

**Eugeniusz KODA, Edward WIENCLAW, Tomasz KOŁANKA**

Katedra Geoinżynierii SGGW  
Department of Geotechnical Engineering WAU

## **Modelowanie przepływu wód podziemnych i infiltracji zanieczyszczeń w korpusie odpadów składowiska\*** **Groundwater flow and infiltration pollutant modelling in wastes body of the landfill**

**Słowa kluczowe:** składowisko, ochrona wód podziemnych, modelowanie przepływu, infiltracja zanieczyszczeń

**Key words:** landfill, groundwater protection, flow modelling, pollutant infiltration

### **Wprowadzenie**

Model, na którym wykonano symulację nieustalonego przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń, jest odwzorowaniem numerycznym składowiska odpadów w Radiowie koło Warszawy wraz z terenem przyległym. Obiekt był eksploatowany od 1962 do 1991 roku jako składowisko odpadów komunalnych, od 1992 roku do chwili obecnej deponowane są na nim tylko odpady balastowe pochodzące z produkcji kompostu, zawierające

głównie: szkło, plastiki, tekstylia i inne składniki nienadające się do wytwarzania kompostu. W ramach rekultywacji składowiska i ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniami pochodzącymi ze składowiska została wykonana m.in. pionowa przesłona bentonitowa metodą jednofazową z wykorzystaniem zawiesiny twardniejącej. Przesłona ma za zadanie zatrzymać migrację zanieczyszczeń ze składowiska w postaci odcieków do pierwszej warstwy wodonośnej. Głębokość wykonania przesłony była uzależniona od głębokości występowania stropu utworów słabo przepuszczalnych (gliny zwałowe, ility trzeciorzędowe) i wynosi od 3,5 do 22 metrów.

---

\* Badania modelowe przedstawione w artykule zostały przeprowadzone w ramach projektu badawczego 2 P04G 056 27 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji.

