



Budowa tunelu szlakowego (B17) warszawskiego metra, Bilfinger Berger Budownictwo SA

Aktualne problemy budowy i projektowania głębokich wykopów, cz. 2

## Bezpieczeństwo posadowienia obiektu według norm europejskich



■ **prof. nzw. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska**,  
Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

Podstawowym obecnie problemem związanym z projektowaniem i budową głębokich wykopów jest ocena i prognoza przemieszczeń obudowy i przyległego terenu oraz wpływ wykopu na otoczenie. Oddziaływanie budowy na obiekty sąsiednie, bezpieczeństwo realizacji prac zależy od przyjętego rodzaju obudowy, adekwatnego do istniejących warunków geotechnicznych oraz od metody prowadzenia prac budowlanych w wykopie.

### 1. Wstęp

Artykuł stanowi kontynuację problematyki podjętej w poprzednim numerze „Nowoczesnego Budownictwa Inżynierskiego” w tekście *Budowa obiektu a obudowa wykopu – niełatwe zależności* („NBI” 2010, nr 2 [29], s. 64–71). W opublikowanej części zwrócono uwagę na fakt, że głębokie wykopki są nieodłącznym elementem każdego procesu budowlanego. W zależności od głębokości posadowienia budowli wykop w mniejszym lub większym stopniu narusza naturalny

stan gruntu, wpływa na położenie wód gruntowych, oddziałuje na otoczenie – sąsiadujące z wykopem obiekty (ich bezpieczeństwo i stan techniczny) – oraz roślinność. W użyciu jest wiele rodzajów obudowy wykopów, istnieje też wiele sposobów zapewnienia ich stateczności oraz metod budowy. Projektowanie może być prowadzone zróżnicowanymi metodami, a każda z nich wymaga interpretacji parametrów geotechnicznych oraz doświadczenia w wymiarowaniu tego typu obiektów. Dostępnych na rynku jest wiele

programów komputerowych, bazujących na różnych podstawach teoretycznych (belki swobodnie podparte, na podłożu sprężystym, metoda elementów skończonych). Każda z tych metod wymaga od projektanta znajomości parametrów wybranego modelu i zakresu przydatności do określonych sytuacji obliczeniowych. Odrębnym zagadnieniem jest uwzględnienie w projektowaniu i wykonawstwie nowych norm europejskich, a szczególnie zaleceń normy Eurokod 7 i pokrewnych.

W poprzedniej części artykułu omówiono definicje i uwarunkowania prawne towarzyszące projektowaniu wykopów oraz rodzaje obudów i metod budowy głębokich wykopów. Niniejsza część jest poświęcona analizie metod obliczeniowych i zaleceń Eurokodu 7.

### 2. Przykłady obliczeniowe

#### 2.1. Analiza rodzajów obudowy i metod wykonania wykopu

Aby ocenić, jak sztywność (tzn. rodzaj) obudowy i sposób jej podparcia (metody budowy) wpływają na wartości przemieszczeń poziomych ściany, w Zakładzie Geotechniki i Budowli Podziemnych Politechniki Warszawskiej wykonano w ramach magisterskiej pracy dyplomowej [14] studium koncepcyjne problemu. Analizowano wykonanie wykopu o głębokości 9,9 m p.p.t., w którym przewidziano trzy kondygnacje podziemnych parkingów. Przyjęto, że naziem za ścianą jest obciążony istniejącym wysokim budynkiem, posadowionym na głębokości 4,6 m, w odległości 4 m od obudowy. W sytuacji geotechnicznej wyodrębniono dwie warstwy gruntów czwartorzędowych: piaski drobne i piaski średnie. Zwierciadło wody gruntowej przyjęto na rzędnej 13,0 m p.p.t. Rozważano cztery warianty budowy – w wykopie szeroko-przestrzennym kotwionym (wariant 1 i 2); w wykopie z przyporami z gruntu rodzimego i rozporami stalowymi (wariant 3) oraz metodą półstropową (wariant 4). Przyjęto następujące rodzaje obudowy wykopu:

- wariant 1 – ścianka szczelna kotwiona
- wariant 2 – ściana szczelinowa kotwiona
- wariant 3 – ściana szczelinowa podparta rozporami (z przyporą z gruntu rodzimego)
- wariant 4 – ściana szczelinowa i metoda półstropowa budowy podziemi.

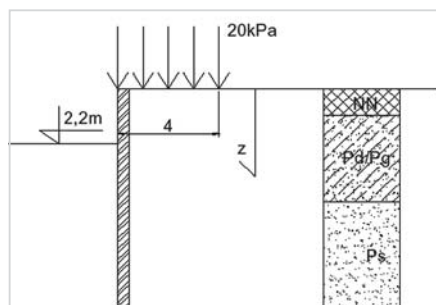
Jako kryterium oceny przyjęto wartości przemieszczeń górnej krawędzi obudowy wykopu. Obliczenia wykonano

programem jednym z wielu z pakietu programów stosowanych powszechnie w kraju do projektowania ścian wykopów. W modelu obliczeniowym uwzględnia on współpracę konstrukcji z podłożem. Pozwala na wyznaczenie przemieszczeń obudowy w kolejnych fazach pracy konstrukcji.

