

Analiza posadowienia słupa powłokowego linii elektroenergetycznej na palach Vibro z wykorzystaniem programu SOFiStiK 3D

Mgr inż. Magdalena Piotrowska, dr inż. Paweł Więclawski
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

W 1930 roku zbudowano pierwszą w Polsce napowietrzną linię elektroenergetyczną o napięciu 60 kV. Po II wojnie światowej nastąpił intensywny rozwój sieci elektroenergetycznych. Dziś trudno sobie wyobrazić życie bez elektryczności. Rosnące zapotrzebowanie powoduje, że dostawcy energii starają się dotrzeć w coraz to odleglejsze miejsca i pokonywać coraz większe odległości pomiędzy słupami. Jako konstrukcję wsporczą do podwieszenia linii wysokiego napięcia obecnie stosuje się słupy: strunobetonowe, żelbetowe, kratownicowe stalowe, rurowe stalowe, rurowe kompozytowe. O doborze konstrukcji słupa de-

cyduje wiele czynników, między innymi pełniona funkcja, wymagane napięcie linii, rozpiętość przęsła i rodzaj terenu.

W Polsce najczęściej stosowanymi konstrukcjami wsporczy mi napowietrznych linii energetycznych wysokiego napięcia są stalowe słupy kratownicowe. W ostatnich latach coraz większe zainteresowanie zyskują stalowe słupy powłokowe. Dzieje się tak ze względu na zalety stali, między innymi możliwość dokładnego kontrolowania cech wytrzymałościowych, dowolne kształtowanie przekroju oraz mniejszy ciężar. Smukła sylwetka słupów powłokowych i stosunkowo nieduża powierzchnia podstawy ułatwia uzyskanie pozwoleń na wybudowanie konstrukcji w miejscach zurbanizowanych, wkomponowuje się w krajobraz, jak również zmniejsza koszt związany z zakupem terenu pod zabudowę. Na rys. 1. przedstawiono przykład słupa powłokowego zlokalizowanego przy ul. Sienna Grobla w Gdańsku. W niniejszym artykule przedstawiono przykład obliczenia posadowienia na palach stalowego słupa linii elektroenergetycznej w złożonych warunkach gruntowo-wodnych Żuław Wiślanych.

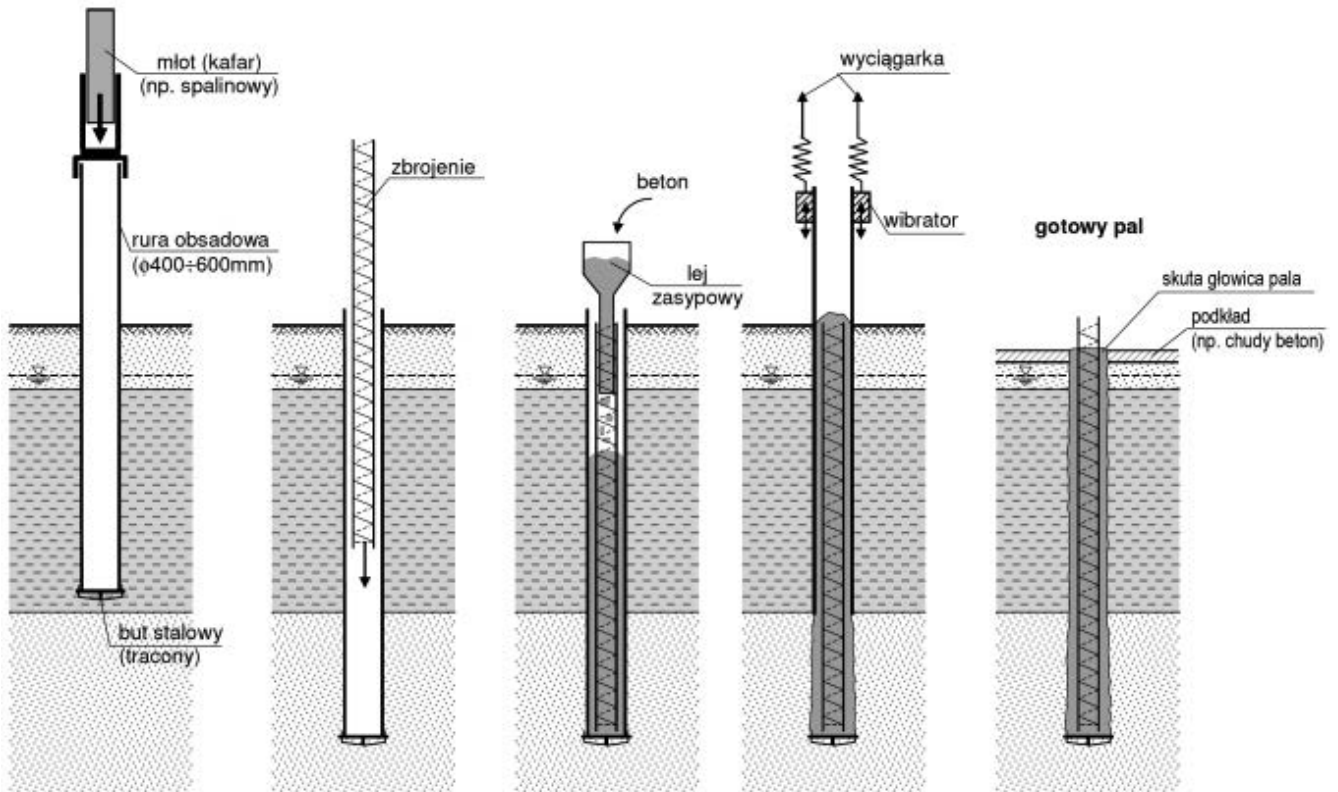
W zależności od przyjętego rodzaju konstrukcji, jej wielkości oraz od warunków gruntowo-wodnych, w których ma być posadowiona linia energetyczna, należy zastosować odpowiedni fundament. Najłatwiejszy jest fundament bezpośredni. W przypadku dobrych warunków gruntowych i słupów o dużych gabarytach stosuje się stopy grzybkowo-schodkowe. Gdy warunki gruntowe nie pozwalają na zastosowanie fundamentów bezpośrednich, należy wykorzystać fundamente pośrednie, na przykład płytowe na palach.

