

EUROKODY

praktyczne komentarze

Niniejszy skrypt to kolejne opracowanie w cyklu publikacji na temat podstaw projektowania konstrukcji budowlanych według aktualnie obowiązujących norm opartych na EUROKODACH. Każdy skrypt to teoria przedstawiona w przystępny sposób oraz przykłady, które prowadzą krok po kroku przez proces wymiarowania.

Skrypt 6

WSTĘP.....	E02
NOWA KLASYFIKACJA WG ISO.....	E02
KATEGORIE GEOTECHNICZNE I STANY GRANICZNE.....	E03
PODEJŚCIA OBLICZENIOWE (DA)	E04
PODSTAWOWE WYTYCZNE PROJEKTOWE I WYKONAWCZE	E05
STANY GRANICZNE NOŚNOŚCI.....	E06
STANY GRANICZNE UŻYTKOWALNOŚCI.....	E10
PRZYKŁAD OBLICZENIOWY.....	E11
PODSUMOWANIE	E16
BIBLIOGRAFIA.....	E16

Część 6. Eurokod 7

Projektowanie posadowień bezpośrednich

Wstęp

W poprzednich numerach ArCADia-PRESS na „błękitnych stronach” została przedstawiona różnorodna tematyka dotycząca projektowania konstrukcji wg przyjętych norm europejskich. Poniższy artykuł jest kontynuacją serii Eurokody – praktyczne komentarze, a traktować będzie o projektowaniu posadowień bezpośrednich z uwzględnieniem zapisów dokumentu Eurokod PN-EN 1997-1:2008 Projektowanie geotechniczne (zwanego dalej Normą). Norma ta jest obszernym zbiorem przepisów i wymagań dotyczących projektowania geotechnicznego. Wprowadza ona konieczność znacznie bardziej niż dotychczas złożonej analizy stanów granicznych nośności i użytkowalności fundamentów konstrukcji budowlanych. Dodatkowo, od 2006 roku obowiązuje nowa klasyfikacja gruntów wg norm PN-EN ISO, która znacząco zmienia zarówno klasyfikację, jak i nazewnictwo gruntów.

Niniejszy tekst ma za zadanie w przystępny sposób przybliżyć Państwu sposób postępowania w przypadku obliczeń fundamentów bezpośrednich. Teoria oraz odpowiednia procedura zostanie poparta praktycznym przykładem. W tym miejscu trzeba raz jeszcze podkreślić, iż jedynie kompleksowe stosowanie norm europejskich w całym procesie modelowania konstrukcji jest miarodajne i zabrania się stosowania współbieżnie Eurokodów i np. dotychczasowych norm krajowych (z wyłączeniem przypadku, gdy zawarte w nich metody są zgodne i dopuszczone do stosowania jako uzupełnienie metod podanych w Eurokodzie). Ilustracja tej dygresji zawarta jest w poniższej uwadze:

Uwaga:

Ze względu na inne podejście do częściowych współczynników bezpieczeństwa po stronie obciążeń i wytrzymałości materiału w normach PN i PN-EN, nie wolno w ramach jednego projektu stosować jednocześnie w obliczeniach norm PN i PN-EN.

Zawsze powinien być stosowany albo zestaw jednych, albo zestaw drugich.

Nowa klasyfikacja wg ISO

Zasadniczą zmianą w podejściu do opisu gruntu według ISO jest przypisanie większego znaczenia makroskopowemu rozpoznaniu gruntów niż miało to miejsce w PN. ISO wprowadza inne próby makroskopowe do określenia rodzaju gruntu spoistego, uproszczony został sposób określenia stanu gruntu (tylko na podstawie obserwacji zachowania się gruntu pod naciskiem palców). Pracochłonna próba wałeczowania stosowana jest tylko do oznaczenia granicy plastyczności i granicy spoistości. Określenie rodzaju gruntu dokonuje się w drodze graficznej interpretacji na trójkacie (tzw. „trójkąt ISO”) i ściśle z nim związanym diagramie. Norma PN wyróżniała łącznie 20 gruntów gruboziarnistych i drobnoziarnistych, natomiast ISO zmieniła i rozszerzyła tę klasyfikację do 32 jednostek. Ponadto pojawiły się zmiany mniejszej wagi, m.in.: zmodyfikowane granice frakcji klasyfikacyjnych gruntu (piaski zaliczono do gruntów gruboziarnistych), wprowadzono dodatkowy stan gruntu niespoistego – bardzo luźny, stan płynny gruntu spoistego określa się już od $IL > 0,75$, nie ma wyróżnionych stanów gruntów według stopnia wilgotności.

Rodzaj gruntu

Tabela 1. przedstawia podstawowy podział na frakcje w zależności od wymiarów cząstek.

Nazwa gruntu jest zdeterminowana przez frakcję o przeważającej masie w danym gruncie, tzw. frakcję główną. Zapisuje się ją rzeczownikiem na początku nazwy gruntu. Większość gruntów składa się z frakcji głównej i frakcji drugorzędnych. Frakcję drugorzędną i ewentualnie kolejne wymienia się wtedy, gdy uznajemy, że mogą one mieć

Tabela 1. Frakcje gruntów			
Grupy gruntów	Frakcje	Symbole	Wymiary cząstek mm
Bardzo gruboziarniste	Duże głazy (Large boulder)	LBo	> 630
	Głazy (Boulder)	Bo	> 200–630
	Kamienie (Cobble)	Co	> 63–200
Gruboziarniste	Żwir (Gravel)	Gr	> 2,0–63
	Żwir gruby (Coarse gravel)	CGr	> 20–63
	Żwir średni (Medium gravel)	MGr	> 6,3–20
	Żwir drobny (Fine gravel)	FGr	> 2,0–6,3
	Piasek (Sand)	Sa	> 0,063–2,0
	Piasek gruby (Coarse sand)	CSa	> 0,63–2,0
	Piasek średni (Medium sand)	MSa	> 0,2–0,63
	Piasek drobny (Fine sand)	FSa	> 0,063–0,2
Drobnoziarniste	Pył (Silt)	Si	> 0,002–0,063
	Pył gruby (Coarse silt)	CSi	> 0,02–0,063
	Pył średni (Medium silt)	MSi	> 0,0063–0,02
	Pył drobny (Fine silt)	FSi	> 0,002–0,0063
	Łt (Clay)	Cl	≤ 0,002

wpływ na właściwości inżynierskie gruntu i wówczas zapisuje się ją przymiotnikowo za frakcją główną, np. żwir piaszczysty (saGr), ił pylasty (siCl) lub ze spójnikiem „z” np. piasek z drobnym żwirem (fgrSa), żwir drobny z piaskiem (saFGr) lub z wyrazem „domieszka”, np. pył z piaskiem grubym z domieszką żwiru drobnego (fgrcsaSi). W oznaczeniach literowych istotna jest kolejność wymieniania frakcji, która definiuje schemat: na początku podaje się frakcje drugorzędne w kolejności ważności (zaczynając od mniej istotnej), zapisywane małymi literami, a na końcu frakcję główną, zapisywaną dużą literą. Grunty stanowiące przewarstwienia wymienia się za frakcją główną; w oznaczeniach literowych grunt przewarstwienia podaje się za frakcją główną, małymi literami podkreślonymi: np. ił pylasty przewarstwiony piaskiem (siClsa). Jeżeli w przypadku gruntów gruboziarnistych występują dwie frakcje główne w jednakowych proporcjach, to pomiędzy ich symbolami umieszcza się ukośnik, np.: żwir/piasek: Gr/Sa; piasek drobny/średni: FSa/MSa

Oznaczanie i opis gruntów

Oznaczanie gruntu – określanie nazwy gruntu i opis na podstawie uziarnienia, rodzaju materiału, właściwości składników mineralnych lub organicznych oraz plastyczności.

Wstępne oznaczanie wykonuje się z uwzględnieniem takich właściwości gruntu, jak:

- wymiar ziarna
- skład gruntu (frakcja główna, frakcja/e drugorzędne)

- spoistość
- zawartość części organicznych
- nieciągłości i warstwowanie
- geneza gruntu

Oprócz oznaczenia gruntu należy podać stan, w jakim grunt znajduje się w złożu, wszelkie drugorzędne składniki, inne cechy gruntu, takie jak zawartość węglanów, kształt cząstek, szorstkość powierzchni, zapach, używane nazwy lokalne i klasyfikację geologiczną.

Bardziej dokładne oznaczanie i klasyfikowanie oparte na uziarnieniu, plastyczności lub zawartości części organicznych przeprowadza się **na podstawie badań laboratoryjnych i to one właśnie powinny być podstawą do rozpoczęcia projektowania posadowienia w większości przypadków**. Wymóg ten wynika bezpośrednio z parametrów jakie wykorzystywane są w obliczeniach, a ich ustalenie najczęściej możliwe jest jedynie na podstawie badań laboratoryjnych.

