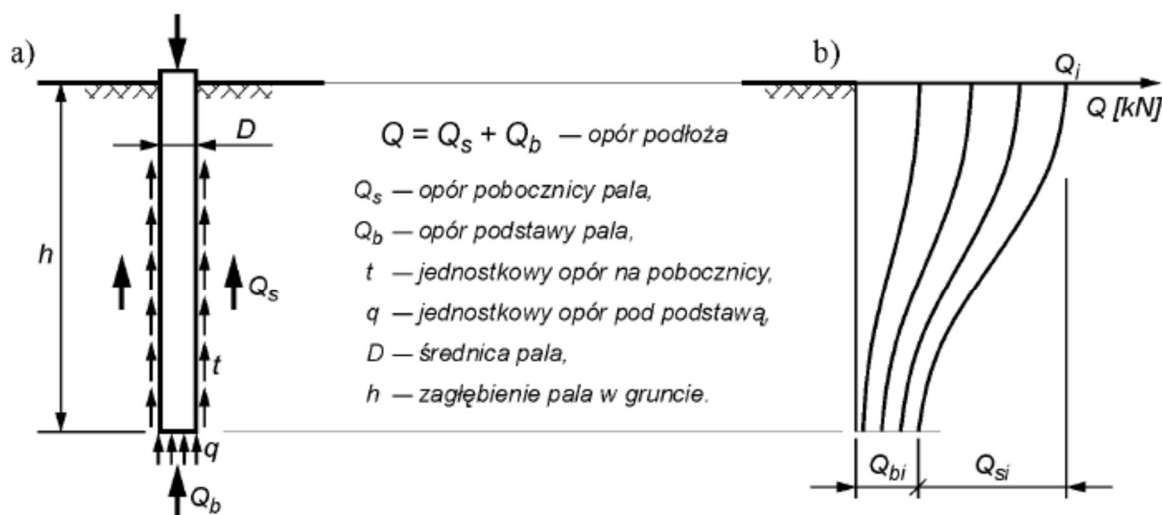


NOŚNOŚĆ PALI POJEDYNCZYCH



Rys. 1. Pal w podłożu gruntowym: a) oznaczenie podstawowe, b) rozkład oporów

Obliczenia oporów jednostkowych wykonuje się według PN-83/B-02482 „Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych” oraz „Komentarza do normy PN-83/B-02482, autorstwa M. Kosseckiego (PZliTB, Szczecin 1985).

Warunek nośności dla pali obciążonych osiowo:

$$Q_r \leq m \times N$$

N – obliczeniowa nośność pala (N_t – pal wciskany; N^w – pal wciągany)

$$N_t = N_s + N_p$$

$$N_s = \sum S_i t_i^{(r)} A_{si} \quad N_p = S_p q^{(r)} A_p;$$

$$N^w = \sum S_i^w t_i^{(r)} A_{si}$$

N_p – opór podstawy pala [kN],

N_s – opór poboczniczy pala wciskanego [kN],

A_p – pole przekroju poprzecznego podstawy pala [m²],

A_{si} – pole poboczniczy pala zagłębionego w gruncie w obrębie warstwy i [m²],

$q^{(r)}$ – jednostkowa, obliczeniowa wytrzymałość gruntu pod podstawą pala, $q^{(r)} = \gamma_m \cdot q$

$t_i^{(r)}$ – jednostkowa, obliczeniowa wytrzymałość gruntu wzdłuż poboczniczy pala, w obrębie warstwy i , $t_i^{(r)} = \gamma_m \cdot t_i$

Według Eurokodu 7 warunek stanu granicznego nośności pała na wciskanie jest następujący:

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}$$

$F_{c;d}$ - obliczeniowe osiowe obciążenie pała wciskanego

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

gdzie:

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

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

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

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

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

$$R_{b;k} = A_p \times q_{b;k} \quad \text{oraz} \quad R_{s;k} = \sum_i A_{s,i} \cdot q_{s,i;k}$$

gdzie:

$q_{b;k}$ i $q_{s,i;k}$ – charakterystyczne wartości oporu podstawy i pobocznic w kolejnych warstwach, wyznaczonymi na podstawie wartości parametrów gruntu.