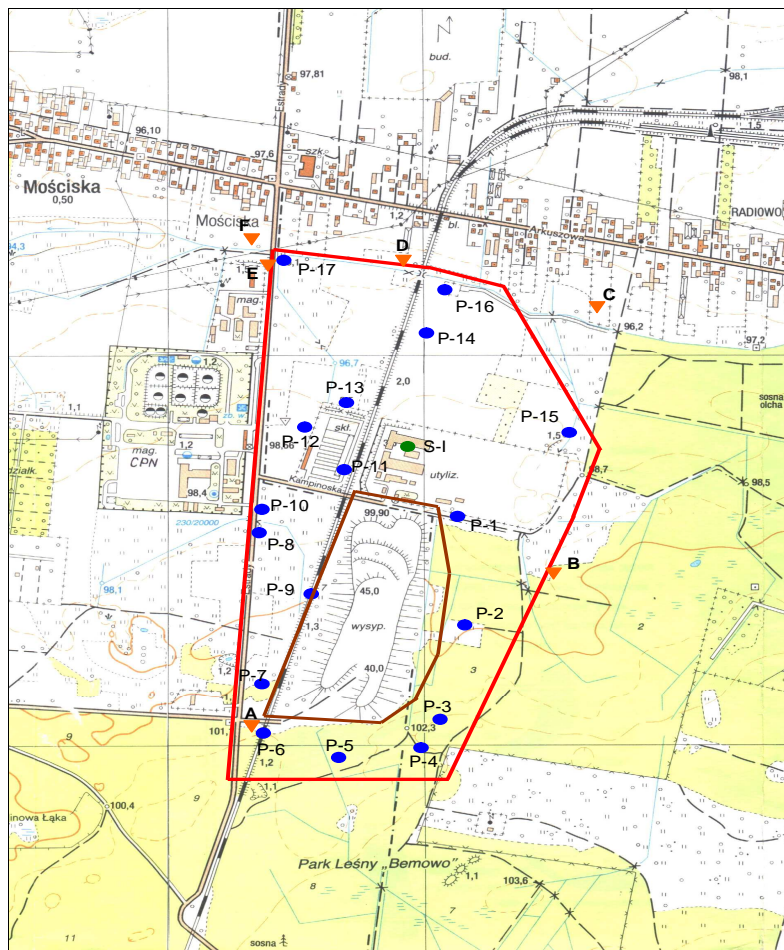
## Obszar badań

Składowisko Radiowo jest położone w północno-zachodniej części Warszawy. Składowisko o wysokości 60 m zajmuje powierzchnię około 16 ha (rys. 1). Prace rekultywacyjne na składowisku rozpoczęto w 1998 roku i obejmują one wykonanie m.in.: przesłony przeciwfiltracyjnej, systemu drenażowego odcieków, systemu recyrkulacji odcieków, kształtowania skarp i budowę dróg technologicznych, mineralnego systemu przykrycia i regulacji stosunków wodnych na terenach przyległych. Planowane jest jeszcze dokończenie kształtowania bryły składowiska z wykorzystaniem odpadów balastowych i wykonanie systemu odgazowania składowiska w 2006 roku. W ramach systemu recyrkulacji rozprowadzane są na części terenu składowiska odcieki i nadmiar wód opadowych z terenu kompostowni. Charakteryzują się one stężeniem jonów chlorkowych w granicach od 0,9 do 4,1 g/dm<sup>3</sup>, średnio 2,5 g/dm<sup>3</sup>. Natężenie infiltracji odcieków składowiskowych i wód z terenu kompostowni na terenie składowiska szacowane jest na  $q_{inf} = 150$  mm/rok (Koda i in. 2004).

Teren składowiska w Radiowie usytuowany jest w wododziałowej części rzeki Łasicy prawobrzeżnego dopływu rzeki Bzury. Wody spływające powierzchniowo z rozpatrywanego obszaru siecią drobnych cieków i rowów melioracyjnych trafiają do Lipowskiej Wody, dopływu Kanału Zaborowskiego, sztucznego cieku uchodzącego do rzeki Łasicy. Wzdłuż wschodniej granicy monitorowanego terenu biegnie rów, prowadzący wody zanieczyszczone bezpośrednio do Lipowskiej Wody. Od zachodniej strony brak jest rowu od-

prowadzającego wody powierzchniowe, a odpływ utrudnia nasyp kolejowy, powodujący przez wiele lat tworzenie się rozlewisk odcieków na terenach przyległych. Za nasypem kolejowym przebiega ciek zbierający wody i prowadzący je wzdłuż wschodniej strony ulicy Estakady, tworząc miejscami niewielkie okresowe rozlewiska infiltrujące w podłoże. Wody te migrują w kierunku północno-zachodnim. Od strony południowej możliwy jest tylko okresowy odpływ wód zanieczyszczonych w kierunku południowo-wschodnim, co powoduje tworzenie się bezodpływowych zagłębień i podmokłości w Lesie Boernerowskim, szczególnie w okresie wiosennym. Od strony północnej, wzdłuż krawędzi składowiska i ulicy Kampinoskiej istnieje rów umocniony płytami betonowymi, prowadzący niewielką ilość wód w kierunku zachodnim do oczyszczalni znajdującej się na terenie kompostowni.

Naturalny przepływ wód gruntowych pierwszego poziomu wodonośnego obecnie jest uwarunkowany wykonaniem pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej wokół składowiska, która zapobiega mieszanii się wód napływających od strony południowo-wschodniej i uniemożliwia odpływ silnie zanieczyszczonych odcieków z podstawy składowiska w kierunku północno-zachodnim. Obecnie wody gruntowe opływają składowisko na zewnątrz przesłony przeciwfiltracyjnej, powodując powstanie lokalnych rozlewisk od strony południowej, szczególnie w okresach wiosennych i po intensywnych opadach. W ramach projektu rekultywacji przewiduje się wykonanie rowu przejmującego napływające wody od południowej



- analizowany obszar / analysed area
- P-1A - pierzometr I-go poziomu wodonośnego / shallow piezometer
- S-1 - studnia II-go poziomu wodonośnego / deep well
- ▼ A - miejsce poboru próbek wód powierzchniowych / surface water sample
- przesłona przeciwiłtracyjna / cut-off wall barrier

RYSUNEK 1. Lokalizacja składowiska w Radiowie wraz z punktami monitoringu wód  
 FIGURE 1. Location of Radiowo landfill and water quality monitoring

i wschodniej strony składowiska oraz utrzymanie istniejącego rowu wzdłuż ulicy Kampinoskiej.

Podłoże składowiska Radiowo, w przypowierzchniowej części, zbudowane jest z polodowcowych i zastoisko-

wych osadów piaszczystych o miąższości 2–8 m, z lokalnymi przegłębieniami nawet do 20 m. W górnej części są to piaski drobnoziarniste z namułami, a w dolnej części warstwy piasków od drobnoziarnistych do gruboziarnistych.