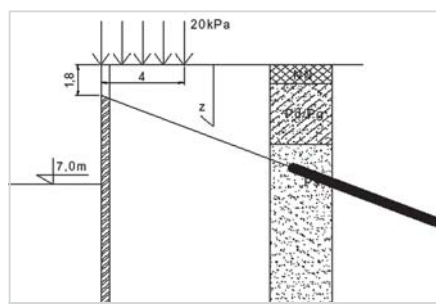
W każdym wariantcie wyznaczano wartości momentów zginających, sił w podparciach i przemieszczeń poziomych w poszczególnych fazach budowy wykopu. W wariantcie 1 w pierwszej serii obliczeń przyjęto, że obciążenie o wartości 350 kN/m<sup>2</sup> na głębokości 4,6 m p.p.t. pochodzące od budynku będzie przeniesione na niżej zalegające warstwy gruntu. Poniżej opisano szczegółowo i pokazano na rycinach kolejne fazy wykonania wykopu do poziomu rzędnej docelowej dna w każdej z zaproponowanych technologii. Na wykresach pokazano wartości przemieszczeń poziomych oraz momentów zginających w wybranych fazach obliczeń.

**Wariant 1**

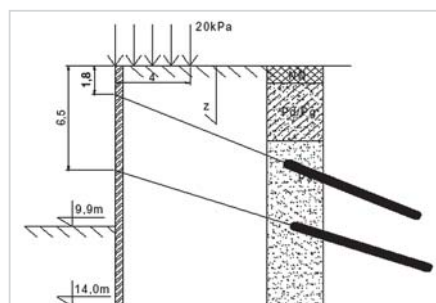
Przyjęto obudowę wykopu z kotwionych w dwóch poziomach grodzic stalowych G62 typu IIIIn o przekroju 436



Ryc. 1. Wariant 1 – faza I



Ryc. 2. Wariant 1 – faza II i III



Ryc. 3. Wariant 1 – faza IV i V

x 168 x 13,0 mm, o długości 14,00 m. Powierzchnia przekroju: A = 1,973E-02 m<sup>2</sup>/m; moment bezwładności: I = 2,320E-04 m<sup>4</sup>/m; moduł sprężystości: E = 210 000,00 MPa; moduł sprężystości na ścinanie: G = 81 000,00 MPa.

Fazowanie robót i odpowiadające im etapy obliczeniowe są następujące:

I faza – wykonanie wykopu do głębokości 2,2 m p.p.t. (ryc. 1)

II faza – wykonanie kotew gruntowych w rozstawie 2,5 m, o długości 18 m (buława 8 m), o nośności 420 kN; głowice kotew na rzędnej na 1,8 m p.p.t. (ryc. 2)

III faza – wykonanie wykopu do głębokości 7,0 m p.p.t. (ryc. 2)

IV faza – wykonanie kotew gruntowych w rozstawie 2,5 m, o długości 18 m (buława 8 m), o nośności 510 kN; głowice kotew na rzędnej na 6,5 m p.p.t. (ryc. 3)

V faza – wykonanie wykopu do rzędnej docelowej dna, tzn. do poziomu 9,9 m p.p.t. (ryc. 3).

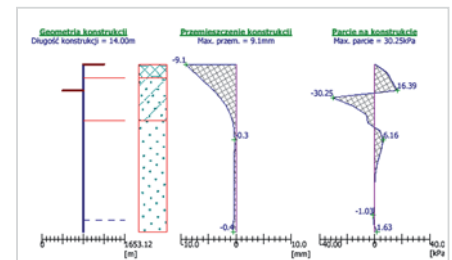
Wartości przyjętych w obliczeniach parametrów geotechnicznych warstw zaznaczonych na rycinach zestawiono w tabelcy 1. W każdym z analizowanych wariantów warunki geotechniczne były analogiczne. Obliczenia dla wszystkich wariantów wykonano metodą modułu reakcji podłoża. Wartość parametru  $k_h$  (modułu podatności podłoża) wyznaczano na podstawie nomogramu Chaidessona. Program automatycznie generuje tę wartość na podstawie wprowadzanych wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Na ogół wszystkie programy bazujące na tej metodzie mają wbudowaną opcję wyznaczania parametru  $k_h$ . Model statyczny ściany to belka swobodnie podparta w gruncie i dwukrotnie podparta rzędem aktywnych kotew gruntowych.

Tab. 1. Zestawienie wartości parametrów geotechnicznych

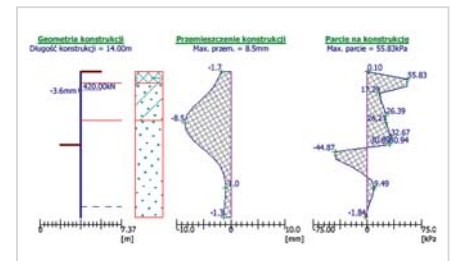
Warstwa geotechniczna	[kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi$ [°]	c [kPa]
NN – nasypy	16,50	30,50	0
P <sub>d</sub> / P <sub>g</sub>	17,50	30,50	0
P <sub>s</sub>	18,50	33,50	0

Największe przemieszczenie poziome ściany wystąpiło we wspornikowej fazie pracy obudowy (I faza). Było ono porównywalne z przemieszczeniem ściany w fazie III, tzn. przy jednym poziomie kotwienia i głębokości wykopu 7 m. Wykresy przemieszczeń pokazano na rycinach 4 i 5.

Jak widać z wykresów wartości, te nie przekraczają 10 mm i nie stanowią zagrożenia dla pracy konstrukcji.



