

Eugeniusz KODA, Jolanta PRZYSIADKA

Katedra Geoinżynierii SGGW
Department of Geotechnical Engineering, WAU

Analiza stateczności wysokich skarp starego składowiska odpadów

Stability analysis of high slopes of old sanitary landfill

Słowa kluczowe: składowisko odpadów, stateczności

Key words: sanitary landfill, stability

Wprowadzenie

Problem rekultywacji składowisk odpadów komunalnych zaczął być dostrzegany dopiero w latach dziewięćdziesiątych. W Polsce istnieje kilka tysięcy starych składowisk odpadów komunalnych wymagających podjęcia prac rekultywacyjnych. W przypadku składowisk tzw. nadpoziomowych bardzo ważnym problemem, obok ochrony środowiska gruntowo-wodnego, jest zapewnienie stateczności skarp. Ze względu na ograniczoną powierzchnię składowania na jednym z największych warszawskich składowisk w Radiowie odpady deponowane są na dużych wysokościach. Stąd wynika konieczność ukształtowania bryły składowiska zabezpieczającego stateczność skarp (Daniel 1993, ISSMFE/ETC 1994). Występowanie potencjalnych osuwisk odpadów powoduje ekspansję składowiska na tereny bezpośrednio przyległe, czę-

sto stanowiące inną własność lub mające walory środowiskowe. Zdarzenia tego typu miały miejsce na tym składowisku wielokrotnie do połowy lat dziewięćdziesiątych. Do wzmocnienia stateczności skarp zastosowano: mur oporowy, nasypy dociążające, lokalne zładogodzenie nachylenia, lokalną wymianę i dogęszczenie odpadów w podbudowie drogi oraz poziome wzmocnienia geosiatką i materacami z opon samochodowych (Koda i in. 1997).

Badania dla oceny parametrów mechanicznych odpadów do analizy stateczności obejmowały: analizę morfologiczną, wykopy badawcze, pomiary odkształceń, sondowania statyczne WST i CPT, próbne obciążenia oraz analizy wsteczne osuwisk obserwowanych w przeszłości na składowisku (Koda 1998).

Charakterystyka obiektu

Składowisko Radiowo, o powierzchni około 15 ha, zlokalizowane jest przy północno-zachodniej granicy

Warszawy. W latach 1962–1991 były na nim składowane odpady komunalne, a od 1992 roku jest to obiekt technologiczny, przyjmujący około 300 ton/dobę tzw. odpadów balastowych z kompostowni. Przy wysokich stromych skar-pach kluczowym zagadnieniem stało się zapewnienie ich stateczności. Na skar-pie wschodniej w 1991 roku wystąpiło duże osuwisko, a na niektórych frag-mentach obserwowano pęknięcia, które świadczą o stanie równowagi zbliżonym do granicznego. Ostatnie znaczące osu-wisko wystąpiło w 1995 roku. Z uwagi na końcową fazę eksploatacji skarpy kształtowane są z uwzględnieniem przeznaczenia składowiska do celów rekreacyjnych (ścieżki rowerowe). Do-datkowo w ramach rekultywacji wyko-nano przesłone przeciwfiltracyjną, sys-tem ujęcia odcieków i drogi technolo-giczne (rys. 1). W najbliższym latach planowane jest dokończenie mineralne-go systemu przykrycia i zabudowy bio-logicznej z wykorzystaniem roślinności oraz budowę systemu odgazowania składowiska.

