

Symulacja naprężeń oraz prognoza osiadań w podłożu projektowanego składowiska odpadów komunalnych „Barycz III”

Mariusz Czop*, Janusz Herzig**, Tomasz Kotowski***

Stress simulation and settlement prediction of subsoil beneath the municipal landfill "Barycz III" (southern Poland). Prz. Geol., 49: 1060–1066.

Summary. Subsoil deformations affected by building and preliminary exploitation of new constructions can be a source of serious threats. A numerical model of the municipal landfill was based on a finite-elements method. The purpose of investigations was obtained with multivariate simulation. The modeling analysis delivered reliable results after the proper test of subsoil geotechnical parameters had been performed. The results of calculations provide a range of subsoil deformations of the waste disposal basement.

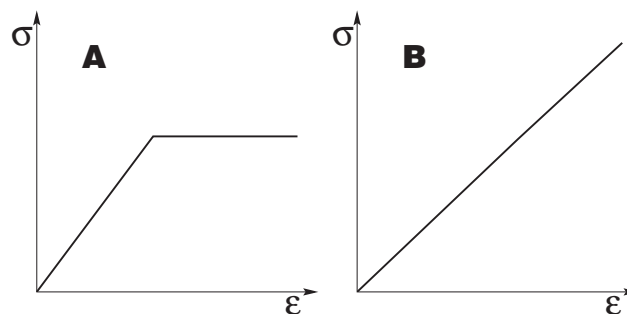
Key words: finite elements method, subsoil settlement, landfills

Ocena naprężeń występujących w podłożu gruntowym i związanych z nimi możliwości odkształceń oraz osiadania powierzchni terenu, jest jednym z poważniejszych problemów, występujących podczas projektowania posadowienia nowych obiektów. Wykorzystując, bazujące na metodzie elementów skończonych programy komputerowe Sigma i Seep firmy GeoSlope, podjęto próbę prognozy zachowania podłoża pod projektowanym składowiskiem odpadów komunalnych „Barycz III”. Lokalizację składowiska zaprezentowano na ryc. 1. Symulacje komputerowe przeprowadzono wykorzystując dwa modele konstytutywne opisujące właściwości odkształceniowe podłoża, przedstawione na ryc. 2.

Właściwie żaden z przedstawionych modeli nie oddaje z dobrą dokładnością zachowania się realnego ośrodka gruntowego. Można jedynie stwierdzić, że oznaczone na drodze modelowania wartości osiadania tworzą pewne ramy. Obliczone za pomocą modeli konstytutywnych war-

tości osiadań podłoża nie są określone w funkcji czasu, lecz wynikają z zależności pomiędzy naprężeniem a odkształceniem opisujących modele konstytutywne. Wpływ upływu czasu na przebieg osiadań oddany został za pomocą, założonych, kolejnych 3 etapów depozycji odpadów na składowisku.

Projektowane składowisko zostało zlokalizowane w odległości kilkunastu kilometrów na południowy-zachód



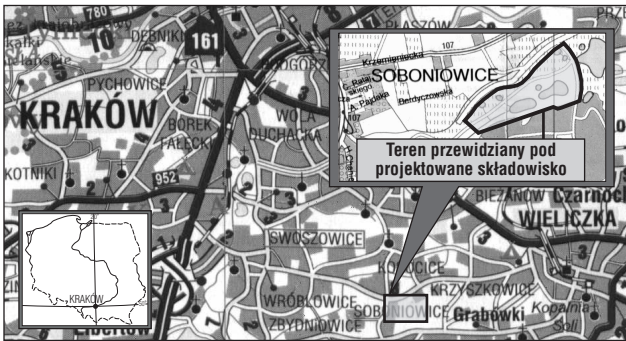
Ryc. 1. Lokalizacja projektowanego składowiska odpadów komunalnych „Barycz III”

Fig. 1. Location of designed municipal landfill "Barycz III"

*Wydział Górniczy, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

**Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

***Zakład Geologii i Hydrogeologii, Uniwersytet M. Kopernika, ul. Sienkiewicza 4, 87-100 Toruń



Ryc. 2. Modele konstytutywne wykorzystane w analizie modelowej

Fig. 2. Constitutive models for modeling analyses

od centrum Krakowa, przy wschodniej granicy eksploatowanego obecnie składowiska odpadów określanego jako etap 2 w sąsiedztwie nieczynnego Oddziału Eksploatacji Otworowej „Barycz” Kopalni Soli Wieliczka. Lokalizacja dużego składowiska, na bardzo zróżnicowanym pod względem geologicznym terenie, budzi uzasadnione obawy o stabilność projektowanego obiektu, nierównomierne osiadanie podłoża mogłoby doprowadzić do utraty szczelności sztucznej izolacji składowiska, i w rezultacie do skażenia środowiska. Wielkość naprężeń oraz osiadań w podłożu gruntowym, związanych z budową i eksploatacją składowiska, można oszacować przy wykorzystaniu analitycznych metod obliczeń, tj: uwzględniających naprężenie pod nasypem jako sumę naprężeń od równomiernego i trójkątnego obciążenia pasmowego oraz metody odkształceń jednoosiowych lub odkształceń trójosiowych półprzestrzeni gruntowej. Ze względu na duży stopień komplikacji budowy geologicznej podłoża oraz nietypowy charakter składowiska, znacznie utrudniający zastosowanie metod analitycznych, do rozwiązania postawionego problemu zastosowano analizę modelową przy wykorzystaniu dostępnego oprogramowania komputerowego.

