

## ADWEKCYJNO-DYSPERSYJNY MODEL TRANSPORTU W REJONIE SKŁADOWISKA ODPADÓW Z PIONOWĄ PRZESŁONĄ PRZECIWFILTRACYJNĄ

### ADVECTIVE-DISPERSIVE MODEL OF POLLUTANT TRANSPORT IN THE VICINITY OF SANITARY LANDFILL WITH VERTICAL BARRIER

EUGENIUSZ KODA<sup>1</sup>, TOMASZ KOŁANKA<sup>2</sup>, EDWARD WIENCLAW<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Artykuł poświęcony jest numerycznej symulacji przepływu wód podziemnych oraz migracji plamy zanieczyszczeń w rejonie składowiska odpadów balastowych Radiowo, wokół którego w latach 1999–2000 wykonano pionową przesłonę przeciwfiltracyjną. Autorzy proponują wykorzystanie modelowania w ocenie oddziaływania składowiska na środowisko wodno-gruntowe na terenach przyległych oraz wpływu wykonanych prac rekultywacyjnych na ograniczenie migracji zanieczyszczeń. Do opracowania modelu zastosowano program FEMWATER/GMS, oparty na metodzie elementów skończonych. W artykule przeanalizowano adwekcyjno-dyfersyjny przemieszczanie się zanieczyszczeń, które przedostały się do pierwszego poziomu wód podziemnych przed wykonaniem uszczelnienia. Do tarowania i weryfikacji modelu numerycznego wykorzystano wyniki monitoringu lokalnego wód podziemnych.

**Słowa kluczowe:** modelowanie przepływu i transportu, składowisko, pionowa przesłona przeciwfiltracyjna, monitoring.

**Abstract.** The paper presents the numerical modelling of groundwater flow and pollutant transport for the old sanitary landfill surrounded by a vertical barrier. The FEMWATER numerical program was used for the flow and transport simulation. The modelling was aimed at the assessment of the vertical barrier effectiveness of groundwater protection in landfill surroundings. The slick of chlorides concentration in groundwater was used for simulation of a transport process in numerical modelling. Results of the local monitoring of the landfill area, including chemical analyses of water and leachate as well as groundwater level observations, were used for verification and calibration of the numerical model.

**Key words:** flow and transport modelling, landfill, vertical barrier, monitoring.

## WSTĘP

Coraz częściej w fazie projektowania rekultywacji starych składowisk odpadów, a szczególnie oceny skuteczności zabezpieczenia przed migracją odcieków, wykorzystywane są komputerowe programy hydrogeologiczne. Dzięki ich użyciu można określić zmiany przepływu wód podziemnych spowodowane wykonaniem prac zabezpieczających w podłożu. Możliwości tego typu programów są szerokie, poczynając od najprostszych, symulujących wyłącznie przepływ w ujęciu dwuwymiarowym, do bardziej skomplikowanych programów trójwymiarowych z uwzględnieniem procesów związanych z transportem zanieczyszczeń.

W ramach rekultywacji składowiska Radiowo k. Warszawy i ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniami został wykonany system zabezpieczający, na który składa się pionowa przesłona przeciwfiltracyjna wykonana metodą jednofazową z wykorzystaniem zawiesiny twardniejącej oraz system ujmowania i zagospodarowania odcieków ze składowiska (recyrkulacja). Przesłona przeciwfiltracyjna ma za zadanie zatrzymać migrację zanieczyszczeń ze składowiska w postaci odcieków do pierwszej warstwy wodonośnej, z której woda poprzez system cieków powierzchniowych jest odprowadzana na tereny Kampinoskiego Parku Narodo-

<sup>1</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; e-mail: eugeniusz\_koda@sggw.pl

<sup>2</sup> GEOTEKO Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 3/5, 02-739 Warszawa

wego. Głębokość wykonania przesłony była uzależniona od głębokości występowania stropu utworów słabo przepuszczalnych (gliny zwałowe, ility trzeciorzędowe) i wynosi od 3,5 do 22 m. Jakość wód gruntowych i ocena skuteczności