Warstwa ta stanowi przypowierzchniowy poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym na głębokości 0-2 m p.p.t. Zasilanie tego poziomu odbywa się drogą infiltracji wód opadowych oraz w wyniku napływu wody z terenów leśnych położonych na południowo-wschód od składowiska. Rowy odwadniające od strony północno-wschodniej i zachodniej, jak również ciek przepływający od strony północnej stanowią układ lokalnego drenażu przypowierzchniowego poziomu wodonośnego, przez wiele lat zanieczyszczanego odciekami ze składowiska. Po wykonaniu przesłony przeciwfiltracyjnej i wdrożeniu systemu recyrkulacji zanieczyszczonych wód na składowisku dopływ zanieczyszczeń do pierwszego poziomu wodonośnego terenów przyległych do składowiska i do cieków powierzchniowych został zatrzymany (Koda i Wienclaw 2005).

Bentonitową przesłonę przeciwfiltracyjną wokół składowiska Radiowo wykonano w latach 1999–2000. Przesłona ma 0,6 m szerokości i jest zagłębiona minimum 2 m poniżej stropu utworów słabo przepuszczalnych (tj. 3,5–22 m p.p.t.) reprezentowanych przez czwartorzędowe gliny polodowcowe (strona południowa, wschodnia i częściowo zachodnia) oraz plioceńskie iły zastoiskowe (strona północna i północno-zachodnia).

### Model przepływu wód gruntowych i transportu

Model numeryczny przepływu wód podziemnych został opracowany z wykorzystaniem pakietu GMS/ FEMWA-

TER (GMS 2000, Lin i in. 2000). Podstawą modelu przepływu FEMWATER jest rozwiązanie przestrzenne (3-D) zadania przepływu i transportu. Celem obliczeń numerycznych było określenie wpływu pionowej przesłony na kształtowanie się zwierciadła wód podziemnych w rejonie składowiska oraz określenie czasu, po którym odcieki zrzucane na powierzchnię składowiska osiągną poziom zwierciadła wód podziemnych. Program FEMWATER umożliwia określenie czasu przepływu wody przez warstwę słabo przepuszczalną (Wienclaw i Ziembikiewicz 2000).

Podstawowym równaniem różniczkowym w FEMWATER opisującym przepływ wód podziemnych jest równanie Richards'a:

$$\nabla[k_r k_s (\nabla h + \nabla z)] + q = F \frac{\partial h}{\partial t}$$

gdzie:

$k_r$  – względna przewodność hydrauliczna,

$k_s$  – tensor przewodności hydraulicznej strefy saturacji ( $L/T$ ),

$h$  – wysokość ciśnienia ( $L$ ),

$z$  – wysokość położenia ( $L$ ),

$q$  – funkcja wyrażająca zasilanie lub pobór wody odniesione do jednostkowej objętości ośrodka i jednostki czasu ( $1/T$ ),

$F = \frac{\partial \theta}{\partial h}$  – różniczkowa pojemność

wodna, gdzie:

$\theta$  – objętościowa zawartość wody ( $L^3/L^3$ ),

$t$  – czas ( $T$ ).

Ogólnie  $F$ ,  $\theta$  i  $k_r$  są funkcjami  $h$ . W modelu zależności te zostały zdefiniowane jako funkcje opisane zależno-

ściami podanymi przez van Genuchtena (1980).

Podstawowymi procesami transportu zanieczyszczeń, które mogą być rozpatrywane z wykorzystaniem modelu FEMWATER są adwekcja, dyspersja i dyfuzja oraz adsorpcja i rozpad.

W prezentowanym modelu proces transportu rozpatrywano jako transport adwekcyjny rozpuszczonego pojedynczego składnika (stężenie chlorków  $Cl^-$ ), który można opisać równaniem:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + V \nabla C = 0$$

gdzie:

$\theta$  – objętościowa zawartość wody ( $L^3/L^3$ ),

$V$  – wektor prędkości przepływu ( $L/T$ ),

$\nabla$  – operator Nabla,

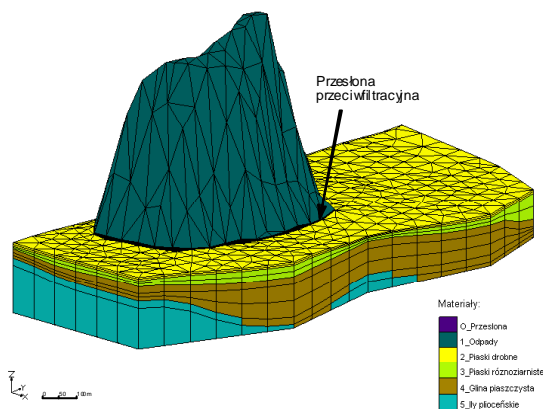
$C$  – stężenie zanieczyszczenia w wodzie ( $M/L^3$ ).