W Eurokodzie 7 brak wskazówek jak powinno się obliczać opory jednostkowe na podstawie danych z badań gruntu – są odesłania do przepisów krajowych.

Sposoby obliczania w krajach europejskich różnią się w zależności od doświadczeń krajowych.

Wartości oporów podstawy ($q_{b;k}$) i pobocznic ($q_{s,i;k}$) według EN 1997-1 nie są równoznaczne z oporami q i t_i w normie PN-B-02482. Do praktycznego stosowania EC 7-1 niezbędne jest uzupełnienie go znowelizowaną normą pałową.

Nie należy posługiwać się bezpośrednio oporami z „normy pałowej”! Opory jednostkowe z normy pałowej PN-B-02482 są zredukowane z uwzględnieniem bezpiecznego poziomu ufności przyjętego w metodyce wyznaczania wartości granicznych w starych normach!

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

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

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

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

Opory jednostkowe według normy PN-83/B-02482:

Dla pali żelbetowych wykonanych w gruncie pod osłoną rury obsadowej, jako A_p przyjmuje się pole odpowiadające zewnętrznej średnicy tej rury.

W przypadku pali Franki można uwzględnić poszerzenie podstaw pali, przyjmując zamiast A_p jako pole przekroju poprzecznego wartość $1,75 A_p$ dla podstawy formowanej w gruncie niespoistym, $1,5 A_p$ w gruncie spoistym. W przypadku pali Vibro można przyjmować $1,10 A_p$, lecz tylko dla gruntów niespoistych. W przypadku pali z poszerzoną podstawą należy wg PN-83/B-02482 przyjmować do obliczania pola przekroju A_p średnicę zastępczą $0,9 D_r$, gdzie D_r odpowiada średnicy poszerzonego otworu.

Wyznaczanie wartości q (graniczny opór jednostkowy pod podstawą pala)

Wytrzymałość obliczeniowa gruntu pod podstawą pala. Wartość jednostkowej wytrzymałości gruntu pod podstawą q wyznacza się wg tablicy 1, w zależności od rodzaju gruntu oraz stopnia jego zagęszczenia I_D lub stopnia plastyczności I_L .

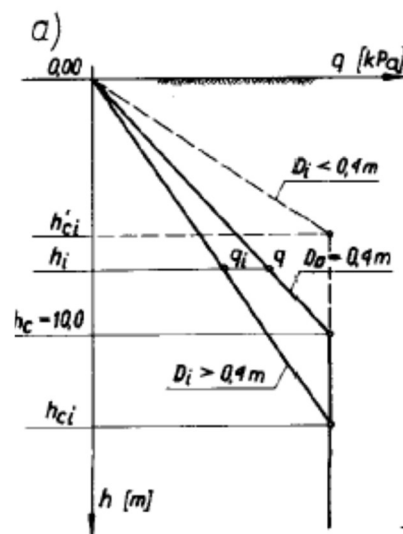
Dla gruntów bardzo spoistych i zwięzło spoistych można przyjmować do obliczeń:

$$q = 9s_u = 9c_u$$

gdzie:

c_u – wytrzymałość gruntu przy ścinaniu (bez konsolidacji i odsączenia wody z próbki) mierzona „in situ” sondą krzyżakową lub określona na próbkach nienaruszonych w aparacie trójosiowego ściskania.

Zależność q od głębokości i średnicy pala. Wytrzymałość gruntu pod podstawą pala q (tablica 1) przyjęto dla głębokości krytycznej $h_c = 10,0$ m i większej, mierzac od poziomu terenu oraz dla średnicy $D_0 = 0,4$ m. Dla głębokości mniejszych niż h_c



należy wartość q wyznaczyć przez interpolację liniową, przyjmując wartość zero w pierwotnym poziomie terenu.