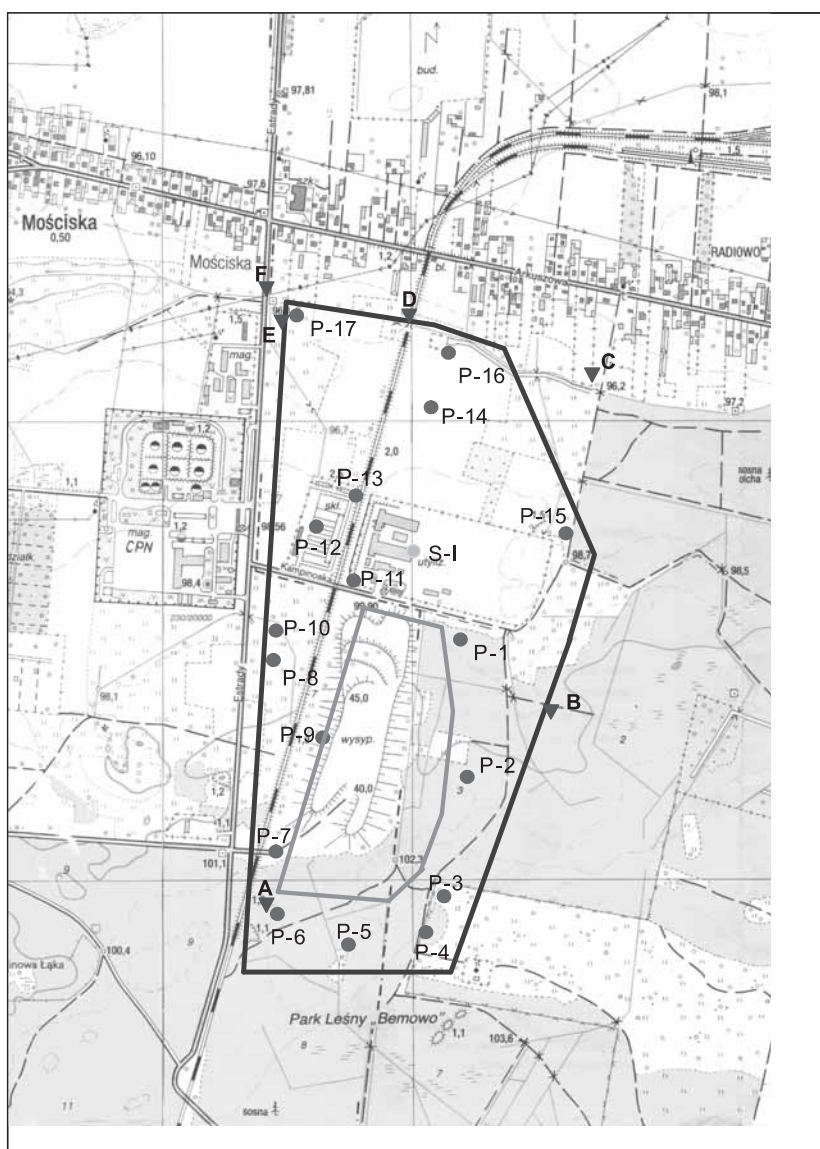
wykonanych prac rekultywacyjnych jest kontrolowana w ramach monitoringu wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie składowiska.

## LOKALIZACJA I CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Model, na którym wykonano symulacje nieustalonego przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń, jest odwzorowaniem numerycznym rejonu składowiska odpadów położonego na obrzeżach północno-zachodniej części Warszawy. Składowisko o wysokości 60 m zajmuje powierzchnię ok. 15 ha (fig. 1).

Teren składowiska w Radiowie usytuowany jest w wododziałowej części Łasicy, prawobrzeżnego dopływu Bzury. Wody spływające siecią drobnych cieków trafiają do Lipkowskiej Wody, dopływu Kanału Zaborskiego, sztucznego cieku uchodzącego do Łasicy przepływającej przez tereny Kampinoskiego Parku Narodowego. Wzdłuż wschodniej granicy monitorowanego terenu biegnie rów prowadzący wody bezpośrednio do Lipkowskiej Wody. Od strony zachodniej nie było rowu, a odpływ utrudniał nasyp kolejowy, powodujący przez wiele lat tworzenie się rozlewisk odcieków na terenach przyległych. Za nasypem kolejowym płynie ciek zbierający wody i prowadzący je wzdłuż wschodniej strony ulicy Estrady, tworząc miejscami niewielkie okresowe rozlewiska infiltrujące w podłoże. Wody te migrują w kierunku północno-zachodnim. Po wykonaniu przesłony przeciwfiltracyjnej wody gruntowe opływają składowisko, powodując powstanie lokalnych rozlewisk od strony południowej, szczególnie w okresie wiosennym i po intensywnych opadach. W ramach projektu rekultywacji przewidziano wykonanie rowu przejmującego napływające wody od strony południowej i wschodniej oraz utrzymanie rowu wzdłuż ulicy Kampinoskiej.

