

Eugeniusz KODA  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

## WYKORZYSTANIE ANALIZY WSTECZNEJ DO OCENY PARAMETRÓW ODPADÓW I ANALIZY STATECZNOŚCI STARYCH NADPOZIOMOWYCH WYSYPISK ODPADÓW KOMUNALNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono ocenę parametrów wytrzymałościowych przeprowadzoną na potrzeby rekultywacji wysypisk Radiowo i Łubna zlokalizowanych w rejonie Warszawy. Badania parametrów wytrzymałościowych odpadów do analizy stateczności obejmowały: analizę morfologiczną, wkopy i nasypy badawcze, sondowania statyczne WST i CPT, próbne obciążenia płytami MON oraz analizy wsteczne wybranych fragmentów skarp (skarpa stateczna, skarpa z pęknięciami, osuwisko). Obliczenia stateczności wysypisk, zarówno na potrzeby analizy wstecznej, jak i obliczeń projektowych, przeprowadzono z zastosowaniem klasycznych metod stosowanych w geotechnice (program GEO-SLOPE) oraz metody elementów skończonych (program Z-SOIL). W artykule omówiono też zabiegi techniczne zaprojektowane w celu zapewnienia stateczności wysokich skarp wysypisk Radiowo i Łubna. Doświadczenia i wyniki obserwacji z tych obiektów są również wykorzystywane do rekultywacji innych podobnych wysypisk.

## THE USE OF BACK-ANALYSIS FOR THE DETERMINATION OF WASTE SHEAR STRENGTH WASTE PARAMETERS AND STABILITY ANALYSIS OF OLD EMBANKMENT SANITARY LANDFILLS

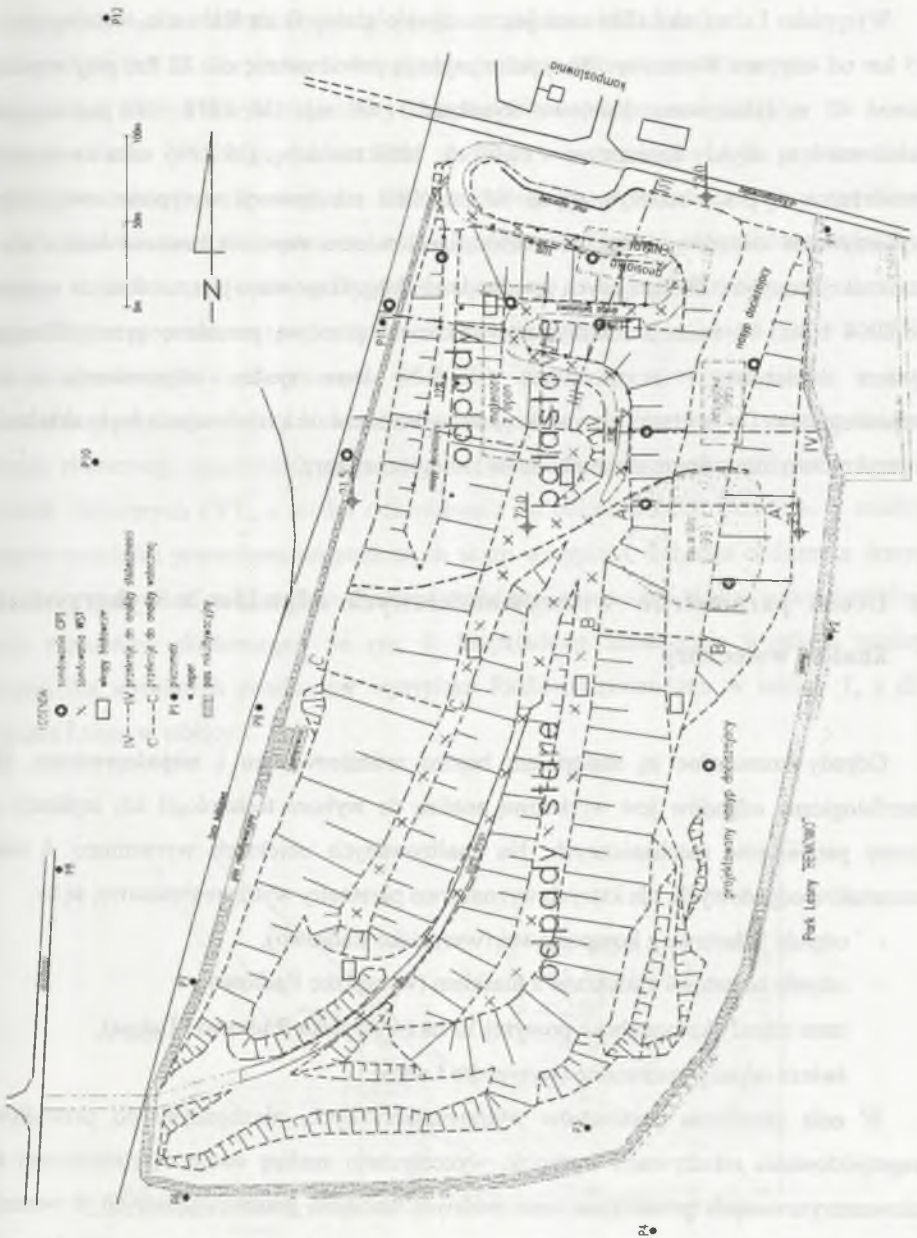
**Summary.** The paper presents the shear strength parameters determination performed for the design of remedial works of Radiowo and Łubna old sanitary landfills. The investigation of waste shear strength parameters were performed using: waste morphological analysis, observations on test pits and test embankments, WST and CPT static soundings, slope failure tests with concrete slabs loading as well as back-analysis of selected parts of high landfill slopes (stable slope, cracked slope and landslides). Slope stability calculations for back-analysis and design analysis were carried out by classical methods (GEO-SLOPE numerical programme) and finite element modelling (Z-SOIL numerical programme). The paper also presents the design solutions for improvement of the slope stability of Radiowo and Łubna landfills. The experiences and observational results from these sites are used for the design of remedial works on other sanitary landfills.