Ryc. 4. Wariant 1 – wykres przemieszczeń poziomych i rozkład parcia gruntu w fazie wspornika

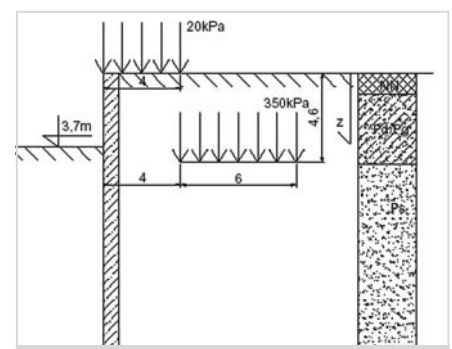


Ryc. 5. Wariant 1 – wykres przemieszczeń poziomych w fazie III

**Wariant 2**

Przyjęto obudowę wykopu z kotwionej w dwóch poziomach ściany szczelinowej o grubości 0,60 m i o długości 14,70 m. Powierzchnia przekroju: A = 6,000E-01 m<sup>2</sup>/m; moment bezwładności: I = 1,800E-02 m<sup>4</sup>/m; moduł sprężystości: E = 31 000,00 MPa; moduł sprężystości na ścinanie: G = 9700,00 MPa. Uwzględniono obciążenie od budynku o wartości 350 kPa. Fazowanie robót i odpowiadające im etapy obliczeniowe są następujące:

I faza – wykonanie wykopu do głębokości 3,7 m p.p.t. (ryc. 6)



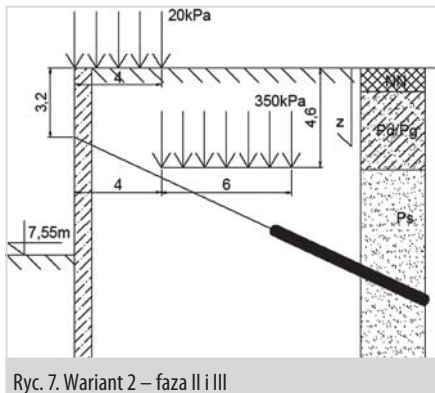
Ryc. 6. Wariant 2 – faza I

II faza – wykonanie kotew gruntowych w rozstawie 2,5 m, o długości 18 m (buława 8 m), o nośności 420 kN; głowice kotew na rzędnej na 3,2 m p.p.t. (ryc. 7)

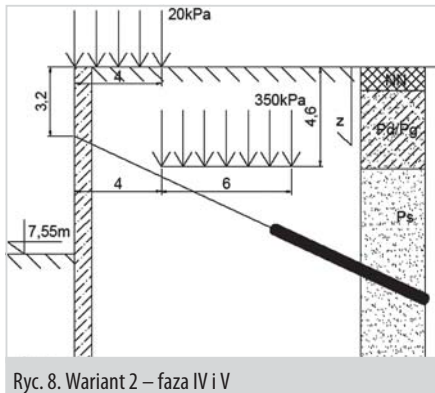
III faza – wykonanie wykopu do głębokości 7,55 m p.p.t. (ryc. 7)

IV faza – wykonanie kotew gruntowych w rozstawie 2,5 m, o długości 18 m (buława 8 m), o nośności 700 kN; głowice kotew na rzędnej na 7,05 m p.p.t. (ryc. 8)

V faza – wykonanie wykopu do rzędnej docelowej dna, tzn. 9,9 m p.p.t. (ryc. 8).

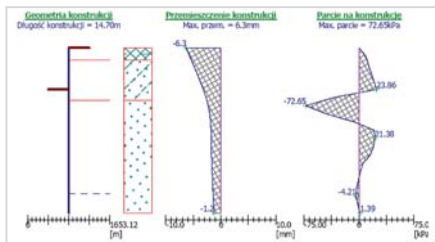


Ryc. 7. Wariant 2 – faza II i III

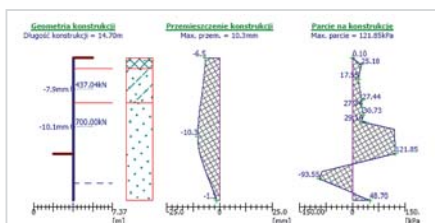


Ryc. 8. Wariant 2 – faza IV i V

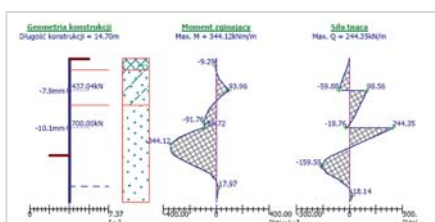
W tym przypadku maksymalne przemieszczenia poziome obudowy nie występują w fazie wspornika, lecz podczas wykonania wykopu do rzędnej docelowej dna. Wykres przemieszczeń oraz parcia gruntu w fazie I pokazano na rycinie 9,



Ryc. 9. Wariant 2 – wykres przemieszczeń poziomych i parcia gruntu w fazie I



Ryc. 10. Wariant 2 – maksymalne wartości przemieszczeń poziomych – faza V



Ryc. 11. Wariant 2 – maksymalne wartości momentów zginających i sił poprzecznych – faza V

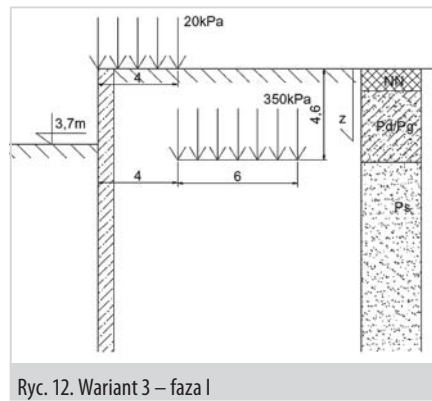
a wykresy maksymalnych wartości przemieszczeń poziomych obudowy oraz momentów zginających i sił poprzecznych odpowiednio na rycinach 10 i 11.