Kategorie geotechniczne i stany graniczne

Norma rozróżnia sposób projektowania zależnie od trzech kategorii geotechnicznych. Wyróżnione zostały proste przypadki, które można bezpiecznie rozwiązać w oparciu o jakościowe badania gruntu i doświadczenie – kategoria geotechniczna 1 (np. 1- lub 2-kondygnacyjne budynki mieszkalne i gospodarcze). Przypadki obejmujące obiekty budowlane posadawiane w prostych i złożonych warunkach gruntowych, wymagające ilościowej i jakościowej oceny danych geotechnicznych i ich ana-

lizy (kategoria geotechniczna 2), np. fundamenty bezpośrednie lub głębokie. Ostatnia trzecia kategoria geotechniczna odnosi się do skomplikowanych warunków gruntowych i obiektów nietypowych bądź o złożonej konstrukcji. W skrypcie nacisk zostanie położony na metodologię projektowania w przypadku kategorii 2.

Norma wprowadza następujące podstawowe stany graniczne:

- EQU – utrata równowagi konstrukcji lub podłoża rozpatrywanych jako ciało sztywne, gdy wytrzymałość materiałów konstrukcji i gruntu nie ma znaczenia
 - STR – zniszczenie lub nadmierna deformacja fundamentów, w którym decydującą rolę odgrywa wytrzymałość fundamentów lub elementów konstrukcji współpracujących z podłożem gruntowym
 - GEO – zniszczenie lub nadmierna deformacja podłoża gruntowego, w którym podstawowe znaczenie ma wytrzymałość podłoża
 - STA – utrata stateczności globalnej lub nadmierne deformacje gruntu, w którym również decydujące są parametry wytrzymałościowe gruntu
 - UPL – zniszczenie przez wypiętrzenie fundamentu, np. na skutek wyporu wody, gdzie decydujące znaczenie ma ciężar konstrukcji
 - HYD – zniszczenie spowodowane ciśnieniem spływowym (nadmiernym spadkiem hydraulicznym)
- Spełnienie warunków stanu STR najczęściej zostaje zapewnione poprzez odpowiedni dobór zbrojenia fundamentu.

Stan GEO możemy przestawić jako zestawienie poniższych warunków dotyczących podłoża pod fundamentem:

- wyczerpania nośności na skutek przebiccia lub wypierania
- utraty stateczności na skutek przesunięcia (poślizg)
- utraty ogólnej stateczności podłoża pod obiektem
- łącznej utraty stateczności podłoża i zniszczenia konstrukcji
- zniszczenia konstrukcji na skutek przemieszczenia fundamentu
- nadmiernych osiadań
- nadmiernych wypiętrzeń spowodowanych pęcznieniem, przemarzaniem lub innymi przyczynami
- niedopuszczalnych drgań

Przy tym pierwszych pięć warunków wywodzi się ze stanów granicznych nośności, a pozostałe są stanami granicznymi użyteczności. Szczęśliwie w większości przypadków obliczenia sprowadzają się do sprawdzenia pierwszych dwóch warunków.

Stany STA, UPL, HYD nie będą rozpatrywane ze względu na ich specyficzny charakter.

Podejścia obliczeniowe (DA)

Norma wprowadza do analizy trzy równorzędne podejścia obliczeniowe, które różnią się między sobą wartościami zastosowanych współczynników częściowych. Współczynniki te są stosowane do oddziaływań lub wyników oddziaływań „A”, do parametrów gruntu „M”, lub do odporów „R”. Wartości współczynników częściowych różnią się nie tylko ze względu na przyjęte podejście obliczeniowe, ale również ze względu na rodzaj zadania geotechnicznego (konstrukcje oporowe, pale itp.). Wartości współczynników częściowych są zdefiniowane w Załączniku A do normy. Nadmienić należy, że ze względu na różne kombinacje współczynników częściowych, wyniki uzyskane przy pomocy każdego z podejść mogą znacząco różnić się między sobą.

Ogólnie podejścia można opisać w sposób następujący:

- DA 1 – współczynniki dotyczą oddziaływań oraz parametrów materiałowych
- DA 2 – współczynniki dotyczą oddziaływań i odporu (nośności).
- DA 3 – współczynniki dotyczą oddziaływań i jednocześnie materiałów (parametrów materiałowych gruntu).

W przypadku stosowania normy na terenie Polski został ustanowiony załącznik krajowy, gdzie zostało postanowione, iż dla stanów granicznych nośności podłoża (GEO) należy stosować:

- Przy sprawdzaniu stateczności ogólnej – podejście obliczeniowe 3 (DA 3)
- Przy sprawdzaniu pozostałych stanów granicznych – podejście obliczeniowe 2 (DA 2)

W podejściu obliczeniowym 2. obliczenia należy wykonać przyjmując wszystkie wartości charakterystyczne, a współczynniki częściowe stosować przy sprawdzaniu warunku nośności, tj. opór graniczny podłoża należy wyznaczać przyjmując wartość współczynnika obciążeń $\gamma_F = 1,0$ (podejście 2*). Powyższe sprawdzenie można skrótowo zapisać w postaci:

$$E_d = E(\gamma_F F_{rep}) \leq R(X_k) / \gamma_R = R_d \quad (1)$$

Zapis ten oznacza, że przy wyznaczaniu wartości obliczeniowych oddziaływań gruntowych stosować się będzie częściowy współczynnik oddziaływania, a wartość charakterystyczna oddziaływania gruntu wyznaczona będzie na podstawie wartości

charakterystycznych parametrów gruntowych. Również opór graniczny gruntu wyznaczany będzie na podstawie wartości charakterystycznych parametrów gruntu, a jego wartość charakterystyczna będzie dzielona przez częściowy współczynnik materiałowy do oporu granicznego gruntu. Tablice 2-4 zestawiają współczynniki częściowe stosowane w przypadku DA 2, określonego przez kombinacje zestawów współczynników postaci:

$$DA 2: „A1” + „R2” + „M1” \quad (2)$$

Tabela 2. Współczynniki częściowe do oddziaływań lub do efektów oddziaływań				
Oddziaływanie		Symbol	Zestaw	
			A1	A2
Stałe	Niekorzystne	γ_G	1,35	1,0
	Korzystne		1,0	1,0
Zmienne	Niekorzystne	γ_Q	1,5	1,3
	Korzystne		0	0

Tabela 3. Współczynniki częściowe do oporu/nośności				
Nośność	Symbol	Zestaw		
		R1	R2	R3
Nośność podłoża	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4	1,0
Przesunięcie (poślizg)	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1	1,0

Tabela 4. Współczynniki częściowe do parametrów geotechnicznych				
Parametr gruntu	Symbol	Zestaw		
		M1	M2	
Kąt tarcia wewnętrznego ^a	γ_φ	1,0	1,25	
Spójność efektywna	γ_c	1,0	1,25	
Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu	$\gamma_{cu'}$	1,0	1,4	
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe	γ_{qu}	1,0	1,4	
Ciężar objęściowy	γ_γ	1,0	1,0	

^a Współczynnik ten stosuje się do wartości $\tan \varphi'$

Podstawowe wytyczne projektowe i wykonawcze

Rozpoznanie geotechniczne

Przed przystąpieniem do projektowania posadowienia należy wykonać rozpoznanie geotechniczne, którego celem jest ustalenie rodzaju i stanu gruntu podłoża. Zakres rozpoznania zależy od wyżej wspomnianej kategorii geotechnicznej ustalonej przez uprawnionego projektanta

ta w porozumieniu z geotechnikiem. Kategoria ta, gdy zostaną stwierdzone inne niż zakładane warunki geotechniczne, zostaje zmieniona. W przypadku pierwszej kategorii geotechnicznej (zgodnie z rozporządzeniem z dnia 25.04.2012 Dz.U. z 2012 poz. 463) zakres badań geotechnicznych może być ograniczony do wierceń i sondowań oraz określenia rodzaju gruntu na podstawie analizy makroskopowej. Wartości parametrów geotechnicznych można określać przy wykorzystaniu lokalnych zależności korelacyjnych. Dla obiektów budowlanych drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej zakres badań, poza badaniami jak dla kategorii 1, powinien być zależny od przewidywanego stopnia skomplikowania warunków gruntowych oraz specyfiki i charakteru obiektu budowlanego lub rodzaju planowanych robót geotechnicznych oraz określać:

- rodzaj gruntów;
- fizyczne i mechaniczne parametry gruntu, takie jak: kąt tarcia wewnętrznego, spójność, wytrzymałość na ścinanie bez odpływu, moduł ścisłości lub odkształcenia, uzyskane w badaniach laboratoryjnych lub w terenie, w szczególności za pomocą takich metod, jak:
 - sondowania statyczne i dynamiczne,
 - badania presjometryczne i dylatometryczne,
 - badania sondą krzyżakową,
 - badania próbnymi obciążeniami gruntu;
- w zależności od potrzeb fizykochemicznych – właściwości wód gruntowych.

