



Wpływ lokalizacji składowisk odpadów na jakość wód podziemnych

Małgorzata E. Wysocka
Politechnika Białostocka

1. Wstęp

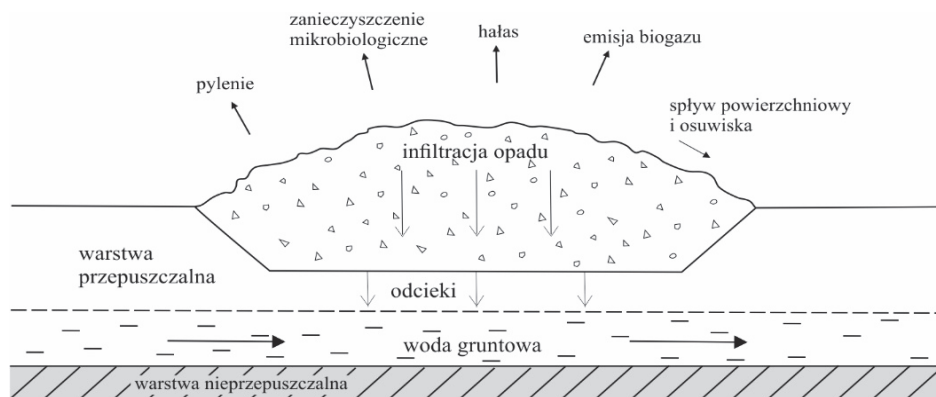
Deponowanie odpadów na powierzchni terenu jest w naszym kraju dominującym sposobem na ich unieszkodliwianie. Faktem jest, iż dopiero od kilkunastu lat w Polsce rozpoczęto działania w kierunku poprawy stanu gospodarki odpadowej. Przez wiele lat w Polsce składowiska odpadów były lokalizowane, budowane i eksploatowane bez wyraźnych wytycznych i uregulowań prawnych. Jeszcze do niedawna rolę składowisk odpadów pełniły najczęściej wyrobiska po eksploatacji kruszywa, bez jakichkolwiek zabezpieczeń.

Pierwszym aktem prawnym dotyczącym zasad usuwania, wykorzystywania i unieszkodliwiania odpadów było Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 1998 r. [12]. Dotyczyło ono jedynie składowisk odpadów niebezpiecznych. Wcześniej, tj. w roku 1993, zostały wydane wytyczne Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa „Zbiór zaleceń do programowania, projektowania i eksploatacji wysypisk odpadów komunalnych” [7]. Jednak w rzeczywistości dopiero rozporządzenie z roku 2003 [13], które zostało znowelizowane w 2009 r. [16], uregulowało stan prawny w tym zakresie. Obecnie dokumentem prawnym, który określa szczegółowe wymagania dotyczące lokalizacji, budowy i prowadzenia składowisk odpadów, jakim odpowiadają poszczególne typy składowisk odpadów oraz zakres, czas i częstotliwość oraz sposób i warunki prowadzenia monitoringu składowiska odpadów jest Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów [20].

Celem artykułu jest wskazanie elementów, które powinny być bezwzględnie wzięte pod uwagę podczas przygotowania projektu budowy bądź rozbudowy składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Szczególną uwagę poświęcono tu warunkom gruntowo-wodnym, tj. warunkom geologicznym i hydrogeologicznym. W celu zobrazowania wagi tematu przedstawiono kilka przykładów niewielkich gminnych składowisk odpadów, które zostały zlokalizowane w miejscach o niekorzystnych warunkach geologicznych. Pokazano wpływ składowiska na jakość wód podziemnych w określonych warunkach hydrogeologicznych.

2. Lokalizacja składowisk a warunki gruntowo-wodne

Nieprawidłowa lokalizacja i eksploatacja składowisk oddziałuje negatywnie na środowisko naturalne, w tym gleby, wody podziemne i powierzchniowe oraz powietrze. Odpady zdeponowane w miejscu składowania, w zależności od ich składu chemicznego i mineralnego, podlegają w wyniku reakcji z elementami środowiska różnym przeobrażeniom, co powoduje powstanie kolejnych, wtórnych zanieczyszczeń [22]. Powstałe niebezpieczne substancje migrują poza teren składowiska, wnikając w grunt podścielający składowisko, a następnie przedostając się do warstw wodonośnych. Odpady zdeponowane w miejscu składowania podlegają różnym procesom chemicznym wytwarzając różnorodnego rodzaju emisje [3], co pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat oddziaływania nieuszczelnionego składowiska na środowisko [3]

Fig. 1. The scheme of the impact of leaky landfill on the environment [3]

Rodzaj oraz intensywność uciążliwości zależą w znacznym stopniu od czynników wewnętrznych związanych z budową składowiska, właściwościami fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi odpadów, technologii składowania oraz czynników zewnętrznych związanych z otoczeniem, między innymi, topografią terenu, warunkami klimatycznymi oraz charakterem bariery ochronnej [6].

Z punktu widzenia środowiska przyrodniczego nie ma dobrej lokalizacji dla składowisk odpadów. Prawidłowy wybór i usankcjonowania prawne dla lokalizacji składowiska to najtrudniejsze zadania w całości kształcie gospodarki odpadami bytowymi. Szczególne wymagania stawiane są warunkom lokalizacyjnym składowisk, które mogą powodować znaczne pogorszenie warunków przyrodniczych w sąsiedztwie i utrudniać korzystanie z terenu [9]. Najważniejszym jest wybranie takiej lokalizacji, która ograniczy do minimum nieuniknione skutki ekologiczne, jak również wielkość nakładów ponoszonych na takie urządzenie składowisk, aby jego wpływ na środowisko był jak najmniejszy [24].