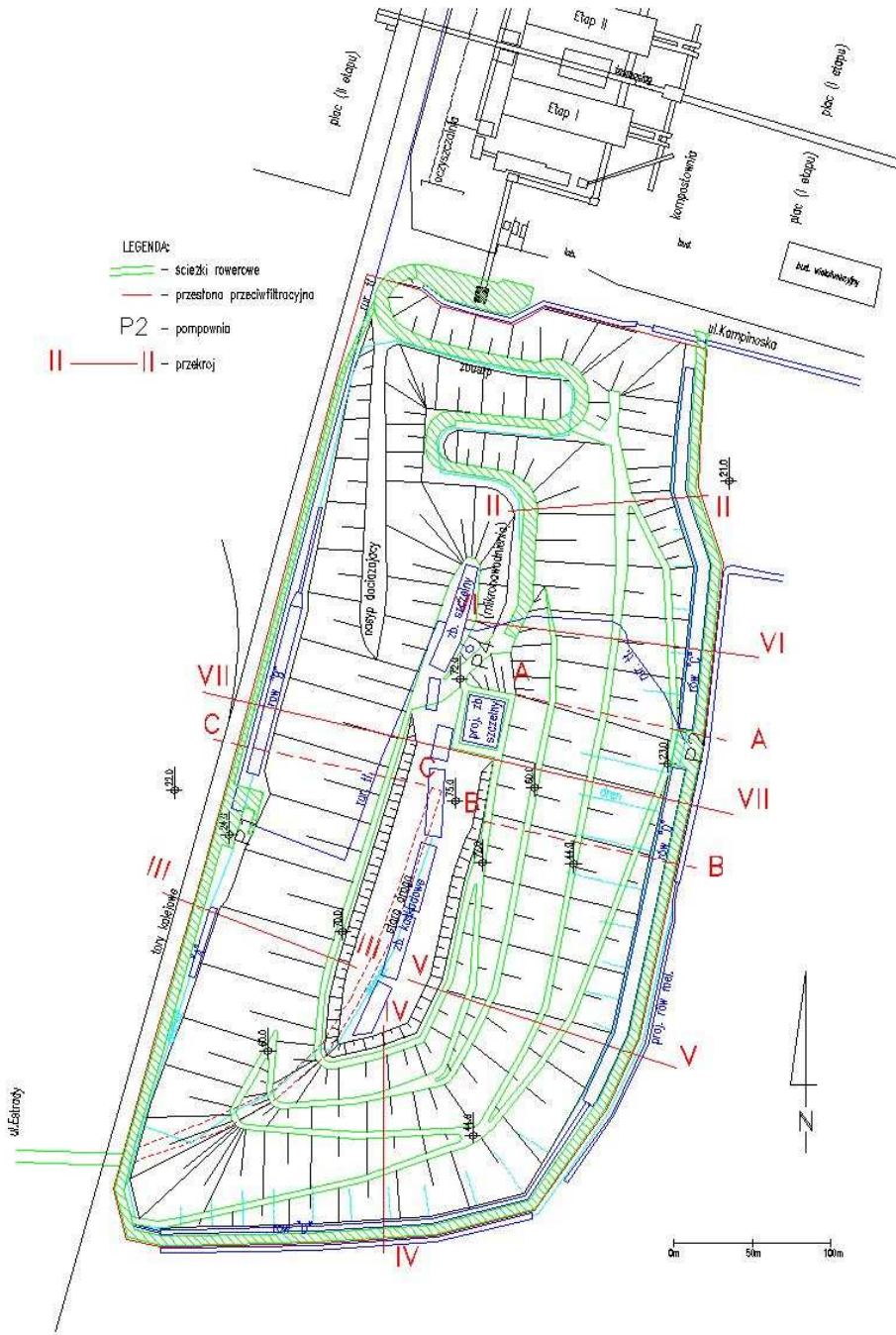
Ocena parametrów wytrzymałościowych odpadów

Odpady deponowane na składowi-sku są materiałem bardzo zróżnicowa-nym i niejednorodnym (Zadroga 1994), mogą znacznie różnić się zarówno pod względem morfologicznym, jak i stan-em zagęszczenia. Wynika stąd proble-m z jednoznacznym określeniem ich właściwości fizycznych i mechanicz-nych (Topolnicki i Mąkinia, 19970).

W zależności od rodzaju odpadów stosuje się różne sposoby oceny para-

metrów wytrzymałościowych. Bezpo-średnie badania parametrów wytrzyma-łościowych poszczególnych składników odpadów komunalnych były dotychczas bardzo rzadko przeprowadzane (Manas-sero i inni, 1996). Wyznaczenie para-metrów geotechnicznych odpadów ko-munalnych wymaga wykorzystania nowych technik badawczych stosowa-nych w geotechnice, z uwzględnieniem modyfikacji wynikającej ze specyfiki odpadów komunalnych, wykazujących jeszcze większą niejednorodność niż grunty (Koda 1997). Najlepsze efekty w ocenie parametrów wytrzymałości-owych uzyskuje się przy zastosowaniu badań *in situ* (Sanches-Alciturri i in. 1993) popartych wynikami laboratoryj-nych badań w aparatach wielkowymia-rowych (Jessberger i Kockel 1993) i/lub analizą wsteczną. Przy interpretacji parametrów wytrzymałościowych nale-ży uwzględnić wiek i skład morfolo-giczny odpadów, który jest też wyj-ściową analizą dla wyboru sposobu i technologii utylizacji odpadów. Wy-konanie badań morfologicznych odpa-dów komunalnych przeprowadzonych dla odpadów balastowych z kompo-stowni Radiowo oraz starych odpadów komunalnych nieprzekompostowanych umożliwiło określenie uśrednionego ich składu. Na analizowanym obiekcie wy-typowano 3 rodzaje materiałów odpa-dowych, dla których wyznaczono para-metry wytrzymałościowe, są to:

- odpady balastowe z kompostowni (pozostałe z produkcji kompostu) składają się na nie m.in. tworzywa sztuczne, folie, tekstylia, a także złom metali i niewielkie ilości od-padów pochodzenia organicznego (5–15%),



RYSUNEK 1. Składowisko Radiowo – przekroje do analizy wstecznej i obliczeń stateczności
 FIGURE 1. Radiowo landfill – the location of cross-sections for back-analysis and stability calculations

- odpady balastowe zmieszane z piaskiem,
- stare odpady komunalne – powyżej 10 lat.
- przekrój A-A na skarpie wschodniej (rejon osuwiska z 1991 roku),
- przekrój B-B na skarpie wschodniej (rejon pęknięć w górnej części skarpy),
- przekrój C-C na skarpie zachodniej (skarpa stabilna o dużym nachyleniu).

