

**Eugeniusz KODA, Michał STĘPIEŃ**

*Katedra Geoinżynierii  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa  
Department of Geotechnical Engineering  
Warsaw Agricultural University  
Nowoursynowska St. 166, 02-787 Warsaw*

## **ZASTOSOWANIE PIONOWYCH PRZESŁON PRZECIWFILTRACYJNYCH WOKÓŁ SKŁADOWISK ODPADÓW**

### **APPLICATION OF VERTICAL BENTONITE BARRIERS SURROUNDING SANITARY LANDFILLS**

*Both, landfills and other waste facilities are the main sources of the high leachate pollution. If not designed properly, this leachate may pollute groundwater, soil and surface water. The leachate containment system is the most critical and expensive element of the landfill construction. The current standard method of the leachate containment is a basal liner installed at the bottom of the entire landfill area. For old landfills, the submerged counterflow system should be used as an alternative method. This system allows leachate to flow freely to the water table zone, which is contained by a perimeter cut-off wall barrier and natural geohydrologic barriers. The paper presents the use of submerged counterflow system for groundwater protection of two old sanitary landfills localized nearby Warsaw. The submerged counterflow system consists of a bentonite cut-off wall barrier in order to protect the first aquifer against the transport of pollutants. The permeability coefficient for the barrier wall is below  $10^{-9}$  m/s. The depth of the barrier wall depends on subsoil conditions. Additional protection against the migration of pollution is assured by the flow direction from the vicinity to the leachate drainage. It will also protect the bentonite material against degradation, caused by the leachate. The control of the effectiveness of the cut-off wall barrier performance is available within the local groundwater monitoring. The influence of the cut-off wall barrier on the change of the groundwater flow conditions around the landfill should be analysed with numerical methods.*

## **1. Wstęp**

Większość wysypisk odpadów komunalnych eksploatowanych w Polsce nie spełnia wciąż wymaganych obecnie norm bezpieczeństwa (brak szczelnej izolacji, drenażu odcieków, odgazowania, ukształtowania bryły i przykrycia). Zlokalizowane są one często na terenach sprzyjających migracji zanieczyszczeń do wód gruntowych (grunty

przepuszczalne, wysoki poziom wody gruntowej). Przez kilkanaście lat składowania odpadów tereny, a szczególnie wody podziemne, wokół takich wysypisk zostały silnie zanieczyszczone. Konieczne jest wówczas wykonanie rozwiązań dla powstrzymania dalszego zanieczyszczenia poprzez izolację tych wysypisk od wód gruntowych. W przypadku występowania w podłożu warstwy słabo przepuszczalnej na stosunkowo niewielkiej głębokości (od kilku do około 30m), izolację wysypiska od wód gruntowych można osiągnąć stosując pionowe przesłony przeciwfiltracyjne (mineralne lub sztuczne), uzupełniane opaskowym drenażem odcieków. Tego typu system został wykonany wokół wysypisk Łubna i Radiowo, zlokalizowanych w rejonie Warszawy [3].

Skuteczne działanie przesłony przeciwfiltracyjnej jest uwarunkowane zapewnieniem dobrej jakości wykonania, kontrolowanej na etapie realizacji i po wykonaniu [4, 5, 6]. Wpływ przesłony na zmianę warunków przepływu wód podziemnych w rejonie wysypiska powinien być modelowany z zastosowaniem metod numerycznych i kontrolowany w ramach monitoringu lokalnego.

## 2. Wpływ wysypisk odpadów na wody podziemne

Najpoważniejszym problemem związanym ze składowaniem odpadów komunalnych jest powstawanie silnie zanieczyszczonych odcieków, które mogą migrować poza wysypisko powodując postępującą degradację wód podziemnych. Do powstawania odcieków przyczynia się przede wszystkim rozkład odpadów i infiltracja opadów atmosferycznych przez korpus wysypiska.

Na podstawie licznych badań stwierdzono, że z wysypisk odpadów komunalnych migruje szereg substancji organicznych i mineralnych, które oddziałują na stężenie większości makroskładników oraz właściwości fizyczne, chemiczne, biologiczne i organoleptyczne wód podziemnych. W odciekach z wysypisk stężenia makroskładników są na ogół znacznie wyższe niż w typowych ściekach komunalnych. Należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką utlenialność i zasolenie, natomiast metale ciężkie nie występują w dużych stężeniach[3].

W dalszej odległości od wysypiska obserwuje się stopniowe zmniejszanie się stężeń zanieczyszczeń w środowisku gruntowo-wodnym w wyniku różnych procesów, a w szczególności: rozcieńczenia, sorpcji, wymiany jonowej i utleniania.