Rozporządzenie do Ustawy o odpadach z roku 2013 [20], jak również wcześniej obowiązujące z 2003 r. [13], jasno określają zasady lokalizacji składowisk odpadów oraz warunki geologiczne, hydrogeologiczne, hydrologiczne, jakie powinny być spełnione przy ich potencjalnym usytuowaniu. Przed wydaniem decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu dla składowisk odpadów należy w rejonie potencjalnego terenu pod składowisko wykonać szereg badań w zakresie hydrologii, hydrogeologii i geologii inżynierskiej, aby zredukować do minimum rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w głąb powierzchni ziemi. Podstawą jest wykonanie wierceń (ich liczba uzależniona jest od wielkości składowiska odpadów), które mają za zadanie przybliżyć budowę geologiczną terenu [18–20, 23]. Ich głębokość powinna być wystarczająca do zbadania warstwy wodonośnej i warstwy izolującej. Do dokładnej analizy terenu, w obrębie, którego ma powstać składowisko odpadów, istotnym jest też posłużenie się otworami archiwalnymi w pobliżu projektowanej inwestycji, jak również mapami topograficznymi, geologicznymi i hydrogeologicznymi. Podczas wykonywania otworów wiertniczych należy pobrać próby gruntu do wykonania analizy uziarnienia oraz laboratoryjnego oznaczenia współczynnika filtracji k z każdej warstwy stanowiącej wydzielenie litologiczne. Bada się także pojemność sorpcyjną gruntu. Należy również przeprowadzić obserwacje hydrogeologiczne i wykonać polowe pomiary współczynnika filtracji dla warstw

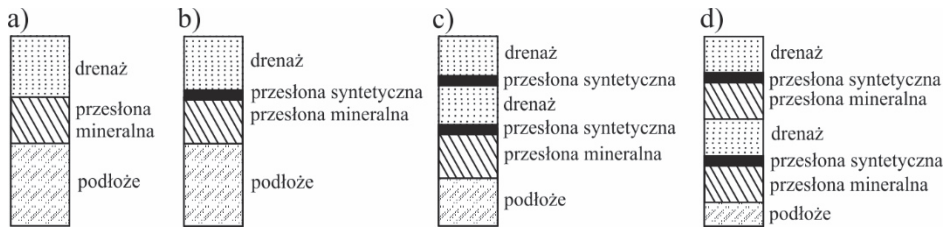
wodonośnych [21]. Przy skomplikowanych warunkach geologicznych dodatkowo wykonuje się rozpoznanie budowy górotworu metodami geofizycznymi, a w szczególności metodą elektrooporową lub sejsmiczną.

Składowisko najlepiej jest sytuować tak, aby miało naturalną barierę geologiczną, która będzie uszczelnieniem podłoża, jak i ścian bocznych. Dla składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne minimalna miąższość naturalnej bariery geologicznej nie powinna być mniejsza niż 1,0 m, a wartość współczynnika filtracji gruntu budującego naturalną barierę to $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s. Bariera powinna mieć rozciągłość poziomą przekraczającą obszar projektowanego składowiska odpadów. Ważnym kryterium lokalizacji składowisk jest zapewnienie, aby przewidywany najwyższy piezometryczny poziom wód podziemnych był położony, co najmniej 1 m poniżej poziomu projektowanego wykopu dna składowiska. W warunkach naturalnych trudno jest znaleźć teren, który charakteryzowałby się zalecanymi warunkami geologicznymi, dlatego też stosowane są sztuczne bariery o minimalnej miąższości 0,5 m, które zapewniają przepuszczalność nie większą niż w przypadku bariery naturalnej. Dodatkowo, do barier naturalnych czy sztucznych stosuje się izolację syntetyczną, która powinna być zaprojektowana przy uwzględnieniu składu chemicznego odpadów i warunków geotechnicznych składowania [20].

Głównym zadaniem uszczelnienia podstawy i skarp jest stworzenie nieprzepuszczalnej bariery uszczelniającej ochraniającej podłoże gruntowe przed przenikaniem odcieków i gazów składowiskowych do niższych warstw podłoża i wód gruntowych, a także odprowadzenie powstałego odcieku do systemu oczyszczania [26]. Sposób wyboru i wykonania uszczelnienia zależy przede wszystkim od rodzaju składowiska, budowy geologicznej i hydrogeologicznej podłoża oraz od rodzaju składowanych odpadów [2]. Na rysunku 2 podano zalecane układy warstw uszczelniających w podstawie składowiska.

Zaleca się zróżnicowanie doboru warstw uszczelnienia konstrukcji składowanych odpadów komunalnych w zależności od stwierdzonych warunków geologicznych podłoża oraz gabarytów składowiska. Brandl [1] zaznacza, że w przypadku odpadów niebezpiecznych, uszczelnienie podstawy powinno być wielowarstwowe. Zabezpieczenia te są konieczne z uwagi na to, iż uszkodzenia geomembrany są bardzo częste i mogą powstać podczas jej produkcji, transportu, rozkładania na składowisku, czy też w trakcie samej eksploatacji samego składowiska. Uszkodzenie takiej geomembrany powoduje rozszczelnienie całej konstrukcji, dlatego też

umieszczenie mineralnej warstwy uszczelniającej poniżej geomembrany minimalizuje przeciek przez otwór. Prędkość przepływu odcieku, a co za tym idzie zanieczyszczeń jest znacznie mniejsza przez uszczelnienie mieszane niż przez geomembranę lub warstwę mineralną stosowaną osobno [11, 26]. Najczęściej stosowanymi materiałami, które służą do budowy mineralnych warstw uszczelniających są ropy i gliny zwałowe, doszczelnione bentonitem, spoiwami hydraulicznymi lub krzemionką.



Rys. 2. Proponowane do stosowania w Polsce profile uszczelnień podstawy składowisk odpadów [5]: a) pojedyncze, wyłącznie mineralne, b) pojedyncze-złożone, mineralno-syntetyczne, c) podwójne, w wielu różnych możliwych wariantach konstrukcji; zasadą są tu dwie warstwy drenażowe, d) podwójne-złożone

Fig. 2. Profile landfill base seals proposed for use in Poland [5]: a) single, only mineral, b) single-complex, mineral and synthetic, c) double, many different possible variants of the structure; there are two drainage layers as a principle, d) double-complex

Mimo stosowania sztucznych barier, składowiska odpadów, powinny być lokalizowane w miejscach, gdzie ich negatywny wpływ na warunki gruntowo-wodne będzie jak najmniejszy. Najlepszymi terenami byłyby, więc obszary gdzie warstwa wodonośna zalega głęboko, a ponad nią występują utwory słabo lub praktycznie nieprzepuszczalne w postaci gruntów spoistych. Taka sytuacja geologiczna i dodatkowo wykonana bariera sztuczna byłyby czynnikami w bardzo dużym stopniu minimalizującymi wpływ składowanych odpadów na wody podziemne.