Podłoże składowiska, w przypowierzchniowej części, zbudowane jest z polodowcowych i zastoiskowych piaszczystych osadów o miąższości 2–8 m, lokalnie do 20 m. W górnej części są to piaski drobnoziarniste z namułami, a w dolnej – warstwy piasków od drobno- do gruboziarnistych. Warstwa ta stanowi przypowierzchniowy poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym na głębokości 0–2 m. Zasilanie tego poziomu odbywa się poprzez infiltrację wód opadowych oraz








-  analizowany obszar  
study area
-  P-1A  
piezometr I poziomu wodonośnego  
shallow piezometer
-  S-I  
studnia II poziomu wodonośnego  
deep well
-  A  
miejsce poboru próbek wód powierzchniowych  
surface water sampling site
-  przesłona przeciwfiltracyjna  
cut-off wall barrier

Fig. 1. Lokalizacja składowiska w Radiowie wraz z punktami monitoringu wód

Location of the Radiowo landfill and water quality monitoring points

w wyniku napływu wody z terenów leśnych położonych na południowy wschód od składowiska. Rowy odwadniające od strony północno-wschodniej i zachodniej oraz ciek przepływający od strony północnej stanowią układ lokalnego drenażu przypowierzchniowego poziomu wodonośnego, przez wiele lat zanieczyszczanego odciekami ze składowiska.

Obiekt był eksploatowany od 1962 do 1991 r. jako składowisko odpadów komunalnych, od 1992 r. deponowane są na nim odpady balastowe pochodzące z produkcji kompostu, zawierające głównie szkło, plastiki, tekstylia i inne składniki nienadające się do wytwarzania kompostu.

Prace rekultywacyjne na składowisku rozpoczęto w 1998 r. i objęły one wykonanie m.in. pionowej przesłony przeciwfil-

tracyjnej, drenażu odcieków, systemu recyrkulacji odcieków, kształtowanie skarp i budowę dróg technologicznych, mineralny system przykrycia i regulację stosunków wodnych na terenach przyległych oraz odgazowanie (Koda, 1999).

Bentonitową przesłoną 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. do głębokości 3,5–22 m), reprezentowanych przez czwartorzędowe gliny polodowcowe (strony południowa, wschodnia i częściowo zachodnia) oraz plioceńskie ility zastoiskowe (strony północna i północno-zachodnia).

## MODEL NUMERYCZNY

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 odwzorowanie plamy zanieczyszczeń na zewnątrz przesłony przeciwfiltracyjnej składowiska i prognoza przemieszczania się jej w czasie. Jako podstawę do obliczeń transportu adwekcyjno-dyspersyjnego wykorzystano wcześniejsze obliczenia przepływu wód podziemnych w rejonie składowiska z pionową przesłoną przeciwfiltracyjną.

Na modelu odwzorowano teren składowiska i kompostowni wraz ze strefą otulinową o szerokości około 200 m, o łącznej powierzchni 88 ha. Powierzchnia terenu składowiska w planie wynosi 15 ha. 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 numerycznym zostały odwzorowane dwie grupy materiałów antropogenicznych – odpady i przesłona bentonitowa, oraz cztery warstwy gruntów budujących podłoże składowiska – piaski drobne, grunty niespoiste nierównomiernie uziarnione, gliny piaszczyste oraz ility plioceńskie. Odpady znajdują się w środku modelu i stanowią jednocześnie jego górną część. Wzdłuż granicy nagromadzonych odpadów przebiega pionowa przesłona przeciwfiltracyjna, charakteryzująca się przewodnością hydrauliczną  $k_s = 5 \times 10^{-10}$  m/s oraz objętościową zawartością wody  $\theta = 0,36$ . Wartości parametrów hydrodynamicznych osadów przyjętych w modelu przedstawiono w tabeli 1.

