



EUGENIUSZ KODA, *eugeniusz_koda@sggw.pl*
Katedra Geoinżynierii, SGGW w Warszawie

ZASTOSOWANIE ANALIZY WSTECZNEJ OSUWISK DO OCENY PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH ODPADÓW

THE USE OF BACK-ANALYSIS FOR THE DETERMINATION OF WASTE GEOTECHNICAL PARAMETERS

Streszczenie W artykule przedstawiono ocenę parametrów geotechnicznych przeprowadzoną dla potrzeb rekultywacji wysokich składowisk. Badania parametrów wytrzymałościowych odpadów obejmowały: nasypy doświadczalne, sondowania statyczne WST i CPT, próbne obciążenia płytami MON oraz analizy wsteczne wybranych skarp (skarp stateczne o dużym nachyleniu, skarp z pęknięciami, skarp z osuwiskami). Obliczenia stateczności składowisk, zarówno dla potrzeb analizy wstecznej jak i obliczeń projektowych, przeprowadzono z zastosowaniem klasycznej metody Bishops stosowanej w geotechnice (program GEO-SLOPE) oraz metody elementów skończonych (program Z-SOIL). Omówiono też projektowane zabiegi techniczne w celu poprawy warunków stateczności wysokich skarp analizowanych składowisk. Parametry odkształceniowe uzyskiwano na podstawie wieloletnich pomiarów osiadań na składowiskach. Doświadczenia i wyniki obserwacji zostały wykorzystywane są do rekultywacji innych składowisk.

Abstract The paper presents the geotechnical parameters determination performed for the design of remedial works of high sanitary landfills. The investigation of waste shear strength parameters were performed on the basis of 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 (high stable slopes, cracked slopes and slopes with landslides). Slope stability calculations for back-analysis and design analysis were done by Bishops classical method (GEO-SLOPE numerical program) and finite element modelling (Z-SOIL numerical program). The design solutions for improvement of the slope stability of Radiowo and Łubna landfills is also presented. The deformation parameters of wastes were determined on back-analysis of long term settlement measurements. The experiences and observational results from analysed sites are use for the design of remedial works on other sanitary landfills.