3. Badania własne wpływu składowisk na wody podziemne

3.1. Obiekty badawcze

Obiektami badawczymi są gminne składowiska odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne, położone w województwie podlaskim.

Zgodnie z Wojewódzkim Planem Gospodarki Odpadami na lata 2009–2012 [8], składowiska te zostały zamknięte ze względu na brak niezbędnego, wymaganego wyposażenia przewidzianego w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 23 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk [13]. Do analizy wzięto pod uwagę 3 składowiska i nazwano je *składowisko A*, *składowisko B*, *składowisko C*. Składowisko A eksploatowane było od roku 1989 do 2009, składowisko B od roku 1990 do 2011, zaś składowisko C od roku 2000 do 2011. Składowiska A i B mają charakter podziemno-nadpodziemny, a składowisko C występuje w formie naziemnego zwałowiska, tzw. hałdy nasypowej.

Na składowiskach deponowane były głównie niesegregowane odpady komunalne wytwarzane w gospodarstwach domowych i pochodzące z terenu gmin. W widocznej masie zgromadzonych odpadów przeważały odpady typowo wiejskie, z przewagą odpadów nieorganicznych, takie jak: opakowania z tworzyw sztucznych, szkło, ceramika, popiół, gruz.

Każde z omawianych składowisk zajmuje powierzchnię do 1 ha, a dobową ilość przyjmowanych odpadów kształtowała się tam poniżej 10 ton/dobę. Na składowiskach brak było urządzeń wodociągowych, kanalizacyjnych, elektroenergetycznych, drenarskich (systemu rowów drenażowych i zbiornika na odcieki), właściwego zaplecza sanitarnego i wyposażenia technicznego – brak wagi samochodowej oraz brodzika do mycia i dezynfekcji kół pojazdów opuszczających składowiska. Nie były również prowadzone badania monitoringowe. Piezometry zostały wykonane dopiero przed zamknięciem składowisk. Deponowanie odpadów odbywało się w byłych wyrobiskach po wyeksploatowanych gruntach piaszczysto-żwirowych bez żadnych zabezpieczeń sztucznych.

3.2. Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne terenu pod poszczególnymi składowiskami

Wszystkie badane składowiska leżą w rejonie zalegania pokrywy czwartorzędowej zalegającej do głębokości ok. 150–180 m. Budowa geologiczna utworów czwartorzędowych związana jest genetycznie z działalnością denudacyjną, akumulacyjną i erozyjną, zachodzącą w czasie kolejnych transgresji i regresji lądolodu skandynawskiego w okresie zlodowacenia środkowopolskiego. Z uwagi na zakres tematu skupiono się tu na przypowierzchniowej budowie geologicznej.

Składowisko A

Utwory przypowierzchniowe występują tu, jako grunty piaszczysto-żwirowe z przewarstwieniami pylastymi do głębokości ok. 12 m. W spągu występuje seria utworów gliniastych do głębokości ok. 25 m. W strefie głębokości od 25 do ok. 67 m zalega miąższy kompleks utworów zastoiskowych w postaci serii pylasto-ilastej, pod którym występuje użytkowy nawodniony poziom wodonośny związany z utworami fluwioglacjalnymi różnej granulacji. Z gruntami piaszczysto-żwirowymi związana jest przypowierzchniowa warstwa wodonośna o swobodnym zwierciadle kształtującym się na głębokości 7,3–7,6 m poniżej terenu. Warstwa ta nie jest odizolowana od powierzchni terenu gruntami spoistymi. Pod względem morfologicznym, składowisko zlokalizowane jest na lokalnym wyniesieniu ze spadkiem terenu w kierunku północno-zachodnim, w stronę pobliskiego ciek, przepływającego w odległości ok. 500 m na zachód od badanego terenu. Ciek ten stanowi lokalną bazę drenażową dla wód przypowierzchniowych. Główny użytkowy poziom wód podziemnych występuje pod miąższym kompleksem utworów zastoiskowych na głębokości ok. 67 m.

Składowisko B

Pierwsza przypowierzchniowa warstwa wodonośna związana jest z utworami piaszczystymi i piaszczysto-żwirowymi częściowo zaglinionymi. Warstwa ta częściowo przykryta jest płatami utworów gliniastych. Kierunek spływu wód przypowierzchniowych w nawierconej warstwie wodonośnej określony został na NE, zgodnie z kierunkiem spływu wód pobliskiej rzeki mającej swe źródła w odległości ok. 1000 m na SE. Warstwa wodonośna ma charakter swobodnego, jak i napiętego zwierciadła. Ciśnienie hydrostatyczne spowodowane jest wyżej leżącymi gruntami spoistymi. Główny użytkowy poziom wodonośny wykorzystywany do zbiorowego zaopatrzenia w wodę mieszkańców gminy, występuje poniżej głębokości 55 m i jest odizolowany od wód przypowierzchniowych kompleksem słabo przepuszczalnych glin zwałowych o miąższości ponad 30 m.

Składowisko C

Utwory przypowierzchniowe stanowią pokłady piaszczyste i piaszczysto-żwirowe o miąższości od ok. 3 do ok. 15 m, z przewarstwieniami pylastymi. W ich spągu występuje seria utworów gliniastych zalegających do głębokości ok. 50 m, pod którymi występuje użytkowy nawodniony poziom wodonośny związany z utworami fluwioglacjalnymi, tj. piaskami różnej granulacji. Z niespoistymi gruntami powierzchniowymi

związana jest warstwa wodonośna o swobodnym zwierciadle zalegającym na głębokości 0,8–1,2 m. Warstwa nie jest odizolowana od powierzchni terenu utworami słabo przepuszczalnymi. Wody te są w kontakcie hydraulicznym ze źródłiskami pobliskiej rzeki znajdującej się w odległości ok. 90 m na północny-wschód, która stanowi lokalną bazę drenażową. Generalnie kierunek spływu wód przypowierzchniowych jest skierowany na SE, tj. zgodnie ze spadkiem terenu, w kierunku pobliskiej rzeki. Główny użytkowy poziom wodonośny wykorzystywany do zbiorowego zaopatrzenia w wodę mieszkańców gminy, występuje poniżej głębokości 50 m i jest przykryty zwartym, mięszszym kompleksem glin zwałowych stanowiących naturalną izolację dla tych wód przed potencjalnymi zanieczyszczeniami ze strony składowiska.