Dla obiektów budowlanych trzeciej kategorii geotechnicznej zakres badań powinien ponadto być uzupełniony badaniami niezbędnymi do przeprowadzenia obliczeń analitycznych i numerycznych dla przyjętego modelu geotechnicznego podłoża, w uzgodnieniu z wykonawcą specjalistycznych robót geotechnicznych.

Głębokość posadowienia

Przy ustalaniu głębokości posadowienia fundamentów wymaga się uwzględnienia następujących czynników:

- osiągnięcie odpowiednio nośnego podłoża,
- głębokość, powyżej której pęcznienie i skurcz gruntów spoistych, wynikające z sezonowych zmian pogody oraz wpływu drzew i krzewów, mogą spowodować znaczące przemieszczenia,
- głębokość, powyżej której mogą nastąpić uszkodzenia spowodowane przemarzaniem gruntu,
- poziom zwierciadła wody gruntowej w podłożu oraz trudności, jakie mogą się pojawić, jeśli

wykop trzeba będzie wykonać poniżej zwierciadła wody,

- wpływ wykopu na sąsiednie fundamenty i konstrukcje,
- wpływ przewidywanych wykopów na sieci podziemne,
- wysokie i niskie temperatury wywołane przez projektowany obiekt,
- możliwość podmycia,
- obecność w gruncie materiałów rozpuszczalnych.

Norma nie wymaga minimalnego zagłębienia fundamentu w gruncie, równego 0,5 m (jak to było dotychczas). Istnieje natomiast ogólne wymaganie zabezpieczenia podłoża pod fundamentem przed podmyciem. Dlatego, jeżeli nie stosuje się innych zabezpieczeń przed rozmyciem podłoża (np. na skutek wód opadowych czy awarii instalacji wodnej), wymagane zagłębienie fundamentu 0,5 m powinno się zachować.

Wymiary fundamentu

Podstawowym wymaganiem jest takie dobranie wymiarów fundamentów, aby przekazane przez fundament siły nie spowodowały utraty nośności podłoża ani nadmiernych osiadań fundamentów. Różnice względem dotychczas obowiązującej normy polskiej w geometrii fundamentu wynikać mogą z braku ograniczeń co do rozmiarów mimośrodów obciążeń, jaki można dopuścić, wymaga się jedynie aby przy mimośrodkach większych od 1/3 wymiaru fundamentu, przy ocenie nośności szczególnie dokładnie analizować obliczeniowe wartości obciążeń oraz uwzględniać niekorzystne odchyłki w wymiarach fundamentu (zaleca się dodawać 0,10 m).

Stany graniczne nośności

Sprawdzenie pierwszego stanu granicznego według Eurokodu 7 sprowadza się do wykazania, że:

$$E_d \leq R_d \quad (3)$$

gdzie:

E_d – jest to wartość obliczeniowa efektu oddziaływań,
 R_d – jest wartością oporu przeciw oddziaływaniu.

Poniżej zestawiono ogólne formuły uproszczone poprzez uwzględnienie rekomendowanego podejścia obliczeniowego DA 2.

Wartości obliczeniowe dla oddziaływań można wyrazić za pomocą zależności:

$$F_d = \gamma_F \cdot F_{rep} \quad (4)$$

gdzie:

F_{rep} – odpowiednia wartość reprezentatywna oddziaływania,
 γ_F – współczynnik częściowy dla oddziaływania, uwzględniający niekorzystne odchylenia wartości.

Wartości obliczeniowe dla właściwości gruntu można wyrazić za pomocą zależności:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M (= 1.0)} \quad (5)$$

gdzie:

X_k – wartość charakterystyczna parametru geotechnicznego

γ_M – współczynnik częściowy dla parametru geotechnicznego, uwzględniający niekorzystne odchyłki od wartości reprezentatywnych. Dla DA 2 wynosi on 1.0.

Wartość obliczeniową w odniesieniu do oporu gruntu należy określać z zależności:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (6)$$

gdzie:

R_k – opór charakterystyczny zależny od obliczeniowych obciążeń (F_d) oraz charakterystycznych parametrów gruntu (X_k),

γ_R – współczynnik częściowy do oporu lub nośności.

W praktyce dla typowych posadowień spełnienie stanu granicznego nośności GEO sprowadza się do sprawdzenia nośności pionowej podłoża oraz nośności gruntu na ścięcie w poziomie posadowienia. Norma rozróżnia sposób obliczeń w zależności od typu warunków gruntowych. Podział ten określony został poprzez obliczenia dla warunków „z odpływem” oraz warunków „bez odpływu”. W przypadku gruntów sypkich – gruboziarnistych (struktura pozwala na łatwe rozpraszanie się nadwyżki ciśnienia porowego wody) wystarczającym jest przeprowadzenie obliczeń „z odpływem”. W przypadku nawodnionych gruntów drobnoziarnistych miarodajne jest sprawdzenie zarówno warunków „z odpływem” (sytuacja długotrwała) jak i warunków „bez odpływu” (odpowiednik sytuacji krótkotrwałej).

Nośność pionowa podłoża

Zestawienie podstawowych używanych w tej części artykułu symboli zawiera Tabela 5.

Tabela 5. Zestawienie symboli	
c_u	wytrzymałość na ścinanie
c'	spójność efektywna gruntu
Φ_k'	efektywny kąt tarcia wewnętrznego
A'	$= B' \times L'$, efektywne obliczeniowe pole powierzchni fundamentu
b	wartości obliczeniowe współczynników nachylenia podstawy, z indeksami c, q i γ
B	szerokość fundamentu
B'	efektywna szerokość fundamentu
D	zagłębienie
e	mimośród siły wypadkowej, z indeksami B i L
i	współczynniki nachylenia obciążenia, z indeksami spójności c, nacisku nadkładu q i ciężaru gruntu γ
L	długość fundamentu
L'	efektywna długość fundamentu
m	wykładnik we wzorach na współczynniki nachylenia i
N	współczynniki nośności, z indeksami c, q i γ
q	naprężenie od nadkładu lub obciążenia w poziomie podstawy fundamentu
q'	obliczeniowe efektywne naprężenie od nadkładu w poziomie podstawy fundamentu
s	współczynniki kształtu podstawy fundamentu z indeksami c, q i γ
V	obciążenie pionowe
α	kąt nachylenia podstawy fundamentu względem poziomu
γ'	obliczeniowy efektywny ciężar objętościowy gruntu poniżej poziomu posadowienia
θ	kąt kierunku działania siły H

Algorytm obliczeń dla warunków „z odpływem” (zgodnie z Załącznikiem D do EC7)

Nośność obliczeniowa może być wyznaczana ze wzoru:

$$\frac{R_k}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + g' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \quad (7)$$

z obliczeniowymi wartościami bezwymiarowych współczynników dla:

- nośności:

$$N_q = e \pi \tan \Phi_k' \tan^2 (45^\circ + \Phi_k'/2)$$

$$N_c = (N_q - 1) c \tan \Phi_k'$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \Phi_k', \text{ jeżeli } \delta \geq \Phi_k'/2 \text{ (dla szorstkiej podstawy)}$$
- nachylenia podstawy fundamentu:

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \tan \Phi_k')$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \cdot \tan \Phi_k')^2$$
- kształtu fundamentu:

$$s_q = 1 + (B'/L') \sin \Phi_k' \text{ dla prostokąta,}$$

$$s_q = 1 + \sin \Phi_k' \text{ dla kwadratu lub koła,}$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 (B'/L') \text{ dla prostokąta,}$$

$s_\gamma = 0,7$ dla kwadratu lub koła,

$s_c = (s_q N_q - 1) / (N_q - 1)$ dla prostokąta, kwadratu lub koła,

- nachylenia obciążenia, spowodowanego obciążeniem poziomym H:

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_c \tan \Phi_k')$$

$$i_q = [1 - H / (V + A' c' \tan \Phi_k')]^m$$

$$i_\gamma = [1 - H / (V + A' c' \cot \Phi_k')]^{m+1}$$

gdzie:

$m = m_b = [2 + (B / L')] / [1 + (B' / L')]$ gdy H działa w kierunku B' ;

$m = m_L = [2 + (L' / B')] / [1 + (L' / B')]$ gdy H działa w kierunku L' .

