

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 59, 2013: 45–55
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 59, 2013)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 59, 2013: 45–55
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 59, 2013)

Dorota WYCHOWANIAK

Katedra Geoinżynierii Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Migracja zanieczyszczeń w rejonie starego składowiska odpadów z pionową przesłoną przeciwfiltracyjną **Pollutant transport in vicinity of old landfill with vertical barrier**

Słowa kluczowe: składowisko, migracja zanieczyszczeń, monitoring wód, modelowanie przepływu

Key words: landfill, pollutant transport, water monitoring, flow modeling

Wprowadzenie

W Polsce gromadzenie odpadów na składowiskach jest nadal najpowszechniej stosowaną metodą ich unieszkodliwiania. W ostatnim dziesięcioleciu zamknięto około 1000 składowisk, często bez rekultywacji lub źle zrehabilitowanych, co jest przyczyną postępującego zanieczyszczenia odciekami środowiska wodno-gruntowego w ich rejonie. Procesy rozkładu odpadów komunalnych w składowisku mogą przebiegać nawet przez kilkadziesiąt lat. Odcieki to ciecz silnie zanieczyszczona w wyniku przesączania się wód opadowych i wód powierzchniowych oraz wód zawartych w od-

padach przez masy składowanych odpadów, zawierająca m.in. siarczany, chlorki, węglowodory, pestycydy czy metale ciężkie.

Jedną z metod zabezpieczania środowiska gruntowo-wodnego w rejonie starych składowisk odpadów komunalnych przed migracją wymienionych zanieczyszczeń jest zastosowanie uszczelnienia bocznego w postaci pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej (ścianki uszczelniającej), zagłębionej poniżej stropu naturalnych utworów słabo przepuszczalnych.

Procesy zachodzące przy przemieszczaniu się (migracji) zanieczyszczeń w nawodnionym ośrodku gruntowym

Zjawisko migracji lub transportu masy w wodach podziemnych to proces przemieszczania się jonów lub czą-

steczek innych niż woda w strumieniu wody podziemnej. Przy zachowaniu i przemieszczaniu się zanieczyszczeń w nawodnionym ośrodku gruntowym uwzględnia się procesy: adwekcji, dyfuzji, dyspersji, sorpcji i degradacji – rozkładu (Rembeza 1998, Bolt i Dobkowska 2000). Migracja zanieczyszczeń jest efektem jednoczesnego działania kilku wymienionych procesów, których intensywność zależy od warunków hydrogeologicznych w rejonie obiektu będącego źródłem zanieczyszczeń. Do uproszczonego opisu analitycznego migracji zanieczyszczeń stosowane może być równanie transportu masy (Van Genuchten 1980):

$$\frac{\partial \cdot (\theta \cdot R \cdot c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\underbrace{(\theta \cdot d_o \cdot \gamma)}_{\text{dyfuzja}} + \underbrace{\alpha \cdot |V|}_{\text{dyspersja}} \right] \frac{\partial c}{\partial x} - \underbrace{V \cdot c}_{\text{adwekcja}} - \underbrace{(\mu \cdot \theta \cdot c)}_{\text{degradacja}} \quad (1)$$

gdzie sorpcję określa się za pomocą współczynnika opóźnienia

$$R = 1 + \frac{\rho_d \cdot k_d}{\theta}$$

a degradację za pomocą współczynnika

$$\mu = \mu_w + \frac{\rho_d \cdot \mu_F \cdot k_d}{\theta} \quad (2)$$

poza tym:

θ – objętościowa zawartość wody [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]

c – stężenie substancji rozpuszczonych w wodzie [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

d_o – współczynnik dyfuzji woda – substancje rozpuszczone w wodzie wolnej [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

γ – wskaźnik oporności pozornej, długość dyspersji [m],

α – dyspersyjność ośrodka, długość dyspersji [m],

V – prędkość przepływu w kierunkach składowej x [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], $V = -k_f \cdot i$,

k_f – współczynnik filtracji [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

i – spadek hydrauliczny [-],

μ_F – współczynnik degradacji pierwszego rzędu rozkładu w roztworze [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$],

μ_w – współczynnik degradacji pierwszego szego rzędu rozkładu substancji w stałej części ośrodka porowatego (ziarna) [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$],

x – odległość w kierunku transportu [m],

ρ_d – gęstość objętościowa materiału uszczelniającego [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

k_d – współczynnik rozkładu [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$].

Równanie (1) nie może być stosowane, jeśli nie zostały określone charakterystyczne (reprezentatywne) parametry równania dla warunków analizowanego obszaru, na przykład w rejonie składowiska odpadów.

