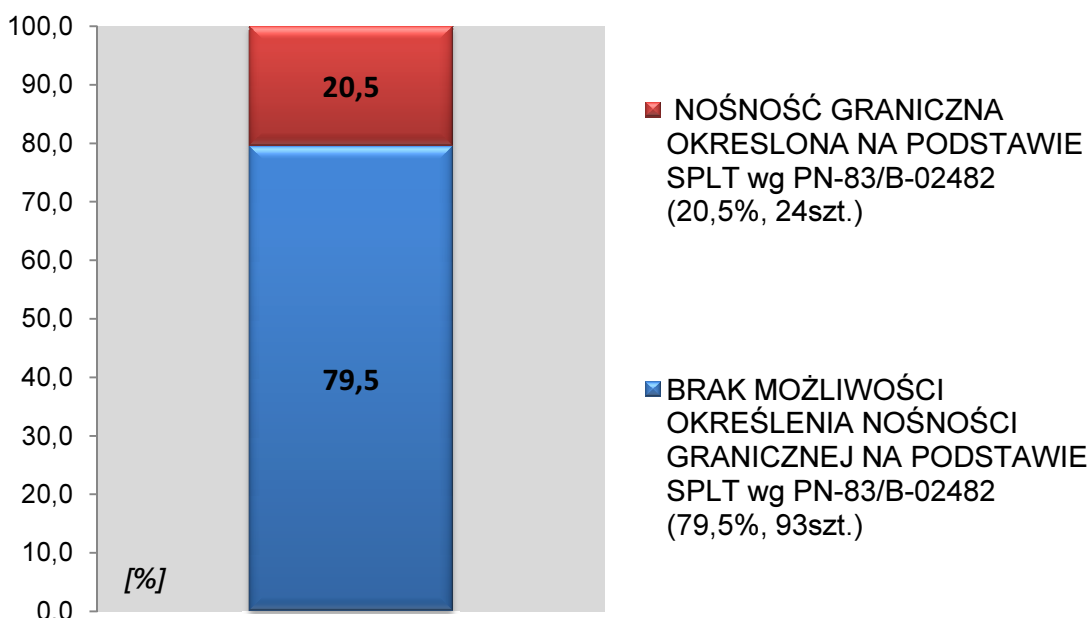
oznaczenie pala/CPT	D	D <sub>b</sub>	L <sub>gn</sub>	L	q <sub>cp</sub>	q <sub>cs</sub>
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]
Pal Vibro nr 641 560/610mm L=18.0m/CPT2	0,56	0,61	18	18	22,0	19,0



Rys. 7.73. Zestawienie krzywych rzeczywistych z SPLT z krzywymi prognozowanymi.

## 8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaletą stosowania Eurokodu 7 jest możliwość wykorzystania, do celów projektowych i weryfikacyjnych, dowolnej metody opartej na dotychczasowych praktykach krajowych. Podstawowym wymogiem, według EC7 dotyczącym próbnych obciążeń statycznych jest, aby umożliwiły one interpretacje wyników w odniesieniu do zjawisk odkształceń, pełzania i odprężenia fundamentu palowego [50]. Badanie należy przeprowadzać tak długo, aż pozwoli ono określić nośność graniczną pala. Na podstawie analizy dla pali Vibro, stwierdza się, że w przypadku tej technologii, interpretacja próbnego obciążenia statycznego wg PN-83/B-02482, stosowana dotychczas w Polsce, jest niezgodna z PN-EN:1997-1:2008. W analizowanej populacji 118 pali Vibro dla 79.5% (93szt.) nie wyznaczono wartości nośności granicznej i osiadań granicznych.