Rozwiązywany problem wpływu składowiska na podłożę ma specyficzny charakter. Przystudiowane pozycje literaturowe, opisujące zastosowania metody elemen-

tów skończonych do analizy osiadań podłoża w związku z powstaniem nasypu lub składowiska, dotyczyły wyłącznie budowli sytuowanych nadpoziomowo lub też w starych odkrywkach (Drumm i in., 1993; Indraratna i in., 1992; Indraratna i in., 1997; Loganathan i in., 1993). Tymczasem w rozważanym przypadku depozycja odpadów rozpocznie się w specjalnie wykonanym wykopie, a dopiero po jego wypełnieniu formowany będzie nasyp. Przy czym odpady będą składowane natychmiast po wykonaniu i odpowiednim przystosowaniu wykopu. Usunięcie warstwy nadkładu o średniej miąższości 10–13 m, wywoła proces odprężania się ośrodka gruntowego. Bez analizy wywołanych tym faktem deformacji, informacja o pierwotnym stanie naprężenia gruntów w podłożu składowiska, nie zostałaby uwzględniona. Tak rozwiązany problem metodycznie nie różniłby się od przypadku składowiska całkowicie nadpoziomowego. Odpowiednie włączenie do analizy osiadań, wyników uzyskanych przy symulacji wykopu uczyniło analizę modelową bardziej reprezentatywną dla rozwiązywanego przypadku.

Analiza modelowa, ze względu na przytoczone argumenty, została podzielona na dwa, nawiązujące ściśle do stadiów powstawania składowiska, etapy:

- powstawania wykopu,
- depozycji odpadów.

Model budowy podłoża projektowanego składowiska

Uwzględniając budowę geologiczną obszaru, teren przyszłego składowiska położony jest przy brzegu nasunięcia karpackiego na morskie osady miocenu solonośnego. Osady trzeciorzędowe, zdeponowane na sztywnym podłożu wapiennym, wykazują tutaj silne zaburzenia tektoniczne, wyróżniamy w nich część dolną paraautochtoniczną oraz górną allochtoniczną (Skoczylas-Ciszewska & Poborski, 1961).

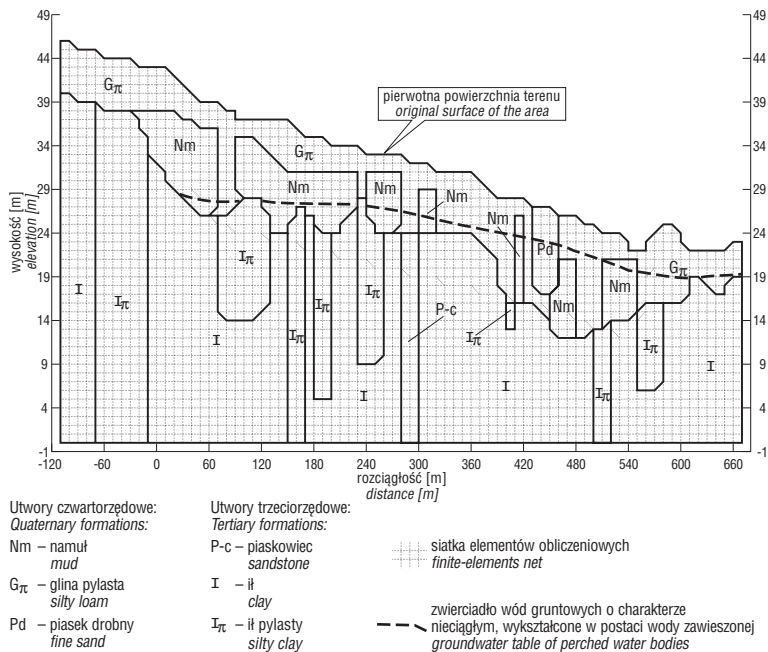
Utwory czwartorzędowe występujące na powierzchni rozpatrywanego terenu to głównie osady deluwialne i współczesne osady zastoiskowe, wykształcone jako gliny i namuły. W budowie tych czwartorzędowych utworów biorą udział w zdecydowanej większości gliny pylaste z lokalnymi przewarstwieniami pyłów i pyłów piaszczystych bądź sporadycznymi wkładkami glin zwięzłych, tworząc razem grunty spoiste. Lokalnie grunty te zawierają ok. 3% części organicznych tworząc grunty próchniczne, bądź występują jako namuły o znacznej zawartości domieszek organicznych. Stropowa partia ilastych warstw chodenickich jest wykształcona w postaci ciemnopopielatych ilów, ilów pylastych, ilów próchnicznych i glin zwięzłych (Mikołajczak & Gocał, 1996).

Stan czwartorzędowych gruntów spoistych jest zmienny. W bezpośrednim sąsiedztwie eksploatowanego obecnie składowiska „Barycz II”, w obrębie omawianego obszaru konsystencja występujących tam gruntów waha się od miękkoplastycznej do twardoplastycznej, w wykonanych tam otworach stwierdzono wycieki i sączenia z gruntów spoistych o konsystencji miękkoplastycznej i plastycznej (Mikołajczak & Gocał, 1996).

Tab. 1. Parametry geologiczno-inżynierskie dla wydzielonych warstw geotechnicznych

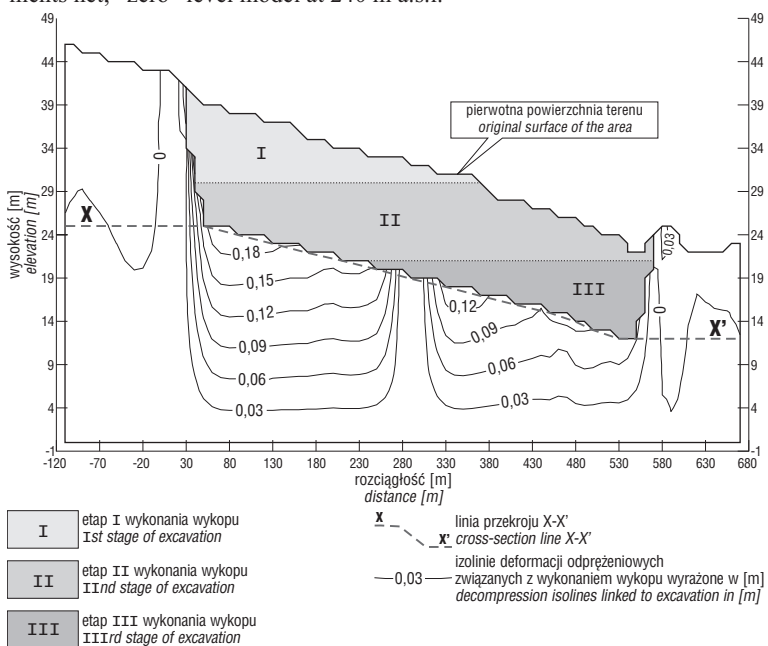
Table 1. Parameters for specified geotechnical layers

