

Dariusz SOBALA<sup>1</sup>

## SPOSOBY OKREŚLANIA NOŚNOŚCI GEOTECHNICZNEJ PALI WCISKANYCH – PROCEDURY I PRZYKŁADY OBLICZENIOWE WEDŁUG EUROKODU 7

W pracy przedstawiono podstawowe sposoby określania nośności geotechnicznej pali wciskanych zgodne z zasadami PN-EN 1997-1. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Zasady ogólne zostały oparte na wynikach badań statycznych nośności pali, wynikach badań podłoża, wynikach badań dynamicznych pali: nośności pali przy dużych odkształceniach lub wstępach/wzorach dynamicznych. Poszczególne metody określania nośności geotechnicznej pali wciskanych przedstawiono w postaci procedur obliczeniowych wykorzystujących alternatywne w porównaniu z powszechnie stosowanymi metodami wg PN- PN-83/B-02482 – metody projektowania. Każdy z omówionych sposobów projektowania zilustrowano przykładem obliczeniowym opartym na danych zaczerpniętych z realizacji rzeczywistych fundamentów palowych w technologii żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych. Określone różnymi sposobami nośności geotechniczne pali zostały każdorazowo zweryfikowane metodami alternatywnymi zgodnie z wymaganiami Eurokodu 7. Porównanie wyników projektowania i weryfikacji nośności pali wciskanych uzyskanych różnymi sposobami potwierdza spójność koncepcji projektowania tego rodzaju elementów geotechnicznych przyjętą w Eurokodzie 7 i możliwość wymiennego stosowania poszczególnych sposobów projektowania pali w zależności od warunków realizacji projektu. Przedstawione w pracy przykłady projektowania pali prezentują również zawarte w Eurokodzie 7 możliwości aktywnego podejścia do kształtowania wartości nośności obliczeniowej i towarzyszącego jej poziomu bezpieczeństwa poprzez przyjęcie odpowiedniej strategii projektowania oraz określenia właściwego zakresu i rodzaju badań wykonywanych na potrzeby projektowania. Powszechne wdrożenie do krajowej praktyki projektowania pali zasad i reguł Eurokodu 7 umożliwi także wykorzystanie światowego dorobku w zakresie metod określania nośności granicznej pali.

**Słowa kluczowe:** nośność graniczna pali, nośność obliczeniowa pala, nośność charakterystyczna pala, badania pali, badania podłoża, wstęp

---

<sup>1</sup> Dariusz Sobala, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, tel. 17 8651596, e-mail: d.sobala@prz.edu.pl, Pracownia Projektowa Aarsleff Sp. z o.o.

## 1. Wprowadzenie

W Eurokodzie 7 [1] wyróżniono trzy podstawowe sposoby określania nośności geotechnicznej pali. Są to (w kolejności odpowiadającej zmniejszającemu się poziomowi niezawodności):

- 1) projektowanie na podstawie **wyników próbnych obciążeń statycznych pali** [2], które zostały potwierdzone obliczeniami,
- 2) projektowanie na podstawie **obliczeń z wykorzystaniem metod empirycznych lub analitycznych**, których wiarygodność została potwierdzona wynikami próbnych obciążeń statycznych w podobnych sytuacjach [3-7],
- 3) projektowanie na podstawie wyników **próbnych obciążeń dynamicznych pali** [8], których wiarygodność została potwierdzona wynikami próbnych obciążeń statycznych w podobnych sytuacjach.

Ponadto w Eurokodzie 7 dopuszczono możliwość projektowania pali **metodą obserwacyjną OM (Observational Method)** na podstawie **zachowania porównywalnych fundamentów palowych**, jeżeli poczynione obserwacje są potwierdzone wynikami badań w terenie i badań podłoża. OM jest przeciwieństwem metody eksperymentalnej, stanowiącej bezpośrednią lub pośrednią podstawę trzech wymienionych sposobów liczbowego określania nośności pali. Zgodnie ze współczesną definicją **metoda obserwacyjna** w geotechnice jest **zarządzanym, zintegrowanym i ciągłym procesem projektowania, kontroli budowy, monitorowania i przeglądów, który w razie potrzeby umożliwia wprowadzenie w trakcie realizacji lub po zakończeniu budowy wcześniej zaplanowanych modyfikacji**. Wszystkie wymienione składowe procesy muszą być jednakowo ważne. **Celem jest uzyskanie ekonomicznych rozwiązań geotechnicznych bez kompromisów w zakresie bezpieczeństwa** [9]. OM rzadko bywa stosowana do liczbowego określania nośności pali, dlatego też nie będzie dalej omawiana w niniejszej pracy.

Charakterystyczne dla trzech wymienionych sposobów określania nośności geotechnicznej pali jest zasada weryfikacji otrzymanych wyników w inny, alternatywny sposób. Pośrednią lub bezpośrednią podstawą weryfikacji nośności pali jest zawsze wynik próbnego obciążenia statycznego. Warto zauważyć, że zasady podane w Eurokodzie 7 rozciągają proces projektowania geotechnicznego pali poza analizy obliczeniowe i zmuszają projektanta do zdobywania niezbędnego w tej dziedzinie doświadczenia przez wykorzystywanie metod eksperymentalnych lub/i obserwacyjnych, realizowanych na etapie wykonawstwa robót palowych. Uzasadnieniem konieczności stosowania w projektowaniu geotechnicznym zasady weryfikacji wyników obliczeń niech będą słowa ojca mechaniki gruntów Karla Terzaghi'ego: *„Niestety grunty są uformowane przez naturę, a nie przez człowieka, a produkty natury są zawsze złożone (...) W chwili przejścia ze stali lub betonu do gruntu nieograniczone możliwości teorii przestają funkcjonować. Naturalny grunt nigdy nie jest jednorodny. Jego parametry zmieniają się z miejsca na miejsce, podczas gdy nasza wiedza o ich właściwościach*

*jest ograniczona do kilku miejsc, w których pobrano próbki. W mechanice gruntów dokładność obliczeń nigdy nie jest większa niż grube przybliżenie, a głównym zadaniem teorii jest nauczenie nas co i w jaki sposób obserwować w terenie.” [10].*

Prezentowane praktyczne procedury i opracowane według nich przykłady określania nośności geotechnicznej pali wciskanych są oparte na zaleceniach Eurokodu 7, stosowanych na świecie metodach projektowania pali, danych z metryk i wynikach przeprowadzonych badań nośności pali. Procedury te zostały w całości lub w części wykorzystane w praktyce m.in. w projektowaniu i ocenie jakości realizowanych robót palowych na dużych inwestycjach, takich jak Stadion Narodowy w Warszawie, budowa autostrady A-4 na Podkarpaciu i terminala LNG (Gazoportu) w Świnoujściu, z realizacji których pochodzi większość danych do prezentowanych przykładów obliczeniowych.

Projektowanie geotechniczne pali wciskanych w stanie granicznym nośności sprowadza się do takiego doboru rozwiązania technologiczno-konstrukcyjnego pala lub/i fundamentu palowego, aby spełniony była warunek:

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

gdzie:  $F_{c,d}$  – obliczeniowy efekt oddziaływań na projektowany pal lub fundament palowy, a  $R_{c,d}$  jest interesującą nas nośnością obliczeniową pala.

## **2. Sposób 1. – projektowanie na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych**

Próbne obciążenia należy przeprowadzać na palach (1) nowego rodzaju, (2) wykonywanych przy użyciu nowych technologii, (3) niebadanych dotychczas w rozpatrywanych warunkach gruntowych lub/i obciążeniowych, (4) dla których brak podstaw teoretycznych do projektowania, oraz (5) wykazujących w trakcie wykonywania znaczne odchylenia od normy, których nie udało się wyjaśnić po przeprowadzeniu dodatkowych badań podłoża.

Próbne obciążenia pali można wykorzystać do oceny przydatności metod wykonania pali, określenia zachowania się reprezentatywnego pala i otaczającego go gruntu pod obciążeniem w zakresie przemieszczeń i **nośności granicznej** oraz oceny całego fundamentu palowego.

W rejonie przyszłej inwestycji pojedyncze próbne obciążenie należy przeprowadzić na palu wykonanym w najbardziej niekorzystnych warunkach gruntowych. W przypadku większej liczby próbnymi obciążeniami jedno powinno być przeprowadzone w rejonie występowania najniekorzystniejszych warunków gruntowych, a pozostałe w rejonach reprezentatywnych dla danego fundamentu. Próbne obciążenia należy wykonywać po czasie potrzebnym na rozproszenie ewentualnego przyrostu ciśnienia wody w porach gruntu na skutek wykonania

w nim pała oraz po osiągnięciu przez materiał trzonu pała wymaganej wytrzymałości.