Adwekcja (unoszenie lub przenoszenie adwekcyjne) to bierny transport rozpuszczonych zanieczyszczeń w wodzie porowej z wykorzystaniem opisu średniej prędkości przepływu wody w porach (prawo Darcy'ego):

$$q = v_p \cdot n_e \quad (3)$$

gdzie:

v_p – średnia prędkość wody w porach [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

n_e – porowatość efektywna [-].

Adwekcja jest podstawowym zjawiskiem, w którego wyniku cząsteczki lub jony rozpuszczonej substancji zmieniają

położenie w środowisku wodno-gruntowym. Gdy nie obserwuje się przepływu wody, adwekcja nie występuje. Zależność prędkości filtracji od współczynnika filtracji (prawo Darcy'ego) powoduje, że w gruntach charakteryzujących się różnym współczynnikiem filtracji (k_f) zasięg transportu adwekcyjnego substancji rozpuszczonej różni się.

Dyfuzja to proces fizycznego wyrównywania stężeń do utworzenia jednorodnej mieszaniny gazowej lub ciekłej. Substancje rozpuszczone w wodzie przemieszczają się od obszarów, w których występują większe jej stężenia, do obszarów o niższych stężeniach. Dyfuzja zachodzi nawet wtedy, gdy woda jest w stanie spoczynku (prędkość wody jest równa 0 w każdym punkcie cieczy) i jest procesem nieodwracalnym opartym na prawie Ficka:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

gdzie:

F – strumień dyfuzyjny,

D – współczynnik dyfuzji [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

C – stężenie substancji [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

x – zmienna niezależna.

Współczynnik dyfuzji (D) zależy od właściwości substancji rozpraszanej i rodzaju rozpraszającego medium, jak również od temperatury (miara energii kinetycznej cząstek medium).

Dyfuzja, która zachodzi w ośrodku porowatym, jest ograniczona poprzez pory, w których rozpraszane są cząsteczki substancji rozpuszczonych w wodzie. W związku z tym dla ośrodka porowatego wprowadza się poprawkę zmniejszającą wartość współczynnika dyfuzji, scharakteryzowaną przez współczynnik

krętości (τ). Współczynnik krętości (τ) określa stosunek dostępnej długości drogi w połączonych porach dla cząsteczki przemieszczającej się w próbce ośrodka porowatego (L_e) do długości próbki (L). Przekształcone prawo Ficka, określające dyfuzję w ośrodku porowatym, ma postać (Zheng i Bennett 2002):

$$F = -D^* \frac{\partial C}{\partial x} \quad (5)$$

gdzie:

$$D^* = \frac{1}{\tau} D,$$

τ – współczynnik krętości [-].

W wodach podziemnych dominuje proces adwekcji, a znaczenie dyfuzji zwiększa się, gdy prędkość przepływu spada. Dlatego też dyfuzja może być znaczącym elementem transportu zanieczyszczeń w gruntach o niskim współczynnikiem filtracji.

Dyspersja związana jest z niejednorodnością pola prędkości wody w skali mikro (w przestrzeni poru), makro (w skali próbki gruntu) oraz mega i pojawia się przy większych prędkościach filtracji. Domenico i Schwartz (1990) wymieniają wiele przyczyn, które powodują niejednorodny przepływ wody w ośrodku gruntowym. W skali mikroskopowej są to: rozkład wielkości porów, geometria porów i występowanie tzw. porów martwych. W skali makroskopowej niejednorodności spowodowane są: zmiennością współczynnika filtracji, anizotropowością współczynnika filtracji i występowaniem uprzywilejowanych dróg filtracji. Z kolei w skali megaskopowej niejednorodności pola prędkości spowodowane są: nieciągłościami straty-

fikacji warstw wodonośnych oraz występowaniem warstw nieprzepuszczalnych i uskoków.

Dispersja w kierunku zgodnym z przepływem nosi nazwę dyspersji podłużnej, natomiast w kierunku prostopadłym do przepływu – dyspersji poprzecznej. Wyróżnia się dwa rodzaje dyspersji: mechaniczną i hydrodynamiczną. W warunkach naturalnych nie da się rozróżnić transportu dyspersyjnego od dyfuzyjnego, w związku z tym współczynnik dyspersji podłużnej i poprzecznej definiowany jest najczęściej jako:

$$D_L = \alpha_L v + D^* \quad \text{i} \quad D_T = \alpha_T v + D^* \quad (6)$$

gdzie:

D_L , D_T – odpowiednio współczynnik dyspersji podłużnej i poprzecznej [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

α_L , α_T – odpowiednio dyspersyjność podłużna i poprzeczna [m],

D^* – współczynnik dyfuzji [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

v – prędkość strumienia przepływu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Wartość współczynnika dyspersji podłużnej jest zawsze większa niż poprzecznej.