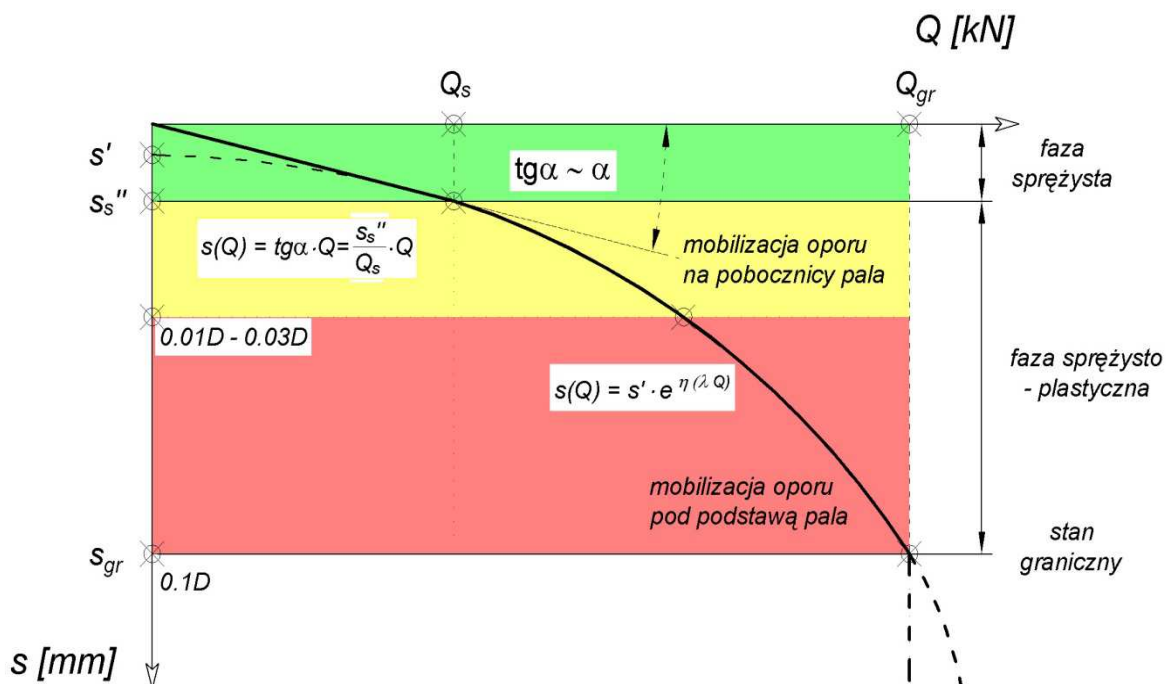


Rys. 7.74. Skuteczność prognozowania nośności granicznej na podstawie metody interpretacji według PN-83/B-02482.

Wobec powyższych wyników:

- konieczne jest ustalenie nowej procedury przeprowadzania próbnego obciążenia statycznego (SPLT) dla pali wykonywanych w technologii Vibro,
- należy stosować inne metody interpretacji próbnego obciążenia statycznego,
- metoda interpretacji SPLT wg PN-83/B-04282 nie jest metodą wyznaczania nośności granicznej pali Vibro,
- można przyjąć, że metoda interpretacji SPLT wg PN-83/B-04282 służy do sprawdzenia czy wykonany pal ma wystarczającą nośność do przeniesienia projektowanych obciążeń,
- wykonując badanie SPLT wg PN-83/B-04282 dla pali Vibro, należy stosować dodatkowe metody weryfikacji, które pozwalają oszacować nośność graniczną.

Opracowana metoda bazuje na krzywych Q-s z badań SPLT przeprowadzonych dla pali Vibro. Istnieje możliwość adaptacji metody do interpretacji próbnego obciążenia statycznego. Jedynym warunkiem jest badanie CPT, które powinno być wykonane w sąsiedztwie badanego pala. Na podstawie fragmentu krzywej Q-s z SPLT jesteśmy w stanie określić charakterystykę fazy sprężystej układu *obciążenie - pala - grunt*. Pozostałe parametry należy wyznaczyć na podstawie procedur obliczeniowych dla danych z krzywej rzeczywistej i sondowania CPT. Wykorzystanie do analizy krzywej z badania SPLT pozwala na dokładne wyznaczenie parametrów krzywej ekstrapolowanej do wartości nośności granicznej.



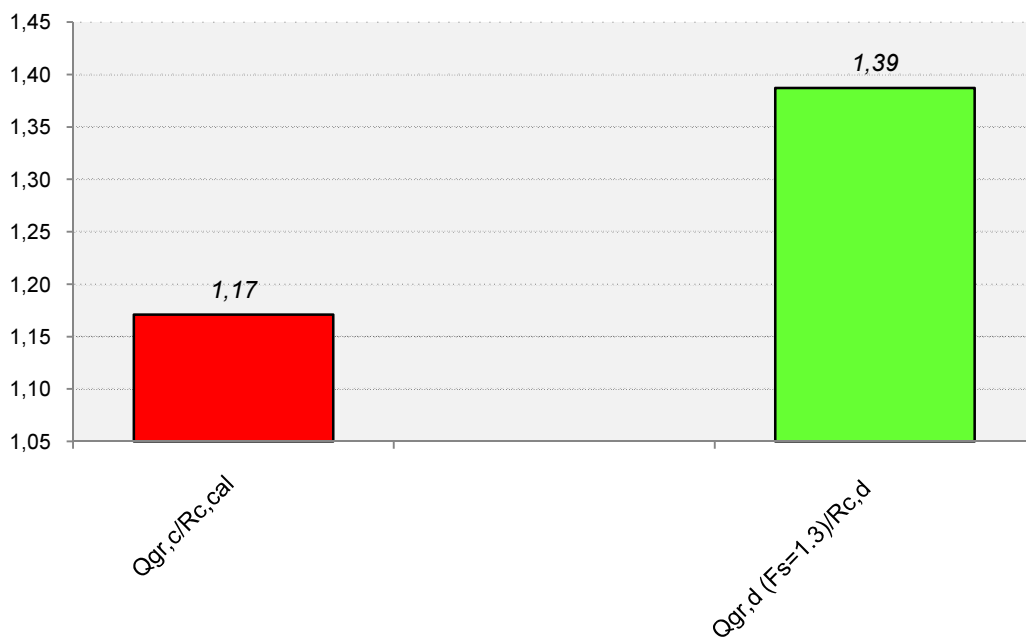
Rys. 7.75. Interpretacja graficzna metody ekstrapolacji (prognozowania) krzywej Q-s z wykorzystaniem wyników sondowania CPT.

