

Model przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń dla składowiska z bentonitową przesłoną pionową

Edward Wienclaw*, Eugeniusz Koda*



E. Wienclaw



E. Koda

Flow and transport modelling in a landfill with a vertical bentonite barrier. *Prz. Geol.*, 53: 770–775.

S u m m a r y. The numerical modelling of groundwater flow and pollutant transport was performed for the old sanitary landfill surrounded by a vertical bentonite barrier. The re-circulation system of leachate applied on the landfill was also included in transport modelling. The simulation, using FEMWATER software, aimed at assessment of the vertical bentonite barrier influence on shaping of groundwater level in subsoil on surroundings, as well as estimating the infiltration time of leachate in the waste body during re-circulation. The results of groundwater monitoring were used for verification and calibration of the numerical model.

Key words: landfill, groundwater protection, flow modelling, pollutant transport

Modelowanie nieustalonego przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń przeprowadzono dla rekultywowanego składowiska odpadów w Radiowie k/Warszawy. Składowisko rozpoczęło swoją działalność w 1962 r. bez jakichkolwiek systemów zabezpieczających przed degradacją środowiska geologicznego. Od 1992 r. na składowisku deponowane są wyłącznie odpady balastowe ze zlokalizowanej obok kompostowni. Planowane jest zamknięcie składowiska w 2005 r. Wokół składowiska została wykonana pionowa przesłona bentonitowa metodą jednofazową, z wykorzystaniem zawiesziny twardniejącej. Celem budowy przesłony było zatrzymanie migracji zanieczyszczeń ze składowiska do środowiska geologicznego. Głębokość wykonania przesłony była uzależniona od głębokości występowania stropu utworów słabo przepuszczalnych (gliny zwałowe, iły plicieńskie) i wynosi od 5 do 22 m.

Dla poznania układu warstw geologicznych i parametrów przepuszczalności poszczególnych osadów, przeprowadzono badania polowe oraz badania kontrolne pionowej przesłony bentonitowej. Badania kontrolne przesłony przeciwfiltracyjnej dotyczyły głównie ciągłości liniowej, wymaganego zagłębienia poniżej stropu utworów słabo przepuszczalnych (min. 2 m) oraz dostatecznie niskiej przepuszczalności (poniżej 1×10^{-9} m/s) i trwałości materiału przesłony w agresywnym środowisku gruntowo-wodnym. Przewodność hydrauliczną określano z wykorzystaniem systemu BAT w warunkach polowych i w komorze trójosiowej z systemem *flow pump* w warunkach laboratoryjnych (Koda & Skutnik, 2003). Trwałość wykonanej bariery jest określana na podstawie badań przewodności hydraulicznej w długim okresie czasu od wykonania i na podstawie analizy wyników badań monitoringowych wód na terenach przyległych.

Monitoring lokalny wód podziemnych i powierzchniowych obejmuje analizy fizykochemiczne odcieków, wód

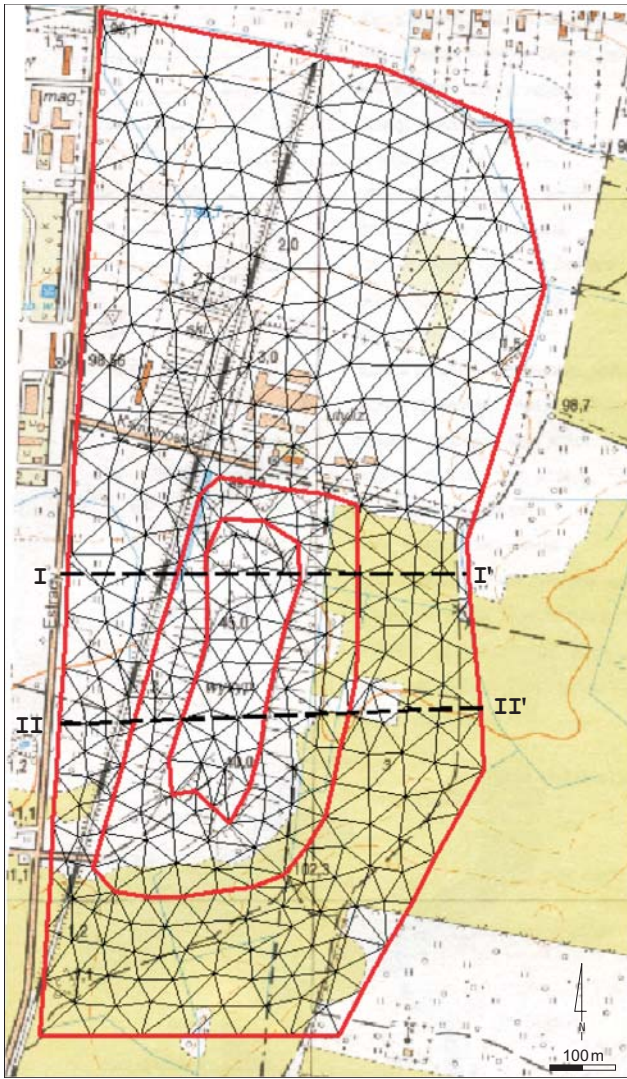
podziemnych i powierzchniowych, jak również systematyczne obserwacje poziomu wody w piezometrach (Golimowski & Koda, 2001). Wyniki badań monitoringowych wykorzystano do tarowania i weryfikacji modelu numerycznego (Koda & Wienclaw, 2005). Przeanalizowano również wpływ pionowej bariery wokół składowiska na przepływ wód podziemnych.

Obszar badań

Składowisko Radiowo jest położone w północno-zachodniej części Warszawy. Zmieszane odpady komunalne z terenu stolicy składowano na nim w latach 1962–1991, a od 1992 r. deponowane są na nim wyłącznie odpady balastowe, zawierające głównie: szkło, plastyki, tekstylia i inne składniki nie nadające się do wytwarzania kompostu. Składowisko o wysokości 60 m zajmuje powierzchnię 16 ha. Prace rekultywacyjne na składowisku rozpoczęto w 1998 r. i obejmują one wykonanie m.in.: pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej, systemu drenażowego odcieków, systemu recyrkulacji odcieków, kształtowanie skarp i budowę dróg technologicznych, mineralny system przykrycia i regulację stosunków wodnych na terenach przyległych. Planowane jest jeszcze dokończenie kształtowania bryły składowiska z wykorzystaniem odpadów balastowych i wykonanie odgazowania składowiska w 2006 r. W ramach systemu recyrkulacji rozprowadzane są na części terenu składowiska odcieki wysypiskowe i wody opadowe z terenu kompostowni. Charakteryzują się one stężeniem jonów chlorkowych w granicach od 0,9 do 4,1 g/dm³, średnio 2,5 g/dm³. Natężenie infiltracji odcieków wysypiskowych i ścieków z terenu kompostowni na terenie składowiska szacowane jest na $q_{inf} = 150$ mm/rok (Koda i in., 2004).

Podłoże składowiska Radiowo, w przypowierzchniowej części, jest zbudowane z polodowcowych i zastoiskowych osadów piaszczystych o miąższości 2–5 m, z lokalnymi przegłębieniami nawet do 20 m. W górnej części są to piaski drobnoziarniste z namułami, a w dolnej części warstwy piaski 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

*Katedra Geoinżynierii, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; wienclaw@alpha.sggw.waw.pl; koda@alpha.sggw.waw.pl



Ryc. 1. Zasięg terytorialny modelu wraz z jego dyskretyzacją w planie; I-I', II-II' — linie przekrojów

Fig. 1. Map of the territorial extent of the model with its numerical mesh; where I-I' and II-II' are the cross-sections lines

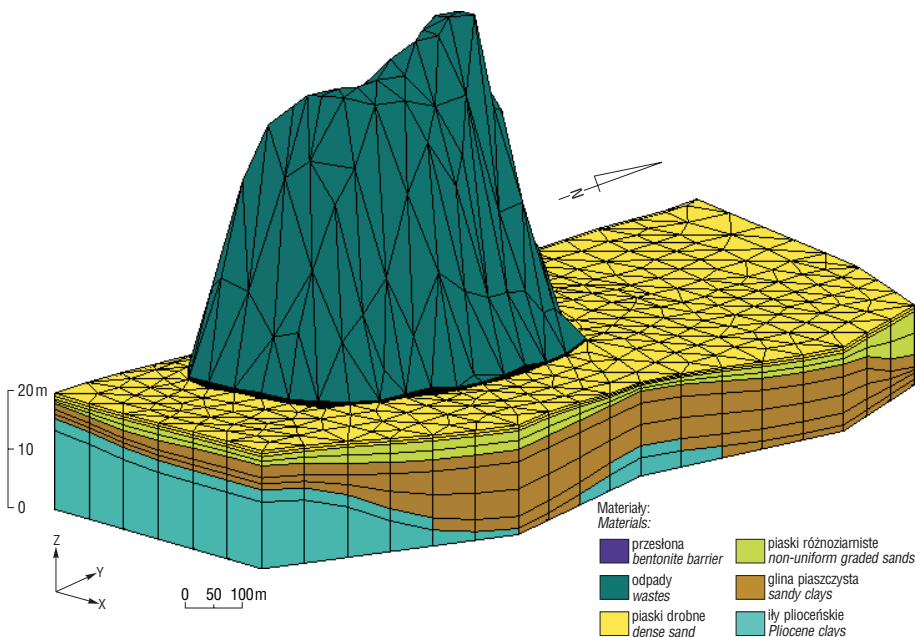
zanieczyszczanego odciekami ze składowiska. Po wykonaniu przesłony przeciwfiltracyjnej i wdrożeniu systemu recyrkulacji zanieczyszczonych wód na składowisku, dopływ zanieczyszczeń do pierwszego poziomu wodonośnego terenów przyległych do składowiska i do cieków powierzchniowych został zatrzymany.

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

Model przepływu wód gruntowych i transportu

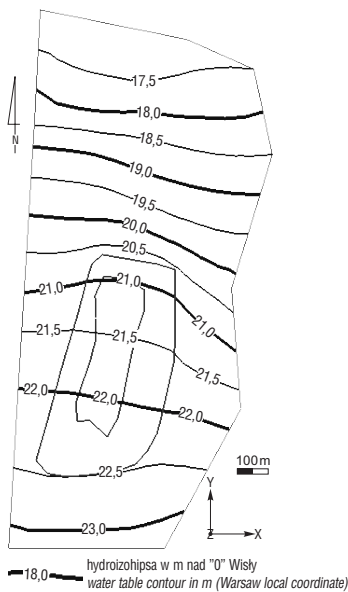
leśnych położonych na południowy-wschód od składowiska. Rowy odwadniające od strony północno-wschodniej i zachodniej, jak również ciek przepływający od strony północnej, stanowią układ lokalnego drenażu przypowierzchniowego poziomu wodonośnego, przez wiele lat

Model numeryczny przepływu wód podziemnych został opracowany z wykorzystaniem pakietu GMS/FEMWATER (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 podziem-



Ryc. 2. Model numeryczny 3-D GMS dla odwzorowania bryły składowiska Radiowo

Fig. 2. The 3-D GMS numerical mesh for the Radiowo landfill



Ryc. 3. Przyjęte warunki początkowe dla przepływu (mapa hydroizohips dla stanu w 1998 r., tj. przed rozpoczęciem robót rekultywacyjnych na składowisku)
Fig. 3. Initial hydraulic conditions (the contour map of GWL in 1998 before commencing remedial works)

nych w rejonie składowiska oraz określenie czasu, po którym odcieki zrzucane na powierzchnię składowiska osiągną poziom zwierciadła wód podziemnych.

Podstawowym równaniem różniczkowym użytym w FEMWATER do opisu przepływu wód podziemnych jest równanie Richardsa:

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

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 (L/T),

t = czas (T),

$F = \frac{d\theta}{dh}$ = różniczkowa pojemność wodna, gdzie θ to

objętościowa zawartość wody (L^3/L^3).

Ogólnie; F , θ i k_r są funkcją h . W modelu zależności te zostały zdefiniowane jako funkcje opisane zależnościami 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:

θ = objętościowa zawartość wody (L^3/L^3),

V = wektor prędkości przepływu (L/T),

∇ = operator Nabla

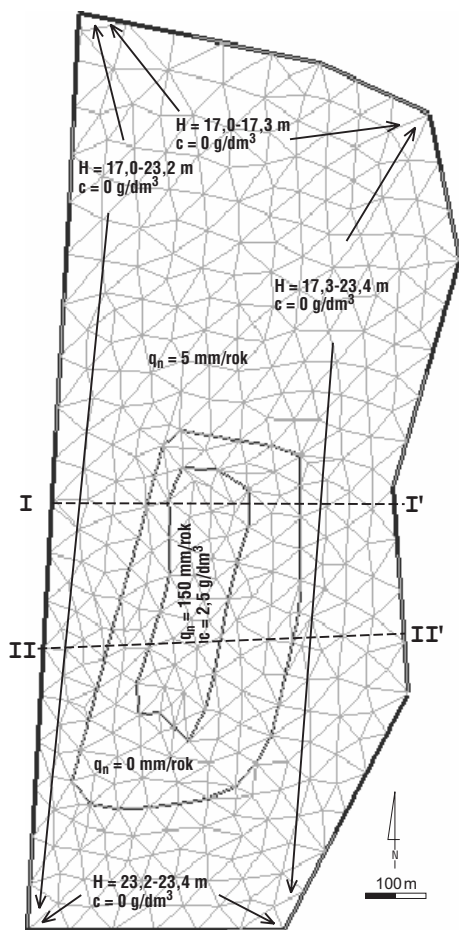
C = stężenie zanieczyszczenia w wodzie (M/L^3).

Zasięg terytorialny modelu wraz z jego dyskretyzacją w planie przedstawiono na ryc. 1. Na modelu odwzorowa-

no teren składowiska i kompostowni wraz ze strefą otulinową o szerokości ok. 200 m, o łącznej powierzchni 88 ha. Powierzchnia terenu składowiska w planie wynosi 16 ha. Powierzchnia części składowiska w planie, na którą są odprowadzane odcieki wynosi 0,4 ha.

Bryłę prezentowanego modelu numerycznego przedstawiono na ryc. 2. 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 składowiska. Zaczynając od najstarszych (najniżej zalegających) do najmłodszych (występujących przy powierzchni terenu), są to: ility (I) charakteryzujące się przewodnością hydrauliczną $k_s = 5 \times 10^{-9}$ m/s i objętościową zawartością wody $\theta = 0,35$; gliny piaszczyste (Gp) o $k_s = 1 \times 10^{-7}$



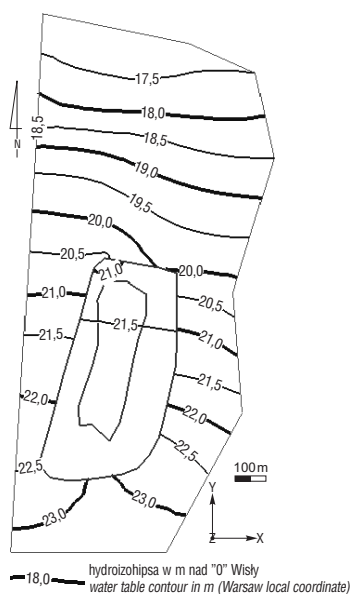
Ryc. 4. Warunki brzegowe przyjęte dla modelu przepływu i transportu w rejonie składowiska Radiowo
Fig. 4. Boundary conditions for the flow and transport numerical model of Radiowo landfill surroundings

Tab. 1. Parametry materiałowe do modelowania numerycznego
Table 1. Soils/material parameters for the numerical model

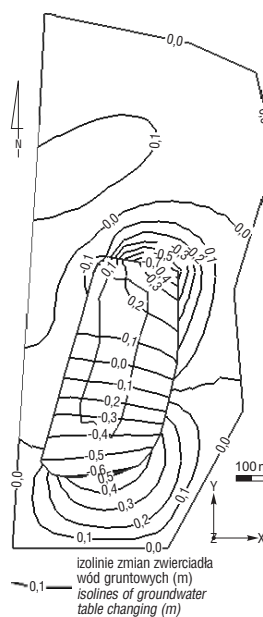
Rodzaj materiału/gruntu Material/Soil	k_s [m/s]	θ [cm ³ /cm ³]	k_r [-]
Przesłona bentonitowa Bentonite barrier	5×10^{-10}	0,36	0,99–1,0
Odpady Wastes	1×10^{-4}	0,055–0,43	0,37–1,0
Piasek drobnoziarnisty Fine-grained sand	5×10^{-5}	0,43	0,99–1,0
Piasek różnoziarnisty Variable-graded sands	1×10^{-4}	0,43	0,99–1,0
Gliny piaszczyste Sandy clays	1×10^{-7}	0,38	1,0
Iły plioceńskie Pliocene clays	5×10^{-9}	0,35	1,0

m/s i $\theta = 0,38$, piaski od drobnoziarnistych do gruboziarnistych (Pd/Ps/Pr) o $k_s = 1 \times 10^{-4}$ m/s i $\theta = 0,43$ oraz piaski drobnoziarniste z namułami (Pd) o $k_s = 5 \times 10^{-5}$ m/s i $\theta = 0,43$. Wartości objętościowej zawartości wody wymienionych gruntów przyjęto za Carsel i Parrish (1988), natomiast dla odpadów na podstawie badań połowych (Koda & Żakowicz, 1998). Odpady o $k_s = 1 \times 10^{-4}$ 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 $k_s = 5 \times 10^{-10}$ m/s i $\theta = 0,36$. 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 tab. 1.

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



Ryc. 5. Mapa hydroizohips dla podłoża składowiska i okolic, po 4 latach od wykonania pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej i wdrożenia systemu recykulacji
Fig. 5. The groundwater contour map for the landfill subsoil with the vertical barrier and the leachate re-circulation system — 4 years after their construction



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

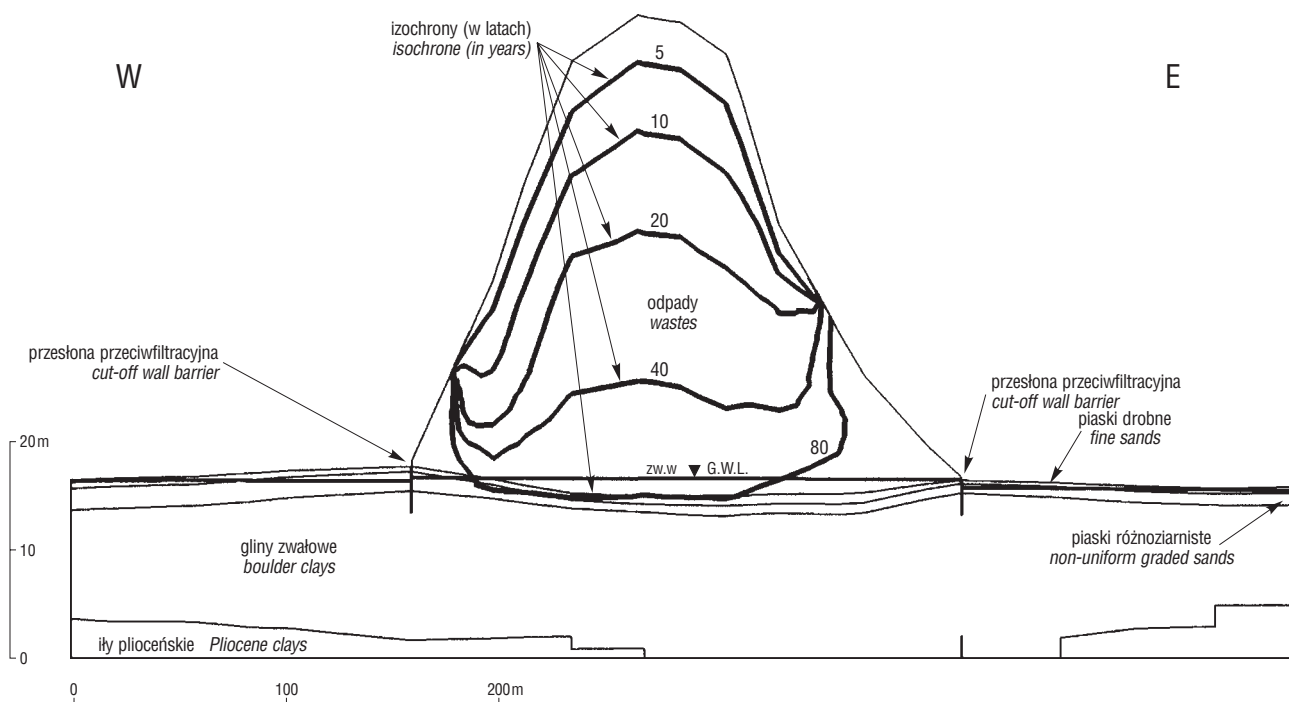
W planie granice zewnętrzne modelu pokrywają się z przebiegiem cieków powierzchniowych otaczających teren składowiska. Cieki te odwzorowano na modelu jako ograniczenie o warunkach brzegowych Dirichleta, dla przepływu o stałych wartościach wysokości hydraulicznej równej rzędnym zwierciadła wody w ciekach, 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 $C = 0$ (ryc. 4).

Część terenu składowiska, na której dokonywany jest zrzut odcieków wysypiskowych i 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 (CI) $C = 2,5$ g/dm³. Na terenie przyległym do składowiska natężenie infiltracji opadów atmosferycznych odwzorowano na modelu także w postaci warunku Neumanna o wartości $q_N = 5$ mm/rok. Powierzchnię stromych zboczy składowiska potraktowano jako powierzchnię o $q_N = 0$.

Wyniki modelowania przepływu i transportu

Wyniki symulacji procesu przepływu wód podziemnych opracowano w postaci mapy hydroizohips (ryc. 5). Przedstawiony na mapie obraz ukształtowania zwierciadła przypowierzchniowych wód podziemnych odpowiada sytuacji względnego ustalenia się przepływu wód podziemnych w podłożu składowiska i w jego otoczeniu. Dla



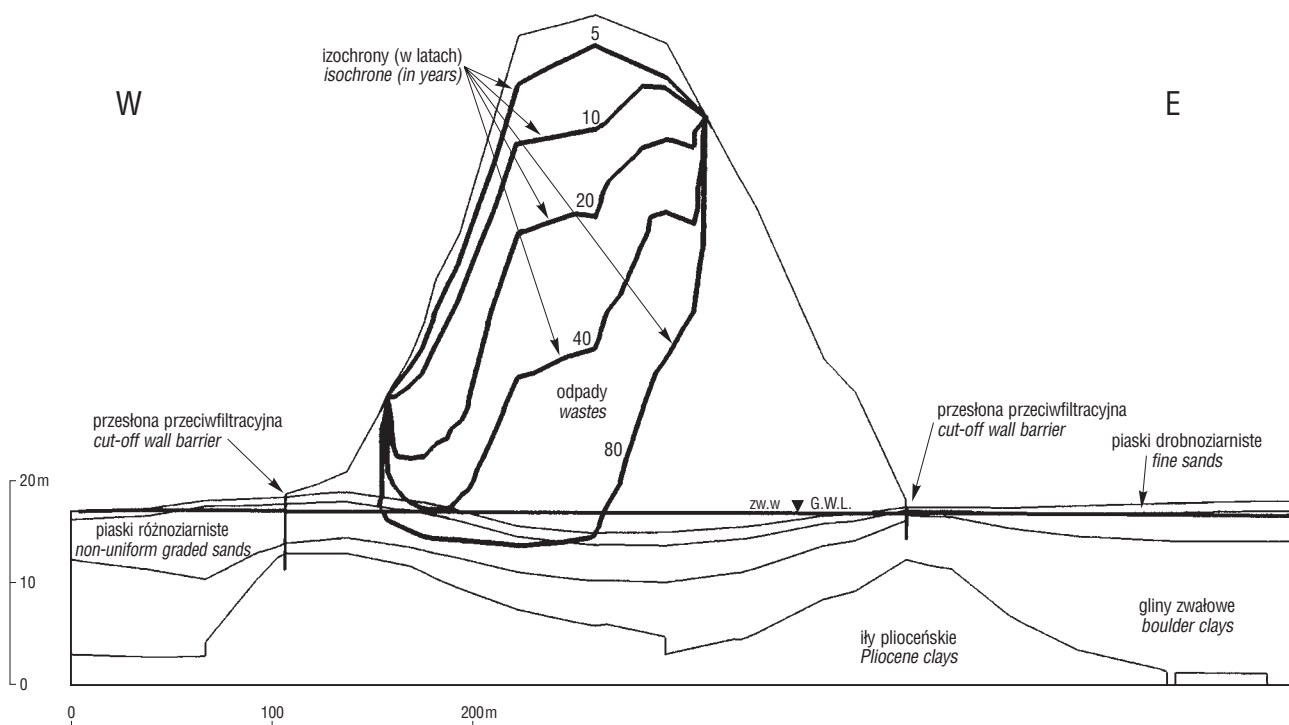
Ryc. 7. Izochrony uzyskane z numerycznej symulacji adwekcyjnego transportu w korpusie i podłożu składowiska w przekroju I-I'
Fig. 7. Isochrones from the numerical simulation of leachate advective transport in the waste body and the landfill subsoil in the cross-section I-I'

odwzorowanego na modelu stanu rekultywacji składowiska, okres ustalenia się przepływu wód podziemnych wynosi ok. 4 lata.

Porównanie ukształtowania powierzchni zwierciadła wód podziemnych dla stanu przed rekultywacją składowiska i dla stanu po 4 latach od wykonania przesłony przeciwnfiltracyjnej i wdrożenia układu recyrkulacji odcieków

wykazuje, że ukształtowanie zwierciadła wód podziemnych w rejonie składowiska uległo zmianie (ryc. 6).

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 powierzchni zwierciadła wód podziemnych ma miejsce w



Ryc. 8. Izochrony uzyskane z numerycznej symulacji adwekcyjnego transportu w korpusie i podłożu składowiska w przekroju II-II'
Fig. 8. Isochrones from the numerical simulation of leachate advective transport in the waste body and the landfill subsoil in the cross-section II-II'

centralnej części składowiska i w jego części północnej, gdzie wznios zwierciadła wody dochodzi do 0,5 m.

Na terenie przyległym do składowiska podobnie ma miejsce zarówno obniżenie się zwierciadła wód podziemnych jak jego lokalne podwyższenie. Maksymalne obniżenie w położeniu zwierciadła o ok. 0,7 m ma miejsce w północnej części terenu, bezpośrednio przyległej do przesłony przeciwfiltracyjnej. Natomiast największe podpiętrzenie wód podziemnych o ok. 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.

Wyniki symulacji transportu adwekcyjnego odcieków w korpusie i podłożu składowiska przedstawiono na przekrojach: I-I' (ryc. 7) i II-II' (ryc. 8) w postaci linii równych czasów (izochron) migracji 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 recykulacji 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 recykulacji 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 przelania 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 rozproszone na koronę składowiska osiągną w wyniku infiltracji poziom wody gruntowej w podłożu składowiska po 40 latach.

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

Literatura

- CARSEL R.F. & PARRISH R.S. 1988 — Developing joint probability distribution of soilwater retention characteristics. *Water Resources Research*, 24: 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. *Proceedings of the 3rd BGE Conf. on Geoenv. Engin., London*, 29–38.
- KODA E., GOLIMOWSKI J., PAPROCKI P., KOLANKA T. 2004 — Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie składowiska I kompostowni Radiowo. *Raport roczny 2003. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa*.
- KODA E. & SKUTNIK Z. 2003 — Quality control tests of vertical bentonite barriers for old sanitary landfill containment. *Proc. of the 13th Europ. Conf. on Soil Mech. and Geot. Engin., Praha*, 1: 409–414.
- KODA E. & WIENCLAW E. 2005 — Modelling of groundwater flow in old landfill containment with vertical bentonite barrier and leachate re-circulation. *Proc. of the 11th Intern. Conf. of IACMAG., Torino* (in print).
- KODA E. & ŻAKOWICZ S. 1998 — Physical and hydraulics properties of the MSW for water balance of the landfill. *Proc. of the 3rd Intern. Congr. on Environ. Geot., Lisboa*, 1: 217–222.
- 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 Scie. Soc. Journ.*, 44: 892–898.