

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 60, 2013: 175–187  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 60, 2013)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 60, 2013: 175–187  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 60, 2013)

**Eugeniusz KODA, Szymon HYPTA**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie  
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

## **Modelowanie przepływu wód gruntowych w rejonie starego składowiska z pionową przesłoną przeciwfiltracyjną** **Groundwater flow modeling in the surrounding area of the old landfill with vertical barrier**

**Słowa kluczowe:** rekultywacja składowisk, przesłona bentonitowa, monitoring wód, modelowanie numeryczne

**Key words:** landfill remedial works, bentonite barrier, water monitoring, numerical modeling

### **Wprowadzenie**

W Polsce najpowszechniejszym sposobem unieszkodliwiania odpadów nadal jest ich składowanie. Deponowane odpady na składowisku muszą być odpowiednio zabezpieczone przed migracją zanieczyszczeń w głąb podłoża gruntowego. Odcieki ze składowiska mogą infiltrować do wód gruntowych i powodować skażenie terenów przyległych. Proces skażenia jest długotrwały i może trwać nawet do kilkudziesięciu lat od momentu zakończenia eksploatacji obiektu. Jednym z najbardziej skutecznych sposobów zabezpieczenia przyległych terenów przed migracją zanieczyszczeń jest

budowa pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych, które zagłębione w warstwę gruntów nieprzepuszczalnych tworzą wraz z nimi szczelną nieckę, uniemożliwiając tym samym migrację zanieczyszczeń wraz z wodami gruntowymi w kierunku poziomym. Ten sposób zabezpieczenia jest szczególnie przydatny przy izolacji starych składowisk, nieposiadających uszczelnienia podstawy. Do oceny skuteczności oraz trwałości wykonanych przesłon, oprócz rutynowo wykonywanego monitoringu jakości wód, coraz częściej stosuje się komputerowe programy hydrogeologiczne, dzięki którym można określić zmiany reżimu przepływu wód podziemnych. Programy tego rodzaju mają duże możliwości obliczeń, poczynając od prostych symulacji przepływu w ujęciu dwuwymiarowym, do skomplikowanych obliczeń modeli trójwymiarowych, uwzględniających także procesy transportu zanieczysz-

czeń ze składowiska (Koda i in. 2008). W artykule przedstawiono przykład modelowania przepływu wód gruntowych w rejonie składowiska Łubna, wokół którego w ramach rekultywacji w 1998 roku wykonano bentonitową przesłonę przeciwfiltracyjną.

### **Zagrożenia ze starych składowisk dla wód podziemnych**

Zagrożenie dla środowiska wodno-gruntowego ze starych składowisk zależy głównie od rodzaju składowanych odpadów, sposobu ich składowania oraz warunków hydrograficznych i hydrogeologicznych. Migracja zanieczyszczeń ze składowiska następuje głównie poprzez infiltrację wód opadowych i może odbywać się w dwojaki sposób: drogą filtracyjną przez drenaże odcieków lub drogą filtracyjną przez podstawę składowiska lub przez przepływ dyfuzyjny (Klimek i in. 2010).

Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat migracji wody przez składowisko, gdzie część całkowitej masy opadu, filtrując poprzez składowisko, zamieniana jest na silnie zanieczyszczone odcieki.

Rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń ze składowisk uzależnione jest od: ilości i prędkości rozkładu z deponowanych odpadów, prędkości przepływu wód podziemnych, stężenia dopływających zanieczyszczeń, spadku hydraulicznego pierwszej warstwy wodonośnej, składu, właściwości i ilości odcieków oraz zdolności sorpcyjnych ośrodka gruntowego.

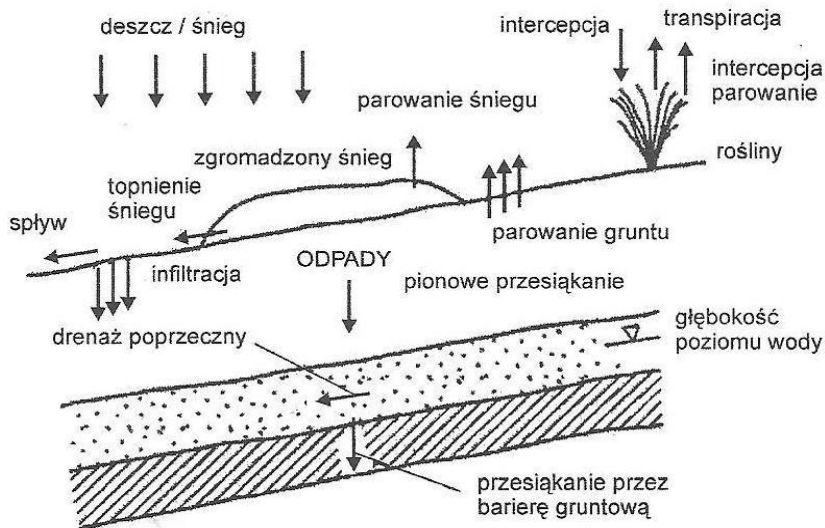
Proces migracji zanieczyszczeń ze składowisk odpadów uwarunkowany jest w szczególności przepuszczalnością

utworów znajdujących się bezpośrednio w podłożu deponowanych odpadów. Warunki hydrogeologiczne w obrębie składowiska są często skomplikowane, dlatego dokładne rozpoznanie dróg migracji jest często trudne do określenia. W szczególności dotyczy to rejonów o skomplikowanych warunkach hydrostrukturalnych (Błaszczuk i Górski 1996).