Wydzielona warstwa geotechniczna	Parametry obliczeniowe	ródło
Piasek drobnoziarnisty	$E = 40\ 000$ [kPa] $\nu = 0,25$ [-] $\gamma = 17,5$ [kN/m ³]	wartości orientacyjne, wg Wiłuna, 1987
Gлина pylasta	$E = 32\ 860$ [kPa] $\nu = 0,1$ [-] $\phi = 12,1$ [°] $c = 13,14$ [kPa] $\gamma = 20,4$ [kN/m ³]	badania laboratoryjne, wg Mikołajczaka & Gocała, 1996
Namuł	$E = 14\ 120$ [kPa] $\nu = 0,15$ [-] $\phi = 16,0$ [°] $c = 35,0$ [kPa] $\gamma = 20,5$ [kN/m ³]	badania laboratoryjne, wg Mikołajczaka & Gocała, 1996, moduł E przyjęty z badań gliny pylastej próchnicznej o zbliżonej wilgotności, zawartości części organicznych i wartościach c i ϕ
Iły	$E = 28\ 000$ [kPa] $\nu = 0,26$ [-] $\phi = 8,6$ [°] $c = 71,6$ [kPa] $\gamma = 20,8$ [kN/m ³]	badania laboratoryjne, wg Rybickiego & Lenduski, 1991
Piaskowiec	$E = 10\ 000\ 000$ [kPa] $\nu = 0,49$ [-] $\gamma = 18,5$ [kN/m ³]	wartości orientacyjne, wg Wiłuna, 1987



Ryc. 3. Model podłoża gruntowego rejonu składowiska w Baryczy przystosowany do obliczeń przy wykorzystaniu programów SEEP/W i SIGMA/W z uwzględnieniem wydzielonych warstw geotechnicznych i siatki elementów obliczeniowych; poziom „zerowy” modelu na wysokości 240 m n.p.m.

Fig. 3. Subsoil model of landfill "Barycz III" adopted to numerical simulation by SEEP/W and SIGMA/W program with geotechnical layers and finite-elements net; "zero" level model at 240 m a.s.l.



Ryc. 4. Izolinie pionowych deformacji odprężeniowych, związanych z całkowitym wykonaniem wykopu; poziom „zerowy” modelu na wysokości 240 m n.p.m.

Fig. 4. Vertical decompression isolines for the final stage of excavation; "zero" level model at 240 m a.s.l.

Model podłoża składowiska „Barycz III” sporządzono na podstawie bazy danych dostępnych profili 85 otworów wiertniczych, wykonanych dla eksploatacji złoża soli kamiennej. Wydzielono w nim sześć warstw geotechnicznych: piasek drobnoziarnisty, glinę pylastą, namuł, il pylasty, il pylasty z piaskowcem i piaskowiec, w konfiguracjach jak na ryc. 3.

Charakterystyka projektowanego składowiska

Projektowane składowisko „Barycz III” zajmować będzie teren o powierzchni ok. 9,7 ha, położony przy zachodniej granicy eksploatowanego obecnie składowiska określanego jako Barycz II (Mikołajczak i in., 1996). Składowisko będzie miało charakter pod-, jak i nadpoziomowy. Depozycja odpadów w początkowym okresie funkcjonowania składowiska, odbywać się będzie, w specjalnie wykonanym wykopie, o średniej głębokości w granicach 10–13 m, odnosząc się do pierwotnej powierzchni terenu. Po całkowitym wypełnieniu wykopu, rozpocznie się etap nadpoziomowej depozycji odpadów, realizowany poprzez formowanie ich w przyrme. Wysokość przyrmy ponad pierwotną powierzchnię terenu nie jest dokładnie określona, prawdopodobnie miąższość warstwy odpadów wynosić będzie ok. 20 m (Mazurek i in., 1997).

Bryła składowiska o przedstawionych gabarytach wywierać będzie na podłożu określone obciążenie. Jego wartość zależy będzie od objętości zgromadzonych w danym czasie odpadów, oraz ich ciężaru objętościowego. W celu oszacowania naprężeń występujących w podłożu i możliwych osiadań podłoża, wykorzystano programy Seep/W i Sigma/W firmy Geo-Slope Canada, bazujące na metodzie elementów skończonych. Wielkość osiadań związanych z obciążeniem od narastającej w czasie bryły składowiska, przeanalizowano dla dwuwymiarowego modelu podłoża, wyodrębnionego wzdłuż najdłuższej osi projektowanego składowiska. Zależność pomiędzy naprężeniem, a odkształceniem występującą dla realnych gruntów, przybliżono za pomocą modeli konstytutywnych: liniowo-sprężystego (*linear elastic*) (wykres B na ryc. 2) i sprężysto-idealnie plastycznego (*elastic plastic*) (wykres A na ryc. 2). Model liniowo-sprężysty wymaga podania następujących parametrów geologiczno-inżynierskich:

- ciężaru objętościowego — γ ,
 - modułu odkształcenia — E ,
 - współczynnika Poissona — ν .
- Model sprężysto-idealnieplastyczny opisują dodatkowo:
- kąt tarcia wewnętrznego — Φ ,
 - spójność — c .

Wartości parametrów przyjętych do obliczeń wraz ze źródłami ich uzyskania zestawiono w tabeli 1.

