



Mikołaj Czajkowski • Anna Bartczak • Olimpia Markiewicz •
Agnieszka Markowska

PORÓWNANIE KOSZTÓW ZEWNĘTRZNYCH WYBRANYCH METOD SKŁADOWANIA STAŁYCH ODPADÓW KOMUNALNYCH

Mikołaj Czajkowski, mgr; Anna Bartczak, dr; Olimpia Markiewicz, mgr; Agnieszka Markowska, dr – Uniwersytet Warszawski, Warszawski Ośrodek Ekonomii Ekologicznej

adres korespondencyjny:

Uniwersytet Warszawski, Wydział Nauk Ekonomicznych
00241 Warszawa, Długa 44/50
e-mail: miq@wne.uw.edu.pl

COMPARISON OF EXTERNALITIES OF SELECTED MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL

SUMMARY: The aim of the article is to compare environmental externalities of different waste landfilling options that are available in Poland. Best available technologies were assumed, while physical parameters of a typical landfill were based on data from the landfill in Gać, Dolnośląskie Voivodship. The main focus of the analysis is the estimation of external costs of gas emissions, transport of waste and disamenities resulting in lower prices of real estate in the neighbourhood. The paper utilizes Life Cycle Analysis (LCA). For the quantification of external effects and external costs the ExternE methodology was used, developed within series of EU research projects. An important element of the study is a sensitivity analysis which utilizes a range of unit costs of greenhouse gas emissions, what reflects uncertainty about the true value of damages caused by carbon emissions. The paper provides an overview of the most important impacts of landfilling and their scale. The estimated externalities range from – 3,29 to over 86 EUR per tonne of waste, depending on the technology used and unit costs of emissions. The study, conducted within the MethodEx Project of the EU 6th Framework Programme, demonstrates a possible use of the methodology applied to the estimation of externalities of waste landfilling. The results can easily be used in order to estimate externalities of alternative waste landfill technologies.

KEYWORDS: externalities, waste management, landfilling of municipal solid waste

Wstęp

Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r.¹ w ogólnych założeniach i postulowanej hierarchii działań jest zgodna z regulacjami Unii Europejskiej w dziedzinie gospodarowania odpadami. Regulacje unijne zakładają głównie minimalizację ilości generowanych odpadów i ich ponowne wykorzystanie. Deponowanie odpadów na składowiskach jest traktowane jako ostateczne rozwiązanie dla odpadów, których nie udało się zebrać w sposób selektywny i zagospodarować w inny sposób. W praktyce jednak wciąż ponad 92% zebranych odpadów komunalnych w Polsce jest składowanych na wysypiskach. Wynika to głównie z nieefektywnych rozwiązań administracyjno-prawnych, które sprzyjałyby selektywnej zbiórce odpadów i poddawaniu ich bardziej zaawansowanym metodom unieszkodliwiania. Koszty wybudowania nowoczesnych obiektów są bardzo wysokie w porównaniu z kosztami funkcjonowania wielu dotychczasowych, prymitywnych wysypisk. Nawet jeżeli uda się zdobyć fundusze na pokrycie części kosztów inwestycyjnych (na przykład z programów pomocowych UE, funduszy ochrony środowiska), istnieje ryzyko, że ze względu na relatywnie wysokie opłaty za usługi w nowoczesnych obiektach popyt na ich usługi będzie niewystarczający, aby przedsięwzięcie było rentowne.

W 2005 roku zebrano w Polsce 9,35 miliona ton odpadów komunalnych.² Jedynie 3,1% odpadów komunalnych zostało zebranych w sposób selektywny, a jedynie 7,8% objęto systemem odzysku lub unieszkodliwiania innego niż składowanie. Niezbędna jest odpowiednia kontrola procesu składowania odpadów w Polsce. Wyposażenie składowisk oraz technologia składowania ma podstawowy wpływ na wielkość szkód środowiskowych spowodowanych tą formą zagospodarowania odpadów, niezależnie od działań zmierzających do minimalizacji ilości odpadów trafiających na wysypisko.

W przeprowadzonej analizie porównano koszty zewnętrzne różnych metod składowania odpadów, ze szczególnym uwzględnieniem powstających gazów cieplarnianych. Do porównanych metod należą składowanie, składowanie połączone ze zbieraniem powstającego gazu wysypiskowego oraz spalanie zebranego gazu z odzyskiem energii, co pozwala uniknąć emisji spowodowanych wytwarzaniem elektryczności lub ciepła w typowy dla Polski sposób (elektrociepłownie termiczne opalane węglem). Do obliczenia kosztów zewnętrznych zastosowano podejście kompleksowe, uwzględniające wielostopniowość procesu zbierania, transportu i zagospodarowania odpadów, a także budowy i prawidłowego zamknięcia wysypiska, gdyż presja na środowisko może być wywierana na każdym z omawianych etapów.

¹ Dz.U. 2001 nr 62 poz. 628 z późn. zm.

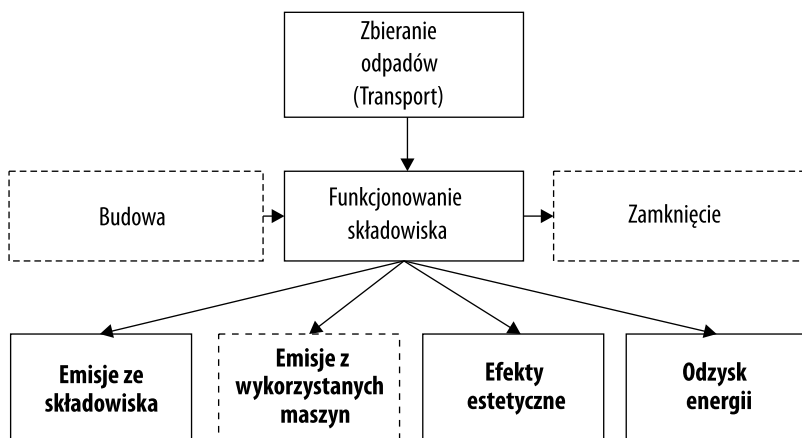
² *Ochrona środowiska 2006*, GUS, Warszawa 2007.

Z powodu dużej niepewności w odniesieniu do wartości pieniężnej szkód powodowanych przez poszczególne zanieczyszczenia, takie jak NMVOC, gazy cieplarniane, tlenki siarki, zastosowano kilka zestawów wartości jednostkowych, aby jak najpełniej ukazać spektrum zależności uzyskanych wyników od przyjętych założeń.

1. Metodologia badania

W przeprowadzonej analizie zastosowano metodę analizy cyklu życia (*life cycle analysis* – LCA), biorąc pod uwagę wszystkie etapy funkcjonowania składowiska. Etapy cyklu życia wysypiska, które zostały uwzględnione w analizie, przedstawiono na rysunku 1. Linie przerywane oznaczają obszary badania, w których zastosowano dane ogólne, pochodzące z innych opracowań; dla wszystkich innych elementów zostały wykorzystane dane zebrane dla modelowego składowiska.

Rysunek 1
Ramy analizy



Źródło: opracowanie własne.

Na potrzeby prowadzonego badania założono wykorzystanie najlepszej możliwej technologii. Dane dotyczące ilości i składu odpadów, ich pochodzenia, sposobu transportowania, wielkości składowiska i inne dane specyficzne dla

konkretnej lokalizacji uzyskano z typowego składowiska, zakładu przetwarzania i składowania odpadów w Gaci, Ekologicznego Związku Gospodarki Odpadami Komunalnymi EKOGOK w Oławie. Składowisko przyjmuje odpady z pięciu pobliskich gmin miejskich i wiejskich.

Zakład składa się z sortowni przywożonych odpadów oraz składowiska. Na potrzeby analizy wykorzystano jednak tylko dane o odpadach trafiających na składowisko. Całkowitą pojemność kwater oszacowano na 1,5 Tg (około 300 000 m³), natomiast ilość odpadów przyjmowanych na składowisko w ciągu roku uwzględniono w dwóch wariantach – 30 i 60 Gg rocznie, co odpowiada 50 i 100% możliwości przerobowych sortowni.

W ramach analizy zidentyfikowano czynniki, które mają negatywny wpływ na środowisko oraz te, których znaczenie jest kluczowe. Potencjalnie najbardziej szkodliwe emisje, z podziałem na ośrodek emisji i etap ich powstawania, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Powstawanie potencjalnych szkód w zależności od etapu cyklu życia składowiska

Potencjalne szkody	Etapy cyklu życia składowiska	Transport odpadów	Funkcjonowanie składowiska	Budowa i zamknięcie zakładu	Spalanie gazów wysypiskowych
Emisje zanieczyszczeń do powietrza					
Gazy cieplarniane (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)		(+)	(+)	(+)	(+)
Klasycznie zanieczyszczenia (PM, SO ₂ , NO _x , NMVOC, CO)		(+)	(+)	(+)	(+)
Substancje śladowe: metale toksyczne (As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb), PAHs, dioksyne		(+)	(+)	(+)	(+)
Zanieczyszczenie gleby i wody					
Zanieczyszczenie gleby oraz wód podziemnych i powierzchniowych odciekami		(-)	(+)	(-)	(-)
Wpływ lotnych popiołów, pozostałości po spalaniu i osadów ściekowych		(-)	(+)	(-)	(-)
Negatywne skutki lokalne					
Emisja nieprzyjemnych zapachów		(-)	(+)	(-)	(-)
Zwiększona populacja szkodników		(-)	(+)	(-)	(-)
Efekty wizualne		(+)	(+)	(-)	(-)
Hałas		(+)	(+)	(-)	(-)
Zwiększone natężenie ruchu drogowego		(+)	(-)	(-)	(-)

(+) – występuje; (-) – nie występuje

Źródło: opracowanie własne.