Na modelu odwzorowano teren składowiska i kompostowni wraz ze strefą utulinową o szerokości około 200 m, o łącznej powierzchni 88 ha. Po-

wierzchnia terenu składowiska w planie wynosi około 16 ha. Powierzchnia części składowiska w planie, na którą są odprowadzane odcieki, wynosi 0,5 ha.

Bryłę prezentowanego modelu numerycznego przedstawiono na rysunku 2 (GMS 3.1 2000). Generowana siatka składa się z 8903 elementów i 5289 węzłów. Maksymalna rzędna odwzorowanej bryły wynosi 78 m nad „0” Wisły. Minimalna rzędna odwzorowanej bryły składowiska i terenów przyległych wynosi 5 m nad „0” Wisły.

W modelu, odpowiednio do rozpoznania budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych rejonu składowiska (Koda 1999), wyróżniono cztery warstwy osadów podłoża. Zaczynając od najstarszych (najniżej zalegających) do najmłodszych (występujących przy powierzchni terenu), są to: ility (I) charakteryzujące się przewodnością hydrauliczną  $k_s = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s i objętościową zawartością wody  $\theta = 0,35$ , gliny piaszczyste (Gp) o  $k_s = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s i  $\theta = 0,38$ , piaski od drobnoziarnistych



RYSUNEK 2. Model numeryczny 3-D GMS dla odwzorowania bryły składowiska Radiowo  
FIGURE 2. The 3-D GMS numerical mesh for Radiowo landfill

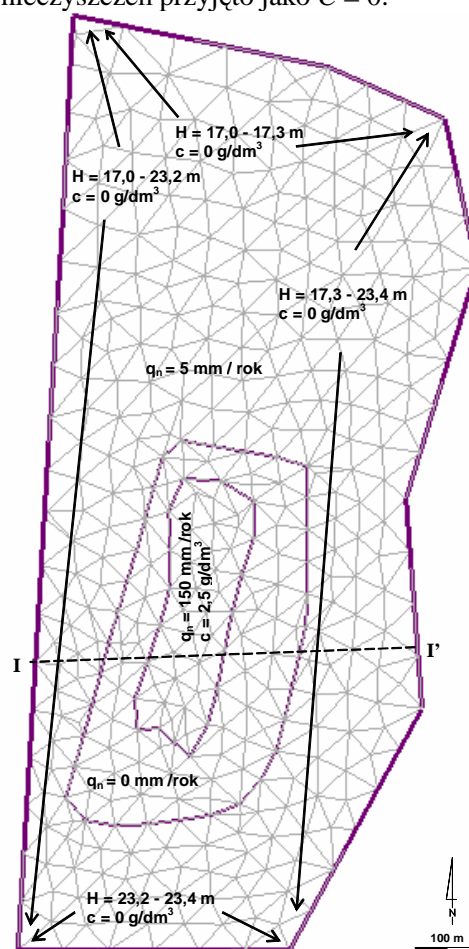
do gruboziarnistych (Pd/Ps/Pr) o  $k_s = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s i  $\theta = 0,43$  oraz piaski drobnoziarniste z namułami (Pd) o  $k_s = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s i  $\theta = 0,43$ . Wartości objętościowej zawartości wody wymienionych gruntów przyjęto za Carsel i Parrish (1988), natomiast dla odpadów na podstawie badań polowych (Koda i Żakowicz 1998). Odpady o  $k_s = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s i  $\theta = 0,055 - 0,43$  znajdują się w środku modelu i stanowią jednocześnie jego górną część. Wzdłuż granicy nagromadzonych odpadów przebiega pionowa przesłona przeciwfiltracyjna o  $k_s = 5 \cdot 10^{-10}$  m/s i  $\theta = 0,36$  (Koda i Skutnik 2003). Wartości przewodności hydraulicznej ( $k_s$ ) dla strefy saturacji, objętościową zawartość wody  $\theta(h)$  i względną przewodność hydrauliczną  $k_r(h)$  dla osadów z podłoża składowiska, odpadów i bentonitu, przyjęte w modelu numerycznym, przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Parametry materiałowe do modelowania numerycznego

