

# Metoda szacowania nośności granicznych pali Vibro na podstawie quasi-liniowych krzywych osiadania

Dr inż. Paweł Więclawski

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

W normie PN-EN:1997-1:2008 [11], zwanej dalej Euroko-dem 7 (EC7), wskazuje się na próbne obciążenia pali jako jedyny sposób do projektowania fundamentów palowych. W normie zaproponowano następujące metody:

- I. na podstawie próbnych obciążeń statycznych, których zgodność potwierdzono wcześniejszymi badaniami i następnie wykazano za pomocą obliczeń,
- II. na podstawie empirycznych lub/i analitycznych podejść obliczeniowych, których poprawność i wiarygodność potwierdzono próbnymi obciążeniami statycznymi w porównywalnych warunkach,
- III. na podstawie próbnych obciążeń dynamicznych, których poprawność i wiarygodność potwierdzono 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.

Pale badawcze należy wykonać w identyczny sposób jak pale fundamentu właściwego i powinny być one posadowio-ne w tych samych warunkach gruntowych. Wskazane jest, aby miały tę samą geometrię.

Próbne obciążenia należy przeprowadzać, gdy:

- stosujemy nowe rodzaje pali, w przypadku których brakuje porównywalnych doświadczeń,
- wykonujemy pale w odmiennych warunkach grunto-wych, w których wcześniej nie wykonywano bada-nia,
- pale będą poddane oddziaływaniu, w przypadku którego wyniki uzyskane na podstawie teorii i wcześniejszych doświadczeń nie zapewniają odpowiedniego bezpieczeń-stwa,
- obserwacje podczas wykonawstwa wskazują na zachowanie się pala odbiegające od przewidywanego.

Rozmieszczenie badań powinno być reprezentatywne dla całego fundamentu, a jego usytuowanie w miejscu, gdzie spodzie-wane są najmniej korzystne warunki geotechniczne.

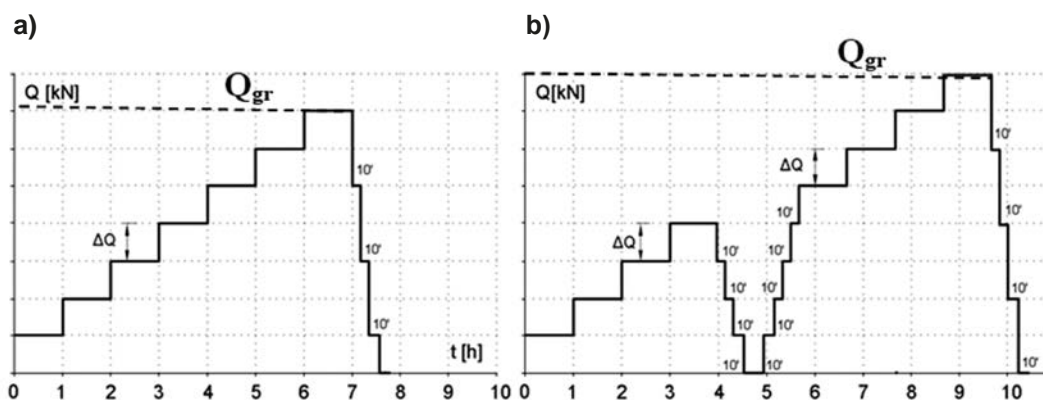
Podstawowym wymogiem, według EC7, jest, aby próbne obciążenie statyczne umożliwiło interpretacje wyników w przy-padku odkształceń, pełzania i odprężenia fundamentu palowego [1, 11]. Badanie należy przeprowadzać tak długo, aż pozwoli ono określić nośność graniczną pala.

Nośność graniczna jest definiowana jako obciążenie powo-dujące osiadania równe 10% średnicy pala. Jest to uproszczenie pozwalające na stosowanie ujednoczonych procedur i podejść obliczeniowych zawartych w EC7 do różnych metod oblicze-niowych [4, 11].

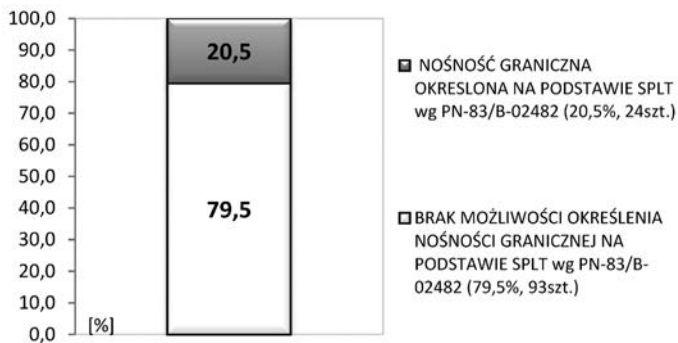
Procedura, liczby stopni i czasu trwania obciążeń pala w nor-mie PN-EN 1997-1:2008 jest zgodna z wytycznymi zawartymi w normach amerykańskich – ASTM oraz Komitetu Naukowego – ISSMFE. Wspólnym mianownikiem procedur jest możliwość określenia nośności granicznej zgodnie z definicją według EC7 [2, 11].