Sorpcja odnosi się do wymiany cząstek i jonów substancji rozpuszczonej z fazą stałą gleby. Jest to proces jednoczesnego gromadzenia się na powierzchni ciała stałego cząstek i jonów substancji rozpuszczonej w wodzie – adsorpcja, i przechodzenia do roztworu cząstek wcześniej adsorbowanych – desorpcja. Związek pomiędzy stężeniem substancji rozpuszczonej w sorbencie a kontaktującą się z nim substancją rozpuszczoną nazywa się izotermą sorpcji:

$$C_a = k_d C \quad (7)$$

gdzie:

C_a – stężenie substancji w fazie stałej [–],

k_d – współczynnik rozkładu [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$],

C – stężenie substancji rozpuszczonej w fazie ciekłej [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Im większe możliwości adsorpcyjne ciała stałego, tym migracja zanieczyszczeń jest bardziej opóźniona. Zjawisko to opisane jest współczynnikiem opóźnienia (R), który dla izoterm sorpcji ma postać:

$$R = 1 + \frac{(1-n)\rho_s k_d}{n} \quad (8)$$

gdzie:

n – porowatość [–],

ρ_s – gęstość ciała stałego [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Wyróżnia się następujące rodzaje sorpcji: mechaniczną (zatrzymywanie w porach glebowych cząstek większych od średnicy porów), fizyczną (wysycenie powierzchni cząsteczkami znajdującymi się w pobliżu granicy faz), chemiczną (rozpuszczalne związki chemiczne reagują ze składnikami gleby i tworzą związki trudnorozpuszczalne), biologiczną (substancje rozpuszczone są pobierane przez organizmy i wbudowywane w materię organiczną) i fizykochemiczną (sorpcja wymienna).

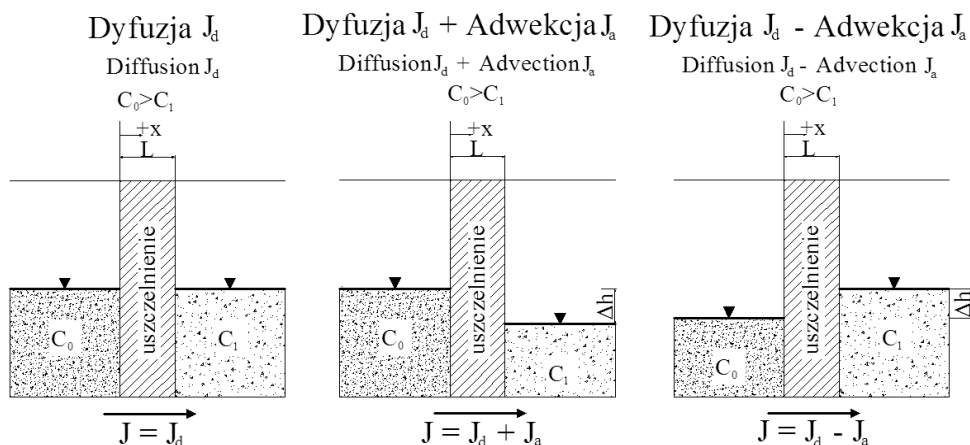
Degradacja polega na rozkładzie i usuwaniu zanieczyszczeń organicznych w wyniku procesów chemicznych i biologicznych. Na degradację mają wpływ mikroorganizmy, katalityczny mechanizm substancji rozpuszczonych w wodzie i glebie w stosunku do czynników środowiskowych. Wynikiem degradacji może być powstanie nowych substancji i związków, które mogą powodować wtórne zanieczyszczenie.

Posługując się równaniem transportu (1) i właściwościami opisanych procesów, Manassero i Shackelford (1994) przedstawili trzy praktyczne przypadki migracji zanieczyszczeń w nawodnionym ośrodku gruntowym z poziomą warstwą uszczelniającą lub pionową barierą przeciwnafiltracyjną. Na rysunku 1 przedstawiono przypadek pionowej bariery, za którą z lewej strony znajduje się grunt nawodniony o stężeniu zanieczyszczeń (C_0) większym niż stężenie zanieczyszczeń w nawodnionym gruncie z prawej strony bariery (C_1). W zależności od warunków hydrogeologicznych, związanych z położeniem zwierciadła wody w obu warstwach, i wynikającego z tego kierunku przepływu zanieczyszczeń (J), w kolejnych przypadkach zachodzi: dyfuzja przy zwierciadłach wody na tym samym poziomie, dyfuzja powiększona o adwekcję przy zwierciadle wody gruntowej z prawej strony bariery niższym niż w gruncie z lewej strony bariery, dyfuzja pomniejszona o adwekcję przy

zwierciadle wody gruntowej z prawej strony bariery wyższym niż w gruncie z lewej strony bariery.