TABLE 1. Soils/material parameters for modeling

Rodzaj materiału <i>Material</i>	$k_s$ [m/s]	$\theta$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$k_r$ [-]
Bentonit <i>Bentonite</i>	$5 \cdot 10^{-10}$	0,36	0,99–1,0
Odpady <i>Wastes</i>	$1 \cdot 10^{-4}$	0,055–0,43	0,37–1,0
Piasek drobny <i>Dense sand</i>	$5 \cdot 10^{-5}$	0,43	0,99–1,0
Piaski nierównomiernie uziarnione <i>Non-uniform sands</i>	$1 \cdot 10^{-4}$	0,43	0,99–1,0
Gliny piaszczyste <i>Sandy clays</i>	$1 \cdot 10^{-7}$	0,38	1,0
Gliny trzeciorzędowe <i>Tertiary clays</i>	$5 \cdot 10^{-9}$	0,35	1,0

Przyjęte warunki początkowe dla przepływu ilustruje mapa ukształtowania zwierciadła wód podziemnych dla sytuacji z 1998 roku (rys. 3), tj. dla sytuacji przed rozpoczęciem realizacji systemu zagospodarowania odcieków i budowy pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej. Początkowe warunki dla transportu zanieczyszczeń przyjęto jako  $C = 0$ .



RYSUNEK 3. Warunki brzegowe przyjęte dla modelu przepływu i infiltracji w rejonie składowiska Radiowo; I-I' – linia przekroju  
FIGURE 3. Boundary conditions for the flow and transport numerical model of Radiowo landfill surroundings; where I-I' is the cross-section line

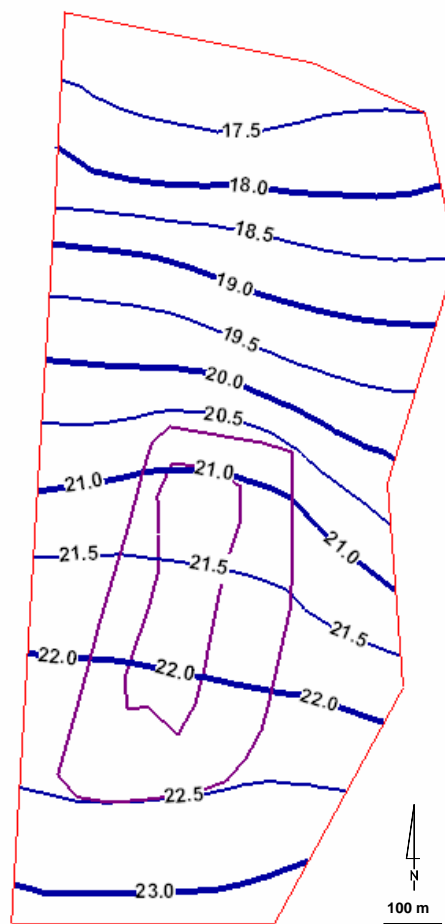
W planie granice zewnętrzne modelu pokrywają się z przebiegiem cieków powierzchniowych otaczających teren składowiska. Cieki te odwzorowano na modelu jako ograniczenie o warunkach brzegowych Dirichleta, dla przepływu o stałych wartościach wysokości hydraulicznej równej rzędnym zwierciadła wody w ciekach, wynoszących od 17 m nad „0” Wisły (w części północnej modelu) do 23,45 m nad „0” Wisły (w części południowej), a dla transportu jako ograniczenia o  $C = 0$  (rys. 3). Część terenu składowiska, na której dokonywany jest zrzut odcieków ze składowiska i kompostowni, wód opadowych z terenu kompostowni (recykulacja), odwzorowano na modelu w postaci warunku Neumanna  $q_N = 150$  mm/rok dla przepływu a dla transportu w postaci warunku Dirichleta o stężeniu wskaźnika zanieczyszczeń (Cl<sup>-</sup>)  $C = 2,5$  g/dm<sup>3</sup>.

Na terenie przyległym do składowiska natężenie infiltracji opadów atmosferycznych odwzorowano na modelu także w postaci warunku Neumanna o wartości  $q_N = 5$  mm/rok. Dla powierzchni stromych zboczy składowiska przyjęto  $q_N = 0$  mm/rok.