Główną przyczyną zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych wokół składowisk odpadów są odcieki powstające wskutek przesączania się wód opadowych i spływowych przez masyw składowanych odpadów. Wody pozostałe po wyparowaniu z wierzchniej warstwy odpadów infiltrują w podłoże, niosąc za sobą rozpuszczalne substancje, do których zalicza się organiczne i mineralne produkty powstałe w przemianach biologicznych i fizykochemicznych. Skład, a także ilość powstających odcieków ze składowiska zależą od wielu czynników, do których można zaliczyć (Zadroga 2005):

- rodzaj deponowanych odpadów i stopień ich rozdrobnienia,
- warunki atmosferyczne (ilość i intensywność opadów, wilgotność powietrza),
- sposób uszczelnienia powierzchni składowiska,
- technikę składowania, miąższość oraz stopień zagęszczenia odpadów,
- wiek składowanych odpadów,
- charakter przemian biochemicznych oraz fizykochemicznych, rodzaj porastającej roślinności na składowisku po rekultywacji.

Odływ i transport substancji ze składowiska może być także ograniczony – w przypadku występowania grun-



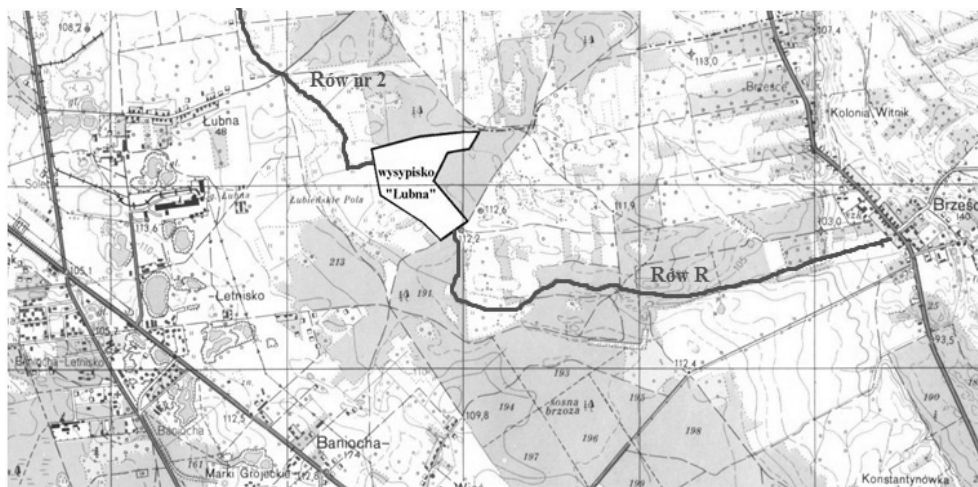
RYSUNEK 1. Kierunki migracji wody w środowisku wodno-gruntowym (Klimek i in. 2010)  
 FIGURE 1. Directions of water migration in the groundwater environment

tów słaboprzepuszczalnych lub warstw wodonośnych z małym spadkiem hydraulicznym.

### Charakterystyka składowiska Łubna i wykonanego systemu ochrony wód

Składowisko odpadów Łubna zlokalizowane jest w pobliżu miejscowości Baniocha, w województwie mazowieckim, w powiecie piaseczyńskim, w gminie Góra Kalwaria (rys. 2). W 1978 roku rozpoczęto eksploatację składowiska na terenie nieprzygotowanym do tego celu, bez uszczelnienia podstawy i bez systemu drenażowego odcieków. Odpływ wód gruntowych i powierzchniowych odbywał się w dwóch kierunkach, tj. zgodnie z przebiegiem rowu nr 2, na północny zachód, a przy wyższych stanach wody również zgodnie z przebiegiem rowu R, na południowy wschód (rys. 2).

Od końca lat 90. ubiegłego wieku wielokrotnie wyznaczany był „ostateczny” termin zamknięcia składowiska, lecz za każdym razem termin ten zmieniano. Ostatecznie składowisko zostało zamknięte 31.03.2011 roku. Powodem zamknięcia obiektu były liczne protesty okolicznych mieszkańców. Było to największe „warszawskie” składowisko odpadów komunalnych. Do końca września 2012 roku na składowisku prowadzone były roboty ziemne związane z przykryciem powierzchni składowiska warstwą gliny i przygotowanie jej do zabudowy biologicznej. Od 1.10.2012 roku na składowisku prowadzone są wyłącznie prace związane z eksploatacją systemu odgazowania. Od strony zachodniej składowiska znajdują się nieużytki z roślinnością łąkową, w pozostałej zaś części – łąki, lasy, a także grunty orne. Na nieużytkach rolnych w okolicy wsi Łubna stwierdzono też liczne miejsca „dzikich wysypisk”, co może być dodat-