Najprostszą procedurą jest stopniowe obciążanie pala do wartości osiadania i nośności granicznej (rys. 1a). Inna opcja to zastosowanie obciążenia w dwóch cyklach: do wartości projek-towanej obciążenia oraz, po odciążeniu, do wartości nośności granicznej odpowiadającej osiadaniom  $0,1D$  (rys. 1b). Procedu-ra ta jest podobna do dotychczas stosowanej w Polsce. Różnica jest jednak znaczna. Wartość maksymalnego obciążenia wynosi 150% obciążenia projektowanego. Skutkuje to brakiem moż-liwości wyznaczenia nośności granicznej w przypadku wielu próbnych obciążeń statycznych.

Na podstawie analizy pali Vibro, stwierdza się, że inter-pretacja próbnego obciążenia statycznego według procedury stosowanej dotychczas w Polsce daje możliwość ekstrapolacji krzywej i określenia nośności granicznej dla 20% pali (rys. 2) [8, 9, 10].



Rys. 1. Zasady obciążeń statycznych – zalecane w PN-EN 1997-1:2008 [2, 11]



Rys. 2. Skuteczność wyznaczania nośności granicznej na podstawie próbnego obciążenia statycznego według procedury PN-83/B-02482

Pale Vibro, podobnie jak Vibrex i Franki, należą do grupy pali w pełni przemieszczeniowych formowanych w gruncie. Wyciągnięcie rury wibratorem powoduje zagęszczenie betonu oraz dobre zespolenie trzonu pala z podłożem. Zastosowanie buta zamykającego podstawę rury, o średnicy większej niż rura osłonowa, zwiększa powierzchnię podstawy pala. Pale Vibro charakteryzują się bardzo dobrą nośnością przy niewielkich osiadaniach, uzyskiwaną w krótkim czasie od wykonania. Zalecane jest krótki czas wykonania w różnych warunkach gruntowych [1].

Krzywe obciążenie-osiadanie ( $Q$ - $s$ ), otrzymane z próbnych obciążeń statycznych według polskiej normy, mają charakter quasi-liniowy (rys. 3). Takie wyniki nie pozwalają w łatwy sposób określić przebiegu krzywej  $Q$ - $s$  do wartości osiadań granicznych.

## METODY INTERPRETACJI PRÓBNEGO OBCIĄŻENIA STATYCZNEGO

Literatura fachowa obfituje w propozycje metod ekstrapolacji niepełnych krzywych  $Q$ - $s$ , które umożliwiają oszacowanie wartości granicznych osiadań i nośności pali [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Metody te w znacznej większości mają charakter uniwersalny. Nie uwzględniają takich czynników jak: sposób wykonania pali, szorstkość i sztywność trzonu pala, a jedynie ogólną tendencję przebiegu krzywej  $Q$ - $s$ .

W metodzie według PN-83/B-02482 [12] siła próbnego obciążenia przykładana jest do pala stopniowo, a jej przyrost powinien wynosić od 1/8 do 1/12 nośności pala [2, 3, 12]. Wartość przyrostu siły należy dobrać tak, aby uzyskać co najmniej 10 stopni obciążenia (rys. 4). Każdy stopień obciążenia utrzymuje się do stabilizacji przemieszczeń pala. Po osiągnięciu siły odpowiadającej nośności projektowanej i stabilizacji przemieszczeń przykładana się do badanego pala obciążenie całkowite równe  $Q_{\max} \geq 1,5Q_r$ , gdzie  $Q_r$  jest projektowaną nośnością pala na wciskanie.

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).

Jeżeli:

- $N_c^1/N_g^1 \geq 0,4$  – mamy krzywą typu „a”, przyjmuje się  $N_c^0 = N_c^1$  i  $k = 1,0$ ;
- $N_c^1/N_g^1 < 0,4$  – mamy krzywą typu „a”, przyjmuje się  $N_c^0 = Q_{maz}$  i  $k = 0,8$ ;
- brak odcinka prostoliniowego na krzywej  $dQ/ds$  – przyjmuje się  $N_c^0 = Q_{maz}$  i  $k = 0,9$ .