Tablica 1 Wartości charakterystyczne jednostkowego granicznego oporu gruntu pod podstawą pała q [kPa]

Nazwa gruntu	Stopień zagęszczenia			
	$I_D = 1,00$	$I_D = 0,67$	$I_D = 0,33$	$I_D = 0,20$
Żwir, pospółka	7750	5100	3000	1950
Piasek gruby i średni	5850	3600	2150	1450
Piasek drobny	4100	2700	1650	1050
Piasek pylasty	3350	2100	1150	700
	Stopień plastyczności			
	$I_L < 0, \omega = 0$	$I_L = 0, \omega = \omega_p$	$I_L = 0,50$	$I_L = 0,75$
Żwir gliniasty, pospółka gliniasta	4150	2750	1650	850
Piasek gliniasty, glina piaszcz., glina, glina pylasta	2750	1950	850	450
Gлина piaszcz. zwięzła, glina zwięzła, glina pylasta zwięzła, il piaszcz., il, il pylasty	2800	1950	800	400
Pył piaszczysty, pył	1850	1250	500	250

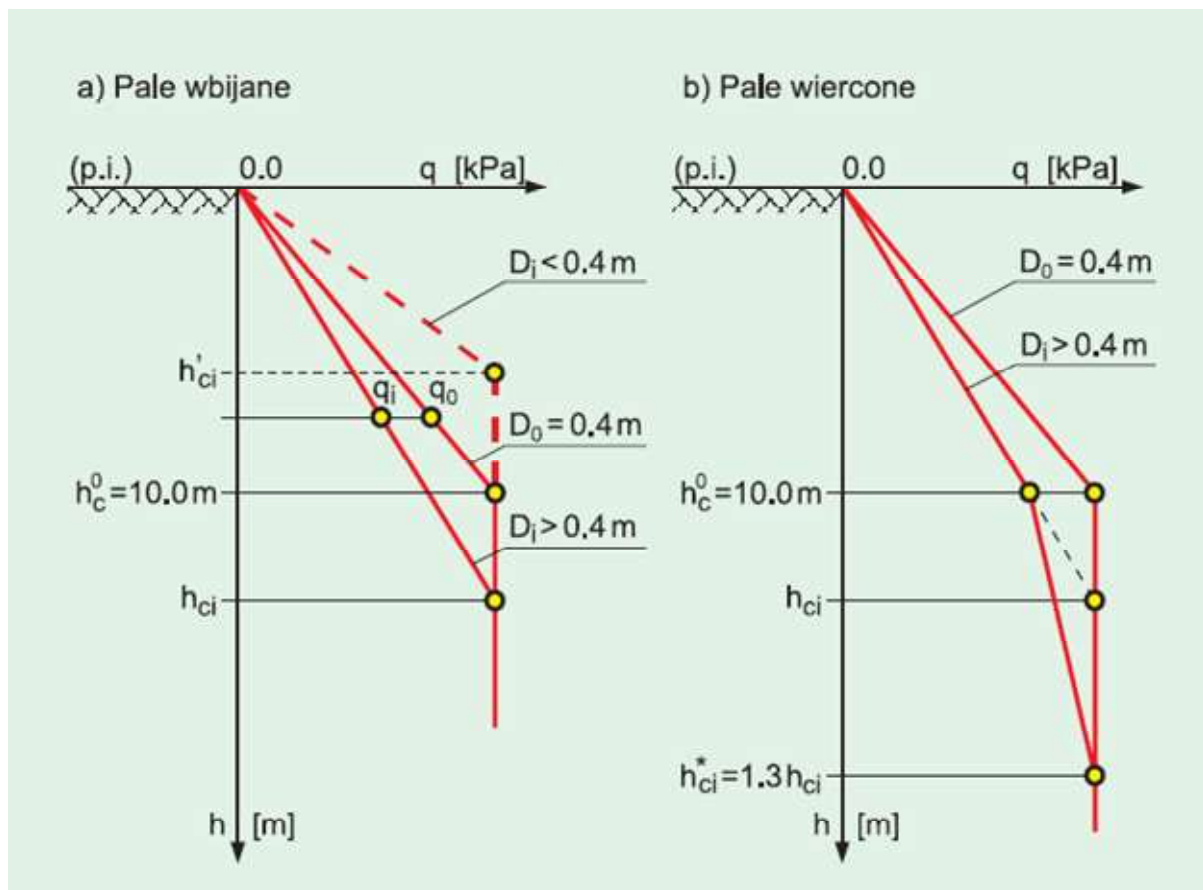
W gruntach niespoistych średnio zagęszczonych i zagęszczonych należy uwzględnić wpływ średnicy podstawy pała na h_c wg:

$$h_{ci} = h_c \sqrt{\frac{D_i}{D_0}}$$

Dla pali typu Franki i Vibro w tym przypadku należy przyjmować średnicę trzonu pała. Wartości q_i oblicza się zgodnie z rys. 1a.