Symulacja zmian naprężeń w podłożu gruntowym podczas wykonywania wykopu

Symulacja powstawania wykopu była prowadzona dla wszystkich warstw geotechnicznych przy wykorzystaniu modelu liniowo-sprężystego. Do obliczeń zastosowano parametry przedstawione w tabeli 2. Powstający wykop o

głębokości średnio 10–13 m, znajdzie się poniżej zalegającego płytko zwierciadła wód podziemnych. Założono, że na każdym etapie wykonania będzie on odwadniany, a zwierciadło wód podziemnych uformowane będzie zgodnie z morfologią dna wykopu. W ośrodku gruntowym, wystąpi, zatem obniżenie ciśnienia porowego. Fakt ten będzie miał szczególnie znaczenie dla gruntów nienasyconych, w których nastąpi wzrost ujemnego ciśnienia porowego. Pociągnie to za sobą, bowiem wzrost naprężenia efektywnego przenieszonego przez szkielet gruntowy i korespondujące z tym faktem odkształcenie (Fredlund & Rahardjo, 1993). Dla oddania wpływu tego efektu zastosowano w analizie modelowej dane o rozkładzie wartości ciśnienia porowego w podłożu składowiska. Były one wynikiem symulacji zmian zwierciadła wód podziemnych związanych z drenażem powstającego wykopu, wykonanych z zastosowaniem programu SEEP/W. Wielkość i zasięg deformacji powstałych po całkowitym usunięciu nadkładu przedstawia ryc. 4 oraz dla wybranej linii przekroju X-X ryc. 5.

Tab. 2. Parametry odkształceniowe dla odpadów komunalnych wykorzystane do opisu interakcji bryły składowiska z podłożem

Table 2. Deformation parameters for municipal wastes used in modeling of the stress-settlement analysis

Warstwa geotechniczna	Parametry obliczeniowe	ródło
Opady komunalne	$E = 3000$ [kPa] $\nu = 0,4$ [-]	badania terenowe wg Jessbergera & Kockela 1995; oraz Sanchez-Alciturri i in., 1995b

Tab. 3. Maksymalne osiadania punktów węzłowych położonych na powierzchni elementów obliczeniowych dna wykopu w kolejnych etapach depozycji odpadów

Table 3. Maximum settlement for grids situated on surface of finite-elements at the bottom of excavation during landfill operation

Etap depozycji odpadów	Maksymalne osiadanie gruntów w dnie wykopu. Ciężar odpadów komunalnych		
	$\gamma=10$ kN/m ³	$\gamma=13$ kN/m ³	$\gamma=16$ kN/m ³
Etap 1	6 (6)	8 (7)	11(10)
Etap 2	12 (10)	16 (13)	25 (19)
Etap 3	16 (14)	22 (18)	30 (24)

Tab. 4. Porównanie miąższości ekwiwalentnych warstw usuwanego nadkładu i deponowanych odpadów

Table 4. Thickness comparison of the equivalent layers of excavated material and deposited municipal wastes

Miaż. usuniętego nadkładu [m]	Cięż. usuniętej w-wy gruntu dla $\gamma=20,37$ [kN/m ³]	Miaż. w-wy odpadów o ekwiwalentnym cięż. dla $\gamma=10$ [kN/m ³]	Miaż. w-wy odpadów o ekwiwalentnym cięż. dla $\gamma=13$ [kN/m ³]	Miaż. w-wy odpadów o ekwiwalentnym cięż. dla $\gamma=16$ [kN/m ³]
9	183,33	18,3	14,1	11,5
10	203,70	20,4	15,7	12,7
11	224,07	22,4	17,2	14,0
12	244,44	24,4	18,8	15,3
13	264,81	26,5	20,4	16,6
14	285,18	28,5	21,9	17,8
15	305,55	30,6	23,5	19,1

Symulacja zmian naprężeń oraz osiadania podłoża gruntowego podczas depozycji odpadów

Na dzień wykopu rozpocznie się deponowanie odpadów. W badaniach modelowych założono trzy etapy składowania. W ich trakcie będzie przyrastać mniej więcej podobna objętość odpadów. Wobec braku danych o ilości zdeponowanych odpadów założono, że składowisko zostanie wypełnione aż do poziomu opisanego rzędną jego wierzchołka na wysokości 283 m. Pośrednim etapom jego powstawania odpowiadają wartości rzędnych powierzchni bryły 266 m i 274 m n.p.m.

Obciążenie wywierane na podłożę przez poszczególne objętości odpadów zależeć będzie od ich ciężaru objętościowego. Jednakże w kwestii wartości tego parametru występują poważne rozbieżności. Odpady są, bowiem mieszaniną komponentów o skrajnie różnej gęstości, od metali po papier, stąd parametr ten zmieniać się może w szerokich granicach 800–6400 kg/m³ (Fang, 1995). Dla świeżych odpadów przyjmuje się najczęściej wartość ok. 200–400 kg/m³. Po ich zagęszczeniu wzrasta ona do poziomu 800–1000 kg/m³. Stare odpady mogą mieć gęstość 1200 kg/m³ i więcej (Fang, 1995; Sanchez-Alciturri i in., 1995a). Problem związany z kontrowersjami, co do wartości ciężaru objętościowego odpadów komunalnych rozwiązano prowadząc obliczenia dla trzech wartości tego parametru, równych: 10, 13 i 16 kN/m³.

Symulację oddziaływania składowiska odpadów na podłożę gruntowe prowadzono dwutorowo. Dla dwuwymiarowego modelu podłoża (przekroju) realizowano analizy uwzględniające różnice w zachowaniu się gruntów pod wpływem obciążenia. W pierwszej z nich dla wszystkich warstw geotechnicznych przyjęto model konstytutywny (zależność naprężenie-odkształcenie) liniowo-sprężysty. Opisany został on parametrami, których wartości zaprezentowano w tabeli 2. Druga analiza była związana ze sprężysto-idealnie plastycznym modelem przyjętym dla większości gruntów podłoża. Model liniowo-sprężysty przyjęto dla piasku oraz piaszczowca. Było to wynikiem lokalnego, niewielkiego rozprzestrzenienia pierwszego gruntu oraz skalistym, ciągłym charakterem drugiego. Dla każdej z symulacji zastosowano trzy różne ciężary objętościowe odpadów komunalnych o wartościach 10, 13 i 16 kN/m³.