1.1. Budowa i zamknięcie składowiska

W celu oszacowania emisji powstających na etapie budowy i likwidacji składowiska wykorzystano ogólne dane pochodzące z inwentarza emisji typowych wysypisk. Wykorzystana baza 'WISARD' została przygotowana i dostarczona przez AEA Energy and Environment na potrzeby realizacji projektu Methodex i była wynikiem prowadzonych wcześniej badań. Skumulowane wielkości emisji powstające podczas budowy i likwidacji składowiska o pojemności 1,5 Tg znajdują się w aneksie. W tabeli 1a zawarto jedynie te emisje, które zostały uwzględnione w oszacowaniu szkód całkowitych.

1.2. Transport odpadów

Pojazdy silnikowe odpowiedzialne są za generowanie różnych efektów zewnętrznych, w tym także emisji szkodliwych związków chemicznych do atmosfery. W analizie skoncentrowano się wyłącznie na jednym rodzaju kosztów zewnętrznych transportu – na zanieczyszczeniach powietrza, które związane są z przemieszczaniem się pojazdów – pomijając pozostałe efekty zewnętrzne transportu, takie jak: zanieczyszczenie powietrza powstające w procesie budowy i składowania pojazdów i infrastruktury drogowej, w procesie wydobywania ropy naftowej i produkcji paliw, a także zniszczeń nawierzchni drogowej i powodowania nadmiernego zatłoczenia. Zanieczyszczenia powietrza generowane przez ruch drogowy przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2
Zanieczyszczenie powietrza związane z transportem

Emisja	Charakterystyka	Źródło	Wpływ	Skala
Dwutlenek węgla (CO ₂)	Produkt uboczny spalania	Produkcja paliw i silniki spalinowe	Zmiana klimatu	Globalna
Tlenek węgla (CO)	Gaz toksyczny, który obniża możliwość transportu tlenu przez krew	Silniki spalinowe	Zdrowie ludzkie	Lokalna
Cząstki stałe (PM10, PM2.5)	Wdychane cząstki paliw oraz węgla	Silniki Diesela i inne źródła	Zdrowie ludzkie, estetyka	Lokalna i regionalna
Tlenki azotu (NO _x)	Różne związki. Niektóre toksyczne, wszystkie wspomagające powstawanie ozonu troposferycznego	Silniki spalinowe	Zdrowie ludzkie, powstawanie ozonu troposferycznego, szkody ekologiczne.	Lokalna i regionalna
Tlenki siarki (SO _x)	Czynnik powodujący podrażnienie płuc, odpowiedzialny za powstawanie kwaśnych deszczy	Silniki Diesela i inne źródła	Zdrowie ludzkie, kwaśne deszcze	Lokalna i regionalna
Lotne związki organiczne (NMVOCs)	Różne związki organiczne w postaci gazów	Produkcja paliw i silniki spalinowe	Zdrowie ludzkie, powstawanie ozonu troposferycznego	Lokalna i regionalna

Źródło: opracowanie własne.

Głównymi źródłami zanieczyszczenia powietrza generowanego z transportu do składowisk odpadów są:

- dostarczanie odpadów na składowisko pojazdami z silnikami spalinowymi;
- wykorzystanie na składowisku odpadów urządzeń takich, jak: kompaktory i wózki widłowe.

W celu oszacowania potrzeb transportowych typowego składowiska wykorzystano dane pochodzące z modelowego składowiska w Gaci. Uwzględniono dane dotyczące liczby pojazdów dostarczających odpady na składowisko, miejsc, z których dowożone są odpady (dystansu, który muszą przebyć), wagi pojazdów z ładunkiem oraz bez ładunku (droga powrotna). W celu oszacowania emisji zanieczyszczeń powietrza związanych z transportem przedstawiono trzy niezależne podejścia, różniące się między sobą danymi dotyczącymi jednostkowych emisji zanieczyszczeń powietrza uzyskanych z różnych źródeł.

W podejściu pierwszym wykorzystano wyniki z projektu badawczego ExternE-Pol.³ Na podstawie danych o przeciętnej emisji zanieczyszczeń na tonokilometr w drogowym przewozie towarowym (tabela 3) i danych dotyczących transportów w modelowym składowisku obliczono roczne emisje zanieczyszczeń transportu w wariancie przyjmowania 30 lub 60 Gg odpadów na składowisko w ciągu roku (tabela 4).

Tabela 3
Emisyjność transportu drogowego

Rodzaj transportu	Emisja zanieczyszczeń w g / Mgkm					
	CO	NO _x	NMVO	SO ₂	PM10	CO ₂
Drogowy przewóz towarowy	1,511	0,974	0,364	0,029	0,066	99,636

Źródło: ExternE-Pol., *Externalities of Energy: Extension of accounting framework and Policy Applications, Final Report, Work Package 7: Implementation of the ExternE Methodology in Eastern Europe, 2004.*

Tabela 4
Roczne emisje zanieczyszczeń z transportu (podejście 1)

Ilość odpadów	Roczne emisje [Mg]					
	CO	NO _x	NMVO	SO ₂	PM10	CO ₂
30 Gg / rok	5,21	3,36	1,25	0,10	0,23	343,09
60 Gg / rok	10,42	6,71	2,51	0,20	0,45	686,17

Źródło: opracowanie własne.

³ ExternE-Pol., *Externalities of Energy: Extension of accounting framework and Policy Applications, Final Report, Work Package 7: Implementation of the ExternE Methodology in Eastern Europe, 2004.*

W zbliżonym podejściu drugim do obliczenia emisyjności transportu wykorzystano program MEFA v.02, przyjmując następujące założenia dotyczące pojazdów: HDV (ciężkie pojazdy dostawcze), silnik Diesla, emisja zanieczyszczeń zgodna z normą EURO2, średnia prędkość 40km/godz. Wielkość emisji NMVOC i CO₂ przyjęta została ponownie na podstawie danych ExternE-Pol (tabela 5). Następnie na podstawie danych o transportach obliczono roczne emisje spowodowane transportem w dwóch wariantach działalności składowiska (tabela 6).

Tabela 5

Emisyjność transportu drogowego (MEFA v.02)

Rodzaj transportu	Emisja zanieczyszczeń w g/km					
	CO	NO _x	NMVOC	SO ₂	PM10	CO ₂
Drogowy przewóz towarowy	4,6206	16,0953	5,5579	0,0284	0,4965	1519,8236

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6

Roczne emisje zanieczyszczeń z transportu (podejście 2)

Ilość odpadów	Roczna emisja [Mg]					
	CO	NO _x	NMVOC	SO ₂	PM10	CO ₂
30000 Mg / rok	1,0431	3,6334	1,25	0,0064	0,1121	343,09
60000 Mg / rok	2,0861	7,2667	2,51	0,0128	0,2242	686,17

Źródło: opracowanie własne.

Trzecie podejście opierało się na ogólnych danych dotyczących kosztów zewnętrznych na terenach wiejskich generowanych przez lekkie pojazdy dostawcze (LDV – podejście 3.1) lub ciężkie pojazdy dostawcze (HDV – podejście 3.2). Wykorzystane dane, pochodzące z opracowania ExternE-Pol,⁴ posłużyły do bezpośredniego oszacowania kosztów zewnętrznych, bez pośredniego stadium szacowania emisji. Poziomy kosztów zewnętrznych, w cEuro / km zawiera tabela 7. Jako wiarygodny dla typowego składowiska przyjęto poziom kosztów oszacowany dla LDV – poziom wysoki oraz HDV – poziom niski (obydwa podejścia dla warunków wiejskich). W rezultacie zastosowania tego podejścia roczne koszty zewnętrzne transportu oszacowano na poziomie 12 300 euro w podejściu 3.1 i 23 700 euro w podejściu 3.2 dla 30 Gg przyjmowanych odpadów rocznie i odpowiednio: 24 600 i 47 400 euro dla 60 Gg.

⁴ Ibidem.

Tabela 7

Koszty zewnętrzne związane z transportem drogowym w Europie Centralnej i Wschodniej [cEuro / km]^{a)}

Pojazd	Poziom niski	Poziom średni	Poziom wysoki	Gazy cieplarniane GHG	Koszt łącznie
Lekkie pojazdy dostawcze LDV					
Miasto – Diesel EURO 2	14,93	30,67	61,35	0,55	31,23
Wieś – Diesel EURO 2	1,23	2,52	5,04	0,35	2,87
Ciężkie pojazdy dostawcze HDV					
Miasto – Diesel EURO 2	100,31	206,05	412,11	1,26	207,31
Wieś – Diesel EURO 2	8,77	12,01	23,82	1,76	13,78

a) tylko szkody zdrowotne.