Nośność pala sprawdza się wzorem:

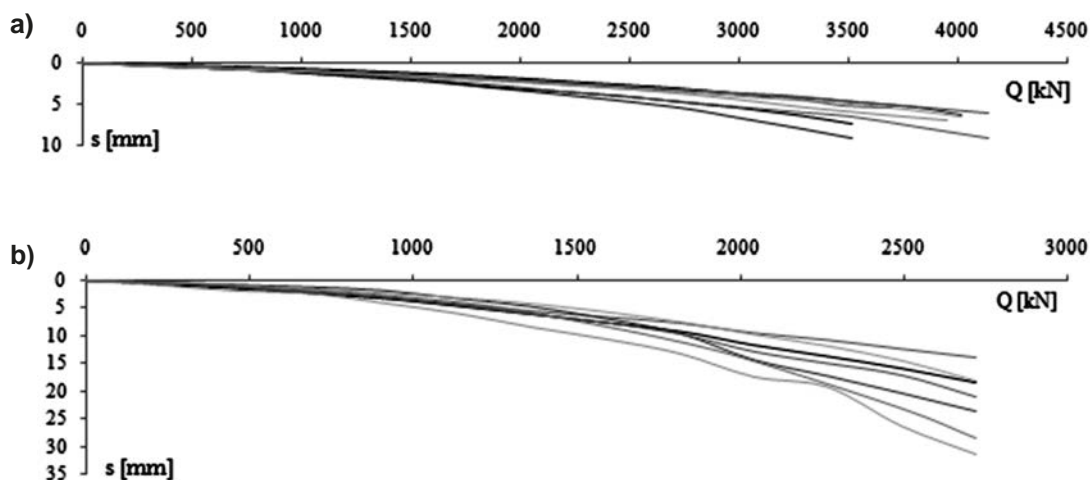
$$N = Q_r \leq kN_c^0 \quad (1)$$

a osiadania weryfikujemy zależnością:

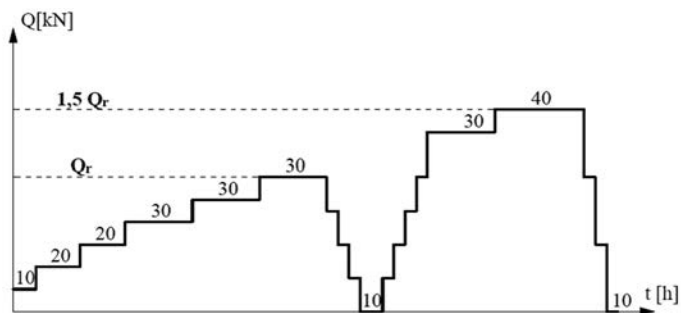
$$S(Q_r) \leq S_{dop} \quad (2)$$

Metoda 90% Brinch - Hansena (1963) definiuje punkt graniczny na krzywej  $Q$ - $s$  jako obciążenie, które powoduje przemieszczenie dwa razy większe niż przemieszczenie spowodowane przez 90% tego obciążenia (rys. 6a) [2, 5, 7].

W metodzie 80% Brinch-Hansena wymaga się badania wykraczającego poza pracę sprężystą pala. W tej metodzie obciążenie graniczne jest definiowane jako obciążenie, które powoduje 4-krotnie większe przemieszczenie 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. 6b) [2, 5, 7]. Krzywą wykreślono z zależności pomiędzy  $\sqrt{s}/Q$  i  $s$ , gdzie  $s$  to przemieszczenie, a  $Q$  – obciążenie.



Rys. 3. Krzywe  $Q$ - $s$  na podstawie próbnego obciążenia statycznego pali Vibro o średnicy: 508/560mm (a), 457/520mm (b)



Rys. 4. Zasada stopniowych obciążeń statycznych – zalecana w PN-83/B-02482 [12]

Obciążenie graniczne  $Q_f$ :

$$Q_f = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}} \quad (3)$$

Przemieszczenie graniczne:

$$s_f = \frac{C_2}{C_1} \quad (4)$$

Metoda China (1963) opiera się na założeniu, że krzywa  $Q-s$  jest w przybliżeniu hiperboliczna. Obciążenie graniczne  $Q_f$  jest zdefiniowane jako odwrotność nachylenia prostej  $Q_f = 1/C_1$  (rys. 7a) [2, 6, 7].

W metodzie Davissona (1972) [2, 5, 7] obciążenie krytyczne pala zdefiniowano jako obciążenie, które powoduje przemieszczenie równe sumie sprężystego odkształcenia pala oraz odkształcenia empirycznego zależnego od geometrii pala (rys. 7b):

$$s_f = \frac{QL}{AE} + 0.00381 \cdot B_R + \frac{1}{3,05} \cdot \frac{D}{B_R} \quad (5)$$

gdzie:

$s_f$  – przemieszczenie graniczne,  
 $Q$  – przyłożone obciążenie,  
 $L$  – długość pala,  
 $E$  – moduł Younga pala,

$A$  – pole powierzchni pala,  
 $B_R$  – długość referencyjna równa 1,0 m,  
 $D$  – średnica pala.

Obciążenie krytyczne według De Beera (1967) odpowiada punktowi maksymalnej krzywizny na krzywej  $Q-s$ . W tej metodzie krzywa  $Q-s$  jest wykreślona w podwójnej skali logarytmicznej. Obciążenie graniczne odpowiada punktowi przecięcia prostych (rys. 8a) [2, 5; 6].