W przypadkach, gdy składowa pozioma obciążenia działa w kierunku tworzącym kąt θ z kierunkiem L' , wartość m można obliczyć ze wzoru:

$$m = m_\theta = m_L \cos^2 \theta + m_b \sin^2 \theta. \quad (8)$$

Algorytm obliczeń dla warunków „bez odpływu”

Nośność obliczeniowa może być wyznaczana ze wzoru:

$$\frac{R_k}{A'} = (\pi + 2) \cdot c_u \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q \quad (9)$$

z bezwymiarowymi współczynnikami uwzględniającymi:

- nachylenie podstawy fundamentu:

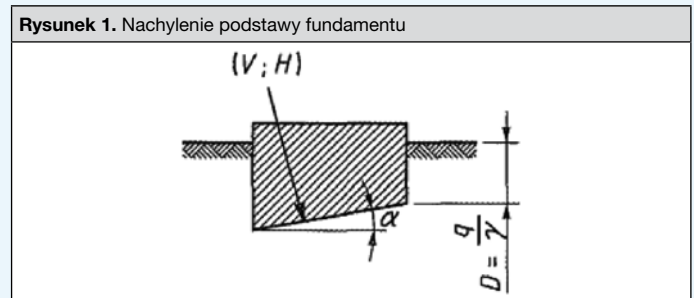
$$b_c = 1 - 2\alpha / (\pi + 2),$$
- kształt fundamentu:

$$s_c = 1 + 0,2 (B' / L') \text{ dla prostokąta,}$$

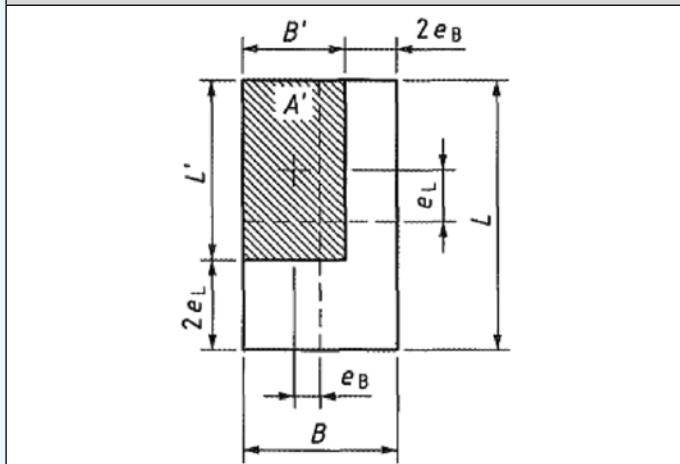
$$s_c = 1,2 \text{ dla kwadratu lub koła,}$$
- nachylenie obciążenia, spowodowane obciążeniem poziomym H:

$$i_c = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A' c_u}} \right) \quad (10)$$

z zastrzeżeniem, że $H \leq A' c_u$.



Rysunek 2. Ilustracja oznaczeń geometrii fundamentu



Nośność gruntu na ścianie

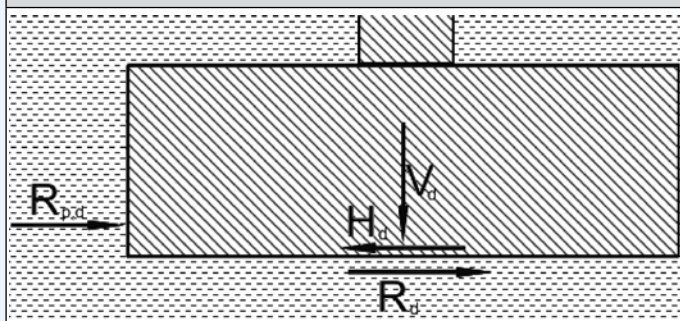
Podstawowy warunek określający dopuszczalną wartość siły poziomej ma postać:

$$H < R_d + R_{p,d} \quad (11)$$

gdzie:

H_d – wartość obliczeniowa siły poziomej przekazywanej przez fundament na grunt,
 R_d – opór graniczny podłoża pod fundamentem na ścianie,
 $R_{p,d}$ – opór graniczny podłoża na przesunięcie fundamentu.

Rysunek 3. Schemat sił w przypadku poślizgu bloku fundamentowego



Przy obliczaniu wartości oporu $R_{p,d}$ wymaga się uwzględniać możliwość usunięcia gruntu sprzed czoła fundamentu na skutek erozji (rozmycia) lub działalności człowieka. Obliczenia tego parametru powinny uwzględniać przewidywane przemieszczenia mobilizujące parcie bierne gruntu. Praktycznym bezpiecznym podejściem dla fundamentów o małej grubości jest pomijanie wartości $R_{p,d}$, ze względu na jej niską wartość. W przypadku masywnych konstrukcji, gdzie wielkość $R_{p,d}$ jest

znacząca, bezpiecznym oszacowaniem jest przyjęcie wartości oporu na podstawie parcia aktywnego gruntu. W obu poniżej przedstawionych algorytmach wartość wyliczonego oporu na ścianie w poziomie posadowienia jest ograniczona przez warunek $0,4V_d$, odnoszący się do przypadków możliwości dostania się między fundament, a grunt wody lub powietrza – co wydaje się być w praktyce sytuacją nagminną.

Algorytm obliczeń dla warunków „z odpływem”

Wartość obliczeniowa oporu granicznego gruntu pod fundamentem można wyznaczyć z zależności:

$$R_d = \min \left(\frac{V'_k + \tan(\delta_k)}{\gamma_{R,h}}; 0,4 \cdot V_d \right) \quad (12)$$

Zalecane wartości kąta tarcia fundamentu o grunt δ_k wynoszą:

- $\delta_k = \Phi'_k$ – dla fundamentów monolitycznych (wykonanych na gruncie)
- $\delta_k = 2/3 \Phi'_k$ – dla fundamentów prefabrykowanych.

Zalecany współczynnik częściowy do wartości oporu gruntu należy przyjmować na poziomie $\gamma_{R,h} = 1,1$.

Dodatkowo norma zaleca pomijać efektywną spójność gruntu.

Algorytm obliczeń dla warunków „bez odpływu”

Wartość obliczeniowa oporu granicznego gruntu pod fundamentem w tych warunkach zdefiniowana jest przez zależność:

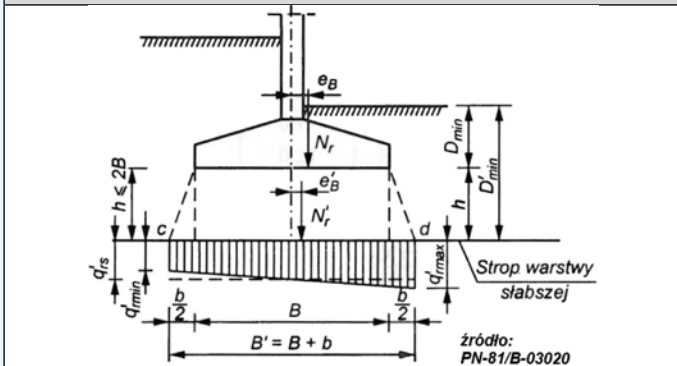
$$R_d = \min \left(\frac{A_c + c_u}{\gamma_{R,h}}; 0,4 \cdot V_d \right) \quad (13)$$

gdzie A_c to pole powierzchni podstawy przekazującej naciski na grunt: $A_c = B \cdot L$.

Obliczenia dla gruntu uwarstwionego

Eurokod 7 nie określa sposobu ustalania nośności uwarstwionego podłoża gruntowego. Problem ten należy rozwiązać przy pomocy metody stosowanej w dotychczasowych polskich normach, polegającej na przeprowadzeniu analogicznych obliczeń, lecz dla fundamentu zastępczego. Fundament ten ma odpowiednio zwiększoną podstawę oraz jest posadowiony w poziomie stropu głębiej położonej warstwy słabszej.

Rysunek 4. Wymiary zastępcze fundamentu



Wymiary poszerzenia fundamentu zależne są od grubości i gruntu warstwy usytuowanej bezpośrednio pod fundamentem i są przedstawione zależnościami:

$$B' = B + b, L' = L + b, \text{ (dla ławy } L' = L = 1,0 \text{ mb)}$$

gdzie

$b = h/3$ dla warstwy 1 z gruntu niespoistego, przy $h \leq B$ oraz przy $h > B \rightarrow b = 2/3h$

$b = h/4$ dla warstwy 1 z gruntu spoistego przy $h \leq B$ oraz przy $h > B \rightarrow b = h/3$

Przy czym jeśli $h > 2B$, nośności drugiej warstwy można nie sprawdzać.