Powierzchnia dna wykopu, zdeformowana po całkowitym odprężeniu, stanowi poziom odniesienia dla wywołanych składowaniem odpadów komunalnych odkształceń. Będzie to jednak powierzchnia, która pierwotnie zalegała nieco niżej i podniosła się na skutek odprężenia. Uwzględniając ten fakt, zastosowano dane z końcowego etapu symulacji wykopu, niosące informację o

odprężeniu się gruntów w związku ze zdjęciem części nadkładu. Zatem w symulacji został uwzględniony nietypowy charakter składowiska oraz informacja, że grunty stanowiące bezpośrednie podłożę budowli pierwotnie były poddawane pewnym naprężeniom, związanym z ciężarem nadkładu.

Ocena odkształceń bryły składowiska nie była przedmiotem analizy. Pomimo tego określenie parametrów wytrzy-

małościowych odpadów komunalnych ma duże znaczenie dla wiarygodności modelowania. Odpady są, bowiem materiałem łatwo odkształcającym się, o gorszych parametrach wytrzymałościowych niż grunty. Ich interakcji z

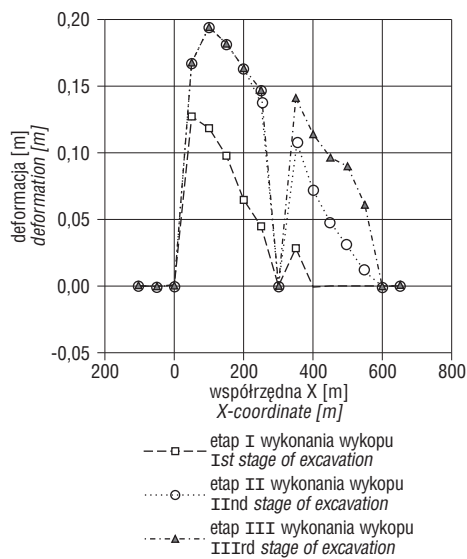
podłożem w żaden sposób nie można porównać z obserwowanymi dla bryły sztywnej.

Dla odpadów komunalnych przyjęto najprostszy liniowo-sprężysty model konstytutywny. Opisują go parametry przedstawione w tabeli 2. Zamieszczone w niej wartości modułu odkształcenia i współczynnika Poissona charakteryzują odpady starsze, o znacznym stopniu zagęszczenia.

Tab. 5. Miąższość warstwy odpadów w kolejnych etapach depozycji

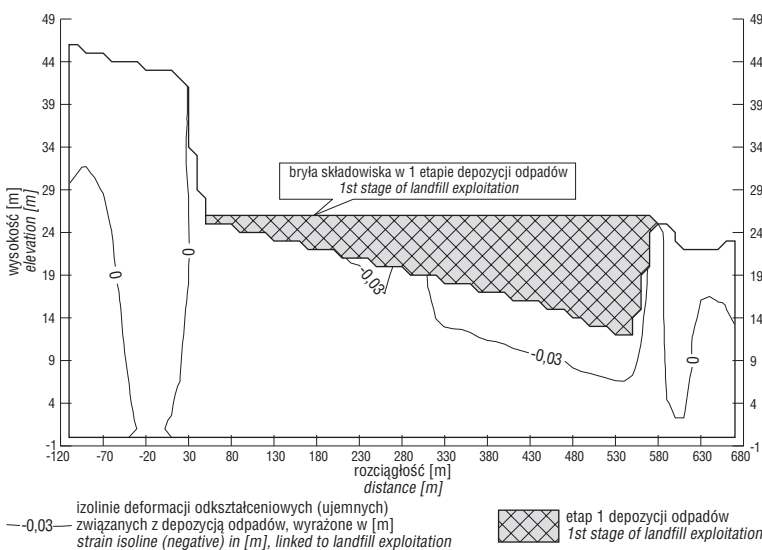
Table 5. Thickness of the municipal wastes layers during landfill operation

Miąższość warstwy odpadów [m] Etap 1	Miąższość warstwy odpadów [m] Etap 2	Miąższość warstwy odpadów [m] Etap 3
Maks. 14	maks. 22	maks. 31
Min. 1	min. 9	min. 18



Ryc. 5. Wykres deformacji pionowej gruntu dla punktów leżących na linii przekrojowej X-X' z uwzględnieniem wzrostu odprężenia w kolejnych etapach pogłębienia wykopu

Fig. 5. Vertical subsoil deformation diagram for grids situated on X-X' line with increased decompression during excavation



Ryc. 6. Izoliny odkształceń deformacyjnych podłoża pod bryłą składowiska w 1 etapie depozycji odpadów; poziom „zerowy” modelu na wysokości 240 m n.p.m.

Fig. 6. Deformation isolines beneath landfill during 1st stage of exploitation; "zero" level model at 240 m a.s.l.