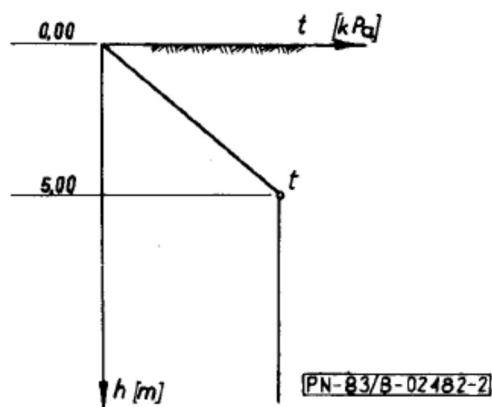
Dla pali wierconych o $D > 0,4$ m (grunt niespoisty $I_D > 0,33$), głębokość krytyczną określoną zgodnie ze wzorem należy zwiększyć o 30% ($h_{ci}^* = 1,3 h_{ci}$), zgodnie z rys. 1b.

Dla pozostałych gruntów (wymienionych w tablicy 1) wartości q nie zależą od średnicy pała i po przekroczeniu głębokości krytycznej $h_c = 10,0$ m przyjmują wartości stałe niezależnie od głębokości.



Rys. 2. Interpolacja jednostkowego oporu granicznego pod podstawą pala q (grunty niespoiste)
(www.pg.gda.pl/~tbrzo)

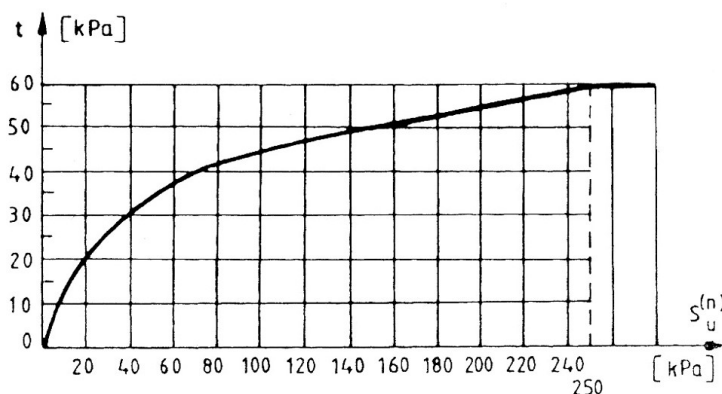
Wyznaczanie wartości t (graniczny opór jednostkowy wzdłuż pobocznicy)



Rys. 3 Interpolacja jednostkowego oporu granicznego na pobocznicy pala t

Wartość jednostkowej wytrzymałości gruntu wzdłuż pobocznicy t wyznacza się na podstawie wytrzymałości granicznej t przyjmowanej wg tablicy 2 zależnie od rodzaju gruntu oraz stopnia jego zagęszczenia I_D lub stopnia plastyczności I_L .

Dla gruntów bardzo spoistych i zwięzło spoistych można przyjmować do obliczeń wartości t zależnie od wytrzymałości gruntu przy ścinaniu, bez konsolidacji i odsączania wody z próbki s_u wg rys. 4.