Tabela 1. Klasyfikacja właściwości filtracyjnych gruntów na podstawie [25]
Table 1. Classification of filtration properties of soils based on [25]

Rodzaj skał	Filtracja pozioma		Filtracja pionowa		
	k [m/s]	Klasa przepuszczalności	k [m/s]	Klasa	
				izolacyjność	przeiękalność
Żwiry, żwiry piaszczyste	$>10^{-3}$	bardzo wysoka (bardzo dobrze przepuszczalne)	$> 10^{-6}$	nie-izolujące	bardzo dobra
Piaski grubo- i różnoziarniste	$10^{-4} - 10^{-3}$	wysoka (dobrze przepuszczalne)			
Piaski drobnoziarniste jednorodnie, różnoziarniste niejednorodnie	$10^{-5} - 10^{-4}$	średnia (średnio przepuszczalne)			
Piaski pyłaste i gliniaste, pyły piaszczyste	$10^{-6} - 10^{-5}$	słaba (słabo przepuszczalne)			
Gliny piaszczyste, ły piaszczyste	$10^{-8} - 10^{-6}$	niska (bardzo słabo przepuszczalne)	$10^{-8} - 10^{-6}$	bardzo słabo izolujące	dobra
Gliny pyłaste, ły piaszczyste	$10^{-12} - 10^{-8}$	bardzo niska (pół-przepuszczalne)	$10^{-10} - 10^{-8}$	słabo izolujące	średnia
ły			$10^{-12} - 10^{-10}$	dobrze izolujące	słaba

Objaśnienia: k – współczynnik filtracji.

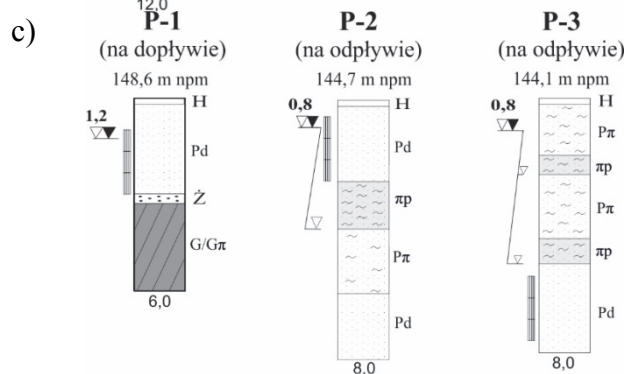
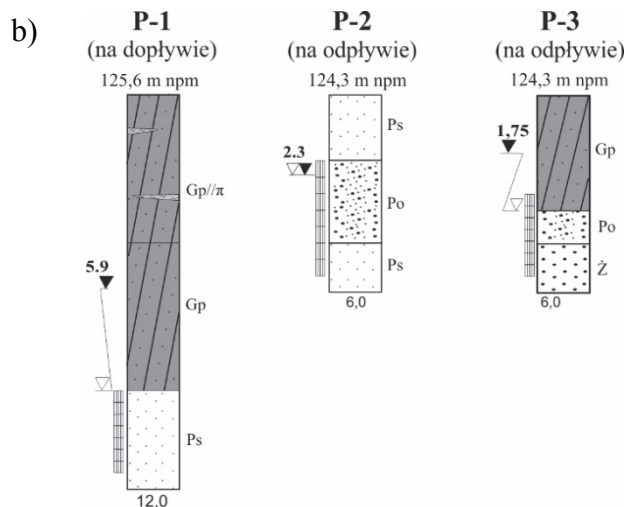
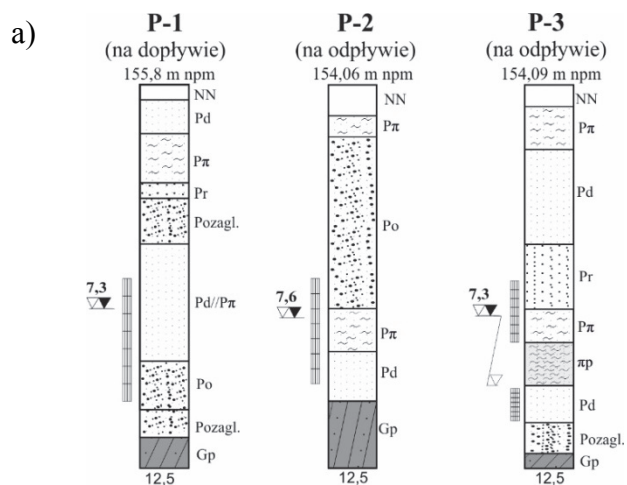
Podsumowując, składowiska odpadów zostały usytuowane bezpośrednio na gruntach piaszczystych i piaszczysto-żwirowych o wysokich współczynnikach filtracji, których wartości średnie podano w tabeli 1 według [25]. Poniżej składowanych odpadów zalega przypowierzchn-

niowa warstwa wodonośna, która nie jest odizolowana od ognisk zanieczyszczeń, jakim są składowane odpady, a więc odcieki wytworzone przez odpady swobodnie migrują do wód tej warstwy i mogą być przenieszone na dalsze odległości wraz z ich spływem. Jedynie w rejonie składowiska B częściowo od powierzchni terenu występują utwory słabo przepuszczalne o niewielkiej miąższości. Pozytywnym faktem jest to, iż użytkowe poziomy wodonośne wykorzystywane do zbiorowego zaopatrzenia w wodę mieszkańców poszczególnych gmin odizolowane są od powierzchni terenu kilkudziesięciometrowym nadkładem utworów słabo lub praktycznie nieprzepuszczalnych. Niestety, przy składowaniu odpadów w miejscach gruntów o wysokiej przepuszczalności, doprowadzono do degradacji wód przypowierzchniowych, z których niewątpliwie korzystają gospodarstwa domowe (w postaci studni kopanych). Unormowania prawne i wytyczne Unii Europejskiej sprawiły, iż aktualnie takie składowiska są zamykane i rekultywowane, co niewątpliwie będzie przyczyniało się do poprawy stanu środowiska.

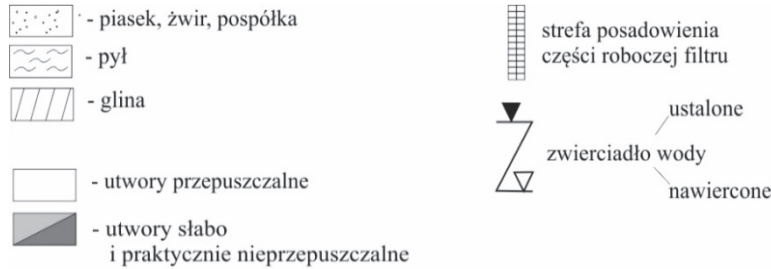
3.3. Monitoring badanych składowisk odpadów

Składowiska odpadów komunalnych, podczas ich eksploatacji i jeszcze przez lata po jej zakończeniu, stanowią potencjalne ogniska zanieczyszczeń. Zgodnie z wytycznymi [20], składowiska odpadów powinny być objęte kontrolą odnoszącą się do wód podziemnych. Podczas eksploatacji poziom oraz skład wód podziemnych należy kontrolować co 3 miesiące. W fazie poeksploatacyjnej, tzn. po zamknięciu składowiska, pomiary należy wykonywać co 6 miesięcy przez kolejne 30 lat, zaś w fazie przedeksploatacyjnej pomiar należy wykonać jednorazowo w celu poznania tła hydrogeochemicznego, które to stanowi ocenę stanu wyjściowego. Próby wody do badań fizyko-chemicznych należy pobierać z otworów obserwacyjnych, tzw. piezometrów.

Na badanych składowiskach odpadów otwory obserwacyjne zostały wykonane dopiero przed samym ich zamknięciem. Wiercenia wykonano po obwodzie składowisk, przy czym jeden został zlokalizowany na dopływie wód podziemnych w rejon składowiska, a dwa pozostałe na odpływie tych wód. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki wierceń w postaci profili geologicznych, obejmujących litologię oraz zaleganie przypowierzchniowych warstw wodonośnych dla poszczególnych składowisk odpadów. Na każdym składowisku piezometr P-1 został zlokalizowany na dopływie wód podziemnych, zaś otwory P-2, P-3 na odpływie tych wód.



OBJAŚNIENIA:



G – glina, Gp – glina piaszczysta, π – pył, $\pi\pi$ – pył piaszczysty, $P\pi$ – piasek pylasty, Pd – piasek drobnoziarnisty, Ps – piasek średnioziarnisty, Pr – piasek gruboziarnisty, Po – pospółka, Ż – żwir, H – gleba, NN – nasyp niebudowlany

Rys. 3. Wykonane otwory badawcze: a) składowisko A, b) składowisko B, c) składowisko C

Fig. 3. Made drill holes: a) landfill A, b) landfill B, c) landfill C

Analizę jakości wód podziemnych w rejonie składowisk przeprowadzono na podstawie badań monitoringowych. Obejmowały one pomiar odczynu pH, przewodności elektrolitycznej właściwej, zawartości ogólnego węgla organicznego (OWO), sumy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) i metali ciężkich takich jak: cynk (Zn), miedź (Cu), ołów (Pb), kadm (Cd), chrom (Cr), rtęć (Hg). Wyniki badań porównano z wartościami granicznymi wskaźników, jakości wody wg klas jakości określonych Rozporządzeniem Ministra Środowiska [15] oraz w porównaniu z wytycznymi Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [14, 17], które zostały przedstawione w tabeli 2.

Podwyższone zawartości tych związków pochodzą z nagromadzonych w masie odpadowej wód odciekowych. Wody opadowe infiltrujące do wnętrza składowiska, jak również woda dostarczana wraz z odpadami i powstająca podczas biochemicznych przemian odpadów, stanowią źródło powstawania odcieków. Wody odciekowe są roztworem wielu substancji, produktów wielu różnych procesów zachodzących w złożu odpadów, m.in. ługowania, rozkładu, fermentacji, syntezy i wymiany [4]. Największe ilości odcieków są uwalniane przez składowisko w okresie eksploatacji, a krótko po jego zamknięciu ilość wytwarzanych odcieków spada aż do całkowitego zaniku.

Tabela 2. Wartości graniczne dla wskaźników jakości wody według klas oraz dla wody przeznaczonej do spożycia

Table 2. Limit values for water quality indicators by grades and also for drinking water

Rodzaj oznaczenia	Jednostka	Wartości graniczne					
		Klasy jakości wód podziemnych [15]					Wody przeznaczone do spożycia [14, 17]
		I	II	III	IV	V	
Odczyn	pH	6,5–9,5			<6,5 lub >9,5		6,5–9,5
Przewodność	μS/cm w 25°C	700	2500	2500	3000	>3000	2500
OWO	mg/l	5	10	10	20	>20	5
Cynk	mg/l	0,05	0,5	1	2	>2	-
Miedź	mg/l	0,01	0,05	0,2	0,5	>0,5	2,0
Ołów	mg/l	0,01	0,025	0,1	0,1	>0,1	0,025
Chrom	mg/l	0,01	0,05	0,05	0,1	>0,1	0,05
Rtęć	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,005	>0,005	0,01(mg/l)
WWA	mg/l	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005	>0,0005	0,001

Wyniki badań monitoringowych jakości wód przedstawiono w tabelach 3–5.