Wyniki modelowania

Wartość deformacji odprężeniowych dna wykopu związana jest z ciężarem usuniętego gruntu. Ogólnie powstające deformacje dna wykopu stanowią 0,18–1,40% miąższości usuniętego nadkładu. Przy czym średnio jest to wartość rzędu 0,8–1,0%. Wpływ na wartość deformacji odprężeniowych ma położenie punktu na dnie wykopu. Ogólnie najsilniejsze odkształcenia notuje się dla punktów położonych w środkowej części wykopu, najmniejsze zaś występują w strefach przy skarpach. W przypadku modelu podłoża składowiska „Barycz III” rozkład deformacji na dnie wykopu jest odmienny. Znajdujący się w środkowej części tego przekroju piaskowiec nie reaguje na usunięcie warstwy, około 13 m nadkładu. Piaskowiec ma dosyć wysokie wartości parametrów wytrzymałościowych, ciężar nadkładu jest na tyle mały, że nie spowodował powstania deformacji, stąd też zdjęcie obciążenia nie doprowadziło do odkształceń odprężeniowych. Analiza wykresu deformacji pionowej dla punktów linii X-X' wskazuje, że odprężeniu ulega tylko bezpośrednie podłoża składowiska. Procesowi temu poddaje się, bowiem warstwa o szerokości większej od odpowiedniego wymiaru wykopu tylko o ok. 50 m z każdej strony. Rozkład deformacji odprężeniowych w kierunku pionowym jest liniowy i maleje wraz z głębokością.

Symulację oddziaływania składowiska na podłoża gruntowe przeprowadzono wielowariantowo, dla dwóch modeli konstytutywnych opisujących własności odkształceniowe warstw geotechnicznych oraz trzech ciężarów objętościowych odpadów komunalnych. W konsekwencji wykorzystania plików wynikowych z ostatniego etapu powstawania wykopu, izoliny osiadań podłoża składowiska obrazują deformacje względem poziomu zarejestrowanego po ukończeniu wykopu i całkowitem odprężeniu gruntów. Porównując wyniki symulacji, wyższe wartości mają osiadania obliczone przy wykorzystaniu modelu sprężysto-idealnie plastycznego. Różnica odkształceń, dla tego samego etapu depozycji, lecz różnych modeli rośnie wprost proporcjonalnie z miąższością warstwy odpadów oraz ich ciężarem objętościowym. Dla naprężeń niższych niż odpowiadające granicy uplastycznienia występują odkształcenia o charakterze odwracalnym, liniowo zależne od naprężenia. Zatem w tym zakresie naprężeń wykorzystując modele liniowo-sprężysty i sprężysto-idealnie plastyczny, dla stałych parametrów odkształceniowych otrzymano takie samo osiadanie. Jednak przy większych naprężeniach przekraczających graniczną wartość powodującą uplastycznienie gruntu, następuje nieograniczony przyrost odkształceń. Dlatego przy większych obciążeniach deformacje obliczone przy zastosowaniu modelu sprężysto-plastycznego są większe niż obliczone przy wykorzystaniu modelu liniowo-sprężystego.

W tabeli 3 zestawiono wartości osiadań obliczonych przy użyciu różnych modeli konstytutywnych. Pierwsza, z umieszczonych w komórce liczb określa deformacje obliczone za pomocą modelu sprężysto-plastycznego, wartość zaś w nawiasie przy wykorzystaniu modelu liniowo-sprężystego.

Tab. 6. Uproszczona ocena możliwości wystąpienia osiadań poniżej „przedodprężeniowego” poziomu dna wykopu
Table 6. Raw estimation of the soil settlement below layer “predecompression” at the bottom of excavation

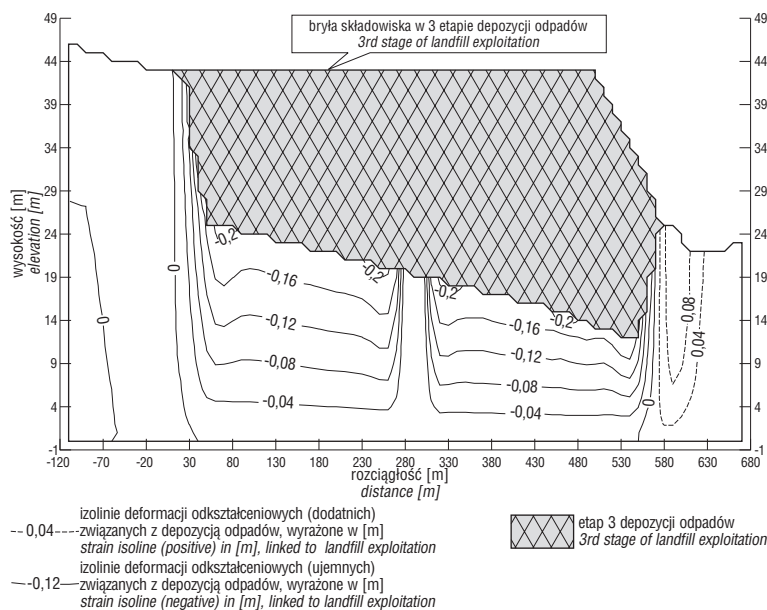
Etapy depozycji odpadów	Ciężar objętościowy odpadów komunalnych		
	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	$\gamma=13 \text{ kN/m}^3$	$\gamma=16 \text{ kN/m}^3$
Etap 1	0	0	1
Etap 2	1	1	2
Etap 3	2	3	4

0 — brak osiadania; 1 — osiadanie możliwe tylko w strefach o maksymalnej miąższości zdeponowanych odpadów; 2 — osiadanie pewne tylko w strefach o maksymalnej miąższości zdeponowanych odpadów; 3 — osiadanie pewne w strefach o maksymalnej miąższości zdeponowanych odpadów i możliwe dla minimalnej miąższości; 4 — osiadanie pewne w strefach o maksymalnej miąższości zdeponowanych odpadów i częste dla minimalnej miąższości

Tab. 7. Warianty ciężaru objętościowego gruntu oraz etapów depozycji odpadów dla których następuje proces wyparcia gruntów spod bryły składowiska
Table 7. Different bulk densities of the soil, and stages of landfill operation for the boundary stress

Etapy depozycji odpadów	Ciężar objętościowy odpadów komunalnych		
	$\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 13 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
Etap 1			+
Etap 2	+	+	+
Etap 3	+	+	+

+ oznacza wystąpienie zjawiska wyparcia gruntu spod bryły składowiska



Ryc. 7. Izolinie odkształceń deformacyjnych podłoża pod bryłą składowiska w 3 etapie depozycji odpadów; poziom „zerowy” modelu na wysokości 240 m n.p.m.