Rys. 4 Zależność wytrzymałości gruntu wzdłuż pobocznicy t od wytrzymałości gruntu przy ścinaniu S_u

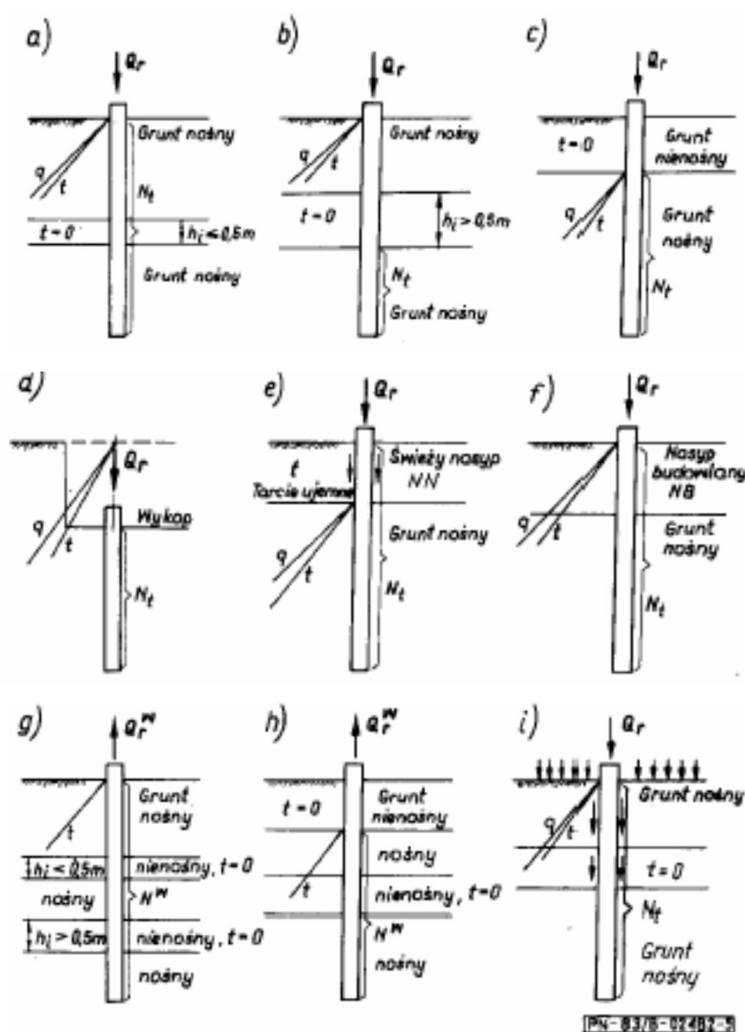
Tablica 2 Wartości charakterystyczne jednostkowego granicznego oporu gruntu wzdłuż pobocznicy pala t [kPa]

Nazwa gruntu	Stopień zagęszczenia			
	$I_D = 1,00$	$I_D = 0,67$	$I_D = 0,33$	$I_D = 0,20$
Żwir, pospółka	165	110	74	59
Piasek gruby i średni	132	74	47	34
Piasek drobny	100	62	31	22
Piasek pylasty	75	45	25	16
	Stopień plastyczności			
	$I_L < 0, \omega \leq \omega_s$	$I_L = 0, \omega = \omega_p$	$I_L = 0,50$	$I_L = 0,75$
Żwir gliniasty, pospółka gliniasta	134	95	67	44
Piasek gliniasty, glina piaszcz., glina, glina pylasta	95	50	31	14
Gлина piaszcz. zwięzła, glina zwięzła, glina pylasta zwięzła, il piaszcz., il, il pylasty	95	50	25	11
Pył piaszczysty, pył	65	30	16	7
Namuły	48	18	0	0

Wartości t podane w tablicy 2 należy przyjmować dla głębokości 5 m i większej, mierząc od poziomu terenu lub wyznaczonego uprzedni poziomu interpolacji. Na głębokościach mniejszych niż 5 m wartości t należy wyznaczać przez interpolację między wartościami z tablicy 2 a wartością zero przyjmowaną dla poziomu interpolacji. Wartości t należy przyjmować bez względu na średnicę pala.

Wartości q i t w szczególnych warunkach gruntowych

W gruntach spoistych w stanie miękkoplastycznym o $I_L > 0,75$ oraz w torfach i namulach wartości q i t (przy tarcu pozytywnym) należy przyjmować równe zero. Wyjątek stanowią namuły w stanie zwartym i półzartym w odniesieniu do wartości t . W przypadku przewarstwienia ośrodka gruntowego, w którym jest zagłębiony pał, warstwą lub warstwami gruntu o miąższości większej niż 0,5 m, dla których $t = 0$, przy obliczaniu nośności pała znak sumy we wzorze na nośność obejmuje wartości iloczynów $t_i^{(n)} A_{si}$ odpowiadające jedynie warstwom leżącym pod najniższą warstwą gruntów nienośnych (rys. 5-a,b). Dla takich przypadków wartości q i t należy interpolować od pierwotnego poziomu terenu.