Źródło: opracowanie własne.

1.3. Emisje ze składowiska

Masowe składowanie odpadów wiąże się z procesami chemicznymi. Ich wynikiem jest emisja związków chemicznych, z których część może być szkodliwa dla człowieka i środowiska. W celu oszacowania tych emisji zastosowano dwie metody rekomendowane przez IPCC i US EPA – dla emisji metanu zastosowano arkusz kalkulacyjny *IPCC Spreadsheet for Estimating Methane Emissions from Solid Waste Disposal Sites*, natomiast całkowita ilość gazu wysypiskowego oraz emisje pozostałych zanieczyszczeń zostały oszacowane przy użyciu modelu *LandGEM – Landfill Gas Emissions Model*, w wersji 3.02.

W omawianych modelach danymi wejściowymi są dane dotyczące ilości i składu odpadów deponowanych na składowisku w każdym roku, a następnie, po ustaleniu szeregu parametrów typowych dla klimatu, typu wysypiska i sposobu zarządzania, otrzymuje się profil czasowy emisji poszczególnych gazów. Z uwagi na wrażliwość przyjętych parametrów wysypiska ich wyszczególnienie można znaleźć w tabeli 2a (aneks). Parametry te zostały przyjęte odpowiednio do polskich warunków klimatycznych i najlepszej dostępnej, obecnie stosowanej technologii.

Emisje biogenicznego CO₂ ze składowiska nie zostały uwzględnione przy oszacowaniu kosztów zewnętrznych gazów cieplarnianych. Gazem o kilkunastokrotnie większym potencjale cieplarnianym jest metan, który powszechnie powstaje na wysypiskach w warunkach beztlenowych.

W ramach analizy oszacowano emisje poszczególnych związków chemicznych w kolejnych latach funkcjonowania składowiska oraz po jego przykryciu. Syntetyczne wielkości emisji obliczone dla całego składowiska, podzielone na najważniejsze z punktu widzenia kosztów zewnętrznych pozycje, to jest metan, inne lotne związki organiczne (NMVOC) oraz rtęć, zawiera tabela 8. Profil emisji zanieczyszczeń w czasie przedstawiono w tabeli 3a (aneks). Roczne emisje ga-

zów wysypiskowych rosną i osiągają maksimum w kilka lat po zaprzestaniu przez składowisko przyjmowania odpadów, co wiąże się z naturą i tempem procesu rozkładu odpadów.

Tabela 8
Całkowite emisje z modelowego składowiska

Wyszczególnienie	Gaz wysypiskowy	Metan	NMVOOC	Rtęć
30 Gg / rok				
Całkowite emisje	6,35E+05	7,42E+04	4,38E+03	1,23E-03
Emisje na Mg odpadów	4,24E-01	4,95E-02	2,92E-03	8,21E-10
60 Gg / rok				
Całkowite emisje	6,37E+05	7,71E+04	4,39E+03	1,23E-03
Emisje na Mg odpadów	4,25E-01	5,14E-02	2,93E-03	8,23E-10

Źródło: opracowanie własne.

Powyższe emisje do atmosfery oszacowane zostały przy założeniu, że metan nie jest odzyskiwany, a współczynnik oksydacji wynosi 10%. W analizie uwzględniono także dwa alternatywne sposoby postępowania z gazami wysypiskowymi: flarowanie oraz spalanie z odzyskiem energii.

Metan generowany na wysypisku może być spalany w tak zwanych pochodniach – flarowany – albo wykorzystany do produkcji ciepła lub elektryczności. Te systemy mogą się charakteryzować różną efektywnością. Oonk i Boom⁵ oraz Scheehle i Kruger⁶ przeprowadzili eksperymenty z zainstalowaną mocą systemów odzysku gazu wysypiskowego i porównali ją z rzeczywistą ilością odzyskanej energii, uzyskując wyniki rzędu od 30 do 70% mocy zainstalowanej. Innym potrzebnym założeniem jest efektywność odzysku metanu w sytuacji, gdy na składowisku istnieje system odzysku. W kilku pracach poświęconych pomiarowi efektywności systemu odzysku zidentyfikowano wiele wątpliwości. Oonk i Boom⁷ raportują efektywności na poziomie od 10 do 85 procent (średnia 37%). W szerszym opracowaniu⁸ zmierzono efektywność odzysku w czterech lokalizacjach na poziomie 9, 50, 53 i 33%. Willumsen⁹ szacuje maksymalną efektyw-

⁵ H. Oonk, T. Boom, *Landfill gas emission measurement using mass-balance method*, TNO-MEP, Apeldoorn, the Netherlands 1993.

⁶ E. Scheehle, D. Kruger, *Global Anthropogenic Methane and Nitrous Oxide Emissions*, „Energy Journal”, Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy (Special Issue #3), 2006.

⁷ H. Oonk, T. Boom, *Landfill gas formation, recovery and emission*, TNO, Apeldoorn, the Netherlands 1995.

⁸ H. Scharff, et al., *A comparison of measurement methods to determine landfill methane emissions*, Afvalzorg Deponie B.V., Haarlem, the Netherlands 2003.

⁹ H. Willumsen, *Landfill gas plants: Number and types worldwide*. Waste Management and Landfill Symposium CISA, University of Cagliari, Sardinia, Italy 2003.

ność odzysku w państwach OECD na poziomie 80%, a w państwach nie będących członkami OECD – do 50%. Z reguły zamknięte składowiska z dobrze utrzymanym wyposażeniem i grubą, dobrze odporną na wilgoć pokrywą charakteryzują się wyższą efektywnością odzysku metanu. Niska efektywność charakteryzuje czynne składowiska z dużymi odkrytymi obszarami i pokryciem tymczasowym.

W zastosowanych obliczeniach przyjęto efektywność odzysku metanu na poziomie 50% w czasie funkcjonowania wysypiska i 80% po jego zamknięciu. Te liczby odzwierciedlają dobrą praktykę w zarządzaniu systemem oraz zastosowanie najnowocześniejszej technologii.

Wielkość odzyskanego metanu (flarowanego lub zużywanego do produkcji energii w zależności od scenariusza) w ciągu okresu życia składowiska oszacowano na poziomie równym $4,20E+04$ lub $4,85E+04$ Mg w zależności od tempa składowania odpadów. Wynosi to odpowiednio $2,80E-02$ lub $3,23E-02$ Mg na 1 Mg odpadów. W scenariuszu z odzyskiem energii założono, że uzyskany metan będzie wykorzystywany do produkcji energii, a efektywność tego procesu będzie wynosić 30%. W celu uzyskania wartości unikniętych kosztów zewnętrznych związanych z zanieczyszczeniem powietrza oparto się na szacunkach z: Kudełko¹⁰, Radovića¹¹, Strupczewskiego i Radovića¹² oraz wyników projektu ExternE-Pol¹³. Wykorzystując dane dla zestawu odpowiednich procesów produkcyjnych energii w Polsce, przyjęto, że koszt zewnętrzny tej produkcji wynosi 4,63 eurocentów / kWh elektryczności.¹⁴

1.4. Zanieczyszczenie gleby i wody

Emisja zanieczyszczeń ze składowiska odpadów do gleby oraz wód mogłaby mieć miejsce jedynie przy nieszczelności zabezpieczeń podłoża składowiska lub podczas odprowadzania odcieków. Tak mogłoby się zdarzyć tylko w przypadku awarii systemów aktualnie wymaganych przez prawo odnośnie do nowych, prawidłowo zabezpieczonych składowisk. Jeśli użytkowanie składowiska odbywa się zgodnie z obowiązującymi regulacjami, zarządzający składowiskiem zobligowani są do zagwarantowania, aby do gleb i wód nie przedostawały się żadne zanieczyszczenia – nie tylko w fazie jego użytkowania, lecz również podczas oraz

¹⁰ M. Kudełko, *Szacunek kosztów zewnętrznych krajowego sektora elektroenergetycznego*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2004.

¹¹ U. Radović, *Application of the Simplified Methodology in Poland, Estimating the External Costs Associated with Electricity Generating Options in Developing Countries Using Simplified Methodologies*, IAEA Research Contract No. 11212/R0, 2002.

¹² A. Strupczewski, M. Borysiewicz, S. Tarkowski, U. Radović, *Ocena wpływu wytwarzania energii elektrycznej na zdrowie człowieka i środowisko oraz analiza porównawcza dla różnych źródeł energii* [Dokument elektroniczny]. Tryb dostępu: http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/strona_konferencja_EAE-2001/14.pdf [Data wejścia: 11-11-2007].

¹³ Externe-Pol., *Externalities of Energy...*, op.cit.

¹⁴ Bez uwzględnienia emisji gazów cieplarnianych.

po jego rekultywacji. Nawet jeśli wystąpiłyby wycieki zanieczyszczeń do gleby i wód, ich wpływ byłby ograniczony do najbliższego otoczenia składowiska.