Z przeprowadzonej analizy wyników wody pobranej z piezometrów na **składowisku A** (tab. 3) wynika, iż wody pobierane z otworu obserwacyjnego nr 3 zlokalizowanego na odpływie wód podziemnych są w najgorszym stanie jakościowym. Zaznacza się podwyższoną przewodność elektrolityczną oraz zawartość ogólnego węgla organicznego, jak również podwyższoną zawartość WWA w stosunku do wód pobieranych z P-2 i P-1. W wodach pobranych jeszcze w trakcie eksploatacji składowiska zaobserwowano wyższą zawartość cynku i ołowiu w porównaniu do lat późniejszych. Na uwagę zwraca dość intensywnie rosnąca w czasie (nawet po zamknięciu składowiska) ilość WWA, która w 2007 r. zawierała się w zakresie < 1–6 ng/l, a w roku 2013 r. – w zakresie od 82,16 do 106,7 ng/l. Na rys. 4 przedstawiono na przykładzie piezometru P-3 (na odpływie) wykres zależności zmian WWA w czasie. Związki WWA są powszechne na starych składowiskach odpadów, z uwagi na fakt depozycji tu popiołów i żużli z palenisk domowych. Ze względu na mutagenne oddziaływanie stanowią zagrożenie dla zdrowia ludzi, dlatego ich zawartość w wodzie pitnej musi być kontrolowana [10].

Zauważono również podwyższone OWO oraz przewodność elektrolityczną, które cechują się zmienną zawartością w czasie.

Tabela 3. Wyniki badań jakości wody podziemnej na składowisku A

Table 3. Results of groundwater quality tests at the landfill A

Rodzaj oznaczenia	Jednostka	październik 2007r.	lipiec 2008r.	listopad 2009r.	maj 2010r.	lipiec 2011r.	lipiec 2012r.	styczeń 2013r.
Piezometr P-1 (na dopływie)								
Odczyn	pH	6,54	6,7	7,0	6,7	6,2	6,7	6,4
Przewodność	$\mu\text{S}/\text{cm w } 25^\circ\text{C}$	1250	1600	1119	1026	268	421	436
OWO	mg/l	2,9	7,8	23,8	2,04	1,92	1,50	2,4
Cynk	mg/l	0,26	0,025	0,04	0,027	0,017	0,027	0,042
Miedź	mg/l	0,011	0,018	<0,01	<0,01	0,015	<0,01	<0,01
Ołów	mg/l	0,041	<0,01					
Chrom	mg/l	<0,01						
Rtęć	mg/l	<0,005						
WWA	ng/l	6	4,18	11,4	72,27	61,59	39,92	106,7
Piezometr P-2 (na odpływie)								
Odczyn	pH	7,03	7,2	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1
Przewodność	$\mu\text{S}/\text{cm w } 25^\circ\text{C}$	520	587	625	556	644	652	614
OWO	mg/l	1,4	<2	<2	4,6	1,25	1,14	2,21
Cynk	mg/l	0,139	<0,01	0,04	0,045	<0,01	0,017	0,034
Miedź	mg/l	0,013	<0,01					
Ołów	mg/l	0,072	<0,01					
Chrom	mg/l	-	<0,01					
Rtęć	mg/l	0,007	<0,005					
WWA	ng/l	<1,0	1,09	10,4	46,8	48,8	50,42	91,13
Piezometr P-3 (na odpływie)								
Odczyn	pH	6,9	6,6	6,7	6,6	6,9	7,0	6,6
Przewodność	$\mu\text{S}/\text{cm w } 25^\circ\text{C}$	1390	2130	1383	1216	1412	1490	1936
OWO	mg/l	2,6	9,63	7,61	3,8	6,21	5,71	10,4
Cynk	mg/l	0,189	0,029	0,044	0,054	0,014	0,029	0,041
Miedź	mg/l	<0,01	0,011	<0,01	<0,01	0,012	<0,01	<0,01
Ołów	mg/l	0,071	0,071	<0,01				
Chrom	mg/l	-	0,017	<0,01				
Rtęć	mg/l	0,003	0,003	<0,005				
WWA	ng/l	3,0	1,06	22,6	51,38	53,34	53,67	82,16

Tabela 4. Wyniki badań jakości wody podziemnej na składowisku B

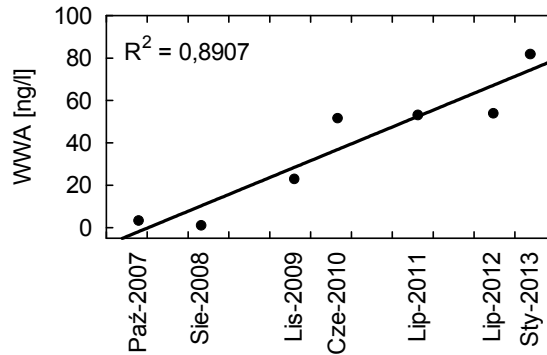
Table 4. Results of groundwater quality tests at the landfill B

Rodzaj oznaczenia	Jednostka	Piezometr P-1 (na dopływie)			Piezometr P-2 (na odpływie)			Piezometr P-3 (na odpływie)		
		listopad 2011r.	wrzesień 2012r.	kwiecień 2013r.	listopad 2011r.	wrzesień 2012r.	kwiecień 2013r.	listopad 2011r.	wrzesień 2012r.	kwiecień 2013r.
Odczyn	pH	6,9	7,3	7,23	7,1	6,8	6,87	6,9	6,8	6,86
Przewodność	μS/cm w 25°C	749	453	427,8	675	589,3	576,8	3276	978,6	986,3
OWO	mg/l	5,59	<3	<3	7,48	3,28	<3	29,3	3,54	3,3
Cynk	mg/l	<0,1	<0,05	0,07	<0,1	0,13	0,10	0,1	0,09	0,09
Miedź	mg/l	<0,05	<0,05	0,07	<0,05	<0,05	0,08	0,15	<0,05	0,08
Ołów	mg/l	<0,01			<0,01			<0,01		
Chrom	mg/l	<0,01			<0,01			<0,01		
Rtęć	mg/l	0,0067	<0,005		0,0091	<0,005		0,0075	<0,005	
WWA	ng/l	-	20	20	-	40	20	<20	<20	<20
Azotany	mg/l	18,1	-	-	34,9	-	-	45,6	-	-

Tabela 5. Wyniki badań jakości wody podziemnej na składowisku C

Table 5. Results of groundwater quality tests at the landfill C

Rodzaj oznaczenia	Jednostka	Piezometr P-1 (na dopływie)				Piezometr P-2 (na odpływie)				Piezometr P-3 (na odpływie)			
		listopad 2011r.	lipiec 2012r.	grudzień 2012r.	kwiecień 2013r.	listopad 2011r.	lipiec 2012r.	grudzień 2012r.	kwiecień 2013r.	listopad 2011r.	lipiec 2012r.	grudzień 2012r.	kwiecień 2013r.
Odczyn	pH	6,9	7,0	6,5	6,8	6,6	6,2	6	6,2	7,2	6,5	6,4	6,2
Przewodność	μS/cm w 25°C	705	315	378	284	1030	121	129	176	917,5	1120	1226	1486
OWO	mg/l	5,4	4,2	4,8	3,3	8,7	4,3	4,5	3,3	11	11,5	11,8	13,7
Cynk	mg/l	<0,05				<0,05				<0,05			
Miedź	mg/l	<0,05				<0,05				<0,05			
Ołów	mg/l	<0,1				<0,1				<0,1			
Chrom	mg/l	<0,01				<0,01				<0,01			
Rtęć	mg/l	<0,005				<0,005				<0,005			
WWA	ng/l	-	57	36	36	-	<57	<36	36	<2	57	36	<36
Azotany	mg/l	8,5	-	-	-	19,3	-	-	-	45,6	-	-	-



Rys. 4. Zależność zmian zawartości WWA w czasie w wodach pobranych z piezometru P-3 (składowisko A)

Fig. 4. Relationship of the WWA content changes in time for water from the piezometer P-3 (landfill A)

Analiza (tab. 4) wykazała, iż woda pobrana z otworu P-3 i P-2, usytuowanych na odpływie wód podziemnych z rejonu **składowiska B**, charakteryzuje się gorszymi parametrami niż woda pobierana z piezometru P-1. Szczególnie widoczne jest to w pierwszym przeprowadzonym badaniu, wykonanym jeszcze w trakcie eksploatacji składowiska, bezpośrednio po wykonaniu otworów obserwacyjnych. Zaobserwowano wtedy przede wszystkim podwyższoną przewodność oraz wyższe zawartości węgla organicznego (OWO) i miedzi, jak również podwyższone zawartości azotanów. Wody pobrane z piezometru P-3 z uwagi na przewodność elektrolityczną oraz zawartość ogólnego węgla organicznego zaliczone zostały do V klasy jakości. Na uwagę zwraca fakt, iż po zamknięciu i zrekultywowaniu składowiska odpadów powyższe parametry uległy polepszeniu, jedynie zawartość miedzi w wodzie w niewielkim stopniu nadal rośnie.

Dane z tabeli 5 wskazują przede wszystkim na podwyższone zawartości ogólnego węgla organicznego (OWO) oraz wyższą przewodność elektrolityczną wody pobieranej z piezometru na odpływie wód podziemnych P-3 z rejonu **składowiska C**. Wartości tych wskaźników rosną wraz z upływem czasu: OWO w zakresie od 11 do 13,7 mg/l, a przewodność w zakresie 917,5–1486 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Wody pobrane z piezometrów P-1 i P-2 jeszcze w trakcie eksploatacji składowiska miały wyższe wartości przewodności i zawartości OWO niż w kolejnych latach po zamknięciu skła-

dowiska. Pozostałe badane parametry są poniżej wartości granicznych dla I klasy jakości. Zaznacza się, iż badanie przeprowadzone bezpośrednio po odwierceniu piezometrów, tj. w trakcie składowania odpadów, wykazało podwyższone występowanie azotanów w wodach z piezometru P-3. Obecnie wody z rejonu piezometru P-1 i P-2 zaliczane są do I klasy jakości, zaś wody z P-3 – biorąc pod uwagę przewodność do II klasy, a ze względu na zawartość OWO – do III klasy jakości.

4. Wnioski

1. Lokalizowanie składowisk odpadów bez żadnych zabezpieczeń, bezpośrednio w obrębie utworów o wysokich współczynnikach filtracji, wpływa na zanieczyszczenie zalegającej poniżej przypowierzchniowej warstwy wodonośnej. Wody pobrane z piezometrów zlokalizowanych na odpływie wód z rejonu składowisk cechują się gorszym składem jakościowym niż wody z piezometrów usytuowanych na dopływie wód podziemnych. Szczególnie zauważa się podwyższone zawartości OWO i podwyższoną przewodność elektrolityczną. Wiąże się to niewątpliwie z procesami gnilnymi w deponowanych odpadach i infiltracją wody opadowej, lęgającej związku zanieczyszczające, które są wprowadzone w ten sposób do wód podziemnych.
2. W obrębie składowiska B, którego budowa charakteryzuje się występowaniem utworów gliniastych przykrywających częściowo warstwę wodonośną, zauważono, iż nawet przy niepełnej izolacji po zaprzestaniu deponowania odpadów stan jakościowy wód w tym rejonie się poprawił, co świadczy o zatrzymywaniu zanieczyszczeń przez te utwory.
3. Składowiska A i C, których podłoże zbudowane jest wyłącznie z utworów niespoistych o wysokich współczynnikach filtracji, cechuje stale pogarszający się stan jakościowy wód.
4. W rejonie składowiska odpadów A – na odpływie wód podziemnych stwierdzono intensywny wzrost zawartości WWA, w przypadku piezometru P-3 od 3 do 82,16 ng/l. Zaobserwowano również podwyższone OWO oraz przewodność elektrolityczną. W rejonie składowiska odpadów C w piezometrze P-3 obserwuje się ciągły wzrost w czasie OWO (od 11 do 13,7 mg/l) oraz przewodności (od 917,5–1486 $\mu\text{S/cm}$).
5. Przypowierzchniowa warstwa wodonośna jest pewnego rodzaju „wskaźnikiem” dających informację o szkodliwym oddziaływaniu składowiska odpadów i potrzebie podjęcia działań remediacyjnych w celu przywróce-

nia dobrego stanu tych wód, aby nie dopuścić do przenikania zanieczyszczeń do poziomu wglębnego użytkowego, cechującego się dobrym składem fizyko-chemicznym. Nakaz zamykania badanych składowisk był niewątpliwie słuszny, gdyż dalsze gromadzenie odpadów z pewnością wpływałoby na dalszą degradację środowiska.

Literatura

1. **Brandl H.:** *Mineral liners for hazardous containment*. Géotechnique. 42, 57–65 (1992).
2. **Górecka A, Koda E.:** *Analiza możliwości ograniczenia zagrożeń środowiska wodno-gruntowego, wynikających z eksploatacji modernizowanego składowiska odpadów komunalnych*. Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska. 49, 48–62 (2010).
3. **Koda E.:** *Geośrodowiskowe aspekty rekultywacji składowisk komunalnych*. Inżynieria Morska i Geotechnika. 3, 134–151 (2009).
4. **Łuczak-Wilamowska B.:** *Uwarunkowania geologiczne składowania odpadów komunalnych*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego. 455, 1–142 (2013).
5. **Majer E., Wysokiński L.:** *Badania gruntów i kontrola jakości wykonanych z nich przestroni izolacyjnych na składowiskach odpadów*. Instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej, Nr 411, Warszawa 2005.
6. **Michalkiewicz M.:** *Składowiska odpadów jako źródła skażenia mikrobiologicznego. Budowa i eksploatacja bezpiecznych składowisk odpadów*. Wydawnictwo Abrys, Gdynia 2009.
7. **Piotrowska H., Kwiatkowski-Blumhl J., Litwin B.:** *Zbiór zaleceń do programowania, projektowania i eksploatacji wysypisk odpadów komunalnych MGPIB*. Wydawnictwo OBREM, Łódź 1993.
8. *Plan gospodarki odpadami dla województwa podlaskiego*. P. Szyszkowski (red.), Urząd Wojewódzki w Białymstoku, Białystok 2009.
9. **Rosik-Dulewska C.:** *Podstawy gospodarki odpadami*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
10. **Rosik-Dulewska C., Karwowska U, Ciesielczuk T.:** *Migracja WWA z nieuszczelnionego składowiska odpadów do wód podziemnych*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 9, 335–342 (2007).
11. **Rowe R. K.:** *Long-term performance of contaminant barrier system*. Géotechnique. 55, 631–678 (2005).
12. *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 1998 r. w sprawie szczegółowych zasad usuwania, wykorzystywania i unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych* (Dz.U. nr 145, poz. 942).

13. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów.* (Dz.U. nr 61, poz.549).
14. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007r w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi* (Dz.U. nr 61, poz. 417).
15. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 lipca 2008 roku w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu wód podziemnych* (Dz.U. nr 143, poz. 896).
16. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 lutego 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów* (Dz.U. nr 39, poz. 320).
17. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi* (Dz.U. nr 72, poz. 466).
18. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji* (Dz.U. nr 288 poz. 1696).
19. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej* (Dz. U. 2014, poz. 596).
20. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów* (Dz.U. nr 0 poz. 523).
21. **Selvadurai, A. P. S., Najari, M.:** *Laboratory-scale hydraulic pulse testing: influence of air fraction in cavity on estimation of permeability.* Geotechnique. 65, 126–134 (2015).
22. **Sobik-Szoltyssek J., Bień J. B., Milczarek M.:** *Analiza współczynnika filtracji w aspekcie możliwości stosowania alternatywnych materiałów do budowy barier izolacyjnych na składowiskach odpadów.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 15, 1393–1410 (2013).
23. *Ustawa z dnia 9 czerwca 2011r „Prawo geologiczne i górnicze”* (Dz. U. Nr 163, poz. 981).
24. **Wiater J.:** *Wpływ składowisk odpadów komunalnych na jakość wód podziemnych i właściwości gleb.* Inżynieria Ekologiczna. 26, 133–145 (2011).
25. **Witeczak S., Adamczyk A.:** *Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania.* PIO. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1994.
26. **Zabielska-Adamska K.:** *Popiół lotny jako materiał do budowy warstw uszczelniających.* Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2006.

Influence of Location of Landfills on Groundwater Quality

Abstract

Since recently localization, building, and exploitation of landfill sites in Poland have been taking place without any guidelines and legal regulations. As a result Poland, in comparison to other European Union countries, does not score well in this respect. Unfortunately landfills, particularly from the rural area, quite often have been stored directly on the natural grounds without any protection in excavation after the exploitation of aggregate.

The aim of this article is to indicate the elements that should be taken into account during structure design, or expansion of the landfills, by focusing particularly on the groundwater quality of the terrain. In order to stress the significance of this subject, three examples of the municipal landfills that have been located in the sites of adverse geological conditions are presented, and the effect of it on the groundwater quality was carried out. Tested landfills have been located mainly within the limits of the non-cohesive soils with high filtration coefficients without any protection. In every case, a subsurface water-bearing layer is deposited directly under the stored landfills. Observation for analyzed landfills were made just before their closing but still during the exploitation. Therefore, the analysis regards the period from the formation of the landfill monitoring wells till today when the landfills are already closed and reclaimed. In the water samples, which were collected according to the guidelines, the following indicators were taken into account and analyzed: reaction pH, proper electrolytic conductivity, total organic carbon, heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg), total polycyclic aromatic hydrocarbons.

In all the tested landfills was found higher concentrations of groundwater's pollution indicators in landfill monitoring wells located on the outlet of these waters than in the landfill monitoring wells located on their supply. An increased total organic carbon content and higher electrolytic conductivity and content of heavy metals such as copper and zinc was specifically observed. Increased contents of these indicators prove a negative impact of landfills on the water environment. Consequently, the order to close these landfills was justified, as further storage of these landfills would have a bad impact on the groundwater quality, as a result of which a complete degradation of the water-bearing level would take place. As a consequence of the cessation of the exploitation, the quality of water has improved within the limits of the landfills where the geological conditions were the best, namely, even a discontinuous layer of the poorly permeable formations stored above the water-bearing layer had

a positive impact and stopped the pollution, disallowing their further migration into the highly permeable formations. In the case of the landfills situated directly on the soils of high filtration coefficients, the indicators of negative influence of deposited landfills increase even after the closing of the researched landfill sites. In this case, a further analysis of monitoring research is needed in order to see after how many years after the shutdown the landfills would cease to be damaging for the waters of the subsurface water-bearing layer.

Słowa kluczowe:

nieszczelnione składowiska odpadów, warunki geologiczne, jakość wód podziemnych, monitoring, piezometr

Keywords:

leaky landfill, geological conditions, groundwater quality, monitoring, piezometer