## 1. Wstęp

W Polsce istnieje kilka tysięcy starych wysypisk odpadów komunalnych wymagających podjęcia prac rekultywacyjnych. Część z nich stanowią duże wysypiska nadpoziomowe, gdzie podstawowe znaczenie ma zabezpieczenie stateczności skarp. Do oceny parametrów wytrzymałościowych zwykle wykorzystuje się techniki stosowane w geotechnice. Reprezentatywne parametry wytrzymałościowe dla odpadów komunalnych uzyskuje się przy wykorzystaniu analizy wstecznej osuwisk i skarp statecznych o dużym pochyleniu oraz próbnych obciążeń [1]. Badania parametrów do analizy stateczności obejmowały też analizę morfologiczną odpadów, wkopy i nasypy badawcze oraz sondowania WST i CPT. Do obliczeń stateczności wykorzystano metody klasyczne oraz metodę elementów skończonych. Do wzmocnienia stateczności skarp wysypiska Radiowo zastosowano: mur oporowy, nasypy dociążające oraz poziome wzmocnienia geosiatką i materacami z opon, natomiast na wysypisku Łubna stateczność skarp zapewniało głównie za pomocą nasypów dociążających z wykorzystaniem odpadów [2].

## 2. Charakterystyka obiektów doświadczalnych

Wysypisko Radiowo o powierzchni ok. 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 ok. 300 ton/dobę tzw. odpadów balastowych z kompostowni. Przy wysokości przekraczającej 55 m i dużych pochyleniach skarp, kluczowym zagadnieniem stało się zapewnienie ich stateczności. W 1991 roku na skarpię wschodniej wystąpiło duże osuwisko (rys. 1), a na niektórych fragmentach obserwowano pęknięcia świadczące o stanie równowagi zbliżonym do granicznego. Z uwagi na końcową fazę eksploatacji, skarpy kształtowane są z uwzględnieniem przeznaczenia wysypiska dla celów rekreacyjnych (ścieżki rowerowe). Ponadto, w ramach rekultywacji, wykonano przesłonę przeciwfiltacyjną, system ujęcia odcieków i drogi technologiczne. W następnych latach planowane jest dokończenie mineralnego systemu przykrycia i zabudowy biologicznej z wykorzystaniem roślinności oraz budowa systemu odgazowania.