**Wariant 3**

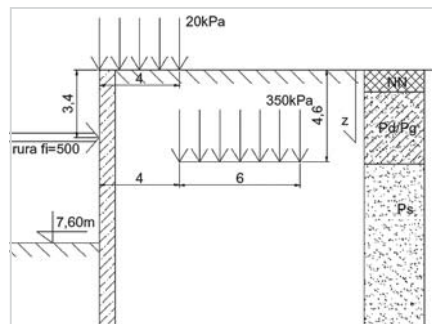
Przyjęto, że wykop będzie wykonywany pod osłoną ściany szczelinowej o grubości 0,60 m i długości 14,70 m z zachowaniem przypory z gruntu rodzimego. W centralnej części wykopu zostanie wykonany fragment konstrukcji wraz płytą denną i ze stropami podziemnych kondygnacji, na których będą oparte stalowe rozpory rurowe o średnicy 500 mm. Schemat konstrukcji obudowy oraz kolejne fazy obliczeniowe podano poniżej oraz pokazano na rycinach 12–14. Parametry ściany analogiczne jak w wariantcie 2.

faza I – wykonanie wykopu do głębokości 3,7 m p.p.t.

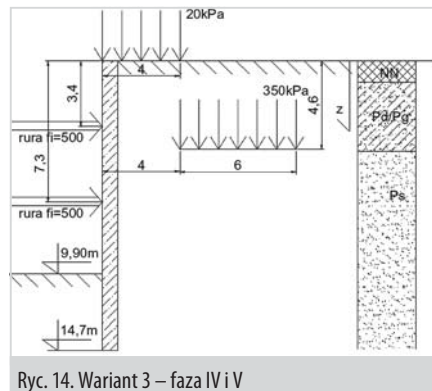
faza II – wykonanie na rzędnej 3,4 m p.p.t. rozpór rurowych Ø 500 mm, o długości 8 m, w rozstawie 4,5 m



Ryc. 12. Wariant 3 – faza I



Ryc. 13. Wariant 3 – faza II i III



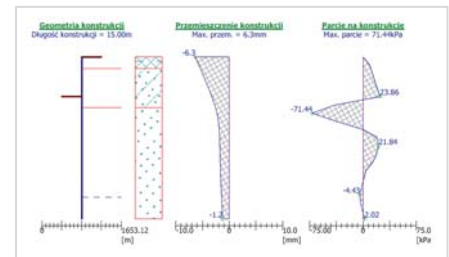
Ryc. 14. Wariant 3 – faza IV i V

faza III – wykonanie wykopu do głębokości 7,60 m p.p.t.

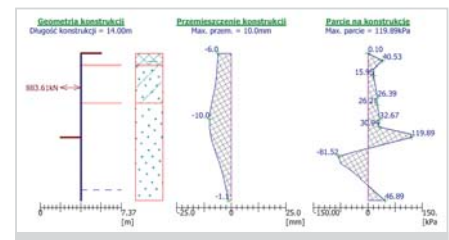
faza IV – podparcie ściany na rzędnej 7,3 m p.p.t. drugim poziomem rozpór rurowych Ø 500, o długości 8 m, w rozstawie 4,0 m

faza V – wykonanie wykopu do rzędnej docelowej tzn. do głębokości 9,9 m p.p.t.

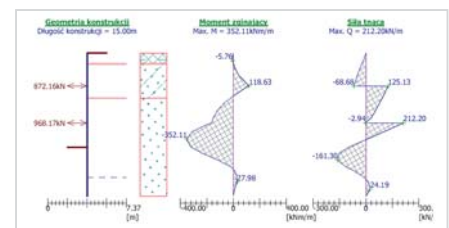
W tym wariantcie maksymalne poziome przemieszczenia obudowy występują w fazie III tzn. przy podparciu ściany jednym poziomem rozpór i wykonaniu wykopu do głębokości 7,60 m. Przemieszczenia w fazach IV i V są porównywalne i wynoszą 9,5 mm. Wykresy przemieszczeń przy wspornikowej pracy ściany oraz w fazie III pokazano na rycinach 15 i 16, a wykres maksymalnych momentów zginających na rycinie 17.



Ryc. 15. Wariant 3 – przemieszczenia poziome ściany w fazie wspornika



Ryc. 16. Wariant 3 – wykres maksymalnych wartości przemieszczeń poziomych



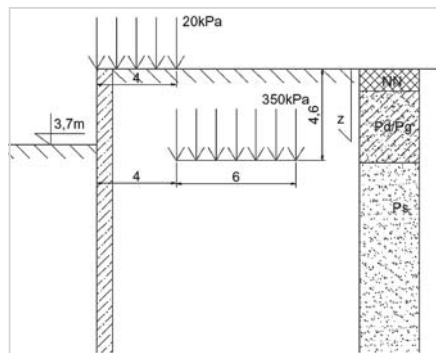
Ryc. 17. Wariant 3 – wykres maksymalnych momentów zginających

**Wariant 4**

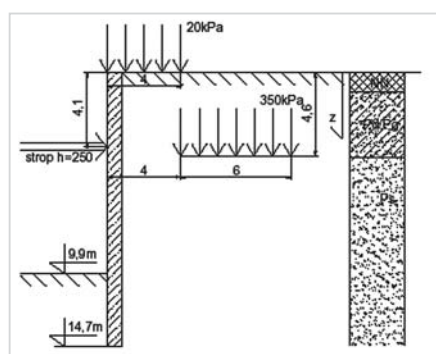
Tak jak w wariantcie 2 i 3 założono obudowę wykopu ze ścian szczelinowych o grubości 0,60 m i długości 14,70 m. Stateczność obudowy zapewnia strop pierwszej kondygnacji podziemnej oparty na baretach i słupach tymczasowych. W części środkowej stropu jest otwór technologiczny umożliwiający wykonanie drugiej i trzeciej kondygnacji podziemnej. Schemat konstrukcji obudowy oraz kolejne

fazy obliczeniowe przedstawiono na rycinach 18 i 19.