Dla pierwszej warstwy wodonośnej przyjęto stałe  $\alpha_L$  i  $\alpha_T$ , opisujące zjawisko dyspersji podczas przemieszczania się stężenia zanieczyszczeń w ośrodku gruntowym. Stałe te zostały wyznaczone na podstawie serii obliczeń numerycznych, natomiast w artykule przedstawiono wyniki dla wartości najlepiej opisującej proces transportu. Parametry materiałowe wyznaczone na podstawie badań polowych (Koda, Skutnik, 2003) i laboratoryjnych (Lipiński i in., 2007) zo-

stały zweryfikowane i omówione we wcześniejszych pracach autorów (Wienclaw, Koda, 2004; 2005; Koda, Wienclaw, 2005).

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

$$\nabla [k_r k_s (\nabla h + \nabla z)] + q = F \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

gdzie:

- $k_r$  – względna wartość współczynnika filtracji [–],
- $k_s$  – tensor współczynnika filtracji 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],
- $F = \partial\theta/\partial h$  – różniczkowa pojemność wodna, gdzie  $\theta$  to objętościowa zawartość wody [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>],
- $t$  – czas [T].

Tabela 1

Parametry hydrodynamiczne osadów przyjęte w modelu numerycznym

Osady	$k_s$ [m/s]	$\theta$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$k_r$ [–]	$\alpha_L$ [m]	$\alpha_T$ [m]
Bentonit	$5 \times 10^{-10}$	0,36	0,99–1,0	–	–
Odpady	$1 \times 10^{-4}$	0,055–0,43	0,37–1,0	–	–
Piaski drobne	$5 \times 10^{-5}$	0,43	0,99–1,0	0,4	0,04
Piaski różnoziarniste	$1 \times 10^{-4}$	0,43	0,99–1,0	0,4	0,04
Gliny piaszczyste	$1 \times 10^{-7}$	0,38	1,0	–	–
ILITY plioceńskie	$5 \times 10^{-9}$	0,35	1,0	–	–

Wartości objętościowej zawartości wody wymienionych gruntów przyjęto za Carsel i Parrish (1988), natomiast dla odpadów na podstawie badań polowych (Koda i Żakowicz, 1998);  $k_s$  – współczynnik filtracji dla strefy saturacji;  $\theta$  – objętościowa zawartość wody;  $k_r$  – względna wartość współczynnika filtracji;  $\alpha_L$  – stała dyspersji podłużnej,  $\alpha_T$  – stała dyspersji poprzecznej

Uproszczone równanie transportu adwekcyjno-dyfuzyjnego ma postać:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C - \nabla \cdot (\theta D \cdot \nabla C) = 0 \quad [2]$$

$$\theta D = \alpha_T |\mathbf{V}| \delta + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{\mathbf{V} \mathbf{V}}{|\mathbf{V}|} \quad [3]$$

gdzie:

- $\theta$  – objętościowa zawartość wody [ $L^3/L^3$ ],
- $\mathbf{V}$  – wektor prędkości przepływu [ $L/T$ ],
- $\nabla$  – operator Nabla,
- $C$  – stężenie zanieczyszczeń w wodzie [ $M/L^3$ ],
- $D$  – współczynnik dyfuzji [ $L^2/T$ ],
- $\alpha_T$  – stała dyfuzji poprzecznej [ $L$ ],
- $\alpha_L$  – stała dyfuzji podłużnej [ $L$ ],
- $\delta$  – delta Kroneckera.

Do symulacji przyjęto warunki początkowe odpowiadające stanowi na rok 2000, tzn. wysokość hydrauliczną i stężenie zanieczyszczeń dla całego modelu na podstawie wyników monitoringu wód w rejonie składowiska (Koda, 2004).  $F$ ,  $\theta$  i  $k_r$  zdefiniowano jako funkcje opisane zależnościami podanymi przez van Genuchtena (1980). W planie sytuacyjnym 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 północnej części modelu) do 23,45 m nad „0” Wisły (w części południowej), a dla transportu jako ograniczenia o  $C = 0$ .

## WYNIKI OBLICZEŃ

Na podstawie symulacji przepływu wody gruntowej stwierdzono, że względne ustalenie się przepływu wód podziemnych w rejonie składowiska nastąpiło po 4–5 latach od zamknięcia przesłony przeciwfiltracyjnej wokół składowiska. Woda omija obszar składowiska otoczony słabo przepuszczalną barierą izolacyjną.

Wyniki symulacji procesu transportu zanieczyszczeń w pierwszej warstwie wodonośnej opracowano w postaci map stężeń chlorków. Na figurze 2 przedstawiono stężenie chlorków przed wykonaniem przesłony przeciwfiltracyjnej. Widoczna jest plama zanieczyszczeń przy zachodniej skarpcie składowiska, gdzie nastąpiło zamknięcie przesłony w listopadzie 2000 r. Na figurze 3 obserwowane jest przemieszczanie się plamy zanieczyszczeń zgodnie z kierunkiem przepływu wód w pierwszej warstwie wodonośnej, tj. na NW, odpowiednio po 5 i 15 latach od zamknięcia przesłony. Maksymalne stężenia chlorków wewnątrz plamy uległy zdecydowanej redukcji w wyniku rozcieńczenia. Po 15 latach maksymalne stężenia chlorków powinny zmniejszyć się 2–3-krotnie. Z prognozy wynika, że całkowita redukcja stężeń chlorków z pierwszego poziomu wodonośnego nastąpi nie wcześniej niż po 30 latach, tj. ok. 2030 r.

Weryfikację obliczeń modelowych przeprowadzono wykorzystując wyniki badań prowadzonych w ramach monitoringu jakości wód. Na figurze 4 przedstawiono przestrzenny rozkład stężeń chlorków w 2000 r. (przed zamknięciem przesłony) i 2005 r. (5 lat po zamknięciu przesłony). Porównując wyniki badań modelowych i monitoringu, można stwierdzić, że przesłona skutecznie izoluje składowisko przed oddziaływaniem na tereny przyległe.

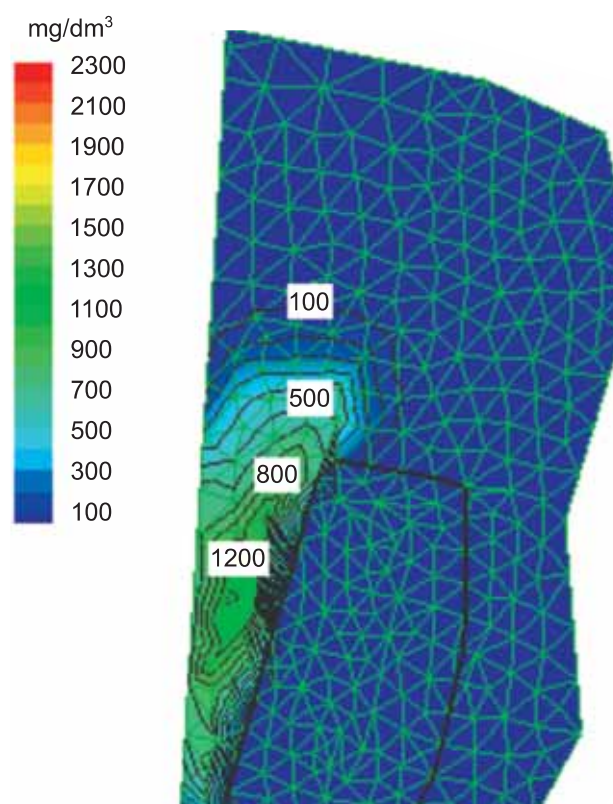
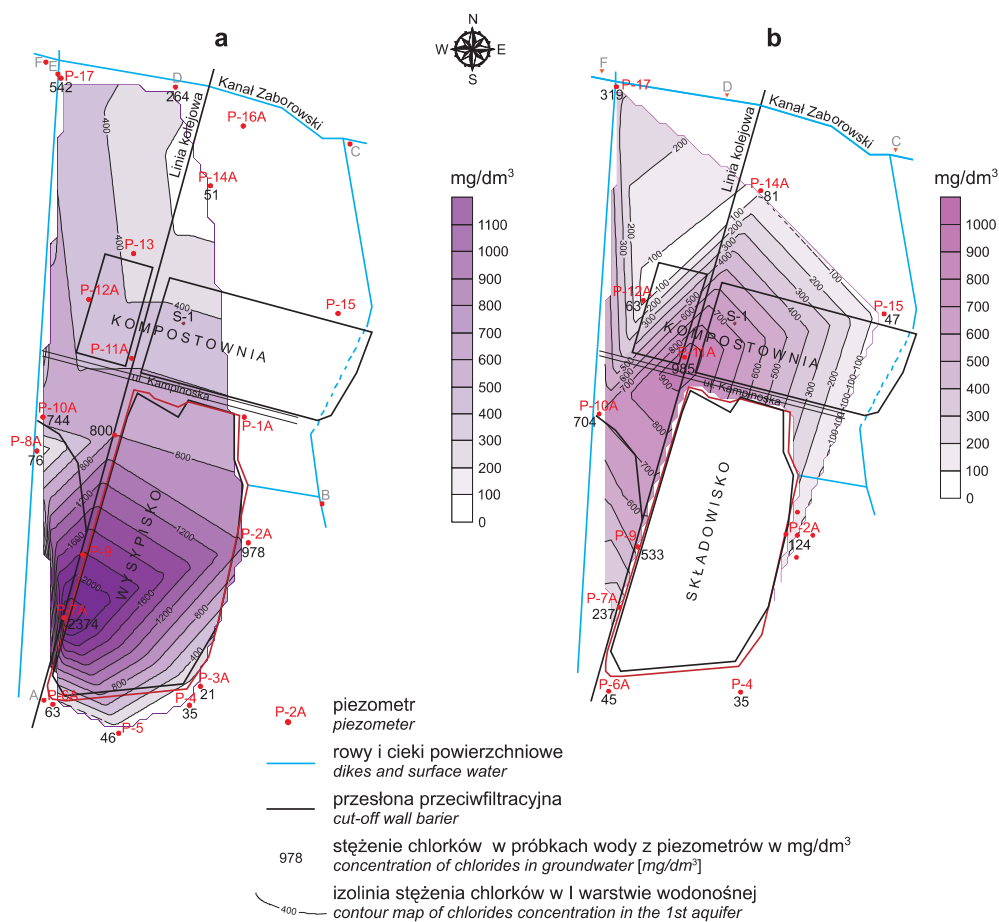
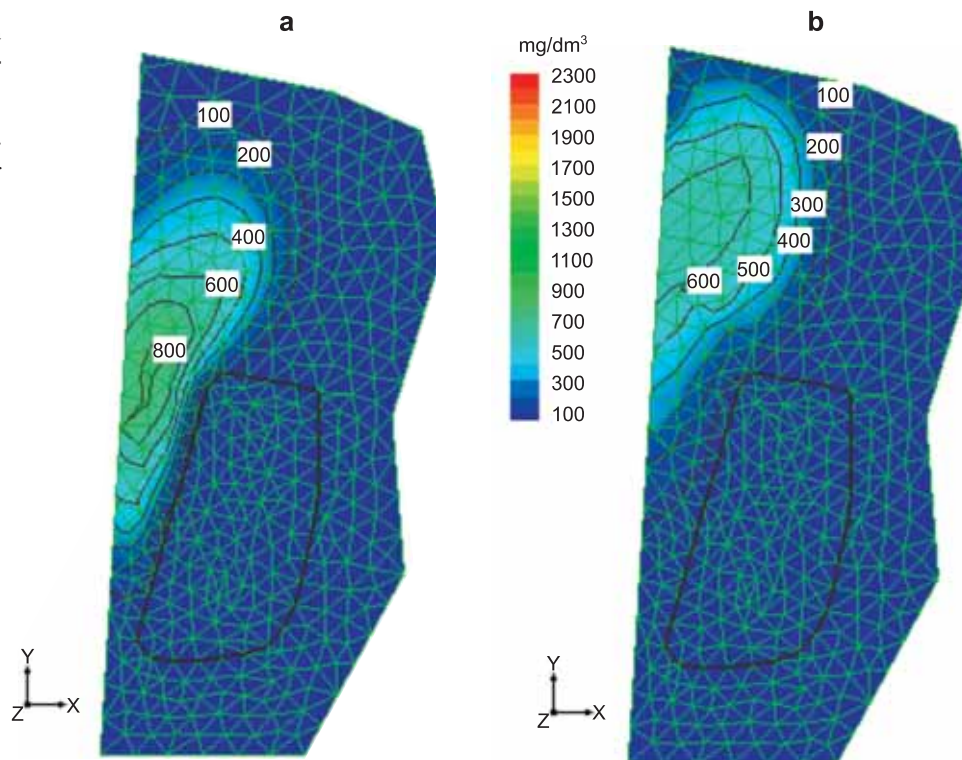


Fig. 2. Odwzorowanie stężenia chlorków w początkowej fazie symulacji

The slick of chlorides concentration in the initial stage of numerical simulation

**Fig. 3. Odzworowanie stężenia chlorków po 5 latach (a) i po 15 latach od zamknięcia przesłony (b)**

The slick of chlorides concentration 5 years (a) and 15 years after vertical barrier was finished (b)



**Fig. 4. Rozkład stężenia chlorków: a – przed zamknięciem przesłony przeciwnfiltracyjnej, b – 5 lat po zamknięciu przesłony przeciwnfiltracyjnej**

Chlorides concentration in groundwater: a – before construction of vertical barrier, b – 5 years after vertical barrier was finished

## PODSUMOWANIE

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 powierzchni składowiska.

Modelowanie numeryczne jest przydatne do jakościowej oceny wpływu bariery pionowej na przepływ wód gruntowych. Wyniki modelowania numerycznego wskazują na izolacyjny charakter bentonitowej przesłony pionowej. Symu-

lowana plama stężenia chlorków w pierwszej warstwie wodonośnej przemieszcza się zgodnie z kierunkiem przepływu wód w tej warstwie, wykazując jednocześnie redukcję maksymalnych stężeń wskutek rozcieńczenia. Prognozowany czas pełnej redukcji zanieczyszczeń szacowany jest na ponad 30 lat.

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

## LITERATURA

- CARSEL R.F., PARRISH R.S., 1988 – Developing joint probability distribution of soilwater retention characteristics. *Water Resour. Res.*, **24**, 5: 755–760.
- GMS 3.1, 2000 – Groundwater Modelling System. Birgham Young University – Environmental Modelling Research Laboratory, Provo UT.
- KODA E., 1999 – Remediation of old embankment sanitary landfills. Proc. of the 3rd BGE Conf. on Geoenv. Engin.: 29–38. London.
- KODA E., 2004 – Local water quality monitoring on surroundings of the sanitary landfill. *Annals of Warsaw Agric. Univ. – SGGW, Land Reclam.*, 35a: 131–144.
- KODA E., SKUTNIK Z., 2003 – Quality control tests of vertical bentonite barriers for old sanitary landfill containment. Proc. of the 13th Eur. Conf. on Soil Mech. and Geot. Engin., vol. I: 409–414. Praga.
- KODA E., WIENCLAW E., 2005 – Flow and transport modelling in old landfill subsoil with vertical barrier. Proc. of the 16th Intern. Conf. on Soil Mech. and Geot. Engin., vol. 2: 925–928. Osaka.
- 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., vol. 1: 217–222. Lisboa.
- 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.
- LIPIŃSKI J.M., KODA E., WDOWSKA M.K., 2007 – Laboratory assessment of permeability of a groundwater protective barrier. *Annals of Warsaw Univ. of Life Science – SGGW, Land Reclam.*, 38: 69–79.
- VAN GENUCHTEN M.T., 1980 – A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of saturated soils. *Soil Sc. Soc. J.*, **44**: 892–898.
- WIENCLAW E., KODA E., 2004 – Groundwater flow modeling for old landfill with vertical barrier. *Annals of Warsaw Agric. Univ. – SGGW, Land Reclam.*, 35a: 229–236.
- WIENCLAW E., KODA E., 2005 – Model przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń dla składowiska z bentonitową przesłoną pionową. *Prz. Geol.*, **53**, 9: 770–775.