1. Wstęp

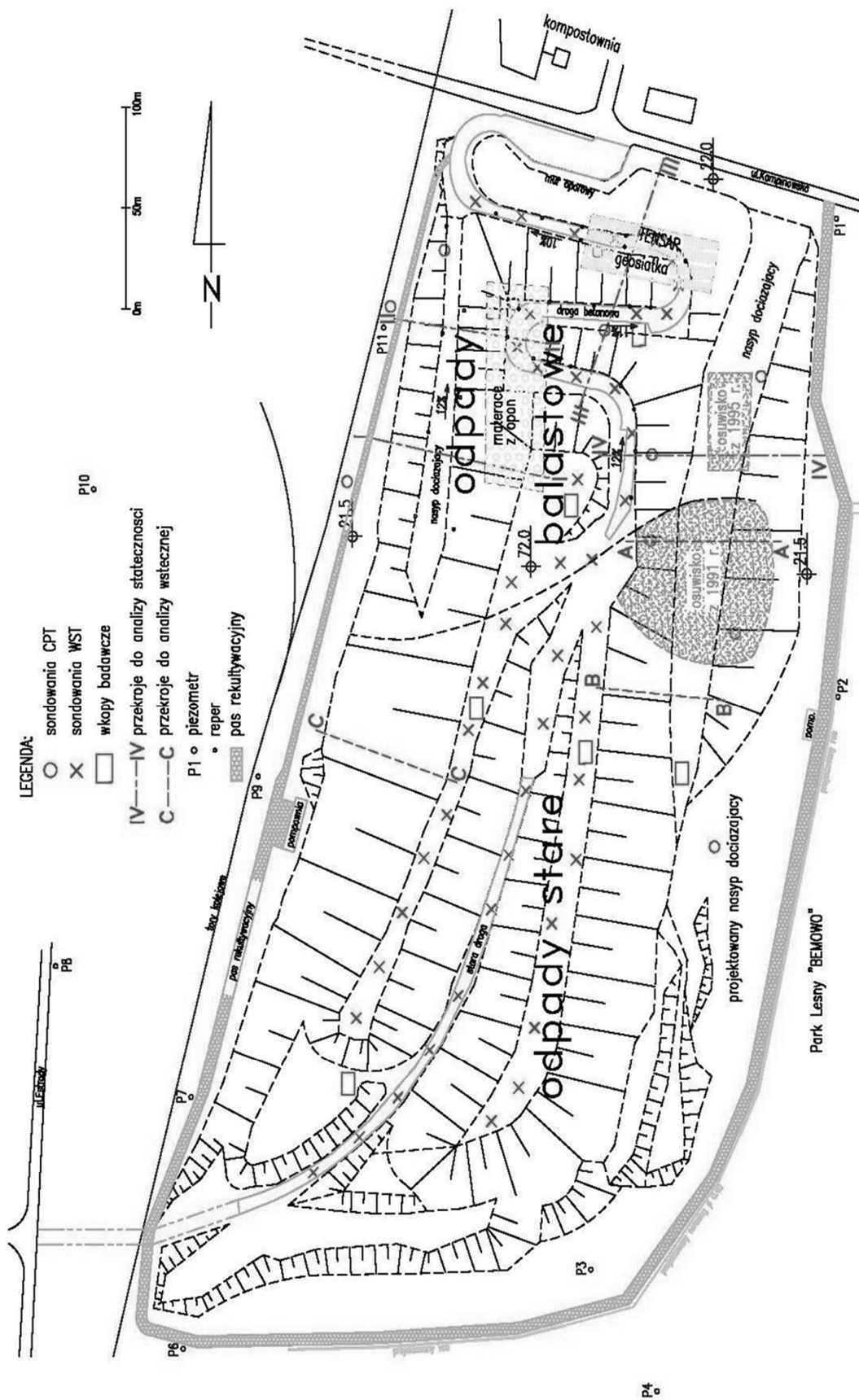
W ostatnich latach przeprowadzany jest program zamykania i rekultywacji starych składowisk odpadów komunalnych nie spełniających standardów ochrony środowiska i przepisów unijnych. Część z nich stanowią duże składowiska nadpoziomowe, gdzie podstawowe znaczenie w ramach rekultywacji technicznej ma zabezpieczenie stateczności skarp. Na składowiskach tych były często osuwiska na skarpach, które po zinwentaryzowaniu i wykonaniu mogą być wykorzystane do analizy wstecznej mającej na celu określenie parametrów geotechnicznych, szczególnie wytrzymałościowych, niezbędnych do bezpiecznego zaprojektowania bezpiecznego kształtu składowiska. Analizę wsteczna osuwisk skarp i próbnych obciążeń zastosowano na składowiskach Radiowo i Łubna zlokalizowanych w rejonie Warszawy. Z uwagi na długotrwałość procesu rekultywacji oraz konieczność wprowadzania zmian w ukształtowaniu bryły i podejmowania działań interwencyjnych w celu zapewnienia

bezpieczeństwa obiektu, w procesie tym może być zastosowana metoda obserwacyjna [1] proponowana też przez Eurokod 7 i innych autorów [2] [3] [4]. Do oceny parametrów wytrzymałościowych odpadów zwykle wykorzystuje się techniki stosowane w geotechnice. Reprezentatywne parametry wytrzymałościowe dla odpadów komunalnych można uzyskać przy wykorzystaniu analizy wstecznej osuwisk i skarp statecznych o dużym nachyleniu oraz próbnych obciążeń na nasypach doświadczalnych i wybranych skarpach na składowisku. Badania parametrów do analizy stateczności powinny obejmować też analizę morfologiczną odpadów, wkopy i nasypy badawcze oraz sondowania statyczne WST i CPT lub dynamiczne DPH. Do obliczeń stateczności wykorzystano klasyczną metodę Bishopa oraz metodę elementów skończonych. Do wzmocnienia stateczności skarp składowiska Radiowo zastosowano: mur oporowy, nasypy dociążające oraz poziome wzmocnienia geosiatką i materacami z opon, natomiast na składowisku Łubna stateczność skarp zapewniano głównie za pomocą nasypów dociążających z wykorzystaniem odpadów [5].