W odniesieniu od obecnych trendów optymalnego projektowania obiektów inżynierskich, w tym projektowania posadowienia na palach, zaproponowana metoda spełnia warunek ekonomicznego i ekologicznego projektowania [8]. Aspekt ten potwierdzają analizy przedstawione w rozdziale 6.

Autorski współczynnik bezpieczeństwa  $F_S=1.3$  uwzględniający:

- niedokładności uśrednień parametrów gruntu;
- zmienność warunków gruntowych w stosunku do wyników sondowania;
- odległość pali od sondowania CPT,
- czynniki technologiczne wykonania pali;

zapewnia bezpieczny zakres, wartości nośności teoretycznych obliczeniowych, w stosunku do rzeczywistych nośności pali, wykazanych na podstawie próbnego obciążenia statycznego. W stosunku do metody z EC7, obliczenia nośności pali na podstawie badań podłoża gruntowego, z zastosowaniem normowych współczynników bezpieczeństwa wykazano 39% zapasu bezpiecznej niewykorzystanej nośności.



Rys. 7.76. Dodatkowy zakres bezpieczeństwa dla nośności obliczeniowej według opracowanej metody w stosunku do EC7.

W proponowanej metodzie zastosowano kilka uproszczeń obliczeniowych, które w pewnym stopniu mogą usprawnić proces projektowania. Metody, które proponuje się w EC 7 nie należą do najbardziej skomplikowanych konieczna jest jednak szczegółowa analiza i przystosowanie ich do krajowych warunków. Na szczególną uwagę zasługuje możliwość dokładniejszego szacowania nośności teoretycznej pali w stosunku do EC 7 i innych metod bezpośrednich opartych na wynikach sondowania CPT.

Aspektem, który wyróżnia opracowaną metodę jest możliwość określenia pełnej krzywej osiadania pali na podstawie wyników badań podłoża. Dysponując pełną krzywą Q-s możliwe jest przyjęcie, do celów projektowych, wartości obciążenia krytycznego bądź obciążenia granicznego oraz osiadań dla ściśle określonych, wymaganych kryteriów pracy fundamentu i całego obiektu.

## LITERATURA

- [1] BRZOSOWSKI, T., Warunki prawidłowego wykonania badań dynamicznych pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2004, s.300-307.
- [2] BRZOSOWSKI, T.; BLOCKUS, M.; Badania dynamiczne pali. *Seminarium „Zagadnienia posadowienia na fundamentach palowych”*. 25 czerwca 2004.
- [3] CICHY, W., Projektowanie geotechniczne w świetle przepisów norm światowych i europejskich. *Geoinżynieria i Tunelowanie*, nr 1/2004, s.36-41
- [4] GUNARATNE, M.; *The Foundation Engineering Handbook*. Wydawnictwo: Taylor and Francis, 2006.
- [5] GWIZDAŁA, K., Nowe techniki fundamentowania. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3-4/2003, s.237-242.
- [6] GWIZDAŁA, K., Współczesne technologie wykonawstwa pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2004, s.307-316.
- [7] GWIZDAŁA, K., Projektowanie fundamentów na palach. *XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła - Ustroń 2005*.
- [8] GWIZDAŁA, K., Ekologiczne aspekty projektowania fundamentów na palach. *53 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB "Krynica 2007"*.
- [9] GWIZDAŁA, K., STĘCZNIEWSKI, M., DYKA, I., Wykorzystanie sondowań statycznych do obliczania nośności i osiadań pali. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, nr 4/2009, s.62-69.
- [10] GWIZDAŁA K., BRZOSOWSKI T., WIĘCŁAWSKI P.; Calculation aspects used in Eurocode 7 for pile foundation. From Research to Design in European Practice. *Bratislava, Slovak Republic, June 2 – 4, 2010*.
- [11] GWIZDAŁA, K.; *Fundamenty palowe. Technologie i obliczenie*. Wydawnictwo naukowe PWN, 2011
- [12] GWIZDAŁA K., WIĘCŁAWSKI P.; Polish experience in the assessment of pile bearing capacity and settlement of the pile foundation. *Baltic Piling Days, Estonia, Tallin, 3 - 5 wrzesień 2012*
- [13] GWIZDAŁA K., WIĘCŁAWSKI P.; Technologia i czynniki wpływające na ocenę nośności pali fundamentowych – rozwiązania praktyczne. *XVI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, 4-7 września 2012 r. Wrocław, Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4, s. 411- 416, 2012
- [14] GWIZDAŁA, K.; *Fundamenty palowe. Badania i zastosowanie*. Wydawnictwo naukowe PWN, 2013.
- [15] GWIZDAŁA K., WIĘCŁAWSKI P.; Influence of time on the bearing capacity of precast piles. *Studia Geotechnica et Mechanica. -Vol. XXXV*, nr. 4 (2013), s.65-74
- [16] GWIZDAŁA K., WIĘCŁAWSKI P.; Nośność graniczna oraz interpretacje metod bezpośrednich dla pali przemieszczeniowych. *61. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk oraz Komitetu Nauki Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Krynica - Bydgoszcz, 20-25 września*