Migracja zanieczyszczeń z wysypisk odpadów do wód podziemnych uwarunkowana jest przede wszystkim przepuszczalnością utworów występujących bezpośrednio w podłożu. W przypadku starych wysypisk, które powstały bez uszczelnienia podstawy, istnieje możliwość ograniczenia migracji zanieczyszczeń poprzez zastosowanie pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych stanowiących element projektu rekultywacji wysypisk. Wykonanie przesłon przeciwfiltracyjnych powinno być poprzedzone sporządzeniem dokumentacji hydrogeologicznej zawierającej:

1. dokładną lokalizację obiektu;
2. rodzaj, ilość i kategorię szkodliwości odpadów oraz opis przewidywanych rozwiązań technicznych dla zabezpieczenia przed oddziaływaniem na środowisko;
3. użytkowanie terenu w sąsiedztwie obiektu;
4. rodzaj zagrożeń w przeszłości i na etapie rekultywacji;
5. analizę materiałów archiwalnych;
6. rozpoznanie budowy geologicznej z uwzględnieniem litologii i miąższości poszczególnych warstw;

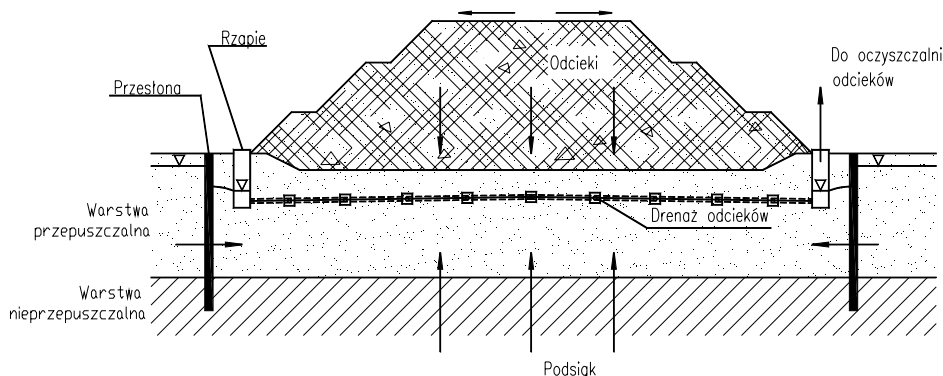
7. badania warunków hydrogeologicznych, a w szczególności pierwszego poziomu wodonośnego, połączeń hydraulicznych z poziomami niższymi, przepuszczalności warstw podłoża, kierunków i prędkości przepływu wód, wahań zwierciadła wód;
8. ocenę stanu zanieczyszczenia wód i gruntu;
9. ocenę możliwości realizacji i uwarunkowań planowanych robót rekultywacyjnych;
10. wytyczne monitoringu lokalnego jakości wód podziemnych i powierzchniowych.

Zakres badań hydrogeologicznych powinien uwzględniać specyfikę konkretnego obiektu, warunki lokalizacyjne i skalę zagrożeń dla środowiska. Właściwe rozpoznanie podłoża pozwala na wybór skutecznych zabiegów rekultywacyjnych.

Z punktu widzenia stosowania pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych, najbardziej istotne jest występowanie w podłożu wysypiska warstwy słabo przepuszczalnej na stosunkowo niewielkiej głębokości (od kilku do ok. 30m). Pozwala to na otoczenie całego wysypiska ściankami szczelnymi i połączenie ich z warstwą nieprzepuszczalną, tworząc zamkniętą „nieckę”. W ten sposób zostaje uniemożliwiona, lub przynajmniej zdecydowanie ograniczona, infiltracja odcieków do wód podziemnych. Gromadzące się w „niecce” odcieki muszą być przez odpowiedni system drenażowy odprowadzane na zewnątrz i poddane oczyszczeniu. Zaleca się utrzymanie poziomu wód wewnątrz niecki poniżej poziomu wód gruntowych na zewnątrz wysypiska (Rys. 1). Zapewnia to skierowanie potencjalnego strumienia przepływu w stronę wysypiska, co dodatkowo zabezpiecza przed zanieczyszczeniem wód na terenach przyległych i przed degradacją materiału, z którego jest wykonana przesłona.

Rys. 1. Zabezpieczenie przed migracją odcieków ze starego wysypiska odpadów z istniejącą w podłożu warstwą słaboprzepuszczalną

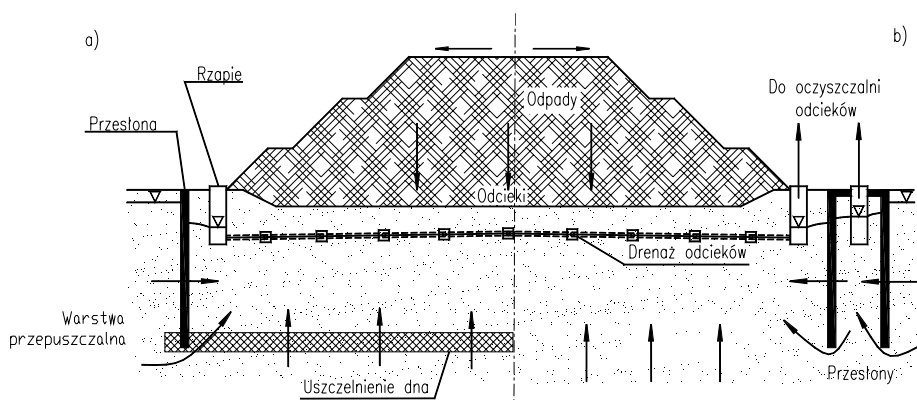
Fig. 1. Protection system against polluted leachate from the old sanitary landfill, where aquitard occurs in the subsoil



Sytuacja komplikuje się w przypadku, gdy w podłożu brak jest warstwy słabo przepuszczalnej, jest ona nieciągła (np. z oknami hydrogeologicznymi) lub występuje na znacznej głębokości. Możliwe jest w takim przypadku wykonanie pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych w połączeniu z uszczelnieniem dna wysypiska (Rys. 2a). Jednak rozwiązanie takie pozostaje w sferze teorii, gdyż wykonanie uszczelnienia dna wymagałoby przewiercania przez warstwy odpadów. Natomiast z powodzeniem stosowane są systemy podwójnych przesłon przeciwfiltracyjnych z ciągłym odpompowywaniem wody (Rys. 2b). Należy zwrócić uwagę na duże ilości ujmowanych w tym przypadku wód (dopływ do podstawy wysypiska), które należy poddać oczyszczeniu.