2. Charakterystyka analizowanych składowisk

Składowisko Radiowo o powierzchni około 16 ha, zlokalizowane jest przy północno-zachodniej granicy Warszawy. W latach 1962÷91 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 wynoszącej około 60 m i dużych pochyleniach skarp, kluczowym zagadnieniem związanym z jego rekultywacją stało się zapewnienie ich stateczności. W latach 80. występowały osuwiska odpadów na skarpie zachodniej. W 1991 roku na skarpie wschodniej wystąpiło duże osuwisko o kubaturze przekraczającej 6000 m³ (rys. 1), a na niektórych fragmentach obserwowano pęknięcia świadczące o stanie równowagi zbliżonym do granicznego. Kolejne osuwisko miało miejsce na skarpie wschodniej w 1995 roku. Z uwagi na końcową fazę eksploatacji, skarpy kształtowane są z uwzględnieniem docelowego przeznaczenia terenu składowiska do celów rekreacyjnych (sporty zimowe i ścieżki rowerowe). Ponadto, w ramach rekultywacji wykonano m.in. pionową przesłonę przeciwwfiltracyjną, drogi technologiczne oraz systemy ujęcia odcieków i odgazowania. W okresie najbliższych 3-4 lat planowane jest dokończenie kształtowania bryły składowiska wraz z ułożeniem mineralnego systemu przykrycia i zabudowa biologiczna powierzchni z wykorzystaniem roślinności.

Składowisko Łubna zlokalizowane jest na terenie gminy Góra Kalwaria, w odległości ok. 35 km od centrum Warszawy. Składowisko zajmuje powierzchnię ok. 22 ha, przy wysokości prawie 60 m. Od 1978 roku na składowisku były składowane zmieszane odpady komunalne. Na skarpach składowiska obserwowano liczne osuwiska odpadów, z których największe miało miejsce na skarpie północnej w 1995 roku. Eksploatacja składowiska została zakończona z dniem 31.03.2011 roku. Od 1996 roku na składowisku prowadzone były prace rekultywacyjne. W projekcie rekultywacji składowiska uwzględniono wykorzystanie odpadów, które w przeważającej mierze stanowią materiał budowlany do konstrukcji nasypów dociążających i podbudowy dróg. W ramach rekultywacji wykonano pionową przesłonę przeciwwfiltracyjną, system drenażowy i oczyszczalnię odcieków oraz system odgazowania i drogi technologiczne.



Rys. 1. Składowisko Radiowo: przekroje do analizy wstecznej i obliczeń stateczności

3. Ocena parametrów geotechnicznych odpadów na podstawie analizy wstecznej

Odpady komunalne są materiałem bardzo zróżnicowanym i niejednorodnym. Zebrane z literatury przez Zadrogę [6] dane dotyczące parametrów geotechnicznych niezbędnych do analizy stateczności (γ , ϕ , c) pokazują, że odpady mogą charakteryzować się bardzo dużym zróżnicowaniem parametrów wytrzymałościowych i gęstości. Skład morfologiczny odpadów jest wyjściową analizą dla wyboru technologii ich unieszkodliwiania oraz do oceny parametrów mechanicznych [7]. Na analizowanych obiektach wyróżniono 4 rodzaje materiałów odpadowych, dla których wyznaczono parametry wytrzymałościowe:

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

Dla określenia parametrów wytrzymałościowych, niezbędnych do bezpiecznego zaprojektowania bryły i rekultywacji składowisk, wykorzystano analizę wsteczną osuwisk i stateczności zinventaryzowanych skarp o dużym nachyleniu oraz analizy wstecznej próbnych obciążeń przeprowadzonych w warunkach polowych (metoda obserwacyjna). Przy ocenie parametrów uwzględniono również wyniki badań morfologicznych odpadów i wyniki sondowań statycznych WST i CPT prowadzonych w ramach nadzoru geotechnicznego.