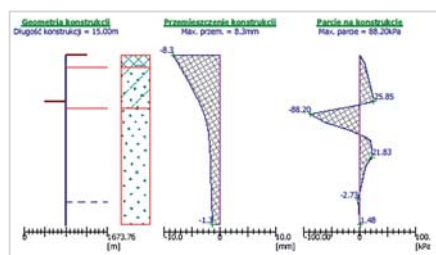
Przyjęto następujący harmonogram prac przy prowadzeniu wykopu:



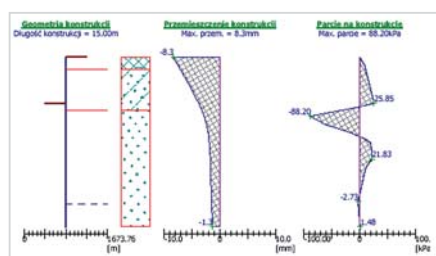
Ryc. 18. Wariant 4 – faza I



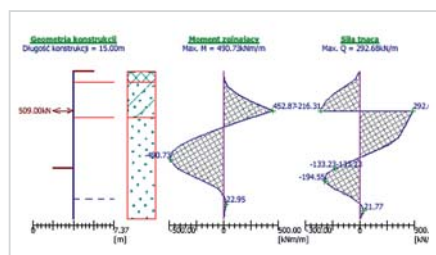
Ryc. 19. Wariant 4 – faza II i III



Ryc. 20. Wariant 4 – przemieszczenia obudowy w fazie wspornika



Ryc. 21. Wariant 4 – przemieszczenia obudowy – faza III



Ryc. 22. Wariant 4 – wartości momentów zginających w fazie docelowej

faza I – wykonanie wykopu do głębokości 4,1 m p.p.t. (ryc. 18)

faza II – wykonanie na rzędnej 4,1m p.p.t. stropu o grubości 25 cm, na przygotowanym podłożu faza III – wykonanie wykopu do projektowanego poziomu posadowienia na głębokości 9,9 m p.p.t. (ryc. 19).

Na zakończenie wykonano obliczenia obudowy wykopu jak w wariantcie I, przyjmując, że obciążenia od budynku działają na ścianę.

Wyniki obliczeń wartości maksymalnych przemieszczeń i momentów zginających przedstawiono w tabelcy 2.

Jak widać, przy obudowie ze ścian szczelinowych w każdym z wariantów budowy podziemi przemieszczenia poziome ściany wykopu są podobne. W przypadku ścianki szczelnej, przemieszczenia poziome zbliżone do poprzednich wartości gwarantuje przeniesienie obciążeń od budynku na warstwy poniżej dna wykopu.

### 3. Analiza metod obliczeniowych i założeń Eurokodu 7

Jedną z istotnych zmian w projektowaniu konstrukcji geotechnicznych (w tym

ścian głębokich wykopów) są wprowadzane w normie europejskiej Eurokod 7 [15] podejścia obliczeniowe i częściowe współczynniki bezpieczeństwa. W punkcie 2.4 tej normy sformułowano trzy podejścia obliczeniowe (oznaczone dalej jako PO), w których podczas sprawdzania stanu granicznego należy przeprowadzić obliczenia dla następujących kombinacji współczynników częściowych:

- podejście obliczeniowe 1  
Kombinacja 1: A1 + M1 + R1 – oznaczona jako PO 1A

- podejście obliczeniowe 2  
Kombinacja 2: A2 + M2 + R1 – oznaczona jako PO 1B

- podejście obliczeniowe 3  
Kombinacja 1: A1 + M1 + R2 – oznaczona jako PO 2

- podejście obliczeniowe 3  
Kombinacja 1: A2 + M2 + R3 – oznaczona jako PO 3.

Wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa w każdym z podejść obliczeniowych zestawiono w tabelcach 3, 4 i 5. Nie uwzględniono PO 3 z uwagi na fakt, że w przypadku ścian oporowych wartości współczynników w kombinacji PO1B i PO 3 są identyczne. Podejścia te

Tab. 2. Wyniki obliczeń

	Przemieszczenia poziome obudowy w fazie wspornika [mm]	Maksymalne przemieszczenia poziome [mm]	Maksymalny moment zginający [kNm/m]	Maksymalna siła w podparciu [kN/m]
<b>Wariant I</b> (ścianka szczelna kotwiona bez obc. budynkiem)	9,1	9,1	78,4	-
<b>Wariant I</b> (ścianka szczelna kotwiona obc. budynkiem).	23,6	37,2	252	244
<b>Wariant II</b> (ściana szczelin. kotwiona)	6,3	10,3	344	245
<b>Wariant III</b> (ściana szczelin. z przyporą z gruntu rodz. i rozporami)	6,3	10,0	352	212
<b>Wariant IV</b> (ściana szczelin. i metoda półstropowa)	8,3	10,4	490	292