Rys. 2. Zabezpieczenie przed migracją odcieków ze starego wysypiska odpadów w przypadku braku warstwy słabo przepuszczalnej w podłożu

Fig. 2. Protection system against polluted leachate from the old sanitary landfill, where aquitard does not occurs in the subsoil



### 3. Systemy pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych

Przesłony przeciwfiltracyjne są obecnie wykonywane w wielu technologiach, wywodzących się najczęściej z technik głębokiego fundamentowania lub wzmacniania gruntów [6]. Przy wyborze technologii wykonania przesłony w konkretnym przypadku należy kierować się: budową geologiczną podłoża, trwałością i odpornością chemiczną materiału przesłony, a także możliwością zastosowania ciężkiego sprzętu i wielkością dostępnych środków finansowych.

Najprostszą formą przesłony przeciwfiltracyjnej są ścianki szczelne wykonywane z połączonych stalowych brusów. Nie są one jednak zalecane do izolacji terenów zanieczyszczonych ze względu na agresywny charakter odcieków wysypiskowych w odniesieniu do stali oraz brak pełnej szczelności. Mogą być natomiast z powodzeniem stosowane jako uszczelnienia tymczasowe na okres budowy lub remontów innego typu uszczelnień.

Często spotykane są przesłony wysokociśnieniowe wykonane z zastosowaniem standardowej techniki zastrzyków strumieniowych (*jet-grouting*). Polega ona na wprowadzeniu do gruntu żerdzi wiertniczej zaopatrzonej w dyszę, przez którą wprowadzana jest pod ciśnieniem mieszanina wody, cementu i powietrza. Mieszanina eroduje grunt i utrzymuje jego cząstki w zawiesinie, a po zastygnięciu tworzy strukturę o małej przepuszczalności. Wadą przesłony wysokociśnieniowych jest brak możliwości kontroli zasięgu iniekcji w podłożu oraz „połączeń” poszczególnych zastrzyków, szczególnie przy podłożu niejednorodnym. Niewątpliwą zaletą jest natomiast brak nadmiaru urobku ziemnego i możliwość wykonania przesłony nachylonych pod pewnym kątem, co może być pomocne w przypadku izolacji terenu z głęboko zalegającą warstwą gruntów nieprzepuszczalnych.

Innym rozwiązaniem są przesłony wąskoszczelinowe. Wykonywane są przy użyciu specjalnych kształtowników (profil dwuteowy lub wibrator skrzydełkowy) wyposażonych w urządzenia iniekcyjne. Kształtownik jest wbijany lub wwibrowywany w grunt na

żądaną głębokość, a następnie podczas jego wyciągania w szczelinę wprowadzana jest zawieszina uszczelniająca. W wyniku nakładania się kolejnych jednostek uzyskuje się ciągłą przesłonę, której zaletami są brak urobku ziemnego, szybkość wykonania i stosunkowo niewielkie koszty. Technologia ta nie zapewnia jednak pełnej szczelności ekranu. Przy małych przekrojach poprzecznych, niewielkie odchylenia od pionu mogą powodować brak ciągłości przesłony. Z tego względu przesłony cienkościennie nie są również zalecane do izolacji terenów zanieczyszczonych, znajdując w ostatnich latach szerokie zastosowanie w uszczelnieniach wałów przeciwpowodziowych.

Kolejnym stosowanym rozwiązaniem są ekrany z zachodzących na siebie pali wierconych o średnicy 90÷120cm. W celu zapewnienia większej szczelności wykonuje się często dwa lub więcej przenikających się rzędów pali. Technologia ta zapewnia ciągłość przesłony oraz możliwość kontroli rodzaju i stanu gruntów w podłożu. Wymaga jednak dużych nakładów pracy i kosztów.

Do izolacji terenów zanieczyszczonych jako najwłaściwsze zalecane są przesłony wykonywane w technologii ściany szczelinowej jednofazowej, zwykłej lub złożonej. Ściany szczelinowe wykonywane są koparkami chwytakowymi o szerokości chwytaka 0.5÷1.2 m, z nakładających się sekcji, co zapewnia ich ciągłość. W czasie głębenia do wykopu wprowadzana jest mieszanina uszczelniająca, która początkowo pełni funkcję zawiesziny tiksotropowej zapewniając stateczność wykopu, a po stwardnieniu tworzy barierę przeciwfiltracyjną. W przypadku ścian szczelinowych złożonych, po wykonaniu wykopu, ale przed stwardnieniem zawiesziny, wprowadzany jest dodatkowy element uszczelniający w postaci geomembrany HDPE. Przesłony złożone zalecane są do izolacji terenów silnie skażonych. Obok wielu zalet ściany szczelinowe posiadają jedną wadę, jaką jest duża objętość urobku ziemnego pozostałego po wykonaniu wykopu - szczeliny. Należy pamiętać, że na terenach zanieczyszczonych grunt jest również skażony i może być zagospodarowany jedynie na wysypiskach.