Niewiele jest pozycji literatury poświęconej szacowaniu potencjalnych szkód spowodowanych substancjami, które występują w odciekach ze składowisk, mogących przedostać się do wody pitnej. Rabl i Spadaro¹⁵ przedstawiają podsumowanie badań w tej dziedzinie. Porównanie koncentracji najbardziej szkodliwych substancji znajdujących się w odciekach (As, Pb, benzen) dopuszczalnych w amerykańskich (EPA) i europejskich (UE) standardach dotyczących wody pitnej pokazuje, iż nawet przy najbardziej pesymistycznych założeniach – że odcieki trafiałyby bezpośrednio do zasobów wody pitnej – koncentracja tych zanieczyszczeń nie przekroczyłaby limitów zarówno amerykańskich, jak i europejskich dla wody pitnej. Wpływ odcieków ze składowisk na zdrowie ludzkie jest praktycznie niezauważalny i może być wykluczony z analizy dotyczącej kosztów zewnętrznych składowisk odpadów.

Z powodów opisanych powyżej w analizie nie uwzględniono wpływu niekontrolowanego przedostawania się zanieczyszczeń do gleby i wód podziemnych. Uwzględniono natomiast ogólne dane dotyczące ilości generowanych zanieczyszczeń w formie odcieków kierowanych do zakładów ich utylizacji, a także zanieczyszczeń przedostających się do gleby na poszczególnych etapach cyklu życia składowiska. Podsumowanie tych wyników znajduje się w tabeli 1a (aneks).

2.

Oszacowanie wysokości szkód

Wysokość szkód spowodowanych opisanymi powyżej czynnikami oszacowano na podstawie kosztów jednostkowych emisji, pochodzących z kilku różnych źródeł. W ramach możliwości starano się zastosować kilka najpowszechniej funkcjonujących w literaturze wartości, aby odzwierciedlić niepewność związaną z ich określeniem i wrażliwość wyników na przyjęte założenia.

Koszty jednostkowe emisji zanieczyszczeń do powietrza (takich jak pyły, dwutlenek siarki, tlenki azotu, lotne związki organiczne, tlenek węgla) określono, stosując metodologię szacowania kosztów zewnętrznych ExternE. Metodą podejścia dawka-skutek (*dose-response* lub *impact-pathway*) określono średnie szkody powodowane na terenie Europy emisją każdego z zanieczyszczeń dla zdrowia człowieka, niszczenia materiałów, plonów i różnorodności biologicznej. W analizie uwzględniono zarówno zanieczyszczenia pierwotne, jak i wtórne.

¹⁵ A. Rabl, J.V. Spadaro, *Environmental Impacts and Costs of Municipal Solid Waste: A Comparison of Landfill and Incineration* [Dokument elektroniczny]. Tryb dostępu: <http://www.arirabl.org/publications/myPapers/Landfill-Incin%20Rabl,Spadaro+Zoughaib07%27.pdf> [Data wejścia: 11-11-2007].

Koszty zewnętrzne emisji poszczególnych zanieczyszczeń zostały oszacowane z zastosowaniem metodologii ExternE.¹⁶ W celu oszacowania wielkości szkód emisji pozostałych zanieczyszczeń zastosowano metody opisane poniżej.

W celu określenia kosztu zewnętrznego emisji CO₂ (niebiogenicznego) oraz CH₄ zastosowano kilka metod odzwierciedlających stan najnowszych badań w tej dziedzinie. Na skutek tego analizę przeprowadzono wariantowo, przyjmując kilka możliwych wartości. W pierwszym wariantcie wartość kosztu emisji CO₂ określono na podstawie krańcowego kosztu redukcji emisji (*abatement cost*), na wcześniej stosowanym w raportach ExternE poziomie 19 euro za Mg CO₂. Wartość ta była stała w czasie trwania analizy. Założono 21-krotny potencjał cieplarniany metanu w stosunku do CO₂. W drugim podejściu wykorzystano dynamiczne oszacowanie społecznego kosztu emisji gazów cieplarnianych na podstawie najnowszych oszacowań w oparciu o model FUND.¹⁷ Wartości kosztów społecznych oszacowano przy wykorzystaniu pięciu zestawów założeń dla profilów czasowych kosztów:

- 1% PRTP¹⁸, SS¹⁹, mediana, wartość z modelu dla NEEDS²⁰,
- 1% PRTP, SS, mediana, wartość z modelu dla MethodEx²¹,
- 1% PRTP, SS, średnia (przycięte 1%²²), wartość z modelu dla MethodEx,
- 1% PRTP, EW²³, średnia (przycięte 5%), wartość z modelu dla MethodEx,
- 1% PRTP, EW, średnia (przycięte 1%), wartość z modelu dla MethodEx.

Tam, gdzie było to możliwe, zastosowano wartość kosztu gazów cieplarnianych uzależnioną od roku ich emisji. Dla celów informacyjnych kosztów skutków dzisiejszych emisji, mających miejsce na przestrzeni najbliższych 250 lat, dyskontowanych do roku 2000, wyrażonych w cenach podanych w euro 2000, przedstawia tabela 9.

¹⁶ NewExt., *New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies*, Final Report to the European Commission, DG Research, Technological Development and Demonstration (RTD), 2004.

¹⁷ R. S. J. Tol, *Multi-Gas Emission Reduction for Climate Change Policy: An Application of FUND*, „Energy Journal”, Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Change Policy (Special Issue #3), 2006; R. S. J. Tol, P. Watkiss, *Social Cost of Climate Change*, Methods and data on environmental and health externalities: harmonising and sharing of operational estimates report, 2007.

¹⁸ Czysta stopa preferencji czasowej, ang. *pure rate of time preference*, PRTP.

¹⁹ Prosta suma, ang. *simple sum*, SS.

²⁰ *New Energy Externalities Development for Sustainability*, projekt badawczy 6 Programu Ramowego UE (2004-2008).

²¹ *Methods and data on environmental and health externalities: harmonising and sharing of operational estimates*, projekt badawczy 6 Programu Ramowego UE (2004-2007).

²² Średnią obliczono, odrzucając skrajne 1% rozkładu kosztów pochodzących z modelu.

²³ Średnia ważona odwrotnie proporcjonalnie do poziomu dobrobytu, ang. *equity weighting*, EW.

Tabela 9

Koszty emisji gazów cieplarnianych GHG w zależności od zastosowanej metodologii

Wyszczególnienie	CO ₂	CH ₄
ExternE	19	399
1% PRTP, SS, mediana, wartość z modelu dla NEEDS	4,3	119,1
1% PRTP, SS, mediana, wartość z modelu dla MethodEx	2	122,4
1% PRTP, SS, średnia (przycięte 1%), wartość z modelu dla MethodEx	10,1	196,7
1% PRTP, EW, średnia (przycięte 5%), wartość z modelu dla MethodEx	25,7	399,5
1% PRTP, EW, średnia (przycięte 1%), wartość z modelu dla MethodEx	49,6	638,2

Źródło: opracowanie własne.

Dla wartości pozostałych emisji zanieczyszczeń wykorzystano wysokość szkód jednostkowych rekomendowanych przez ExternE oraz CAFE.²⁴ Podsumowanie wykorzystanych wartości zawiera tabela 10.

Tabela 10

Koszt zanieczyszczeń [euro/Mg]

Zanieczyszczenia	Koszt wg ExternE	Koszt wg CAFE
Cd	4,20E+04	4,20E+04
Cr	3,40E+04	3,40E+04
Cr (VI)	2,60E+05	2,60E+05
Formaldehyd	1,30E+02	1,30E+02
Ni	4,10E+03	4,10E+03
Arszenik	8,00E+04	8,00E+04
Dioksyny	3,70E+10	3,70E+10
Ołów	6,00E+05	6,00E+05
Rtęć	6,00E+06	6,00E+06
NH ₃	4,10E+03	1,00E+04
NO _x	1,20E+03	3,90E+03
PM2.5	2,60E+04	2,90E+04
SO ₂	3,10E+03	5,60E+03
NMVOC	3,70E+02	6,30E+02

Źródło: opracowanie własne.

²⁴ CAFE, *Clean Air For Europe* [Dokument elektroniczny]. Tryb dostępu: <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l28026.htm> [Data wejścia: 02-04-2008].

Wykorzystane zestawy wartości szkód spowodowanych emisjami gazów cieplarnianych (5 metod) oraz pozostałych zanieczyszczeń (2 metody) dają w sumie 12 zestawów kosztów, które zostały wykorzystane w analizie. W dalszej części kombinacje te zostały oznaczone w sposób, którego podsumowanie zawiera tabela 11.

Tabela 11
Wykorzystane zestawy wartości i kodowanie

Wykorzystane wartości	Kod
CO ₂ -Podejście 1 + ExternE	Zestaw wartości 1 (VS1)
CO ₂ -Podejście 1 + CAFE (niski poziom)	Zestaw wartości 2 (VS2)
CO ₂ -Podejście 2.1 + ExternE	Zestaw wartości 3 (VS3)
CO ₂ -Podejście 2.1 + CAFE (niski poziom)	Zestaw wartości 4 (VS4)
CO ₂ -Podejście 2.2 + ExternE	Zestaw wartości 5 (VS5)
CO ₂ -Podejście 2.2 + CAFE (niski poziom)	Zestaw wartości 6 (VS6)
CO ₂ -Podejście 2.3 + ExternE	Zestaw wartości 7 (VS7)
CO ₂ -Podejście 2.3 + CAFE (niski poziom)	Zestaw wartości 8 (VS8)
CO ₂ -Podejście 2.4 + ExternE	Zestaw wartości 9 (VS9)
CO ₂ -Podejście 2.4 + CAFE (niski poziom)	Zestaw wartości 10 (VS10)
CO ₂ -Podejście 2.5 + ExternE	Zestaw wartości 11 (VS11)
CO ₂ -Podejście 2.5 + CAFE (niski poziom)	Zestaw wartości 12 (VS12)

Źródło: opracowanie własne.