## Wyniki modelowania przepływu i transportu

Wyniki symulacji procesu przepływu wód podziemnych opracowano w postaci mapy hydroizohips (rys. 4).

Przedstawiony na mapie obraz ukształtowania zwierciadła wody gruntu odpowiada sytuacji względnego

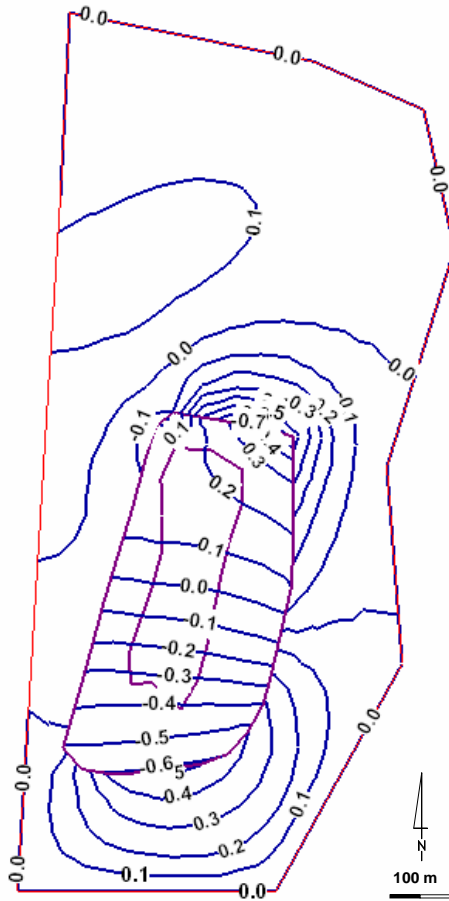


RYSUNEK 4. Przyjęte warunki początkowe dla przepływu (mapa hydroizohips dla stanu w 1998 roku, tj. przed rozpoczęciem robót rekultywacyjnych na składowisku)

FIGURE 4. Initial hydraulic conditions (the contour map of GWL in 1998 before remedial works starting)

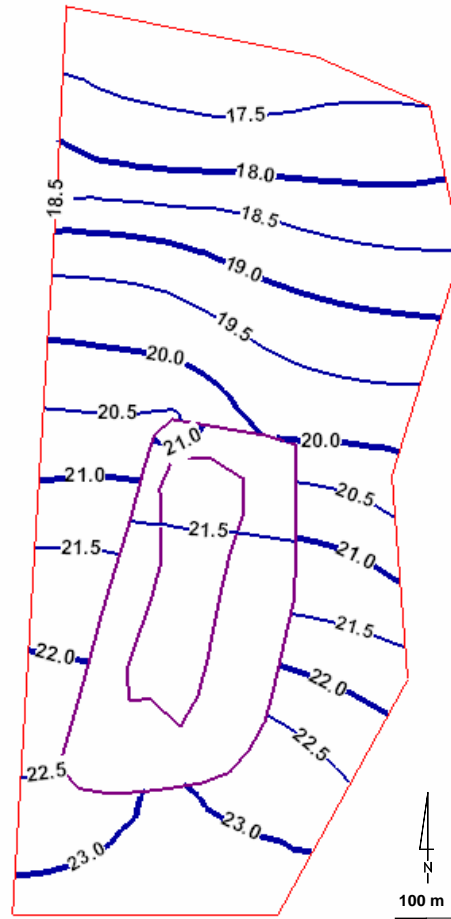
ustalenia się przepływu wód podziemnych w podłożu składowiska i w jego otoczeniu. Dla odwzorowanego na modelu stanu rekultywacji składowiska okres ustalenia się przepływu wód podziemnych wynosi około 4 lata (rys. 5).





RYSUNEK 5. Mapa hydroizohips dla podłoża składowiska i okolic po 4 latach od wykonania pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej i wdrożenia systemu recykulacji  
 FIGURE 5. The groundwater contour map for the landfill subsoil with the vertical barrier and the leachate re-circulation system – 4 years after its exploitation

Porównanie ukształtowania powierzchni zwierciadeł wód podziemnych dla stanu przed rekultywacją składowiska i dla stanu po 4 latach od wykonania przesłony przeciwfiltracyjnej i wdrożenia układu recykulacji odcieków wykazuje, że ukształtowanie zwierciadła wód podziemnych w rejonie składowiska uległo zmianie (rys. 6).