WYKONANIE FUNDAMENTU PŁYTOWEGO NA PALACH

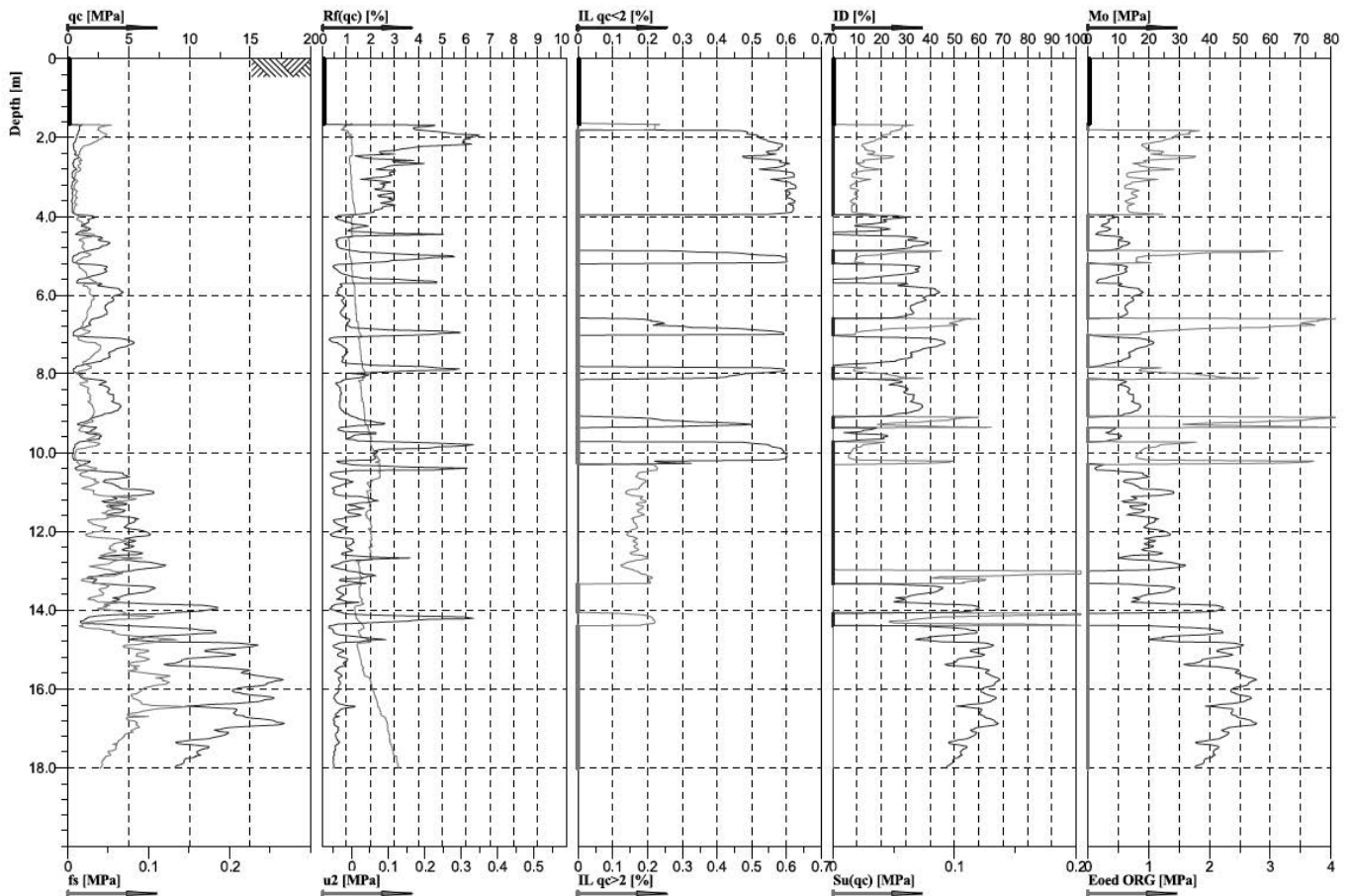
W przypadku omawianego przykładu założono wykonanie fundamentu posadowionego na palach typu Vibro, które są palami przemieszczeniowymi. Wykonuje się je poprzez wbicie w grunt stalowej rury z uszczelnioną podstawą. Następnie w suchy otwór wprowadza się kosz zbrojeniowy i wypełnia rurę betonem. Za pomocą wyciągarki z wibratorem wyciąga się rurę, dzięki czemu następuje zagęszczenie betonu oraz poprawia się współpraca pala z gruntem. Schemat wykonania pala Vibro przedstawiono na rys. 2. Po wykonaniu pali możliwe jest szalowanie i betonowanie płyty fundamentowej.



Rys. 1. Stalowy słup powłokowy przy ul. Sienna Grobla w Gdańsku
[materiały własne]



Rys. 2. Etapy wykonywania pali Vibro [1]



Rys. 3. Wyniki badań CPTu_102

WARUNKI GRUNTOWO-WODNE MIEJSCA LOKALIZACJI SŁUPA

Dane geotechniczne podłoża gruntowego do obliczeń określono na podstawie wyników badań sondą statyczną CPTU przedstawionych na rys. 3. Badania wykonano na obszarze Żuław Wiślanych w Elblągu w rejonie skrzyżowania ulicy Żuławskiej z drogą krajową nr 7. Poziom zwierciadła wód gruntowych występuje stosunkowo płytko. Ze względu na liczne depresje teren narażony jest na zalewanie. W obliczeniach przyjęto, że poziom wody znajduje się w poziomie posadowienia.