W oparciu o zestawy wartości emisji, przedstawione w tabeli 11, obliczono koszt zewnętrzny emisji zanieczyszczeń spowodowanych składowaniem odpadów (z odzyskiwaniem metanu i bez), transportem (w 3 podejściach), kosztem emisji w procesie budowy i likwidacji zakładu (w tym emisji zanieczyszczeń do wody i gleby).

Na osobne omówienie zasługują uniknięte koszty zewnętrzne wynikające z flarowania lub spalania z odzyskiem energii zebranego gazu wysypiskowego. Wartość kaloryczną metanu przyjęto na poziomie 50,049 MJ/kg. Ilość zgromadzonego metanu w ciągu całego życia składowiska wynosi odpowiednio 4,20E+04 oraz 4,85E+04 przy tempie składowania 30 Gg lub 60 Gg odpadów rocznie (szybsze zapełnianie składowiska pozwala na wyższą stopę odzysku metanu, ponieważ wysypisko zostaje wcześniej przykryte, co zwiększa skuteczność zbierania gazów). Zebrany metan umożliwia uzyskanie odpowiednio 6,30E+08 lub 7,28E+08 MJ elektryczności, co odpowiada 1,75E+08 i 2,02E+08 kWh w zależności od ilości odpadów składowanych rocznie. Wielkości te, w przeliczeniu na uniknięte koszty zewnętrzne zanieczyszczeń powietrza, odpowiadają 8,10E+06 i 9,37E+06 euro. W przeliczeniu na Mg odpadów, daje to odpowiednio 5,40 i 6,24 euro /Mg odpadów.

W celu obliczenia unikniętych emisji gazów cieplarnianych przyjęto, że ilość elektryczności produkowanej każdego roku z gazów pochodzących z wysypiska zastąpi elektryczność uzyskiwaną z typowych surowców energetycznych stosowanych w Polsce, to jest węgla kamiennego i brunatnego. Ilość węgla emitowanego do atmosfery na 1 TJ produkowanego ciepła oszacowano na poziomie 26,86936 Mg jako średnią ważoną dla węgla kamiennego i brunatnego, na podstawie IPCC.²⁵ Ilość emitowanego do atmosfery węgla została następnie przekonwertowana na CO₂ (C/CO₂ = 12/44), a jednostka ciepła (TJ) na jednostkę elektryczności (kWh), przy założeniu sprawności na poziomie 30%. Otrzymano rezultaty rzędu 1,06E-03 MgCO₂/kWh elektryczności. Ilość elektryczności produkowanej każdego roku przy użyciu metanu z wysypiska została pomnożona przez wielkość unikniętych emisji CO₂, a uniknięty koszt obliczony poprzez pomnożenie unikniętych emisji CO₂ z paliw kopalnych przez odpowiednie wartości kosztu emisji CO₂.

Wartość kosztów zewnętrznych, związanych z uciążliwościami estetycznymi spowodowanymi istnieniem składowiska, uzyskano w oparciu o metodę transferu wartości (*benefit transfer*)²⁶ na podstawie modelu przygotowanego do tego celu przez Boyda i Waltona.²⁷ Zastosowano trzy metody transferu wartości uciążliwości estetycznych dla okolicznych mieszkańców z innych istniejących badań.

W podejściu pierwszym obliczenia oparto na danych jednostkowych oszacowanych dla Wielkiej Brytanii w ramach obszernego badania metodą cen hedonicznych, przeprowadzonego przez DERA.²⁸ Dla wysypiska w Gaci otrzymane wartości uciążliwości jednej tony składowanych na wysypisku odpadów wyniosły 3,194-4,572 euro.

Drugie zastosowane podejście, wykorzystujące obserwacje zmian cen nieruchomości w zależności od odległości gospodarstwa domowego od wysypiska, wykazało, że efekt spadku cen zanika dla odległości dalszych niż 3,2km od składowiska. W analizowanym przykładzie w tym promieniu nie znajdowały się żadne zabudowania mieszkalne.

Rezultatem trzeciego podejścia, opartego na transferze meta – funkcji wyceny, był średni wzrost cen nieruchomości średnio o 0,075% wraz ze wzrostem odległości nieruchomości od wysypiska o 1,6 km, aż do osiągnięcia odległości 4,38 km. W okolicy analizowanego składowiska nie znajdowały się nieruchomości mieszkalne, metoda ta daje więc również oszacowania uciążliwości estetycznych na poziomie 0.

²⁵ IPCC, *Revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 1996.

²⁶ M. Czajkowski, *Jak podejmować racjonalne decyzje dotyczące środowiska? Przykłady aplikacji badań wyceny dóbr środowiskowych w Polsce*, w: *Uwarunkowania rozwoju społeczno-gospodarczego Polski*, red. A. P. Balcerzak, D. Górecka., Wyd. Adam Marszałek, Toruń 2007.

²⁷ R. Boyd, H. Walton, *Valuing the disamenity costs of waste disposal facilities*, Report for METHODEX, Methods and data on environmental and health externalities: harmonising and sharing of operational estimates, 2007.

²⁸ DEFRA; *A Study to Estimate the Disamenity Costs of Landfill in Great Britain*, Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2003.

3.

Zestawienie wyników

W rezultacie przeprowadzonych obliczeń oszacowano wielowymiarową macierz kosztu zewnętrznego składowania odpadów w zależności od tempa składowania odpadów, zastosowanej metody obliczania emisji transportu, szacowania niedogodności estetycznych, systemu zagospodarowania metanu z wysypiska i zestawu przyjętych kosztów jednostkowych emisji. Podsumowanie tych wyników zawiera tabela 12 i 13.

Zestawienie wyników dla wszystkich kategorii kosztów jest trudne, ponieważ zastosowano kilka podejść do szacowania tych samych kategorii. Z drugiej strony, przyjęcie różnych metod badawczych pozwala na analizę wrażliwości otrzymanych rezultatów.

Tabela 12
Koszty zewnętrzne wybranych elementów cyklu życia składowiska
dla składowiska przyjmującego 30 Gg odpadów rocznie [euro / Mg odpadów]

Wyszczególnienie		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8	VS9	VS10	VS11	VS12
Emisje	Bez odzysku metanu	20,83	21,59	6,03	6,79	8,56	9,32	14,87	15,63	33,28	34,04	79,18	79,94
	Z odzyskiem metanu	9,02	9,32	2,64	2,94	3,68	3,98	6,32	6,62	13,81	14,11	32,25	32,55
Energia	Bez odzysku energii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Z odzyskiem energii	-7,76	-7,76	-5,80	-5,80	-5,81	-5,81	-7,05	-7,05	-11,08	-11,08	-24,55	-24,55
Transport	Podejście 1	0,50	0,84	0,33	0,67	0,31	0,64	0,40	0,73	0,58	0,91	0,85	1,19
	Podejście 2	0,44	0,78	0,27	0,62	0,25	0,59	0,34	0,68	0,52	0,86	0,79	1,13
	Podejście 3.1	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
	Podejście 3.2	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Budowa, likwidacja, odcieki, maszyny		0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,1	0,79	1,17	0,93	1,3	1,12	1,5
Koszty uciążliwości	Podejście 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Podejście 1	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 13

Koszty zewnętrzne wybranych elementów cyklu życia składowiska dla składowiska przyjmującego 60 Gg odpadów rocznie [euro / Mg odpadów]

Wyszczególnienie		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8	VS9	VS10	VS11	VS12
Emisje	Bez odzysku metanu	21,6	22,36	6,51	7,27	8,82	9,58	14,88	15,64	31,43	32,19	71,47	72,24
	Z odzyskiem metanu	7,98	8,24	2,44	2,7	3,23	3,49	5,37	5,62	10,92	11,17	24,04	24,29
Energia	Bez odzysku energii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Z odzyskiem energii	-8,97	-8,97	-6,74	-6,74	-6,70	-6,70	-8,08	-8,08	-12,12	-12,12	-24,68	-24,68
Transport	Podójście 1	0,50	0,84	0,33	0,67	0,31	0,64	0,40	0,73	0,58	0,91	0,85	1,19
	Podójście 2	0,44	0,78	0,27	0,62	0,25	0,59	0,34	0,68	0,52	0,86	0,79	1,13
	Podójście 3.1	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
	Podójście 3.2	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Budowa, likwidacja, odcieki, maszyny		0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,1	0,79	1,17	0,93	1,3	1,12	1,5
Koszty uciążliwości	Podójście 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Podójście 1	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88

Źródło: opracowanie własne.

Najistotniejszym czynnikiem, powodującym największe szkody dla środowiska, jest emisja gazów cieplarnianych z wysypiska. Pozycja ta ma najwyższą wartość nawet w przypadku wykorzystania najbardziej konserwatywnych, to jest najniższych kosztów na jednostkę wyemitowanych gazów cieplarnianych (VS3, VS4). Z tego powodu prowadzenie nawet najprostszej metody zagospodarowania powstającego gazu wysypiskowego (zbieranie i flarowanie) pozwala zmniejszyć emisje metanu i NMVOC w stopniu znacznie zmniejszającym obciążenia składowania dla środowiska. Na uwagę zasługuje także potencjał odzysku energii z zebranego gazu wysypiskowego. W zależności od przyjętego zestawu kosztów jednostkowych, wykorzystanie jego spalania do produkcji energii elektrycznej lub ciepła pozwala z powodzeniem zrekompensować, a w niektórych przypadkach przekroczyć nawet dwukrotnie koszty zewnętrzne emisji z wysypiska (VS3-VS6).

Pozostałe elementy działalności składowiska mają mniejsze znaczenie. Koszty zewnętrzne transportu kształtują się na zbliżonym poziomie, niezależnie od zastosowanego podejścia do ich obliczenia. Ich wartość, dla warunków transportowych modelowego składowiska, wyniosła 0,25-1,19 euro na Mg odpadów. Koszty zewnętrzne emisji powstających podczas budowy, likwidacji, utylizacji

odcieków i działania maszyn na składowisku kształtują się łącznie na poziomie 0,72-1,5 euro na Mg odpadów.

Jak pokazały zastosowane podejścia do oszacowania kosztów uciążliwości estetycznych składowiska, wartości te mogą znacznie różnić się w zależności od jego lokalizacji i otoczenia. Można stwierdzić, że o ile koszty te dla składowiska położonego w terenie wiejskim, niezabudowanym, są zanedbywalne, można spodziewać się ich znacznego wzrostu w przypadku lokalizacji wysypisk w okolicach dużych miast, gdzie skądinąd powstaje najwięcej odpadów.

Celem umożliwienia oceny i porównania łącznych wartości kosztów zewnętrznych zaproponowano trzy scenariusze, stanowiące kombinacje przyjętej metody oszacowania poszczególnych składowych kosztów i wariantu prowadzonej gospodarki gazami wysypiskowymi.

Scenariusz 1 – “kosztowny”: założono brak odzysku metanu, koszty transportu oszacowano za pomocą podejścia 1, a dla uciążliwości estetycznych przyjęto podejście 1, odpowiadające lokalizacji wysypiska w gęsto zabudowanym terenie. Wyniki podsumowano w tabeli 14.

Tabela 14

Koszty zewnętrzne w scenariuszu 1 [euro 2000 / Mg odpadów]

Scenariusz 1												
	VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8	VS9	VS10	VS11	VS12
30 Gg / rok												
Emisje	20,83	21,59	6,03	6,79	8,56	9,32	14,87	15,63	33,28	34,04	79,18	79,94
Transport	0,50	0,84	0,33	0,67	0,31	0,64	0,40	0,73	0,58	0,91	0,85	1,19
LCA	0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,10	0,79	1,17	0,93	1,30	1,12	1,50
Uciążliwości	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88
Łącznie	26,08	27,56	10,98	12,46	13,47	14,94	19,94	21,41	38,67	40,13	85,03	86,51
60 Gg / rok												
Emisje	21,60	22,36	6,51	7,27	8,82	9,58	14,88	15,64	31,43	32,19	71,47	72,24
Transport	0,50	0,84	0,33	0,67	0,31	0,64	0,40	0,73	0,58	0,91	0,85	1,19
LCA	0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,10	0,79	1,17	0,93	1,30	1,12	1,50
Uciążliwości	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88
Łącznie	26,85	28,33	11,46	12,94	13,73	15,20	19,95	21,42	36,82	38,28	77,32	78,81

Źródło: opracowanie własne.

Scenariusz 2 – “średnio kosztowny”: założono istnienie systemu zbierania i flarowania gazów wysypiskowych, koszty transportu oszacowano za pomocą podejścia 1, pominięto wartość uciążliwości estetycznych, co odpowiada peryferyjnej lokalizacji wysypiska. Wyniki podsumowano w tabeli 15.

Tabela 15

Koszty zewnętrzne w scenariuszu 2 [euro 2000 / Mg odpadów]

Scenariusz 2												
	VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8	VS9	VS10	VS11	VS12
30 Gg / rok												
Emisje	9,02	9,32	2,64	2,94	3,68	3,98	6,32	6,62	13,81	14,11	32,25	32,55
Transport	0,50	0,84	0,33	0,67	0,31	0,64	0,40	0,73	0,58	0,91	0,85	1,19
LCA	0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,10	0,79	1,17	0,93	1,30	1,12	1,50
Uciążliwości	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Łącznie	10,39	11,41	3,71	4,73	4,71	5,72	7,51	8,52	15,32	16,32	34,22	35,24
60 Gg / rok												
Emisje	7,98	8,24	2,44	2,70	3,23	3,49	5,37	5,62	10,92	11,17	24,04	24,29
Transport	0,50	0,84	0,33	0,67	0,31	0,64	0,40	0,73	0,58	0,91	0,85	1,19
LCA	0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,10	0,79	1,17	0,93	1,30	1,12	1,50
Uciążliwości	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Łącznie	9,35	10,33	3,51	4,49	4,26	5,23	6,56	7,52	12,43	13,38	26,01	26,98

Źródło: opracowanie własne.

Scenariusz 3 – “tani”: założono istnienie systemu zbierania gazów wysypiskowych i ich spalania z odzyskiem energii, koszty transportu oszacowano za pomocą podejścia 2, pominięto wartość uciążliwości estetycznych, co odpowiada peryferyjnej lokalizacji wysypiska. Wyniki podsumowano w tabeli 16.

Tabela 16

Koszty zewnętrzne w scenariuszu 3 [euro 2000 / Mg odpadów]

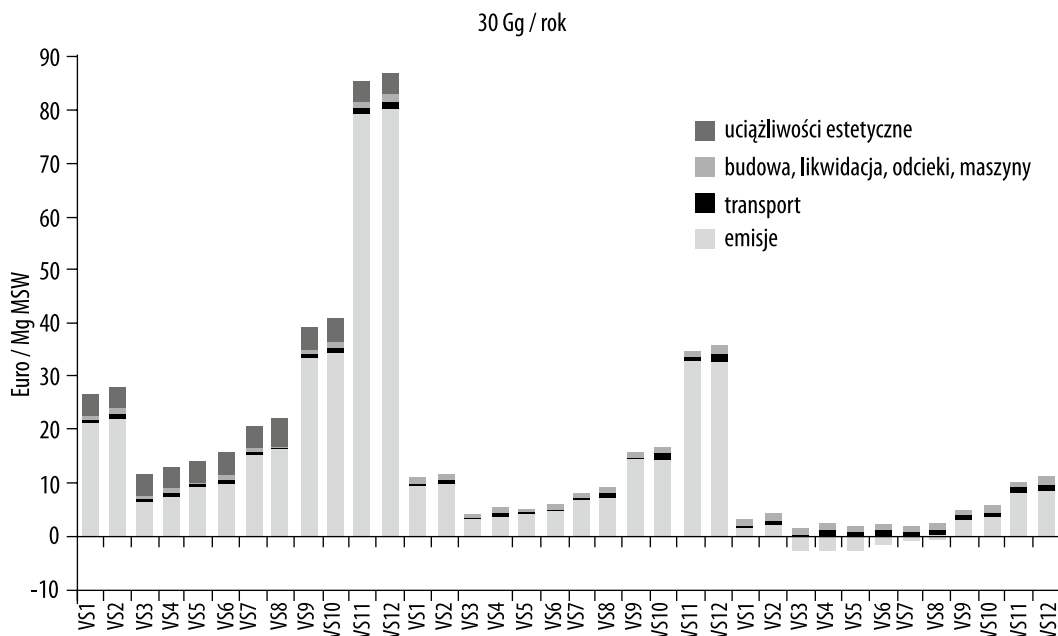
Scenariusz 3												
	VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8	VS9	VS10	VS11	VS12
30 Gg / rok												
Emisje (net)	1,26	1,56	-3,16	-2,86	-2,13	-1,83	-0,73	-0,43	2,73	3,03	7,70	8,00
Transport	0,44	0,78	0,27	0,62	0,25	0,59	0,34	0,68	0,52	0,86	0,79	1,13
LCA	0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,10	0,79	1,17	0,93	1,30	1,12	1,50
Uciążliwości	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Łącznie	2,57	3,59	-2,15	-1,12	-1,16	-0,14	0,40	1,42	4,17	5,19	9,61	10,64
60 Gg / rok												
Emisje	-0,99	-0,73	-4,30	-4,04	-3,47	-3,21	-2,71	-2,46	-1,20	-0,95	-0,64	-0,39
Transport	0,44	0,78	0,27	0,62	0,25	0,59	0,34	0,68	0,52	0,86	0,79	1,13
LCA	0,87	1,25	0,74	1,12	0,72	1,10	0,79	1,17	0,93	1,30	1,12	1,50
Uciążliwości	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Łącznie	0,32	1,30	-3,29	-2,30	-2,50	-1,52	-1,58	-0,60	0,24	1,21	1,27	2,25

Źródło: opracowanie własne.