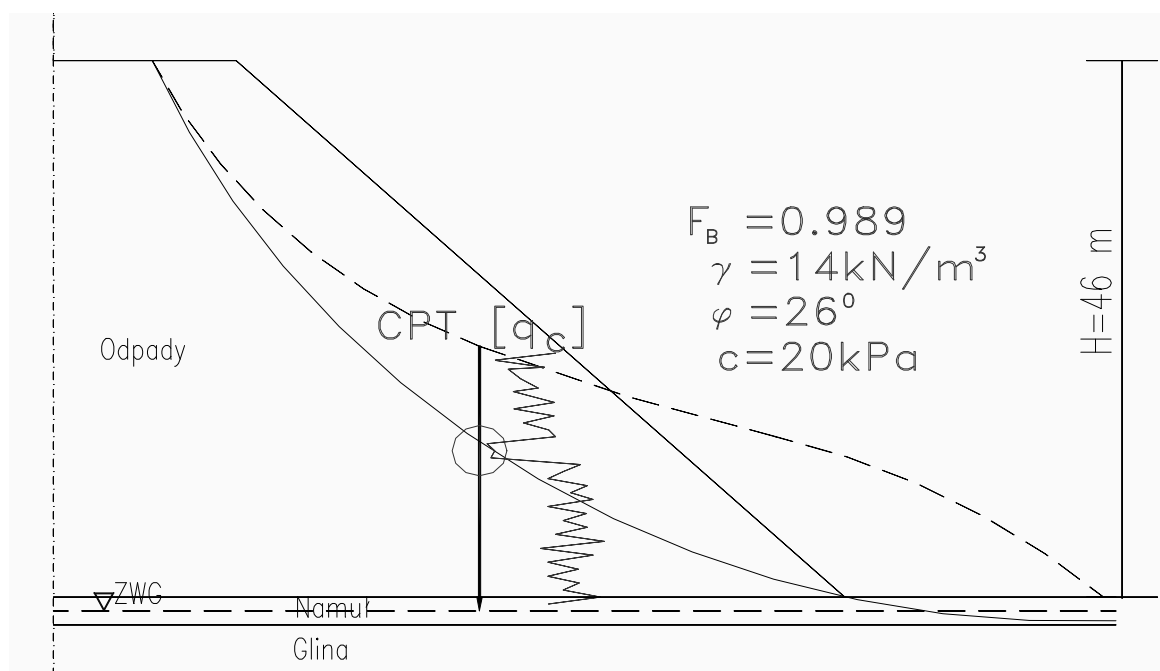
Na składowisku Łubna do analizy wstecznej wybrano dwa przekroje skarp:

- 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 składowisku Radiowo do analizy wstecznej wybrano trzy przekroje skarp (rys. 1):

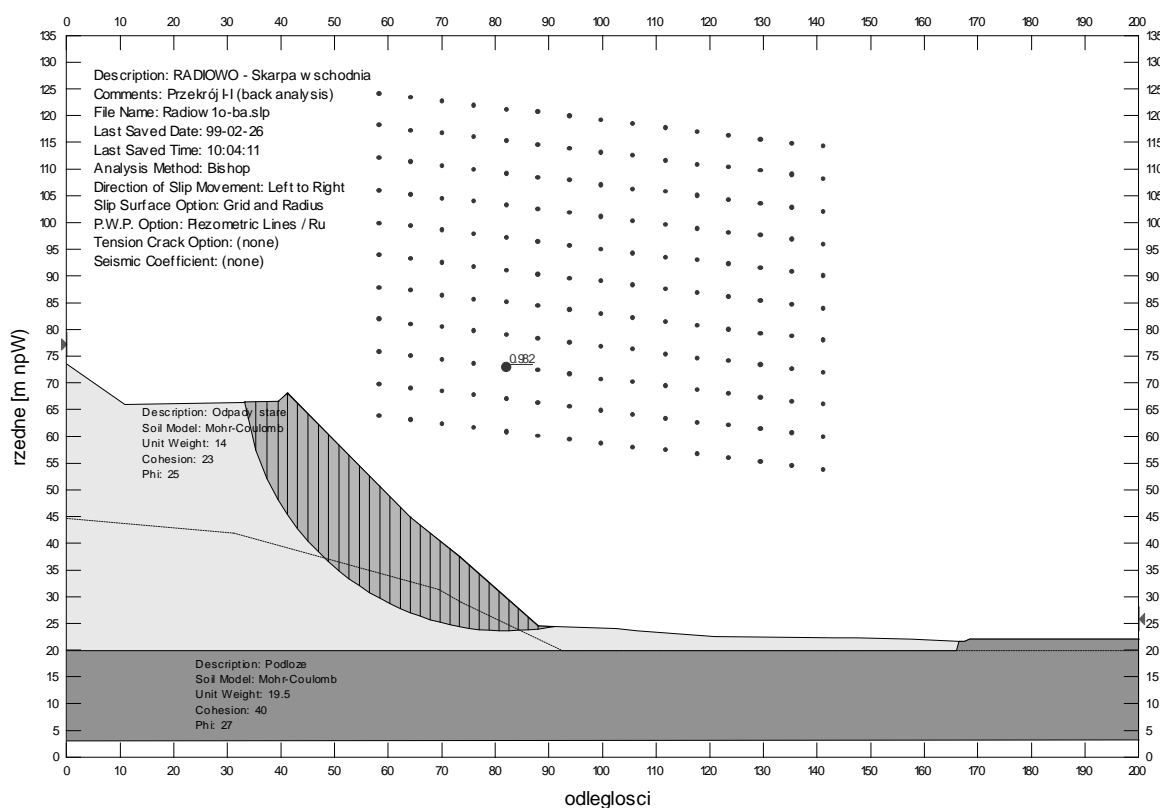
- przekrój A-A na skarpie wschodniej (rejon osuwiska z 1991 roku),
- przekrój B-B na skarpie wschodniej (rejon pęknięć w górnej części skarpy),
- przekrój C-C na skarpie zachodniej (skarpa stabilna o dużym nachyleniu).

Do określenia przebiegu powierzchni poślizgu w przekroju A-A wykorzystano wykonane sondowanie statyczne CPT, podczas którego na głębokości około 9 m uzyskano wyraźne obniżenie wartości oporu stożka q_c (rys. 2).



Rys. 2. Schemat osuwiska na wschodniej skarpie składowiska Radiowo – przekrój A-A [5]

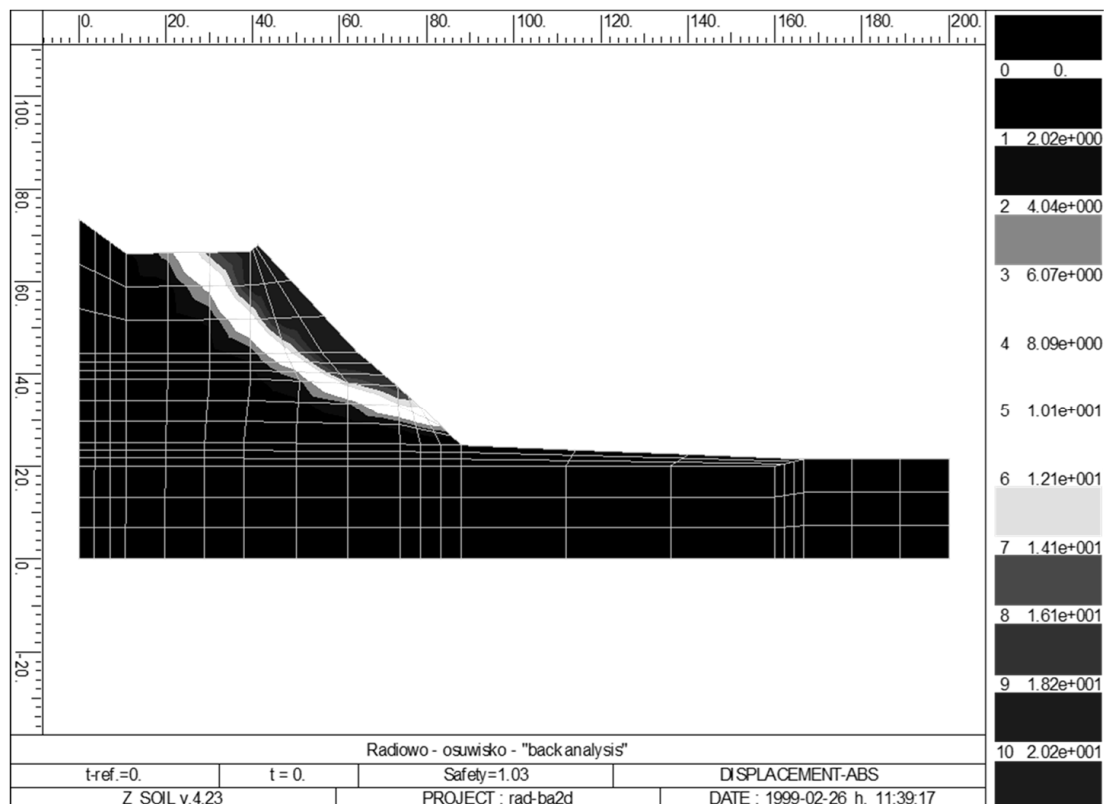
Gęstość objętościową odpadów uzyskano z badań polowych przeprowadzonych w wko-pach badawczych na składowiskach. Analizę stateczności przeprowadzono z wykorzystaniem klasycznej metody Bishopa (program GEO-SLOPE) oraz metody elementów skończonych (program Z-SOIL). Parametry wytrzymałościowe (spójność c i kąt tarcia wewnętrznego ϕ), dobierano metodą najmniejszych kwadratów (uzyskanie współczynnika stateczności na poziomie stanu równowagi granicznej), przy czym do oceny spójności wykorzystywano również wyniki sondowań statycznych CPT, a moduł odkształcenia do obliczeń z wykorzystaniem MES określono z analizy wstecznej pomiarów osiadań i przemieszczeń poziomych skarp składowisk. Schemat obliczenia skarpy w przekroju A-A (składowisko Radiowo) metodą Bishopa przedstawiono na rys. 3, a z schemat analizy wstecznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych na rys. 4. Przykładowe zestawienie wyników analizy wstecznej dla wybranych przekrojów składowiska Radiowo zestawiono w tabl. 1, a dla składowiska Łubna w tabl. 2.



Rys. 3. Analiza wsteczna osuwiska (przekrój A-A) na składowisku Radiowo (metoda Bishopa – program GEO-SLOPE)

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

Przekrój obliczeniowy	F_{min}	Metoda obliczeń	Uwagi z obserwacji
A-A	0,989	Bishop	Osuwisko z 1991 r. na skarpie wschodniej
	1,030	MES	
B-B	1,029	Bishop	Pęknięcia na skarpie wschodniej
	1,080	MES	
C-C	1,142	Bishop	Skarpa stateczna zachodnia
	1,190	MES	



Rys. 4. Wynik analizy wstecznej osuwiska (przekrój A-A) na składowisku Radiowo z wykorzystaniem metody elementów skończonych (program Z-SOIL)

Tablica 2. Przykładowe wyniki obliczeń współczynnika stateczności F_{min} na podstawie analizy wstecznej skarp składowiska Łubna przy parametrach $\phi = 21^\circ$, $c = 15$ kPa (świeże odpady komunalne).

Przekrój obliczeniowy	F_{min}	Metoda obliczeń	Uwagi z obserwacji skarp
IV-IV	0,992	Bishop	Osuwisko na skarpie północnej w 1995 roku
	1,020	MES	
II-II	1,042	Bishop	Pęknięcia na skarpie zachodniej
	1,110	MES	

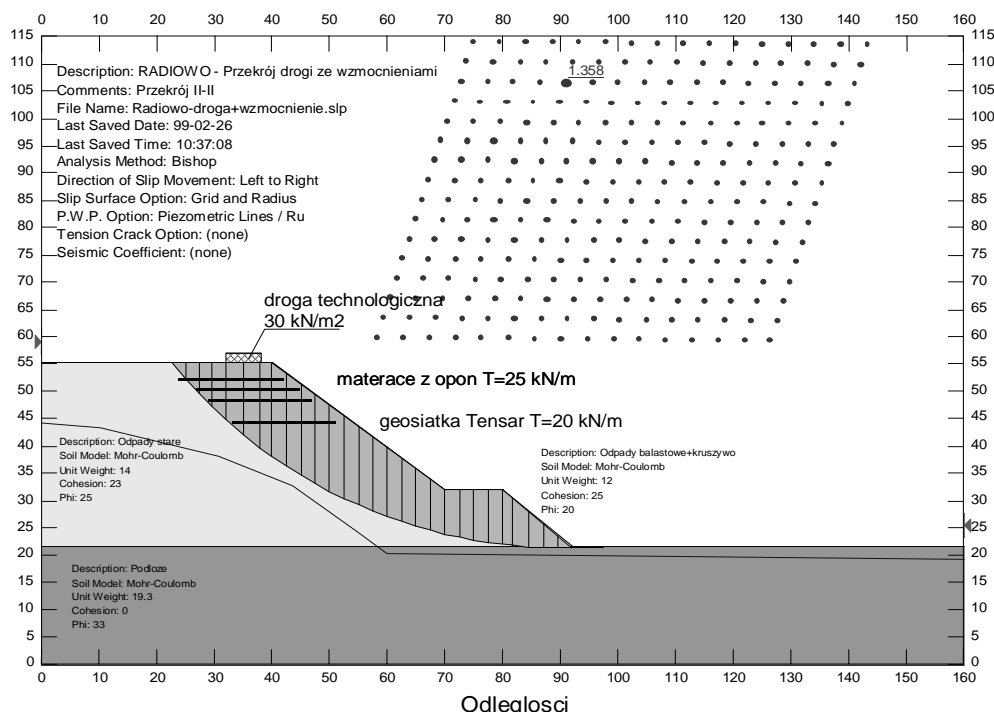
Parametry geotechniczne dla poszczególnych rodzajów odpadów wbudowywanych w nasypy docierające na składowiskach Radiowo i Łubna, z podaniem metod ich wyznaczania i weryfikacji, wykorzystywane do analizy stateczności zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Parametry geotechniczne odpadów do analizy stateczności.

Rodzaj odpadów	Składowisko	Naprężenie σ [kPa]	ρ [t/m ³]	ϕ [o]	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

4. Analiza stateczności projektowanych skarp składowisk

Z inwentaryzacji osuwisk na składowiskach Radiowo i Łubna wynika, że powierzchnie poślizgu miały kształt zbliżony do kołowego. Do obliczeń stateczności w projekcie ukształtowania skarp wykorzystano metodę Bishopa zakładającą kołową powierzchnię poślizgu oraz metodę elementów skończonych przy założeniu modelu Culomba-Mohra i redukcji parametrów wytrzymałościowych w kolejnych krokach obliczeń. W analizie stateczności skarp w przekrojach projektowych składowiska radiowo uwzględniono poziome wzmocnienia geosiatką i materacami ze zużytych opon [8]. Przykład analizy stateczności skarpy metodą Bishopa pokazano na rys. 5. Z obydwu metod uzyskano zbliżone wartości współczynników stateczności. Wyniki obliczeń stateczności skarp wysypiska Radiowo (bez wzmocnień i ze wzmocnieniami) zestawiono w tabelicy 4. Wszystkie wartości współczynników stateczności wzmocnionych skarp są wyższe od 1.3, co wskazuje na skuteczność stosowanych zabiegów wzmacniających. Po zakończeniu eksploatacji planowane jest wykorzystanie terenu składowiska jako stoku narciarskiego i do celów rekreacyjnych [9].



Rys. 5. Analiza stateczności skarpy zachodniej ze wzmocnieniami metodą Bishopa

Tablica 4. Wyniki analizy stateczności skarp wysypiska Radiowo metodą Bishopa.

Skarpa	Przekrój obliczeniowy	Współczynnik stateczności bez wzmocnienia	Rodzaj wzmocnienia skarp składowiska	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

Na składowisku Łubna za najbardziej efektywne rozwiązanie dla potrawy warunków stateczności skarp uznano budowę nasypów dociążających. Konstrukcja ta pozwoliła na uzyskanie znacznej dodatkowej objętości składowiska do unieszkodliwiania odpadów. Dla skarp 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, które przy braku zabudowy w otoczeniu składowiska uznano za wartości bezpieczne.

5. Podsumowanie i wnioski

Zapewnienie stateczności starych nadpoziomowych składowisk odpadów komunalnych jest jednym z najważniejszych, obok ochrony środowiska wodno-gruntowego, zagadnień do rozwiązania na etapie rekultywacji tych obiektów.

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

Do analizy stateczności skarp składowisk odpadów mogą być stosowane zarówno metody równowagi granicznej oparte na kołowej powierzchni poślizgu, jak analizy wykorzystujące metodę elementów skończonych.

Bezpieczne ukształtowanie skarp składowisk jest konieczne do przyszłego porekultywacyjnego zagospodarowania terenu składowiska do innych celów, budowlanych lub rekreacyjnych.

Literatura

1. Koda E.: Stateczność rekultywowanych składowisk odpadów i migracja zanieczyszczeń przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2011.
2. Eurokod 7. PN-EN 1997-1. Projektowanie geotechniczne. Część 1 – Zasady ogólne.
3. Nicholson D. red.: The observational method in geotechnical engineering. Thomas Telford. London. 1996.
4. Młynarek Z.: Podłoże gruntowe a awaria budowlana. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”. Międzyzdroje. 103-128, 2008.
5. Koda E., Przysiadka J.: Analiza stateczności wysokich skarp składowisk z uwzględnieniem wzmocnień. Inżynieria i Budownictwo. Nr 7-8, 403-407, 2007.
6. Zadroga B.: Metody określania właściwości mechanicznych odpadów. Inżynieria Morska i Geotechnika. Nr 3, 127-132, 1994.
7. Wysokiński L.: Zasady budowy składowisk odpadów. Instytut Techniki Budowlanej. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki. Nr 444, Warszawa, 2009.
8. Koda E.: Wykorzystanie materiałów antropogenicznych do rekultywacji składowisk odpadów. Inżynieria Morska i Geotechnika, Nr 4, 451-456, 2012.
9. Koda E.: Projekt zagospodarowania rekultywowanego składowiska odpadów Radiowo jako stoku narciarskiego, z wykorzystaniem odpadów. X Konferencja „Dla Miasta i Środowiska – Problemy Unieszkodliwiania Odpadów”, Politechnika Warszawska, Warszawa, 110-117, 2012.