Sprawdzenie stateczności fundamentu (EQU)

Warunek stanu równowagi statycznej przyjmuje postać:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} + T_d \quad (14)$$

gdzie

$E_{dst,d}$ jest sumą obliczeniowych oddziaływań destabilizujących obliczonych z uwzględnieniem częściowych współczynników bezpieczeństwa podanych w Tabeli 6

$E_{stb,d}$ jest sumą obliczeniowych oddziaływań stabilizujących obliczonych z uwzględnieniem częściowych współczynników bezpieczeństwa podanych w Tabeli 6

T_d – opór ścinania

Sprawdzenie to jest istotne w przypadku projektu konstrukcyjnego. Dodatkowo norma zaleca, aby w przypadku uwzględniania oporu ścinania T_d miał on niewielkie znaczenie.

Tabela 6. Współczynniki częściowe dla stanu granicznego EQU

Stałe		
Niekorzystne ^a	$\gamma_{G, dst}$	1,1
Korzystne ^b	$\gamma_{G, stb}$	0,9
Zmienne		
Niekorzystne ^a	$\gamma_{Q, dst}$	1,5
Korzystne ^b	$\gamma_{Q, stb}$	0

^a Destabilizujące

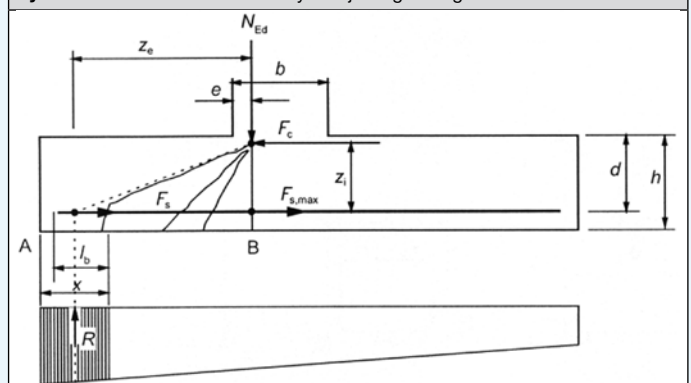
^b Stabilizujące

Obliczanie zbrojenia fundamentu – spełnienie stanu granicznego STR

Zbrojenia na zginanie

Siłę rozciągającą w zbrojeniu określa się z warunków równowagi z uwzględnieniem efektu rys ukośnych, tak jak przedstawia to Rysunek 5. Zbrojenie przenoszące siłę rozciągającą F_s w przekroju x powinno być zakotwione w betonie na tej samej odległości x od krawędzi podstawy.

Rysunek 5. Schemat obliczeniowy zbrojenia głównego fundamentu



Siłę rozciągającą, którą należy zakotwić, określa wzór:

$$F_s = R \cdot z_e / z_i \quad (15)$$

gdzie:

R – wypadkowa ciśnienia gruntu na odcinku x,

z_e – zewnętrzne ramię siły, tj. odległość między R i siłą pionową N_{Ed}

N_{Ed} – siła pionowa odpowiadająca odporowi gruntu między przekrojami A i B,

z_i – wewnętrzne ramię siły, tj. odległość między zbrojeniem i siłą poziomą F_c ,

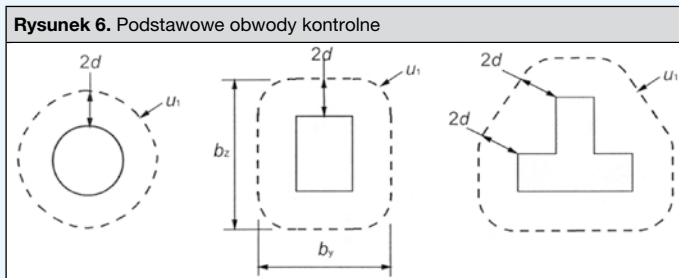
F_c – siła ściskająca odpowiadająca maksymalnej sile rozciągającej $F_{s,max}$

W uproszczeniu można przyjmować i ze określa się przy założeniu $e = 0,15b$, z_i przyjąć można jako $0,9d$.

Istotne jest, iż w prętach prostych bez końcowych zakotwień najbardziej krytyczna jest minimalna wartość x . W przybliżeniu można przyjmować ją jako $x_{\min} = h/2$. Dla innych rodzajów zakotwień bardziej krytyczne są wyższe wartości x .

Sprawdzenie przebiecia fundamentu

W przypadku stóp fundamentowych weryfikacja nośności na przebiecie sprowadza się do sprawdzenia naprężeń ścinających powstałych na kontrolnym obwodzie u (Rysunek 6.), przebiegającym w odległości $2d$ od krawędzi słupa. Naprężenia te wynikają z różnicy sił pionowych działających na fundament oraz sił oporu gruntu na obszarze pola krytycznego. W przypadku, gdy obwód kontrolny znajduje się poza obszarem fundamentu, mechanizm przebiecia nie zachodzi i w związku z tym obliczeń nie wykonuje się.



Obliczeniowa wartość nośności na ścinanie przy przebieciu jest określona wzorem:

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} 2d/a \geq 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} 2d/a \quad (16)$$

gdzie:

f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w MPa,

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad d \text{ w mm}, \quad (17)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0,02, \quad (18)$$

gdzie:

ρ_{ly} , ρ_{lz} stopnie zbrojenia odnoszące się do stali z przyczepnością odpowiednio w kierunkach y i z ;

Zalecaną wartością $C_{Rd,c}$ jest $0,18/(\gamma_c = 1,4)$, $k_1 = 0,1$.

Naprężenie przebijające określić można ze wzoru:

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{sd,red}}{u \cdot d} \quad (19)$$

gdzie

$$\beta = 1 + k \frac{M_{sd}}{V_{sd}} \cdot \frac{u}{W_1} \quad (20)$$

W_1 – wskaźnik wytrzymałości obwodu kontrolnego

k – współczynnik zależny od geometrii przekroju słupa wg Tabeli 7.

Tabela 7. Wartość współczynnika k

b_s/l_s	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,60	0,70	0,80

Stany graniczne użytkowalności

Obliczenia osiadań można prowadzić według metody naprężeń, zgodnie z polską normą PN-81/B-03020. Jest ona zgodna z zapisami Eurokodu i ze względu na jej popularność jest obecnie preferowana.

Podstawowym założeniem metody jest podział zalegającego pod stopą fundamentową gruntu na warstwy, których grubość nie przekracza $0,5 \times B$ z uwzględnieniem naturalnego rozkładu warstw geotechnicznych. Naprężenia pionowe w dowolnym punkcie pod fundamentem obliczane są wg normowego wzoru Boussinesqua:

$$\sigma_z = \frac{3 \times Q}{2 \times \pi} \times \frac{z^3}{R_0^5} \quad (21)$$

gdzie $Q = \sigma(x_s, y_s) \times dx \times dy$, przy uwzględnieniu rozkładu naprężeń pod całym fundamentem

Następnie wyznaczane są osiadania pierwotne i wtórne. Osiadania wtórne są uwzględniane tylko w przypadku, gdy czas wznoszenia budowli (od wykonania wykopów fundamentowych do zakończenia stanu surowego, z montażem urządzeń stanowiących obciążenia) jest dłuższy niż 1 rok. Osiadanie w poszczególnej warstwie jest sumą osiadania wtórnego i pierwotnego. Sumowanie osiadań poszczególnych warstw w celu wyznaczenia całkowitego osiadania fundamentu przeprowadzane jest do głębokości $z_{\max}$, na której jest spełniony warunek:

$$\sigma_{z_{\max}d} \leq 0,2 \times \sigma_{z_{\max}p} \quad (22)$$

Przykład obliczeniowy

Charakterystyka zdania

Jako ilustracja zamieszczonej powyżej części teoretycznej zostanie przedstawiony przykład obliczeniowy dotyczący zaprojektowania stopy fundamentowej. Stopa przenosić ma obciążenia od żelbetowego słupa hali magazynowej. Dla uproszczenia, w obliczeniach zostaną pominięte warstwy posadzkowe hali i zostanie przyjęty ekwiwalentny ciężar zasypki równy $18,5 \text{ kN/m}^3$. Głębokość posadowienia ze względu na lokalizację (Łódź) i spistość gruntów w podłożu przyjęto 1,2 m. Obciążenia odniesione do poziomu wierzchu fundamentu, rozdzielone na zmienne i stałe przedstawia poniższa tabela:

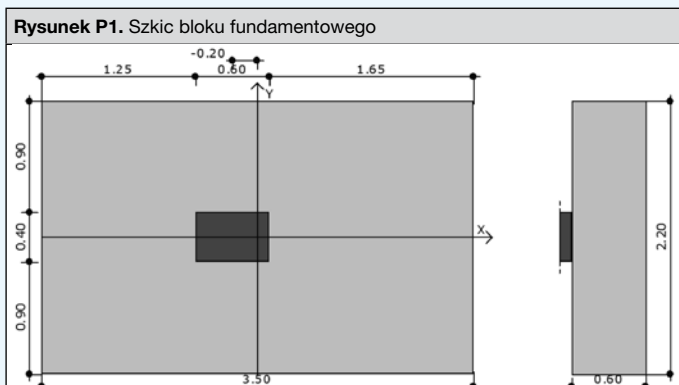
	V [kN]	MB [kNm]	ML [kNm]	HB [kN]	HL [kN]
stałe	730.0	0.00	160.0	0.00	-70.00
zmienne	150.0	65.00	120.0	35.00	-85.00

Realizacja budynku będzie trwała ponad 12 m-cy.

Założenia geometryczne

Stopę przyjęto w kształcie prostokąta prostopadłościennego bloku. Ze względu na mimośrodowe obciążenie przyjęto wstępne, kompensujące przesunięcie słupa względem fundamentu o wielkości 20 cm. Geometrię i wymiary przedstawia poniższa tabela i rysunek P1.

Szerokość stopy B	[m]	2.20
Długość stopy L	[m]	3.50
Wysokość stopy H _f	[m]	0.60
Szerokość przekroju słupa b	[m]	0.40
Wysokość przekroju słupa h	[m]	0.60
Mimośród ex	[m]	-0.20
Mimośród ey	[m]	0.00



Założenie materiałowe

Blok fundamentowy przewiduje się jako monolityczny z betonu C25/30, zbrojony prętami $\phi 16$ ze stali B500SP. Grubość otuliny zbrojenia przyjęto 70 mm. Zestawienie cech materiałów przedstawia tabela:

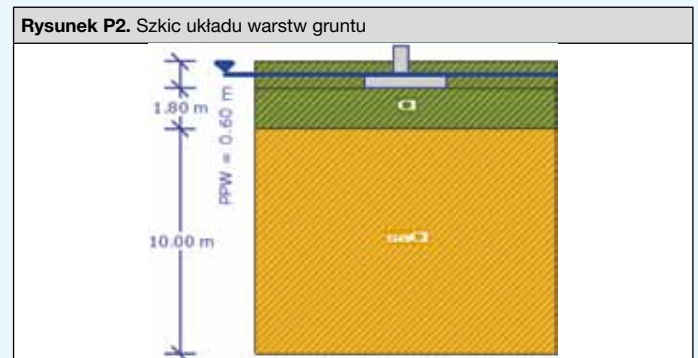
Ciężar objętościowy betonu	[kN/m ³]	25.0
Granica plastyczności stali (f_{yk})	[MPa]	500

Warunki gruntowe

Złożone warunki gruntowe scharakteryzowane są poprzez układ dwóch warstw gruntów spoistych. Zestawienie parametrów przedstawia poniższa tabela:

	Nazwa gruntu	Miąższość [m]	γ [kN/m ³]	Φ' [°]	c' [kPa]	C_u [kPa]	M [kPa]	M_o [kPa]
1	Cl	3,0	23	16	25	60	550	700
2	saCl	10,0	22	23	16	40	750	950

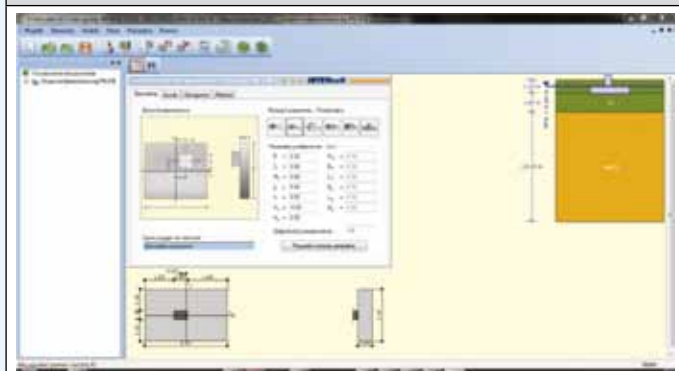
Poziom wody gruntowej jest stosunkowo wysoki i stabilizuje się na rzędnej -0,6 m poniżej poziomu terenu. Układ warstw względem posadowianego fundamentu oraz położenie zwierciadła wody gruntowej przedstawia Rysunek P2.



Wprowadzenie zadania do programu

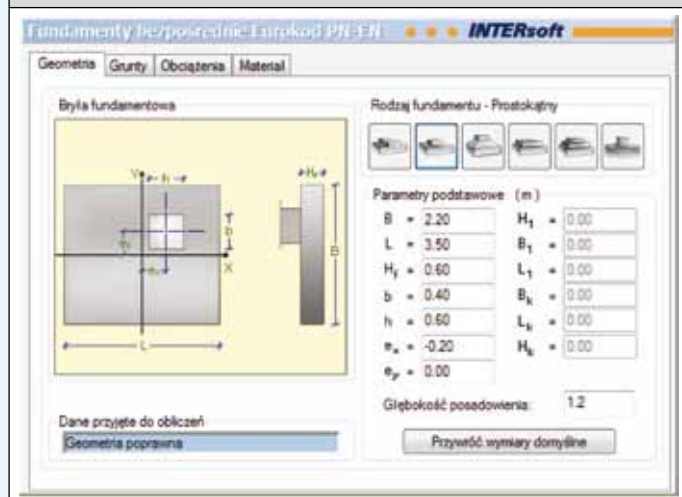
Obliczenia zostaną przeprowadzone przy pomocy programu **Konstruktor Studio 6.4**, w module **Fundamenty bezpośrednie Eurokod PN-EN** (Rysunek P3).

Rysunek P3. Okno główne programu Konstruktor Studio, moduł fundamenty bezpośrednie Eurokod PN-EN



Pierwszym krokiem podczas obliczeń fundamentu jest wprowadzenie założeń geometrycznych projektu na zakładce geometria, co przedstawione zostało na Rysunku P4.

Rysunek P4.



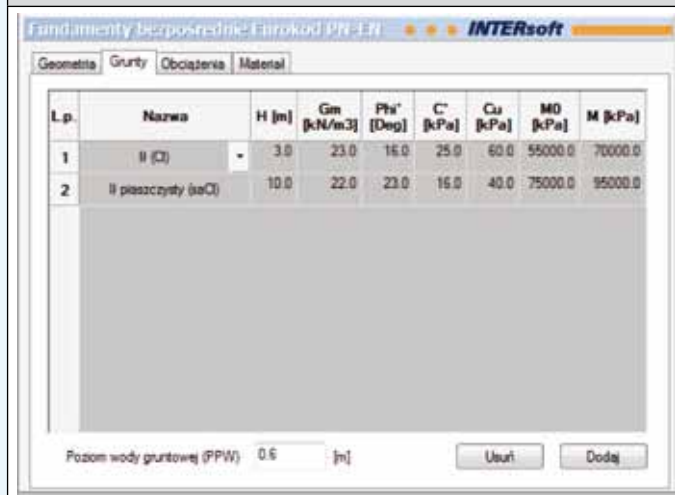
Do zdefiniowania warunków gruntowych służy zakładka Grunty. Za pomocą przycisku Dodaj zostały wprowadzone dwie warstwy gruntowe wraz z przypisaniem im odpowiednich właściwości (Rysunek P5).

Obciążenia w programie mogą być definiowane na dwa sposoby:

- Jako zestaw obciążeń zmiennych i stałych o wartościach charakterystycznych, program w tym przypadku automatycznie uwzględni współczynniki częściowe dla wartości obliczeniowych.
- Jako kompletny zestaw wartości obciążeń dla stanów granicznych nośności (ULS) i użytkowości (SLS). W tym przypadku użytkownik

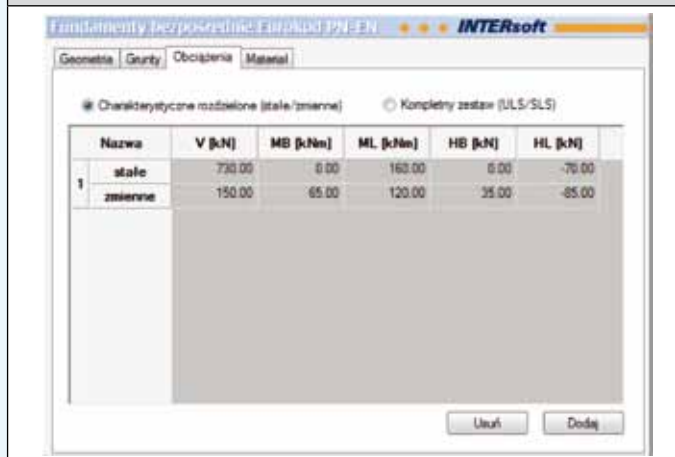
wprowadza wielkości z uwzględnionymi współczynnikami częściowymi.

Rysunek P5.