RYSUNEK 6. Mapa zmian położenia zwierciadła wody gruntowej na składowisku i terenach przyległych w wyniku działania pionowej przesłony i eksploatacji systemu recykulacji odcieków  
 FIGURE 6. The contour map of changes of the groundwater level on the landfill and surroundings caused by the vertical barrier and the leachate re-circulation

W podłożu składowiska ma miejsce zarówno obniżenie się zwierciadła wód podziemnych, jak i jego podwyższenie. Obniżenie zwierciadła w granicach do około 0,6 m występuje w południowej części składowiska. Podwyższenie po-



ziomu wód podziemnych ma miejsce w centralnej i północnej części składowiska, gdzie wznios zwierciadła wody dochodzi do 0,5 m. Na terenie przyległym do składowiska jest podobnie – ma miejsce zarówno obniżenie się zwierciadła wód podziemnych, jak i jego lokalne podwyższenie.

Maksymalne obniżenie w położeniu zwierciadła do 0,7 m ma miejsce w północnej części terenu, bezpośrednio przyległej do przesłony przeciwfiltracyjnej.

Natomiast największe podpiętrzenie wód podziemnych do 0,5 m, występuje w części terenu przyległej do składowiska od południa, gdzie przesłona stanowi barierę utrudniającą przepływ wodzie podziemnej z południa ku północy. Wyniki modelowych symulacji poziomu zwierciadła wód podziemnych są porównywalne z pomiarami w ramach sieci monitoringu lokalnego wód podziemnych w piezometrach (Golimowski i Koda 2001).

Wyniki symulacji transportu adwekcyjnego odcieków w korpusie i podłożu składowiska przedstawiono na przekroju I–I' (rys. 7) w postaci linii równych czasów (izochron) infiltracji frontu odcieków. Nawiązując do celu badań modelowych, można przyjąć, że odcieki dotrą do zwierciadła wód podziemnych w podłożu składowiska po około 40 latach od momentu ich zrzutu na korpus składowiska.

## **Podsumowanie i wnioski**

Ochrona przypowierzchniowych wód podziemnych przed odciekami ze składowiska Radiowo jest realizowana

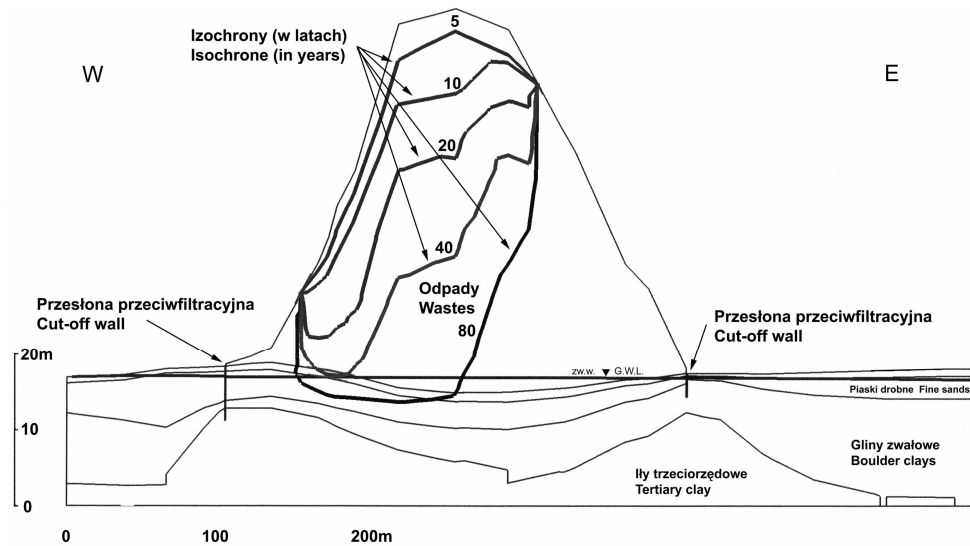
z wykorzystaniem systemu składającego się z pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej i drenażu opaskowego, dodatkowo uzupełnionego układem recyrkulacji odcieków na powierzchnię składowiska.

Modelowanie numeryczne jest przydatne do jakościowej oceny wpływu bariery pionowej na przepływ wód gruntowych. Wyniki modelowania numerycznego dla składowiska Radiowo, przedstawione i przeanalizowane w artykule, wskazują na izolacyjny charakter bentonitowej przesłony pionowej.