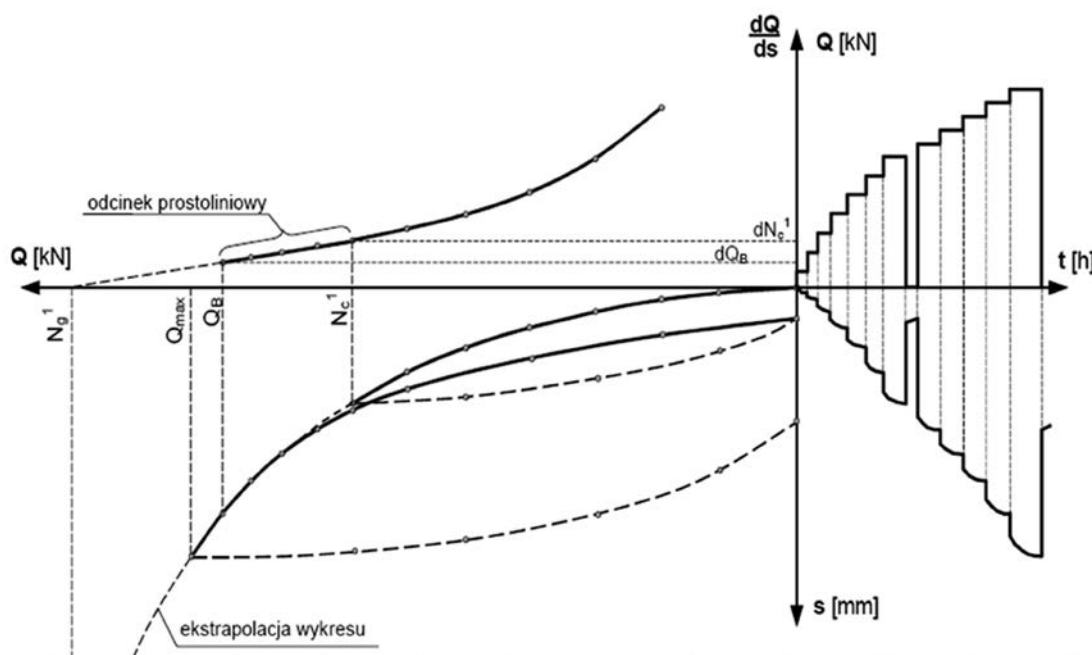
W metodzie Fullera oraz Hoya (1970) obciążenie graniczne określa się na podstawie dwóch prostych, stycznych do krzywej  $Q-s$ . Pierwsza styczna to linia sprężystego ściskania, druga styczna nachylona w stosunku 1,3 mm na 10 kN. Obciążenie graniczne jest w punkcie przecięcia drugiej stycznej z krzywą  $Q-s$  (rys. 8b). Butler i Hoy (1977) definiują obciążenia krytyczne jako punkt przecięcia dwóch stycznych (rys. 8b) [2, 6, 7].

W metodzie zmodyfikowanej hiperboli Gwizdały [2, 8] określa się parametry pomocnicze  $a_1$  i  $b_1$  (rys. 9a), wykorzystując wartości obciążenia  $Q$  i osiadania  $s$  z próbnego obciążenia statycznego. Na podstawie parametrów pomocniczych wyznacza się asymptotę  $b_f$  krzywej ogólnej (rys. 9b) z równania:

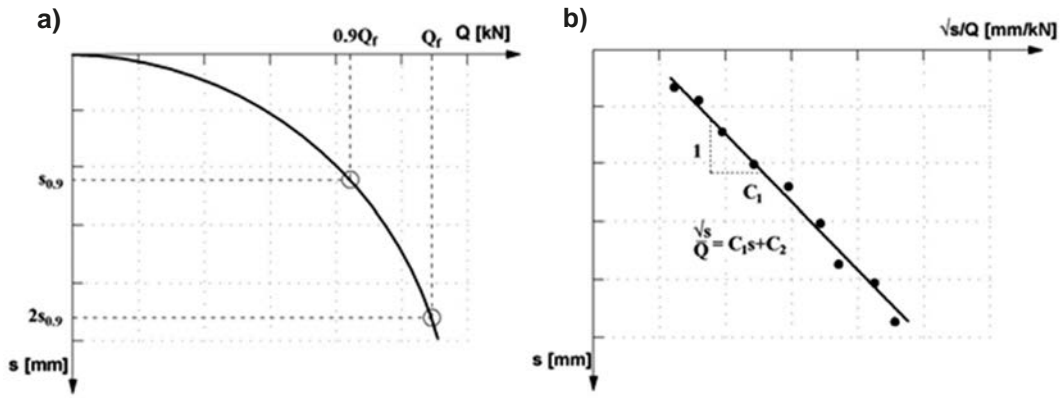
$$Q(s) = \frac{s}{a_1 + b_1 \cdot s} \quad (6)$$

## METODYKA WYZNACZANIA NOŚNOŚCI GRANICZNEJ PALI VIBRO NA PODSTAWIE KRZYWEJ Z PRÓBNEGO OBCIĄŻENIA STATYCZNEGO

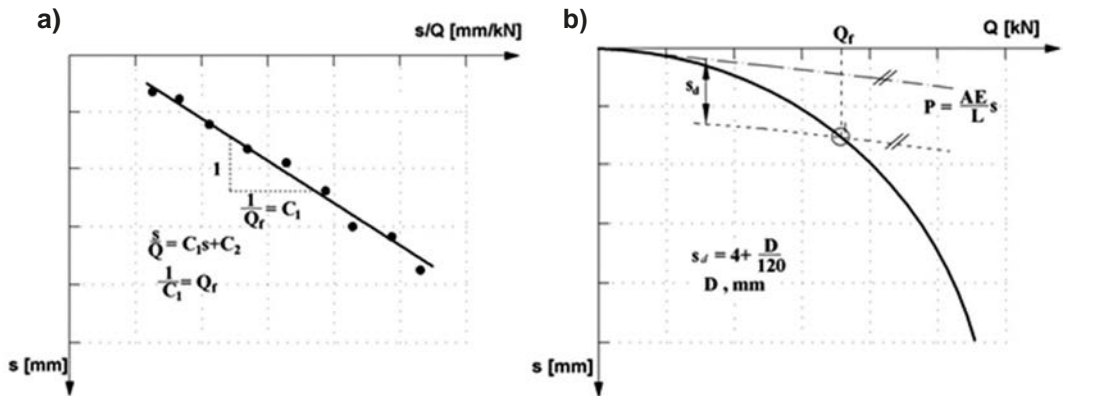
Metody ekstrapolacji stosowane do interpretacji próbnych obciążeń statycznych oparte są na założeniu, że przebieg krzywej  $Q-s$  jest zbliżony do funkcji hiperbolicznej. W przypadku analizowanych pali Vibro, quasi-liniowa zależność  $Q-s$  umożliwia przyjęcie tego założenia jako właściwe. Według proponowanego podejścia pełna krzywa  $Q-s$  ma charakter złożony. Pierwsza faza osiadania pala przebiega w sposób liniowy. Po



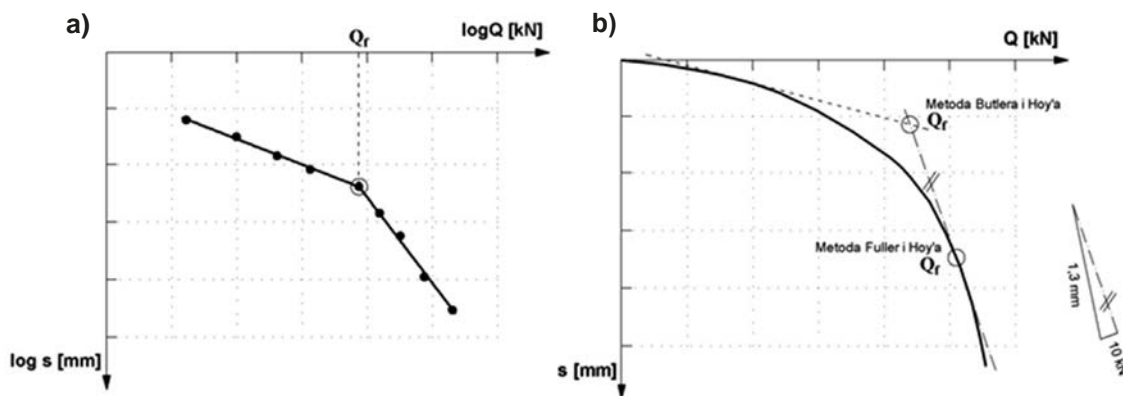
Rys. 5. Wykres zależności uzyskiwany na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego [12]



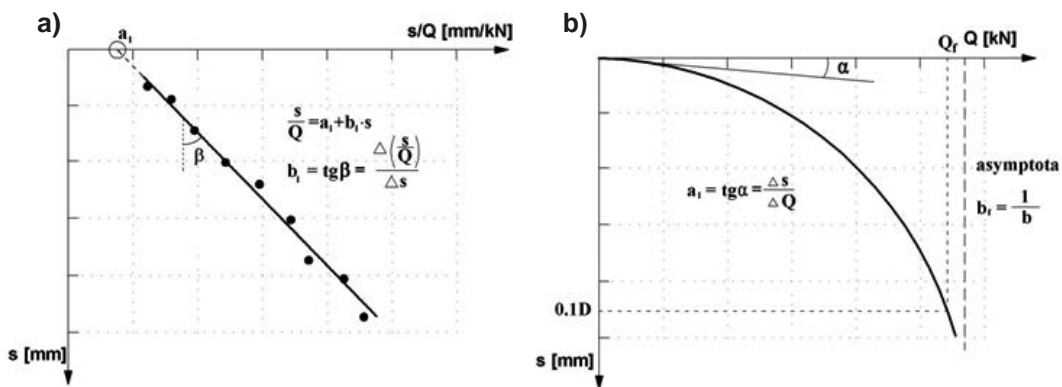
Rys. 6. Definicja obciążenia granicznego w metodzie B-H 90% (a) i w metodzie B-H 80% (b) [2, 5, 7]



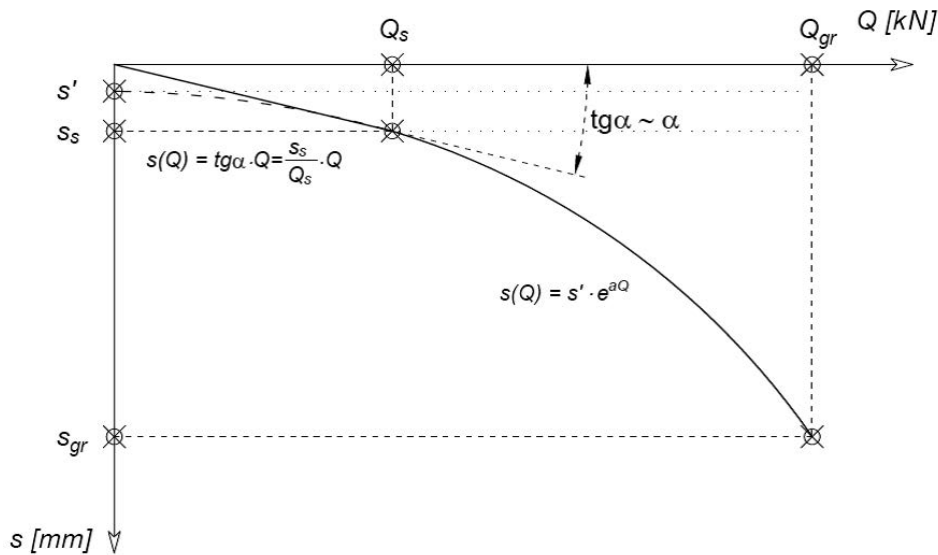
Rys. 7. Definicja obciążenia granicznego w metodzie China (a) i obciążenia krytycznego w metodzie Davissona (b) [2, 5, 7]



Rys. 8. Definicja obciążenia krytycznego w metodzie De Beer'a (a) i w metodzie Butlera, Fullera i Hoy'a (b) [2, 5, 7]



Rys. 9. Założenia do metody zmodyfikowanej hiperboli: parametry pomocnicze krzywej (a) i krzywa ogólna (b) [2]



Rys. 10. Model dwufazowej charakterystyki  $Q$ - $s$  wyznaczony dla pali Vibro [8]

przekroczeniu określonej wartości obciążenia  $Q_s$ , przyrost osiadań zmienia się nieliniowo do wartości granicznej [8, 9, 10]. Tę część krzywej  $Q$ - $s$  zdefiniowano jako funkcję wykładniczą (rys. 10).

W przypadku przedstawionego modelu wykładnik funkcji nieliniowej wyznaczyć można na podstawie wartości  $Q_s$  z zależności:

$$a = \frac{1}{Q_s} \quad (7)$$

Pomiędzy wartością  $s'$  i  $s_s$  zachodzi stała relacja:

$$s_s = e \cdot s' \quad (8)$$

Na podstawie analizy położenia początku krzywizny krzywej  $Q$ - $s$  dla pali Vibro przyjęto, statystycznie uzasadniony, punkt o współrzędnych  $(Q_s; s_s)$ :

$$Q_s = 1,25 \cdot Q_r \quad (9)$$

$$s_s = s(Q_s) = s(1,25 \cdot Q_r) \quad (10)$$

Na podstawie syntezy analiz statystycznych parametrów empirycznych i wzajemnych relacji matematycznych zachodzących w obrębie przyjętego modelu, uwzględniając, że osiadania graniczne są równe 10% średnicy pała  $D$ , ustalono zależność:

$$Q_{gr} = 0,75 \cdot Q_r \left( \ln \frac{0,1 \cdot D}{s(1,25 \cdot Q_r)} + 1 \right) \quad (11)$$

Dysponując dwoma punktami: początkiem krzywizny –  $(Q_s; s_s)$  oraz granicznym –  $(Q_{gr}; s_{gr})$ , możliwa jest ekstrapolacja krzywej  $Q$ - $s$  z próbnego obciążenia statycznego oraz opis matematyczny za pomocą funkcji wykładniczej (rys. 11).

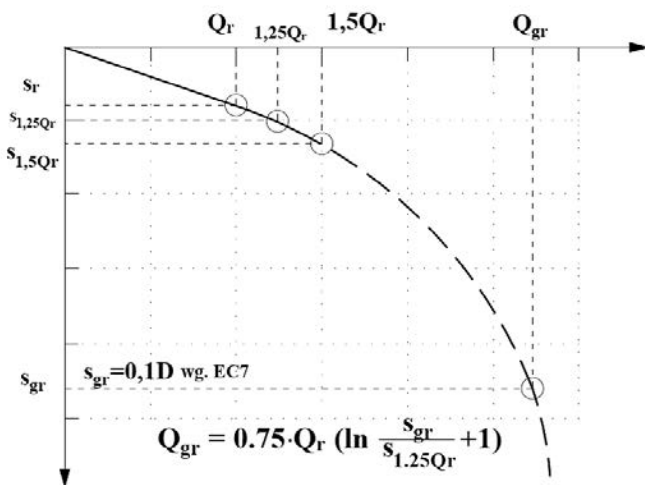
W celu weryfikacji zdefiniowanej zależności przeprowadzono analizę porównawczą z innymi metodami, przedstawioną na rys. 12.

Relacje między wartościami uzyskanymi na podstawie opracowanego wzoru w stosunku do wartości z innych metod mają stałe tendencje.

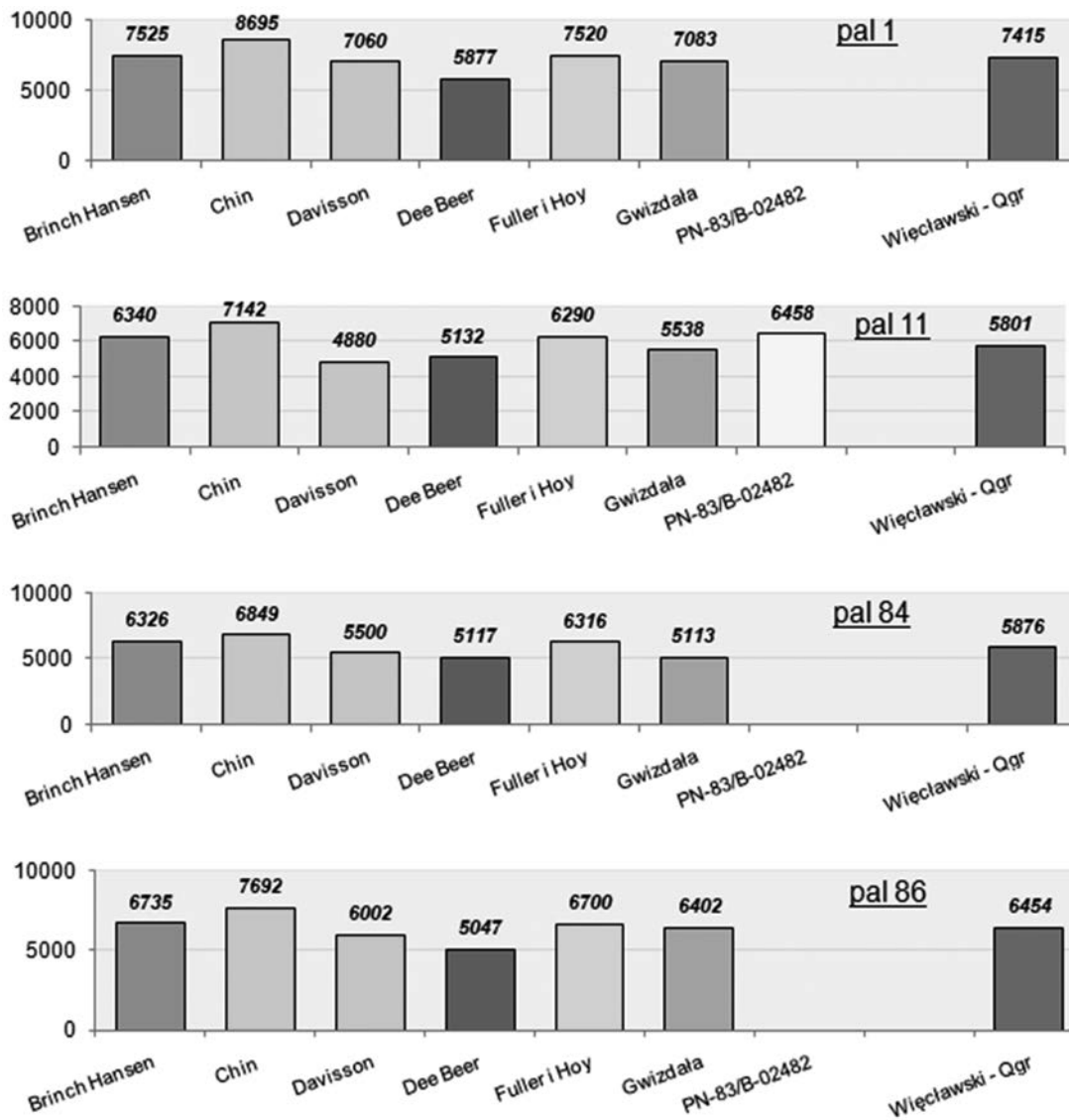
Wartość nośności granicznej  $Q_{gr}$  jest zbliżona do pozostałych wartości granicznych, a różnica nie przekracza 30% (rys. 13). Otrzymane wyniki nie wychodzą poza zakres wartości innych metod.

## WNIOSKI

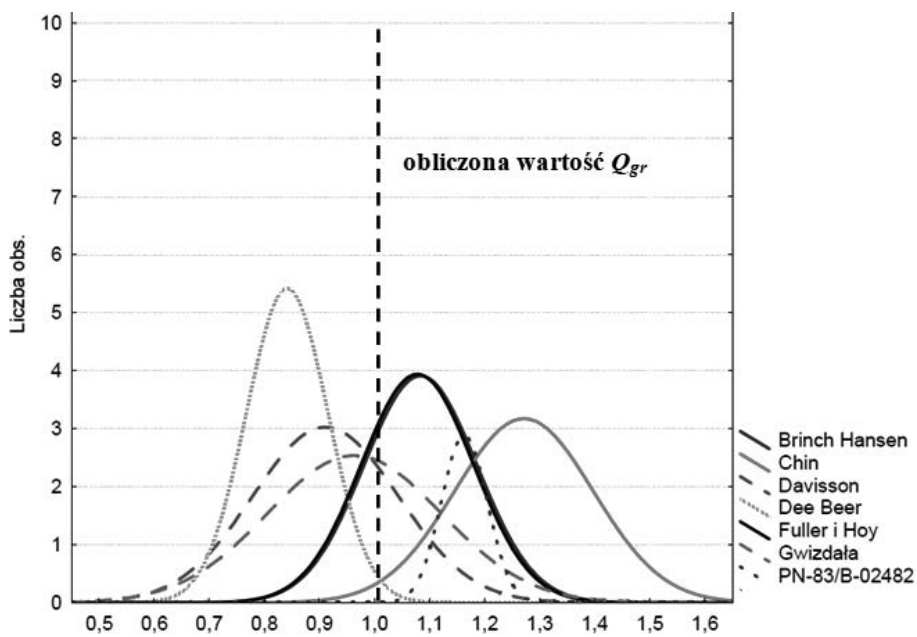
Na podstawie analizy przeprowadzonej dla pali Vibro można stwierdzić, że interpretacja próbnego obciążenia statycznego zgodnie z PN-83/B-02482 nie spełnia kryteriów z PN-EN:1997-1:2008. W grupie 118 pali Vibro dla 80% nie wyznaczono wartości nośności granicznej i osiadania granicznego. Konieczne jest zatem ustalenie nowej procedury przeprowadzania próbnego obciążenia statycznego. Można przyjąć, że metoda interpretacji według PN-83/B-02482 służy do sprawdzenia, czy wykonany pał ma wystarczającą nośność do przeniesienia projektowanych obciążeń. Nie jest natomiast metodą wyznaczania nośności granicznej pali Vibro. Należy stosować inne metody interpretacji próbnego obciążenia statycznego.



Rys. 11. Interpretacja metody ekstrapolacji krzywej  $Q$ - $s$  wyznaczonej dla pali Vibro



Rys. 12. Wartości nośności granicznej wybranych pali Vibro na podstawie metod ekstrapolacji krzywej  $Q-s$



Rys. 13. Rozkłady wartości nośności granicznej w stosunku do opracowanej zależności

Opracowana metoda oparta jest na krzywych z badań statycznych przeprowadzonych dla pali Vibro. Na podstawie fragmentu zależności  $Q-s$  możliwe jest określenie wartości nośności granicznej. Znajomość punktów charakterystycznych pozwala na opis matematyczny pełnej krzywej osiadania pala. Otrzyma-  
ne wyniki plasują się na poziomie średnich z wartości z pozosta-  
łych metod. Jest to czynnik definiujący bezpieczeństwo metody. Wzór jest zalecany dla pali Vibro, których podstawy znajdują się w piaskach. Tak zdefiniowana metoda może dawać miarodajne wyniki. Jedynym pewnym źródłem weryfikacji jest jednak próbne obciążenie statyczne przeprowadzone do wartości osiada-  
nia i nośności granicznej bądź w takim zakresie, aby możliwe było precyzyjne ich wyznaczenie.

## LITERATURA

1. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenie. Wydawnictwo naukowe PWN, 2011.
2. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Badania i zastosowanie. Wydawnictwo naukowe PWN, 2013.
3. Gwizdała K., Więclawski 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.
4. Gwizdała K., Brzozowski T., Więclawski P.: Calculation aspects used in Eurocode 7 for pile foundation. From Research to Design in European Practice. Bratislava, Slovak Republic, June 2 – 4, 2010.
5. 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.
6. Mayne P. W.: Cone Penetration Testing. A Synthesis of Highway Practice. Transportation Research Board, NCHRP368, Washington D.C., 2007.
7. Salgado, R.; Lee, J.: Pile Design on Cone Penetration Test Results. Final Report, FHWA/IN/JTRP-99/8, 1999.
8. Więclawski P.: Metodyka szacowania osiadań pali Vibro na podstawie wyników badań statycznych CPT. Politechnika Gdańska, 2016.
9. Więclawski 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.
10. Więclawski 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.
11. PN-EN 1997-1:2008, Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
12. PN-83/B-02482, Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych na podstawie wyników.