

Analiza stateczności składowanych odpadów komunalnych

Dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska, prof. PB, mgr inż. Justyna Sulewska
Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Wybór lokalizacji składowisk odpadów nie może być przypadkowy i powinien uwzględniać warunki topograficzne, klimatyczne, geotechniczne i geologiczne, jak również aspekty demograficzne oraz zasady zagospodarowania przestrzennego [7, 11, 17]. Budowę składowisk odpadów komunalnych w Polsce reguluje obecnie ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach oraz rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 roku w sprawie składowisk odpadów [12, 16]. W rozporządzeniu [12] zastrzeżono, że eksploatacja składowiska powinna zapewniać „stateczność geotechniczną składowanych odpadów”, jednak nie zdefiniowano sposobu jej zapewnienia. Zbocza składowiska w fazie poeksploatacyjnej również powinny podlegać ocenie stateczności „określonej metodami geotechnicznymi”.

Ze statecznością odpadów nierozzerwalnie związana jest konstrukcja całego składowiska oraz jego położenie. Ze względu na położenie w zależności od ukształtowania terenu najczęściej wyróżnia się [11]: składowiska nadpoziomowe, podpoziomowe i boczne (przyskarpowe). Zadania poszczególnych elementów konstrukcji składowiska szczegółowo omówiono w pracy Zadrogi i Olańczuk-Neyman [20]. Uszczelnienie podstawy i skarpa ma na celu stworzenie nieprzepuszczalnej bariery uszczelniającej, ochraniającej podłoże gruntowe przed przenikaniem odcieków i gazów wysypiskowych do niższych warstw podłoża i wód gruntowych, a także odprowadzenie powstałego ocieku do systemu oczyszczania.

Zgodnie z rozporządzeniem [12] w podłożu pod składowiskiem i jego skarpami bocznymi powinna zalegać naturalna bariera geologiczna występująca w postaci ciągłej warstwy gruntu o współczynniku filtracji $k \leq 10^{-9}$ m/s oraz miąższości nie mniejszej niż 1,0 m. W przypadku braku naturalnego uszczelnienia lub gdy bariera nie spełnia powyższych wymagań wykonuje się sztuczną barierę geologiczną o minimalnej miąższości 0,5 m i przepuszczalności jak dla bariery naturalnej. Uzupełnieniem naturalnej lub sztucznej bariery jest izolacja syntetyczna. Podłoże składowiska odpadów komunalnych oraz jego zbocza wyposaża się także w system drenażu wód odciekowych, w skład którego wchodzi warstwa drenażowa o współczynniku filtracji $k > 10^{-4}$ m/s i miąższości nie mniejszej niż 0,5 m.

Celem pracy jest sprawdzenie stateczności odpadów komunalnych składowanych na składowisku o określonej konstrukcji, przy założeniu zmiennych dotyczących bryły odpadów, takich

jak: wysokość, szerokość korony i nachylenie skarpy masywu odpadów.

CZYNNIKI WARUNKUJĄCE STATECZNOŚĆ ODPADÓW

Problematyce stateczności składowisk odpadów poświęcono wiele publikacji angielsko- [1, 3, 10] i polskojęzycznych [5, 6, 8, 15, 22]. Do analizy stateczności składowisk odpadów mogą być stosowane zarówno metody równowagi granicznej oparte na cylindrycznej (kołowej) powierzchni poślizgu, jak i metoda elementów skończonych.

W najczęściej stosowanych metodach równowagi granicznej wyznaczany ze stosunku sił utrzymujących bryłę gruntu do sił zsuwających współczynnik stateczności F powinien być większy od wartości dopuszczalnej F_{dop} , którą w przypadku składowisk odpadów należy przyjmować w granicach od 1,2 do 1,3, w zależności od ważności obiektu i zagrożeń terenów przyległych [5]. Skarpy składowisk komunalnych o współczynniku $F < 1,3$ uważa się za niepewne pod względem stateczności [6].

Metody oceny stateczności odpadów opisano w pracy [5]. Najczęściej stosowanymi metodami są klasyczne metody równowagi granicznej: Felleniusa, Bishopa, Janbu czy Morgensterna-Price'a. Koda [5] podaje, że metoda Felleniusa może być stosowana jedynie do orientacyjnej prognozy stateczności skarp składowisk ze względu na niejednorodność odpadów komunalnych deponowanych na składowisku. W metodzie Felleniusa przyjmuje się zerowe siły tnące i normalne pomiędzy obliczeniowymi blokami, co skutkuje mniejszymi wartościami uzyskiwanych współczynników stateczności. Niejednorodność odpadów komunalnych powiększa zakres generowanych błędów.