Rys. 5. Interpolacja jednostkowych oporów granicznych pod podstawą (q) oraz na pobocznicy pała (t) dla gruntów uwarstwionych (PN-83/B-024820)

W przypadku występowania gruntów nienośnych od powierzchni terenu lub w postaci przewarstwień ($h_i > 0,5$ m) oraz gdy warstwy te wywołują tarcie negatywne (ujemne) gruntu (rys. 4-c,e,i) wartości q i t można interpolować liniowo od obliczeniowego poziomu terenu, leżącego w poziomie stropu warstwy nośnej.

Tarcie negatywne (ujemne) gruntu.

W obliczaniu nośności pala należy uwzględnić możliwość wystąpienia tarcia negatywnego wywołanego osiadaniem gruntu względem trzonu pala, zmniejszającego całkowitą jego nośność.

Może ono wystąpić w następujących przypadkach:

1. Pal jest wprowadzony w warstwy nośne przez warstwy gruntów nieskonsolidowanych lub luźno usypanych (np. torfy, namuły, grunty spoiste o $I_L > 0,75$, grunty niespoiste o $I_D < 0,2$ i świeże nasypy), które ulegają osiadaniom pod wpływem własnego ciężaru (rys. 5c).
2. Przewidywane jest dodatkowe obciążenie naziomu (rys. 5i) względnie odwodnienie gruntu zalegającego wokół pala.

W pierwszym przypadku należy w drugim członie wzoru na nośność wyrażającym opór poboczniczy przyjmować dla osiadających warstw gruntu ujemną wartość $t^{(r)}$ wg tabl. 5.

W drugim przypadku, gdy dodatkowemu osiadaniu mogą ulec warstwy gruntu rodzimego mało ściśliwego, wartości tarcia ujemnego w tych warstwach należy przyjmować wg tablicy 2, dla odpowiedniego rodzaju gruntu, wstawiając je do wzoru ze znakiem ujemnym; γ_m należy przyjmować $\geq 1,1$ określone na podstawie dokumentacji geotechnicznej dla I_D lub I_L .

Tak samo należy postępować w odniesieniu do warstwy gruntu, która może osiąść pod wpływem odkształceń niżej leżących warstw ściśliwych.

Tablica 3 Wartości tarcia negatywnego

Lp.	Rodzaj gruntu	Tarcie ujemne $t^{(r)}$ [kPa]
1	Świeże nasypy i piasek ($I_D \leq 0,2$)	5÷10
2	Piasek pylasty ($I_D \leq 0,2$), pył piaszczysty ($I_L \geq 0,75$)	10
3	Piasek gliniasty, glina piaszczysta ($I_L \geq 0,75$)	5÷10
4	Torf, namuł	5÷10

Przykład obliczeniowy.

Wyznaczyć maksymalną siłę obliczeniową, jaką można obciążyć pal w fundamencie składającym się z 4 pali.

Dane: pal żelbetowy, prefabrykowany, wbijany o przekroju kwadratowym 450×450 mm i długości 14 m. Powierzchnia terenu wokół pala może być obciążona (należy uwzględnić tarcie negatywne).

Przelot [m]	Rodzaj gruntu	Parametry warstw geotechnicznych				
		γ [kN/m ³]	Stan gruntu	γ' [kN/m ³]	ϕ'	c' [kPa]
0.0 – -3.00	Gp	18.5	$I_L = 0,45$	11.2	11	10
-3.0 – -7.5	Torf	10.0	-	3.5	15	5
-7.5 – -25.0	Pd	17.0	$I_D = 0,65$	9.5	32	-

ZWG = -2,5 m ppt (zwierciadło wody gruntowej)

Warunek stanu granicznego nośności pala na wciskanie:

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}$$

Obliczeniowa wartość nośności pala wciskanego:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = \frac{R_{c;k}}{1,1}$$

Charakterystyczna wartość nośności pala wciskanego może być wyznaczana ze wzoru:

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

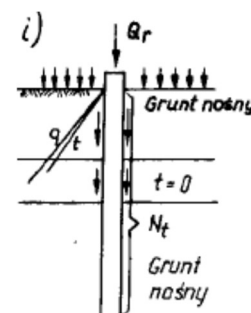
Gdy obliczenia opieramy na jednym profilu geotechnicznym $\xi_3 = \xi_4 = 1,4$

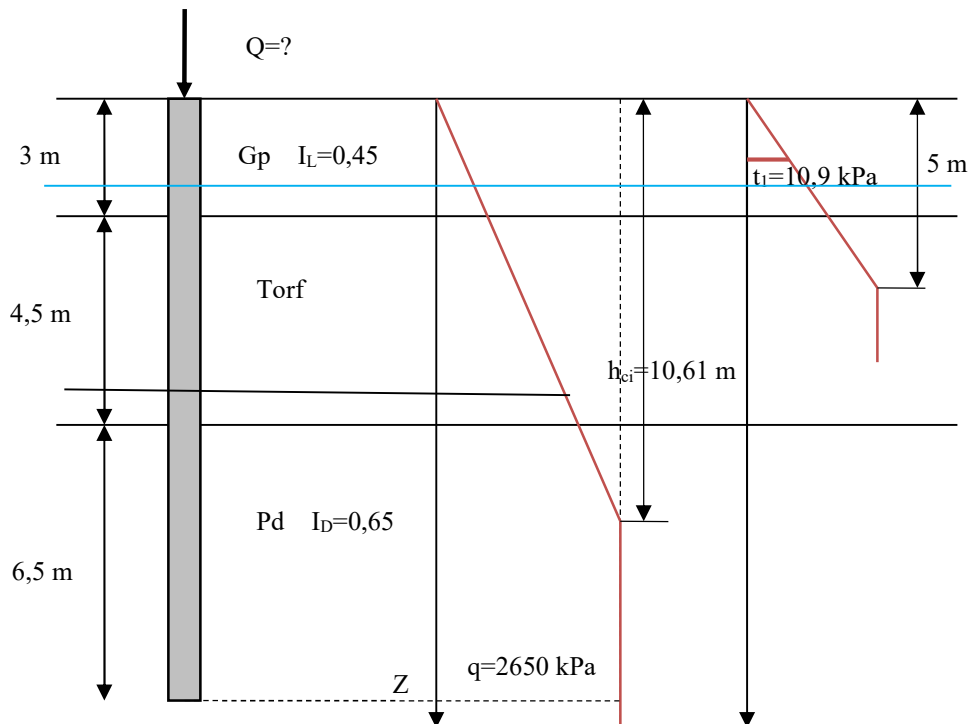
$$R_{b;cal} = A_b \times q_b = A_b \times 1,25 \times S_p \times q$$

$$R_{s;cal} = \sum_i A_{s;i} \cdot q_{s;i} = 1,25 \sum_i A_{s;i} \cdot S_{si} \cdot t_i$$

q, t – opory jednostkowe obliczane według PN-83/B-024820

Poziom interpolacji dla wyznaczenia q i t przyjmuje się zgodnie ze schematem i) rys. 5 PN-83/B-024820, czyli w poziomie terenu.





Wyznaczenie oporu podstawy pala q oraz nośności podstawy

Pale zakończono w warstwie piasków drobnych: $Pd, I_D = 0,65$;

według tablicy 1 PN-83/B-024820: $q = 2650 \text{ kPa}$ (na głębokości krytycznej $h_c = 10 \text{ m}$ i dla średnicy podstawy $D_0 = 0,4 \text{ m}$)

$$\text{Dla } D_i = 0,45 \text{ m} \rightarrow h_{ci} = 10 \sqrt{\frac{0,45}{0,4}} = 10,61 \text{ m}$$

Podstawa pala znajduje się poniżej głębokości krytycznej ($h = 14 \text{ m} < h_{ci}$), więc na poziomie podstaw pali: $q = 2650 \text{ kPa}$