- 2015.
- [17] KŁOSIŃSKI, B., Wdrażanie norm europejskich dotyczących fundamentowania w Polsce. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3-4/2003, s.227-233.
  - [18] KŁOSIŃSKI, B., Przegląd norm europejskich dotyczących projektowania konstrukcji geotechnicznych. *Geoinżynieria i Tunelowanie*, nr 5/2005, s.18-27.
  - [19] KŁOSIŃSKI, B.; PIECZYRAK, J., Norma EN 1997 Eurokod 7 „Projektowanie geotechniczne”. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2009.
  - [20] KŁOSIŃSKI, B.; RYCHLEWSKI, P., Charakterystyka nowych europejskich norm geotechnicznych. *XXIV Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła 2009*.
  - [21] MAHLER, A.; Use of Cone Penetration Test in pile design. Department of Geotechnics Budapest University of Technology and Economics, 2004.
  - [22] MAYNE P.W., MITCHELL J.K., AUXT J.A, YILMAZ R., U.S. National Report on CPT, *Proc. Intl. Symposium on Cone Penetration Testing, Vol. 1, Swedish Geotechnical Society, Report 3:95*, Linköping, 1995.
  - [23] MAYNE P.W.; Cone Penetration Testing. A Synthesis of Highway Practice. *Transportation Research Board, NCHRP368*, Washington D.C., 2007
  - [24] MŁYNAREK Z., WELLING E., TSCHUSCHKE W.; Conductivity Piezocone Penetration Test for Evaluation of Soil Contamination, Proceedings, *International Symposium on Cone Penetration Testing, Vol. 2, Swedish Geotechnical Society Report 3:95*, Linköping, October 4-5, 1995.
  - [25] MŁYNAREK Z., WIERZBICKI J., Nowe możliwości i problemy interpretacyjne polowych badań gruntów. *III Sympozjum WPGIWP, Puszczykowo 2007*, Geologos 11, 2007, str. 97-118.
  - [26] POULOS, H.G., Geotechnika na progu XXI wieku. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/1999, s.69-75.
  - [27] SALGADO, R.; LEE, J.; Pile Design on Cone Penetration Test Results. Final Report, FHWA/IN/JTRP-99/8, 1999
  - [28] SCHNAID, F.; In Situ Testing in Geotechnics. Wydawnictwo: Taylor and Francis, 2008.
  - [29] SCHUPPENER, B., European Geotechnical Standards. *11th Baltic Sea Geotechnical Conference*, s.913-928.
  - [30] SIKORA Z., OSSOWSKI R., Numeryczne modelowanie sondowania statycznego CPTu, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2004.
  - [31] SIKORA Z.; Sondowania Statyczne. Metody i Zastosowanie w Geoinżynierii. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2006.
  - [32] SIMPSON, B., Proposed changes to correlation factors. Kwiecień 2007.
  - [33] ŚWIECA, M., Projektowanie pali wg Eurokodu 7. Przykłady obliczeń. *XXIV Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła 2009*.
  - [34] TARNAWSKI M., URA M.; Wyniki sondowań i badań presjometycznych w bardzo zagęszczonych piaskach. XIX Seminarium Naukowe Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska. Szczecin, grudzień 2011, s. 95-101
  - [35] TARNAWSKI M., URA M.; Porównanie wyników sondowań statycznych CPT i dynamicznych DPSH w gruntach niespoistych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 1/2012; s. 38-42.
  - [36] TEJCHMAN, A., Badania dynamiczne pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2000,

- s.325-330.
- [37] TEJCHMAN, A., O normach palowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2001, s.361-364.
- [38] TEJCHMAN, A., O nowej normie palowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3-4/2003, s.234-237.
- [39] TOMLINSON, M.J.; Pile design and construction practice. Wydawnictwo: Taylor and Francis, 1994.
- [40] TSCHUSCHKE W., WIERZBICKI J.; Zastosowanie techniki statycznego sondowania do oceny parametrów geotechnicznych podłoża. *Współczesne Problemy Geologii Inżynierskiej*, Wrocław, 1998. s.107-112.
- [41] TSCHUSCHKE W., MŁYNAREK Z., KROLL M., WELLING E.; Problemy techniczne i interpretacyjne sondowań statycznych o dużej głębokości. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 1/2003. s.29-33
- [42] TSCHUSCHKE W.; Identyfikacja konsystencji gruntów mało spoistych na podstawie charakterystyk penetracji z badania statycznego sondowania. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol.4, nr.3, 2013, s.247-252.
- [43] WIĘCŁAWSKI P.; Obliczeniowe i ekonomiczne aspekty posadowienia na palach wg PN-EN 1997-1:2004, *Praca magisterska*, Politechnika Gdańska, 2009.
- [44] WIĘCŁAWSKI P.; Rzeczywista nośność pali w gruntach ilastych z zastosowaniem zaleceń PN-EN 1997-1:2004. *XI Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice-Szczyrk, 12-13 maja 2011*. Monografia pod redakcją dr hab inż. Joanny Bzówki.
- [45] WIĘCŁAWSKI P.; Nośność graniczna pali Vibro obciążonych osiowo na podstawie próbnych obciążeń statycznych i wyników sondowania CPT. *Konferencja Naukowo - Techniczna Interdyscyplinarne Zagadnienia Budownictwa, Warszawa 28-29 maja 2015*.
- [46] WIĘCŁAWSKI P.; Ocena współpracy pali Vibro z podłożem gruntowym na podstawie badań in-situ. *61. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk oraz Komitetu Nauki Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Krynica - Bydgoszcz, 20-25 września 2015*.
- [47] WIŁUN Z.; Zarys geotechniki. Wydawnictwo WKŁ Sp.z o.o, Warszawa 1976, 2007
- [48] ZADROGA, B., Współczesne tendencje w praktycznych zastosowaniach geotechniki *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/1999, s.288-292.
- [49] ZADROGA, B., Czy i jak zmodyfikować Polską Normę Palową PN-83/B-02482?. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/2000, s.75-81.
- [50] PN-EN 1997-1:2008, Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne- Część 1: Zasady ogólne.
- [51] PN-EN 1997-2:2008, Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badania podłoża gruntowego.
- [52] PN-83/B-02482, Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- [53] PN-B-04452:2002, Geotechnika. Badania polowe.
- [54] <http://www.finesoftware.eu>
- [55] <http://www.national-geographic.pl>
- [56] <http://www.markgraf-privat.de>
- [57] <http://icevibro.com>



- [58] <http://geoengineering.inzynieria.com>
- [59] <http://brunelleschi.imss.fi.it>
- [60] <http://geotecnia-sor.blogspot.com>
- [61] <http://www.amazon.com/Illustrations-Concrete-Construction-Architecture-Engineers>
- [62] <http://chestofbooks.com>
- [63] <http://www.geologismiki.gr>
- [64] <http://www.insitusoil.com>
- [65] <http://www.lukaszlukasik.pl/galeria/Architektura/slides/Biskupin>
- [66] [www.stabliator.pl](http://www.stabliator.pl)
- [67] <http://www.consoilproject.pl>
- [68] <http://www.eng.usf.edu>

## Indeks oznaczeń

### Litery łacińskie

$a$	współczynnik podstawy stożka netto
$a \times b$	wymiary pala o przekroju prostokątnym, przy czym $b \leq 1,5 \cdot a$ ,
$a_b, b_l$	współczynniki funkcji zależności osiadań i obciążeń w metodzie zmodyfikowanej hiperboli
$A$	pole powierzchni przekroju pala
$A_c$	powierzchnia podstawy stożka
$A_b$	pole powierzchni podstawy pala
$A_s$	pole powierzchni poboczniczy pala
$A_{sb}, A_{st}$	pole przekroju ściany tulei ciernej odpowiednio nad filtrem porowym powyżej podstawy stożka oraz na krańcu tulei ciernej
$b_f$	asymptota funkcji obciążenie - osiadanie w metodzie zmodyfikowanej hiperboli
$B_q$	parametr ciśnienia wody w porach
$B_R$	długość referencyjna równa 1.0m
$c'$	efektywna spójność gruntu
$c_u$	wytrzymałość gruntu na ścinanie w warunkach bez odpływu wody z porów, również spójność według PN-81/B-03020, oznaczenie w normie $S_u$ .
$C_p$	obwód części trzonu pala w warstwie, w której umieszczono głowicę pala
$C_1$	współczynnik proporcjonalności, $C_1=0.9$ w metodzie autorskiej
$C_1, C_2$	współczynniki funkcji zależności osiadań i obciążeń w metodach Metoda Brinch - Hansena i China
$D$	średnica trzonu pala
$D_b$	średnica podstawy pala
$D_{eq}$	zastępcza średnica podstawy pala o przekroju prostokątnym
$D_0$	średnica pala Vibro $D_0=508\text{mm}$
$E$	moduł Younga pala
$f_s$	tarcie na tulei ciernej pomierzone bezpośrednio w badaniu CPTU
$F_S$	globalny współczynnik bezpieczeństwa ( <i>safety factor</i> )
$F_{max, base}$	maksymalny opór podstawy
$F_{max, shaft}$	maksymalny opór tarcia poboczniczy
$F_r$	znormalizowany współczynnik tarcia
$G_0$	moduł odkształcenia postaciowego
$H_r$	wartość obliczeniowa obciążenia poziomego
$I_D$	stopnia zagęszczenia gruntów niespoistych
$I_L$	stopnia plastyczności gruntów spoistych
$k_c$	współczynnik nośności zależny od rodzaju gruntu
$L$	długość pala
$L_{gn}$	zagłębienie pala w gruncie nośnym
$M_0$	edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej
$M$	edometryczny moduł ściśliwości wtórnej
$N_t$	projektowana nośność pala na wciskanie
$N^W$	projektowana nośność pala na wyciąganie
$N_c^0, N_c^1$	nośność krytyczna na podstawie SPLT według PN-83/B-02482
$N_g^1$	nośność graniczna na podstawie SPLT według PN-83/B-02482
$OCR$	współczynnik prekonsolidacji gruntu
$p_b$	jednostkowy opór podstawy pali wierconych ( $q_{b,k}$ )

$p_{max, base}$	maksymalny, jednostkowy opór podstawy w MPa
$p_{max, shaft, z}$	maksymalny, jednostkowy opór tarcia pobocznicy, na głębokości $z$ w MPa
$p_s$	jednostkowy opór tarcia pobocznicy pali wierconych ( $q_{s,i,k}$ )
$P$	obciążenie powodująca skrócenie trzonu pala
$P_A$	ciśnienie atmosferyczne
$q_c$	opór stożka pomierzony bezpośrednio w badaniu CPTU
$q_{c,i;mean}$	wartość oporów $q_c$ uśrednionych w określonych strefach pala
$q_{c;z;a}$	wartość $q_c$ na głębokości $z$
$q_{cp}$	uśredniony jednostkowy opór pod podstawą pala
$q_{cs,i}$	uśredniony jednostkowy opór na pobocznicy w obrębie $i$ – tej warstwy
$q_n$	opór stożka netto, normalizacja względem głębokości sondowania
$q_{b;k}$	wartość charakterystyczna oporu podstawy określona na podstawie wartości parametrów gruntu
$q_{s;i;k}$	wartość charakterystyczna tarcia na pobocznicy określona na podstawie wartości parametrów gruntu
$Q$	obciążenie
$Q_f$	obciążenie graniczne według interpretacji próbnych obciążeń statycznych
$Q_{gr,c}$	obciążenie powodujące osiadania pala równe 10 % średnicy, $R_{c,cal}$ , wg EC7
$Q_{gr,d}$	nośność obliczeniowa pala według proponowanej w opracowaniu procedury
$Q_{max}$	obciążenie maksymalne w próbnym obciążeniu statycznym
$Q_r$	obciążenie projektowe
$Q_s$	wartość przyłożonego obciążenia powodująca osiadania $s_s$ ", obciążenie inicjujące fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal-grunt
$Q_s (LCPC)$	nośność charakterystyczna pobocznicy pala w metodzie LCPC
$Q_t (LCPC)$	nośność charakterystyczna podstawy pala w metodzie LCPC
$q_t$	opór stożka znormalizowany względem ciśnienia wody w porach gruntu
$R_{b,cal}$	nośność podstawy pala, obliczona na podstawie wyników badań podłoża, w stanie granicznym nośności
$R_{b;d}$	wartość obliczeniowa nośności podstawy pala
$R_{b;k}$	wartość charakterystyczna nośności podstawy pala
$R_c$	nośność pala wciskanego uwarunkowana oporami gruntu, w stanie granicznym nośności
$R_{c,cal}$	wartość $R_c$ wyznaczona z obliczeń
$R_{c;d}$	wartość obliczeniowa $R_c$
$R_{c;k}$	wartość charakterystyczna $R_c$
$R_{c,m}$	wartość $R_c$ pomierzona w jednym lub kilku próbnym obciążeniach pali
$R_d$	wartość obliczeniowa oporu przeciw oddziaływaniu
$R_f$	współczynnik tarcia
$R_{p,d}$	wartość obliczeniowa siły utrzymującej wywołanej przez parcie gruntu na boczną powierzchnię fundamentu
$R_{s,d}$	wartość obliczeniowa nośności pobocznicy pala
$R_{s,cal}$	graniczna nośność pobocznicy, obliczona przy użyciu parametrów geotechnicznych określonych z wyników badań
$R_{s,k}$	wartość charakterystyczna nośności pobocznicy pala
$s$	osiadania
$s_d$	graniczne przemieszczenie sprężyste pala zależne od średnicy
$s_f$	przemieszczenie graniczne uwzględniające skrócenie własne pala
$s_u$	wytrzymałość gruntu na ścianie w warunkach bez odpływu według PN-81/B-03020, patrz też $c_u$

$s'$	punkt przecięcia wykładniczej linii trendu, opisującej fazę sprężysto-plastyczną z osią rzędnych $s$ ; punkt początkowy funkcji wykładniczej
$s'_M$	obliczony punkt przecięcia wykładniczej linii trendu, opisującej fazę sprężysto-plastyczną z osią rzędnych
$s_s''$	wartość osiadań pala w punkcie przejścia krzywej Q-s z fazy sprężystej w fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal - grunt
$s_s''_M$	wartość obliczona osiadań pala w punkcie przejścia krzywej Q-s z fazy sprężystej w fazę sprężysto-plastyczną współpracy pal - grunt
$tg\alpha$	współczynnik kierunkowy zależności sprężystej obciążeń i osiadań pali
$u_c$	ciśnienie wody w porach gruntu: $u_1$ , $u_2$ , lub $u_3$
$u_0$	ciśnienie wody w porach gruntu w poziomie stożka przed rozpoczęciem sondowania
$u_2, u_3$	ciśnienie wody w filtrze porowym odpowiednio powyżej stożka i powyżej tulei czarnej
$v_s$	prędkości fali poprzecznej
$z$	głębokość

### Litery greckie

$\alpha$	kąt nachylenia części sprężystej charakterystyki obciążenie-osiadanie do osi obciążenia
$\alpha, \alpha_{LCPC}$	współczynnik tarcia uwzględniający stan i rodzaj gruntu, oraz materiał pala
$\alpha_p$	współczynnik klasy podstawy pala
$\alpha_s$	współczynnik klasy poboczniczy pala
$\beta$	współczynnik uwzględniający kształt stopy pala
$\gamma_F$	współczynnik częściowy do oddziaływania
$\gamma_G$	współczynnik częściowy do oddziaływania stałego
$\gamma_b$	współczynnik częściowy do nośności podstawy pala
$\gamma_s$	współczynnik częściowy do nośności poboczniczy pala
$\gamma_c$	współczynnik częściowy do całkowitej nośności pala
$\eta$	współczynnik korekcyjny, zależny od geometrii pala i zagłębienia podstawy w gruncie nośnym
$\eta_M$	współczynnik korekcyjny, zależny od geometrii pala i zagłębienia podstawy w gruncie nośnym
$\lambda$	wykładnik funkcji wykładniczej, opisującej fazę sprężysto-plastyczną współpracy pala z gruntem
$\lambda_M$	wykładnik funkcji wykładniczej, opisującej fazę sprężysto-plastyczną współpracy pala z gruntem
$\xi_1; \xi_2$	współczynniki korelacyjne do oceny wyników próbnych obciążeń statycznych pali
$\xi_3; \xi_4$	współczynniki korelacyjne do określania nośności pali na podstawie wyników badań podłoża, nie będących próbnymi obciążeniami pali
$\xi_5; \xi_6$	współczynniki korelacyjne do określania nośności pali na podstawie wyników badań dynamicznych udarowych
$\rho$	gęstość objętościowa gruntu
$\sigma_{v0}$	składowa pionowa stanu naprężeń geostatycznych
$\sigma'_{v0}$	składowa pionowa stanu naprężeń geostatycznych efektywnych
$\varphi'$	efektywny kąt tarcia wewnętrznego
$\psi_1$	współczynnik nośności podstawy
$\psi_{2i}$	współczynnik nośności poboczniczy

- $\Delta L$  odległość od podstawy pala do spągu pierwszej warstwy powyżej podstawy  
o  $q_c < 2$  MPa
- $\Delta u$  nadwyżka ciśnienie wody w porach gruntu

### Skróty

- ASTM* American Society for Testing and Materials, międzynarodowa organizacja opracowująca normy
- CCPTU* Conductivity Cone Penetration Test, badanie sondą statyczną z pomiarem przewodności elektrycznej gruntu
- CPT* Cone Penetration Test, badanie sondą statyczną
- CPTU* Piezocone Penetration Test, badanie sondą statyczną z pomiarem ciśnienia wody w porach gruntu
- DA* Design Approach, podejście obliczeniowe, skrót z EC7
- DCPT* Dilatocone Penetration Test, badanie sondą statyczną z tuleją dylatometryczną
- DIN* Deutsches Institut für Normung, Niemiecki Instytut Normalizacji
- DLT* Dynamic Load Testing, badanie dynamiczne pala
- EC7* Eurokod 7, norma PN-EN 1997-1:2008.
- ISSMFE* International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, międzynarodowy komitet opracowujący normy i zalecenia
- LCPC* Laboratoire central des ponts et chaussées, instytut zajmujący się mechanika gruntów i fundamentowaniem
- PDA* Pile Driving Analysis, badanie dynamiczne dla pali wbijanych
- PIT* Pile Integrity Testing, badania ciągłości i długości pala
- PSPLT* Pseudo Static Pile Load Test, próbne obciążenie pala tłumionym obciążeniem dynamicznym
- Q-s* charakterystyka obciążenie - osiadanie, krzywa osiadania pala
- RCPTU* Resistivity Cone Penetration Test, badanie sondą statyczną z pomiarem oporności elektrycznej gruntu
- SCPTU* Seismic Cone Penetration Test, badanie sondą statyczną z czujnikiem sejsmicznym
- SIT* Sonic Integrity Testing, badania ciągłości i długości pala
- SPLT* Static Pile Load Test, próbne obciążenie statyczne pala