Lokalizacja i charakterystyka obiektu doświadczalnego

Składowisko odpadów „Łubna” położone jest na terenie gminy Góra Kalwaria i założone zostało w 1978 roku na rodzimym gruncie, bez żadnych systemów zabezpieczeń. Jest to składowisko typu nadpoziomowego, o powierzchni około 22 ha i kubaturze ponad 5,5 mln m³. Zanieczyszczone wody z jego rejonu przepływały m.in. przez teren uzdrowiska w Konstancinie-Jeziornej. Składowisko zlokalizowane jest na gruntach przepuszczalnych o wysokim poziomie wody gruntowej (głębokość zwierciadła wody od 0,1 do 1,8 m p.p.t.), zbudowanych z piasków z wkładkami z pyłów i miejscami z gruntów organicznych. Głębiej występuje warstwa słabo przepuszczalna



RYСУNEK 1. Charakterystyczne praktyczne przypadki migracji zanieczyszczeń w nawodnionym ośrodku gruntowym przez pionową barierę przeciwnafiltracyjną (Shackelford 1988)

FIGURE 1. Characteristic practical cases of pollutant transports in subsoil by vertical barrier (Shackelford 1988)

(gliny zwałowe), zalegająca na pyłach i łąkach zastoiskowych (miąższość 20–30 m). Warstwa ta izoluje użytkowy poziom wodonośny, który zbudowany jest z piasków i żwirów o miąższości około 40 m. W 1996 roku rozpoczęto prace związane z rekultywacją składowiska, w ramach których wykonano również pionową przesłonę przeciwfiltracyjną odcinającą odcieki składowiskowe od pierwszej warstwy wodonośnej. Aktualnie prace rekultywacyjne są w końcowej fazie. Składowisko zostało zamknięte z dniem 31 marca 2011 roku.

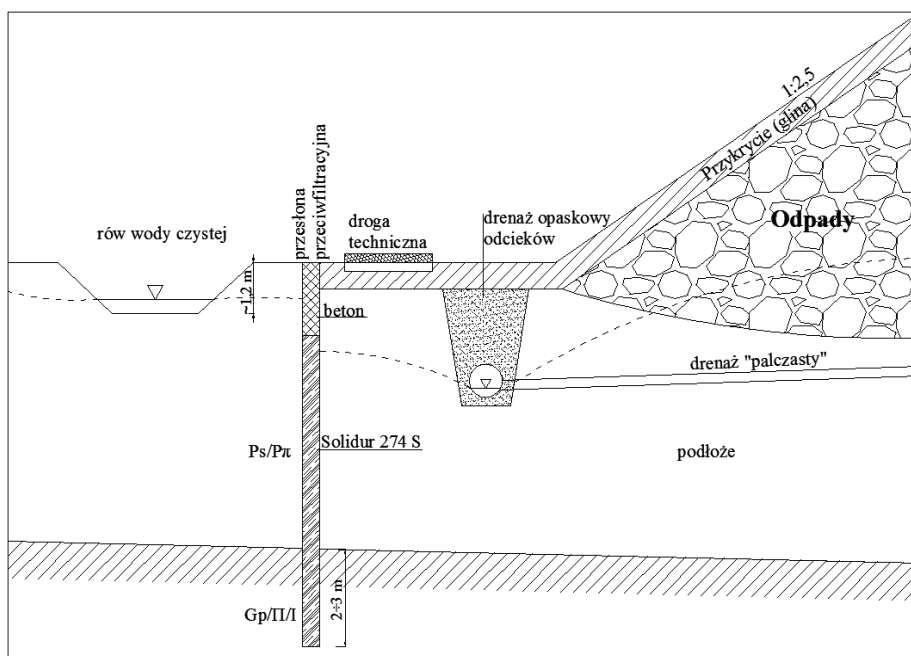
Zabezpieczenie starego składowiska odpadów przed migracją zanieczyszczeń