Nośność podstawy według PN-83/B-02482:

$$N_P = S_P \times q^{(r)} \times A_P$$

Nośność podstawy według EC7:

$$R_{b,cal} = A_b \times q_{b,k}$$

gdzie:

$q_{b,k}$ – charakterystyczna wartość oporu jednostkowego podstawy

Przyjmujemy:

$$q_{b,k} = 1,25 \times S_p \times q^{(n)} = 1,25 \times 1,1 \times 2650 = 3644 \text{ kPa}$$

$$R_{b,cal} = A_b \times q_{b,k} = ?$$

Wyznaczenie oporów pobocznic pła t oraz nośności pobocznic z uwzględnieniem tarcia negatywnego

Warstwa I: $G_p, I_L = 0,45; h_1 = 3,0$ m

Tarcie negatywne

dla $I_L = 0,00 \rightarrow t = - 50$ kPa

dla $I_L = 0,50 \rightarrow t = - 31$ kPa

dla $I_L = 0,45 \rightarrow t = - [50 - (50-31) \times 0,45/0,50] = - 33$ kPa (na głębokości 5 m, licząc od poziomu terenu)

Nas interesuje średni opór w obrębie warstwy I, czyli opór w połowie warstwy, tzn. na głębokości $z = 0,5 \times 3,0 = 1,5$ m $\Rightarrow t_1 = 33 \times 1,5/5 = -9,9$ kPa

Warstwa II: $T, h_2 = 4,50$ m

Tarcie negatywne

$t_2 = - 10,0$ kPa (wartość odczytana z tablicy 3 PN-83/B-024820)

Warstwa III: $P_d, I_D = 0,65; h_3 = 6,5$ m

dla $I_D = 0,67 \rightarrow t = 62$ kPa

dla $I_D = 0,33 \rightarrow t = 31$ kPa

dla $I_D = 0,65 \rightarrow t = 62 - (62-31) \times (0,67-0,65)/(0,67-0,33) = 60,2$ kPa (na głębokości 5 m, licząc od poziomu terenu)

$t_3 = 60,2$ kPa dla całej warstwy ponieważ warstwa III zalega poniżej 5 m od poziomu interpolacji oporu t .

Nośność pobocznic według PN-83/B-02482:

$$N_S = \Sigma [S_{Si} \times t^{(r)}_i \times A_{Si}] = S_{S1} \times t^{(r)}_1 \times A_{S1} + S_{S2} \times t^{(r)}_2 \times A_{S2} + S_{S3} \times t^{(r)}_3 \times A_{S3}$$

Nośność pobocznic według EC7:

$$R_{s;k} = \sum_i A_{s;i} \cdot q_{s;i;k}$$

$$q_{s,k,i} = 1.25 \times S_{si} \times t_i$$

$$R_{s;cal} = 1.25 \sum_i A_{s;i} \cdot S_{si} \cdot t_i$$

$$R_{s;cal} = 1.25 \times 4 \times 0.45 \times [S_{S1} \times t_1 \times h_1 + S_{S2} \times t_2 \times h_2 + S_{S3} \times t_3 \times h_3]$$

$$R_{s;cal} = 1.25 \times 4 \times 0.45 \times [S_{S1} \times t_1 \times h_1 + S_{S2} \times t_2 \times h_2 + S_{S3} \times t_3 \times h_3] = ?$$

Całkowita nośność na wciskanie na podstawie metody analitycznej:

$$R_{c;cal} = R_{b;cal} + R_{s;cal} = ?$$

Charakterystyczna wartość nośności pała wciskanego może być wyznaczana ze wzoru:

$$R_{c;k} = \frac{R_{b;cal} + R_{s;cal}}{\xi} = \frac{R_{c;cal}}{\xi} =$$

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = \frac{1}{1,1}$$

$$R_{c;d} = ?$$

Warunek nośności dla pała pojedynczego:

$$F_{c;d} \leq ?$$

Dla porównania warunek nośności dla pała pojedynczego na podstawie obliczeń

$$PN-83/B-02482: Q_r \leq 0,9 \times 1103,0 = 992,7 \text{ kN}$$