OGÓLNE ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ FUNDAMENTU SŁUPA

Przeanalizowano słup wysokiego napięcia 110 kVa. Lokalizacja w terenie zabudowanym i złożone warunki gruntowe zdecydowały o przyjęciu konstrukcji stalowego słupa powłokowego (Valmont – Słup dwutorowy seria SRV2 typ P1+10 [9]) posadowionego na fundamencie płytowym na palach. Jako metodę stawiania słupa wybrano metodę wysokościową. Zaprojektowano pale typu Vibro o średnicy 508/560 mm. Układ składa się z 16 pali o długości 16,0 m rozmieszczonych po okręgu, w którym co drugi pal jest nachylony w stosunku 5:1. Stanowi to podporę pod fundament płytowy o średnicy 13,64 m. Grubość fundamentu jest zmienna i wynosi od 0,85 m do 2,12 m, a w miejscu cokołu do montowania stopy słupa powłokowego 2,77 m. Na rys. 4. przedstawiono model fundamentu słupa wykonany w programie SOFiSTiK 3D.

Założenia przyjęte w obliczeniach przewodów linii energetycznej i konstrukcji wsporczej [4]:

- Jako sytuacją wyjściową w przypadku analizy równań stanów przyjęto oddziaływanie ciężaru własnego przewodów w temperaturze $T_0 = +10^\circ\text{C}$.
- Siła naciągu od przewodów elektrycznych obliczono dla 16 przypadków układów obciążeń.
- W celu określenia oddziaływań wiatru na konstrukcję słupa podzielono ją na 9 segmentów. Wartości ciśnienia prędkości wiatru, prędkości średniej wiatru oraz współczynnik intensywności turbulencji uzależniono od wysokości nad poziomem terenu.

- Zgodnie z [8] oddziaływanie wiatru rozpatrzono dla kierunku prostopadłego, równoległego i pod kątem 45° do lin.
- Symetria ustroju słupa pozwoliła na zmniejszenie liczby sytuacji obliczeniowych. Z 8 kierunków działania wiatru pozostawiono 3 (prostopadły, równoległy i jeden pod kątem 45°).
- Założono jednakową rozpiętość i spad przęsła po obu stronach słupa.

Parametry linii wysokiego napięcia określono na podstawie karty katalogowej firmy Valmont [9], producenta stalowych słupów powłokowych.

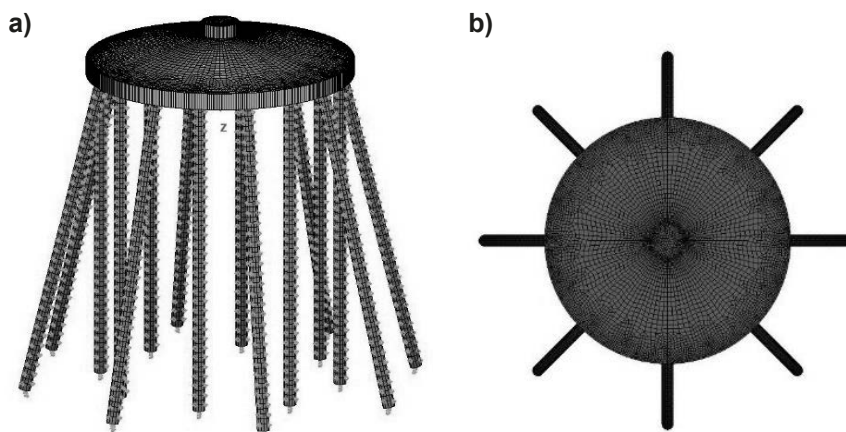
Analizowane przypadki układów oddziaływań na przewody:

- P_0 – ciężar własny przewodu w temperaturze $T = +10^\circ\text{C}$,
- P_1 – temperatura $+10^\circ\text{C}$ + wiatr maksymalny,
- P_{2a} – ciężar własny + ekstremalne oblodzenie + temperatura $T = -5^\circ\text{C}$,
- P_{3a} – ciężar własny + ekstremalne oblodzenie + wiatr bardzo prawdopodobny + temperatura $T = -5^\circ\text{C}$,
- P_{3b} – ciężar własny + nominalne oblodzenie + wiatr mało prawdopodobny + temperatura $T = -5^\circ\text{C}$,
- P_4 – ciężar własny + temperatura $T = -25^\circ\text{C}$ bez wiatru i oblodzenia,
- P_{2b}^m – ciężar własny + oblodzenie zredukowane + temperatura $T = -5^\circ\text{C}$,
- P_{2c}^m, P_{2d}^m – ciężar własny + oblodzenie zredukowane + temperatura $T = -5^\circ\text{C}$,
- P_{2c}^w, P_{2d}^w – ciężar własny + oblodzenie zredukowane + temperatura $T = -5^\circ\text{C}$,
- P_{5a} – ciężar własny + oblodzenie charakterystyczne zredukowane + temperatura $T = -5^\circ\text{C}$.

Wpływ wiatru w przypadkach P_1 , P_{3a} i P_{3b} przeanalizowano dla trzech różnych kierunków: prostopadłym, równoległym i pod kątem 45° do linii.

Do obliczenia sił naciągu określono równania stanów dla wartości obliczeniowych obciążeń.

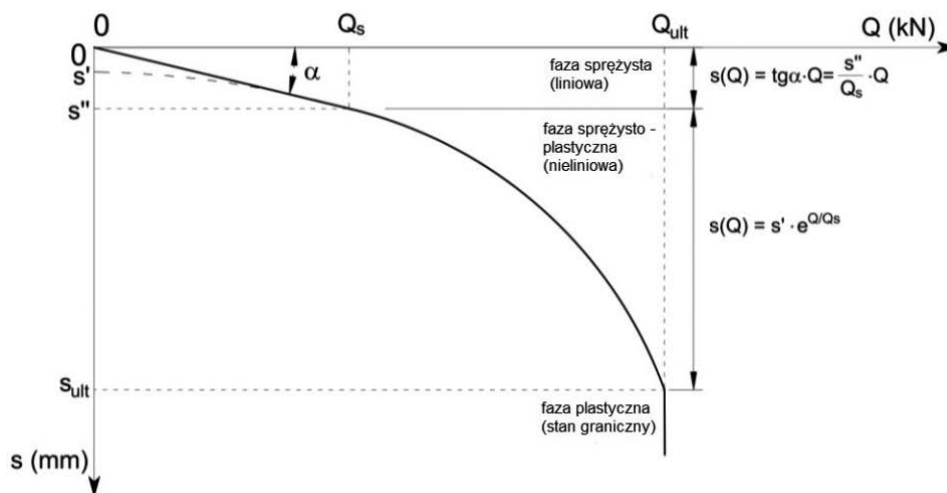
Obciążenia przyłożone do konstrukcji słupa to obciążenia ciężarem własnym, obciążenie wiatrem, oblodzenie, reakcje z przewodów: obciążenia eksploatacyjne oraz wyjątkowe – wynikające z zerwania się przewodu.