Rys. 1. Wysypisko Radiowo: przekroje do analizy wstecznej i obliczeń stateczności oraz lokalizacja miejsc sondowań statycznych

Fig. 1. Radiowo landfill: the location of cross-sections for back-analysis and stability calculations as well as points of static soundings



Wysypisko Łubna zlokalizowane jest na terenie gminy Góra Kalwaria, w odległości ok. 35 km od centrum Warszawy. Wysypisko zajmuje powierzchnię ok. 22 ha, przy wysokości ponad 40 m (planowana docelowa wysokość – 60 m). Od 1978 roku na wysypisku składowane są odpady komunalne w ilości ok. 1000 ton/dobę. Od 1996 roku na wysypisku prowadzone są prace rekultywacyjne. W projekcie rekultywacji wysypiska uwzględniono wykorzystanie odpadów, które w przeważającej mierze stanowią materiał budowlany do konstrukcji nasypów dociążających i podbudowy dróg. Planowane jest zamknięcie wysypiska w 2004 roku. W ramach rekultywacji wykonano pionową przesłonę przeciwfiltracyjną, system drenażowy i oczyszczalnię odcieków oraz system odgazowania i drogi technologiczne. Do realizacji pozostało jeszcze dokończenie kształtowania bryły składowiska z przykryciem mineralnym oraz zabudowa biologiczna skarp.

### **3. Ocena parametrów wytrzymałościowych odpadów z wykorzystaniem analizy wstecznej**

Odpady komunalne są materiałem bardzo zróżnicowanym i niejednorodnym. Skład morfologiczny odpadów jest wyjściową analizą do wyboru technologii ich utylizacji oraz oceny parametrów mechanicznych. Na analizowanych obiektach wyróżniono 4 rodzaje materiałów odpadowych, dla których wyznaczono parametry wytrzymałościowe, są to:

- odpady balastowe z kompostowni (wysypisko Radiowo),
- odpady balastowe zmieszane z piaskiem (wysypisko Radiowo),
- stare odpady komunalne – powyżej 10 lat (wysypiska Radiowo i Łubna),
- świeże odpady komunalne (wysypisko Łubna).

W celu określenia parametrów wytrzymałościowych, niezbędnych do prawidłowego zaprojektowania rekultywacji wysypisk, wykorzystano analizę wsteczną stateczności skarp zinwentaryzowanych 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 wysypisk.

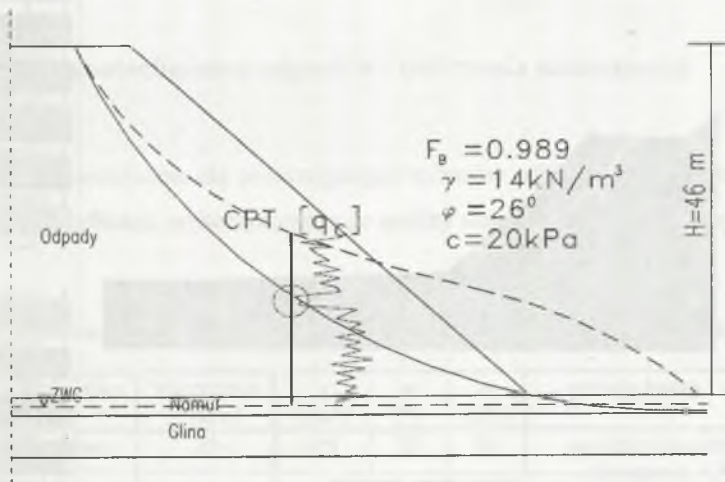
Na wysypisku Łubna do analizy wstecznej wybrano dwa przekroje skarp:

- przekrój II-II na skarpie zachodniej (rejon pęknięć na skarpie o dużym nachyleniu),
- przekrój IV-IV na skarpie północnej (rejon osuwiska z 1995 roku).

Na wysypisku Radiowo do analizy wstecznej wybrano trzy przekroje skarp (rys. 1):