Graficzne zestawienie kosztów zewnętrznych przypadających na Mg stałych odpadów komunalnych i opracowanych dla 12 zestawów kosztów w trzech opracowanych scenariuszach przedstawiają rysunki 2 i 3. Najistotniejszym składnikiem kosztów zewnętrznych jest koszt oszacowany dla metanu i innych lotnych związków organicznych (NMVOC). Zbieranie i flarowanie gazów wysypiskowych (scenariusz 2) pozwala znacząco ograniczyć wpływ tego komponentu, natomiast wykorzystanie zebranego metanu dla odzysku energii (scenariusz 3) pozwala zrekompensować koszty zewnętrzne produkcji energii w sposób konwencjonalny i dzięki temu koszty zewnętrzne netto emisji stają się w rzeczywistości ujemne (koszty zewnętrzne są w tym przypadku korzyściami zewnętrznymi). Siła oddziaływania tego czynnika jest wystarczająco wysoka, aby skompensować inne koszty zewnętrzne składowania odpadów.

Rysunek 2

Zestawienie kosztów zewnętrznych dla opracowanych scenariuszy i zestawów kosztów (VS) [euro / Mg odpadów]

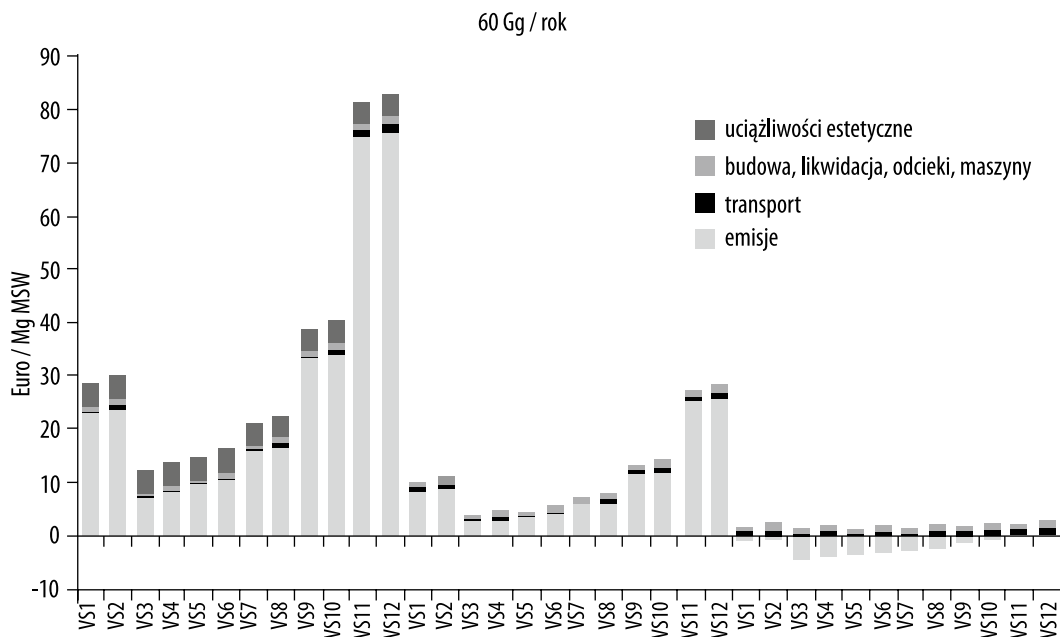


Źródło: opracowanie własne.

Innym interesującym spostrzeżeniem jest bardzo wysoka zmienność otrzymanych rezultatów w zależności od przyjętego zestawu kosztów jednostkowych emisji. Typowe wartości szkód emisji CO_2 i CH_4 stosowane w wielu wcześniejszych opracowaniach ExternE, oparte na krańcowym koszcie redukcji emisji (ang. *mar-*

Rysunek 3

Zestawienie kosztów zewnętrznych dla opracowanych scenariuszy i zestawów kosztów (VS) [euro / Mg odpadów]



Źródło: opracowanie własne.

ginal abatement cost, MAC; VS1 i VS2), okazują się być dwukrotnie wyższe niż rezultaty dla konserwatywnych oszacowań społecznego kosztu emisji gazów cieplarnianych (VS3 i VS4) oraz prawie czterokrotnie niższe niż rezultaty dla wysokich oszacowań VS11 i VS12. Otrzymane rezultaty ukazują wrażliwość otrzymanych wyników na przyjęte założenia dotyczące kosztów jednostkowych.

Niezależnie od zastosowanego zestawu wartości, odpowiednie zagospodarowanie gazów wysypiskowych pozwala znacznie zmniejszyć koszty zewnętrzne emisji z wysypisk (w przypadku odzysku energii nawet do zera). Otrzymane koszty zewnętrzne w połączeniu z danymi dotyczącymi kosztów prywatnych flarowania lub odzysku energii mogą stanowić przesłankę do wyboru optymalnego społecznie sposobu zagospodarowania gazów wysypiskowych, a co za tym idzie, ustalenia odpowiednich regulacji prawnych i zastosowania instrumentów ekonomicznych, takich jak opłaty za emisje substancji zanieczyszczających lub subwencje promujące odpowiednie technologie.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano oszacowania kosztów zewnętrznych składowania odpadów dokonane za pomocą kilku równoległych metod badawczych. Zwraca uwagę zróżnicowanie uzyskanych rezultatów w zależności od przyjętej metodologii. Celowe zastosowanie kilku wariantów gospodarowania składowiskiem, zestawów założeń i kosztów jednostkowych pozwoliło na przeprowadzenie analizy wrażliwości oszacowanych kosztów zewnętrznych.

Pomimo zmienności otrzymanych rezultatów, można zaobserwować kilka tendencji. Przede wszystkim największe koszty zewnętrzne są generowane przez emisję zanieczyszczeń powietrza, w szczególności metan i lotne związki organiczne. Wpływ tych emisji jest jednak znacząco niższy w scenariuszach, w których metan jest zbierany i flarowany. Przy wykorzystaniu zebranego metanu do produkcji elektryczności ten wpływ ulega dalszemu zmniejszeniu i poprzez wypieranie emisji powstających przy produkcji energii w tradycyjny sposób powoduje, że odpowiednie składowanie odpadów może generować korzyści zewnętrzne, a przynajmniej nie generować szkód. Wrażliwość wyników na sposób gospodarowania pozwala sformułować ostrożną konkluzję, że składowanie nie musi generować wysokich kosztów zewnętrznych, przy zastosowaniu odpowiedniej technologii i zabezpieczeń.

Rezultaty, otrzymane w różnych scenariuszach i dla różnych zestawów kosztów jednostkowych, mieszczą się w przedziale od – 3,29 do ponad 86 euro na Mg odpadów. Ze względu na tak szeroki przedział oszacowanych kosztów zewnętrznych wykorzystanie otrzymanych wyników do celów internalizacji kosztów zewnętrznych wymaga podjęcia normatywnych decyzji dotyczących założeń estymacji jednostkowych kosztów zewnętrznych (na przykład kosztów emisji gazów cieplarnianych). Wykorzystanie wyników przez polskiego regulatora powinno także brać pod uwagę charakter obliczonych szkód, których koszty zmierzone zostały w wymiarze globalnym (gazy cieplarniane, rtęć) lub europejskim (klasyczne zanieczyszczenia). Tylko nieliczne zanieczyszczenia powodują szkody typowo lokalne. Można się spodziewać, że szkody powodowane tylko na terytorium Polski będą miały kilkakrotnie niższą wartość, tym niemniej autorom nie są znane inne krajowe oszacowania kosztów zewnętrznych spowodowanych prowadzeniem legalnego składowania odpadów w Polsce, z którymi otrzymane wyniki można byłoby porównać.

Interesującym rozszerzeniem analizy byłoby dołączenie elementów recyklingu odpadów prowadzonego w sortowniach najnowocześniejszych składowisk. Analiza cyklu życia surowców, które mogą być odzyskane w wyniku recyklingu, pozwoliłaby na oszacowanie korzyści zewnętrznych takiej działalności, powstających w wyniku zaoszczędzonej energii czy surowców do ich ponownego wytworzenia. Podobne rozszerzenie mogłoby dotyczyć kompostowania frakcji odpadów ulegającej biodegradacji. Inne ciekawe rozszerzenie przeprowadzonej analizy mogłoby dotyczyć porównania kosztów zewnętrznych składowania oraz spalania odpadów z odzyskiem energii. Zdaniem autorów, rozwinięcia wymaga

także metoda wyceny uciążliwości estetycznych. Choć metoda transferu wartości jest stosunkowo prosta i niedroga, wiąże się z dużą niedokładnością,²⁹ zwłaszcza w przypadku transferu wartości z krajów Europy Zachodniej do Polski.