W celu zabezpieczenia starych składowisk odpadów stosowane są uszczelnienia boczne (pionowe ścianki uszczelniające) i obramowujące. Systemy uszczelnień obramowujących obejmują: odprowadzenie i neutralizację odcieków oraz ujęcie i neutralizację gazów składowiskowych. Zadaniem tych uszczelnień jest stworzenie nieprzepuszczalnej bariery wokół i pod składowiskiem w celu skutecznego odciążenia źródła zanieczyszczeń od podłoża i wód gruntowych. Rodzaj uszczelnienia bocznego należy dobrać indywidualnie do każdego zabezpieczanego składowiska, po analizie warunków hydrogeologicznych i poziomie zagrożenia dla terenów przyległych. Przesłony przeciwfiltracyjne mogą być: zawieszane (nie sięgają stropu warstwy słabo przepuszczalnej i wydłużają drogę filtracji) i wcięte (osiągają strop warstwy słabo przepuszczalnej). Przesłony wcięte stosowane są do izolacji gruntów sil-

nie zanieczyszczonych i są najczęściej stosowanym sposobem ochrony środowiska gruntowo-wodnego przed migracją odcieków ze składowiska. Wbudowanie przesłony powoduje utworzenie szczelnej „wanny” odcinającej odcieki od otoczenia, które ujmowane są systemem drenażowym i transportowane do oczyszczalni odcieków/ścieków. Poziom odcieków w „wannie” jest utrzymywany poniżej poziomu wód gruntowych i w takich warunkach występuje gradient hydrauliczny oraz przepływ w kierunku składowiska, co w razie awarii przesłony uniemożliwia przedostawanie się odcieków do środowiska gruntowo-wodnego (Rowe 1998).

W 1998 roku wokół składowiska odpadów „Łubna” wykonano pionową przesłonę przeciwfiltracyjną (rys. 2), o grubości 0,6 m, zabezpieczającą przed migracją zanieczyszczeń w pierwszym poziomie wody podziemnej (gruntowej) i do drugiego (użytkowego) poziomu wody podziemnej. Głębokość przesłony uzależniona jest od warunków geologicznych i wynosi od 5,5 do 17 m, co wynika z konieczności wykonania przesłony około 2 m poniżej stropu ciągłej warstwy gruntów słabo przepuszczalnych. Do budowy przesłony zastosowano gotową mieszankę bentonitową Solidur 274S, będącą mieszaniną iltu (bentonit sodowy), cementu i dodatków, o współczynniku przepuszczalności $1 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i niższym.

Długość okresu eksploatacji przesłony przeciwfiltracyjnej zależy od wieku, agresywności środowiska, cyklu nasączania i suszenia na głębokości zwierciadła wody gruntowej, procesu wysychania na powierzchni terenu czy erozji. Szczegółowe badania dowiodły, że z po-



RYSUNEK 2. Elementy pasa rekultywacyjnego z pionową przesłoną przeciwiłtracyjną wokół składowiska „Lubna” (Koda 2000)

FIGURE 2. Elements of zone reclamation with vertical barrier around Lubna landfill (Koda 2000)

danych czynników najbardziej znaczący wpływ na funkcjonowanie przesłony mają: wiek, zagłębienie (wpływ ciśnienia) oraz skażenie (Soga i Joshi 2010).

Monitoring wód w rejonie składowiska odpadów „Lubna” i model numeryczny przepływu i migracji

Zadaniem monitoringu jest identyfikacja i śledzenie przemieszczania się zanieczyszczeń ze składowiska do środowiska gruntowo-wodnego, nadzór nad przebiegiem rekultywacji oraz ocena jakości i skuteczności wykonanych systemów zabezpieczeń.

Lokalny monitoring wód w rejonie składowiska odpadów „Lubna” obejmuje wody podziemne (wody gruntowe, wody z poziomu użytkowego, wody w przewarstwiach utworów zastoiowych), wody powierzchniowe (rowy melioracyjne), wody odciekowe (surowe i podczyszczone w istniejącej oczyszczalni biologicznej), pomiary zwierciadła wody podziemnej i wielkości przepływu w rowach melioracyjnych. Analizy chemiczne i pomiary wykonywane są raz na 6 miesięcy. Ocenę jakości wód powierzchniowych i podziemnych przeprowadzono na podstawie porównania otrzymanych wartości stężeń wskaźników oznaczanych w próbkach wód powierzchniowych z wartościami granicznymi, adekwatnie dla poszczególnych