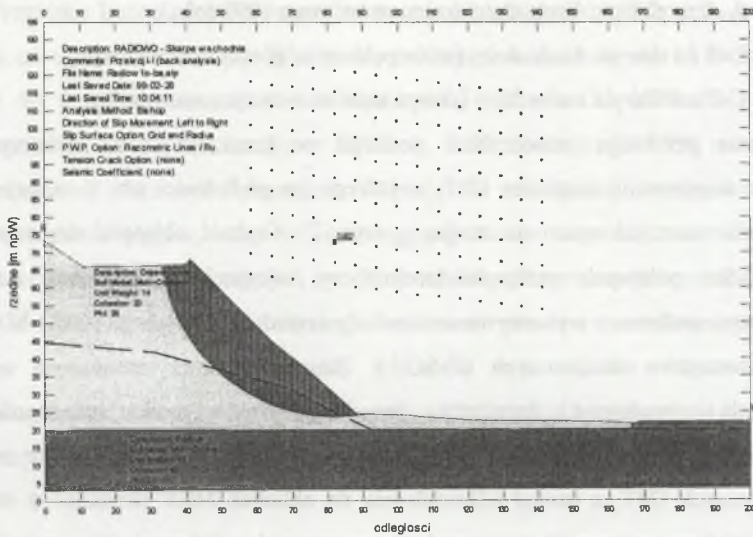
- przekrój A-A na skarpie wschodniej (rejon osuwiska z 1991 roku),
- przekrój B-B na skarpie wschodniej (rejon pęknięć w górnej części skarpy),
- przekrój C-C na skarpie zachodniej (skarpa stabilna o dużym nachyleniu).

Do określenia przebiegu powierzchni poślizgu w przekroju A-A wykorzystano przeprowadzone sondowanie statyczne CPT, z którego na głębokości ok. 9 m uzyskano wyraźne obniżenie wartości oporu na stożku  $q_c$  (rys. 2). Gęstość objętościową odpadów uzyskano z badań polowych przeprowadzonych we wkopach badawczych. Analizę stateczności przeprowadzono z wykorzystaniem metody szwedzkiej i Bishopa (GEO-SLOPE) oraz metody elementów skończonych (Z-SOIL). Parametry wytrzymałościowe  $c$  i  $\varphi$  dobierano metodą najmniejszych kwadratów (uzyskanie współczynnika stateczności na poziomie równowagi granicznej), przy czym do oceny spójności wykorzystywano wyniki sondowań statycznych CPT, a moduł odkształcenia do obliczeń MES określono z analizy pomiarów osiadań i przemieszczeń poziomych skarp wysypiska. Schemat obliczenia skarpy w przekroju A-A (Radiowo) metodą Bishopa przedstawiono na rys. 3, a z wykorzystaniem metody elementów skończonych na rys. 4. Przykładowe zestawienie wyników analizy wstecznej dla wybranych przekrojów wysypiska Radiowo zestawiono w tabelicy 1, a dla wysypiska Łubna w tabelicy 2.



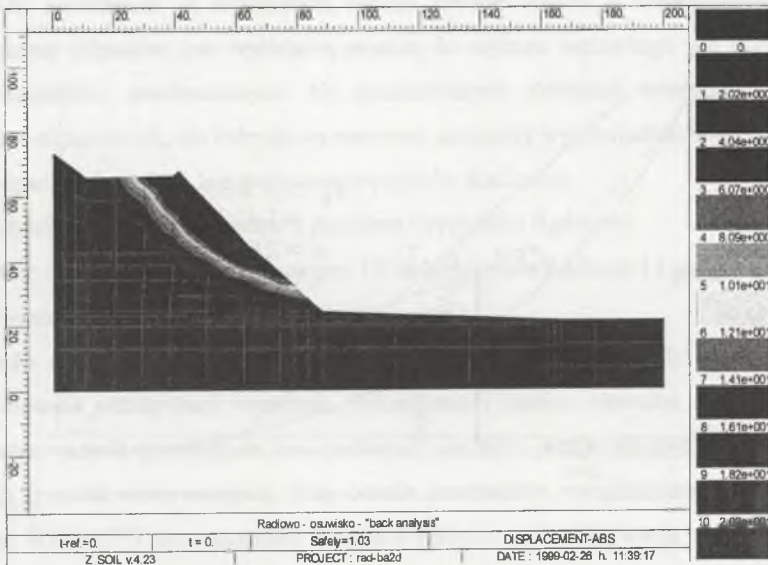
Rys. 2. Schemat osuwiska na wschodniej skarpie wysypiska Radiowo (Koda, 1997)

Fig. 2. Scheme of the landslide in the eastern slope of Radiowo landfill



Rys. 3. Wynik analizy wstecznej osuwiska (przekrój A-A) na wysypisku Radiowo (metoda Bishopa – program GEO-SLOPE)

Fig. 3. Back-analysis of landslide (A-A cross-section) in Radiowo landfill by Bishop's method (GEO-SLOPE numerical programme)



Rys. 4. Wynik analizy wstecznej osuwiska (przekrój A-A) na wysypisku Radiowo metodą MES (program Z-SOIL)

Fig. 4. Back-analysis of landslide (A-A cross-section) in Radiowo landfill by FEM method (Z-SOIL numerical programme)



Tablica 1

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

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	

Tablica 2

Przykładowe wyniki obliczeń współczynnika stateczności  $F_{min}$  na podstawie analizy wstecznej skarp na wysypisku Łubna przy założonych parametrach  $\varphi=21^\circ$ ,  $c=15$  kPa (odpady świeże)

Przekrój obliczeniowy	$F_{min}$	Metoda obliczeń	Uwagi
IV-IV	0.992	Bishop	osuwisko z 1995 r. na skarpie północnej
	0.975	szwedzka	
	1.020	MES	
II-II	1.042	Bishop	pęknięcia na skarpie zachodniej
	0.990	szwedzka	
	1.110	MES	

#### 4. Parametry geotechniczne odpadów i obliczenia stateczności

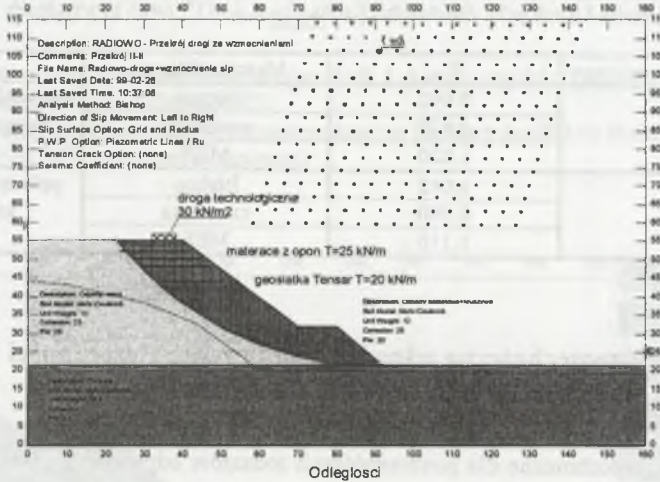
Parametry geotechniczne dla poszczególnych rodzajów odpadów, z podaniem metod ich wyznaczania i weryfikacji, wykorzystywane do analizy stateczności zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3

Parametry geotechniczne odpadów komunalnych do analizy stateczności wysypisk Radiowo i Łubna

Kategoria odpadów	Wysypisko	Napężenie $\sigma$ [kPa]	$\rho$ [ $U/m^3$ ]	$\varphi$ [ $^\circ$ ]	$c$ [kPa]	metoda badań i weryfikacji
Balastowe	Radiowo	35	0.9	20	25	analiza wsteczna próbnego obciążenia, CPT, WST
Balastowe z piaskiem	Radiowo	50	1.2	25	23	analiza wsteczna próbnego obciążenia, CPT, WST
Stare odpady	Radiowo i Łubna	65	1.4	26	20	analiza wsteczna osuwiska w Radiowie, CPT, WST
Świeże odpady	Łubna	125	1.1	21	15	analiza wsteczna osuwiska na Łubnej, CPT, WST

Z inwentaryzacji osuwiska na wyspiku Radiowo i sondowań statycznych wykonanych w przekroju A-A wynika, że powierzchnia poślizgu miała kształt zbliżony do kołowego. Do obliczeń stateczności wykorzystano metodę Bishopa oraz metodę elementów skończonych przy założeniu modelu Culomba-Mohra. W analizie stateczności skarp w przekrojach projektowych uwzględniono poziome wzmocnienia geosiatką i materacami z opon. Przykład analizy stateczności skarpy w przekroju II-II metodą Bishopa pokazano na rys.5, a z wykorzystaniem MES na rys.6. Z obydwu metod uzyskano podobne wartości współczynnika stateczności. Wyniki obliczeń stateczności skarp wyspiska Radiowo (bez wzmocnień i ze wzmocnieniami) zestawiono w tablicy 4. Wszystkie wartości współczynników stateczności wzmocnionych skarp są wyższe od 1,3, co wskazuje na skuteczność stosowanych zabiegów.