Przeprowadzenie powyższej analizy było możliwe dzięki wykorzystaniu rezultatów uzyskanych we wcześniejszych badaniach prowadzonych w ramach projektów Unii Europejskich, takich jak: ExternE, ExternE-Pol., NewExt, CAFÉ, NEEDS, a przede wszystkim współpracy autorów w projekcie MethodEx. Kierownikiem naukowym polskiego zespołu projektu MethodEx był prof. zw. dr hab. Tomasz Żylicz, któremu autorzy pragną podziękować za cenne wskazówki.

²⁹ M. Czajkowski i in., *Lake Water Quality Valuation – Benefit Transfer Approach vs. Empirical Evidence*, „Ekonomia” 2007 nr 19, s. 156-196.

Aneks

Tabela 1A
Skumulowane emisje wybranych etapów cyklu życia składowiska^{a)}
z podziałem na ośrodek emisji^{b)}

Ośrodek	Zanieczyszczenie	Jednostka	Budowa i składowanie	Użytkowanie Składowiska ^{d)}	Odcieki	łącznie
(p)	Amoniak (NH ₃)	Mg	1,15E-03	1,51E-02	4,33E-03	2,06E-02
(w)	Amoniak (NH ₄ ⁺ , NH ₃ , jako N)	Mg	4,93E-02	1,12E-01	7,84E+00	8,00E+00
(p)	Arszenik (As)	Mg	1,07E-04	2,47E-05	3,96E-04	5,27E-04
(g)	Arszenik(As)	Mg	6,19E-07	2,81E-07	3,60E-06	4,50E-06
(w)	Arszenik (As3+, As5+)	Mg	1,73E-04	5,51E-05	5,26E-03	5,48E-03
(p)	Kadm (Cd)	Mg	3,64E-05	4,97E-05	6,45E-05	1,50E-04
(g)	Kadm (Cd)	Mg	2,80E-10	1,27E-10	1,63E-09	2,04E-09
(w)	Kadm (Cd++)	Mg	3,71E-05	9,17E-05	1,09E-02	1,11E-02
(p)	Dwutlenek węgla (CO ₂ , z paliw kopalnych)	Mg	3,93E+03	4,26E+03	3,55E+03	1,17E+04
(p)	Tlenek węgla (CO)	Mg	9,55E+00	2,59E+01	3,03E+00	3,85E+01
(w)	Chrom (Cr III)	Mg	1,63E-05	7,39E-06	7,01E-02	7,01E-02
(p)	Chrom (Cr III, Cr VI)	Mg	1,40E-04	3,08E-05	4,80E-04	6,52E-04
(g)	Chrom (Cr III, Cr VI)	Mg	7,75E-06	3,52E-06	4,51E-05	5,63E-05
(w)	Chrom (Cr III, Cr VI)	Mg	1,03E-03	3,16E-04	2,60E-05	1,37E-03
(w)	Chrom (Cr VI)	Mg	3,06E-10	1,39E-10	1,78E-09	2,22E-09
(p)	Dioksyyny	Mg	1,05E-10	5,41E-12	3,83E-10	4,93E-10
(g)	Dioksyyny	Mg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
(w)	Dioksyyny	Mg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
(p)	Ołów (Pb)	Mg	6,69E-04	1,09E-04	1,75E-03	2,52E-03
(g)	Ołów (Pb)	Mg	6,50E-09	2,95E-09	3,78E-08	4,73E-08
(w)	Ołów (Pb++, Pb4+)	Mg	5,10E-04	6,41E-05	1,41E-01	1,42E-01
(p)	Rtęć (Hg)	Mg	1,80E-05	3,26E-06	6,39E-05	8,52E-05
(g)	Rtęć (Hg)	Mg	5,16E-11	2,34E-11	3,00E-10	3,75E-10
(w)	Rtęć (Hg+, Hg++)	Mg	8,04E-07	5,44E-07	9,64E-05	9,78E-05
(p)	Metan (CH ₄)	Mg	1,82E+01	4,42E+01	1,73E+01	7,97E+01
(w)	Metan (CH ₄)	Mg	4,52E-04	2,35E-05	1,84E-03	2,32E-03
(p)	Nikiel (Ni)	Mg	7,00E-04	9,93E-04	1,04E-03	2,73E-03
(g)	Nikiel (Ni)	Mg	2,14E-09	9,69E-10	1,24E-08	1,55E-08
(w)	Nikiel (Ni++, Ni3+)	Mg	5,15E-04	3,19E-04	1,30E-01	1,31E-01
(p)	Tlenki azotu (NO _x jako NO ₂)	Mg	3,03E+01	5,81E+01	6,84E+00	9,52E+01
(p)	Cząstki stałe (PM)	Mg	1,13E+01	5,58E+00	1,91E+01	3,59E+01
(p)	Tlenki siarki (SO _x jako SO ₂)	Mg	1,06E+01	3,15E+00	6,16E+01	7,53E+01
(p)	NMVOC	Mg	2,79E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,79E-01
(w)	NMVOC	Mg	1,64E-02	4,57E-02	9,39E-04	6,30E-02

^{a)} na podstawie danych ogólnych, dla składowiska o pojemności 1,5 Tg; ^{b)} emisje do powietrza (p), wody (w) i gleby (g); ^{d)} dotyczy tylko wykorzystania maszyn na potrzeby zarządzania składowiskiem

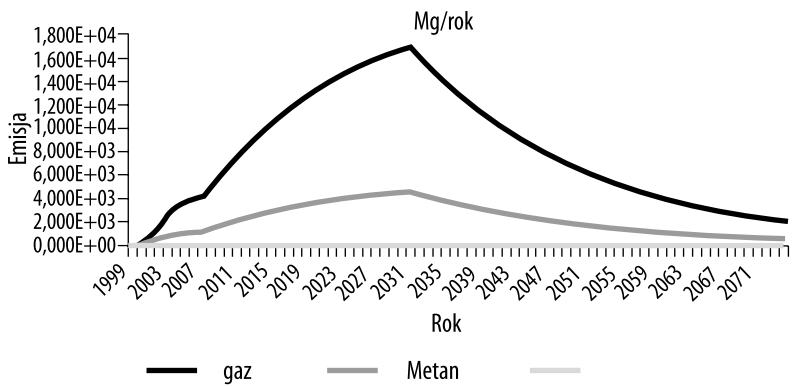
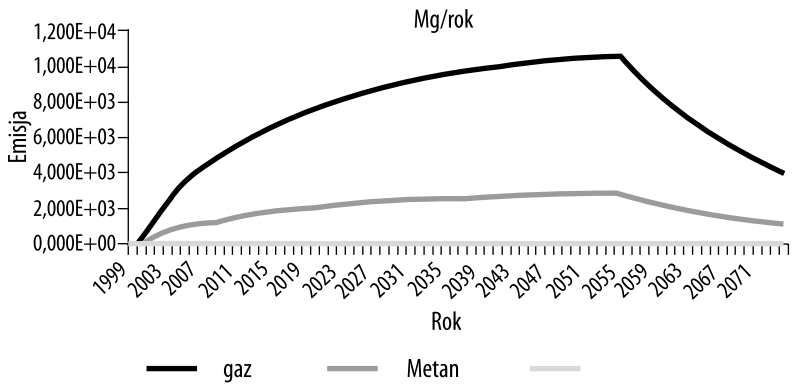
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2A
Parametry przyjęte do obliczenia emisji ze składowiska

Dane ogólne	
Pojemność składowiska	1 500 000 Mg
Data otwarcia	1999
Ilość przyjmowanych odpadów rocznie	30 000 Mg, do roku 2054 – wariant 1 60 000 Mg, do roku 2030 – wariant 2
Skład odpadów (niezmienny w całym okresie)	
Odpady konsumpcyjne	30%
Papier	22%
Drewno	8%
Tekstylia	5%
Plastiki i inne odpady obojętne	35%
Rodzaj odpadów	
Stałe odpady komunalne	100%
Odpady przemysłowe	0%
Stężenie NMVOC (ppmv heksanu)	Inventory co-disposal – 2400
DOC, zawartość węgla organicznego ulegającego biodegradacji	
Odpady konsumpcyjne	15%
Papier	40%
Drewno i słoma	43%
Tekstylia	24%
Dane dotyczące powstawania metanu	
DOCf (udział DOC ulegającego rozkładowi)	50%
Procentowy udział stałych odpadów komunalnych w SWDS (reszta poddana odzyskowi)	88%
Opóźnienie – średni czas do rozkładu w warunkach beztlenowych	12 miesięcy
Wydajność metanu	
Frakcja metanu w gazie wysypiskowym	50%
Odzysk metanu przed pokryciem odpadów	50%
Odzysk metanu po pokryciu odpadów	80%
Współczynnik utlenienia	10%
Horyzont czasowy generowania metanu (lata)	80
Horyzont czasowy generowania NMVOC (lata)	140
Tempo rozkładu (przyjęto na poziomie typowym dla klimatu umiarkowanego wilgotnego)	
Odpady konsumpcyjne	0,4
Papier	0,07
Drewno i słoma	0,035
Tekstylia	0,07

Źródło: opracowanie własne.

Schemat 1A
 Profil emisji gazów wysypiskowych i metanu w czasie



Źródło: opracowanie własne.