Fig. 7. Deformation isolines beneath landfill during 3rd stage of exploitation; “zero” level model at 240 m a.s.l.

Po obliczeniu ilości usuwanych elementów poszczególnych gruntów wyznaczono średni ciężar objętościowy usunianego z wykopu materiału na poziomie $20,37 \text{ kN/m}^3$. Można, zatem w przybliżeniu określić ciężar zdejmowanej warstwy gruntu, oraz odpowiadającą mu miąższość warstwy odpadów, co przedstawiono w tabeli 4 i 5.

Zestawiając i porównując dane z tabeli 4 i 5 można określić, kiedy wystąpi osiadanie, którego wartość obliczana jest względem pierwotnego, przedodprężeniowego położenia elementów podłoża. Wyniki powyższego zestawienia obrazuje schematycznie tabela 6.

Zatem wystąpienie osiadań względem pierwotnej powierzchni terenu jest pewne dla trzeciego etapu składowania odpadów, w sprzyjających okolicznościach zajdzie podczas etapu drugiego i znacznie rzadziej dla pierwszego. W przypadku wariantów, dla których nie jest możliwe osiadanie poniżej przedodprężeniowego poziomu odniesienia pomimo przyłożenia pewnej warstwy odpadów, czyli pewnego obciążenia, ciągle zachodzić będzie proces odprężania się podłoża. Nie wystąpią natomiast jakiegokolwiek osiadania podłoża.

Powyższe rozważania potwierdzają się w pełni dla wszystkich wariantów symulacyjnych, dla których obliczenia prowadzono wykorzystując model liniowo-sprężysty. Nie można ich jednak wprost zastosować dla wariantów realizowanych przy pomocy modelu sprężysto-plastycznego. Jest to wynikiem różnic pomiędzy wartościami obliczonych osiadań otrzymanych przy zastosowaniu poszczególnych modeli konstytutywnych, oraz różnicami pomiędzy samymi modelami konstytutywnymi. Jednakże odkształcenia wyznaczone dla modelu sprężysto-plastycznego są większe tylko dla bardziej zaawansowanych etapów depozycji, choć i tak są to niewielkie różnice rzędu kilku centymetrów. Dlatego analizę przeprowadzoną przy wykorzystaniu modelu liniowo-sprężystego należy traktować jako pewne, mimo wszystko dosyć dokładne przybliżenie, dla rozważań dotyczących symulacji przy pomocy modelu sprężysto-plastycznego.

W przypadku analizowanych symulacji strefy uplastycznienia gruntów, mogą rozwijać się w miejscach, gdzie miąższość warstwy odpadów znacznie przekracza wartość ekwiwalentną ciężaru usuniętego nadkładu o ile ciężar wywierany przez odpady przekroczy wartość naprężenia granicznego, dla danego gruntu. Najbardziej podatne na wystąpienie tego typu zjawiska będą strefy podłoża przy narożach bryły składowiska, gdzie usunięto nadkład o małej miąższości zaś zdeponowano dużą ilość odpadów. Rozwój stref uplastycznienia pod wpływem wzrostu obciążenia prowadzi w efekcie do wyparcia gruntu spod bryły składowiska. Sytuacja taka następuje pod narożami opartej na dnie wykopu stopy składowiska. Ma to miejsce dla konfiguracji jak w tabeli 7.

We wszystkich przypadkach ciężar odpadów jest większy od ciężaru usuniętego nadkładu. Możliwe jest, zatem, że będzie to czynnik wpływający na rozwój stref uplastycznienia i wyparcia gruntu spod bryły składowiska. Odkształcające się warstwy gruntu powodować będą przemieszczanie się bryły składowiska. Ogólnie będzie ono wykazywać tendencję do zagłębiania się w podłoże. Przy wschodniej gra-

nicy obszaru składowiska zachodzić będzie największe osiadanie, związane z rozwojem strefy uplastycznienia wywołanej obciążeniem najgrubszą, bo 31 m warstwą odpadów.

Wyniki symulacji komputerowych wizualizowano w postaci rysunków modeli podłoża z naniesionymi izoliniami deformacji w kierunku pionowym. Izolinie są opisane wartościami liczbowymi, oznaczającymi deformację wyrażoną w metrach. Znak liczby określającej izolinię informuje o charakterze odkształcenia. W przypadku znaku „-” jest to skrócenie pewnego elementu podłoża. Zaprezentowano część wyników modelowania komputerowego symulującego:

□ etap 1 składowania odpadów dla wariantu wykorzystujących do obliczeń model sprężysto-plastyczny oraz wartość ciężaru objętościowego odpadów 10 kN/m^3 , reprezentatywną dla świeżych odpadów komunalnych, (ryc. 6).

□ etap 3 składowania odpadów dla wariantu wykorzystujących do obliczeń model sprężysto-plastyczny oraz wartość ciężaru objętościowego odpadów 13 kN/m^3 , reprezentatywną dla starszych odpadów komunalnych, (ryc. 7).

Rozpatrując otrzymane wyniki w nawiązaniu do projektu składowiska otrzymujemy obraz potencjalnych zagrożeń mogących wystąpić w podłożu składowiska. Do miejsc szczególnie narażonych należą narożniki składowiska, zagrożone wystąpieniem stref uplastycznienia gruntów oraz jego środkowa część, gdzie ze względu na występowanie gruntów o bardzo zróżnicowanych parametrach odkształceniowych, mogą wystąpić nierównomierne, znaczne osiadania podłoża. Jak wynika z przeprowadzonych symulacji osiadań rozwiązania konstrukcyjne składowiska powinny uwzględniać zabiegi wzmacniające podłoże i izolację dna składowiska w zagrożonych rejonach. Wzmocnienie podłoża można uzyskać poprzez zagęszczenie, wymianę gruntu czy też kombinację obu działań.