Rys. 4. Model fundamentu podpory a) widok ogólny b) widok z góry

Tabl. 1. Zestawienie wartości obliczeniowych sił działających na fundament

Numer	Kombinacja	PX [kN]	PY [kN]	PZ [kN]	MX [kNm]	MY [kNm]	MZ [kNm]
Stan technologiczny	SGN+	314,1	0	-450,1	0	-11965	0
	SGN-	-314,1	0	-450,1	0	11965	0
Układ podstawowy	SGN+	-638	0	-501,8	0	24391,97	0
	SGN-	0	-283,8	-416,3	-7891,45	0	0
Układ wyjątkowy	SGN+	-283,8	0	-416,3	0	7891,45	0
	SGN-	76,4	0	-534,3	-38,76	-2871,89	320,03



Rys. 5. Charakterystyka współpracy pala z podłożem gruntowym [6]

W celu określenia ekstremalnych sił działających na podstawę słupa w modelu obliczeniowym wykonano kombinacje oddziaływań mogących występować jednocześnie. Zgodnie z tabelicą 4.12.2/PL.2 z załącznika krajowego [8] przeanalizowano 19 kombinacji obliczeniowych uwzględniających stan technologiczny, stan podstawowy i stan wyjątkowy.

W stanie technologicznym rozpatrzono montaż przewodów w średniej temperaturze powietrza występującej w Polsce $T = +10^{\circ}\text{C}$. W stanie podstawowym przeanalizowano 14 kombinacji, uwzględniając działanie wiatru w różnych kierunkach i w czasie występowania mrozu. W 5 kombinacjach również sprawdzono siły działające na fundament w przypadku awarii, to jest zerwania jednego lub kilku przewodów linii energetycznej.

W tabl. 1 zestawiono główne wartości otrzymanych sił obliczeniowych działających na fundament wykorzystanych do kontroli warunków SGN.

NOŚNOŚĆ PALI VIBRO

Nośność pala obliczono metodą Więclawskiego [6] wykorzystującą wyniki badania CPT. Metodę tę opracowano na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych wyłącznie dla pali Vibro. Zakłada ona uśrednienie oporów wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala. Na rys. 5 pokazano charakterystykę współpracy pala z gruntem według [6]. Określone korelacje dotyczą

pali, których podstawa znajduje się w gruntach niespoistych, piaskach drobnych i średnich.

Obliczenia prowadzono są na podstawie zależności empirycznych, a ich celem jest ustalenie krzywej obciążenie – osiadanie (Q - s) i wyznaczenia oporu granicznego.

Tabl. 2. Wartości liczbowe punktów krzywej Q - s

Faza sprężysta		Faza sprężysto-plastyczna	
Q [kN]	s [mm]	Q [kN]	s [mm]
0	0	(0)	(1,35)
1122	3,67	1122	3,67
		2100	8,77
		2500	12,52
		2900	17,88
		3300	25,54
		3500	30,52
		3700	36,48
		3800	39,88
		4071	50,80

Poniżej przedstawiono proces wyznaczania wykresu Q - s i nośności pala według tej metody.

Nośność graniczną przyjęto przy osiadaniach pala zgodnie z EC7 [7] równych $0,1D$. Parametry fazy sprężystej i sprężysto-plastycznej współpracy pala z ośrodkiem gruntowym mają:

- Faza sprężysta

$$s(Q) = \tan \alpha \cdot Q = \frac{s''}{Q_s} \cdot Q$$

gdzie:

$\tan \alpha$ – współczynnik kierunkowy funkcji liniowej w zakresie sprężystej współpracy pal – grunt,

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

s'' – wartość osiadania pala w punkcie przejścia krzywej Q - s z fazy sprężystej w fazę sprężysto-plastyczną [mm],

Q_s – wartość przyłożonego obciążenia wywołująca osiadania „ s'' ”, obciążenie rozpoczynające fazę sprężysto-plastyczną [kN].

- Faza sprężysto-plastyczna

$$s(Q) = s' \cdot e^{Q/Q_s}$$

gdzie:

s' – punkt początkowy funkcji wykładniczej dla $Q = 0$ kN [mm],

e – liczba Eulera [-].

- Podatność ośrodka gruntowego w fazie sprężystej współpracy pal – grunt

$$\frac{s''}{Q_s} = 2D \left\{ 0,022 \left[\frac{(q_{cp} + q_{cs})L}{2L_{gn}} \right]^{-0,5} \right\}$$

gdzie:

q_{cs} – wartość średnia oporów stożka sondy CPT w gruncie wzdłuż poboczniczy pala [MPa],

q_{cp} – wartość średnia oporów stożka sondy CPT w gruncie pod podstawą pala [MPa],

D – średnica trzonu pala,

L – długość całkowita pala [m],

L_{gn} – zagłębienie pala w gruncie nośnym [m].

Na podstawie korelacji między parametrami krzywej Q - s otrzymano:

- Punkt początkowy funkcji wykładniczej (dla $Q = 0$ kN) dla piasków drobnych:

$$s' = 0,67 \cdot e^{223,47 \cdot \frac{s''}{Q_s}} = 1,35 \text{ mm}$$

- Wartość osiadań pala w punkcie przejścia krzywej Q - s z fazy sprężystej w fazę sprężysto-plastyczną:

$$s'' = e \cdot s' = 3,67 \text{ mm}$$

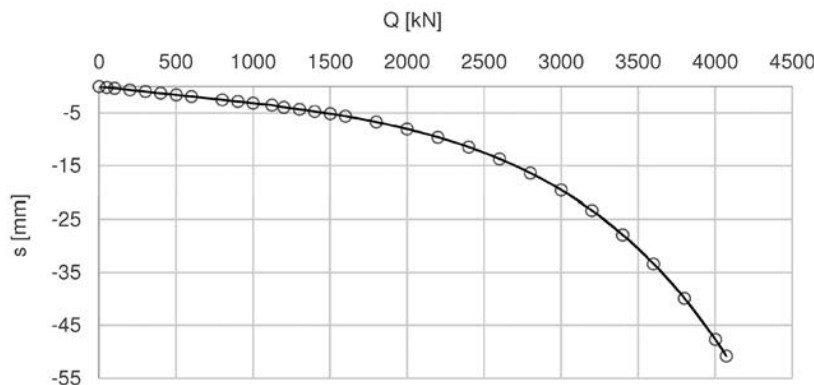
- Dla danych zadania: $D = 0,508$ m; $L = 16,0$ m; $L_{gn} = 3,5$ m otrzymano podatność ośrodka gruntowego w fazie sprężystej:

$$\frac{s''}{Q_s} = 0,00313 \text{ mm/kN}$$

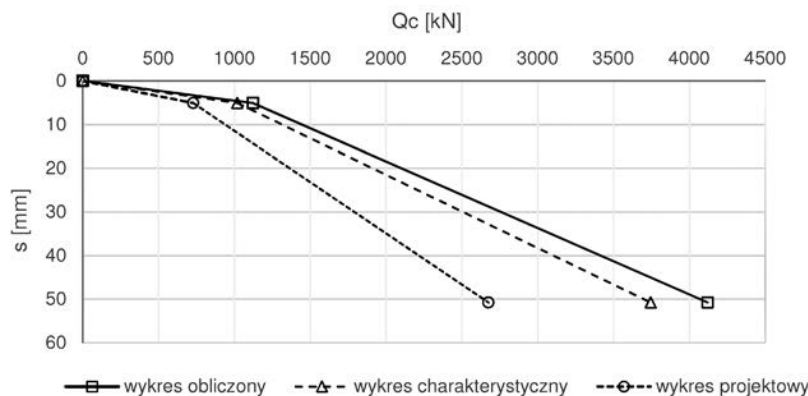
Na podstawie obliczeń dla fazy sprężystej i sprężysto-plastycznej wyznaczono wykres krzywej zależności Q - s , który przedstawiono na rys. 6. Wartości liczbowe punktów krzywej podano w tabl. 2.

Nośność graniczną wyznaczoną na podstawie parametrów podłoża według metody Więclawskiego (odpowiadająca przemieszczeniu pala $s = 0,1D$):

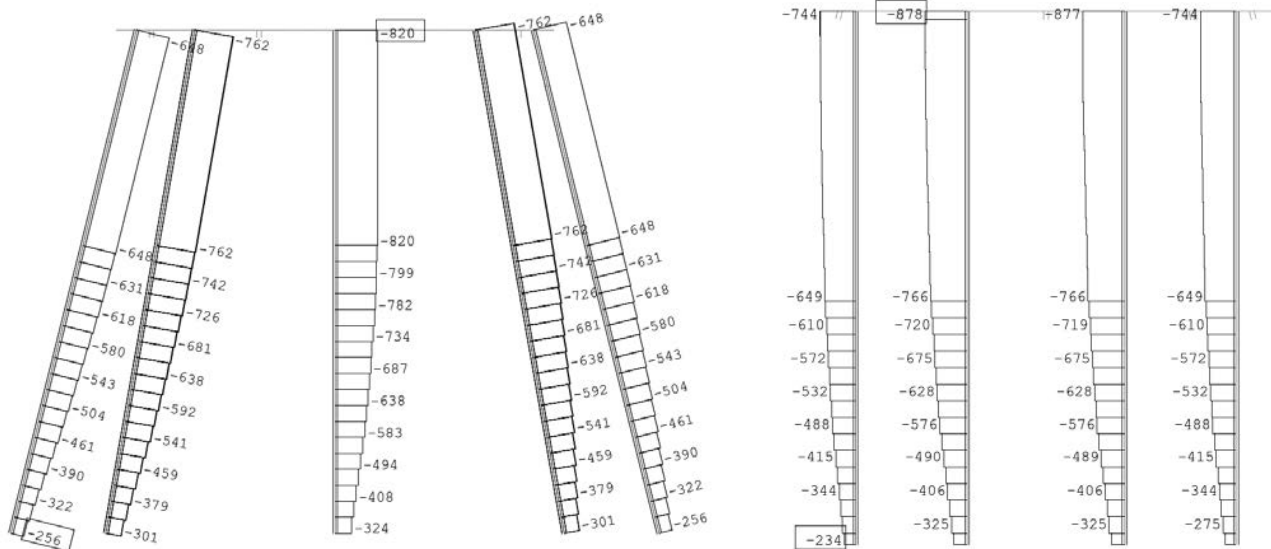
$$Q_{gr,calc} = 4071 \text{ kN}$$



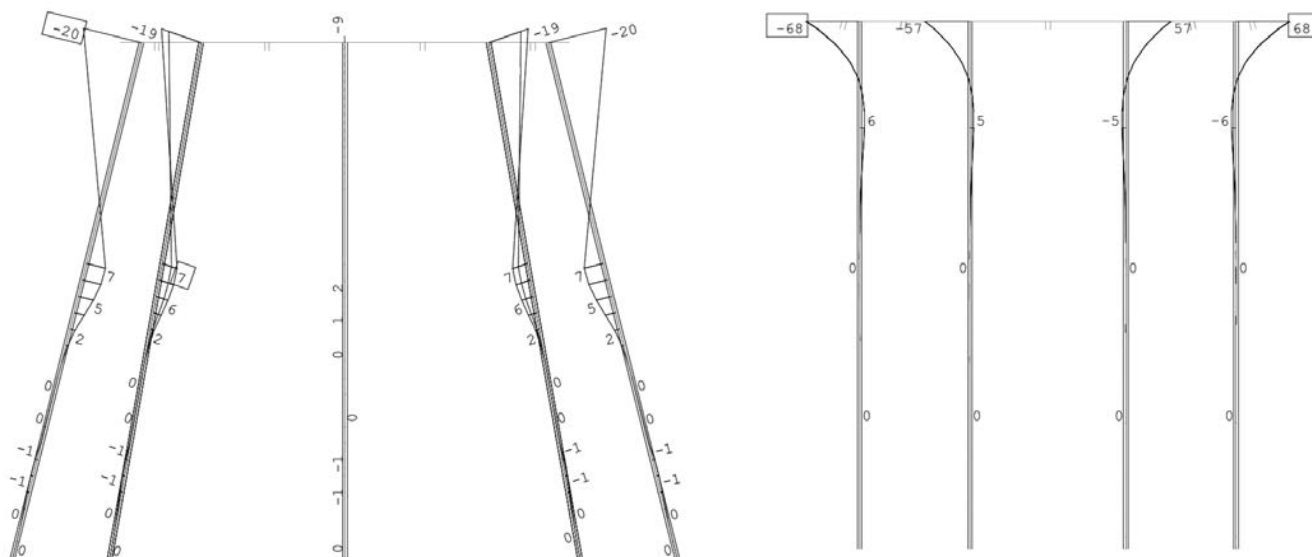
Rys. 6. Krzywa Q - s wyznaczona według metody Więclawskiego



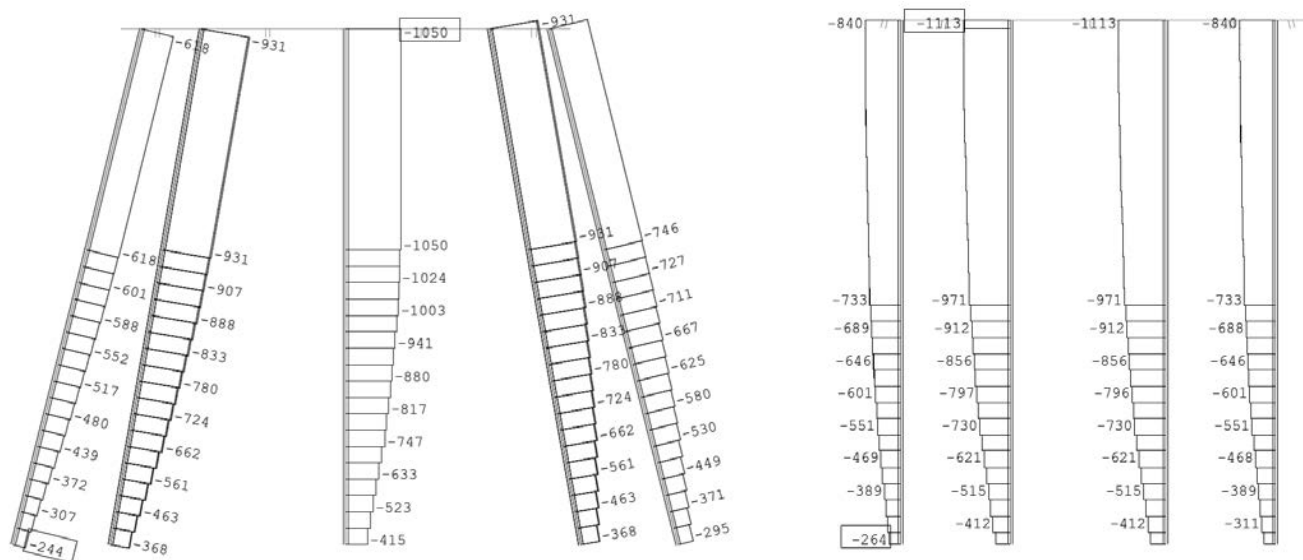
Rys. 7. Charakterystyki uproszczone Q - s pala pojedynczego dla wartości charakterystycznych i projektowych



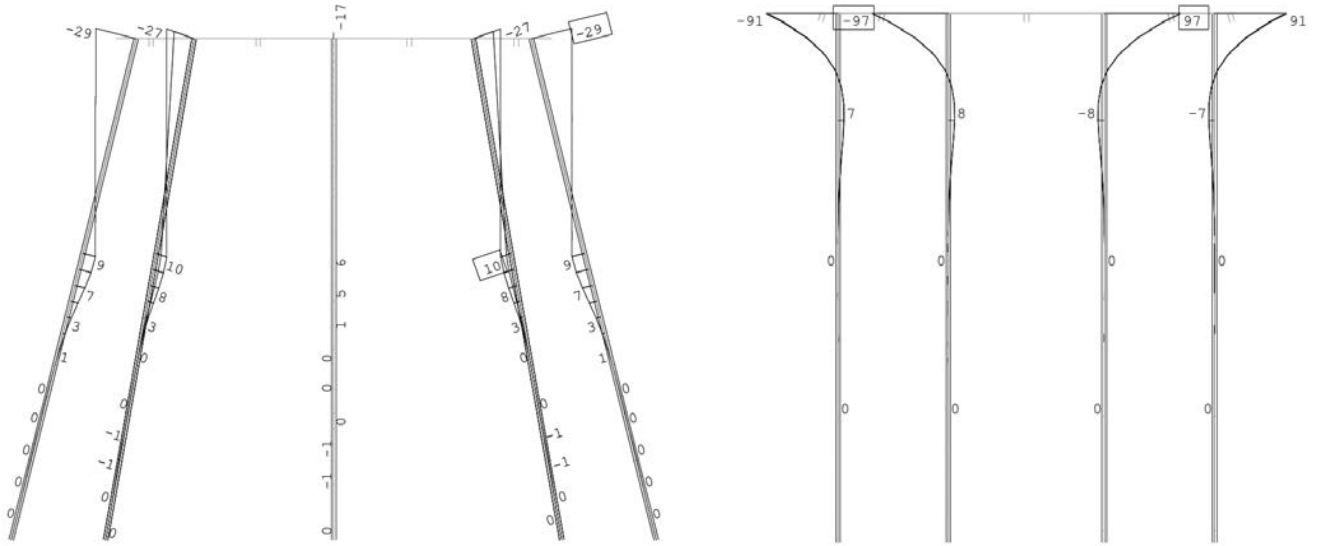
Rys. 8. Siły normalne w palach – stan technologiczny [kN]; wartości ujemne – siły wiskające



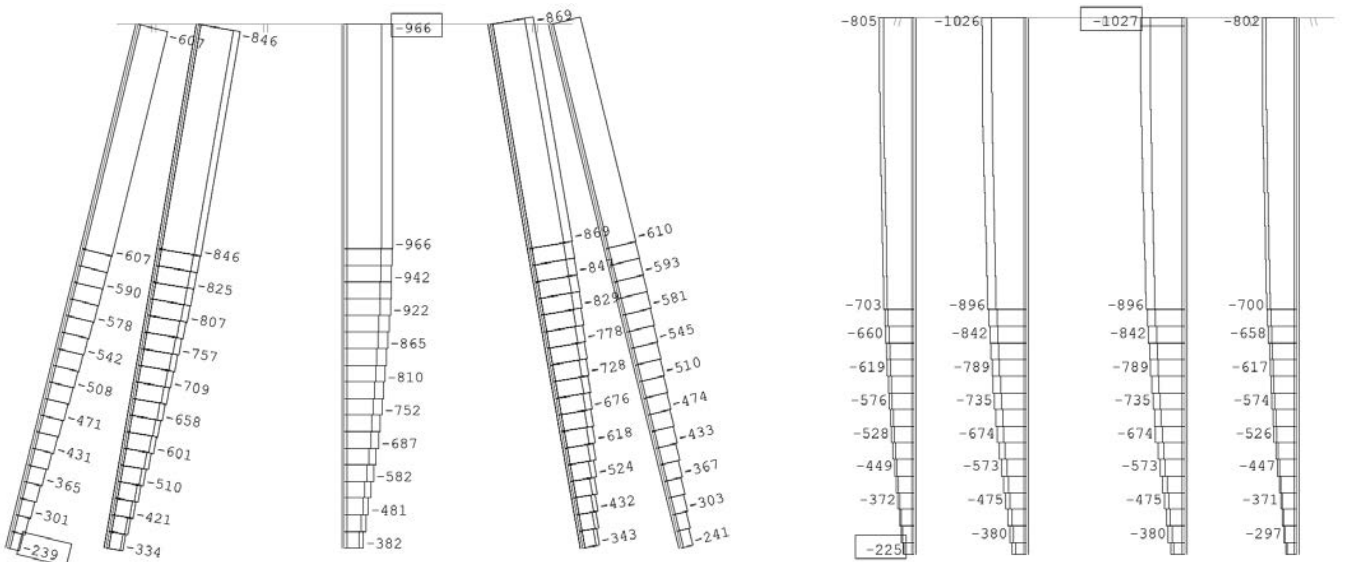
Rys. 9. Momenty M_y w palach – stan technologiczny [kNm]



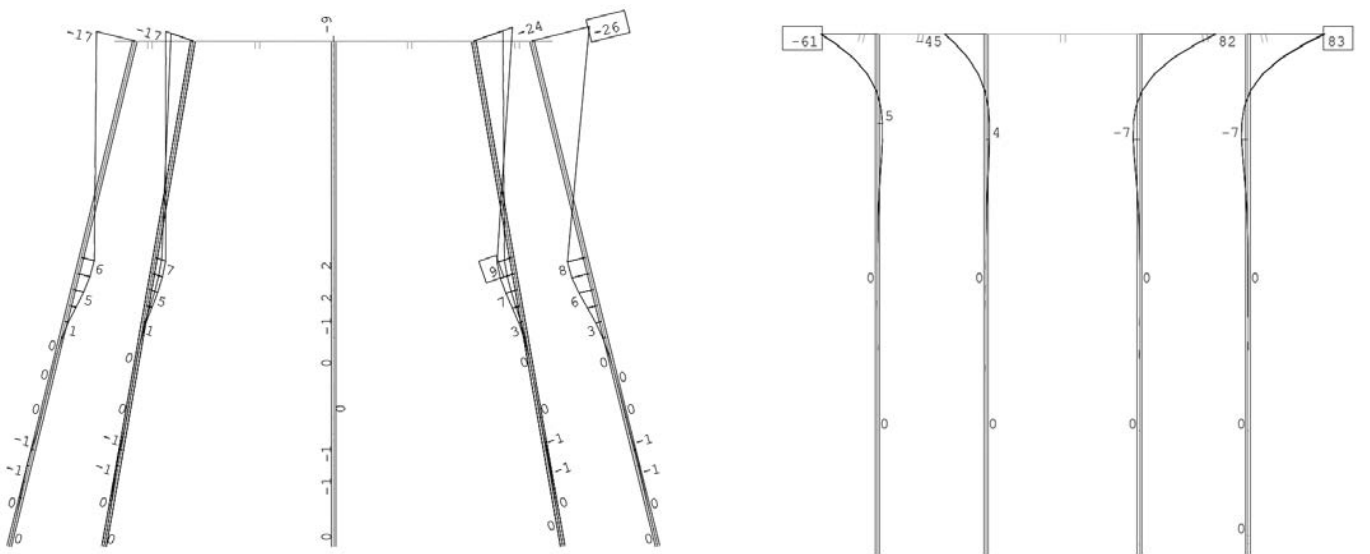
Rys. 10. Siły normalne w palach – układ podstawowy [kN]; wartości ujemne – siły wiskające



Rys. 11. Momenty M_y w palach – układ podstawowy [kNm]



Rys. 12 Siły normalne w palach – układ wyjątkowy [kN]; wartości ujemne – siły wciskające



Rys. 13. Momenty M_y w palach – układ wyjątkowy [kN]

Nośność obliczeniową według PN-EN 1997-1:2008:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_f} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \min \left\{ \frac{Q_{gr,calc}}{\xi_3}; \frac{Q_{gr,calc}}{\xi_4} \right\} = 2643,51 \text{ kN}$$

Przyjęte współczynniki:

$$\gamma_f = 1,1 [-]; \xi_3 = \xi_4 = 1,4 [-]$$

Szywność podłoża pod podstawą pala uwzględniono w modelu obliczeniowym poprzez zastosowanie podłużnych podpór sprężystych. Na podstawie krzywej $Q-s$ wyznaczono uproszczoną (biliniową) krzywą, według propozycji [3], przedstawioną na rys. 7.

Do wyznaczenia szywności poprzecznej podpory sprężystej wykorzystano metodę uogólnioną według [2].

OBLICZENIA SIŁ WEWNĘTRZNYCH W PALACH

Do obliczeń sił normalnych, poprzecznych oraz momentów zginających w palach przygotowano model 3D fundamentu w programie Sofistik. Model ten przedstawiono na rys. 4. Podparcie pali zamodelowano w postaci podpór sprężystych: biliniowych podłużnych oraz liniowych poziomych (poprzecznych).

Ekstremalne wartości sił wewnętrznych w przypadku rozpatrywanych kombinacji obciążeń podano w tabl. 3. Na rys. 8 ÷ 13 przedstawiono wykresy dla ekstremalnych wartości sił normalnych i momentów zginających w analizowanych kombinacjach.

Tabl. 3. Ekstremalne wartości sił wewnętrznych w palach

	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
Stan technologiczny	-877,7	-87,8	-61,1	-68,5	-78,5
Układ podstawowy	-1113,0	-132,9	-84,0	-96,5	-110,8
Układ wyjątkowy	-1027	-82,1	-72,8	-61,3	-73,9

Obciążenie pojedynczego pala uzyskane z programu Sofistik jest mniejsze niż nośność otrzymana z obliczeń metodą Więclawskiego.

- Siły normalne w palach ukośnych i pionowych – stan technologiczny [kN]
- Momenty M_y w palach ukośnych i palach pionowych – stan technologiczny [kNm]
- Siły normalne w palach ukośnych i pionowych – układ podstawowy [kN]
- Momenty M_y w palach ukośnych i palach pionowych – układ podstawowy [kNm]
- Siły normalne w palach ukośnych i pionowych – układ wyjątkowy [kN]
- Momenty M_y w palach ukośnych i palach pionowych – układ wyjątkowy [kNm]

PODSUMOWANIE

Przy rozwijających się nieustannie technologiach szuka się rozwiązań nie tylko uzasadnionych ekonomicznie, ale rów-

niez uwzględniających aspekty wizualne. Zaczęto budować konstrukcje smuklejsze i dodatkowo w złożonych warunkach gruntowo-wodnych. Wiąże się to z koniecznością posadowień pośrednich, między innymi na palach Vibro przedstawionych w opracowaniu bądź na palach prefabrykowanych.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych wymiarowania posadowienia pośredniego słupa linii elektroenergetycznej. Określenie pionowych podpór sprężystych pod podstawami pali metodą Więclawskiego i uproszczonych do charakterystyk $Q-s$ (biliniowych) dla pala pojedynczego pozwoliło na uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników.

Duża liczba kombinacji i złożoność oddziaływań byłyby problematyczne do uwzględnienia bez zaawansowanych obliczeń numerycznych. Wykonanie modeli w programie Sofistik pozwala na rzeczywiste odzwierciedlenie pracy słupa oraz uzyskanie dokładnych reakcji przekazywanych na fundament palowy.

W wyniku numerycznej analizy fundamentu możliwe było zaobserwowanie, jak pale przenoszą obciążenia w zależności od danego przypadku oddziaływań. W jednej kombinacji dany pal był wciskany, a w innej wyciągany.

Przy wymiarowaniu fundamentu palowego w złożonych warunkach gruntowo-wodnych wymaga się zaawansowanej analizy obliczeniowej uwzględniającej wszystkie kombinacje sił działających na konstrukcje.

LITERATURA

1. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
2. Kosecki M.: Statystyka ustrojów palowych. Zasady obliczania konstrukcji palowych metodą uogólnioną i fundamentów płytowo-palowych metodą podłoża dwuparametrowego. Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział w Szczecinie.
3. Krasiński A.: Propozycja alternatywnego podejścia do obliczania i projektowania fundamentów palowych, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5, 2015, s. 703-709.
4. Manderka Z., Szojda L., Wandzik G.: Projektowanie stalowych słupów linii elektroenergetycznych, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2017
5. Piotrowska M.: "Projekt posadowienia konstrukcji wsporczej linii energetycznej", praca magisterska, Politechnika Gdańska, 2021
6. Więclawski P.: Vibro piles performance prediction using result of CPT. Studia Geotechnica et Mechanica 43(4), 2021.
7. PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne Część 1: Zasady ogólne.
8. PN-EN 50341-2-22:2016. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22: Zbiór normatywnych warunków krajowych. Normatywne warunki krajowe dla Polski.
9. <https://www.valmont.pl> (data dostępu 12.10.2020 roku)

Niniejszy artykuł powstał na podstawie pracy magisterskiej Magdaleny Piotrowskiej pt.: „Projekt posadowienia konstrukcji wsporczej linii energetycznej” na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej pod kierunkiem dr inż. Pawła Więclawskiego [5]. W artykule wykorzystano program Sofistik udostępniony dzięki życzliwości firmy Aarsleff.