Rysunek P6 przedstawia zdefiniowane obciążenia dla rozważanego zadania:

Rysunek P6.



Ostatnim etapem definiowania zadania jest określenie materiałów konstrukcyjnych dla fundamentu. Dokonanie tego umożliwia zakładka Materiał (Rysunek P7).

Rysunek P7.

Obliczenia i rezultaty procedury projektowej fundamentu

Stan graniczny nośności (GEO)

Podejście obliczeniowe DA 2, przyjęte współczynniki częściowe:

- $\gamma_{G, niekorzystne} = 1,35$, $\gamma_Q = 1,50$
- $\gamma_R = 1,4$ – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla oporu granicznego na wyparcie
- $\gamma_{R, h} = 1,1$ – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla oporu granicznego na ścięcie gruntu pod fundamentem

SPRAWDZENIE PIONOWEJ NOŚNOŚCI PODŁOŻA

Warunki „z odpiływem”

Dodatkowe obciążenia podłoża:

Ciężar fundamentu (całkowity):

$$G_{f,k} = V_f \cdot (\gamma_f - \gamma_w) = 4,62 \cdot (25,00 - 9,81)$$

Ciężar gruntu nad fundamentem:

$$G_k = 85,47 [kN]$$

Obliczeniowa wartość obciążenia podłoża:

$$V_d = \gamma_{G, niekorzystne} \cdot (N_{G,k} + G_{f,k} + G_k) + \gamma_Q \cdot N_{Q,k} = 1,35 \cdot (730,00 + 70,18 + 85,47) + 1,50 \cdot 150,00 = 1420,62 [kN]$$

Obciążenia przekazywane na podłoże (charakterystyczne wartości momentów bez uwzględnienia niesiowego działania siły pionowej):

$$V_k = N_{G,k} + G_{f,k} + G_k + N_{Q,k} = 730,00 + 115,50 + 85,47 + 150,00 = 1080,97 [kN]$$

$$M_{Bk} = M_{OBG,k} + M_{OBQ,k} + (H_{BGk} + H_{BQk}) \cdot h = 0,00 + 65,00 + (0,00 + 35,00) \cdot 0,60 = 86,00 [kN]$$

$$M_{Lk} = M_{OLG,k} + M_{OLQ,k} + (H_{LGk} + H_{LQk}) \cdot h = 160,00 + 120,00 + ((-70,00) + (-85,00)) \cdot 0,60 = 187,00 [kN]$$

$$H_k = \sqrt{(H_{BG,k} + H_{BQk})^2 + (H_{LG,k} + H_{LQk})^2} = \sqrt{(0,00 + 35,00)^2 + ((-70,00) + (-85,00))^2} = 158,90 [kN]$$

Mimośród obciążeń:

$$e_B = \frac{M_{Bk}}{V_k} + e_{OB} = \frac{86,00}{1080,97} + 0,00 = 0,08 < 0,3 \cdot B = 0,66 [m]$$

Warunek spełniony

$$e_L = \frac{M_{Lk}}{V_k} + e_{OL} = \frac{187,00}{1080,97} + (-0,20) = 0,01 < 0,3 \cdot L = 1,05 [m]$$

Warunek spełniony

Sprowadzone wymiary fundamentu:

$$B' = B - 2 \cdot e_B = 2,20 - 2 \cdot 0,08 = 2,04 [m]$$

$$L' = L - 2 \cdot e_L = 3,50 - 2 \cdot 0,01 = 3,48 [m]$$

$$A' = B' \cdot L' = 2,04 \cdot 3,48 = 7,10 [m^2]$$

Jednostkowy opór graniczny podłoża

$$\frac{R_k}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + g' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma = 25,00 \cdot 11,63 \cdot 1,00 \cdot 1,21 \cdot 0,83 + 21,71 \cdot 4,34 \cdot 1,00 \cdot 1,16 \cdot 0,87 + 0,5 \cdot 13,19 \cdot 2,03 \cdot 1,91 \cdot 1,00 \cdot 0,82 \cdot 0,79 = 404,42 [kPa]$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R} = \frac{2861,51}{1,40} = 2043,93 [kN]$$

Warunek obliczeniowy:

$$V_d = 1420,62 < R_d = 2043,93 [kN]$$

Warunek nośności na wyparcie spełniony

Warunki „bez odpływu”

Ciężar fundamentu:

$$G_{f,k} = V_f + \gamma_f = 4,62 \cdot 25,00 = 115,5 [kN]$$

Ciężar gruntu nad fundamentem:

$$G_k = 85,47 [kN]$$

Obliczeniowa wartość obciążenia podłoża:

$$V_d = \gamma_{G, niekorzystne} \cdot (N_{G,k} + G_{f,k} + G_k) + \gamma_Q \cdot N_{Q,k} = \\ = 1,35 \cdot (730,00 + 115,50 + 85,47) + 1,50 \cdot 150,00 = 1481,81 [kN]$$

Obciążenia przekazywane na podłoże (charakterystyczne wartości momentów bez uwzględnienia nieosiowego działania siły pionowej):

$$V_k = N_{G,k} + G_{f,k} + G_k + N_{Q,k} = \\ = 730,00 + 115,50 + 85,47 + 150,00 = 1080,97 [kN] \\ M_{Bk} = M_{OBG,k} + M_{OBQ,k} + (H_{BGk} + H_{BQ,k}) \cdot h = \\ = 0,00 + 65,00 + (0,00 + 35,00) \cdot 0,60 = 86,00 [kN] \\ M_{Lk} = M_{OLG,k} + M_{OLQ,k} + (H_{LGk} + H_{LQ,k}) \cdot h = \\ = 160,00 + 120,00 + ((-70,00) + (-85,00)) \cdot 0,60 = 187,00 [kN] \\ H_k = \sqrt{(H_{BG,k} + H_{BQ,k})^2 + (H_{LG,k} + H_{LQ,k})^2} = \\ = \sqrt{(0,00 + 35,00)^2 + ((-70,00) + (-85,00))^2} = 158,90 [kN]$$

Mimośród obciążeń:

$$e_B = \frac{M_{Bk}}{V_k} + e_{OB} = \frac{86,00}{1080,97} + 0,00 = 0,08 < 0,3 \cdot B = 0,66 [m]$$

Warunek spełniony

$$e_L = \frac{M_{Lk}}{V_k} + e_{OL} = \frac{187,00}{1080,97} + (-0,20) = 0,01 < 0,3 \cdot L = 1,05 [m]$$

Warunek spełniony

Sprawdzone wymiary fundamentu:

$$B' = B - 2 \cdot e_B = 2,20 - 2 \cdot 0,08 = 2,04 [m] \\ L' = L - 2 \cdot e_L = 3,50 - 2 \cdot 0,01 = 3,48 [m] \\ A' = B' \cdot L' = 2,04 \cdot 3,48 = 7,10 [m^2]$$

Jednostkowy opór graniczny podłoża:

$$\frac{Rk}{A'} = (\Pi + 2) \cdot c_u \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q = \\ = (\Pi + 2) \cdot 60,00 \cdot 1,00 \cdot 1,12 \cdot 0,90 + 27,60 = 336,42 [kPa]$$

Warunek obliczeniowy:

$$V_d = 1481,81 < R_d = 1706,48 [kN]$$

Warunek nośności na wyparcie spełniony.

SPRAWDZENIE NOŚNOŚCI GRUNTU NA ŚCIĘCIE W POZIOMIE POSADOWIENIA

$$H < R_d + R_{p,d}$$

$R_{p,d}$ – opór graniczny podłoża na przesunięcie fundamentu przyjęto = 0,0

Warunki „z odpływem”

Wartość obliczeniowa oporu granicznego gruntu pod fundamentem

$$R_d = \min \left(\frac{V'_k \cdot \tan(\delta_k)}{\gamma_{R,h}}; 0,4 \cdot V_d \right) = \\ = \min \left(\frac{1035,65 \cdot 0,29}{1,10}; 0,4 \cdot 1420,62 \right) = 269,97 [kN] \\ H_d = 228,12 < R_d = 269,97 [kN]$$

Warunek nośności na ściecie spełniony.