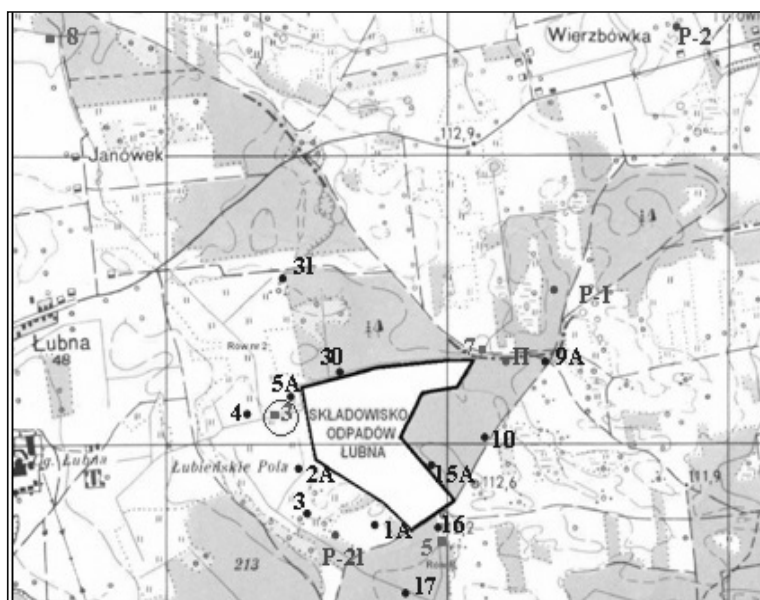
klas jakości wód płynących powierzchniowych i klas jakości wód podziemnych, określonych odpowiednimi rozporządzeniami. Położenie składowiska odpadów „Łubna” i lokalizację punktów monitoringu wód przedstawiono na rysunku 3.

Na poprawę jakości wód powierzchniowych i podziemnych w rejonie składowiska „Łubna” decydujące znaczenie miało wykonanie pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej odcinającej odcieki od pierwszego poziomu wodonośnego oraz budowa systemu drenażowego odcieków. Wpływ prac rekultywacyjnych na jakość wód powierzchniowych i podziemnych w pierwszej warstwie wodo-

nośnej przedstawiono odpowiednio w tabelach 1 i 2.

Jak wynika z zestawienia wybranych wskaźników zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych i podziemnych, obserwowana jest znaczna poprawa jakości tych wód. W przypadku wód podziemnych w ciągu kilku lat większość badanych wskaźników osiągnęła stężenia wymagane dla I i II klasy jakości.

W celu przeanalizowania wpływu przesłony przeciwfiltracyjnej na układ pierwszego poziomu wodonośnego w rejonie składowiska „Łubna” wykorzystano program FEMWATER z pakietu GMS. Jest to program symulacji przepływu i transportu substancji rozpuszczonych w wodzie i ich wymiany mię-



Legenda/Legend:

- 3 ■ – punkt poboru wody z cieków powierzchniowych / surface water abstraction point
- 2A • – piezometry zafiltrowane w pierwszej warstwie wodonośnej / piezometers in the first aquifer
- P-1 • – piezometry zafiltrowane w drugiej warstwie wodonośnej / piezometers in the second aquifer
- II • – piezometr zafiltrowany w utworach zastoiskowych / piezometer in the ice dam deposits

RYSUNEK 3. Lokalizacja składowiska „Łubna” i punktów monitoringu wód (stan obecny)

FIGURE 3. Location of Łubna landfill and water quality monitoring points (present condition)

TABELA 1. Wpływ wykonania przesłony przeciwfiltracyjnej wokół składowiska „Lubna” na jakość wód powierzchniowych na rowie nr 2 (punkt 3 poboru) na przykładzie wybranych wskaźników zanieczyszczeń
 TABLE 1. The influence of the vertical barrier on quality of surface water in the vicinity of Lubna landfill for chosen parameters in the point No 3 on ditch No 2

| Wskaźnik zanieczyszczeń Pollution indicator | Jednostka Unit | Stężenie zanieczyszczeń Concentration of pollutants | | | Wartości dopuszczalne według Rozporządzenia... [2011] ^a Admissible values by Decree... [2011] | | |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|
| | | 24.11.97 | Zamknięcie przesłony (09.06.1998) Clousere of the vertical barrier (09.06.1998) | 16.12.03 | 09.11.09 | I klasa | II klasa |
| BZT ₅ /BOD ₅ | mg O ₂ ·l ⁻¹ | 610 | | 75 | 4,6 | ≤ 3 | ≤ 6 |
| ChZT _{Cr} COD _{Cr} | mg O ₂ ·l ⁻¹ | 1043 | | 238 | 59 | ≤ 25 | ≤ 30 |
| PEW Conductivity | μS·cm ⁻¹ | 4770 | | 3450 | 2502 | ≤ 1000 | ≤ 1500 |
| Azot amonowy Ammonium nitrogen | mg NNH ₄ ⁺ ·l ⁻¹ | 182,1 | | 17,5 | 0,07 | ≤ 0,78 | ≤ 1,56 |
| Chlorki Chlorides | mg Cl ⁻ ·l ⁻¹ | 938 | | 690 | 440 | ≤ 200 | ≤ 300 |
| Siarczany Sulphates | mg SO ₄ ²⁻ ·l ⁻¹ | 275 | | 130 | 174 | ≤ 150 | ≤ 250 |

^aDla klas III, IV i V wartości granicznych nie ustala się.