W wyniku wykonania pionowej przesłony bentonitowej i wdrożenia układu recyrkulacji odcieków na powierzchnię składowiska, poziom zwierciadła wody (odcieków) na obszarze składowiska (otoczonym pionową przesłoną) również został zmieniony, tj. nastąpiło obniżenie lub podwyższenie poziomu odcieków, w zależności od strefy składowiska. Prognoza położenia zwierciadła wód podziemnych/odcieków w składowisku posłużyła do opracowania projektu drenażu odcieków i ustalenia rzędnej korony przesłony bentonitowej, zapewniających uniknięcie przełania się odcieków poprzez przesłonę na tereny przyległe.

Wyniki modelowania przepływu wody gruntowej zostały zweryfikowane pomiarami monitoringowymi w płytkich piezometrach rozmieszczonych wokół składowiska.

Nawiązując do postawionego celu modelowania transportu w korpusie składowiska Radiowo, można przyjąć, że odcieki rozprowadzone na koronę składowiska osiągną w wyniku infiltracji poziom wody gruntowej w podłożu składowiska po 40 latach.



RYSUNEK 7. Izochrony z numerycznej symulacji adwekcyjnego transportu w korpusie i podłożu składowiska w przekroju I-I'

FIGURE 7. Isochrones from the numerical simulation of leachate advective transport in the waste body and the landfill subsoil in the cross-section I-I'

## Literatura

- CARSEL R.F., PARRISH R.S. 1988: Developing joint probability distribution of soilwater retention characteristics. *Water Resources Research* 24, 5: 755–760.
- GMS 3.1 2000: *Groundwater Modelling System*. Birgham Young University – Environmental Modelling Research Laboratory, Provo UT.
- GOLIMOWSKI J., KODA E. 2001: Assessment of remedial works effectiveness on water quality in the vicinity of landfill based on monitoring research. *Annals of Warsaw Agric. Univ. – SGGW, Land Reclam.* 32: 17–30.
- KODA E. 1999: Remediation of old embankment sanitary landfills. Proc. of the 3<sup>rd</sup> BGE Conf. on Geoenv. Engin., London.
- KODA E., SKUTNIK Z. 2003: Quality control tests of vertical bentonite barriers for old sanitary landfill containment. Proc. of the 13<sup>th</sup> Europ. Conf. on Soil Mech. and Geot. Engin., Praha.
- KODA E., WIENCLAW E. 2005: Modelling of groundwater flow in old landfill containment with vertical bentonite barrier and leachate re-circulation. Proc. of the 11<sup>th</sup> Intern. Conf. of IACMAG., Torino.
- KODA E., ŻAKOWICZ S. 1998: Physical and hydraulics properties of the MSW for water balance of the landfill. Proc. of the 3<sup>rd</sup> Intern. Congr. on Environ. Geot., Lisboa.
- KODA E., GOLIMOWSKI J., PAPROCKI P., KOŁANKA T. 2004: Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie składowiska i kompostowni Radiowo. Raport roczny 2003. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- LIN H.C.J., RICHARDS D.R., YEN G.T., CHENG J.R., CHENG H.P., JONES N. 2000: FEMWATER – A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media. Version 3.0, Technical Report CHL. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg (USA), MS.
- van GENUCHTEN M.T. 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of saturated soils. *Soil Sci. Soc. Journ.* 44: 892–898.
- WIENCLAW E., ZIEMBIKIEWICZ M. 2000: Assessment of the time of transport of pollutants through the poorly permeable layer. *Ann. of Warsaw Agric. Univer. – SGGW, Land Reclam.* 31: 33–40.

## Summary

**Groundwater flow and infiltration pollutant modelling in wastes body of the landfill.** The numerical modelling of groundwater flow and pollutant infiltration was analyzed for the old sanitary landfill surrounded by a vertical bentonite barrier. The re-circulation system of leachate applied on the landfill was also analysed in transport modelling. The FEMWATER numerical program was used for the modelling. The aim of modelling was assessment of the vertical bentonite barrier influence on

shaping of groundwater level in subsoil on surroundings as well as determination of time infiltration of leachate in the waste body during re-circulation. The results of groundwater monitoring were used for verification and tarring of the numerical model.

### Authors' address:

Eugeniusz Koda, Edward Wienclaw  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
Ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland