

ĆWICZENIE NR 2

NOŚNOŚĆ PALI FUNDAMENTOWYCH WEDŁUG EUROKODU 7 Z WYKORZYSTANIEM WYNIKÓW BADANIA CPT

Zalecana literatura:

1. Gwizdała K. – *Fundamenty palowe, t. 1. Technologie i obliczenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2011.
2. Lunne T., Robertson P., Powell J. – *Cone Penetration Testing in geotechnical practice*. Blackie Academic and Professional, London, 1997.
3. EM 1110-2-2906. ENGINEERING AND DESIGN. *Design of Pile Foundations, US Army Corps of Engineers*, 15 January 91.
4. PN-B-02482:1983 *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.
5. PN- EN -1997-1 *Projektowanie geotechniczne. Zasady ogólne*
6. *EA Pfähle, Recommendations on Piling, German Geotechnical Society, 2nd edition, Wiley Ernst&Sohn, Berlin 2012*
7. Fleming W.G.K., Weltman A., Randolph M., Elson K.: *Piling Engineering*. 3-rd Edition. New York: Taylor & Francis 2009
8. Viggiani C., Mandolini A., Russo G.: *Piles and Pile Foundations*. London and New York: CRC Press Taylor & Francis Group 2012.
9. Tomlinson M., Woodward J.: *Pile Design and Construction Practice*. 6-th Edition. London and New York: CRC Press Taylor & Francis Group 2015

Cel pracy:

Obliczyć nośność obliczeniową pala wciskanego $R_{c,d}$ według Eurokodu 7. Profil geotechniczny oraz parametry geotechniczne wyznaczyć na podstawie wyników badania sondą CPTU.

Metoda wyznaczenia oporów jednostkowych poboczniczy i podstawy pala:

1. z wykorzystaniem PN-83/B-024820
2. **LCPC - Bustamante M., Ganaselli L.** – *Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT*. Proc. of 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT – II, Amsterdam, 1982

Dane do projektu

Rzędna głowicy pala: 1,5 m p.p.t

Średnica pala $D = 0,6$ m

Technologia pala: wiercony CFA.

Długość pala $L = 15,5$ m

Termin oddania projektu: 31 - 01 - 2025 r.

Eurokod 7 do obliczenia nośności pali pojedynczych zaleca podobny jak w normie *PN-83/B-02482* wzór statyczny z wprowadzeniem współczynników bezpieczeństwa γ :

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad \text{lub} \quad R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s}$$

gdzie:

$R_{c;d}$ – całkowita obliczeniowa nośność pala R_c zależna od wytrzymałości gruntu,

$R_{c;k}$ – charakterystyczna wartość R_c ,

$R_{b;k}$ – charakterystyczna nośność podłoża pod podstawą pala,

$R_{s;k}$ – charakterystyczna nośność gruntu wzdłuż pobocznicy,

$\gamma_t, \gamma_b, \gamma_s$ – częściowe współczynniki bezpieczeństwa (dla całkowitej nośności pala, dla podstawy, dla pobocznicy)

$$R_b = A_p \cdot q_b \quad \text{oraz} \quad R_s = \sum A_{s,i} \cdot q_{s,i}$$

gdzie:

q_b i $q_{s,i}$ – charakterystyczne wartości oporu granicznego podstawy i pobocznicy w kolejnych warstwach, wyznaczonymi na podstawie wartości parametrów gruntu.

W Eurokodzie 7 brak wytycznych jak powinno się obliczać opory jednostkowe na podstawie danych z badań gruntu. Informacje są bardzo ogólne:

7.6.2.3 Wyznaczanie nośności granicznej pali wciskanych na podstawie wyników badań podłoża

(1)P Metody określania nośności wciskanego fundamentu palowego na podstawie wyników badań podłoża gruntowego należy ustalić na podstawie próbnych obciążeń pali i porównywalnych doświadczeń, jak podano w 1.5.2.2.

(2) Można wprowadzić współczynnik modelu obliczeniowego, jak opisano w 2.4.1(9), aby zapewnić, że przewidywana nośność na wciskanie jest wystarczająco bezpieczna.

Sposoby obliczania w krajach europejskich bardzo się różnią. Wartości oporów podstawy (q_b) i pobocznicy ($q_{s,i}$) według EN 1997-1 nie są równoznaczne z oporami q i t w normie *PN-B-02482*. Do praktycznego stosowania EC 7-1 niezbędne jest uzupełnienie go znowelizowaną normą (Załącznikiem Krajowym).

Nie należy posługiwać się bezpośrednio oporami z normy palowej, gdyż są one zredukowane!

W celu dostosowania do zaleceń EC7 (nośność graniczna przy osiadaniu 10% średnicy pala) wartości q i t określone według *PN-83/B-02482* można zwiększyć o około 25%, czyli:

$$q_{b,k} = 1.25 \times S_p \times q^{(n)}$$

$$q_{s,k,i} = 1.25 \times S_{s,i} \times t_i^{(n)}$$

Charakterystyczna wartość nośności pala wciskanego może być wyznaczana ze wzoru:

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

gdzie:

ξ_3 i ξ_4 – współczynniki korelacyjne w zależności od liczby zbadanych profili n ,

stosowane odpowiednio do:

- wartości średnich $(R_{c;cal})_{mean} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{mean} = (R_{b;cal})_{mean} + (R_{s;cal})_{mean}$;

- wartości najniższych $(R_{c;cal})_{min} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{min}$.

Table A.10 - Correlation factors ξ to derive characteristic values from ground test results (n - the number of profiles of tests)

ξ for $n =$	1	2	3	4	5	7	10
ξ_3	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
ξ_4	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

Jeśli konstrukcja ma wytrzymałość i sztywność, która wystarcza, aby przekazać obciążenia ze słabych pali na mocne, można podzielić wartości ξ_3 i ξ_4 przez 1,1.

Wykorzystanie sondowań statycznych w projektowaniu pali fundamentowych

Badania statyczną sondą wciskaną pozwalają na jakościową ocenę podłoża uwarstwionego, zwłaszcza o bardzo zmiennej wytrzymałości oraz odkształcalności. Dzięki osiągnięciu znacznych głębokości są szczególnie przydatne przy projektowaniu pali. Przewarstwienia w postaci torfów, namulów, warstw słabonośnych mogą być w sposób łatwy wychwytywane i lokalizowane. Takie ukształtowanie gruntu ma kluczowe znaczenie zarówno w doborze rodzaju pala, jak i jego długości. Przeprowadzanie sondowań statycznych zabezpiecza przed przypadkowym pozostawieniem gruntów o wysokiej odkształcalności poniżej podstawy pala.

Metody służące do oceny nośności pali fundamentowych można podzielić na dwie kategorie:

- metody pośrednie – za pomocą parametru wskaźnikowego (np. I_L , I_D) określone zostają inne parametry geotechniczne i na ich podstawie określa się opory pod podstawą oraz na pobocznicę pala wg normy PN-83/B-02482,
- metody bezpośrednie – za pomocą bezpośredniej korelacji pomiędzy oporem pod podstawą i na pobocznicę pala, a parametrami zmierzonymi podczas sondowania.

Metody obliczania nośności na podstawie parametrów geotechnicznych wyznaczonych z sondowania statycznego wykorzystują poniższy wzór:

$$R_u = R_{bu} + R_{su} = A_b \cdot q_{bu} + \sum A_{si} \cdot q_{sui}$$

$$q_{bu} = \psi_1 \cdot \bar{q}_c$$

$$q_{sui} = \frac{\bar{q}_{csi}}{\psi_{2i}} \quad \text{lub} \quad q_{sui} = \frac{\bar{f}_{si}}{\psi_{3i}}$$

gdzie:

R_u – graniczne obciążenie głowicy pała, najczęściej odpowiadające umownemu osiadania pała (np. 10% średnicy pała, $s=0,1D$),

R_{su} – graniczny opór gruntu na poboczniczy pała [kN],

R_{bu} - graniczny opór gruntu pod podstawą pała [kN],

q_{sui} - jednostkowy opór graniczny na poboczniczy pała w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [kPa],

q_{bu} – jednostkowy opór graniczny pod podstawą pała [kPa],

\bar{q}_c – uśredniona wartość jednostkowego oporu na stożku w strefie przy podstawie pała [kPa],

\bar{q}_{csi} - uśredniona wartość jednostkowego oporu na stożku w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [kPa],

\bar{f}_{si} – uśredniona wartość jednostkowego oporu na poboczniczy tulei ciernej w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [kPa],

A_s - powierzchnia poboczniczy pała [m²],

A_b - powierzchnia podstawy pała [m²],

ψ_1 – współczynnik nośności podstawy,

ψ_{2i} - współczynnik nośności poboczniczy w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej dla q_c ,

ψ_{3i} - współczynnik nośności poboczniczy w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej dla f_s .

Zgodnie z oznaczeniami EC7 przyjmujemy:

$$R_{c;cal} = R_u$$

$$q_b = q_{bu}$$

$$q_{s;i} = q_{sui}$$

W naszym przykładzie wykorzystujemy jedną z najczęściej stosowanych metod wyznaczania nośności pali opracowaną w paryskim Laboratoire central des ponts et chaussées (Bustamante M., Ganaselli L. – *Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT*. Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT – II, Amsterdam, 1982). Metodę tą wykorzystuje się dla wszystkich rodzajów pali i wszystkich rodzajów gruntu. Średni opór na stożku wyznaczany jest w trzech etapach:

1. Wyrównanie wartości q_c uzyskanych podczas sondowania, dążąc do tego, by krzywa $q_c(z)$ była zbliżona do minimalnych wartości oporu q_c ,
2. Określenie średniej wartości oporu \bar{q}_c' na podstawie wyrównanych wartości q_c z przedziałów ($h - 1,5D$; $h + 1,5D$),
3. Wyznaczenie uśrednionej wartości oporu na stożku wg wzoru:

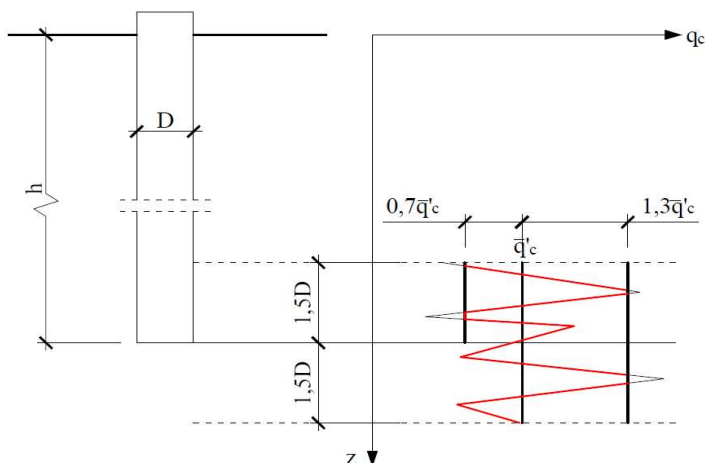
$$\bar{q}_c = \frac{\bar{q}_{cd}'' + \bar{q}_{cg}''}{2}$$

gdzie:

$$\bar{q}_{cd}'' \leq 1,3 \cdot \bar{q}_c' \text{ dla przedziału } (h; h + 1,5D),$$

$$\bar{q}_{cg}'' \leq 0,7 \cdot \bar{q}_c' \text{ dla przedziału } (h; h - 1,5D).$$

Uśrednioną wartość jednostkowego oporu na stożku w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej wyznacza się wg wzoru:



$$\bar{q}_{csi} = \frac{1}{\Delta h} \int_{h_{i-1}}^{h_i} q_c(h) dh$$

Dla uproszczenia obliczeń w przykładzie uśrednianie oporów zostanie wykonane w sposób bezpośredni (z pominięciem wymienionych wyżej etapów 2-3).

Proponowane wartości współczynników ψ_1 i ψ_{2i} przedstawiono w tabeli 1.

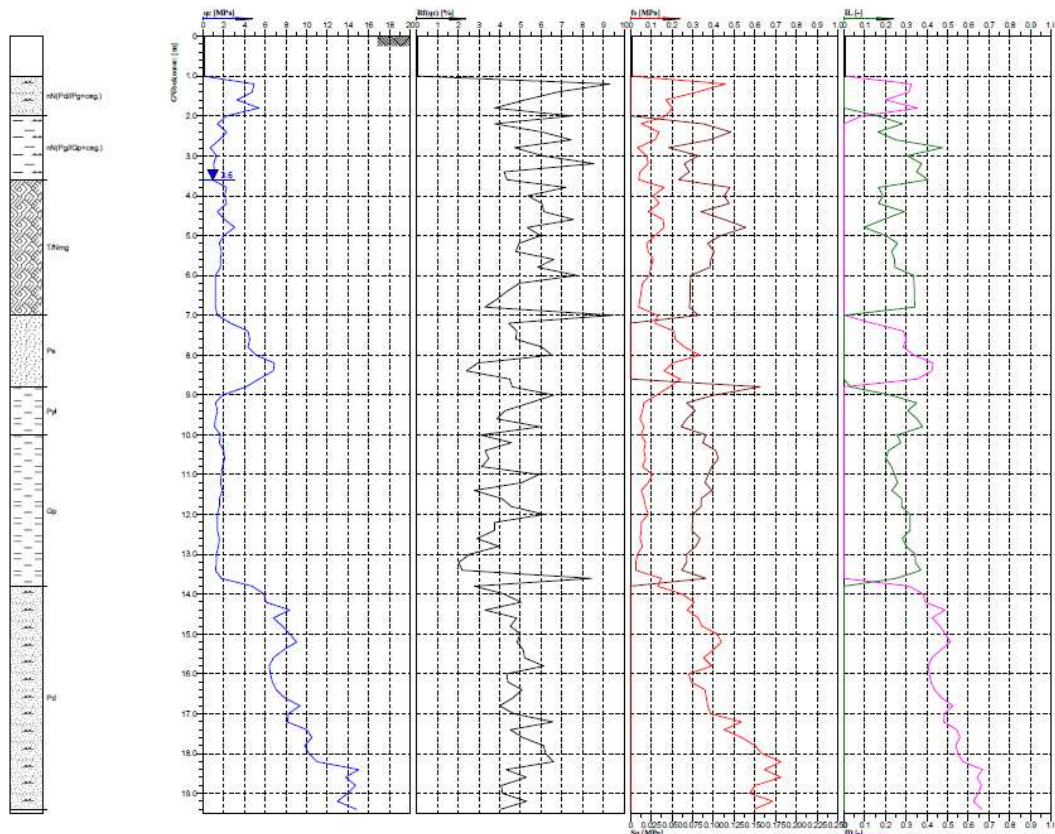
Tabela 1. Wartości współczynników ψ_1 i ψ_{2i} wg Bustamante i Giaselli (1983).

Rodzaj gruntu	q_c [MPa]	ψ_1		ψ_{2i}			
		Pale wiercone i iniektowane pod małym ciśnieniem	Pale wbijane, wciskane i iniektowane pod dużym ciśnieniem	Pale wiercone		Pale wbijane	
				Trzon betonowy	W rurze obsadowej	Trzon betonowy	Trzon stalowy
Iły miękkoplastyczne i namuły	< 1	0,4	0,5	30	30	30	30
Iły półzwarte	1 ÷ 5	0,35	0,45	40	80	40	80
Gliny plastyczne	≤ 5	0,4	0,5	60	150	60	120
Zwarte iły i gliny	> 5	0,45	0,55	60	120	60	120
Kreda plastyczna	≤ 5	0,2	0,3	100	120	100	120
Żwiry i piaski średnio zagęszczone	5 ÷ 12	0,4	0,5	100	200	100	200
Kreda spękana do zwietrzałej (rumosz)	> 5	0,2	0,4	60	80	60	80
Żwiry i piaski zagęszczone	> 12	0,3	0,4	150	300	150	200

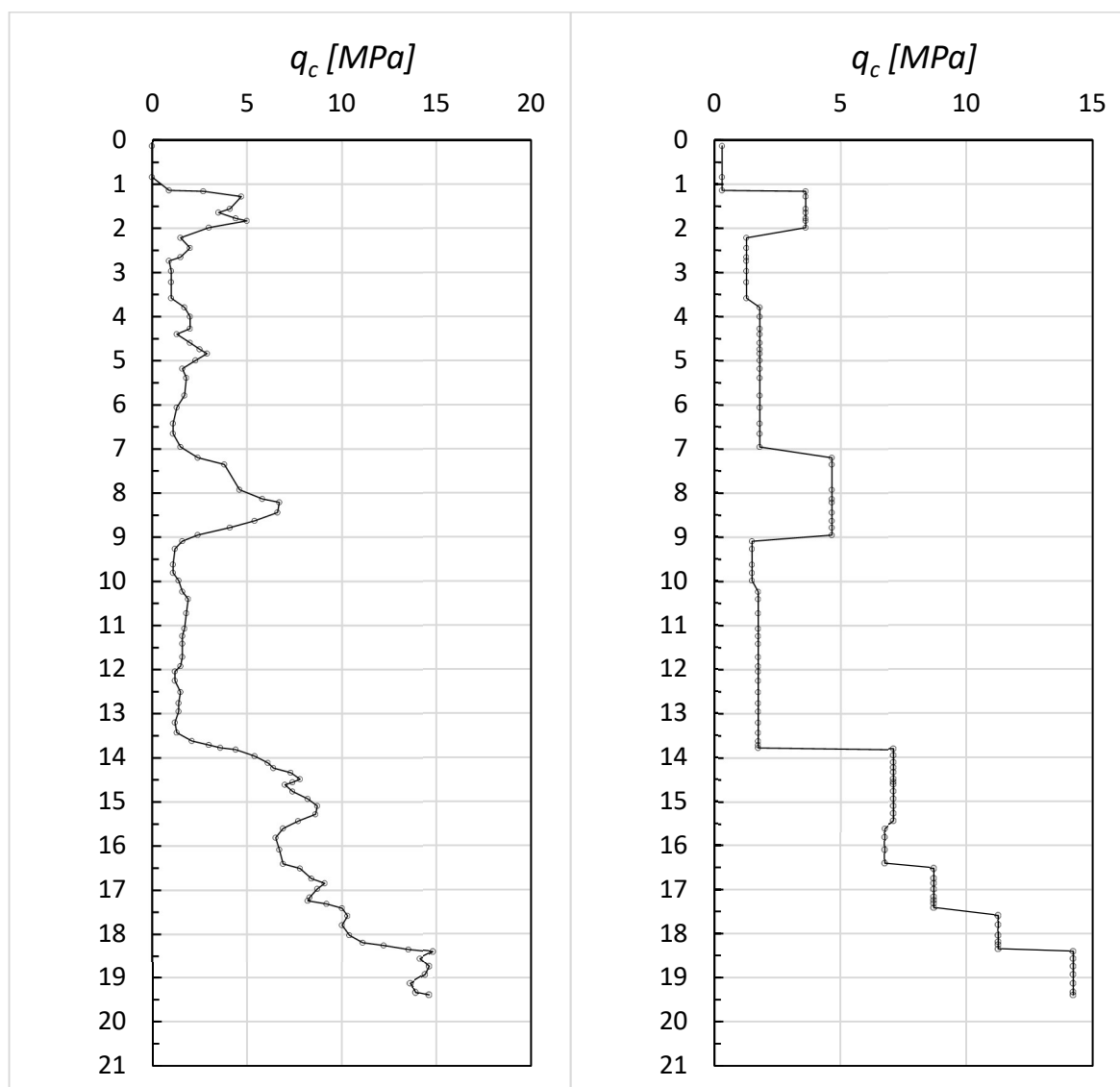
Należy jednak pamiętać, aby wartości jednostkowych oporów na poboczniczy pala q_{sui} nie przekraczały wartości maksymalnych podanych w tabeli 2. Wartości w nawiasach odnoszą się do pali wierconych, wykonanych starannie wg technologii w niewielkim stopniu naruszającej strukturę gruntu i pali wbijanych wykonanych w podłożu, w którym wbijanie poprawia właściwości nośne.

Tabela 2. Maksymalne wartości oporu jednostkowego q_{sui} (Bustamante i Ganaselli, 1983).

Rodzaj gruntu	q_c [MPa]	Maksymalne wartości q_{sui}					
		Pale wiercone		Pale wbijane		Pale iniektowane	
		Trzon betonowy	W rurze obsadowej	Trzon betonowy	W rurze obsadowej	Trzon betonowy	W rurze obsadowej
Iły miękkoplastyczne i namuły	< 1	15	15	15	35	35	-
Iły półzwarne	1 ÷ 5	35 (80)	35 (80)	35 (80)	35	80	120
Gliny plastyczne	≤ 5	35	35	35	35	80	-
Zwarne iły i gliny	> 5	35 (80)	35 (80)	35 (80)	35	80	200
Kreda plastyczna	≤ 5	35	35	35	35	80	-
Żwiry i piaski średnio zagęszczone	5 ÷ 12	80 (120)	35 (80)	80 (120)	80	120	200
Kreda spękana do zwietrzałej (rumosz)	> 5	120 (150)	80 (120)	120 (150)	120	150	200
Żwiry i piaski zagęszczone	> 12	120 (150)	80 (120)	120 (150)	120	150	200



Uśrednienie oporów q_c :



Nr	grunt	Z	q_c	Δh	I_D	I_L	ψ_2	q_{sui}	q_{smax}	min { q_{sui}, q_{smax} }	ψ_1	q_{bu}
		[m] p.p.t.	[MPa]	[m]	[-]	[-]	[-]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]
1	nasyp niebudowlany	1.1	0.3	1.1						0.0	-	0.0
2	nasyp niebudowlany	2.0	3.6	0.9						0.0	-	0.0
3	nasyp niebudowlany	3.6	1.3	1.6						0.0	-	0.0
4	torf	7.0	1.8	3.4		0.35				0.0	-	0.0
5	piasek średni	9.0	4.6	2.0	0.31		100	46.4	80	46.4	-	0.0
6	pył	10.0	1.5	1.0		0.41	60	24.8	35	24.8	0.4	595.6
7	glina piaszczysta	13.8	1.7	3.8		0.36	60	28.9	35	28.9	0.4	693.3
8	piasek drobny	15.4	7.1	1.7	0.44		100	71.1	80	71.1	0.4	2843.1
9	piasek drobny	16.4	6.8	1.0	0.42		100	67.5	80	67.5	0.4	2700.0
10	piasek drobny	17.4	8.7	1.0	0.50		100	87.1	80	80.0	0.4	3485.0
11	piasek drobny	18.3	11.3	0.9	0.58		100	112.5	80	80.0	0.4	4500.0
12	piasek drobny	19.4	14.2	1.1	0.65		100	142.3	80	80.0	0.4	5693.3

Tabela 3. Wybrane wzory stosowane do określania stopnia plastyczności i stopnia zagęszczenia gruntów.

Autor	Opis zależności	Zastosowanie
Borowczyk, Frankowski	$I_L = 0,729 - 0,7367 \log q_c$	Grunty spoiste – $f_i < 10\%$
	$I_L = 0,518 - 0,653 \log q_c$	Grunty spoiste – $f_i = 10-30\%$
	$I_L = 0,242 - 0,427 \log q_c$	Grunty spoiste – $f_i > 30\%$
Borowczyk	$I_D = 0,709 \cdot \log(q_c) - 0,165$	Piaski drobno-, średnio- i gruboziarniste

Formuła GEOTACO: $I_L = 0,35 - 0,5 \log(q_c - \sigma'_{v0})$

Współczynniki ψ_1 i ψ_2 oraz wartości maksymalne jednostkowych oporów granicznych wyznaczono wg tabel 1 i 2.

Obliczenia nośności

Rzędna głowicy pala: 1,5 m p.p.t

Średnica pala $D = 0,6\text{m}$

Technologia pala: wiercony CFA.

Długość pala $L = 15,5\text{ m}$

Nr	grunt	Z	q_c	Δh	min { q_{sui}, q_{smax} }	R_{sui}	R_{su}	q_{bu}	R_{bu}	R_u	L
		[m]	[MPa]	[m]	[kPa]	[kN]	[kN]	[kPa]	[kN]	[kN]	[m]
1	nasypany niebudowlany	1.1	0.3	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4
2		2.0	3.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
3		3.6	1.3	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1
4	torf	7.0	1.8	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5
5	piasek średni	9.0	4.6	2.0	46.4	175.1	175.1	0.0	0.0	175.1	7.5
6	pył	10.0	1.5	1.0	24.8	48.2	223.3	595.6	168.4	391.7	8.5
7	glina piaszczysta	13.8	1.7	3.8	28.9	206.4	429.7	693.3	196.0	625.7	12.3
8	piasek drobny	14.5	7.1	0.7	71.1	97.8	527.5	2843.1	803.9	1331.3	13.0
8	piasek drobny	15.4	7.1	0.9	71.1	124.6	652.1	2843.1	803.9	1455.9	13.9
9	piasek drobny	16.4	6.8	1.0	67.5	123.4	775.5	2700.0	763.4	1538.9	14.9
10	piasek drobny	17.0	8.7	0.6	80.0	90.5	865.9	3485.0	985.4	1851.3	15.5
10	piasek drobny	17.4	8.7	0.4	80.0	61.8	927.8	3485.0	985.4	1913.1	15.9
11	piasek drobny	18.3	11.3	0.9	80.0	140.2	1068.0	4500.0	1272.3	2340.4	16.8
12	piasek drobny	19.4	14.2	1.1	80.0	158.3	1226.4	5693.3	1609.8	2836.1	17.9

$$R_{c;cal} = R_u = 1851,3 \text{ kN}$$

Charakterystyczna wartość nośności pala wciskanego:

$$R_{c;k} = \frac{R_{c;cal}}{\xi} = \frac{1851,3}{1,4} = 1322,3 \text{ kN}$$

Obliczeniowa wartość nośności pala wciskanego:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = \frac{1322,3}{1,1} = \mathbf{1202,1 \text{ kN.}}$$

Obliczenia nośności

(z uwzględnieniem oporów jednostkowych z PN-83/B-04820)

Rzędna głowicy pała: 1,5 m p.p.t

Średnica pała $D = 0,6\text{m}$

Technologia pała: wiercony CFA: współczynniki technologiczne: $S_s = 0,8$; $S_p = 0,9$.

Długość pała $L = 15,5\text{ m}$

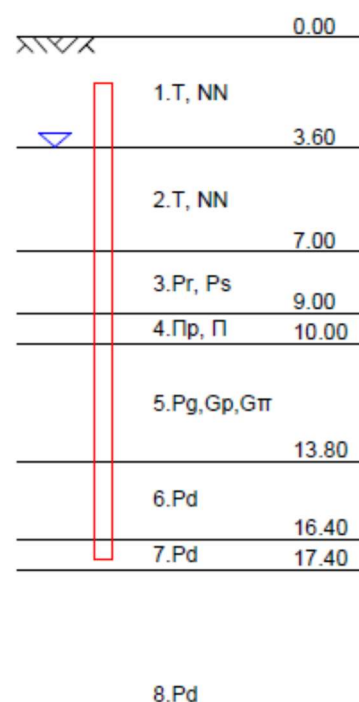
Nr	grunt	Z	q_c	Δh	I_D	I_L
		[m] p.p.t.	[MPa]	[m]	[-]	[-]
1	nasyp niebudowlany	3.6	-	3.6		
2	torf	7.0	1.8	3.4		0.35
3	piasek średni	9.0	4.6	2.0	0.31	
4	pył	10.0	1.5	1.0		0.41
5	głina piaszczysta	13.8	1.7	3.8		0.36
6	piasek drobny	16.4	7.0	3.6	0.42	
7	piasek drobny	17.4	8.7	1.0	0.50	
8	piasek drobny	18.3	11.3	0.9	0.58	
9	piasek drobny	19.4	14.2	1.1	0.65	

Obliczenia programem *palX* (<http://geoprogram.eu/programy.php>):

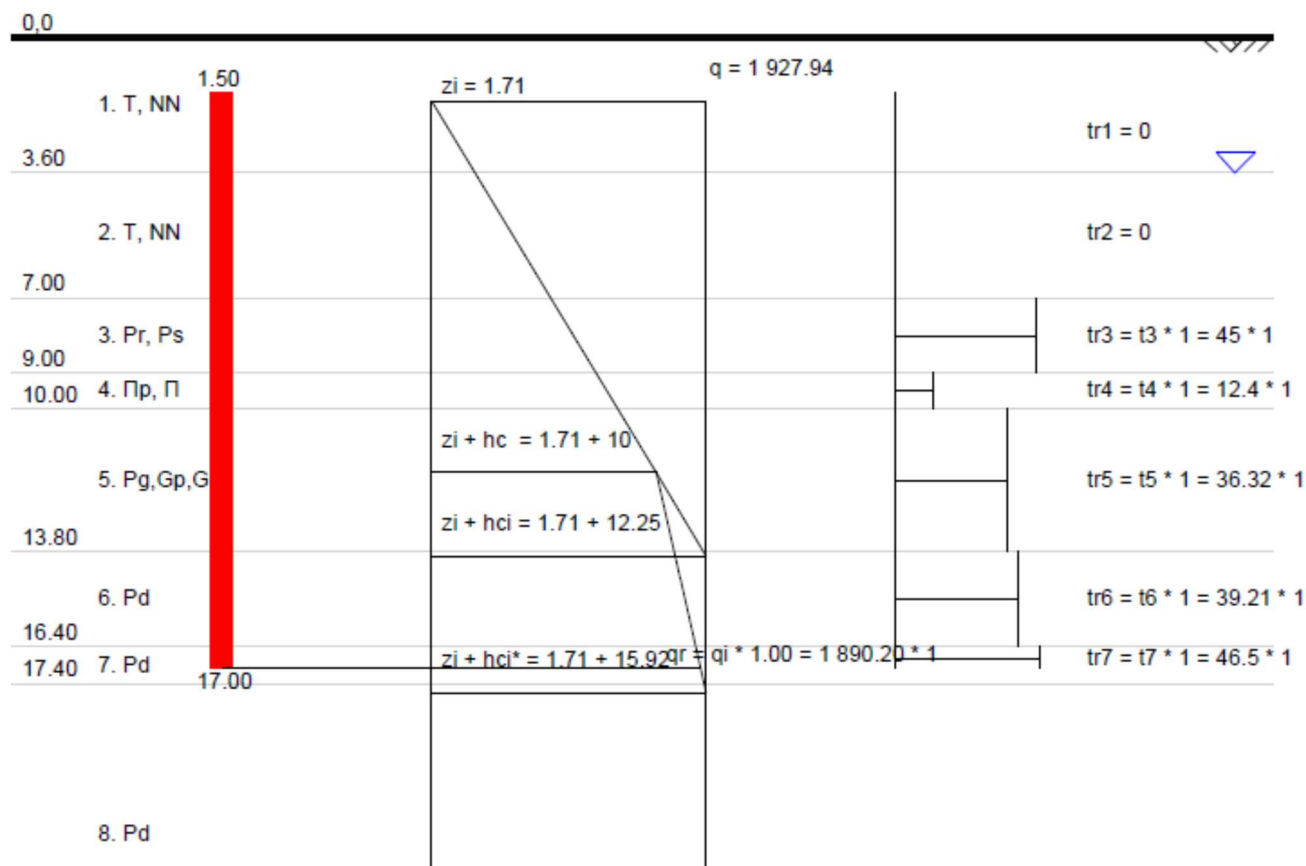
Długość pała: 15.50 [m]
 Rzędna głowicy: 1.50 [mppt]
 Rzędna wykopu: 0.00 [mppt]

Średnica trzonu: 0.60 [m]
 Średnica podstawy: 0.60 [m]
 Współczynnik korekcyjny m: 1.00 [-]

Lp.	h [m]	z [mppt]	grunt	ID/IL	wsp.	γ [kN/m ³]
1	3.60	3.60	T, NN	0.00	1.00	16.00
2	3.40	7.00	T, NN	0.00	1.00	7.00
3	2.00	9.00	Pr, Ps	0.31	1.00	10.00
4	1.00	10.00	Πp, Π	0.60	1.00	11.00
5	3.80	13.80	Pg, Gp, Gπ	0.36	1.00	12.00
6	2.60	16.40	Pd	0.42	1.00	10.00
7	1.00	17.40	Pd	0.50	1.00	10.00
8	8.00	25.40	Pd	0.65	1.00	10.00



Obliczenie oporów jednostkowych (t, q) według PN-83/B-04820



Lp.	hp.[m]	As[m2]	tana	Sp	Ss	Sw	t[kPa]	tr[kPa]	uwagi
1	2.10	3.96	-	1.00	1.00	0.60	0.00	0.00	
2	3.40	6.41	-	1.00	1.00	0.60	0.00	0.00	
3	2.00	3.77	-	1.00	1.10	0.70	45.00	45.00	
4	1.00	1.88	-	1.00	1.00	0.60	12.40	12.40	
5	3.80	7.16	-	1.00	1.00	0.60	36.32	36.32	
6	2.60	4.90	-	0.90	0.80	0.50	39.21	39.21	
7	0.60	1.13	-	0.90	0.80	0.50	46.50	46.50	

q = 1928 [kPa] (w.6)
qr = 1890 [kPa]

$$N_t = N_p + N_s = 481 + 666 = 1147 \text{ kN}$$

$$R_{c;cal} = 1,25 * N_t = 1433,8 \text{ kN}$$

Charakterystyczna wartość nośności pala wciskanego:

$$R_{c;k} = \frac{R_{c;cal}}{\xi} = \frac{1433,8}{1,4} = 1024,1 \text{ kN}$$

Obliczeniowa wartość nośności pala wciskanego:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = \frac{1024,1}{1,1} = \mathbf{931 \text{ kN.}}$$