Odpady komunalne gromadzone na składowiskach są materiałem bardzo zróżnicowanym morfologicznie i pod względem zagęszczenia [4, 15, 21]. Dużym problemem jest zatem wiarygodna ocena właściwości fizycznych i mechanicznych odpadów, tym bardziej, że rzadko wykonywane są bezpośrednie badania odpadów. Do analizy stateczności odpadów mogą być wykorzystywane: analiza morfologiczna odpadów, wykopy badawcze, sondowania, próbne obciążenia, a także analizy wsteczne zinventoryzowanych osuwisk odpadów na składowiskach.

Gęstość niezagęszczonych polskich odpadów zawiera się w zakresie $0,15 \div 0,70 \text{ Mg/m}^3$, a średnia gęstość odpadów na składowiskach wynosi $0,8 \div 1,4 \text{ Mg/m}^3$ [5]. Świeże odpady komunalne charakteryzują się gęstością w zakresie $0,4 \div 1,0 \text{ Mg/m}^3$, podczas gdy odpady zleżające na składowiskach mają gęstość od $0,8$ do $1,2 \text{ Mg/m}^3$ [21]. Gęstość odpadów jest zróżnicowana nie tylko w przypadku odpadów odbieranych z terenów wiejskich i miejskich, ale nawet różnych rodzajów zabudowy miejskiej [5].

Zydroń i inni [22] zestawili wyniki badań wytrzymałościowych odpadów na podstawie prawie 30 prac. Wyniki badań różnią się w zależności od przyjętej metody badawczej. Zapewne ma tu wpływ także efekt skali, ponieważ odpady komunalne wymagają badań w aparatach wielkowymiarowych. Zaprezentowano wyniki badań odpadów świeżych i o różnym stopniu rozkładu. Zakresy zarówno kąta tarcia wewnętrznego, jak i oporu spójności mieszczą się w bardzo szerokich granicach. Najczęściej powtarzalne zakresy wartości to około $20 \div 35^\circ$ w przypadku kąta tarcia wewnętrznego i $15 \div 40 \text{ kPa}$ dla oporu spójności. Wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych jest zmienna w czasie, co związane jest przede wszystkim z ich kompresją oraz rozkładem substancji organicznych. Należy też zwrócić uwagę na stopniowy spadek w czasie wartości parametrów wytrzymałościowych odpadów ze względu na postępujący rozkład odpadów komunalnych.

OBLICZENIA STATECZNOŚCI SKARPY WBUDOWANYCH ODPADÓW

Materiały i geometria analizowanego zbocza

Warstwy uszczelniające dno i skarpy składowiska odpadów komunalnych przyjęto zgodnie z obowiązującymi przepisami prawnymi i zaleceniami literaturowymi. Przekrój przez warstwy pokazano na rys. 1. Warstwę drenażową zaplanowano z piasku średniego w stanie średnio zagęszczonym o miąższości $0,5 \text{ m}$, natomiast mineralną warstwę uszczelniającą o miąższości 1 m z zagęszczonej gliny zwięzłej w stanie twardoplastycznym. Należy zwrócić uwagę, że wilgotność optymalna wbudowywanych gruntów uszczelnień mineralnych jest dużo mniejsza niż ich granica plastyczności [19]. Dodatkowo przewidziano zastosowanie uszczelnienia syntetycznego w postaci obustronnie tek-

stutowanej geomembrany PEHD (ang. HDPE) grubości $2,0 \text{ mm}$ oraz geowłókniny spełniającej funkcje drenażowo-ochronne.

Wartości parametrów geotechnicznych odpadów komunalnych oraz materiałów syntetycznych budujących podłoże składowiska zaczerpnięto z pracy [10, 14]. Parametry wytrzymałościowe warstw syntetycznych podano jako parametry kontaktu międzyfazowego, które przedstawiono jako wartości wytrzymałości szczytowej przy maksymalnym oporze ścinania, ponieważ są one wykorzystywane w analizach stateczności podstawy składowisk odpadów (wartości rezydualne podczas obliczania stabilności uszczelnień powierzchniowych), ze względu na przewidywane wartości przesunięć pomiędzy warstwami uszczelnień [13, 18].