Podsumowanie

W rezultacie obliczeń przeprowadzonych przy wykorzystaniu modeli konstytutywnych uzyskano wartości osiadań podłoża składowiska tworzących pewne ramy. Dla obliczeń realizowanych przy wykorzystaniu modelu liniowo-sprężystego są to najmniejsze możliwe odkształcenia, dla sprężysto-plastycznego zaś, największe. Oczywiście sytuacja taka będzie mieć miejsce o ile założymy, że parametry geotechniczne zastosowane do symulacji są reprezentatywne dla ośrodka gruntowego. Reprezentatywność parametrów wyróżnionych warstw, przyjętych w badaniach modelowych w największym stopniu wpływa na wartość uzyskanych wyników. Przy spełnieniu powyższego założenia osiadania obserwowane w terenie mieścić się będą w zarysowanych granicach. Maksymalne, czyli potencjalnie najbardziej niebezpieczne dla projektowanego składowiska wartości osiadań bezpośredniego podłoża składowiska zestawiono w tabeli 3.

Modelowanie komputerowe osiadań prowadzono stosując trzy wartości ciężaru objętościowego odpadów komunalnych. Odpady komunalne wykazują, bowiem znaczny stopień zróżnicowania składu i właściwości fizyczno-mechanicznych. Przyjęto, że dla świeżych odpadów komunalnych reprezentatywna jest wartość 10 kN/m^3 ,

dla starszych zaś 13 kN/m^3 . Uzyskane dla tych wartości wielkości osiadań bliższe będą realnym odkształceniom, które wystąpią w naturalnych warunkach pod wpływem obciążenia warstwą odpadów.

Uzyskane wyniki obrazujące interakcję pomiędzy bryłą składowanych odpadów a podłożem, wskazują na możliwości i charakter wystąpienia potencjalnych zagrożeń związanych z lokalizacją składowiska w terenie o skomplikowanej budowie geologicznej. Zastosowanie do oceny osiadań podłoża gruntowego pod składowiskiem symulacji komputerowych pozwala na szybką, wielowariantową ocenę osiadań w anizotropowym podłożu, przy wykorzystaniu zmiennych parametrów obciążenia podłoża gruntowego. Wykorzystane programy komputerowe i metodyka obliczeń mogą znaleźć szerokie zastosowanie w innych projektach obiektów wrażliwych na nadmierne, nierównomierne osiadania podłoża gruntowego.

Literatura

- DRUMM E.C., KANE W.F. & ORLOWSKI A.C. 1993 — Subsidence effects on embankments: Combined empirical-Fem approach. *Jour. Geotech. Eng.*, 119: 173–177.
- FANG H.Y. 1995 — Engineering behaviour of urban refuse, compaction control and slope stability analysis of landfill. *Waste disposal by landfill — GREEN'93*, Sarsby (ed.). Balkema, Rotterdam: 47–71.
- FREDLUND D. G. & RAHARDJO H. 1993 — Soils mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- INDRARATNA B., BALASUBRAMANIAM A.S. & BALACHANDRAN S. 1992 — Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay. *Jour. Geotech. Engin.*, 118: 12–33.
- INDRARATNA B., BALASUBRAMANIAM A.S. & SIVANESWARAN N. 1997 — Analysis of settlement and lateral deformation of soft clay foundation beneath two full-scale embankments. *Internat. Jour. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 21: 121–135.
- JESSBERGER H.L. & KOCKEL R. 1995 — Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials. *Waste disposal by landfill — GREEN'93*, Sarsby (ed.). Balkema, Rotterdam: 313–322.
- LOGANATHAN N., BALASUBRAMANIAM A.S. & BERGADO D.T. 1993 — Deformation analysis of embankments. *Jour. Geotech. Engin.*, 119: 1185–1206.
- MAZUREK J., GONET A. & STRYCZEK S. 1997 — Prognoza deformacji powierzchni terenu na skutek eksploatacji otworowej w rejonie przeznaczonym pod składowanie odpadów w etapie III. *Arch. CPP GSMiE, PAN. Kraków*
- MIKOŁAJCZAK J. & GOCAŁ J. 1996 — Projekt pozyskania ziemi do izolacji deponowanych na wysypisku odpadów, z terenów przewidzianych pod III etap wysypiska. *Wyd. Geod. Górn. Inż. Środ., Zakł. Kształtowania i Ochrony Środowiska, Arch. AGH, Kraków.*
- RYBICKI S. & LENDUSZKO P. 1991 — Warunki geologiczno-inżynierskie w utworach mioceńskich podłoża Krakowa. *Budowa geologiczna, warunki hydrogeologiczne i geotechniczne podłoża Krakowa. Mat. konferencyjne*, Kleczkowski A. S. (red.). Wyd. AGH, Kraków: 59–97.
- SANCHEZ-ALCITURRI J. M., PALMA J., SAGASETA C. & CANIZAL J. 1995a — Three years of deformation monitoring at Meruelo landfill. *Waste disposal by landfill — GREEN'93* Sarsby (ed.). Balkema, Rotterdam: 365–371.
- SANCHEZ-ALCITURRI J. M., PALMA J., SAGASETA C. & CANIZAL J. 1995b — Mechanical properties of wastes in a sanitary landfill. *Waste disposal by landfill — GREEN'93*, Sarsby (ed.). Balkema, Rotterdam: 357–363.
- SKOCZYLAŚ-CISZEWSKA K. & POBORSKI J. 1961 — Z badań geologicznych nasunięcia karpackiego na miocen solonośny w Baryczki koło Wieliczki. *Spraw. Kom. Nauk Geol., PAN Oddz. w Krakowie*, Warszawa: 237–238.
- WIŁUN Z. 1987 — *Zarys geotechniki*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- WOLSKI W. (red.) 1980 — *Zastosowanie metody elementów skończonych w geotechnice*. Ossolineum, PAN.