Wszystkie wymienione wyżej technologie wykonywania pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych wymagają prowadzenia odpowiednich badań kontrolnych w trakcie budowy, jak i po zakończeniu w laboratorium [4, 5]. Rodzaj i częstotliwość badań kontrolnych dla poszczególnych rodzajów przesłon określają odpowiednie normy. Możliwa jest również weryfikacja skuteczności wykonanych przesłon w ograniczaniu migracji zanieczyszczeń poprzez zastosowanie modeli numerycznych.

## 4. Charakterystyka obiektów

### 4.1. Wysypisko odpadów komunalnych Łubna

Wysypisko Łubna położone jest na terenie gminy Góra Kalwaria, w odległości około 35 km na południe od centrum Warszawy. Lokalizacja ta jest niekorzystna ze względu na wysoki poziom wód gruntowych (0.5-1m p.p.t.) oraz odpływ odcieków do zlewni rzeki Jeziorki, przepływającej przez tereny uzdrowiskowe w Konstancinie Jeziornej. Od 1978 roku na wysypisku są składowane odpady komunalne z terenu Warszawy, a w latach 1995-96 składowano również osady z oczyszczalni ścieków komunalnych „Czajka”. Wysypisko zajmuje powierzchnię około 20 ha, przy wysokości prawie 40 m.

Kubatura zdeponowanych odpadów wynosi ok. 5 mln m<sup>3</sup>. Aktualnie jest to jedyne wysypisko przyjmujące niesegregowane odpady komunalne z Warszawy, w ilości około 1000 ton/dobę. Od sierpnia 1996 roku na wysypisku prowadzone są prace w ramach kompleksowej jego rekultywacji (kształtowanie bryły wysypiska, budowa nasypów dociążających, budowa pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej, systemu drenażowego i oczyszczalni odcieków). Aktualne pozwolenie na składowanie odpadów na wysypisku ważne jest do końca 2002 roku.

Wysypisko Łubna zlokalizowane jest na podmokłym terenie niecki morfologicznej, ukształtowanej na powierzchni wysoczyzny polodowcowej. Od powierzchni występuje przepuszczalna warstwa wodonośna zbudowana z piasków, z wkładkami pyłów oraz miejscami gruntów organicznych, o miąższości 2-4 m (lokalnie 15 m). Warstwa ta jest podatna na wnikanie zanieczyszczeń i w znacznym stopniu już zanieczyszczona odciekami z wysypiska. Średni współczynnik filtracji w warstwie tej wynosi około 1 m/d. Głębiej występuje słabo przepuszczalna warstwa glin zwałowych o miąższości ok. 5m, zalegająca na pyłach i ilach zastoiskowych (miąższość 20-30m). Średni współczynnik filtracji w warstwie utworów zastoiskowych wynosi około 0.005 m/d. Zestaw glin zwałowych i utworów zastoiskowych stanowi płaszcz ochronny użytkowego poziomu wodonośnego (piaski i żwiry, miąższość ok. 40 m, współczynnik filtracji 30 m/d), którego strop znajduje się na głębokości 25-40 m. Nie stwierdzono przenikania zanieczyszczeń z powierzchni przez gliny zwałowe i utwory zastoiskowe do użytkowej warstwy wodonośnej.

## 4.2. Wysypisko odpadów balastowych Radiowo

Wysypisko Radiowo znajduje się na terenie gminy Stare Babice, przy północno-zachodniej granicy Warszawy. W latach 1962-91 wysypisko przyjmowało odpady komunalne z terenu Warszawy. Były one składowane bez żadnego zabezpieczenia podłoża przy płytce zalegających wodach gruntowych. Obecnie obiekt jest technologicznym wysypiskiem funkcjonującym na potrzeby kompostowni „Radiowo”. Na wysypisku składowane są odpady nieprzydatne do produkcji kompostu, jak: plastyki, folie, opony, złom, itp., w ilości ok. 300 ton/dobę. Powierzchnia wysypiska wynosi około 15 ha, przy wysokości ponad 55 m. Od strony południowej i wschodniej obiekt otoczony jest lasem (Park Leśny „Bemowo”, z dwoma rezerwatami przyrody). Najbliższe zabudowania mieszkalne są w odległości 0.7 km od wysypiska, a około 3 km dalej znajduje się Kampinoski Park Narodowy, na teren którego odpływają wody z rejonu wysypiska.

Wysypisko odpadów w Radiowie położone jest w obrębie silnie zdenudowanej wysoczyzny glacialnej. Jest to centralna część Kotliny Warszawskiej, która ma charakter synkliny zaznaczającej się w budowie utworów mezozoicznych. Synklinę wypełniają utwory trzeciorzędowe (pliocen) przykryte kompleksem osadów czwartorzędowych. Głębokość od poziomu terenu do stropu ilów waha się od kilku do kilkunastu metrów, a lokalnie ility występują na powierzchni. Wśród osadów czwartorzędowych na przeważającej części obszaru w sąsiedztwie wysypiska zalegają piaski i żwiry wodnolodowcowe, lokalnie jeziorne o miąższości od 2 do 5 m. Utwory piaszczyste zalegają na glinach zwałowych stadiału maksymalnego zlodowacenia środkowo-polskiego, które mają swoje wychodnie na powierzchni terenu. Grunty te charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami współczynnika przepuszczalności: od 15 m/d w piaskach średnich, poprzez 5.5 m/d w piaskach drobnych, 0.8 m/d w piaskach gliniastych do 0.01 m/d w glinach

piaszczystych. Z utworami tymi związany jest pierwszy poziom wodonośny, którego swobodne zwierciadło kształtuje się na poziomie od 0.3 do 2.0 m p.p.t. i jest zależne od warunków atmosferycznych oraz pory roku. Kierunek przepływu wody w tej warstwie w części południowej przebiega na północny-zachód, natomiast poza wysypiskiem zmienia się na północny i dalej na zachodni w stronę Kampinoskiego Parku Narodowego.