TABELA 2. Wpływ wykonania przesłony przeciwfiltracyjnej wokół składowiska „Lubna” na jakość wód pierwszego poziomu wodonośnego w piezometrze 1A na przykładzie wybranych wskaźników zanieczyszczeń

TABLE 2. The influence of the vertical barrier on quality of first groundwater layer in the vicinity of Lubna landfill for chosen parameters in the point No 1A

| Wskaźnik zanieczyszczeń Pollution indicator | Jednostka Unit | Stężenie zanieczyszczeń Concentration of pollutants | | Wartości graniczne dla klas I–V według Rozporządzenia... [2008] Limit values Decree... [2008] | | | | | |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------|-------------------|------|--------|
| | | 17.06.97 | Zamknięcie przesłony (09.06.1998) Clousere of the vertical barrier (09.06.1998) | 01.06.09 | I | II | III | IV | V |
| BZT ₅ /BOD ₅ | mg O ₂ ·l ⁻¹ | 20 | | < 0,5 | – | | | | |
| ChZT _{Cr} COD _{Cr} | mg O ₂ ·l ⁻¹ | 78,5 | | 13,9 | – | | | | |
| PEW Conductivity | μS·cm ⁻¹ | 1360 | | 631 | 700 | 2500 ^a | 2500 ^a | 3000 | > 3000 |
| Azot amonowy Ammonium nitrogen | mg NNH ₄ ⁺ ·l ⁻¹ | 1,5 | | 0,09 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 3 | > 3 |
| Chlorki Chlorides | mg Cl ⁻ ·l ⁻¹ | 356 | | 133 | 60 | 150 | 250 | 500 | > 500 |
| Siarczany Sulphates | mg SO ₄ ²⁻ ·l ⁻¹ | 84 | | 99,3 | 60 | 250 ^a | 250 ^a | 300 | > 300 |

^aPrzy klasyfikacji do oceny przyjmuje się klasę o najwyższej jakości spośród klas posiadających tę samą wartość graniczną.

dzy wodą a gruntem. Model stworzono na podstawie kilkudziesięciu profiliów uzyskanych z archiwalnych i wykonywanych do tego celu dodatkowych otworów rozpoznawczych. Kształt bryły składowiska odpowiada docelowemu kształtowi, obszar modelu jest ograniczony rowami melioracyjnymi i lokalnymi wzniesieniami terenu (powierzchnia modelu wyniosła 90 ha). W modelu zostały odwzorowane odpady i przesłona przeciwiłtracyjna oraz trzy warstwy gruntów, stanowiących podłoże składowiska. W celu sprawdzenia poprawności wykonanych symulacji porównano pomiary zwierciadła wody w piezometrach z wartościami uzyskanymi z modelowania. Na tej podstawie przyjęto, że kierunek i charakter przepływu otrzymany z symulacji zgadza się z warunkami rzeczywistymi, a względne ustabilizowanie zwierciadła wody nastąpiło 1,5 roku po wbudowaniu przesłony. Model zostanie wykorzystany do symulacji transportu zanieczyszczeń ze składowiska i oceny skuteczności zastosowanych zabezpieczeń.

Podsumowanie

Ochrona środowiska gruntowo-wodnego przed migracją zanieczyszczeń w rejonie starych składowisk jest ważnym zagadnieniem ze względu na długotrwałe oddziaływanie tego typu obiektów na środowisko naturalne. Istotne znaczenie mają badania parametrów do opisu procesów rządzących zachowaniem i przemieszczaniem się zanieczyszczeń ze składowisk odpadów w nawodnionym ośrodku gruntowym, co pozwoli na zwiększenie dokładności numerycznych symulacji transportu, które razem z monitoringiem wód w rejonie składo-

wiska stanowią podstawowe narzędzia w ocenie skuteczności zabiegów rekultywacyjnych. Równie ważna jest analiza wpływu wykonanych zabezpieczeń na migrację zanieczyszczeń, podobnie jak oddziaływania odcieków na trwałość materiałów uszczelnień składowisk oraz przebiegu samooczyszczania się środowiska wodno-gruntowego. Badania będą polegały na laboratoryjnych pomiarach charakterystyk przepuszczalności gruntów i materiału przesłony przeciwiłtracyjnej z wykorzystaniem wody i zanieczyszczonych odcieków oraz oznaczenia wybranych parametrów i związków chemicznych w wodzie pierwszego poziomu wodonośnego, takich jak: przewodność elektrolityczna PEW, azot amonowy, chlorki i siarczany.

Literatura

- BOLT A., DOBKOWSKA M. 2000: Charakterystyka procesów naturalnej degradacji zanieczyszczeń BTEX w środowisku gruntowym. Jubileuszowa Sesja Naukowa „Geotechnika w budownictwie i inżynierii środowiska”, Gdańsk.
- BRANDL H. 1994: Vertical barriers for municipal and hazardous waste containment. Proceedings Symposium on Developments in Geotechnical Engineering, Bangkok: 301–344.
- DELLEUR J. 1999: The handbook of groundwater engineering. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- DOMENICO P.A., SCHWARTZ F.W. 1990: Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, New York.
- GOLIMOWSKI J., KOCISZEWSKI R. 1998: Monitoring wód podziemnych wokół wysypiska „Łubna”. Raport roczny 1997, Warszawa.
- KODA E. 2000: Systemy zabezpieczenia przed zanieczyszczeniem wód w rejonie starych wysypisk odpadów. Jubileuszowa Sesja Naukowa „Geotechnika w budownictwie i inżynierii środowiska, Gdańsk: 313–322.

- KODA E. 2001: Monitoring lokalny wód w rejonie starych wysypisk odpadów komunalnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 476: 415–423.
- KODA E. 2011: Stateczność rekultywowanych składowisk odpadów i migracja zanieczyszczeń przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- KODA E., GOLIMOWSKI J., PAPROCKI P. 2004: Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie składowiska odpadów „Łubna”. Raport roczny 2003, Warszawa.
- KODA E., GOLIMOWSKI J., PAPROCKI P., KOŁANKA T. 2010: Monitoring składowiska odpadów „Łubna”. Raport roczny 2009, Warszawa.
- MAŁECKI J.J. 2006: Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- MANASSERO M., SHACKELFORD C.D. 1994: The role of diffusion in contaminant migration through soil barriers. *Rivista Italiana di Geotecnica* 1: 5–23.
- REMBEZA L. 1998: Przepływy wody i zanieczyszczeń w gruncie. Analityczne metody rozwiązań. Wydawnictwo AR, Poznań.
- ROWE R.K. 1998: Geosynthetics and the mineralization of containment migration through barrier systems beneath solid waste. Key. Lect. for the 6th Inter. Conf. on Geotechnics, Atlanta: 27–102.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 lipca 2008 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu wód podziemnych. Dz.U. z 2008 r. nr 143, poz. 896.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. Dz.U. z 2011 r. nr 257, poz. 1545.
- SHACKELFORD C.D. 1988: Diffusion as a transport process in fine-grained barrier materials. *Geotechnical News* 6, 2: 24–27.
- SOGA K., JOSHI K. 2010: Long-term performance of cement-bentonite cut-off walls: A case study. Proc. of the 6th Inter. Cong. on Environ. Geo., New Dehli 1: 151–164.
- Van GENUCHTEN M.T. 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of saturated soils. *Soil Sciences Society Journal* 44: 892–898.
- WIENCLAW E., KODA E. 2005: Model przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń dla składowiska z bentonitową przesłoną pionową. *Przegląd Geologiczny* 53, 9: 770–775.
- ZHENG C., BENNETT G.D. 2002: Applied contaminant transport modeling. Wiley – Interscience, New York.

Streszczenie

Migracja zanieczyszczeń w rejonie starego składowiska odpadów z pionową przesłoną przeciwfiltracyjną. W artykule przedstawiono i zdefiniowano procesy zachodzące w migracji zanieczyszczeń ze składowiska odpadów w nawodnionym ośrodku gruntowym. Omówiono również sposób zabezpieczenia składowiska przed migracją zanieczyszczeń oraz założenia modelu numerycznego przepływu i migracji zanieczyszczeń na przykładzie starego składowiska odpadów „Łubna”. Przeanalizowano wyniki systematycznych badań monitoringowych jakości wód powierzchniowych i podziemnych w rejonie składowiska z okresu przed i po wykonaniu przesłony przeciwfiltracyjnej.

Summary

Pollutant transport in vicinity of old landfill with vertical barrier. The paper presents and defines the processes of pollutant transport in subsoil. The landfill's vertical barrier and assumption of numerical model of groundwater flow and pollutant transport are also discussed, based on example of the old sanitary landfill Łubna localized near Warsaw. The water monitoring results of landfill areas, which includes water chemical analyses from the period before and after the vertical barrier was built, is also analyzed in this paper.

Author's address:

Dorota Wychowaniak
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Geoinżynierii
 ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
 Poland
 e-mail: dorota.wychowaniak@ios.edu.pl