Inżynieria Ekologiczna
Ecological Engineering
Volume 19, Issue 6, December 2018, pages 133–144
https://doi.org/10.12912/23920629/99169

Received: 2018.09.15
Accepted: 2018.11.02
Published: 2018.12.01

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZAGOSPODAROWANIA WÓD OPADOWYCH Z EKSPLOATOWANEGO SKŁADOWISKA ODPADÓW KOMUNALNYCH

Agata Szymańska-Pulikowska[1*], Katarzyna Stanowska[2]

[1] Zakład Wód Podziemnych i Gospodarki Odpadami, Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Plac Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

[2] Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Grunwaldzka 55, 50-357 Wrocław

* Autor do korespondencji: agata.szymanska-pulikowska@upwr.edu.pl

STRESZCZENIE

Jednym z problemów, związanych z projektowaniem składowisk odpadów, jest określenie ilości i rodzaju wód powstających na ich terenach. Największy udział w bilansie wodnym dużych składowisk odpadów ma opad atmosferyczny, tworzący spływy powierzchniowe. Celem pracy było przeanalizowanie możliwości odprowadzania i zagospodarowania wód opadowych z terenu eksploatowanego składowiska odpadów komunalnych, na przykładzie składowiska odpadów komunalnych w Bogatyni. W celu określenia ilości wód opadowych, które wymagają odprowadzenia z terenu składowiska, dokonano inwentaryzacji wchodzących w jego skład powierzchni. Ze względu na możliwość zanieczyszczenia przez emisje związane ze składowanymi odpadami założono, że do wykorzystania będą przeznaczone wody czyste, odprowadzone z powierzchni, które nie mają kontaktu z odpadami. Wielkość spływu powierzchniowego określono wykorzystując powszechnie stosowane modele. Na podstawie przeprowadzonych analiz zaproponowano rozwiązania techniczne, pozwalające na zgromadzenie i wykorzystanie wód opadowych w granicach przedsiębiorstwa lub odprowadzenie nadmiaru do gruntu.

Słowa kluczowe: składowisko odpadów komunalnych, wody opadowe, wykorzystanie

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF RAINWATER UTILIZATION FROM AN ACTIVE MUNICIPAL WASTE LANDFILL

ABSTRACT

One of the problems associated with the design of landfill sites is the determination of the amount and type of waters created in their areas. The largest share in the water balance of large landfills has precipitation, forming surface runoffs. The purpose of the work was to analyze the possibilities of rainwater disposal and management from the active landfill site, on the example of a municipal waste landfill in Bogatynia. In order to determine the amount of rainwater that needs to be discharged from the landfill site, an inventory was made of its area. Due

„Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie".
Artykuł opracowany na zlecenie Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie.
Artykuł współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach II Schematu Pomocy Technicznej „Krajowa Sieć Obszarów Wiejskich" Program Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020.
Instytucja Zarządzająca Programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014-2020 – Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

to the possibility of contamination due to emissions associated with deposited waste, it was assumed that only clean water will be used, discharged from surfaces that are not in contact with waste. The amount of surface runoff was determined using commonly used models. On the basis of the conducted analyzes, technical solutions were proposed, allowing for the collection and utilization of rainwater, within the company's boundaries, or for draining the excess into the ground.

Keywords: municipal landfill, rainwater, utilization

WSTĘP

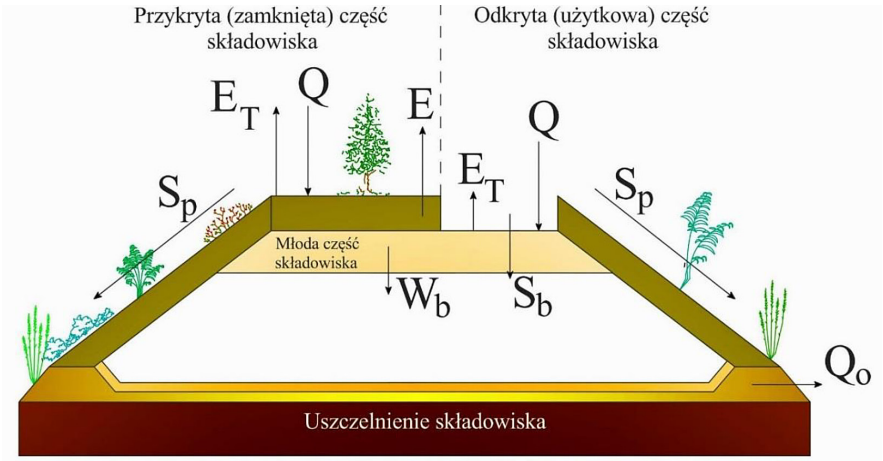
Składowisko odpadów komunalnych definiuje się jako obiekt budowlany przeznaczony do składowania odpadów [Ustawa o odpadach 2018]. Każdy obiekt budowlany powoduje przekształcenie pierwotnego terenu, na którym został zlokalizowany [Karczmarczyk and Mosiej 2011]. Naturalne powierzchnie gruntowe zastępuje się utwardzonymi nawierzchniami, takimi jak drogi [Gradkowski 2011], place, zlokalizowane przy nich budowle i budynki zadaszone. Wzrost stopnia uszczelnienia terenu jednoznacznie wiąże się z powiększeniem spływu powierzchniowego i ograniczeniem możliwości naturalnej infiltracji opadów atmosferycznych. Przy braku systemu odprowadzającego wodę może to powodować podtopienia lub prowadzić do niewydolności kanalizacji [Geiger and Dreiseitl 1999].

Głównym problemem związanym z projektowaniem składowisk odpadów jest określenie ilości i rodzaju poszczególnych wód oraz badanie ich jakości na potrzeby gospodarki wodno-ściekowej. Ocena ilościowa pozwala na dobranie parametrów systemów przechwytujących poszczególne rodzaje wód, pojemności i wymiarów obiektów czasowo przetrzymujących wody. Wody te mogą zostać wykorzystane na potrzeby związane z funkcjonowaniem danego obiektu [Sanches Fernandes et al. 2015]. Na podstawie oceny jakościowej podejmuje się decyzje o przekierowaniu konkretnego rodzaju wód do zbiorników z okresowym przetrzymywaniem przed wywozem do oczyszczalni ścieków lub bezpośrednio do odbiornika [Lipniacka-Piaskowska 2010].

W miarę postępującego wypełniania składowiska, a tym samym zagęszczania powstającej bryły, w jego obrębie obserwuje się zachodzące procesy rozkładu i wymiany fizykochemicznej [Machajski and Olearczyk 2008]. Związane jest to z wytwarzaniem gazów składowiskowych podczas beztlenowej fermentacji substancji organicznych [Przydatek 2012]. Wynikiem procesów zachodzących na składowisku jest również powstawanie odcieków składowiskowych (wód odciekowych), które stanowią realne zagrożenie dla środowiska wodnego, głównie wód podziemnych [Szymańska-Pulikowska 2012]. Wody odciekowe na składowisku odpadów powstają w dwojaki sposób, częściowo poprzez proces infiltracji wód opadowych przez złoże zdeponowanych odpadów, a częściowo, jako tzw. hydrolizat, powstający podczas procesu przemian biochemicznych rozpuszczalnych związków substancji odpadowej, najczęściej o charakterze organicznym. Przy braku odpowiedniego uszczelnienia dna kwatery może dojść do infiltrowania zgromadzonych tam odcieków w głąb podłoża gruntowego. Mogą one dotrzeć aż do warstwy wodonośnej i być przenoszone na znaczne odległości. Wody odciekowe, z powodu ich silnego zanieczyszczenia, wymagają oczyszczenia przed odprowadzeniem do odbiornika [Machajski and Olearczyk 2008].

W bilansie wodnym składowiska powinny być uwzględnione jego podstawowe elementy, których udział może się zmieniać, w zależności od rodzaju powierzchni (rys. 1). Wody podziemne na terenie składowiska związane są z położeniem zwierciadła wód gruntowych i jego zmiennością oraz filtracją, co wpływa na transport zanieczyszczeń dopływających przez nieodpowiednio zabezpieczone podłoże składowiska [Machajski and Olearczyk 2008]. Najniżej położony element konstrukcyjny składowiska powinien być zlokalizowany około 1,0 m powyżej maksymalnego poziomu wody gruntowej [Rozporządzenie Ministra Środowiska 2013].

Spływy powierzchniowe w obrębie składowiska, to wody napływające z otoczenia zewnętrznego terenu składowiska oraz opady, trafiające na jego powierzchnię. Określenie ilości napływających wód stanowi podstawę określenia doboru rozwiązań i parametrów systemu rowów opaskowych otaczających zewnętrznie obiekt, albo tych, które przechwytują wody spływające po skarpach obwałowań. Takie wody zaliczane są do wód czystych, niewymagających oczyszczenia przed wprowadzeniem do odbiornika [Machajski and Olearczyk 2008].



Rys. 1. Podstawowe elementy bilansu wodnego składowiska (Q – opady atmosferyczne lub infiltracja wody, S_p – spływ powierzchniowy, E_T – ewapotranspiracja, S_b – wody opadowe tworzące odcieki, W_b – woda z biologicznych procesów rozkładu, Q_o – odpływ odcieków) [na podst.:Lipniacka-Piaskowska 2010]
Fig. 1. The basic elements of the water balance of the landfill (Q – precipitation or infiltration of water, S_p – surface runoff, E_T – evapotranspiration, S_b – precipitation waters forming leachate, W_b – water from biological degradation processes, Q_o – outflow of leachate) [based on: Lipniacka-Piaskowska 2010]

Największy udział w bilansie wodnym dużych składowisk odpadów ma opad atmosferyczny, pomniejszony o wodę odparowaną, zależnie od pory roku i wilgotności powietrza. Wody opadowe przejmowane przez rynny i rury spustowe z budynków administracyjno-biurowych, garaży czy magazynów paliw i środków chemicznych, a także sortowni, powinny być traktowane jako czyste, z bezpośrednim odprowadzeniem do odbiorników lub do zbiorników na wodę wykorzystywaną do prac porządkowych, zraszania bryły odpadów i ochrony przeciwpożarowej. Wody opadowe przejmowane z kratek ściekowych z placów manewrowych oraz dróg dojazdowych, z wnętrza sortowni odpadów (spłukiwanie wnętrza hali), z kompostowni, brodzika dezynfekcyjnego oraz myjni płytowej powinno się traktować jako wody brudne i wymagające podczyszczenia przed zrzutem do odbiornika. Takie wody powinny być gromadzone w zbiorniku przeznaczonym do tego celu oraz być okresowo wywożone do najbliższej oczyszczalni ścieków [Machajski and Olearczyk 2008].

Wraz z rozwojem urbanizacji opracowywane są liczne metody umożliwiające oszacowanie ilości tego rodzaju wód na analizowanym, przekształconym terenie [Kotowski et al. 2010]. Do tego ważne jest rozpoznanie powierzchni, na jakie natrafia opad, aby możliwe było dokonanie selekcji na wodę czystą, przeznaczoną do zagospodarowania, i zanieczyszczoną [Machajski and Olearczyk 2008]. Pojawiające się technologie pozwalają na bezpieczne odprowadzenie wód opadowych, a także ekonomiczne zagospodarowanie ich w świetle istniejących lokalnie możliwości i obowiązującego prawa [Sample and Liu 2014]. Projektowanie lepszych rozwiązań wymaga rozwoju metod obliczeniowych, zwiększenia zasobu danych empirycznych do modelowania oraz poszerzania wiedzy o metodach wykorzystania wód opadowych. Ważne jest także zwiększenia świadomości społeczeństwa i zaufania dla takich systemów [Campisano et al. 2017].

Składowiska odpadów komunalnych cechują się przewagą wód pochodzenia atmosferycznego, stąd bardzo ważne staje się objęcie szczególną analizą tego składnika bilansu wodnego [Sanches Fernandes et al. 2015]. Składowiska poprzez duży procent uszczelnienia czystej powierzchni terenu, takiej jak skarpy składowiska i zadaszone wiaty i budowle, są odpowiednim miejscem do wykonania systemu odprowadzenia wód opadowych. Zebrane wody wykorzystuje się na cele porządkowe, takie jak spłukiwanie placu manewrowego, mycie kół pojazdów, zapewnienie wody dla myjki dezynfekcyjnej, lub na procesy technologiczne (np. zraszanie skarp kwater w okresach letnich). Zagospodarowanie w ten sposób wody opadowej znacznie zmniejsza wielkość poboru wody wodociągowej, co może widocznie wpłynąć na koszty prowadzenia składowiska.

Analiza występujących w obrębie składowiska różnych rodzajów wód pozwala na dokładne przeprowadzanie bilansu wodnego i monitoringu,

co zwiększa szanse na bezpieczną eksploatację składowiska bez degradowania środowiska. Odseparowanie i retencjonowanie czystych wód opadowych staje się rozwiązaniem pożądanym, dającym możliwość zmniejszenia problemów z odprowadzeniem spływów powierzchniowych do kanalizacji i pozwalającym na wykorzystanie wód opadowych do celów gospodarczych i technologicznych.

Celem pracy było przeanalizowanie możliwości odprowadzania i zagospodarowania wód opadowych z terenu eksploatowanego składowiska odpadów komunalnych na przykładzie składowiska w Bogatyni.

MATERIAŁ I METODY

Składowisko odpadów komunalnych jest własnością Gminnego Przedsiębiorstwa Oczyszczania Sp. z o.o. z siedzibą w Bogatyni. Zlokalizowane jest w rejonie zrekultywowanej hałdy zewnętrznej Kopalni Węgla Brunatnego Turów S.A. w kierunku północno-wschodnim od ulicy Zgorzeleckiej, poza terenem zabudowy mieszkaniowej (rys. 2). Ze względu na sąsiedztwo Gminnej Stacji Przeróbki Osadów Ściekowych składowisko posiada przyłącze wodociągowe z tego obiektu. Do składowania odpadów innych niż niebezpieczne wydzielono dwie kwatery:

- podpoziomowo-nadpoziomowa kwatera nr 1 (niecka I) o pojemności 146 000 Mg i zdolności przyjmowania odpadów 60 Mg/d, aktualnie eksploatowana;
- podpoziomowo-nadpoziomowa kwatera nr 2 (niecka II) o pojemności 300 000 Mg i zdolności przyjmowania odpadów 124 Mg/d, przewidziana do eksploatacji po zamknięciu kwatery nr 1 [Instrukcja 2015].

Kwatera nr 1, o powierzchni 2,53 ha, posiada uszczelnienie w postaci naturalnej bariery geologicznej i geomembrany PEHD oraz drenaż wód odciekowych. Wokół kwatery zostały wykonane rowy opaskowe, które kierują wody do zbiornika na odcieki. Kwatera nr 2, o powierzchni około 1,84 ha, ma uszczelnienie w postaci naturalnej bariery geologicznej uzupełnionej sztuczną barierą, wykonaną z gruntów nieprzepuszczalnych. Kwatera jest wyposażona w system drenażu składającego się z sączków zbierających i kolektora głównego. W celu zabezpieczenia przed napływem wód powierzchniowych został wykonany system odwodnienia, składający się z rowu opaskowego, podłączonego do rowu opaskowego kwatery nr 1. Na terenie Składowiska Odpadów Komunalnych w Bogatyni znajdują się także urządzenia techniczne, niezbędne do prawidłowego funkcjonowania obiektu. Należą do nich m. in.: system drenażu wód odciekowych połączony ze zbiornikiem, instalacja ujmowania i wykorzystania gazu składowiskowego, brodzik dezynfekcyjny i pas zieleni izolacyjnej (złożony z drzew i krzewów, o minimalnej szerokości 10 m) [Instrukcja 2015].

W celu określenia ilości wód opadowych, które wymagają odprowadzenia z terenu składowiska dokonano inwentaryzacji wchodzących

Rys. 2. Teren Składowiska Odpadów Komunalnych w Bogatyni, ortofotomapa [na podst.: www.geoportal.gov.pl, maj 2018 r.]
Fig. 2. Area of Municipal Waste Landfill Plant in Bogatynia, orthophotomap [based on: www.geoportal.gov.pl, 2018, May]

w jego skład powierzchni (na podstawie map serwisu geoportal.gov.pl). Ze względu na możliwość zanieczyszczenia przez emisje związane ze składowanymi odpadami założono, że do wykorzystania będą przeznaczone wody czyste. Po przeprowadzeniu inwentaryzacji wybrano powierzchnie, z których odprowadzane wody można potraktować jako czyste a następnie (z wykorzystaniem współczynników spływu, odpowiadających poszczególnym rodzajom pokrycia) obliczono objętość spływu powierzchniowego z poszczególnych części składowiska. Wykorzystano do tego celu dwa modele obliczania natężeń deszczów miarodajnych (model Reinholda i model Błaszczyka) oraz ogólny wzór do obliczania spływów powierzchniowych [Gradkowski 2011, Kotowski et al. 2010]. Do obliczeń wykorzystano wyniki monitoringu prowadzonego w 2017 roku [Sprawozdanie 2018]. Na podstawie wyników obliczeń ilości odprowadzonej wody zaproponowano rozwiązania techniczne, możliwe do wykorzystania na składowisku do odprowadzenia i zagospodarowania wód opadowych w granicach przedsiębiorstwa.

WYNIKI I DYSKUSJA

W projektowaniu składowisk oraz ich infrastruktury największe znaczenie mają ilości wód odprowadzanych z ich powierzchni, dzięki czemu można określić sposób prowadzenia gospodarki wodno-ściekowej składowiska. Ważna jest możliwość wykorzystania odprowadzanych wód na cele lokalne, np. technologiczne [Sanches Fernandes et al. 2015], odprowadzenia ich do oczyszczalni lub bezpośrednio do odbiornika [Lipniacka-Piaskowska 2010]. W obrębie składowiska odpadów komunalnych wymagane jest wykonanie bilansu wodnego, co wynika z planu gospodarki wodno-ściekowej. W takim bilansie należy uwzględnić wszystkie rodzaje wód, występujące (i mogące wystąpić) na terenie samego składowiska oraz w jego najbliższym otoczeniu [Machajski and Olearczyk 2008].

Opady atmosferyczne

Na Składowisku Odpadów Komunalnych w Bogatyni badanie wielkości opadu atmosferycznego odbywa się raz dziennie. Dane dotyczące dobowych sum opadów atmosferycznych pochodzą z odczytów najbliższej, reprezentatywnej dla lokalizacji składowiska stacji meteorologicznej – w mieście Bogatynia. Opad atmosferyczny mierzony jest deszczomierzem Hellmanna na wysokości 1 m nad gruntem. Dotychczasowe odprowadzenie wód polega na zbiorczym odprowadzeniu wód odciekowych z kwater składowiska, spływów wód powierzchniowych z uszczelnionych skarp kwatery nr 1, wód przechwytywanych rowami opaskowymi oraz wód przechwyconych na utwardzonym zapleczu technicznym składowiska. Wody te są kierowane wraz z wodami odciekowymi do otwartego zbiornika bezodpływowego [Instrukcja 2015]. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów meteorologicznych w roku 2017. Z przedstawionych danych wynika, że najwyższa miesięczna suma opadów atmosferycznych w 2017 roku wystąpiła w lipcu – 145,2 mm, a najniższa w styczniu – 31,6 mm. Roczna suma opadów wyniosła 818,3 mm.

Wody odciekowe

Na składowisku w Bogatyni odprowadza się je systemem drenażu do zbiornika bezodpływowego, zlokalizowanego w centralnej części składowiska. Do zbiornika trafiają też wody odciekowe z kompostowni, funkcjonującej na terenie składowiska [Projekt 1997]. Zestawienie ilości odcieków przesłanych do Bogatyńskich Wodociągów i Oczyszczalni S.A. w Bogatyni w roku 2017 przedstawiono w tabeli 2. Z przedstawionych miesięcznych wielkości zrzutu wód odciekowych wynika, że najwięcej odprowadzono w grudniu 2017 roku – 1547,70 m^3, a najmniej w lutym – 476,80 m^3. Roczna objętość odprowadzonych odcieków wyniosła 9591,8 m^3.

Tabela 1. Miesięczne sumy opadów atmosferycznych w Bogatyni w 2017 roku [Sprawozdanie 2018]
Table 1. Monthly precipitation in Bogatynia in 2017 [Sprawozdanie 2018]

Stacja opadowa	Miesięczna suma opadów atmosferycznych [mm]												Roczna suma opadów [mm]
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Bogatynia	31,6	38,4	47,4	45,6	50,4	124,0	145,2	83,2	68,3	97,8	45,2	41,2	818,3

Tabela 2. Miesięczne ilości odprowadzanych wód odciekowych w 2017 roku [Sprawozdanie 2018]
Table 2. The monthly amount of leachate discharged in 2017 [Sprawozdanie 2018]

Objętość odprowadzonych wód odciekowych [m³]												Razem [m³]
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
567,1	476,8	529,5	589,5	531,9	630,1	1031,3	541,8	876,6	1083,3	1176,4	1547,7	9591,8

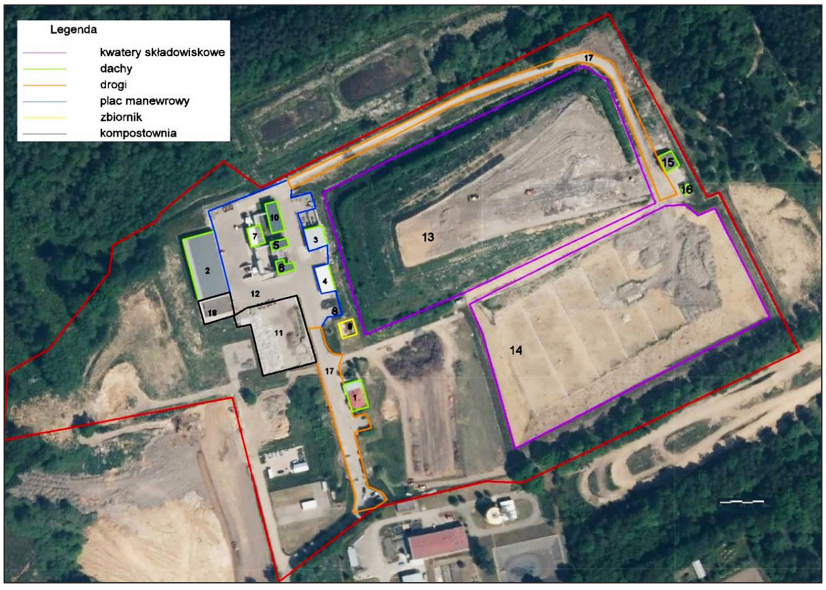
Wody powierzchniowe i podziemne

W bezpośrednim otoczeniu składowiska w Bogatyni nie występują wody powierzchniowe, w związku z tym nie prowadzi się monitoringu w tym zakresie. Zabezpieczeniem przed infiltracją wód podziemnych jest system uszczelniający, składający się z bariery geologicznej uzupełnionej geomembraną [Projekt 1997].

W celu określenia ilości wód odprowadzanych z powierzchni składowiska przeprowadzono inwentaryzację i pomiary powierzchni części o jednorodnym pokryciu, znajdujących się w granicach działki. Na ich podstawie określono wartości współczynników spływu na terenie składowiska, będące niezbędne do oszacowania ilości możliwej do zebrania i wykorzystania wody deszczowej. Przeprowadzono podział wody na wodę czystą (z powierzchni dachów i uszczelnionych skarp kwatery I), którą można ponownie wykorzystać na terenie Zakładu, oraz wodę zanieczyszczoną (np. z powierzchni placu manewrowego i dróg), wymagającą oczyszczenia w najbliższej oczyszczalni ścieków. Podziału dokonano na podstawie informacji literaturowych [Machajski and Olearczyk 2008]. Pominięto trawiastą powierzchnię zlewni z powodu naturalnej infiltracji wody deszczowej do gruntu. Na mapie poglądowej terenu składowiska (rys. 3) z podziałem na powierzchnie o jednorodnym pokryciu, zaznaczono m. in. kwatery składowiskowe, z których w analizie ilości wód opadowych uwzględniono jedynie kwaterę nr 1 (tylko powierzchnię uszczelnionych skarp, otoczonych rowem opaskowym), w docelowej wysokości i o projektowanym nachyleniu skarp.

Powierzchnie, występujące na składowisku w Bogatyni podzielono, ze względu na charakter zbieranych wód, na czyste i zanieczyszczone (tab. 3). Będzie to decydowało o możliwości zagospodarowania. Przyjęto, że wody odprowadzane ze skarp kwatery nr 1 do rowu opaskowego nie mają kontaktu z odpadami, są więc wodami czystymi. Wody zbierane z kwatery nr 2 systemem drenażu zaliczono do wód zanieczyszczonych ze względu na to, że odprowadzane są do zbiornika na odcieki i inny sposób odprowadzenia wymagałby przebudowy systemu.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów określono odpływ ze składowiska.



Rys. 3. Teren składowiska z podziałem na powierzchnie o jednorodnym pokryciu [na podstawie mapy serwisu geoportal.gov.pl]
Fig. 3. Landfill area with division into surfaces with homogeneous coverage [based on: maps of geoportal.gov.pl]

Tabela 3. Zestawienie powierzchni, występujących na składowisku w Bogatyni (numery obiektów zgodne z oznaczeniami zamieszczonymi na rysunku 3)
Table 3. Listing of surfaces occurring in the Bogatynia landfill (object numbers in accordance with the indications in Fig. 3)

Numer obiektu	Obiekt	Powierzchnia w rzucie [m^2]	Rodzaj pokrycia	Rodzaj zbieranych wód
1.	Budynek socjalno-administracyjny	241,54	dachówka	czyste
2.	Hala stabilizacji tlenowej odpadów	1 012,08	papa	czyste
3.	Kompostownia	198,74	papa	czyste
4.	Wiata na odpady selektywne	195,51	papa	czyste
5.	Wiata na odpady gabarytowe	70,53	papa	czyste
6.	Wiata z rozrywarką worków	88,45	papa	czyste
7.	Linia sortownicza	128,22	blacha	czyste
8.	Brodzik dezynfekcyjny	28,17	beton	zanieczyszczone
9.	Zbiornik na wody odciekowe	112,28	beton	zanieczyszczone
10.	Wiata z belownicą	185,97	papa	czyste
11.	Kompostownia otwarta	1 910,75	płyty ażurowe	zanieczyszczone
12.	Plac manewrowy	5 007,45	asfalt	zanieczyszczone
13.	Kwatera nr 1	25 300,00 (10 072,52 skarpy)	odpady/trawa	czyste (na skarpach)
14.	Kwatera nr 2	22 000,00	żwir	zanieczyszczone
15.	Budynek garażowy	126,31	papa	zanieczyszczone
16.	Narzędziownia	31,17	papa	czyste
17.	Drogi dojazdowe	4 120,22	asfalt / płyty betonowe	zanieczyszczone
18.	Kompostownia odpadów biodegradowalnych	375,48	płyty ażurowe	zanieczyszczone

Ogólny wzór do obliczania ilości spływów deszczowych

W celu poprawnego zaprojektowania systemu odprowadzenia wody opadowej ze zlewni, należy przede wszystkim oszacować wielkość spływu powierzchniowego, możliwego do zebrania z danego terenu. W tym celu określa się ilość wody opadowej, która w określonym czasie spłynie ze zlewni do odbiornika wód opadowych [Gradkowski 2011]:

$$Q = \varphi \cdot \psi \cdot q \cdot F \quad dm^3 \cdot s^{-1}$$

gdzie: Q – natężenie spływu ($dm^3 \cdot s^{-1}$),
φ – współczynnik opóźnienia odpływu (-),
ψ – współczynnik spływu (-),
q – natężenie deszczu na jednostkę powierzchni (jednostkowe, $dm^3 \cdot ha \cdot s^{-1}$),
F – powierzchnia zlewni (ha).

Współczynnik opóźnienia odpływu

Jest zależny od przyjętej metody obliczania ilości wód opadowych, a jego wielkość określa się ze wzoru [Gradkowski 2011]:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[n]{F}} < 1 \quad (-)$$

gdzie: n – współczynnik zależny od kształtu zlewni i spadków terenu:
n = 4, gdy prędkość spływu jest mniejsza od 1,2 $m \cdot s^{-1}$ i stosunek długości zlewni do szerokości jest dwukrotny,
n = 6, gdy prędkość spływu wynosi ok. 1,2 $m \cdot s^{-1}$,
n = 8, gdy prędkość jest większa niż 1,2 $m \cdot s^{-1}$ i stosunek wymiarów zlewni wynosi około 1.

Do obliczeń przyjęto:
n = 4,
F = 1,24 ha (na podstawie tabeli 3),
zatem:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[4]{1,24}} = 0,948$$

Współczynnik spływu

Współczynnik spływu ψ jest wielkością zależną od pokrycia terenu i charakterystyczną dla każdej zlewni. Wyrażany jest jako stosunek ilości wody opadowej, która spłynie z danej powierzchni, do ilości wody, która spadła na tę powierzchnię, wg wzoru [Gradkowski 2011]:

$$\psi = \frac{Q_{sp}}{Q_{op}} < 1 \quad (-)$$

gdzie: Q_{sp} – wielkość spływu z danej powierzchni ($dm^3 \cdot s^{-1}$),
Q_{op} – wielkość opadu na daną powierzchnię ($dm^3 \cdot s^{-1}$),
ψ – współczynnik spływu (–).

Wielkość współczynnika spływu jest określana w zależności od rodzaju powierzchni, jednak istnieje stała zależność – im niższa wartość współczynnika spływu, tym rodzaj powierzchni cechuje się mniejszym uszczelnieniem i większym wchłanianiem wody opadowej. Do obliczenia odpływu ze składowiska przyjęto wartości współczynników spływu podane w tabeli 4.

Tabela 4. Współczynniki spływu dla różnych powierzchni [Świgoń 2008]
Table 4. Runoff coefficients for different surfaces [Świgoń 2008]

Rodzaj powierzchni	Współczynnik spływu ψ
Dachy szczelne (blacha, papa)	0,90 – 0,95
Drogi bitumiczne	0,85 – 0,90
Bruki kamienne i klinkierowe	0,75 – 0,85
Bruki jak wyżej, lecz bez zalanych spoin	0,50 – 0,70
Bruki gorsze bez zalanych spoin	0,40 – 0,50
Drogi tłuczniowe	0,25 – 0,60
Drogi żwirowe	0,15 – 0,30
Powierzchnie niebrukowane	0,10 – 0,20
Parki, ogrody, łąki, zieleńce	0,00 – 0,10

Powierzchnia zredukowana

Iloczyn współczynnika spływu i wielkości zlewni nazywany jest zlewnią zredukowaną F_z, której określenie jest niezbędne do oszacowania faktycznej ilości wody, spływającej z danej powierzchni [Gradkowski 2011]:

$$F_{zi} = \psi_i \cdot F_i \text{ ha}$$

gdzie: F_{zi} – powierzchnia zredukowana obszaru nr „i" o jednorodnej wartości współczynnika ψ (ha),
ψ_i – wartość współczynnika ψ w obszarze nr „i" (–),
F_i – powierzchnia obszaru nr „i" o jednorodnej wartości współczynnika spływu (ha).

Z tabeli 4 wybrano jedynie te obiekty, których powierzchnia i układ zapewniały odprowadzenie czystej wody opadowej. Dla każdego rodzaju pokrycia dobrano odpowiedni współczynnik spływu i obliczono wielkości powierzchni zredukowanych (tab. 5).

Jednostkowe natężenie deszczu

Obliczenie odpływu wody ze zlewni rozpoczyna się od określenia jednostkowego miarodajnego natężenia deszczu. Należy wykorzystać informacje o czasie trwania deszczu, prawdopodobieństwie jego wystąpienia, wysokości opadu normalnego (średniego dla wielolecia), natężeniu deszczu wzorcowego i częstości występowania deszczu dla danej miejscowości. Do obliczeń wy-

Tabela 5. Obliczone powierzchnie zredukowane
Table 5. Calculated surfaces reduced

Numer obiektu	Powierzchnia w rzucie F		Rodzaj pokrycia	Współczynnik spływu	Powierzchnia zredukowana F_z	
	[m^2]	[ha]			[m^2]	[ha]
1.	241,54	0,024	dachówka	0,95	229,46	0,023
2.	1 012,08	0,101	papa	0,90	910,87	0,091
3.	198,74	0,020	papa	0,90	178,87	0,018
4.	195,51	0,020	papa	0,90	175,96	0,018
5.	70,53	0,007	papa	0,90	63,48	0,006
6.	88,45	0,009	papa	0,90	79,61	0,008
7.	128,22	0,013	blacha	0,95	121,81	0,012
10.	185,97	0,019	papa	0,90	167,37	0,017
13.	10 072,52	1,007	trawa, uszczelnienie	0,30	3 021,76	0,302
15.	126,31	0,013	papa	0,90	113,68	0,011
16.	31,17	0,003	papa	0,90	28,05	0,003
Suma	12 351,04	1,24	-------	-------	5090,91	0,509

korzystano dwa modele, w celu porównania wyników [Kotowski et al. 2010].

Model Reinholda z 1940 – stosowany w projektowaniu odwodnień terenów zurbanizowanych, w szczególności kanalizacji obiektów komunikacyjnych (mosty, drogi, wiadukty, przejścia i przejazdy pod ulicami lub lotniska). Jednostkowe natężenie deszczu obliczane jest wg wzoru [Kotowski et al. 2010]:

$$q = q_{15,1}\frac{38}{t+9}\left(\sqrt[4]{C} - 0{,}3684\right)\ \mathrm{dm^3 \cdot ha \cdot s^{-1}}$$

zatem:

$$q = 112 \cdot \frac{38}{15+9} \cdot \left(\sqrt[4]{5} - 0{,}3684\right) = 199{,}85$$

gdzie: q – natężenie deszczu na jednostkę powierzchni ($dm^3 \cdot ha \cdot s)^{-1}$,
$q_{15,1}$ – natężenie deszczu wzorcowego o czasie trwania t = 15 min i częstości C = 1 rok ($dm^3 \cdot s \cdot ha^{-1}$); przyjęto jak dla Wrocławia [Kotowski et al. 2010] $q_{15,1}$ = 112 $dm^3 \cdot ha \cdot s^{-1}$,
t – czas trwania deszczu (min); przyjęto t = 15 min,
C – częstość wystąpienia deszczu o natężeniu q lub większym (lata); przyjęto C = 5 lat.

Obliczona wielkość spływu powierzchniowego, uwzględniająca jednostkowe natężenie deszczu z modelu Reinholda:

$$Q = \frac{1}{\sqrt[n]{F}} \cdot q \cdot F_z\ \mathrm{dm^3 \cdot s^{-1}}$$

zatem:

$$Q = 0{,}948 \cdot 199{,}85 \cdot 0{,}509 = 96{,}43\ \mathrm{dm^3 \cdot s^{-1}}$$

Model Błaszczyka z 1954 roku – najczęściej stosowany do projektowania odwodnień [Kotowski et al. 2010]:

$$q = \frac{6{,}631 \cdot \sqrt[3]{H^2 \cdot C}}{t^{0{,}67}}\ \mathrm{dm^3 \cdot ha \cdot s^{-1}}$$

zatem:

$$q = \frac{6{,}631 \cdot \sqrt[3]{729^2 \cdot 5}}{15^{0{,}67}} = 149{,}65\ \mathrm{dm^3 \cdot ha \cdot s^{-1}}$$

gdzie: q – natężenie deszczu na jednostkę powierzchni ($dm^3 \cdot ha \cdot s^{-1}$),
t – czas trwania deszczu (min); przyjęto t = 15 min,
H – wysokość opadu normalnego (średniego z wielolecia, mm); przyjęto 729 mm,
C – częstość wystąpienia deszczu o natężeniu q lub większym (lata); przyjęto C = 5 lat.

Obliczona wielkość spływu powierzchniowego, uwzględniająca jednostkowe natężenie deszczu z modelu Błaszczyka:

$$Q = \frac{1}{\sqrt[n]{F}} \cdot q \cdot F_z\ \mathrm{dm^3 \cdot s^{-1}}$$

zatem:

$$Q = 0{,}948 \cdot 149{,}65 \cdot 0{,}509 = 72{,}21\ \mathrm{dm^3 \cdot s^{-1}}$$

Przy projektowaniu urządzeń odprowadzających i retencjonujących wodę opadową należy pamiętać o zachowaniu rezerwy, ponieważ wyniki uzyskane przy zastosowaniu różnych modeli mogą się różnić (w przypadku składowiska w Bogatyni obliczone wielkości spływu powierzchniowego różnią się o 24,22 $dm^3 s^{-1}$). Modele te służą raczej do szacowania wielkości spływu powierzchniowego z analizowanego obszaru i nie uwzględniają wielu czynników, takich jak parowanie terenowe czy ukształtowanie terenu. Aby uzyskać miarodajne wyniki należałoby korzystać z modeli o charakterze lokalnym, należałoby również zweryfikować wartości przyjmowanych współczynników. Wyniki uzyskane w opracowaniu mogą służyć projektantowi jako pomoc w dobraniu odpowiedniego rozwiązania zbiornika magazynującego wodę opadową.

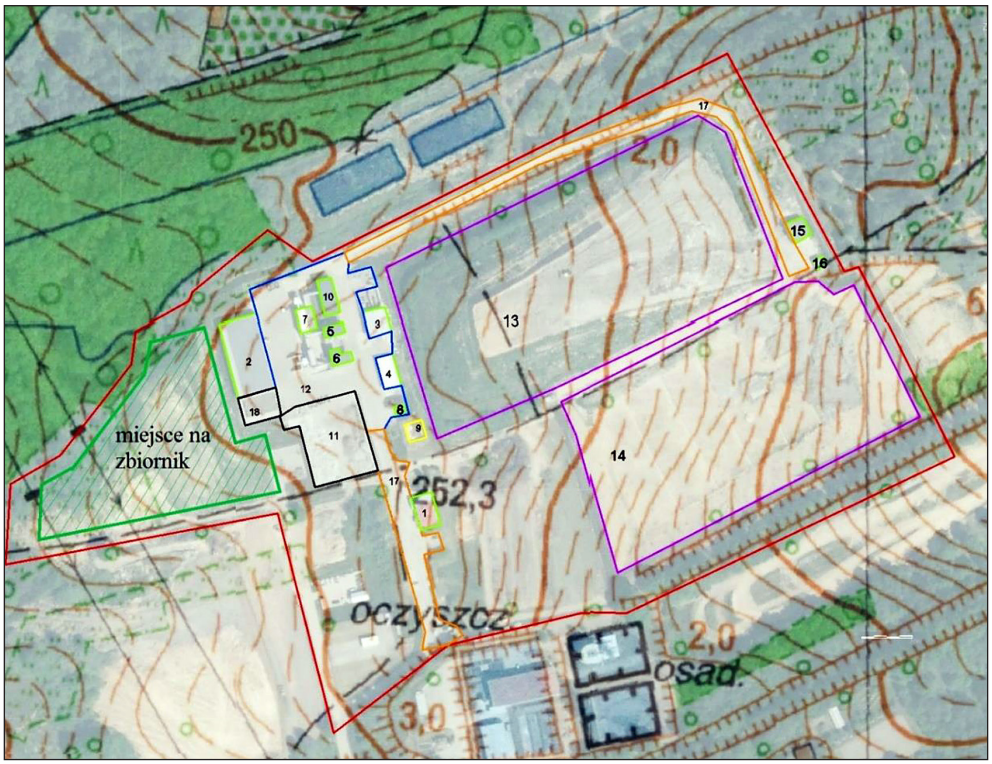
Podczas projektowania nowych obiektów dąży się do ekonomicznego wykorzystania dostępnych możliwości, w celu zminimalizowania kosztów ponoszonych podczas eksploatacji. Z tego powodu przy projektowaniu nowych inwestycji lub podczas przeprowadzenia modernizacji istniejących obiektów, warto rozważyć umieszczenie na terenie składowiska instalacji przechwytującej wodę opadową. Ważnym aspektem ekonomicznym są także ceny odprowadzenia wody opadowej do systemu kanalizacji [Sample and Liu 2014]. Dodatkową korzyścią może być także zatrzymanie wód opadowych na terenie zakładu w zbiornikach nadziemnych lub podziemnych. Mogą one być później wykorzystywane zamiast czystej wody [Geiger and Dreiseitl 1999] i przeznaczane np. do celów porządkowych lub sanitarnych, co z kolei spowoduje zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych obiektu [Sanches Fernandes et al. 2015]. Zbiorniki często stanowią zabezpieczenie sieci kanalizacyjnych i innego typu odbiorników, np. rowów czy rzek. Ze względu na występowanie powodzi miejskich rozwiązania

tego typu mogą stać się niezbędnym elementem architektury w przyszłości.

Innym rozwiązaniem może być zamontowanie komór drenażowych, paneli rozsączających lub studni infiltracyjnych. Elementy te montuje się pod powierzchnią terenu, nawet pod powierzchniami utwardzonymi. Dzięki nim wody opadowe mogą zasilać wody gruntowe [Szymańska-Pulikowska et al. 2013]. Infiltracja powierzchniowa to odprowadzenie wód przez powierzchnie utwardzone powierzchnią przepuszczalną oraz przez powierzchnie zielone (rowy, trawniki, kwietniki). Połączeniem infiltracji powierzchniowej i podpowierzchniowej jest ogród deszczowy. Infiltracja uniemożliwia wykorzystanie wody opadowej do celów gospodarczych, jedynie ogranicza odpływ wody ze zlewni zachowując ją w jej granicach, poprawia warunki wodne oraz zmniejsza ilość wody odpływającej systemem kanalizacji [Karczmarczyk and Mosiej 2011].

W przypadku Składowiska Odpadów w Bogatyni proponuje się przechwycenie czystej wody opadowej przy pomocy nowego, oddzielnego systemu, składającego się z rynien zainstalowanych przy krawędziach dachów i wzdłuż krawędzi budynków, istniejących rowów opaskowych wokół kwater oraz istniejącego systemu drenażu skarp kwatery nr 1. Z tej instalacji woda opadowa zostanie przekierowana systemem niezależnej podziemnej kanalizacji deszczowej do podwójnego zbiornika podziemnego, zlokalizowanego w zachodniej, niezagospodarowanej części terenu Zakładu. Teren ten jest jednocześnie najniżej położoną częścią składowiska, dzięki czemu kanalizacja będzie mogła zostać zaprojektowana ze spadkiem, jako system grawitacyjny.

Z systemu kanalizacji podziemnej woda opadowa zostanie przekierowana do zbiornika retencyjnego, mającego na celu zatrzymanie wody deszczowej. Przed wlotem wody opadowej do zbiornika zaleca się montaż filtrów separujących zanieczyszczenia i zawiesiny, aby w sposób bezpieczny gromadzić odprowadzaną wodę. Zbiornik będzie wykonany z nieprzepuszczalnego (zapobiegającego infiltracji) materiału oraz będzie posiadał zamontowaną klapę przy powierzchni terenu, aby umożliwić montaż i demontaż pompy, pozwalającej na wykorzystanie zgromadzonej wody do celów porządkowych, do mycia oraz do zasilania brodzika dezynfekcyjnego. Pozwoli to na ograniczenie zużycia wody z sieci wodociągowej i prowadzenie ekonomicznej gospodarki



Rys. 4. Teren składowiska z zaznaczoną lokalizacją zbiornika na wody opadowe [na podstawie mapy serwisu geoportal.gov.pl]
Fig. 4. Landfill area with location of the rainwater reservoir [based on: maps of geoportal.gov.pl]

wodą na terenie składowiska. Zaleca się monitorowanie składu wód w zbiorniku, w celu wychwycenia zanieczyszczeń, które mogą świadczyć o nieszczelnościach odwadnianych powierzchni i przedostawaniu się zanieczyszczeń z odpadów.

Możliwy jest także montaż zbiornika infiltracyjnego (drugiej fazy odprowadzenia wody opadowej), zlokalizowanego poniżej zbiornika retencyjnego. Jest to rozwiązanie opcjonalne, do zastosowania po rozpoczęciu eksploatacji kwatery nr 2. Przy większych opadach woda zostanie przekierowana grawitacyjnie ze zbiornika retencyjnego do zbiornika infiltracyjnego. Zbiornik infiltracyjny będzie równomiernie rozsączał wodę do otoczenia. Dzięki dwufazowemu rozwiązaniu systemu gromadzenia wód opadowych gospodarka wodna składowiska będzie cechować się funkcjonalnością i bezpieczeństwem. Do określenia pojemności i wymiarów zbiorników można wykorzystać wyniki obliczeń wielkości spływu powierzchniowego na składowisku.

Zanieczyszczone wody opadowe, wychwytywane wpustami deszczowymi z placu manewrowego i z powierzchni dróg, będą odprowadzane istniejącym systemem kanalizacji do zbiornika na wody odciekowe. Na rysunku 4 przedstawiono mapę terenu składowiska z miejscem możliwej lokalizacji zbiornika.

PODSUMOWANIE

Składowisko odpadów jest wyjątkowym przykładem obiektu budowlanego, łączącego w sobie elementy powierzchni naturalnych jak ukształtowanych sztucznie. Stanowi przykład połączenia technologii i systemów poprawiających bezpieczeństwo środowiska przyrodniczego (monitoring, uszczelnienia, drenaże itp.) oraz poprawiających ekonomiczne warunki prowadzenia działalności gospodarczej i bytowej człowieka (technologie składowania odpadów, wykorzystanie naturalnej i sztucznej topografii, uwarunkowań klimatycznych, lokalnego przekształcenia powierzchni). Połączenie tych dwóch aspektów może umożliwić gospodarowanie wodami opadowymi na terenie składowiska, dzięki odseparowaniu od innych wód i zagospodarowaniu w obrębie obiektu z korzyścią dla środowiska (ograniczenie odpływu czystej wody do systemu kanalizacji) oraz dla przedsiębiorstwa (wykorzystanie wody do celów gospodarczych, zmniejszenie prawdopodobieństwa powodzi, ograniczenie zużycia wody wodociągowej, zmniejszenie opłat za odprowadzanie wody opadowej).

BIBLIOGRAFIA

1. Campisano A., Butler D., Ward S., Burns M.J., Friedler E., Debusk K., Fisher-Jeffes L.N., Ghisi E., Rahman A., Furumai H., Han M. 2017. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. Water Research, 115, 195-209.
2. Geiger W., Dreiseitl H. 1999. Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych: poradnik retencjonowania i infiltracji wód deszczowych do gruntu na terenach zabudowanych. Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
3. Gradkowski K. 2011. Specyfika odwodnienia równi drogowych. Drogownictwo, 3, 94-99.
4. Instrukcja prowadzenia Składowiska Odpadów w Bogatyni. 2015. Biuro Inżynierii Środowiska TOM-EKO Tomasz Kubik, Jelenia Góra.
5. Karczmarczyk A., Mosiej J. 2011. Racjonalne zagospodarowanie wód opadowych na terenach o zwartej i rozproszonej zabudowie. Ekoinnowacje na Mazowszu Poradnik Transferu Technologii w Ochronie Środowiska, Wyd. II: Priorytety WFOŚiGW - Podręcznik Internetowy. Cz. II Gospodarka Wodna. CTTiRP Politechniki Warszawskiej.
6. Kotowski A., Kaźmierczak B., Dancewicz A. 2010. Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji. Polska Akademia Nauk. Instytut Podstawowych Problemów Techniki.
7. Lipniacka-Piaskowska A. 2010. Funkcjonowanie składowiska odpadów z recyrkulacją odcieków. Rozprawa doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska, Szczecin.
8. Machajski J., Olearczyk D. 2008. Bilans wodny w obrębie składowiska odpadów komunalnych. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 7, 89-100.
9. Projekt Architektoniczno-Budowlany. 1997. Ekolog Systems, Poznań.
10. Przydatek G. 2012. Analiza przemian zachodzących w złożu czynnego składowiska odpadów. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 3/IV, 109-118.
11. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 maja 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Dz. U. 2013, poz. 523).
12. Sample D.J., Liu J. 2014. Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. Journal of Cleaner Production, 75, 174-194.

13. Sanches Fernandes L.F., Terêncio D.P.S., Pacheco F.A.L. 2015. Rainwater harvesting systems for low demanding applications. Science of The Total Environment, 529, 91-100.
14. Sprawozdanie z monitoringu przeprowadzonego w 2017 roku na Składowisku Odpadów Komunalnych w miejscowości Bogatynia. 2018. Przedsiębiorstwo Geologiczne sp. z o. o. Kielce.
15. Świgoń Z. 2008. Wskazówki prawno-techniczne indywidualnego zagospodarowania wód deszczowych. Rynek Instalacyjny, 5, 38-42.
16. Szymańska-Pulikowska A. 2012. Changes in the content of selected heavy metals in groundwater exposed to the impact of a municipal landfill site. Journal of Elementology, 17(4), 689-702.
17. Szymańska-Pulikowska A., Jurecki M., Thornagel T., Fischer W. 2013. Mała retencja – komory i panele drenażowe. Zeszyty Naukowe. Inżynieria Lądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska, 8-9, 57-63.
18. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (t.j. Dz. U. 2018, poz. 992).
19. www.geoportal.gov.pl [dostęp 10.05.2018].