Tab. 3. Podejście obliczeniowe 1A (PO 1A)

Współczynniki częściowe					
Parametry geotechniczne			Obciążenia		Odpór gruntu
$\gamma_c$	$\gamma_{\varphi}$	$\gamma_y$	$\gamma_Q$	$\gamma_G$	$V_{R,e}$
1,0	1,0	1,0	1,5	1,35	1,0

Tab. 4. Podejście obliczeniowe 1B (PO 1B)

Współczynniki częściowe					
Parametry geotechniczne			Obciążenia		Odpór gruntu
$\gamma_c$	$\gamma_{\varphi}$	$\gamma_y$	$\gamma_Q$	$\gamma_G$	$V_{R,e}$
1,25	1,25	1,0	1,3	1,0	1,0

Tab. 5. Podejście obliczeniowe 2 (PO 2)

Współczynniki częściowe					
Parametry geotechniczne			Obciążenia		Odpór gruntu
$\gamma_c$	$\gamma_{\varphi}$	$\gamma_y$	$\gamma_Q$	$\gamma_G$	$V_{R,e}$
1,0	1,0	1,0	1,5	1,35	1,4

charakteryzują się wzrostem obciążeń – PO 1A, redukcją parametrów gruntu – PO 1B oraz wzrostem obciążeń i redukcją oporów podłoża – PO 2.

Aby pokazać różnice w wymiarowaniu obudów głębokich wykopów w każdym z podejść obliczeniowych oraz dokonać wyboru najbardziej niekorzystnej kombinacji częściowych współczynników bezpieczeństwa, wykonano opisane poniżej obliczenia. Jako wielkości szukane będące podstawą do porównań wybrano zagłębienie ściany w gruncie poniżej dna wykopu oraz maksymalne wartości momentów zginających, sił poprzecznych i przemieszczeń poziomych obudowy wykopu ze ściany szczelinowej.

Analizowano [20] dwa przypadki obudowy wykopu: wspornikowa ścianka szczelna (ryc. 23) oraz ścianka szczelna kotwiona (ryc. 24). Analizę statyczną wykonano zgodnie z wytycznymi normy PN 81-B 03020 – I seria oraz z wytycznymi EN 1997-1:2004 – II seria. Ścianka szczelna jest posadowiona w piasku o następujących parametrach geotechnicznych:  $f_k^c = 37^\circ$ ;  $c_k^c = 0$ ;  $g = 18 \text{ kN/m}^3$ ;  $g_{sr} = 20 \text{ kN/m}^3$ .

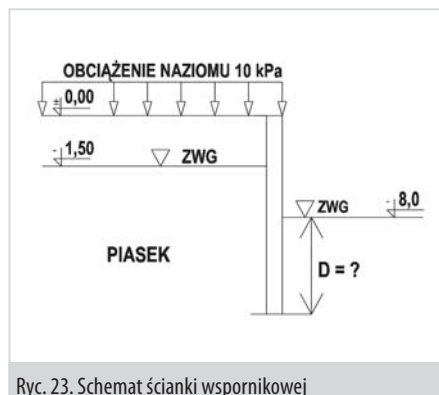
W obliczeniach uwzględniono różnicę parcia wody gruntowej. Dane dodatkowe:  $f_{obl}^c = 33,3^\circ$  wg normy polskiej i  $f_{obl}^c = 31,1^\circ$  wg Eurokodu 7

współczynniki parcia czynnego, uwzględniające tarcie gruntu o ścianę:

$K_{ah} = 0,241$  wg normy polskiej;  $K_{ah} = 0,268$  wg Eurokodu 7

moduł podatności podłoża (z nomogramu Chaidessona [18]):

$k_h = 36 \text{ MN/m}^3$  (w obliczeniach wg PN);  $k_h = 29,8 \text{ MN/m}^3$  (w obliczeniach wg EC 7)



Ryc. 23. Schemat ścianki wspornikowej

Obliczenia w obu seriach wykonano metodą klasyczną [21], wyznaczając wypadkowe parcia i odpory gruntu zgodnie z teorią Coulomba – Mohra, metodą stanów granicznych [16], metodą poziomej reakcji podłoża z uwzględnieniem stanów granicznych [16] oraz metodą modułu podatności podłoża [22].

Tab. 6. Wyniki obliczeń ścianki wspornikowej

	wg PN-81/B-03020				wg EUROKODU 7			
	metoda klasyczna		metoda poziomej reakcji podłoża		metoda klasyczna		metoda poziomej reakcji podłoża	
	[16]	[21]	[16]	[22]	[16]	[21]	[16]	[22]
D	4,24	5,84	4,20	4,20*	3,75	6,08	4,70	4,70*
$M_{max}$	114,83	93,86	94,60	92,52	105,10	95,01	121,84	110,71
$u_{max}$			48,64	38,49			55,62	53,23

\*) obliczenia programem [22] wykonano dla zadanej głębokości wbicia ścianki poniżej dna wykopu – analogicznej jak w programie [16] z uwagi na możliwość porównania wartości momentów i przemieszczeń. Taki tok obliczeń wynika ze sposobu działania programu [22]

Tab. 7. Wyniki obliczeń ścianki kotwionej

	wg PN-81/B-03020				wg EUROKODU 7			
	metoda klasyczna		metoda poziomej reakcji podłoża		metoda klasyczna		metoda poziomej reakcji podłoża	
	[16]	[21]	[16]	[22]	[16]	[21]	[16]	[22]
D	3,35	3,8	3,90	3,90*	5,23	3,80	5,00	5,00*
$M_{max}$	226,24	188,34	160,83	163,93	186,62	172,79	183,35	209,96
$u_{max}$			33,10	32,96			68,55	51,96