Wyniki próbnych obciążeń wykonanych na **palach próbnych**<sup>2</sup> mogą być **bezpośrednio wykorzystane w projektowaniu do określania nośności** lub do weryfikacji przyjętych założeń projektowych. Próbne obciążenia wykonywane na **palach konstrukcyjnych** są z reguły wykorzystywane jako powykonawcze badania odbiorcze i stanowią dodatkowe doświadczenie porównywalne.

Pale próbne powinny mieć parametry analogiczne do pali konstrukcyjnych, tj. tę samą średnicę, zagłębienie w warstwie nośnej i technologię wykonania. W przypadku dużych średnic, gdy wykonywanie pali próbnych jest nieefektywne<sup>3</sup> lub zbyt drogie, badania można zrealizować na palach o średnicy co najwyżej dwukrotnie mniejszej, pograżanych tą samą metodą w tej samej warstwie nośnej. Pale takie powinny być wyposażone w układy pomiarowe pozwalające na oddzielne określenia nośności stopy i pobocznic, tak aby umożliwić późniejsze wiarygodne przeniesienie wyników próbnego obciążenia na pale o większej średnicy. Dużą ostrożność przy tego typu badaniach należy zachować w przypadku pali z dnem otwartym. Średnica pała decyduje o możliwości ukształtowania się korka gruntowego wewnątrz przekroju otwartego, co z kolei może znacząco i bezpośrednio wpłynąć na nośność podstawy, a pośrednio również na nośność pobocznic pała.

Spośród różnego rodzaju badań pozwalających na określenie nośności pali za najbardziej wiarygodne uznano w Eurokodzie 7 **próbne obciążenia statyczne**. Ich wyniki stanowią zwykle podstawę opracowania i weryfikacji metod empirycznych i analitycznych projektowania pali, a dla innych metod badania nośności (np. metody dynamicznej) stanowią badania referencyjne. Próbne obciążenia statyczne mogą być realizowane według różnych procedur. Ogólnie różni się próbne obciążenia statyczne pali realizowane siłą zwiększaną stopniami i utrzymywaną przez określony czas do umownego zaniku przemieszczeń głowicy pała ML (*Maintained Load pile test*) lub realizowane ze stałą prędkością wciskania i pomiarem siły wymuszającej przemieszczenie CRP (*Constant Rate of Penetration pile test*). Próbne obciążenie statyczne można zrealizować w jednym, dwu lub w wielu cyklach [2]. W trakcie typowego próbnego obciążenia statycznego obciążenie jest przykładane do głowicy pała i tam odczytywane są jego przemieszczenia. Liczba badań i procedura próbnego obciążenia powinna być dobrana przez projektanta na potrzeby konkretnego projektu. W Polsce badania statyczne nośności pali są praktycznie realizowane wyłącznie według zmodyfikowanej procedury ML opisanej w normie PN-83/B-02482 [7]. Celem badania statycznego, którego wyniki mają być wykorzystane wprost do określenia nośności pała, jest bezpośrednie wyznaczenie jego nośności granicznej  $R_{c,m}$

<sup>2</sup> Pale wykonane przed palowaniem zasadniczym.

<sup>3</sup> Nie ma np. możliwości technicznych zrealizowania obciążenia o bardzo dużej wartości.

lub zgromadzenie danych umożliwiających ekstrapolację jej wartości jedną z wielu dostępnych metod.

Proponowana w projekcie normy europejskiej prEN ISO 22477-1 [2] procedura próbnego osiowego obciążenia statycznego pala różni się od powszechnie wykorzystywanej w kraju procedury według PN-83/B-02482 [7]. Polega ona na:

- określeniu siły próbnego obciążenia  $Q_{\max}$ 
  - dla badań pali próbnych  $Q_{\max}$  zaleca się przyjmować jako nie mniejszą niż  $2E_{d,SLS}$  lub  $R_{c,clac}$ , gdzie  $E_{d,SLS}$  jest obciążeniem obliczeniowym w stanie granicznym użyteczności, a  $R_{c,clac}$  – obliczonym lub oczekiwany oporem granicznym pala,
  - dla badań kontrolnych/powykonawczych  $Q_{\max}$  zaleca się przyjmować jako nie mniejszą niż  $1,5E_{d,SLS}$  lub  $R_y$ , gdzie  $R_y$  jest wartością oporu sprężystego pala równą obciążeniu, powyżej którego przyrost przemieszczeń następuje bez istotnego przyrostu obciążenia,
- realizacji próbnego obciążenia statycznego do wartości  $Q_{\max}$  w jednym cyklu obciążenia/odciążenia<sup>4</sup>, na który składa się minimum
  - 8 stopni obciążenia i 4 stopnie odciążenia w próbnych obciążeniach pali próbnych lub
  - 6 stopni obciążenia i 3 stopnie odciążenia w próbnych obciążeniach kontrolnych/powykonawczych.

Próbne obciążenie statyczne pala należy rozpocząć przy obciążeniu stanowiącym  $0,05Q_{\max}$  (w celu sprawdzenia układu obciążenia i pomiarowego) i zwiększać o stałą wartość siły  $\Delta Q$  w poszczególnych stopniach. Dopuszczalne jest zmniejszenie wartości przyrostu obciążenia  $\Delta Q$  w celu dokładnego określenia przebiegu osiadania przy wartościach obciążenia zbliżonych do oporu granicznego pala  $R_{c,m}$ .

Obciążenie w poszczególnych stopniach powinno być utrzymywane na stałym poziomie przez określony czas. Zalecany czas minimalny to 60 min dla stopnia obciążenia i 10 min dla pojedynczego stopnia odciążenia, lecz nie mniej niż 30 min dla całego cyklu odciążenia. Obciążenie/odciążenie powinno być realizowane płynnie, bez gwałtownych skoków obciążenia i drgań. Zaleca się, aby kolejny stopień obciążenia/odciążenia nie był osiągnięty w czasie krótszym niż 1 min. W razie potrzeby zalecane jest wydłużenie czasu utrzymywania stopnia obciążenia do momentu, aż przemieszczenie głowicy pala będzie mniejsze niż 0,1 mm/20 min.

Oczekiwany wynikiem próbnego obciążenia statycznego pala jest:

- zależność obciążenie-osiadanie pala,

---

<sup>4</sup> Obciążenie realizowane w wielu cyklach lub jako cykliczne jest dopuszczoną procedurą alternatywną.

- pomierzony lub prognozowany opór sprężysty pala  $R_y$  lub/i opór/nośność graniczna pala  $R_{c,m}$  równy obciążeniu przy osiadaniu głowicy równym 0,1 zastępczej średnicy pala.

Projektowanie pali oparte na wynikach próbnych obciążeń statycznych również wymaga weryfikacji. Weryfikację przeprowadza się zwykle obliczeniami, których wynik powinien być zbliżony do wyniku uzyskanego z badań. Ponadto obliczenia oparte nawet na bardzo ogólnym rozpoznaniu podłoża umożliwiają m.in. wstępny dobór optymalnego przekroju i długości pali do badań statycznych, oszacowanie nośności granicznej, a tym samym siły próbnego obciążenia, kontrolę niekorzystnych lub przypadkowych wpływów mogących zniekształcić wynik jednostkowego próbnego obciążenia statycznego oraz uwzględnienie w projektowaniu czynników, których nie obejmuje wynik badania (np. pracę pala w grupie).

Omawiany sposób projektowania jest drogi i efektywny ekonomicznie wyłącznie w przypadku dużych fundamentów palowych, w których optymalizacja przynosi wymierne oszczędności, a koszty i czas przeprowadzenia badań nie wpływają zasadniczo na całkowity koszt i termin realizacji robót palowych. Ze względu na uwarunkowania formalne i praktykę realizacji procesu budowlanego w Polsce projektowanie na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych jest stosunkowo rzadko stosowane w praktyce. Częściej ma to miejsce w prywatnym budownictwie kubaturowym niż kontraktach publicznych. Jednak jednym z najbardziej spektakularnych przykładów zastosowania tego sposobu projektowania pali w Polsce są fundamenty obiektu budowanego ze środków publicznych – Stadionu Narodowego w Warszawie. W przypadku tej inwestycji w trakcie projektowania przeprowadzono palowanie próbne, którego wyniki zostały wykorzystane przy wyborze technologii posadowienia i w projekcie wykonawczym palowania.