## 5. System zabezpieczenia wód w rejonie wysypiska Łubna

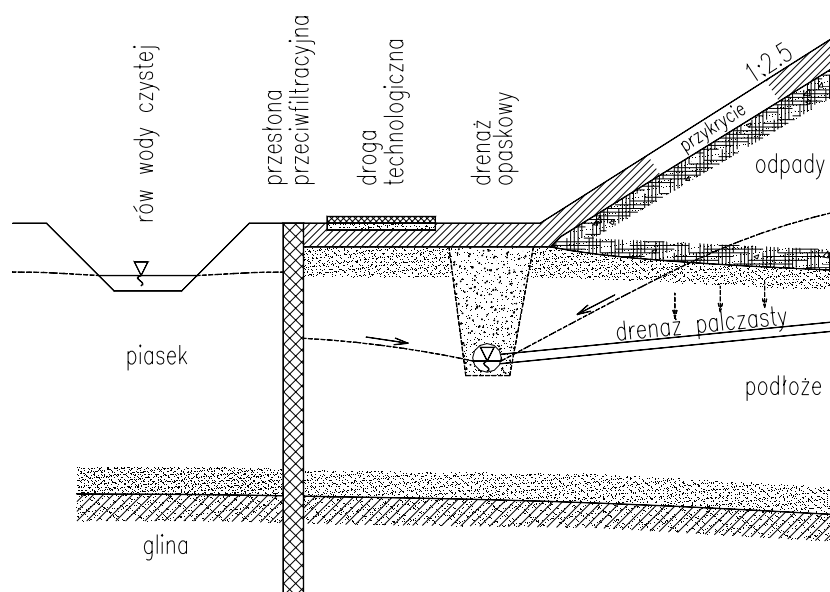
W ramach zabiegów rekultywacyjnych wokół wysypiska Łubna w okresie listopad 1997 r. – czerwiec 1998 r., wykonano pionową przesłonę przeciwfiltacyjną w technologii ściany szczelinowej jednofazowej z bentonitowej zawiesiny samotwardniejącej Solidur. Zadaniem przesłony jest zabezpieczenie przed migracją zanieczyszczeń w pierwszej warstwie wodonośnej i do użytkowego poziomu wodonośnego poza rejonem wysypiska. Przy doborze składu zawiesiny uwzględniono wyniki fizyko-chemicznych badań zanieczyszczonych wód gruntowych, odcieków i gruntów w podłożu. Ze względu na podatność bentonitu, głównego składnika zawiesiny, na przemazanie i wysychanie, zamknięcie przesłony od góry (do 1.2 m) wykonano z betonu hydrotechnicznego. Głębokość przesłony jest zmienna w zależności od warunków geologicznych na jej trasie i wynosi od 5.5 m do 17 m, wg zasady zagłębienia 2-3m poniżej stropu ciągłej warstwy gruntów spoistych (Rys. 3). W trakcie budowy prowadzono stały nadzór geologiczny, a także badania właściwości fizycznych zawiesiny (gęstość, lepkość) w celu zapewnienia jej dobrej jakości oraz pobierano próbki zawiesiny do badań laboratoryjnych (współczynnik przepuszczalności, wytrzymałość) [4]. Współczynnik przepuszczalności przesłony wynosi poniżej  $k < 1 \cdot 10^{-10}$  cm/s. Z badań laboratoryjnych określono, że gradient początkowy dla materiału przesłony wynosi około 50, co w warunkach wysypiska Łubna czyni ją praktycznie nieprzepuszczalną (rzeczywiste gradienty  $i=1-2$ ).

Dodatkowym zabezpieczeniem przed migracją zanieczyszczeń jest zapewnienie kierunku potencjalnej migracji wód od strony terenów przyległych („woda czysta”) do drenażu odcieków, znajdującego się między przesłoną a skarpą wysypiska (Rys. 3). Chroni to również materiał przesłony przed potencjalną degradacją wodami odciekowymi. Ponadto, w podstawie nasypów dociążających zaprojektowano system tzw. drenaży „palczastych” doprowadzających odcieki do drenażu opaskowego (Rys. 3). Zasypkę drenażu (rura HDPE w geowłókninie) wykonano z gruntów o uziarnieniu zabezpieczającym przed zamuleniem („filtr odwrotny”). Obecnie do czasu zakończenia rozruchu technologicznego oczyszczalni, odcieki wywożone są samochodami do oczyszczalni ścieków miejskich w Piasecznie i w Moczydłowie. W przypadku nie uzyskania zakładanych parametrów oczyszczania, przewiduje się włączenie podczyszczonych wód do kolektora sanitarnego i dalej do oczyszczalni ścieków komunalnych w Moczydłowie.

Jakość wód powierzchniowych i podziemnych jest kontrolowana w ramach monitoringu lokalnego. Z analizy wyników badań wynika, że jakość wód powierzchniowych i podziemnych pierwszego poziomu uległa zdecydowanej poprawie po wykonaniu systemu zabezpieczającego [2].

Rys. 3. Schemat złożonego systemu zabezpieczającego w pasie rekultywacyjnym wysypiska odpadów komunalnych Łubna

Fig. 3. The groundwater protection system against leachate on Łubna landfill



## 6. 3. System zabezpieczenia wód w rejonie wysypiska Radiowo

W latach 1997-98 zostały opracowane projekty ujęcia odcieków przy podstawie skarp wysypiska, z wąwozu po starej drodze wjazdowej oraz ujęcia nadmiaru wód deszczowych z terenu kompostowni i zagospodarowania do celów technologicznych na wysypisku („recykulacja”).

Dotychczas wody opadowe z terenu kompostowni były odprowadzane (po wstępnym oczyszczeniu) do Kanału Zaborowskiego prowadzącego wody przez tereny Kampińskiego Parku Narodowego. Jednakże, nie uzyskano pozwolenia wodno-prawnego na utrzymanie tego zrzutu i nakazana została jego likwidacja. Dla oceny możliwości wykorzystania tych wód do celów technologicznych na terenie wysypiska, wykonano analizy jakości odcieków oraz wód z kompostowni, badania retencyjności wodnej odpadów, oraz sporządzono bilans wodny wysypiska.

Realizowana rekultywacja wysypiska obejmuje wykonanie wokół wysypiska pionowej przesłony przeciwnfiltracyjnej, systemu ujmowania odcieków, systemu odgazowania, modernizację rowów melioracyjnych na terenach przyległych (zaburzenie kierunków przepływu wykonaną przesłoną) oraz ukształtowanie bryły wysypiska i zabudowę biologiczną skarp.

Rolę drenażu odcieków w rejonie skarp wysypiska spełniają rowy, stanowiące dodatkową rezerwę retencyjną (Rys. 4). Skarpy i dno rowów umocniono płytkami ażurowymi, ułożonymi na geowłókninie i podsypce mineralnej („filtr odwrotny”). Od strony

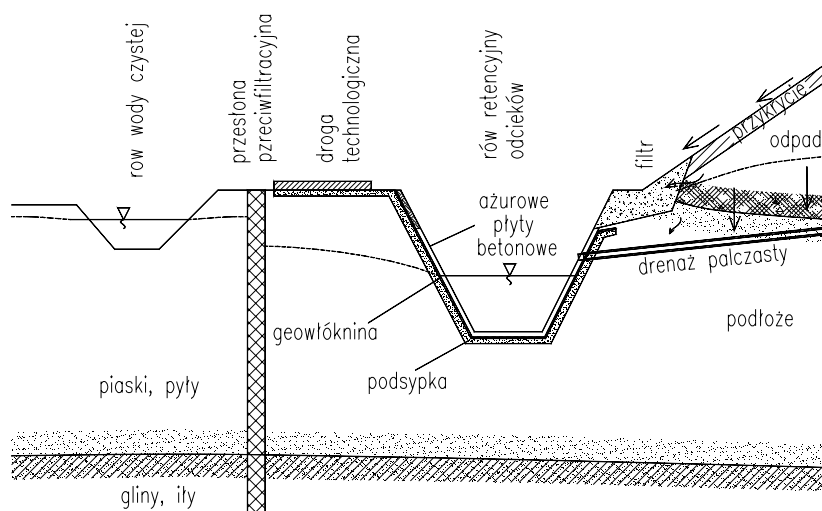


wschodniej i południowej w podstawie nasypów dociążających wykonano drenaże „palczaste” w wylotami do rowów odcieków, ułatwiające odprowadzenie odcieków z podstawy wysypiska.

Przesłonę przeciwnfiltracyjną wokół wysypiska Radiowo wykonano, podobnie jak w przypadku wysypiska Łubna, w technologii ściany szczelinowej jednofazowej z zawiesiny Solidur. Jej budowę rozpoczęto w styczniu 1999 roku i przerwano w czerwcu 1999 roku, po zrealizowaniu około 70% robót. Budowę zakończono w okresie wrzesień-listopad 2000 roku. Przez 1.5 roku wysypisko było zabezpieczone jedynie fragmentem przesłony – od strony wschodniej, północnej i częściowo zachodniej. Z badań jakości wód prowadzonych w tym okresie w ramach monitoringu lokalnego stwierdzono, że największe zanieczyszczenie wód podziemnych występuje w rejonie odcinka, na którym nie wykonano przesłony [1].

Rys. 4. Schemat złożonego systemu zabezpieczającego w pasie rekultywacyjnym wysypiska odpadów balastowych Radiowo

Fig. 4. The groundwater protection system against leachate on Radiowo landfill



## 7. Modelowanie przepływu wód gruntowych w rejonie wysypisk

W ramach analizy skuteczności pionowych przesłon przeciwnfiltracyjnych na ograniczenie migracji zanieczyszczeń przeprowadzono numeryczną analizę adwekcyjnego transportu zanieczyszczeń z terenu wysypisk odpadów w Radiowie i w Łubnej na tereny przyległe oraz wpływu przesłon przeciwnfiltracyjnych na ukształtowanie linii przepływu wody w rejonie wysypisk. Analiza wyników modelowania jest przydatna przy projektowaniu trasy przesłon oraz urządzeń drenażujących (rowów) na terenach przyległych.

Głównymi procesami fizyko-chemicznymi branymi pod uwagę w analizie transportu zanieczyszczeń w wodzie gruntowej są: adwekcja, adsorpcja, dyfuzja, dyspersja i degradacja. Jednakże w wielu przypadkach, szczególnie w odniesieniu do starych zanieczyszczeń zgromadzonych w gruncie, głównymi czynnikami decydującymi o migracji zanieczyszczeń są: adwekcyjne unoszenie substancji rozpuszczonych w wodzie i adsorpcyjne zatrzymywanie substancji przez szkielet gruntowy. Dokładny opis tych procesów pozwala na uzyskanie w pierwszym przybliżeniu poprawnych wyników, a przede wszystkim obliczenia takie można oprzeć na parametrach łatwiejszych do wyznaczenia niż w przypadku pozostałych zjawisk. Natomiast do pierwszego przybliżenia zwykle przyjmuje się liniową równowagę między cząstkami stałymi i cieczą. Jeżeli pozostałe zjawiska związane z transportem zanieczyszczeń (dyfuzja, dyspersja i degradacja) zostaną pominięte, to równanie transportu w układzie trójwymiarowym może być zapisane w postaci [8]:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial c}{\partial t} = -V_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = -V_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_y \frac{\partial c}{\partial y} - V_z \frac{\partial c}{\partial z}$$

gdzie:

$c$  – stężenie substancji rozpuszczonych w wodzie,

$R$  – współczynnik zatrzymania:

$$R = 1 + K(1 - n)/n$$

$n$  – porowatość,

$K$  – współczynnik koncentracji zanieczyszczeń (dla przepływu adwekcyjnego  $K=0$ ).

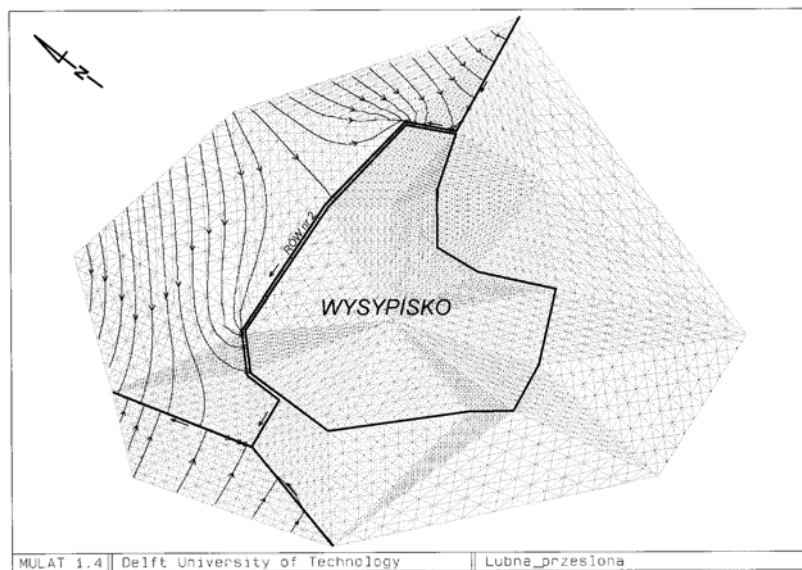
Obliczenia wykonano przy użyciu programu numerycznego MULAT 1.4 opracowanego w Delft University of Technology [7]. Program jest oparty na metodzie elementów skończonych i umożliwia analizę przepływu wody gruntowej i adwekcyjnego transportu zanieczyszczeń z możliwością uwzględnienia liniowej adsorpcji i dyspersji w podłożu wielowarstwowym w układzie trójwymiarowym.

Przy modelowaniu przepływu założono w pierwszym przybliżeniu jedynie adwekcyjny transport zanieczyszczeń wzdłuż linii przepływu wody gruntowej oraz brak adsorpcji zanieczyszczeń przez grunt. Obliczenia wykonano dla pierwszego poziomu wodonośnego. Do analizy przyjęto warstwę wodonośną jako jednorodną zbudowaną z piasków o uśrednionym współczynniku przepuszczalności. Poniżej zalegają grunty spoiste, które można uznać za nieprzepuszczalne (gliny piaszczyste i pylaste, ily). Dla przesłony przeciwfiltracyjnej przyjęto współczynnik przepuszczalności  $k=8.6 \cdot 10^{-5}$  m/d (tj.  $k=10^{-9}$  m/s), uzyskany z badań kontrolnych. Efektem przeprowadzonych obliczeń były dwu- i trójwymiarowe obrazy przebiegu linii przepływu wody na analizowanym obszarze. Z uwagi na duże zagęszczenie elementów na rysunkach wynikowych, do interpretacji wybrano dwuwymiarowe przebiegi linii przepływu migrujących cząstek (Rys. 5 i 6).

Wyniki obliczeń obrazują wpływ przesłony na zmiany kierunków przepływu wód gruntowych. W przypadku wysypiska Łubna (Rys. 5) wyraźnie widoczny jest drenujący charakter rowu opaskowego nr 2 ujmującego wody napływające i odprowadzającego wody zrzutowe z oczyszczalni odcieków. Przesłona spowodowała niewielkie zaburzenia przepływu wód gruntowych. W przypadku wysypiska Radiowo (Rys. 6) przesłona spowodowała zmianę kierunku przepływu wód gruntowych, które omijają „przeszkodę”. Zaburzenia przepływu mogą powodować podpiętrzenie wód od strony wschodniej wysypiska, co powoduje konieczność zaprojektowania dodatkowych rowów melioracyjnych.

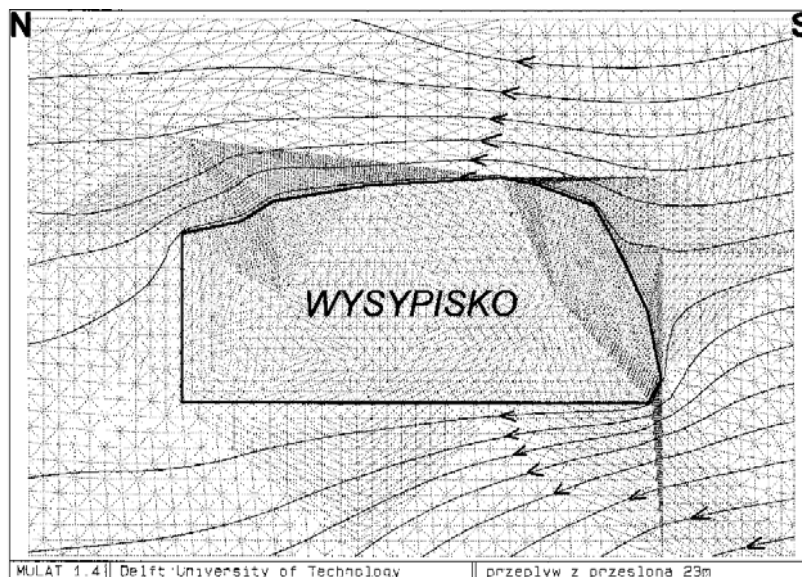
Rys. 5. Linie przepływu wód gruntowych w rejonie wysypiska Łubna po wykonaniu przesłony przeciwfiltracyjnej

Fig. 5. The paths of groundwater flow in the area of Łubna landfill, after cut-off wall barrier was constructed



Rys. 6. Linie przepływu wód gruntowych w rejonie wysypiska Radiowo po wykonaniu przesłony przeciwfiltracyjnej

Fig. 6. The paths of groundwater flow in the area of Radiowo landfill, after cut-off wall barrier was constructed



## 8. Podsumowanie

- Migracja zanieczyszczeń ze starych wysypisk zależy głównie od warunków hydrogeologicznych.
- Głównymi elementami złożonego systemu zabezpieczenia przed zanieczyszczeniem wód w rejonie starych wysypisk odpadów są drenaże (lub rowy) opaskowe oraz pionowe przesłony przeciwfiltracyjne. System taki może w skuteczny sposób zabezpieczyć przed zanieczyszczeniem wody na terenach przyległych do wysypisk.
- Skuteczne działanie przesłon jest uwarunkowane zapewnieniem dobrej jakości wykonania kontrolowanej na etapie realizacji i kontroli trwałości po wykonaniu.
- Wysypiska odpadów komunalnych Radiowo i Łubna zostały założone bez żadnych zabezpieczeń. Warunki hydrogeologiczne umożliwiły wykonanie przesłon przeciwfiltracyjnych dla zabezpieczenia przed migracją odcieków do wód gruntowych.
- Modelowanie numeryczne pozwala na określenie wpływu przesłon przeciwfiltracyjnych na zmiany kierunków przepływu wód gruntowych w rejonie wysypisk i zaprojektowanie dodatkowych urządzeń melioracyjnych dla zabezpieczenia przed podtapianiem terenów otaczających.
- Z badań kontrolnych w ramach monitoringu lokalnego wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie wysypiska Łubna wynika, że wykonany system zabezpieczający wpływa na poprawę jakości tych wód. W przypadku wysypiska Radiowo, wnioski w tym zakresie będą możliwe po kilkuletnim okresie obserwacji.

## Bibliografia

- [1] Golimowski, J., Koda, E. Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie wysypiska i kompostowni Radiowo (maszynopis). Warszawa, 2000
- [2] Golimowski, J., Koda, E. Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie wysypiska Łubna (maszynopis). Warszawa, 2000
- [3] Koda, E. Rekultywacja starych wysypisk odpadów komunalnych. *III Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami*, Poznań, 1999, 335-363
- [4] Koda, E., Paprocki, P. Sprawozdanie końcowe z nadzoru geologicznego nad wykonaniem przesłony przeciwfiltracyjnej wokół wysypiska Łubna (maszynopis). Geoteko, Warszawa, 1998
- [5] Koda, E., Paprocki, P., Fołtyn, P., Skutnik, Z., Stępień, M. Sprawozdanie z nadzoru geologicznego nad wykonaniem przesłony przeciwfiltracyjnej wokół wysypiska Radiowo (maszynopis). Geoteko, Warszawa, 2000
- [6] Stępień M. Kontrola jakości wykonania pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych dla wysypisk odpadów komunalnych. Praca dyplomowa. SGGW, Warszawa, 2000
- [7] Verruijt, A. MULAT 1.0. Multi-Layered Aquifer Transport. User's Guide. Delft University of Technology. Delft, 1991
- [8] Verruijt, A. Finite element modeling of transport in porous media. *Applied Scientific Research*, 1991, 48: 129-139