Warunki „bez odpływu”

$$A_c = B \cdot L = 2,20 \cdot 3,50 = 7,70 [m^2] \\ R_d = \min \left(\frac{A_c \cdot c_u}{\gamma_{R,h}}; 0,4 \cdot V_d \right) = \\ = \min \left(\frac{7,70 \cdot 60,00}{1,10}; 0,4 \cdot 1484,81 \right) = 387,36 [kN] \\ H_d = 228,12 < R_d = 387,36 [kN]$$

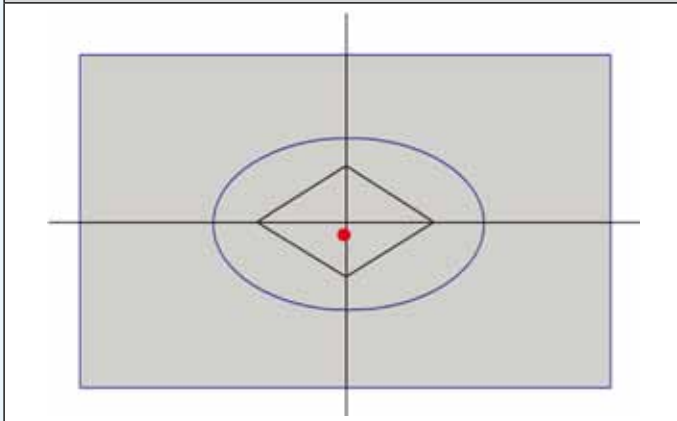
Warunek nośności na ściecie spełniony.

Sprawdzenie nośności pozostałych warstw (przedstawione tylko wyniki):

Poziom spr.	Nawodniona	Warunki z odpływem		Warunki bez odpływu	
		Ed/Rd (H)	Ed/Rd (V)	Ed/Rd (H)	Ed/Rd (V)
3.00	TAK	0.402	0.389	0.711	0.944

Położenie wypadkowej sił, po uwzględnieniu zamierzonego przesunięcia słupa (20 cm) przedstawia Rysunek P8.

Rysunek P8.



Sprawdzenie równowagi fundamentu (EQU)

Przyjęte oznaczenia w indeksach:

- stb - oddziaływania stabilizujące
 - dst - oddziaływania destabilizujące
- Współczynniki częściowe do oddziaływań:
- $\gamma_{G,dst} = 1,10$
 - $\gamma_{G,stb} = 0,90$
 - $\gamma_{Q,dst} = 1,50$

$$M_{B,dst} = 97,50 < M_{B,stb} = 876,79 [kNm]$$

$$M_{L,dst} = 233,30 < M_{L,stb} = 1526,30 [kNm]$$

Warunek stateczności spełniony.

Sprawdzenie przebicia fundamentu

Wymiary obwodu kontrolnego:

$$b_L = 2,69 [m]$$

$$B_B = 2,49 [m]$$

Obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie przy przebicciu:

$$v_{Rd,c} = c_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot 2 \cdot \frac{d}{a} > v_{min} \cdot 2 \cdot \frac{d}{a}$$

$$v_{Rd,c} = 0,13 \cdot 1,62 \cdot (100 \cdot 0,0012 \cdot 25,00)^{1/3} \cdot 2 \cdot \frac{0,52}{1,29} > 360,50 \cdot 2 \cdot \frac{0,52}{1,29}$$

$$v_{Rd,c} = 290,85 [kPa]$$

Maksymalne naprężenie ścinające:

$$v_{Ed} = B \cdot \frac{V_{Ed,red}}{(u \cdot d)} = 1,23 \cdot \frac{329,58}{(3,18 \cdot 0,52)} = 243,28 [kPa]$$

Sprawdzenie nośności:

$$v_{Ed} = 243,28 \leq v_{Rd,c} = 290,85 [kPa]$$

Nośność na przebicie wystarczająca.

Wymiarowanie zbrojenia

Obliczeniowo niezbędne zbrojenie wynosi:

$$A_y = 3,45 \text{ cm}^2/\text{mb}$$

$$A_x = 10,05 \text{ cm}^2/\text{mb}$$

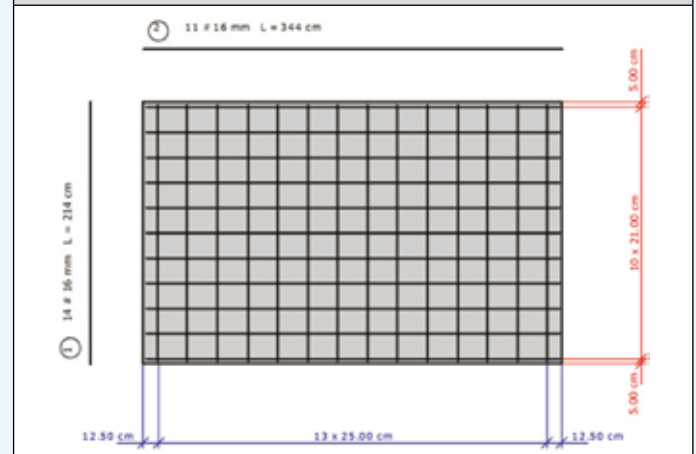
Minimalne zbrojenie konstrukcyjne dla fundamentu wynosi: $A_k = 7,07 \text{ cm}^2/\text{mb}$

W kierunku y (B) przyjęto $f_i = 16,0 \text{ mm}$ w rozstawie $s_1 = 25,0 \text{ cm}$ $A_{s1} = 8,48 \text{ cm}^2/\text{mb}$

W kierunku x (L) przyjęto $f_i = 16,0 \text{ mm}$ w rozstawie $s_2 = 21,4 \text{ cm}$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2/\text{mb}$

Rozkład prętów w fundamencie przedstawia Rysunek P9.

Rysunek P9.



Osiadanie fundamentu

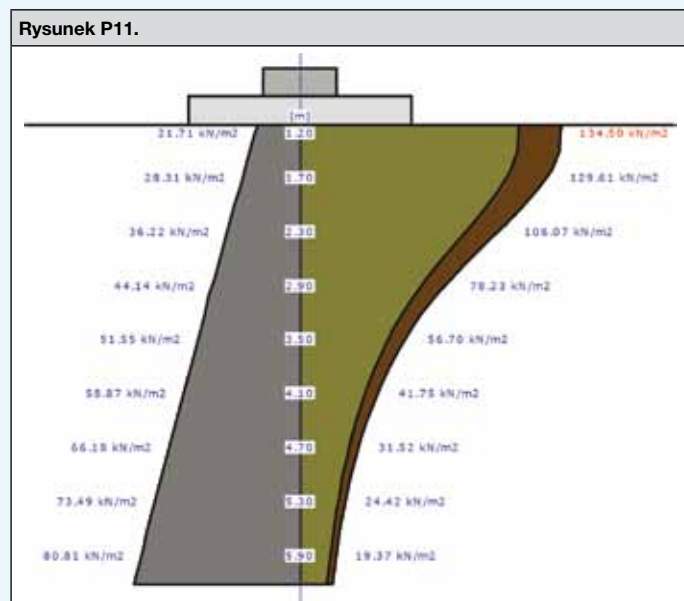
Zestawienie wyników obliczeń osiadania:

- Osiadania pierwotne = 0,004 cm
- Osiadania wtórne = 0,001 cm
- Osiadania całkowite = 0,004 cm
- Tangens kąta nachylenia względem osi X = 0,00043
- Tangens kąta nachylenia względem osi Y = -0,00044
- Przechyłka = 0,00062 rad

Warunek naprężeniowy:

$$0,2 \cdot \sigma_{zp} = 0,2 \cdot 85,68 = 17,14 \leq \sigma_{zd} = 16,79 [kN / m^2]$$

Głębokość prowadzenia obliczeń - odpowiada-
jąca spełnieniu warunku naprężeniowego = 6,30 m



Podsumowanie

Przedstawiony w artykule materiał teoretyczny i praktyczny w postaci przykładu obliczeniowego wyczerpał podstawowe zagadnienia związane z projektowaniem fundamentów wg PN-EN 1997-1:2008 Projektowanie geotechniczne. Podstawy te mają w założeniu pozwolić na przybliżenie i zrozumienie istoty wymiarowania wg nowej normy. Artykuł wydaje się pożyteczną lekturą dla osób, które

codzienną pracę projektową wspomagają programami komputerowymi, głównie ze względu na rozwikłanie niektórych zapisów normy oraz przybliżenie założeń metod tam podanych.

Marek Iefik, Marcin Krasiński

Bibliografia

1. PN-EN 1997-1:2008 (Eurokod 7) Projektowanie geotechniczne
2. PN-EN 1997-2:2008 (Eurokod 7) Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego
3. PN-EN ISO 14688-1/2 Badania Geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów.
4. PN-81 B/03020. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
5. PN-EN 1992-1-1:2008 (Eurokod 2) Projektowanie konstrukcji z betonu. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
6. Walery Kotlicki: Projektowanie posadowień bezpośrednich wg EC7. XXIV Ogólnopolskie warsztaty projektanta konstrukcji. Wisła 2009.
7. Olgierd Puła: Projektowanie fundamentów bezpośrednich według Eurokodu 7. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2012
8. Włodzimierz Starosolski: Konstrukcje żelbetowe według PN-B-03264:2002 i Eurokodu 2. Wydawnictwo PWN. Warszawa 2008