Dla określenia parametrów wytrzymałościowych, niezbędnych do prawidłowego zaprojektowania rekultywacji składowiska, wykorzystano analizę wsteczną stateczności skarp zinventaryzowanych geodezyjnie oraz próbnych obciążeń przeprowadzonych w warunkach polowych (metoda obserwacyjna). Przy ocenie parametrów uwzględniono również wyniki sondowań WST i CPT, prowadzonych w ramach nadzoru nad rekultywacją składowiska.

Na składowisku Radiowo do analizy wstecznej wybrano trzy przekroje skarp (tab. 1):

Do określenia przebiegu powierzchni poślizgu w przekroju A-A wykorzystano przeprowadzone sondowanie statyczne CPT, z którego na głębokości około 9 m uzyskano wyraźne obniżenie wartości oporu na stożku q_c (rys. 2). Ustalone na podstawie map archiwalnych nachylenie skarpy w chwili zsuwu wynosiło 1 : 1,15, przy wysokości około 46 m.

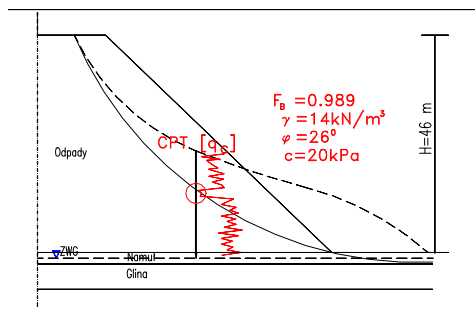
Gęstość objętościową odpadów określono z badań polowych przepro-

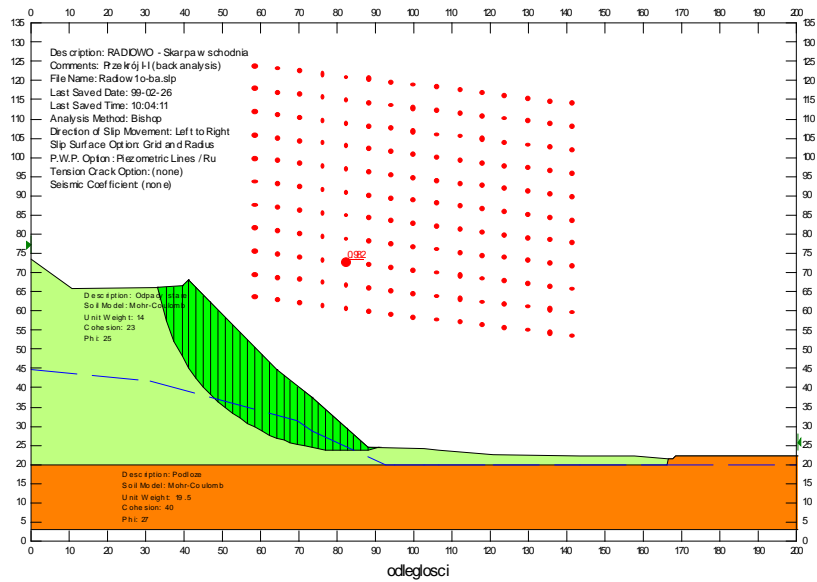
TABELA 1. Przykładowe wyniki obliczeń współczynnika stateczności (F_{min}) na podstawie analizy wstecznej skarp na składowisku Radiowo przy założonych parametrach $\phi'=26^\circ$, $c'=20$ kPa (odpady stare)

TABLE 1. Stability factors from back – analysis of slopes on Radiowo landfill for $\phi'=26^\circ$, $c'=20$ kPa

Przekrój obliczeniowy	F_{min}	Metoda obliczeń	Uwagi
A-A	0,989	Bishop	osuwisko z 1991 r. na skarpie wschodniej
	0,967	szwedzka	
	1,030	MES	
B-B	1,029	Bishop	pęknięcia na skarpie wschodniej
	0,984	szwedzka	
	1,080	MES	
C-C	1,142	Bishop	skarpa stateczna zachodnia
	1,092	szwedzka	
	1,190	MES	

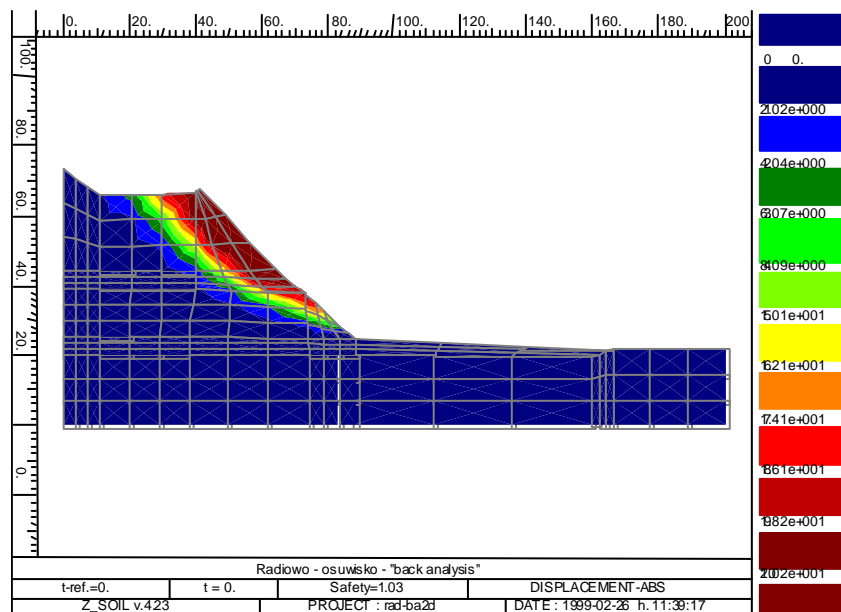
RYSUNEK 2. Schemat osuwiska na wschodniej skarpie składowiska Radiowo
FIGURE 2. Scheme of the landslide in the eastern slope of Radiowo landfill





RYSUNEK 3. Wyniki analizy wstecznej stateczności osuwiska metodą Bishopa (program GEO-SLOPE).

FIGURE 3. The back-analysis of the landslide in Radiowo landfill by Bishop's method (GEO-SLOPE program).

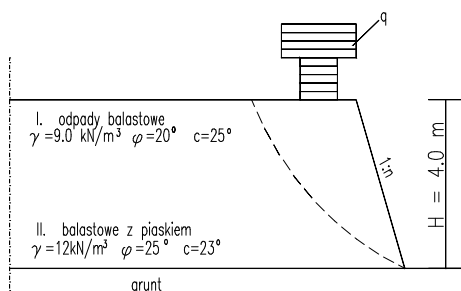


RYSUNEK 4. Wyniki analizy wstecznej stateczności osuwiska z wykorzystaniem MES (program Z-SOIL)

FIGURE 4. The back-analysis of the landslide in Radiowo landfill by FEM method (Z-SOIL program)

wadzonych we wkopach badawczych. Parametry wytrzymałościowe c' i φ' , dobierano metodą najmniejszych kwadratów (uzyskanie współczynnika stateczności na poziomie równowagi granicznej), przy czym do oceny spójności wykorzystywano wyniki sondowań statycznych CPT. Moduł odkształcenia do obliczeń MES określono z analizy kilkuletnich pomiarów osiadań i przemieszczeń poziomych skarp składowiska (metoda obserwacyjna). Schemat obliczeniowy do analizy wstecznej skarpy w przekroju A-A metodą Bishopa przedstawiono na rysunku 3, a z wykorzystaniem metody elementów skończonych na rysunku 4.

Próbne obciążenie zrealizowano na dwóch z trzech sekcji nasypu doświadczalnego, tj. pierwszej zbudowanej z odpadów balastowych i trzeciej wykonanej z odpadów balastowych z przekładkami piasku (rys. 5). Obciążenie realizowano za pomocą płyt betonowych. Na pierwszej sekcji utratę stateczności osiągnięto przy obciążeniu $q_1 = 68 \text{ kN/m}^3$, a na sekcji trzeciej przy $q_3 = 90 \text{ kN/m}^3$. Obciążenie q_1 wykorzystano do określenia parametrów wytrzymałościowych odpadów balastowych, nato-



RYSUNEK 5. Schemat próbnych obciążeń na nasypie doświadczalnym

FIGURE 5. Scheme of back-analysis of the slope failure tests on Radiowo

miast obciążenie q_3 dla odpadów balastowych z przekładkami piasku. Parametry dla podłoża gruntowego przyjęto z sondowań statycznych CPT. Dla przekroju V-V (strona południowo-wschodnia) przyjęto odmienne wartości parametrów z uwagi na występowanie w podłożu namulów organicznych. Parametry wytrzymałościowe odpadów i gruntów podłoża do analizy stateczności zestawiono w tabeli 2.

Zabiegi w celu poprawy stateczności skarp

Skuteczne przeprowadzenie zabiegów rekultywacyjnych na składowiskach odpadów jest często uwarunkowane wykonaniem zabiegów w celu poprawy parametrów zdeponowanych odpadów lub wykonanie konstrukcji wzmacniających stateczność (Zadroga 1999). W celu poprawy stateczności skarpy (wysokość około 15 m) wzdłuż pierwszego odcinka nowej drogi wjazdowej, zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie ulicy Kampinoskiej, wykonano: mur oporowy z profili Larsena w rejonie placu przesywowego balastu, złagodzenie pochylenia skarpy z 1 : 1,1 na 1 : 1,75, wymianę niezagęszczonego materiału w podbudowie drogi o miąższości około 5 m i wzmocnienie poziome warstwami geosiatki PE (Koda i inni, 1997).

Od strony zachodniej składowisko graniczy z boczną koleją do Huty Warszawa. Ponadto w pobliżu podstawy skarpy przebiega gazociąg. Skarpa składowiska ma pochylenie 1 : 1,28, co naraża ją na powstanie osuwisk zagrażających bezpieczeństwu ruchu na drodze

TABELA 2. Parametry wytrzymałościowe odpadów balastowych i gruntów podłoża dla składowiska Radiowo

TABLE 2. Shear strength parameters for non-composted wastes in Radiowo landfill

Kategoria odpadów	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	Metody badań i weryfikacji
Balastowe	11,0	20	25	CPT, WST, próbne obciążenia
Balastowe + piasek	12,0	25	23	CPT, WST, próbne obciążenia
Stare odpady	14,0	26	20	CPT, WST, analiza wsteczna
Podłoże gruntowe	18,5	31	0	CPT, DMT, PN-81/B-03020
Podłoże w części południowo-wschodniej	17,5	20	10	CPT, DMT, PN-81/B-03020

wjazdowej. Z uwagi na ograniczony teren w sąsiedztwie dolną część skarpy wzmocniono nasypem dociążającym. Górną część skarpy wzmocniono geosiatką PE oraz materacami z opon samochodowych. Opony wiązano taśmą polipropylenową łączoną na zapinki PE. W podstawie nasypu dociążającego wykonano warstwę drenażową o uziarnieniu filtra odwrotnego dla odprowadzenia odcieków z podstawy składowiska, natomiast zewnętrzną warstwę nasypu wykonano z gruntu spoistego, spełniającego rolę mineralnego uszczelnienia przykrycia.

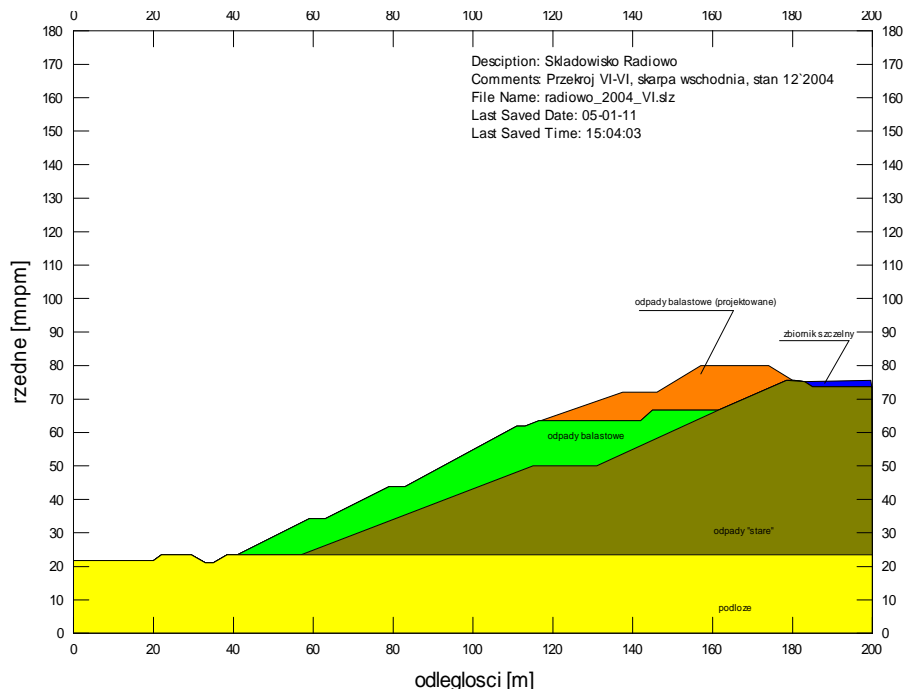
Od strony wschodniej, po uzyskaniu dodatkowego terenu na podstawie decyzji Ministra Środowiska (czasowe wylesienie), wzmocnienie skarpy zrealizowano z wykorzystaniem nasypu dociążającego (rys. 6). Nasyp wykonywany jest z odpadów balastowych, gruzu i gruntu. Warstwa zewnętrzna nasypu dociążającego jest budowana z gruntu spoistego, a w podstawie ułożono warstwę drenażową (uziarnienie filtra odwrotnego) dla odprowadzenia odcieków

z podstawy składowiska (Koda i in. 1997).

Analiza stateczności w wybranych przekrojach skarpy składowiska

W celu analizy stateczności skarpy składowiska odpadów balastowych w Radiowie przeprowadzono sprawdzające numeryczne obliczenia stateczności w 7 wytypowanych przekrojach obliczeniowych:

- przekroju II-II (wschodnia skarpa nasypu dociążającego),
- przekroju III-III (zachodnia skarpa w części południowej),
- przekroju IV-IV (skarpa południowa – zamknięcie „starej drogi wjazdowej”),
- przekroju V-V (wschodnia skarpa nasypu dociążającego w południowej części),
- przekroju VI-VI (wschodnia skarpa nasypu dociążającego w środkowej części),



RYSUNEK 6. Geometria skarpy składowiska w przekroju VI-VI z nasypem dociążającym do analizy stateczności.

FIGURE 6. The berm reinforced of eastern slope of the landfill in cross-section VI-VI, for stability analysis

- przekroju VII-VII (zachodnia skarpa w środkowej części),
- przekroju VIII-VIII (wschodnia skarpa w środkowej części).

Geometrię do analizy stateczności ustalono na podstawie map geodezyjnych. Natomiast poziom odcieków uzyskano z pomiarów w studniach gazowych i z obserwacji wysięków odcieków w rejonie zbiorników retencyjnych. Lokalizację przekrojów obliczeniowych do analizy stateczności pokazano na rysunku 1.

Analizę stateczności wykonano, wykorzystując klasyczne (dla gruntów) metody obliczeń (metoda Bishopa i szwedzka) przy zastosowaniu programu komputerowego GEO-SLOPE (Kanada). Metoda Bishopa uwzględnia

oddziaływanie sił między poszczególnymi paskami, co w przypadku tak niejednorodnego materiału, jakim są odpady, pozwala na uzyskanie bardziej miarodajnych wyników.

Do obliczeń stateczności zastosowano metody zakładające utratę stateczności wzdłuż cylindrycznej powierzchni poślizgu. Bardziej miarodajne wyniki dla składowisk odpadów uzyskuje się z metody Bishopa, z uwagi na skład morfologiczny odpadów sprzyjający oddziaływaniom międzypaskowym.

Obliczone wartości współczynnika stateczności (F) dla poszczególnych przekrojów obliczeniowych dla stanu aktualnego i stanu docelowego zamieszczono w tabeli 3, a przykładowe

TABELA 3. Wyniki analizy stateczności skarp składowiska metodą Bishopa dla stanu przed wzmocnieniem, stan na grudzień 2004 r. i stanu docelowego

TABLE 3. Wyniki analizy stateczności skarp składowiska metodą Bishopa dla stanu przed wzmocnieniem, stan na grudzień 2004 r. i stanu docelowego

Przekrój	Współczynnik stateczności F		
	skarpy bez wzmocnień	stan na grudzień 2004 r.	stan docelowy
II-II	1,04	1,358	1,357
III-III	1,14	1,277	1,268
IV-IV	1,18	1,451	1,328
V-V	1,12	1,309	1,296
VI-VI	1,03	1,484	1,435
VII-VII	1,15	1,157	1,154
VIII-VIII	1,08	1,365	1,252

schematy obliczeń dla wybranych przekrojów pokazano na rysunkach 7, 8, 9 i 10.

Współczynniki stateczności (F) z metody Bishopa, uzyskane dla przekrojów obliczeniowych (poza przekrojami III i VII), są większe od wartości $F = 1,3$, które dla składowiska odpadów przyjmuje się za wartość bezpieczną dla zachowania stateczności skarp. Dla przekroju obliczeniowego III-III (skarpa zachodnia w południowej części składowiska) wartość współczynnika stateczności jest mniejsza od wartości 1,3 i wynosi $F = 1,26$ dla aktualnego stanu ukształtowania bryły (grudzień 2004) oraz $F = 1,27$ dla stanu docelowego.

Skarpy składowisk komunalnych o współczynniku $F < 1,3$ uważa się za niepewne pod względem stateczności. Z tego względu należy zwrócić szczególną uwagę na prace i zabiegi rekultywacyjne wykonywane na południowo-zachodniej części składowiska. Na skarpie tej należy założyć dodatkowe repery i prowadzić systematyczne pomiary odkształceń.

Jeszcze niższe współczynniki stateczności ($F = 1,16$) uzyskano dla prze-

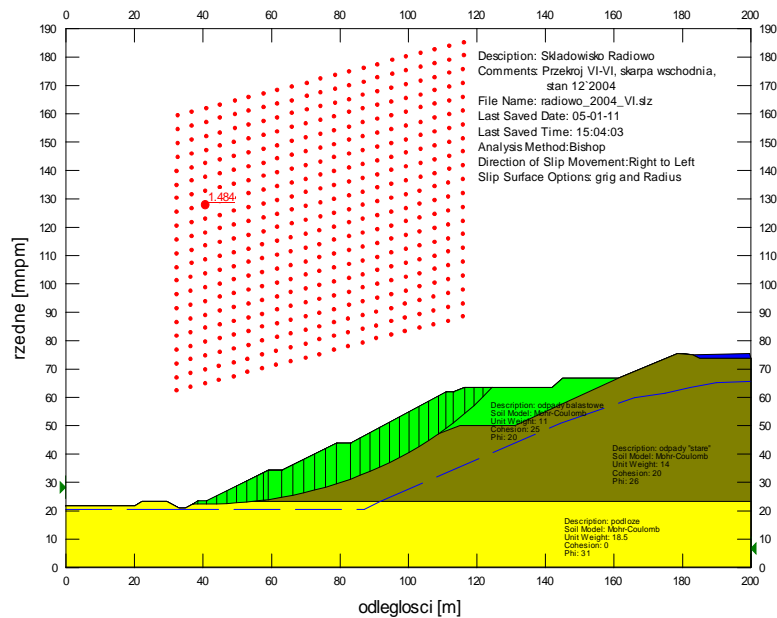
kroju VII (stara skarpa składowiska od strony zachodniej). Przekrój ten uznano mimo to za stabilny, z uwagi na wieloletnie obserwacje stanu tej skarpy. Przekrój ten wcześniej był wykorzystywany do analizy wstecznej (przekrój C-C) i zakładano dla niego współczynnik stateczności na poziomie $F = 1,15$ dla weryfikacji parametrów geotechnicznych starych odpadów. Należy prowadzić dalsze obserwacje stanu skarpy zachodniej w rejonie analizowanego przekroju VII.

Wnioski

Zapewnienie stateczności starych nadpoziomowych składowisk odpadów komunalnych jest kluczowym zagadnieniem do rozwiązania na etapie rekultywacji tych obiektów.

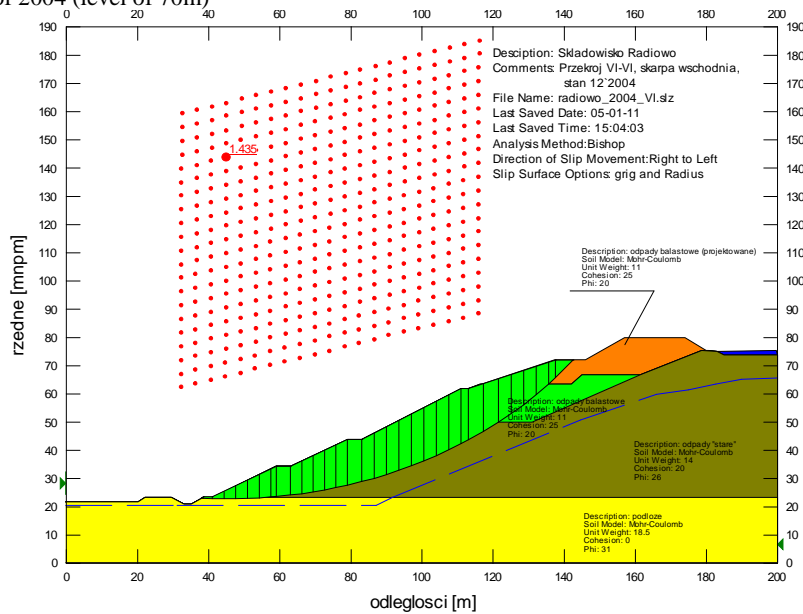
Parametry geotechniczne odpadów mogą być wyznaczone z zastosowaniem analizy wstecznej uzupełnionej analizą składu i wieku odpadów oraz technikami badań *in situ*.

Do analizy stateczności składowisk odpadów mogą być stosowane zarówno



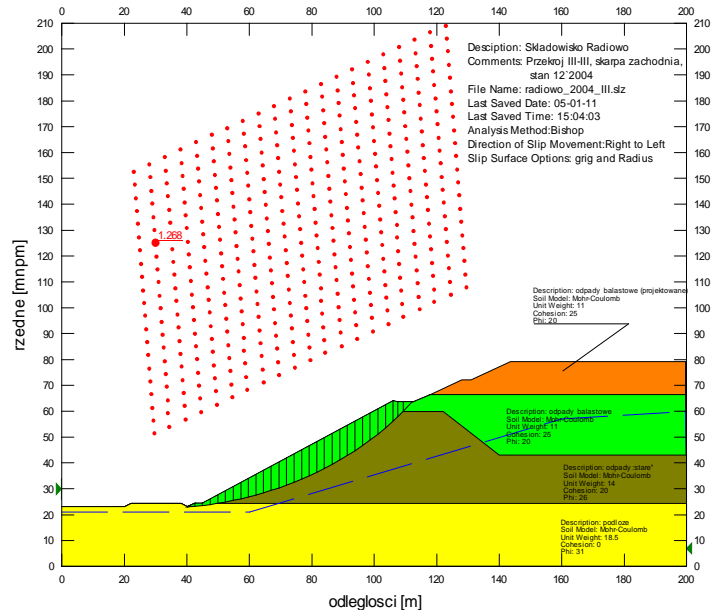
RYSUNEK 7. Wyniki analizy stateczności skarpy wschodniej z metody Bishopa w przekroju VI-VI dla stanu w grudniu 2004 r. (rzędna 70 m n. "0" Wisły)

FIGURE 7. Results of slope stability analysis in cross-section VI-VI by Bishop's method for state of the end of 2004 (level of 70m)

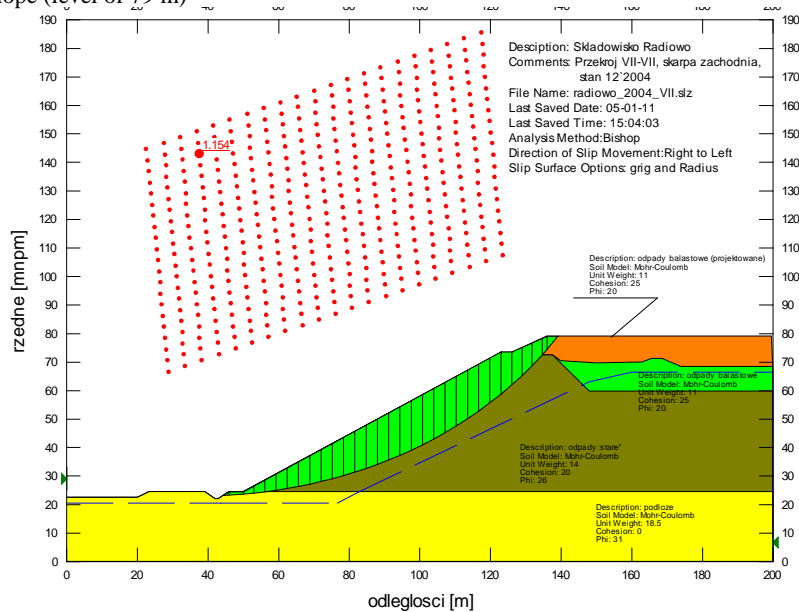


RYSUNEK 8. Wyniki analizy stateczności skarpy wschodniej metodą Bishopa w przekroju VI-VI dla planowanego stanu docelowego (rzędna 79 m n. "0" Wisły)

FIGURE 8. Results of slope stability analysis in cross-section VI-VI by Bishop's method for fixed state landfill slope (level of 79 m)



RYSUNEK 9. Wyniki analizy stateczności skarpy zachodniej metodą Bishopa w przekroju III-III dla planowanego stanu docelowego (rzędna 79 m n. "0" Wisły)
 FIGURE 9. Results of slope stability analysis in cross-section III-III by Bishop's method for fixed landfill slope (level of 79 m)



RYSUNEK 10. Wyniki analizy stateczności skarpy zachodniej metodą Bishopa w przekroju VII-VII dla planowanego stanu docelowego (rzędna 79 m n. "0" Wisły)
 FIGURE 10. Results of slope stability analysis in cross-section VII-VII by Bishop's method for fixed landfill slope (level of 79m)

metody pasków, oparte na kołowej powierzchni poślizgu, jak i metoda elementów skończonych. Z obliczeń stateczności skarp składowiska Radiowo uzyskano współczynniki stateczności wyższe od 1,2 z wyjątkiem starej skarpy od strony zachodniej (przekrój VII-VII), dla której uzyskano współczynnik stateczności 1,15. Skarpę uznano za stateczną z uwagi na utrzymanie istniejącego stanu od około 15 lat.

Summary

Stability analysis of high slopes of old sanitary landfill. The paper presents the stability analysis of old large landfills of embankment type, localised nearby Warsaw, i.e. Radiowo. The reinforcement solutions applied on the landfill body as well as influence of leachate level in waste body were taken into account in stability analysis. The reinforcement methods consist of retaining wall, berms, geogrids and tyre mattresses. The paper also presents shear strength parameters determined for wastes disposed on the landfill. Field tests consisting of morphological analysis, settlement measurements, WST and CPT soundings, back stability analysis as well as slope failure tests performed for determination of waste mechanical parameters. Stability analysis of the high landfill slopes were performed by classical (GEO-SLOPE numerical program) and finite element methods (Z-SOIL numerical program). The applied slope reinforcements and assurance of the proper performance of the leachate drainage have the greatest importance for the landfill slope stability.

Literatura

DANIEL D. 1993: Geotechnical practice for waste disposal. Chap. and Hall. London.

- ISSMFE/ETC. 1994: Geotechnics of Landfills Design and Remedial Works – Technical Recommendations GLR. Ernst & Sohn. Berlin, 1993 (tłumaczenie Geoteko).
- JESSBERGER H.L., KOCKEL R. 1993: Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials. *Proc. 1st Intern. Symp. on Geot. Rel. to the Envir.*, Bolton.
- KODA E. 1997: In situ tests of MSW geotechnical properties. *Proc. of the 2nd Intern. Symp. on Geot. and the Environment*, Kraków – Bolton.
- KODA E. 1998: Stability conditions improvement of the old sanitary landfills. *Proc. of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lizbona.
- KODA E. 2000: Stability analysis of high slopes of old sanitary landfills. *Annals of Warsaw Agricultural University – Land Reclamation*, 29: 85–96.
- KODA E., PEJDA K., GOŁĘGOWSKI P. 1997: Poprawa warunków stateczności starego wysypiska odpadów komunalnych. *Roczniki AR, CCLXX*, 2: 129–139.
- MANASSERO M., van IMPE W.F., BOUAZZA A. (1996): Geotechnical properties of MSW. *Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Geot. Envir.*, Osaka.
- SANCHES-ALCITURRI J.M., PALMA J., SAGASETA C., CANIZAL J. 1993: Mechanical properties of wastes in a sanitary landfill. *Proc. of the 1st Intern. Symp. on Geot. Rel. to the Envir.*, Bolton.
- TOPOLNICKI M., MAKINIA B. 1997: Ocena stateczności i deformacji wysokiej skarpy odpadów komunalnych. *XLIII Konferencja Naukowa nt. „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”*, Poznań – Krynica.
- ZADROGA B. 1994: Metody określania właściwości mechanicznych odpadów. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 3: 127–132.
- ZADROGA B. 1999: Polepszanie właściwości i stateczności odpadów komunalnych gromadzonych na składowiskach. *III Konferencja Naukowo-Techniczna „Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa”*, Olsztyn – Kortowo.

Author's address:

Eugeniusz Koda
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
Ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa,
Poland