\*) obliczenia programem [22] wykonano dla zadanej głębokości wbicia ścianki poniżej dna wykopu – analogicznej jak w programie [16] z uwagi na możliwość porównania wartości momentów i przemieszczeń. Taki tok obliczeń wynika ze sposobu działania programu [22]

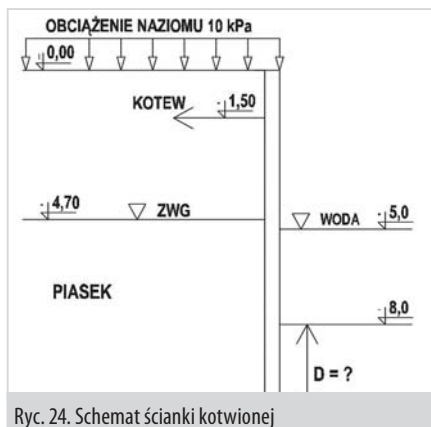
W obliczeniach wyznaczano zagłębienie ściany poniżej dna wykopu oraz moment zginający w ścianie. Porównano też maksymalne przemieszczenia poziome ściany. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 6D [m] – oznacza zagłębienie ściany poniżej dna wykopu,  $M$  [kNm/m] – moment zginający,  $u_{max}$  [mm] – maksymalne poziome przemieszczenie ściany.

Ścianka szczelna kotwiona jest posadowiona w piasku o następujących parametrach geotechnicznych:  $f_k^c = 35^\circ$ ;  $c_k^c = 0$ ;  $g = 18 \text{ kN/m}^3$ ;  $g_{sr} = 20 \text{ kN/m}^3$ .

W obliczeniach uwzględniono różnicę parcia wody gruntowej. Dane dodatkowe:  $f_{obl}^c = 31,5^\circ$  wg normy polskiej i  $f_{obl}^c = 29,3^\circ$  wg Eurokodu 7

współczynniki parcia czynnego, uwzględniające tarcie gruntu o ścianę:

$K_{ah} = 0,262$  wg normy polskiej;  $K_{ah} = 0,288$  wg Eurokodu 7



Ryc. 24. Schemat ścianki kotwionej

moduł podatności podłoża (z nomogramu Chaidessona [18]):

$k_h = 30 \text{ MN/m}^3$  (wg PN) i  $k_h = 30 \text{ MN/m}^3$  (wg Eurokodu 7).

Kotew modelowano w programie [16 i 22] jako podporę sprężystą. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 7.

Analizując wyniki, stwierdza się, że wartości  $D$ ,  $M$  i  $u_{max}$  obliczone według założeń Eurokodu 7 są większe niż wyznaczone według zasad polskiej normy. Wyjątek stanowią obliczenia ścianki wspornikowej programem [16], metodą klasyczną. Wzrost ten w przypadku zagłębienia poniżej dna wykopu i momentu zginającego waha się w przedziale od 10 do 35% w zależności od metody obliczeń, a w przypadku przemieszczeń sięga nawet 50%. Wynik ten jest konsekwencją redukcji według Eurokodu 7 wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu współczynnikiem częściowym  $g_r = 1,25$ , podczas gdy zgodnie z polską normą współczynnik materiałowy wynosi  $g = 1/0,9 = 1,11$ . Wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu, a także spójności wpływają znacząco na tok obliczeń programami [16, 22].

## 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z projektowaniem i budową głębokich wykopów. Szczegółowe dane podane w przykładach mogą posłużyć do własnej analizy zagadnienia oddziaływania budowy na obiekty są-



Budowa kompleksu sportowego Akademii Rolniczej w Lublinie. Ściana szczylinowa kotwiona dwoma rzędami kotwi stalych systemu SUSPA-Daueranker, Stump - Hydrobudowa Sp. z o.o.

siednie, bezpieczeństwo realizacji inwestycji i przyjętego rodzaju obudowy. Są też podstawą do weryfikacji poprawności założeń obliczeniowych, a po wykonaniu obliczeń sprawdzających mogą być dyskutowane podczas spotkań w szerokim gronie specjalistów.

Należy pamiętać, że budowa głębokich wykopów to złożony proces inwestycyjny, na który składają się wieloetapowe działania wpływające wzajemnie na siebie, decydując o koncepcji i powodzeniu realizacji. Przy wyborze sposobu budowy i rodzaju obudowy wykopu trzeba kierować się względami technologicznymi oraz brać pod uwagę koszty i możliwości techniczne lub specyfikę wykonawców.

Projektowanie obudów głębokich wykopów wymaga na każdym etapie inwestycji (koncepcja, projekt budowlany czy wykonawczy) ścisłej współpracy konstruktora i architekta z geotechnikiem. W analizie statycznej ścian wykopów należy korzystać z szerokiej gamy specjalistycznego oprogramowania, uwzględniającego współpracę konstrukcji z podłożem. Jest to warunek bezwzględny poprawnej oceny i prognozy przemieszczeń obudowy wykopu oraz oddziaływania na obiekty sąsiednie.

Celem autorki było przybliżenie tych problemów oraz przygotowanie danych do dalszej dyskusji.

### I. Literatura

1. Wiłun Z.: *Geotechnika*. WKŁ. Warszawa 1987.
2. ITB 427/2007 *Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych, cz. A: Roboty ziemne i konstrukcyjne*.

3. Puller M.: *Deep Excavations*. Thomas Telford. London 1998.
4. BS 8002 *Earth Retaining Structures*. British Standards Institution. London 1994.
5. Grzegorzewicz K.: *Obudowa ścian głębokich wykopów*. Materiały Seminarium „Głębokie wykopki na terenach wielkomiejskich” IDiM PW, IB-DiM. Wyd. IBDiM. Warszawa 2002, s. 45–70.
6. Jarominiak A.: *Lekkie konstrukcje oporowe*. WKiŁ. Warszawa 1999.
7. Siemińska-Lewandowska A., Grzegorzewicz K., Kłosiński B.: *Problemy budowy głębokich podziemi budynków użyteczności publicznej*. Materiały XLIX Konferencji KILiW i PZITB. Krynica 2003, t. 1, s. 151–170.
8. Rossner W., Winter K.N.: *Normierte Verbau- und Abdeckkonstruktionen*. Verlag Ernst & Sohn. Berlin 1982.
9. PN-EN 1537:1999 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Kotwy gruntowe*.
10. Stamatello H.: *Tunele i miejskie budowle podziemne*. Arkady. Warszawa 1970.
11. I.C.O.S. – *Entreprise de travaux speciaux*. Wydawnictwo firmy I.C.O.S. 1968.
12. Siemińska-Lewandowska A. et al.: *Varsovie: La tour*. Telekomunikacja Polska SA. „Travaux International” 1999, nr 759, s. 18–22.
13. Gryczmański M.: *Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów*. Wyd. KILiW PAN, IPPT PAN. „Studia z Zakresu Inżynierii” 1995, nr 40.

14. Łysiak P.: *Analiza przemieszczeń w alternatywnych wariantach wykonania obudowy głębokiego wykopu*. Praca dyplomowa w Zakładzie Geotechniki i Budowli Podziemnych, Politechnika Warszawska, czerwiec 2008.
15. PN- EN 1997-1:2004 Eurokod 7 *Projektowanie geotechniczne – Cz. 1. Zasady ogólne*.
16. Instrukcja użytkownika programu GEO 4 FINE (2004).
17. Menard L., Bourdon C., Houy A.: *Étude expérimentale de l'encastrement d'un rideau en fonction des caractéristiques pressiométriques du sol de fondation*. „Sols-Soils” 1964, t. 3, nr 9, s. 11–27.
18. Chaidesson R.: *Parois continues moulées dans le sols*. Proc. of the 5<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris 1961, t. 2. s. 563–568.
19. Siemińska-Lewandowska A., Krzyżkowska A.: *Analiza obliczeniowa ściany szczylinowej w świetle normy EN 1997-1:2004 Eurocode 7*. „Inżynieria i Budownictwo” 2006, nr 6, s. 323–326.
20. Mitew-Czajewska M., Siemińska-Lewandowska A.: *Analiza ściany oporowej według EN 1997 – 1:2004 Eurocode 7*. „Inżynieria i Budownictwo” 2005, nr 3, s. 129–131.
21. Instrukcja użytkownika programu PAL do analizy statycznej pali stanowiących rozparcia wykopów – BPB-KiS „Metroprojekt” (1984).
22. Instrukcja użytkownika programu RIDO v. 4.02 Robert Fages Logiciels 2004.

### II. Ustawy i rozporządzenia

23. Prawo budowlane. DzU 2003, nr 217, poz. 2016 ze zmianami 18 maja, 27 i 28 lipca 2005 r.
24. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. DzU 1998, nr 126, poz. 839.
25. Prawo geologiczne i górnicze. DzU 1994, nr 27, poz. 96 z późn. zm.
26. Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie projektów prac geologicznych. DzU 2001, nr 153, poz. 1777.
27. Prawo wodne. DzU 2001, nr 115, poz. 1229 z późn. zm.
28. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego. DzU 2003, nr 120, poz. 1133.



Autostradowa Obwodnica Wrocławia - ścianka szczelna wciskana przy torowisku



S8 - Węzeł Konotopa - kotwienie ściany szczelinowej



Autostrada A2, Świecko - Nowy Tomyśl - pale prefabrykowane

## Roboty palowe

- Dostawa i instalacja pali prefabrykowanych wbijanych dla posadowienia mostów, konstrukcji inżynierskich oraz obiektów kubaturowych
- Posadowianie na palach wbijanych ekranów akustycznych i słupów sieci trakcyjnych
- Instalacja mikropali
- Wbijanie i wwibrowywanie pali stalowych
- Badanie nośności pali - próbne obciążenia statyczne, dynamiczne testy nośności pali, badania ciągiłości pali
- Wzmacnianie gruntu - pale prefabrykowane, kolumny DSM

## Zabezpieczenia głębokich wykopów

- Stalowe ścianki szczelne - instalacja grodzic z zastosowaniem metod tradycyjnych oraz bezwibracyjnej metody wciskania grodzic prasą hydrauliczną SILENT PILER
- Ścianki berlińskie
- Iniekcyjne kotwy gruntowe
- Roboty ziemne i odwodnieniowe
- Pomiary wibracji

## Projektowanie

- Prace projektowe dla potrzeb wykonywanych robót realizowane we własnej pracowni projektowej
- Serwis projektowy - [www.aarsleff.com.pl/serwis.php](http://www.aarsleff.com.pl/serwis.php) - do pobrania rysunki, specyfikacje, wytyczne oraz **KALKULATOR PALI** - program do projektowania fundamentów palowych



Zachodnia Obwodnica Poznania - wzmocnienie podłoża kolumnami DSM