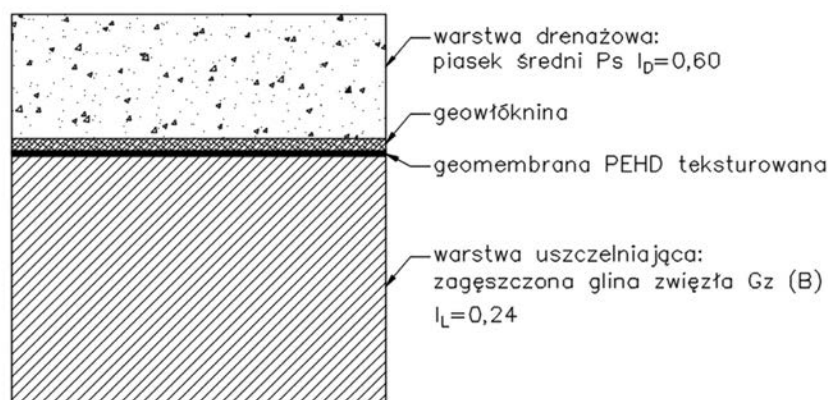
Parametry przyjętych materiałów przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Parametry materiałów wykorzystywanych do obliczeń stateczności odpadów

Materiał	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kPa]
Odpady komunalne	10,20	30,0	3,0
Piasek średni Ps o $I_D = 0,60$	16,68	33,6	–
Piasek średni Ps + geowłóknina	9,02	27,0	14,0
Geowłóknina + geomembrana teksturowana PEHD	5,29	24,0	0,0
Geomembrana teksturowana PEHD + glina zwięzła Gz (B)	14,91	19,0	9,3
Glina zwięzła Gz (B) o $I_L = 0,24$	20,60	17,5	30,1

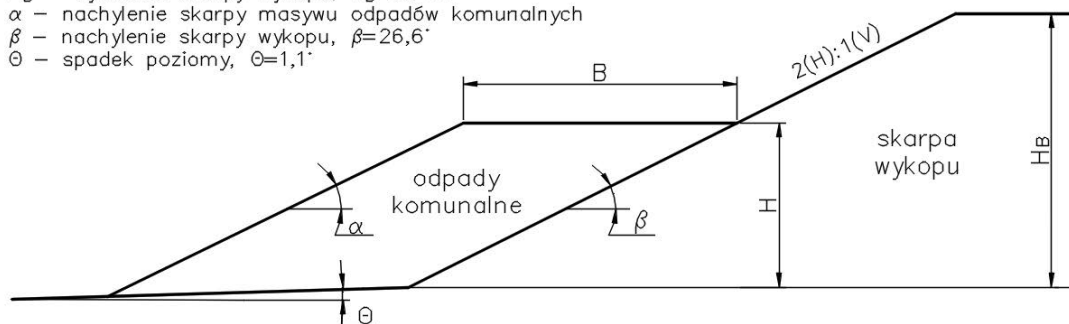
Przyjęto zmienne parametry geometryczne bryły odpadów, takie jak: wysokość masywu odpadów $H = 5, 10, 30$ i 50 m , szerokość korony bryły odpadów $B = 10$ i 50 m oraz nachylenie skarpy masywu odpadów $\alpha = 20, 25, 30$ i 45° . Składowisko odpadów przyjęto jako podpoziomowe w wykopie, gdzie maksymalna wysokość odpadów jest równa wysokości skarpy wykopu. Skarpa wykopu zbudowana jest z piasku drobnego. Ukształtowanie wykopu przyjęto za [10], z pochyleniem dna wykopu 2% ($1,1^\circ$). Na rys. 2 pokazano schemat składowania odpadów komunalnych na składowisku.

Założono warunki gruntowo-wodne panujące w podłożu gruntowym jako proste. Utwory przypowierzchniowe stano-



Rys. 1. Przekrój przez warstwę pojedynczego uszczelnienia skarpy i podstawę składowiska

B – szerokość masywu odpadów komunalnych
H – wysokość masywu odpadów komunalnych
H_B – wysokość skarpy wykopu, H_B=50 m
α – nachylenie skarpy masywu odpadów komunalnych
β – nachylenie skarpy wykopu, β=26,6°
Θ – spadek poziomy, Θ=1,1°



Rys. 2. Schemat składowania odpadów komunalnych na składowisku

wią grunty niespoiste piaszczyste w postaci piasków średnich w stanie średnio zagęszczonym, które zalegają również głębiej w podłożu gruntowym. Poniżej utworów niespoistych występują grunty gliniaste z grupy konsolidacji B, w postaci glin piaszczystych i glin w stanie twardoplastycznym. W analizowanym podłożu nie zakłada się występowania wód gruntowych.

Metodyka obliczeń

Przeanalizowano najbardziej niekorzystne powierzchnie poślizgu i współczynniki wykorzystania stateczności 29 wariantów konstrukcji skarp odpadów wbudowywanych na składowiskach. Rozważania przeprowadzono według podejścia 3 (DA3) według Eurokodu 7 [9], przyjętego według załącznika krajowego do sprawdzania stanu równowagi (stateczności), wyznaczając procentowe wykorzystanie nośności. Wykonano także obliczenia stateczności, biorąc pod uwagę wartości współczynników bezpieczeństwa, czyli wykorzystując charakterystyczne wartości parametrów i oddziaływań. Analizę stateczności konstrukcji wykonano za pomocą programu numerycznego GEO5 (moduł *Stateczność zbocza*), biorąc pod uwagę metody równowagi granicznej: Felleniusa/Pettersona, Bishopa, Spencera, Janbu i Morgensterna-Price'a, przy założeniu kołowej powierzchni poślizgu. Obliczenia przeprowadzono kilkakrotnie, poszukując powierzchni poślizgu o najmniejszym współczynniku stateczności (krytycznej powierzchni poślizgu), będącym stosunkiem wartości charakterystycznych sił utrzymujących wzdłuż powierzchni poślizgu do sił ścinających [2].

Wyniki analiz przedstawiono jako wartość procentowego wykorzystania nośności zgodnie z Eurokodem 7:

$$\Lambda = \frac{E_d}{R_d} \cdot 100\% < 100\% \quad (1)$$

gdzie:

E_d – wartość obliczeniowa momentu wywracającego lub/i sił ścinających wzdłuż powierzchni poślizgu,
R_d – wartość obliczeniowa momentu utrzymującego lub/i sił utrzymujących wzdłuż powierzchni poślizgu.

Porównawczo wyniki zaprezentowano jako wartości współczynników stateczności F:

$$F = \frac{R_k}{E_k} > F_{dop} \quad (2)$$

gdzie:

R_k – wartość charakterystyczna momentu utrzymującego lub/i sił ścinających wzdłuż powierzchni poślizgu,
E_k – wartość charakterystyczna momentu wywracającego lub/i sił utrzymujących wzdłuż powierzchni poślizgu,
F_{dop} – współczynnik bezpieczeństwa (wartość dopuszczalna współczynnika stateczności).

Wyniki obliczeń i analiza

Wyniki obliczeń przedstawiono w zależności od geometrii skarpy i metody obliczeń w tabl. 2 jako stopień wykorzystania nośności Λ oraz w tabl. 3 – jako współczynniki stateczności F.

Praktycznie we wszystkich przypadkach obliczeniowych za pomocą metody Felleniusa/Pettersona uzyskano nieznacznie mniejsze wartości współczynników stateczności F (i największe wykorzystanie nośności) spowodowane przyjęciem zerowych sił tnących i normalnych pomiędzy blokami obliczeniowymi. Przeprowadzając obliczenia według zaleceń Eurokodu 7 [2] należy wziąć pod uwagę, że Eurokod narzuca przyjęcie sił poziomych pomiędzy pionowymi paskami, co wyklucza stosowane metody Felleniusa i metody Janbu, gdy bierze się pod uwagę jedynie pionowe reakcje pomiędzy paskami, co nie ma miejsca w programie GEO5.

Analizując obliczenia wykonane zgodnie z DA3 Eurokodu 7 [2] stwierdzono, że przy założonej konstrukcji i wymiarach geometrycznych składowiska masyw odpadów można uznać za stateczny przy wysokości składowania H = 5 ÷ 50 m, szerokości korony bryły odpadów B równej 10 i 50 m oraz nachyleniu skarpy masywu odpadów α od 20° do 25°. Po zwiększeniu nachylenia skarpy odpadów do 30° skarpa jest stateczna przy B = 10 m, natomiast gdy B = 50 m – jedynie przy wysokości składowania odpadów H = 5 ÷ 10 m. W przypadku dalszego zwiększenia nachylenia skarpy α do 45° warunek stateczności jest spełniony jedynie przy szerokości skarpy równej 10 m i wysokości H składowanych odpadów równej 5 m.

Obliczenia stateczności przy wzięciu pod uwagę współczynnika bezpieczeństwa mogą być bardziej lub mniej rygorystyczne w porównaniu do obliczeń według Eurokodu 7 (DA3), a zależy to od przyjętej wartości współczynnika bezpieczeństwa. Zakładając, że współczynnik bezpieczeństwa powinien wynosić F_{dop} = 1,2 ÷ 1,3 [5], za niestateczne można uważać konstrukcje skarp odpadów o nachyleniu masywu odpadów α ≥ 45° i szeroko-

Tabl. 2. Procentowe wykorzystanie nośności Λ w zależności od geometrii skarpy i metody obliczeń

Parametr geometryczny			Wykorzystanie nośności Λ wyznaczone metodą:				
			Bishopa	Felleniusa /Pettersona	Spencera	Janbu	Morgensterna-Price'a
$\alpha = 20^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	94,1				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	72,3	73,0	71,6	71,4	71,3
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	94,1				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	70,8	72,3	70,8	70,8	70,8
$\alpha = 25^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	94,1				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	87,7	89,1	87,3	87,2	87,2
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	94,1				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	88,8	90,9	88,9	88,9	88,9
$\alpha = 30^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	94,1				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$	97,0	97,9	98,7	98,1	98,4
		$H = 50 \text{ m}$	–	–	–	–	–
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	94,1				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$	102,0	105,4	102,1	102,1	102,1
		$H = 50 \text{ m}$	107,5	110,3	107,6	107,6	107,6
$\alpha = 45^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	99,5	106,2	99,8	99,8	99,2
		$H = 10 \text{ m}$	133,6	137,7	133,1	132,7	132,8
		$H = 30 \text{ m}$	–	–	–	–	–
		$H = 50 \text{ m}$	–	–	–	–	–
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	105,3	110,4	105,7	105,7	105,2
		$H = 10 \text{ m}$	126,5	132,7	127,0	126,9	127,0
		$H = 30 \text{ m}$	158,8	165,4	159,2	159,3	159,2
		$H = 50 \text{ m}$	171,5	178,4	171,9	171,8	171,8

Tabl. 3. Współczynniki stateczności F w zależności od geometrii skarpy i metody obliczeń

Parametr geometryczny			Współczynnik stateczności F wyznaczony metodą:				
			Bishopa	Felleniusa /Pettersona	Spencera	Janbu	Morgensterna-Price'a
$\alpha = 20^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,33				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	1,73	1,71	1,75	1,75	1,75
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,33				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	1,77	1,73	1,76	1,76	1,76
$\alpha = 25^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,33				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	1,42	1,40	1,43	1,43	1,43
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,33				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$					
		$H = 50 \text{ m}$	1,41	1,38	1,41	1,41	1,41
$\alpha = 30^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,33				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$	1,29	1,28	1,27	1,27	1,27
		$H = 50 \text{ m}$	–	–	–	–	–
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,33				
		$H = 10 \text{ m}$					
		$H = 30 \text{ m}$	1,22	1,19	1,22	1,22	1,22
		$H = 50 \text{ m}$	1,16	1,13	1,16	1,16	1,16
$\alpha = 45^\circ$	$B = 10 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,26	1,18	1,25	1,25	1,26
		$H = 10 \text{ m}$	0,94	0,91	0,94	0,94	0,94
		$H = 30 \text{ m}$	–	–	–	–	–
		$H = 50 \text{ m}$	–	–	–	–	–
	$B = 50 \text{ m}$	$H = 5 \text{ m}$	1,19	1,13	1,18	1,18	1,19
		$H = 10 \text{ m}$	0,99	0,94	0,98	0,98	0,98
		$H = 30 \text{ m}$	0,79	0,76	0,79	0,78	0,79
		$H = 50 \text{ m}$	0,73	0,70	0,72	0,73	0,73

a)

[56.94; 228.28]

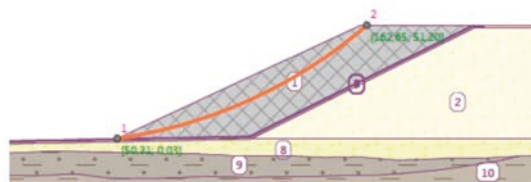


Metoda Spencera

 $\alpha = 20^\circ$, $B = 10$ m, $H = 50$ m
 $\Lambda = 71,6\%$, $F = 1,75$

b)

[19.87; 215.74]

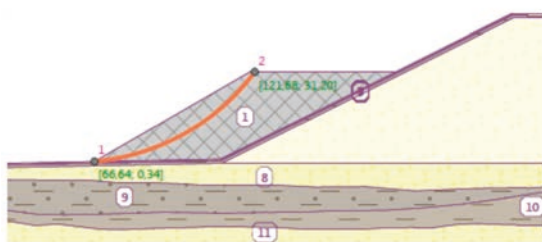


Metoda Bishopa

 $\alpha = 25^\circ$, $B = 50$ m, $H = 50$ m
 $\Lambda = 72,3\%$, $F = 1,41$

c)

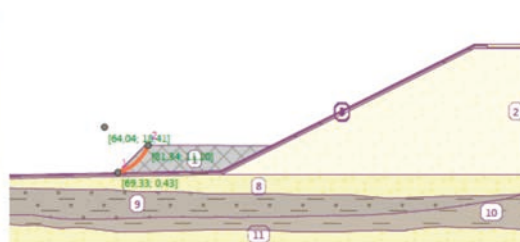
[59.77; 77.09]



Metoda Felleniusa/Pettersona

 $\alpha = 30^\circ$, $B = 50$ m, $H = 30$ m
 $\Lambda = 105,4\%$, $F = 1,19$

d)



Metoda Janbu

 $\alpha = 45^\circ$, $B = 50$ m, $H = 10$ m
 $\Lambda = 126,9\%$, $F = 0,98$

Rys. 3. Przykładowe powierzchnie poślizgu wygenerowane za pomocą programu GEO5:

a), b) stateczność konstrukcji zachowana, c), d) stateczność konstrukcji nie została zachowana

ści korony $B = 50$ m, natomiast w przypadku $B = 10$ m skarpy do wysokości 10 m są stateczne. Warunku stateczności nie spełniają też skarpy o nachyleniu $\alpha = 30^\circ$, szerokości korony $B = 50$ m i wysokości 50 m. Warunki te są praktycznie tożsame z obliczeniami według Eurokodu 7. Biorąc pod uwagę, że F_{dop} powinien być co najmniej równy 1,3 [6], warunek stateczności spełniają jedynie konstrukcje skarp o nachyleniu $\alpha \leq 25^\circ$, w przypadku obu szerokości korony i wysokości masywu $H \leq 50$ m. Skarpy o większym pochyleniu niż $\alpha = 25^\circ$ spełniają warunek stateczności, jeżeli wysokość składowanych odpadów wynosi co najwyżej 10 m.

W przypadku analizowanego nachylenia skarpy α równego 20° i 25° zwiększenie wysokości składowanych odpadów nie powoduje zmniejszenia stateczności masywu odpadów. Wysokość skarpy zaczyna wpływać na stateczność odpadów przy $\alpha = 30^\circ$ i wysokości $H = 30 \div 50$ m, by przy $\alpha = 45^\circ$ osiągnąć pełne oddziaływanie.

Należy zauważyć, że położenie krytycznych linii poślizgu zmienia się w zależności od wymiarów geometrycznych bryły odpadów, a jest generalnie niezależne od przyjętej metody obli-

czeń. W przypadku nachylenia skarpy $\alpha = 20 \div 25^\circ$ i wysokości masywu $H = 5 \div 30$ m, linia poślizgu przebiega w uszczelnieniu skarpy wykopu lub skarpie wykopu (rys. 3a), niezależnie od szerokości korony masywu odpadów. Przy zwiększeniu H do 50 m – przebiega w masywie odpadów, gdy $B = 10$ m – równoległe do skarpy (rys. 3b i c). Przy nachyleniu skarpy $\alpha = 30^\circ$ płaszczyzna poślizgu pojawia się w masie odpadów, gdy $H = 30$ m. W przypadku nachylenia skarpy $\alpha = 45^\circ$ płaszczyzna poślizgu pojawia się w masie odpadów, już gdy $H = 5$ m (rys. 3d).