### **Procedura określania nośności obliczeniowej pali na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych $R_{c,m}$**

1. Obliczenie wartości średniej  $(R_{c,m})_{mean}$  oraz wyznaczenie wartości minimalnej  $(R_{c,m})_{min}$  ze zbioru pomierzonych nośności granicznych  $R_{c,m_i}$ , gdzie  $i = 1...n$ , a  $n$  jest liczbą próbnych obciążeń statycznych.
2. Odczytanie współczynników korelacyjnych  $\xi_1$  i  $\xi_2$  z tablicy A.9 załącznika normatywnego A do normy PN-EN 1997-1 [1] dla  $n$  przeprowadzonych próbnych obciążeń statycznych (tab. 1).
3. Wprowadzenie ewentualnej poprawki zmniejszającej przyjęte wartości współczynników korelacyjnych ze względu na dużą sztywność zwieńczenia według p. 7.6.2.2 (9) PN-EN-1997-1.

Tabela 1. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych  $R_{c,k}$  na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych pali ( $n$  – liczba badanych pali)

Table 1. Correlation coefficients  $\xi$  for determining characteristic values  $R_{c,k}$  on the basis of static test loading results ( $n$  – number of tested piles)

$n$	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

4. Wyznaczenie wartości charakterystycznej nośności pala na wciskanie:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_1}; \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2} \right\}.$$

5. Odczytanie wartości  $\gamma_t = \gamma_R$  współczynnika częściowego bezpieczeństwa zgodnie z zestawem R2 tablicy A.6 załącznika normatywnego A normy PN-EN 1997-1.

6. Wyznaczenie wartości obliczeniowej nośności  $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$ .

#### Przykład 1. Projektowanie pali na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych<sup>5</sup>

W fundamencie jednego z obiektów terminala gazowego LNG w Świnoujściu posadowionego na mieszaninie pisaków drobnych, pylastych oraz piasków średnich ze żwirem w stanie od średnio zagęszczonego do zagęszczonego przewidziano wykonanie 84 szt. pali o wymaganej minimalnej nośności na wciskanie  $R_{c,d} = 2450$  kN. Na podstawie obliczeń wstępnie przyjęto, że właściwym rozwiązaniem spełniającym te wymagania będzie wykorzystanie żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych o przekroju 400 x 400 mm o długości całkowitej prefabrykatu  $L_c = 15,0$  m. Zakres oszacowanych na podstawie wyników badań podłoża nośności obliczeniowych wynosił od 2250 do 2550 kN. Przyjęto, że określenie nośności obliczeniowych i ostateczny dobór liczby pali będzie dokonany na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych. Wyznaczono dwie strefy: pierwszą, w której wyniki obliczeń wstępnych wskazywały na niedobór nośności przyjętych pali, oraz drugą o reprezentatywnych dla większości obszaru fundamentu warunkach gruntowych. W tych miejscach pograżono pale testowe i kotwiące, a po wymaganym, siedmiodniowym oczekiwaniu przeprowadzono próbne obciążenia statyczne typu ML według procedury

<sup>5</sup> Przykład jest oparty na rzeczywistych wynikach próbnych obciążeń statycznych, jednak przedstawiona procedura została wykorzystana nie do projektowania, lecz do kontroli wyników wcześniej wykonanych badań pali metodą dynamiczną.

z PN-83/B-02482 [7]. Przyjęto maksymalną siłę próbnego obciążenia  $Q_{\max} > 1,5R_d \cong 4000\text{kN}$ .

W wyniku przeprowadzonych dwóch próbnych obciążeń statycznych wyznaczono następujące nośności graniczne:  $R_{c,m_1} = 3100\text{ kN}$  i  $R_{c,m_2} = 3850\text{ kN}$ .

1. Obliczono średnią nośność graniczną  $(R_{c,m})_{mean} = 3475\text{ kN}$  oraz określono wartość minimalną nośności granicznej pala  $(R_{c,m})_{min} = 3100\text{ kN}$ .
2. Następnie z tablicy A.9 przyjęto odpowiednie dla dwóch przeprowadzonych badań statycznych współczynniki korelacyjne: dla wartości średniej  $\xi_1 = 1,30$  i wartości minimalnej nośności granicznej  $\xi_2 = 1,30$ .
3. Wprowadzono współczynnik redukujący wartość współczynników korelacyjnych wynikający z dużej sztywności zwieńczenia o wartości 1,1.
4. Na podstawie tych wartości obliczono nośność charakterystyczną pali:
 
$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_1}; \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2} \right\} = 2842\text{ kN}.$$
5. Przyjęto współczynnik bezpieczeństwa o wartości  $\gamma_t = \gamma_R = 1,10$  dla pali wciśkanych i podejścia obliczeniowego R2.
6. Obliczono nośność obliczeniową  $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_R} = 2583\text{ kN}$ . Przyjęto, że wyznaczona nośność mieści się w zakresie zweryfikowanym obliczeniami wstępnymi.
7. Warunek stanu granicznego nośności GEO dla przyjętych pali jest spełniony  $R_{c,d} = 2583\text{ kN} \geq F_{c,d} = 2450\text{ kN}$ .

### 3. Sposób 2. – projektowanie na podstawie obliczeń z wykorzystaniem metod empirycznych lub analitycznych opartych na wynikach badań podłoża

Sposób 2. umożliwia wykorzystanie wszelkich znanych metod analitycznego i empirycznego określania nośności granicznej pali, np.  $\alpha$  i  $\beta$  według API (1993) [3], LCPC według Fascicule 62 [6], Niemieckiego Towarzystwa Geotechnicznego według EA-Pfähle [5], a także dotychczas często stosowanej w Polsce metody opisanej w normie PN-83/B-02482 [7].

Metoda według PN-83/B-02482 dla uzyskania zgodności z zasadami i regulacjami Eurokodu 7 wymaga aktualizacji opisu i oznaczeń oraz uzgodnienia poziomu niezawodności. Jeżeli uzna się, że przez wdrożenie eurokodów w Polsce utrzyma się dotychczasowy poziom bezpieczeństwa projektowanych konstrukcji (wartości współczynników bezpieczeństwa są w zakresie postanowień krajowych), można przyjąć, że nośności  $m \cdot N_t$  wyznaczone według PN-83/B-02482 są tożsame z nośnościami  $R_{c,d}$  wyznaczonym według Eurokodu 7 [11, 12].



Praktyczne zastosowanie konkretnej metody obliczeniowego wyznaczania nośności granicznej pala  $R_{c,cal}$  jest limitowane dostępem do wykorzystywanych w niej parametrów geotechnicznych podłoża. Ponadto stosowanie konkretnej metody powinno być poprzedzone dokładnym określeniem zakresu jej stosowalności. Niektóre metody mają zakresy te znacznie ograniczone do określonych rodzajów gruntów lub/i pali. Wynika to najczęściej ze sposobu i zakresu kalibracji metody, który z natury rzeczy jest ograniczony.

Oczekiwanym efektem zastosowania wybranej metody obliczeniowej są wyznaczone na podstawie poszczególnych profili gruntowych nośności graniczne pali  $R_{c,cal}$ . Należy pamiętać, że obliczenia nośności pali wykonane tym sposobem są, co najwyżej, tak dokładne, jak parametry gruntów wykorzystane do ich wyznaczenia.

### Procedura określania nośności obliczeniowej pala na podstawie obliczonej nośności granicznej

1. Obliczenie średniej  $(R_{c,cal})_{mean}$  oraz wyznaczenie wartości minimalnej  $(R_{c,cal})_{min}$  ze zbioru  $n$  obliczonych nośności granicznych  $R_{c,cal,i}$ , gdzie  $i = 1...n$ , a  $n$  jest liczbą zbadanych i uwzględnionych w obliczeniach profili gruntowych.
2. Odczytanie współczynników korelacyjnych  $\xi_3$  i  $\xi_4$  z tablicy A.10 załącznika normatywnego A do normy PN-EN 1997-1 dla  $n$  badanych i uwzględnionych w obliczeniach profili gruntowych (tab. 2.).

Tabela 2. Współczynniki korelacyjne  $\xi$  do wyznaczania wartości charakterystycznych  $R_{c,k}$  na podstawie wyników badań podłoża ( $n$  – liczba badanych/uwzględnionych profili gruntowych)

Table 2. Correlation coefficients  $\xi$  for determining characteristic values  $R_{c,k}$  on the basis of soil investigation results ( $n$  – number of investigated/considered soil profiles)

$n$	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

3. Wprowadzenie ewentualnej poprawki zmniejszającej przyjęte wartości współczynników korelacyjnych ze względu na sztywność zwieńczenia według p. 7.6.2.3 (7) PN-EN 1997-1.
4. Wyznaczenie wartości charakterystycznej nośności pala na wciskanie

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_4} \right\}.$$

5. Odczytanie wartości  $\gamma_t = \gamma_R$  współczynnika częściowego bezpieczeństwa zgodnie z zestawem R2 tablicy A.6 załącznika normatywnego A normy PN-EN 1997-1.
6. Wyznaczenie wartości obliczeniowej nośności  $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$ .

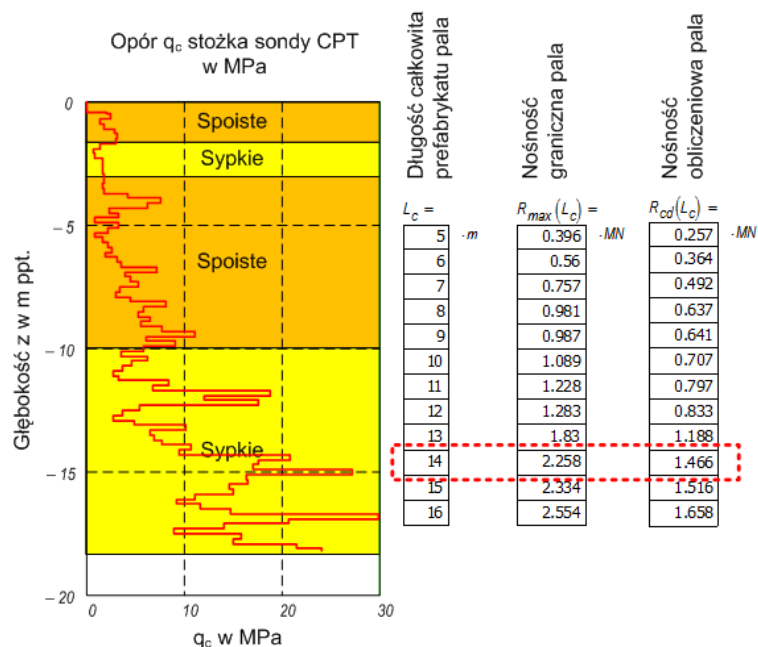
### **Przykład 2. Projektowanie pali z zastosowaniem metody empirycznej oparte na badaniach gruntu**

W fundamencie przyczółka nr 1 (strona lewa) wiaduktu autostradowego WA-44 (Autostrada A-4, odcinek Radymno-Korczowa) przewidziano wykorzystanie 42 pali prefabrykowanych o przekroju 400 x 400 mm. Przewidywane maksymalne obciążenie pala wynosiło  $F_{c,d} = 1350$  kN. W obrębie podpory wykonano sondowanie CPT 1/44 oraz otwory badawcze 1/44, 2/WD44, 1/WA44. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że warunki gruntowe na obszarze podpory nie ulegają zasadniczym zmianom. W podłożu zalegają od góry: piaski pylaste ( $I_D = 0,32$ )/pyły piaszczyste ( $I_L = 0,35$ ) 0÷3 m, piaski pylaste ( $I_L = 0,15\div 0,35$ ) 3÷10 m oraz pisaki drobne/średnie/grube ( $I_D = 0,45\div 0,60$ ) 10÷18 m przyjęte jako zasadnicza warstwa nośna dla pali. Obliczenia nośności pali przeprowadzono metodą opisaną w pracy [4] w wersji według francuskich wytycznych Fascicule 62 [6] na podstawie wyników sondowania CPT 1/44. Sondowanie wykonano z poziomu 187,70 m n.p.m. Spód zwieńczenia przyjęto na poziomie 1,28 m ppt. Przyjęto, że zwieńczenie jest sztywne. Wybrana metoda empiryczna została skalibrowana dla wielu rodzajów pali (w tym żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych) w gruntach spoistych (gliny i pyły) i sypkich (pisaki i żwiry). Obliczone wartości nośności granicznej  $R_{c,cal}$  i obliczeniowej w stanie granicznym nośności  $R_{c,d}$  dla pełnego profilu gruntowego przedstawiono na rys. 1.

Wykorzystując jedno sondowanie CPT oraz wybraną metodę analizy wyników sondowania, wyznaczono nośność graniczną pala o długości  $L_c = 14,0$  m równą  $R_{c,cal_1} = 2258$  kN.

Kolejno zrealizowano następujące kroki obliczeniowe:

1. W przypadku jednego sondowania CPT  $(R_{c,cal})_{mean} = (R_{c,cal})_{min} = 2258$  kN.
2. Następnie z tablicy A.10 (tab. 2.) przyjęto odpowiednie współczynniki korelacyjne dla jednego profilu gruntowego uwzględnionego w analizie (sondowanie CPT), tj. dla wartości średniej i minimalnej nośności granicznej  $\xi_3 = \xi_4 = 1,40$ .
3. Wprowadzono współczynnik redukujący wartość współczynników korelacyjnych wynikający z dużej sztywności zwieńczenia o wartości 1,1.



Rys. 1. Wyniki sondowania i obliczeń nośności pali na podstawie sondowania CPT bez uwzględnienia wpływu sztywności zwieńczenia

Fig. 1. Results of probing and pile capacity calculations on the basis of CPT probing without the effect of pile cap stiffness

4. Na podstawie otrzymanych wartości obliczono nośność charakterystyczną

$$\text{pali: } R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,calc})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,calc})_{min}}{\xi_4} \right\} = 1774 \text{ kN.}$$

5. Przyjęto współczynnik bezpieczeństwa  $\gamma_t = \gamma_R = 1,10$  dla drugiego podejścia obliczeniowego.

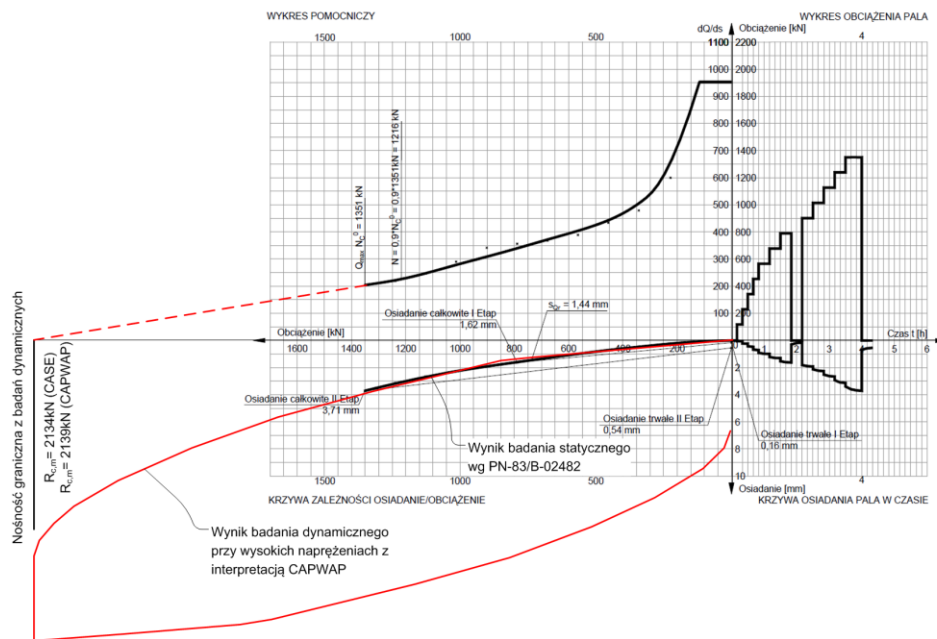
6. Obliczono nośność obliczeniową:  $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_R} = 1613 \text{ kN.}$

Wyznaczona nośność nie wymaga redukcji ze względu na pracę pali w grupie. Nośność fundamentu palowego wykonanego w piaskach jest nie mniejsza niż suma nośności pojedynczych pali. Warunek stanu granicznego nośności GEO dla pala o długości  $L_c = 14,0 \text{ m}$  jest spełniony:  $R_{c,d} = 1613 \text{ kN} \geq F_{c,d} = 1350 \text{ kN.}$

Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla pala krótszego o 1 m, tj.  $L_c = 13,0 \text{ m}$ . Warunek stanu granicznego nie jest spełniony:  $R_{c,d} = 1307 \text{ kN} \geq F_{c,d} = 1350 \text{ kN}$ . Ostatecznie przyjęto pale o długości  $L_c = 14,0 \text{ m}$ .

W rzeczywistości ze względu na wymagania formalne obliczenia nośności pali w tym fundamencie przeprowadzono na podstawie parametrów wiodących  $I_D$  i  $I_L$  oraz normy PN-83/B-02482. W ich wyniku dla przewidywanych obciążeń rzeczywistych o wartości  $F_{c,d} = 736$  kN dobrano pale o długości całkowitej prefabrykatu równej 14 m (czynnej 13,6 m) i konserwatywnej nośności obliczeniowej wynoszącej  $R_{c,d,cal} = 792$  kN. W projekcie przewidziano procedurę kontrolną polegającą na przeprowadzeniu jednego próbnego obciążenia statycznego do wartości maksymalnej obciążenia próbnego  $Q_{max} = 1351$  kN  $> 1,5R_{c,d,cal}$  oraz jednego próbnego obciążenia dynamicznego. Wyniki próbnych obciążeń posłużyły w praktyce do weryfikacji założeń projektowych, a na potrzeby niniejszej publikacji zostaną wykorzystane do weryfikacji wyników obliczeń nośności pali metodą bezpośrednią opartą na wynikach sondowania CPT.

Na rysunku 2. na jeden wykres nałożono wyniki próbnego obciążenia statycznego i dynamicznego pala wykonane w obrębie fundamentu na palach tego samego rodzaju i długości.



Rys. 2. Wynik próbnych obciążeń statycznego (SLT) i dynamicznego (DLT) wykonanych na tym samym pale

Fig. 2. Results of static (SLT) and dynamic (DLT) load tests performed on the same pile

W wyniku przeprowadzonego próbnego obciążenia statycznego na podstawie obliczeń i zgodnie z zasadami PN-83/B-02482 [7] nie osiągnięto noś-

ności granicznej. Opierając się na zasadach analizy próbnych obciążeń statycznych z normy [7] określono nośność obliczeniową pala:  $R_{c,d} = 0,9 \cdot Q_{\max} = 1216 \text{ kN} \gg F_{c,d}$ . Wynik próbnego obciążenia dynamicznego pozwolił na oszacowanie nośności granicznej pala na poziomie  $R_{c,m} = 2135 \text{ kN}$ . Pojedyncze próbne obciążenie dynamiczne nie pozwala na wykorzystanie jego wyników w projektowaniu (wymagane jest dysponowanie m.in. dwoma takimi wynikami). Oszacowana w wyniku próbnego obciążenia dynamicznego i obliczona metodą empiryczną nośność graniczna ma zbliżoną wartość (różnica ok. 6%). Określona za pomocą metody empirycznej i zasad zawartych w Eurokodzie 7 nośność obliczeniowa dla pala o  $L_c = 14,0 \text{ m}$  wynosi  $R_{c,d} = 1466 \text{ kN}$  bez uwzględnienia dużej sztywności zwieńczenia lub  $R_{c,d} = 1613 \text{ kN}$  z jej uwzględnieniem i jest większa od nośności określonej na podstawie PN-83/B-02482 [7] (obliczona 792 kN i uzyskana jako wynik próbnego obciążenia 1216 kN) oraz bliższa rzeczywistej nośności pala. W trakcie analizy wyników kolejnego próbnego obciążenia dokonanego na tym samym palu należy uwzględniać wpływ zmiany stanu naprężenia w gruncie wywołany poprzednio wykonanym obciążeniem pala.

#### **4. Sposób 3. – projektowanie na podstawie wyników badań dynamicznych pali**

##### **Projektowanie pali z zastosowaniem wzorów dynamicznych**

Zastosowanie wzorów dynamicznych ma bardzo długą historię, ale w praktyce jest ograniczone do wyznaczania nośności pali przemieszczeniowych wbijanych (prefabrykowanych lub formowanych w gruncie). Znanych jest wiele wzorów dynamicznych pozwalających na oszacowanie nośności granicznej  $R_{c,m}$ , których wykorzystanie powinno zostać poprzedzone analizą stosowalności wybranego wzoru w danych warunkach gruntowych dla określonego rodzaju pali. Zastosowanie wzorów dynamicznych wymaga:

- znajomości układu warstw podłoża gruntowego,
- pozytywnych i udokumentowanych doświadczeń z próbnych obciążeń statycznych pali tego samego rodzaju o podobnej długości i przekroju poprzecznym w podobnych warunkach gruntowych,
- prowadzenia zapisów wpędów podczas ostatnich serii uderzeń.

W praktyce są stosowane różne wzory dynamiczne, np. Hilleya, Janbu lub Sorensena (tzw. formuła duńska, czyli znany w kraju wzór dynamiczny zawarty w normie PN-83/B-02482) [7].

Wnioskowanie na temat nośności pali na podstawie wpędów należy opierać na wynikach wbijania min. 5 pali rozmieszczonych w obszarze palowania, dla których ustalono wymaganą liczbę uderzeń na końcowym odcinku pograżania.

### **Projektowanie pali z wykorzystaniem analizy równania fali sprężystej (Wave Equation Analysis)**

Zastosowanie analizy równania fali sprężystej do określenia nośności granicznej pali  $R_{c,m}$  wymaga:

- znajomości układu warstw podłoża gruntowego,
- wykazania wiarygodności wyników analizy, opierając się na pozytywnych wynikach próbnych obciążeń statycznych pali tego samego rodzaju, o podobnej długości i przekroju poprzecznym w podobnych warunkach gruntowych,
- obliczenia wartości współczynników korelacyjnych  $\xi$  niezbędnych do określenia nośności obliczeniowej, opierając się na doświadczeniach lokalnych.

W praktyce sposób ten jest z reguły stosowany do projektowania technologicznego procesu wbijania pali: doboru ciężaru, rodzaju i energii młota oraz szacowania spodziewanych naprężeń w trzonie pala w trakcie pogażania, a rzadziej do określania nośności granicznej pali. Z tego też względu metoda ta nie będzie dalej omawiana w kontekście określania nośności geotechnicznej pali.

### **Projektowanie pali z wykorzystaniem wyników próbnych obciążeń dynamicznych**

Wraz z komputeryzacją, miniaturyzacją, rozwojem urządzeń mobilnych oraz technik obliczeniowych powstały nowe możliwości badania nośności pali fundamentowych. Jedną z powszechnie stosowanych współcześnie metod badań nośności osiowej pali są próbne obciążenia dynamiczne realizowane przy dużych odkształceniach DLT (*Dynamic Load Test*). Badanie polega na kilkukrotnym uderzeniu odpowiednio dobranym młotem z założoną energią w głowicę oprzyrządowanego pala. Pal wyposażony w czujniki pomiaru odkształceń (tensometry) oraz przyspieszeń pod wpływem uderzenia przemieszcza się w gruncie i odkształca, a wzbudzona w nim fala odkształceń wędruje wzdłuż trzonu, odbija się od stopy i wraca do głowicy, po drodze podlegając tłumieniu, które zależy od materiału trzonu pala oraz rodzaju i stanu gruntu otaczającego pal. Mierzone w czasie badania odkształcenia betonu głowicy pala oraz jej przyspieszenia poddane analizie numerycznej pozwalają na określenie oporów granicznych pala i przemieszczeń pala towarzyszących ich osiągnięciu, a w przypadku bardziej złożonych analiz – na rozdzielenie oporów pomiędzy stopę i pobocznice, określenie rozkładu oporów na pobocznicy, a także określenie przybliżonej zależności obciążenie/przemieszczenie głowicy pala, analogicznej do tej uzyskiwanej w badaniach statycznych. Wyniki badań DLT były wielokrotnie i z sukcesem korelowane z odpowiednimi wynikami SLT, a zaobserwowane rozbieżności (niedokładność metody) zostały ujęte w Eurokodzie 7 w postaci zwiększonych wartości współczynników korelacyjnych  $\xi_5$  i  $\xi_6$  w stosunku do  $\xi_1$  i  $\xi_2$ . Badania DLT są realizowane zgodnie z ASTM Designation D 4945, Standard Test Meth-

od for High-Strain Dynamic Testing of Piles [8]. Norma ta została przywołana w Eurokodzie 7 [1] jako właściwy dokument odniesienia dla tego typu badań.

W przypadku pali prefabrykowanych wykorzystanie tej metody badań jest najczęstsze i najbardziej naturalne ze względu na dysponowanie na placu budowy wszystkimi niezbędnymi warunkami do ich przeprowadzenia, tj. palem zdolnym natychmiast po pogrążeniu do przenoszenia obciążeń oraz kafarem z młotem zdolnym wywołać w palu odpowiednie przemieszczenie umożliwiające interpretację pomierzonych sygnałów.

Według zasad zawartych w Eurokodzie 7 wymaga się, aby wyniki DLT były kalibrowane badaniem statycznym wykonanym **w podobnych warunkach gruntowych**. W typowym przypadku sprowadza się to do wykonania badania statycznego jako badania kalibrującego i badań dynamicznych jako podstawowych badań nośności pali. W przypadku dysponowania obszerną bazą wyników badań statycznych (przeprowadzonych na palach tego samego rodzaju, o zbliżonych wymiarach i wykonanych w podobnych warunkach gruntowych) nie ma konieczności wykonywania badań kalibrujących w przypadku każdego analizowanego fundamentu.

Efektom próbnego obciążenia dynamicznego jest nośność graniczna badanego pala  $R_{c,m}$ .

#### **Procedura wyznaczania nośności pali na podstawie wyników badań dynamicznych pali**

1. Obliczenie średniej  $(R_{c,m})_{mean}$  oraz wyznaczenie wartości minimalnej  $(R_{c,m})_{min}$  ze zbioru pomierzonych nośności granicznych  $R_{c,m_i}$ , gdzie  $i = 2 \dots n$ , a  $n$  jest liczbą badań dynamicznych. Jeżeli w fundamencie występują pale różnych rodzajów, to przy ustalaniu liczby  $n$  badanych pali zaleca się rozpatrywać oddzielnie grupy jednakowych pali.
2. Odczytanie współczynników korelacyjnych  $\xi_5$  i  $\xi_6$  z tablicy A.11 załącznika normatywnego A dla  $n$  przeprowadzonych badań dynamicznych (tab. 3.).
3. Wyznaczenie wartości charakterystycznej nośności pala na wciskanie:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_5}; \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_6} \right\}.$$

4. Odczytanie wartości  $\gamma_t = \gamma_R$  współczynnika częściowego bezpieczeństwa zgodnie z zestawem R2 tablicy A.6 załącznika normatywnego A.
5. Wyznaczenie wartości obliczeniowej nośności  $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$ .

W projektowaniu zalecane jest zastosowanie wyników badań dynamicznych przy dużych odkształceniach z analizą dopasowania sygnału (np. CAPWAP). Ze względu na dużą różnicę wartości współczynników bezpieczeństwa zastosowanie mniej zaawansowanych metod badań dynamicznych pali mo-

że prowadzić do niedoszacowania nośności rzędu 40% (por. wartości zestawione w tab. 3.).

Tabela 3. Współczynniki korelacyjne  $\xi_5$  i  $\xi_6$  do wyznaczania wartości charakterystycznych  $R_{c,k}$

Table 3. Correlation coefficients  $\xi_5$  i  $\xi_6$  for determining characteristic values  $R_{c,k}$

$n^*$	$\geq 2$	$\geq 5$	$\geq 10$	$\geq 15$	$\geq 20$
na podstawie wyników dynamicznych badań udarowych bez dopasowania sygnału, np. CASE					
$\xi_5$	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
$\xi_6$	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25
na podstawie wyników dynamicznych badań udarowych z dopasowaniem sygnału, np. CAPWAP					
$\xi_5$	1,36	1,28	1,23	1,21	1,19
$\xi_6$	1,28	1,15	1,11	1,06	1,06
na podstawie wzoru dynamicznego z pomiarem quasi-sprężystego przemieszczenia głowicy pała podczas udaru					
$\xi_5$	1,76	1,65	1,60	1,56	1,54
$\xi_6$	1,65	1,49	1,43	1,38	1,38
na podstawie wzoru dynamicznego bez pomiaru quasi-sprężystego przemieszczenia głowicy pała podczas udaru**					
$\xi_5$	1,92	1,80	1,74	1,70	1,68
$\xi_6$	1,80	1,62	1,56	1,50	1,50

\*  $n$  – liczba zbadanych pali.

\*\* – opartego wyłączenie na wpędach.

### Przykład 3.1. Projektowanie pali z wykorzystaniem wzorów dynamicznych

W projekcie opisanym w przykładzie 1. przyjęto odmienną strategię projektową. Do projektowania postanowiono zastosować wzory dynamiczne, a konkretnie formułę duńską, która jest często stosowana do zgrubnej, roboczej kontroli nośności żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych w grunty sypkie. Formuła ta może być z powodzeniem wykorzystywana do projektowania pali wbijanych w grunty sypkie w przypadku mało odpowiedzialnych fundamentów.

Nośność graniczna pała wyznaczona według formuły duńskiej z parametrami jak dla młotów wolnospadowych jest równa:

$$R_{c,m_i} = \frac{\eta \cdot h \cdot G}{s + 0,5s_0},$$

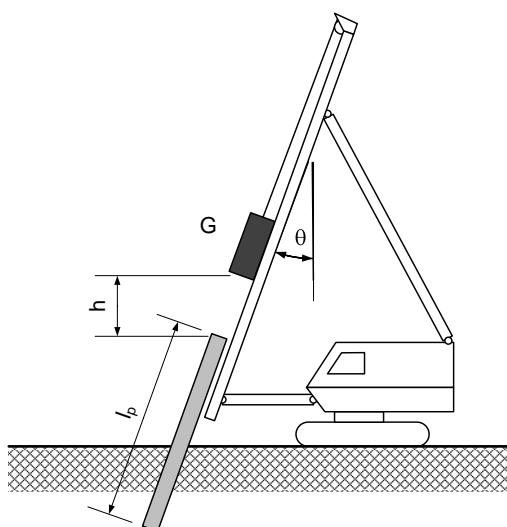
przy czym  $s_0 = \sqrt{\frac{2\eta \cdot h \cdot G \cdot l_p}{A \cdot E}}$  jest oszacowaniem sprężystego skrócenia pała pod uderzeniem, gdzie  $G$  – ciężar młota,  $h$  – wysokość spadu młota mierzona



w pionie,  $\eta = \eta_0 \cdot (1 - \mu \cdot \tan \theta)$  – efektywność młota ( $\eta_0 = 0,7 \div 0,95$ ,  $\mu \cong 0,1 \div 0,4$  – przyjmowane w zależności od wykorzystywanego kafara),  $l_p$  – długość wbijanego pala,  $A$  – powierzchnia przekroju poprzecznego pala,  $s$  – wielkość wępu na ostatnim odcinku pograżania pala (najczęściej średnia na ostatnim odcinku 0,2 m) (rys. 3.). We wzorze należy zastosować moduł sprężystości trzonu pala  $E = 20 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$  dla pali żelbetowych,  $E = 10 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$  dla pali drewnianych oraz  $E = 210 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$  dla pali stalowych.

Procedura postępowania umożliwiająca określanie nośności na podstawie wzorów dynamicznych polega na:

- doborze odpowiedniej długości pala na podstawie informacji o układzie warstw podłoża w lokalizacji fundamentu palowego, parametrów kafara i dostępnych przekrojów prefabrykatów palowych,
- wstępnym ustaleniu kryterium osiągnięcia nośności (kryterium wępu),
- wbijaniu kolejnych (co najmniej 5) pali i analizie ich nośności za pomocą wzoru dynamicznego z ewentualną korektą kryterium wępu,
- ewentualnym włączeniu do analizy kolejnych pali – wynik analizy nośności podlega modyfikacji wraz ze wzrostem liczby pali,
- wprowadzeniu ewentualnej korekty uwzględniającej wpływ upływu czasu na nośność pali.



Rys. 3. Parametry procesu wbijania wykorzystywane w formule duńskiej

Fig. 3. Driving parameters used in the Danish formula

W tabeli 4. zestawiono dane i wyniki analizy nośności pali przeprowadzonej za pomocą formuły duńskiej dla pali, które zostały kolejno wbite w fundamencie obiektu opisanego w przykładzie 1.<sup>6</sup>

Tabela 4. Zestawienie nośności granicznych pali prefabrykowanych wyznaczonych wzorem dynamicznym

Table 4. Specification of limit capacities of precast piles calculated with the dynamic formula

$i$	$R_{c,m_i}$ [kN]	$i$	$R_{c,m_i}$ [kN]	$i$	$R_{c,m_i}$ [kN]	$i$	$R_{c,m_i}$ [kN]	$i$	$R_{c,m_i}$ [kN]	$i$	$R_{c,m_i}$ [kN]
1	4380	16	4217	31	4217	46	4411	61	4257	76	4347
2	4217	17	4106	32	4056	47	3730	62	4426	77	4238
3	4238	18	4175	33	4411	48	4380	63	4330	78	4257
4	4238	19	4197	34	3754	49	3944	64	4411	79	4238
5	4175	20	4238	35	4313	50	4002	65	4238	80	4295
6	4217	21	4313	36	4543	51	4276	66	4197	81	4295
7	4276	22	4130	37	4106	52	4238	67	4153	82	4454
8	4257	23	4130	38	4029	53	4411	68	4106	83	4411
9	4197	24	4217	39	4238	54	4411	69	4106	84	4481
10	4130	25	4238	40	4175	55	4411	70	4257	–	–
11	4197	26	4238	41	4056	56	4411	71	4197	–	–
12	4175	27	4238	42	4106	57	4411	72	4411	–	–
13	4175	28	4347	43	4411	58	4364	73	4313	–	–
14	4257	29	4130	44	4276	59	3473	74	4380	–	–
15	4257	30	4238	45	4217	60	4411	75	4380	–	–

Jak widać w zestawieniu wyników, oszacowana nośność pali w czasie odpowiadającym zakończeniu wbijania nie spełnia wymagań projektowych. Po uwzględnieniu wpływu czasu (*soil set-up*), np. według zależności podanej dla piasków przez Skova i Denvera [13], po 7 dniach nośność pali powinna osiągnąć wartości spełniające wymagania projektu. Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń (tab. 5.), można zauważyć, że metoda jest wrażliwa na liczbę uwzględnionych nośności granicznych pali – najniższy wynik nośności określono dla wszystkich pali wbitych w rozpatrywanym obszarze.

<sup>6</sup> Analizę wykonano wyłącznie na potrzeby niniejszego opracowania.

Tabela 5. Realizacja procedury obliczeniowej określania nośności pali prefabrykowanych wbijanych na podstawie wzoru dynamicznego bez i z uwzględnieniem wpływu czasu na nośność pali

Table 5. Use of calculation procedure for determining precast pile capacities with the dynamic formula with and without the effect of time on pile capacity

Etap obliczeń wg procedury	Parametr	Liczba pali				
		5	10	20	40	84
1.	$R_{c,m_{mean}}$ [kN]	4250	4233	4216	4209	4237
	$R_{c,m_{min}}$ [kN]	4175	4130	4106	3754	3473
2.	$\xi_5$	1,5	1,45	1,4	1,4	1,4
	$\xi_6$	1,35	1,3	1,25	1,25	1,25
	współczynnik korekcyjny ze względu na rodzaj analizy	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
3.	$R_{c,k}$ [kN]	2361	2432	2509	2503	2315
4.	$\gamma_t = \gamma_R$	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
5.	$R_{c,d}$ [kN], $t = 0,5$ dnia	2146	2211	2281	2275	2105
	$R_{c,d}$ [kN], $t = 7$ dni	2638	2718	2804	2797	2587

### Przykład 3.2. Projektowanie pali na podstawie wyników badań dynamicznych przy dużych odkształceniach

W kolejnym przykładzie ponownie zastosowano opis projektu z przykładu 1., z tym że do oszacowania nośności pala na podstawie wyników badań dynamicznych nośności pali przy dużych odkształceniach. W ramach zaplanowanych badań na palach o jednakowej długości czynnej wykonano w opisanym obszarze 20 analiz DLT. Obróbkę wyników przeprowadzono metodą CAPWAP. Zestawienie wyznaczonych nośności granicznych wraz z ich analizą przedstawiono na rys. 4.

1. Obliczono średnią  $(R_{c,m})_{mean} = 4021$  kN oraz wyznaczono wartość minimalną  $(R_{c,m})_{min} = 3225$  kN ze zbioru 20 pomierzonych nośności granicznych  $R_{c,m}$ .
2. Odczytano wartości współczynników korelacyjnych  $\xi_5 = 1,4 \cdot 0,85 = 1,19$  i  $\xi_6 = 1,25 \cdot 0,85 = 1,06$  z tablicy A.11 załącznika normatywnego A dla 20 przeprowadzonych próbných obciążeń dynamicznych z interpretacją wyników metodą CAPWAP.
3. Wyznaczono wartość charakterystyczną nośności pala na wciskanie:
 
$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{4012 \text{ kN}}{1,19}, \frac{3225 \text{ kN}}{1,06} \right\} = 3035 \text{ kN}.$$
4. Odczytano wartość  $\gamma_t = \gamma_R = 1,10$  współczynnika częściowego bezpieczeństwa zgodnie z zestawem R2 tablicy A.6 załącznika normatywnego A dla pali wciskanych.

5. Wyznaczono wartość obliczeniową nośności pali:  $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{3035 \text{ kN}}{1,10} = 2759 \text{ kN}$ .

Na podstawie przeprowadzonej analizy (tab. 6.) stwierdzono, że wszystkie pale próbne wbite na omawianym obszarze zapewniają spełnienie warunku stanu granicznego nośności  $F_{c,d} = 2450 \text{ kN} \leq R_{c,d} = 2759 \text{ kN}$ . Nadwyżka nośności wynosi ok. 15% w stosunku do potrzeb.

Nośności i bezpieczeństwo pali na podstawie badań wg PN-EN 1997-1 (Załącznik A, Tabele A9-A11)

Liczba badań	20	szt.
Minimalna wartość nośności granicznej	3225	kN
Średnia wartość nośności granicznej	4021	kN
Współczynnik korelacji dla wartości nośności minimalnej $\xi_{min}$	1.25	
Współczynnik korelacji dla wartości nośności średniej $\xi_{avg}$	1.4	
Rodzaj badań	Badania dynamiczne z analizą typu CAPWAP	
Współczynnik korekcyjny wynikający z rodzaju analizy	0.85	
Szytwe zwińczenie pali	TAK	
Współczynnik wynikający ze sztywności zwińczenia	1.0	
Nośność charakterystyczna	3035	kN
Sposób pracy pala	Wiskane	
Współczynnik bezpieczeństwa (podejście obliczeniowe 2)	1.1	
Nośność obliczeniowa	2759	kN
Całkowity współczynnik bezpieczeństwa dla nośności $SF_{min}$	1.17	
Całkowity współczynnik bezpieczeństwa dla nośności $SF_{avg}$	1.46	

Nośności graniczne określone na podstawie badań

Lp.	Nośność graniczna w [kN]
1	3754
2	3483
3	3840
4	3233
5	3309
6	3225
7	3801
8	4807
9	4756
10	3725
11	4612
12	4812
13	4503
14	3774
15	3445
16	5251
17	3346
18	4354
19	4643
20	3745

**UWAGA!** W przypadku określania nośności na wyciąganie należy dobierać właściwe sposoby badań:  
- badania statyczne;  
- sondowania gruntu lub  
- badania dynamiczne z analizą typu CAPWAP.

Rys. 4. Zrzut ekranu prostego arkusza kalkulacyjnego do wyznaczania nośności pali zgodnie z Eurokodem 7 na podstawie wyników badań nośności pali lub podłoża

Fig. 4. Screen shot of a simple worksheet for calculating pile capacity according to Eurocode 7 on the basis of test loading results or soil investigation results

W celu weryfikacji przyjętej procedury projektowania, po zakończeniu robót palowych na podstawie metryk (wstępów) wytypowano dwa najsłabsze pale i przeprowadzono na nich kontrolne próbne obciążenia statyczne. W wyniku badań otrzymano nośności graniczne podane w przykładzie 1.

Opierając się na analizie zgodnej z wymaganiami Eurokodu 7, dla dwóch wyników próbnych obciążeń statycznych w przykładzie 1. otrzymano nośność obliczeniową  $R_{c,d} = 2583$  kN (rys. 5.). Różnica wartości nośności obliczeniowych określonych na podstawie wyników badań statycznych i dynamicznych wynika m.in. z liczby przeprowadzonych badań każdego rodzaju, przyjętych wartości współczynników korelacyjnych oraz normowej możliwości uwzględnienia sztywności oczepu w przypadku wyników badań statycznych. Jednak w przypadku próbnych obciążeń statycznych wykonanych na wybranych najsłabszych palach uprawnione jest przyjęcie współczynników korelacyjnych na poziomie  $\xi_1 = \xi_2 = 1,0 \div 1,05$ . Aby uzyskać porównywalne wyniki, w analizie należy pominąć również wpływ sztywności oczepu. Wówczas nośność obliczeniowa pala wyznaczona na podstawie badań statycznych mieściłaby się w przedziale  $R_{c,d} = 2683 \div 2818$  kN, który zawiera również nośność określoną na pod-

*Nośności i bezpieczeństwo pali na podstawie badań wg PN-EN 1997-1 (Załącznik A, Tabele A9-A11)*

Liczba badań	2	szt
Minimalna wartość nośności granicznej	3100	kN
Średnia wartość nośności granicznej	3475	kN
Współczynnik korelacji dla wartości nośności minimalnej $\xi_{min}$	1	
Współczynnik korelacji dla wartości nośności średniej $\xi_{avg}$	1	
Rodzaj badań	Badania statyczne	
Współczynnik korekcyjny wynikający z rodzaju analizy	1	
Sztywne zwięźcenie pali	TAK	
Współczynnik wynikający ze sztywności zwięźcenia	1.0	
Nośność charakterystyczna	3100	kN
Sposób pracy pala	Wcisłane	
Współczynnik bezpieczeństwa (podejście obliczeniowe 2)	1.1	
Nośność obliczeniowa	2818	kN
Całkowity współczynnik bezpieczeństwa dla nośności $SF_{min}$	1.10	
Całkowity współczynnik bezpieczeństwa dla nośności $SF_{avg}$	1.23	

*Nośności graniczne określone na podstawie badań*

Lp.	Nośność graniczna w [kN]
1	3850
2	3100
3	
4	
5	
6	

**UWAGA!** W przypadku określania nośności na wyciąganie należy dobrać właściwe sposoby badań:  
 - badania statyczne;  
 - sondowania gruntu lub  
 - badania dynamiczne z analizą typu CAPWAP.

Rys. 5. Zmodyfikowana analiza nośności na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych (opis w tekście)

Fig. 5. Modified analysis of pile capacity based on static load test results (description included)

Tabela 6. Realizacja procedury obliczeniowej określania nośności pali prefabrykowanych wbijanych na podstawie wyników badań DLT z interpretacją CAPWAP i jej wyniki uzależnione od liczby badań

Table 6. Use of calculation procedure for determining capacities of precast driven piles on the basis of DLT results and CAPWAP analysis and its results dependent on the number of tests

Etap obliczeń wg procedury	Parametr	Liczba pali				
		2	4	8	16	20
1.	$R_{c,m_{mean}}$ [kN]	3619	3578	3682	4021	4021
	$R_{c,m_{min}}$ [kN]	3483	3233	3225	3225	3225
2.	$\xi_5$	1,5	1,6	1,5	1,42	1,4
	$\xi_6$	1,6	1,5	1,32	1,25	1,25
	współczynnik korekcyjny ze względu na rodzaj analizy	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
3.	$R_{c,k}$ [kN]	2661	2536	2810	3035	3035
4.	$\gamma_i = \gamma_R$	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
5.	$R_{c,d}$ [kN]	2419	2305	2555	2759	2759

stawie wyników badań dynamicznych 20 pali rozmieszczonych w obszarze fundamentu. Można zatem uznać, że w omawianym przypadku wnioskowanie na podstawie wyników badań dynamicznych było bezpieczne, a zaprojektowane w ten sposób pale spełniają wymagania projektu.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w opracowaniu praktyczne procedury obliczeniowe prowadzą do określenia nośności obliczeniowej  $R_{c,d}$  pali na podstawie wyników badań nośności lub/i podłoża.

Opisane na przykładzie żelbetowych pali wbijanych sposoby wyznaczania nośności pali oparte na wynikach badań nośności pali (statycznych i dynamicznych) powinny być stosowane we wszystkich średnich i dużych fundamentach palowych, w przypadku których bezpośrednio koszty robocizny i materiałów mają zasadniczy wpływ na koszt robót palowych. Wymaga to uwzględnienia w harmonogramie realizacji inwestycji **czasu na przeprowadzenie badań** nośności pali oraz **aktywnego udziału projektanta fundamentu palowego** w realizacji robót palowych.

W projekcie budowlanym nie należy przedstawiać zamkniętego rozwiązania posadowienia. Na tym etapie projektowania należy dokonać wyboru sposobu fundamentowania obiektu (fundament bezpośredni/pale), dobrać lub wykluczyć określone technologie palowania (pale przemieszczeniowe lub wiercone) oraz podać jednoznaczne kryteria spełnienia poszczególnych stanów granicznych i zapewnienia wymaganej trwałości. **Szczegóły efektywnego ekonomicznie i bezpiecznego rozwiązania fundamentu palowego** powinny być ustalone

**m.in. opisanymi w pracy metodami na etapie projektu wykonawczego w trakcie realizacji robót palowych.**

Tradycyjnie w Polsce najczęstsze zastosowanie ma i zapewne nadal będzie miał sposób określania nośności pali wykorzystujący metody obliczeniowe oparte na badaniach podłoża. Metoda określania nośności według PN-83/B-02482 po blisko 30 latach stosowania wymaga pilnej aktualizacji opisu i oznaczeń oraz uzgodnienia poziomu niezawodności w celu dostosowania do wymagań Eurokodu 7. Wykorzystanie innych metod wymaga uprzedniej analizy zakresu ich stosowalności w rozpatrywanych warunkach gruntowych i dla wybranej technologii palowania oraz sporej ostrożności wyrażanej w praktyce weryfikacją próbnymi obciążeniami.

Na koniec warto podkreślić, że spełnienie warunku stanu granicznego nośności w zakresie geotechnicznym (GEO) **nie zwalnia projektanta z obowiązku sprawdzenia pozostałych stanów granicznych**, tj. nośności trzonu pala (STR) oraz użytkowości w zakresie konstrukcyjnym (zarysowanie) i geotechnicznym (osiadanie, różnice osiadań) **z wykorzystaniem adekwatnych kombinacji oddziaływań**. Ze względu na wykorzystywane w Eurokodzie 7 i opisane procedury projektowania geotechnicznego pali w stanie granicznym nośności (GEO) ze stosunkowo niskimi wartościami współczynników bezpieczeństwa rozdzielanie stanów granicznych nośności i użytkowości w zakresie geotechnicznym jest znacznie ostrzejsze niż dotychczas. W fundamentach palowych zaprojektowanych zgodnie z wymaganiami eurokodów zdecydowanie rzadziej niż dotychczas będzie miał uzasadnienie często w praktyce spotykany pogląd, że zapewnienie nośności pali niejako automatycznie zagwarantuje spełnienie warunków stanu granicznego użytkowości w zakresie osiadań lub/i różnicy osiadań.

Poszerzony opis wielu zagadnień jedynie zasygnalizowanych w niniejszym opracowaniu Czytelnik może znaleźć w monografii Gwizdały [14].

**Literatura**

- [1] PN-EN 1997-1. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Zasady ogólne.
- [2] prEN ISO 22477-1. Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 1: Pile load test by static axially loaded compression.
- [3] API RP 2A – LRFD. Planning Designing and Construction of Fixed Offshore Platforms – Load and Resistance Factor Design. American Petroleum Institute, 1993.
- [4] Bustamante M., Gianselli L.: Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT. Proc. of 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOP-II, Amsterdam, vol. 2, 1982, pp. 493-500.
- [5] EA-Pfähle. Recommendations on piling. DGGT/Ernst&Sohn, 2014.
- [6] Fascicule 62, Titre V. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris, 1993.
- [7] PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- [8] ASTM Designation D 4945. Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles.
- [9] CIRIA. The Observational Method. Report R185, 1999.

- [10] Goodman R.E.: Karl Terzaghi: the Engineer as Artist. ASCE PRESS, 1990.
- [11] Sobala D.: Wyznaczanie nośności geotechnicznej pali wciskanych według EC7 i metody opisanej w PN-83/B-02482. Kwartalnik Mosty, nr 6/2011.
- [12] Sobala D.: Wyznaczanie nośności geotechnicznej pali wciskanych – procedura i przykłady obliczeniowe wg Eurokodu 7. Wrocławskie Dni Mostowe. Aktualne realizacje mostowe, Wrocław 24-25 listopada 2011.
- [13] Skov R., Denver H.: Time-dependence of bearing capacity of piles. Proc. of 3rd international conference on the application of stress-wave theory to piles, B.H. Fellenius (ed.). Ottawa, Canada 1988, pp. 879-888.
- [14] Gwizdała K.: Fundamenty palowe, t. 1 i 2. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 2013.

## METHODS OF CALCULATING GEOTECHNICAL CAPACITY OF COMPRESSED PILES – CALCULATION PROCEDURES AND EXAMPLES ACCORDING TO EUROCODE 7

### Summary

The article provides an overview of basic methods of calculating geotechnical bearing capacity of piles in accordance with the provisions of PN-EN 1997-1 (Eurocode 7): Geotechnical Design – General Rules, based on the results of static load tests, soil investigation and results of dynamic load tests: pile capacities with high deformations or pile sets/dynamic formulas. Each method of calculating bearing capacities of compressed piles is presented in the form of a calculation procedure applying design methods alternative to the widely used methods pursuant to PN-83/B-02482. They are furthermore illustrated with examples of calculation based on real data from actual driven reinforced concrete pile applications. Pile capacities determined by means of various methods are always verified with alternative methods according to the requirements of Eurocode 7. Comparison of the results of design and verification of capacities of compressed piles proves coherence of design concepts assumed in Eurocode 7 and possibility of alternative applications of particular pile design methods, depending on project conditions and requirements. The examples of pile designs provided in the article also show a wide scale of possibilities in Eurocode 7 concerning an active approach to calculation of design capacities and corresponding safety level by adopting an adequate design method and correct determination of scope and type of tests.

**Keywords:** pile limit capacity, design capacity, characteristic pile capacity, pile tests, soil investigation, pile sets

*Przesłano do redakcji: 26.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 02.06.2014 r.*

DOI:10.7862/rb.2014.20