## Prognozowanie pracy pali Vibro obciążonych osiowo z wykorzystaniem wyników sondowania CPT.

mgr inż. Paweł Więclawski

### Streszczenie

W odniesieniu do obecnych trendów optymalnego projektowania obiektów inżynierskich, dąży się do określania rzeczywistych wartości współdziaływania podłoża gruntowego i konstrukcji. Pale Vibro należą do grupy pali przemieszczeniowych z poszerzoną podstawą, charakteryzują się bardzo dużą nośnością, szczególnie w gruntach niespoistych. Próbne obciążenia statyczne (SPLT) wskazują, że nośność pali Vibro jest znacznie większa niż zakładana na etapie projektu. Trudność, w wielu przypadkach, sprawia wyznaczenie nośności granicznej na podstawie próbnego obciążenia statycznego, ze względu na liniowy przebieg krzywej *obciążenie - osiadanie*. Praca zawiera analizę, której wynikiem jest metoda prognozowania krzywej *obciążenie - osiadanie* pali Vibro obciążanych osiowo, z wykorzystaniem wyników sondowania sondą statyczną CPT(u). W analizie wykorzystuje się wyniki SPLT co jest zgodne ze wskazaniem aktualnej normy PN-EN:1997-1: 2008. Wyznaczona pełna krzywa teoretyczna pozwala określić wartość nośności granicznej, ale przede wszystkim charakter współpracy posadowienia z ośrodkiem gruntowym w zależności od przykładanego obciążenia zewnętrznego. Taka propozycja jest konkurencyjna w stosunku do dotychczas stosowanych metod obliczania nośności pali i pozwoli na ocenę rzeczywistych zależności *obciążenie - osiadanie* oraz jednocześnie bardziej ekonomiczne i ekologiczne projektowanie fundamentów na palach.

Rozdział 1. rozprawy stanowi wstęp, w którym przedstawiono tezę i założenia pracy. W rozdziale 2. omówiono pale Vibro, przedstawiono technologiczne rozwiązania, dawne i obecne, wykonawstwa pali. W rozdziale 3. opisana została sonda statyczna CPT, możliwość zastosowania wyników sondowań do celów rozpoznania podłoża i projektowania fundamentów palowych. W rozdziale 4. scharakteryzowano metody obliczania nośności pali na podstawie badań podłoża gruntowego. Przedstawiono metody wykorzystujące wyniki sondowania CPT, metody normowe zawarte w EC7 oraz nienormowe stosowane w Europie. Rozdział 5. to charakterystyka badań terenowych pali. Szczególną uwagę zwrócono na próbne obciążenia statyczne, procedury przeprowadzania badania, metody interpretacji stosowane na świecie. Rozdział 6. zawiera zbiór danych do analizy oraz opis procedury poszukiwania korelacji pomiędzy wynikiem sondowania CPT i charakterem pracy pala w podłożu. Przedstawiono ściśle zależności między oporem na stożku sondy  $q_c$  i przebiegiem krzywej *obciążenie - osiadanie*. Otrzymane wyniki zostały zweryfikowane z zastosowaniem analizy statystycznej oraz analizy porównawczej z innymi metodami stosowanymi obecnie w Europie. Rozdział 7. zawiera wyniki praktycznego zastosowania proponowanej metody. W celu sprawdzenia słuszności postawionej tezy i przydatności praktycznej wykorzystano opracowaną metodę do prognozowania krzywej *obciążenie - osiadanie* pali Vibro, które nie były wykorzystane w analizie. W rozdziale 8. podsumowano przeprowadzoną analizę oraz przedstawiono możliwości i rezultaty stosowania opracowanej metody do prognozowania krzywej *obciążenie - osiadanie* i wyznaczania nośności granicznej pali Vibro.

**Axially loaded Vibro piles performance prediction using result of Cone Penetration Tests.**

mgr inż. Paweł Więclawski

**Abstract**

Current trends of optimal engineering design focus on determining the actual soil and structure interactions. Vibro piles technology belong to the group of full displacement piles with expanded base, characterized by a very high load capacity, especially in non-cohesive soils. Static Pile Load Testing (SPLT) indicates that the bearing capacity of Vibro piles is much higher than expected at the design stage. The difficulty in many cases is determination of limit load capacity from the static load test because in many cases the settlement curve has a linear characteristic. The paper includes an analysis which result is a method of settlement curve forecasting for axially loaded Vibro piles using the results of the CPT(u) probing. The analysis incorporates the results of SPLT, which is consistent with the recommendations of the current standard PN-EN: 1997-1: 2008. The theoretical full settlement curve reveals specific value of the limit load capacity, but most of all soil-structure interactions depending on the applied external load. That method is competitive to existing pile capacity calculating methods and allows for an assessment of the real load - settlement interaction and at the same time more economical and ecological design of the pile foundations.

Chapter 1 contains an introduction, which presents the main thesis and the concept of the dissertation. In chapter 2 construction of piles and the past and present technology of Vibro piles are presented. In chapter 3 the CPT probe is described, the possibility to apply tests results to recognize the soil and design pile foundations. The 4<sup>th</sup> chapter methods for calculating the bearing capacity of piles based on the ground investigation were characterized. Methods of using the results of CPT probing, methods compatible with the EC7 standard and non-standard commonly used in Europe were presented as well. Chapter 5 contains the characteristic of piles tested in-situ. Great attention was paid to the procedure and to the static load test interpretation methods used around the world. Chapter 6 includes a collection of data for analysis and a description of the procedure for searching the correlation between the result of CPT and piles performance in the ground. Close relationship between the cone resistance  $q_c$  and load - settlement curve shapes were shown. The results were verified by statistical analysis and comparative analysis with other methods currently used in Europe. Chapter 7 presents the results of applying the proposed method in a real life case. In order to check the validity of thesis and its practical usefulness, the method was used to predict the load - settlement curve for Vibro piles that were not used in the correlation analysis. Chapter 8 summarizes the analysis, presents options and results of application of method to predict the load - settlement curve and determination of limit load for Vibro piles.