WNIOSKI

1. Obliczenia stateczności skarp odpadów komunalnych składowanych na składowiskach wykonano zgodnie z zaleceniami podejścia 3 (DA3) Eurokodu 7 oraz analizując współczynniki bezpieczeństwa, gdzie wykorzystano wartości charakterystyczne parametrów i oddziaływań. Ocena stateczności skarp za pomocą obu metod jest

porównywalna, jeżeli wartości dopuszczalne współczynników stateczności są większe niż 1,2. Jeżeli $F_{dop} \geq 1,3$, analizy stateczności za pomocą współczynnika bezpieczeństwa są dużo bardziej rygorystyczne.

2. Odpady komunalne składowane na składowisku podpoziomowym są generalnie stateczne, jeżeli nachylenie skarpy odpadów jest $\alpha \leq 25^\circ$. Wysokość składowanych odpadów może wynosić wtedy nawet 50 m, przy szerokości korony 50 m. Gdy nachylenie skarpy $\alpha = 30^\circ$, stateczne są konstrukcje masywów odpadów do wysokości 10 m.
3. Podane wartości parametrów geometrycznych składowanych odpadów należy traktować jedynie orientacyjnie, ze względu na duże zróżnicowanie parametrów fizyczno-mechanicznych odpadów komunalnych i ich niejednorodność.

LITERATURA

1. Daniel D. E.: Geotechnical practice for waste disposal. London, Chapman&Hall, London 1997.
2. European Technical Committee No. 8 (ETC 8), (1993). Geotechnics of Landfill Design and Remedial Works – Technical Recommendation GLR. Ernst & Sohn, Berlin 1993.
3. GEO5 Podręcznik użytkownika. Fine Ltd. 2018.
4. Koda E.: Geośrodowiskowe aspekty rekultywacji składowisk odpadów. Inżynieria Morska i Geotechnika, 30, 3/2009.
5. Koda E.: Składowiska odpadów. Stateczność zboczy wysypisk odpadów komunalnych. Materiały konferencyjne – XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła 2009.
6. Koda E., Przysiadka J.: Analiza stateczności wysokich skarp starego składowiska odpadów. Analiza stateczności wysokich skarp starego składowiska odpadów. Inżynieria i Budownictwo, 63, 7-8/2007.
7. Łuczak-Wilamowska B.: Uwarunkowania geologiczne składowania odpadów komunalnych. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 455, 2013.
8. Ponikiewski, S. Bzówka, J.: Analiza stateczności zrehabilitowanych skarp składowiska odpadów. Inżynieria i Budownictwo, 69, 3/2013.
9. PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne + poprawka PN-EN 1997-1:2008/Ap2:2010.
10. Qian X., Koerner R. M.: Critical interfaces and waste placement in landfill design. Environmental Geotechnics, 4, 3, 2017.
11. Rosik-Dulewska Cz.: Podstawy gospodarki odpadami. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2015.
12. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Dz. U. 2013 poz. 523).
13. Stark T. D., Poeppel A. R.: Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests. Journal of Geotechnical Engineering, 120, 3, 1994.
14. Sulewska J.: Stateczność konstrukcji składowisk odpadów. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Białostocka, Białystok 2019.
15. Topolnicki M., Mąkinia B.: Ocena stateczności i deformacji wysokiej skarpy odpadów komunalnych. Materiały XLIII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB „Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa”, Tom VIII, Poznań-Krynica, 1997.
16. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach (Dz. U. 2013 poz. 21).
17. Wysokiński L.: Zasady budowy składowisk odpadów. Wydawnictwo ITB, Warszawa 2009.
18. Zabielska-Adamska K.: Problemy określania wytrzymałości kontaktu międzyfazowego w uszczelnieniach mieszanych. Inżynieria Morska i Geotechnika, 1/2012.
19. Zabielska-Adamska K.: Grunty antropogeniczne. Zagęszczalność i właściwości gruntów zagęszczanych. Studia z zakresu inżynierii nr 106, KILiW PAN, 2019.
20. Zadroga B.: Metody określania właściwości mechanicznych odpadów. Inżynieria Morska i Geotechnika, 3/1994.
21. Zadroga B., Olańczuk-Neyman K.: Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego. Aspekty geotechniczno-budowlane. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
22. Zydroń T., Cholewa M., Demczuk P.: Wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych a stateczność skarp konstrukcji. Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiecus 14, 4/2015.