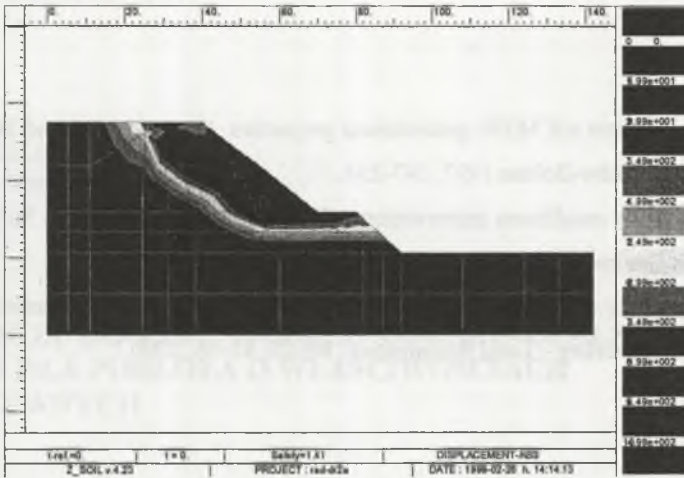
Rys. 5. Analiza stateczności skarpy zachodniej ze wzmocnieniami metodą Bishopa (GEO-SLOPE)  
Fig. 5. Stability analysis of the reinforced western slope of Radiowo landfill with Bishop's method

Tablica 4

Wyniki analizy stateczności skarp wyspiska Radiowo metodą Bishopa

Skarpa	Przekrój	Współczynnik stateczności bez wzmocnienia	wzmocnienie	Współczynnik stateczności ze wzmocnieniem
Zachodnia	I	1.04	nasyp, materace z opon, geosiatka	1.36
	II	1.43	nasyp, materace z opon, geosiatka	1.73
Północna	III	1.03	złagodzenie skarpy, geosiatka	1.68
Wschodnia	IV	1.18	nasyp dociążający	1.57





Rys. 6. Analiza stateczności skarpy zachodniej ze wzmocnieniami – MES (program Z\_SOIL)  
 Fig. 6. Stability analysis of the reinforced western slope of Radiowo landfill with FEM

Dla wysypiska Łubna za najbardziej efektywne rozwiązanie w celu porawy stateczności skarp uznano budowę nasypów dociążających. Konstrukcja ta pozwoliła na uzyskanie znacznej dodatkowej objętości do wbudowania odpadów. Dla skarpy północnej i zachodniej przed wzmocnieniem uzyskiwano współczynniki stateczności skarp niższe od 1.1, świadczące o stanie równowagi zbliżonym do granicznego. Na skarpie północnej w 1995 roku wystąpiło osuwisko, a na skarpie zachodniej obserwowano liczne pęknięcia i zsuwanie się odpadów. Po wykonaniu nasypów dociążających uzyskano współczynniki stateczności są większe od 1.2, co przy braku zabudowy w otoczeniu składowiska uznano za wartości bezpieczne.

## 5. Wnioski

Zapewnienie stateczności starych nadpoziomowych wysypisk 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 wysypisk odpadów mogą być stosowane zarówno metody pasków, oparte na kołowej powierzchni poślizgu, jak i metoda elementów skończonych.

## LITERATURA

1. Koda E.: In situ test of MSW geotechnical properties. Contaminated and Derelict Lands – GREEN 2, Kraków-Bolton 1997, 247-254.
2. Koda E.: Stability conditions improvement of the old sanitary landfills. 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisbona 1998. Vol.I, 223-228.
3. Koda E.: Stability analysis of high slopes of old sanitary landfills. Annals of Warsaw Agricultural University – Land Reclamation, No.29, 85-96, 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

**Abstract**

The paper presents the shear strength parameters determination performed for the design of remedial works of Radiowo and Łubna old sanitary landfills, localised nearby Warsaw. The investigation of waste shear strength parameters were performed using: waste morphological analysis, observations on test pits and test embankments, WST and CPT static soundings, slope failure tests with concrete slabs loading as well as back-analysis of selected parts of high landfill slopes (stable slope, cracked slope and landslides observed). The most reliable parameter values can be reached on the basis of the back-analysis, additionally verified by the observational method results. Slope stability calculations for back-analysis and design analysis were done by classical slice methods (GEO-SLOPE numerical program) and finite element modelling (Z-SOIL numerical program). The paper also presents the design solutions for improvement of the slope stability of Radiowo and Łubna landfills. The reinforcement techniques consist a retaining wall, berms, geogrids and tire mattress. The experiences and observational results from these sites are used for the design of remedial works on other municipal landfills.