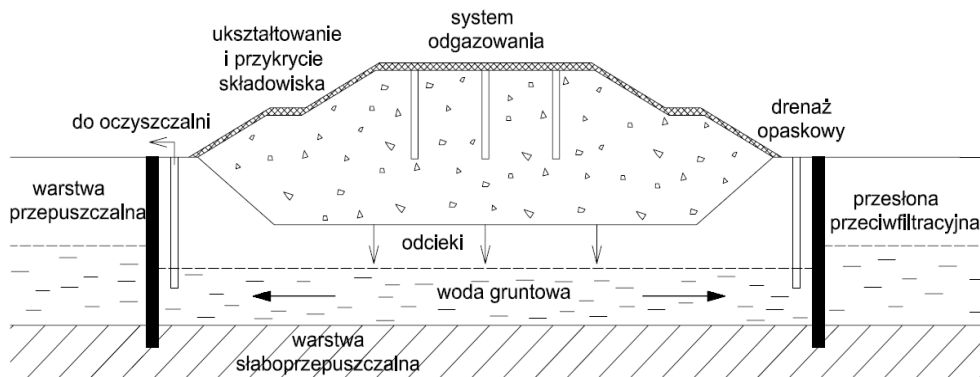
RYSUNEK 2. Lokalizacja składowiska odpadów Lubna, z odpływami do rowu nr 2 i rowu R  
 FIGURE 2. Location of Lubna landfill, with outflows to the ditch No 2 and the ditch R

kowym źródłem zanieczyszczenia wód gruntowych.

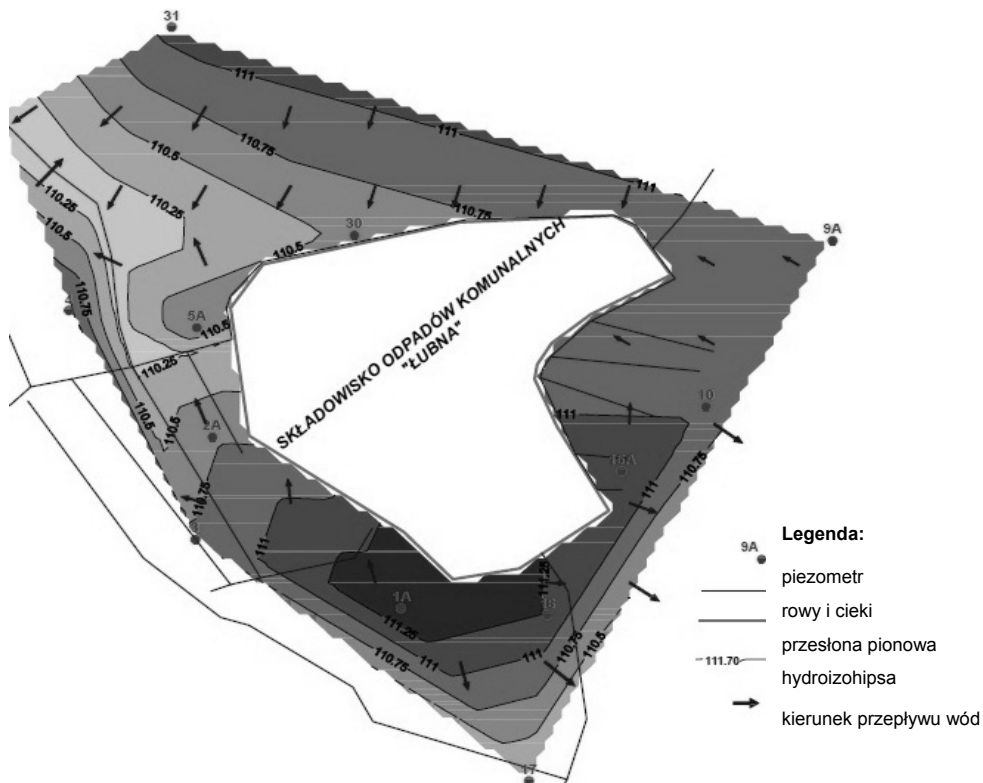
Na poprawę jakości wód w obrębie składowisk mają wpływ przede wszystkim odpowiednie zabiegi techniczne wykonywane w ramach projektu rekultywacji, w tym: ukształtowanie i przykrycie bryły składowiska, odgazowanie oraz zabezpieczenie przed migracją zanieczyszczeń w postaci bentonitowej bariery pionowej i opaskowego drenażu odcieków (rys. 3). Wykonane zabiegi przyczyniły się do wyeliminowania „mieszania się” napływających wód czystych z odciekami w podłożu składowiska, a także do zahamowania migracji odcieków na tereny przyległe (Koda 1999). Wokół składowiska zainstalowano piezometry do monitoringu jakości i kierunków przepływu wód gruntowych. Kierunki przepływu wód gruntowych są uwarunkowane oddziaływaniem rowów nr 2 i R (rys. 4).

### Modelowanie przepływu wód w rejonie starego składowiska

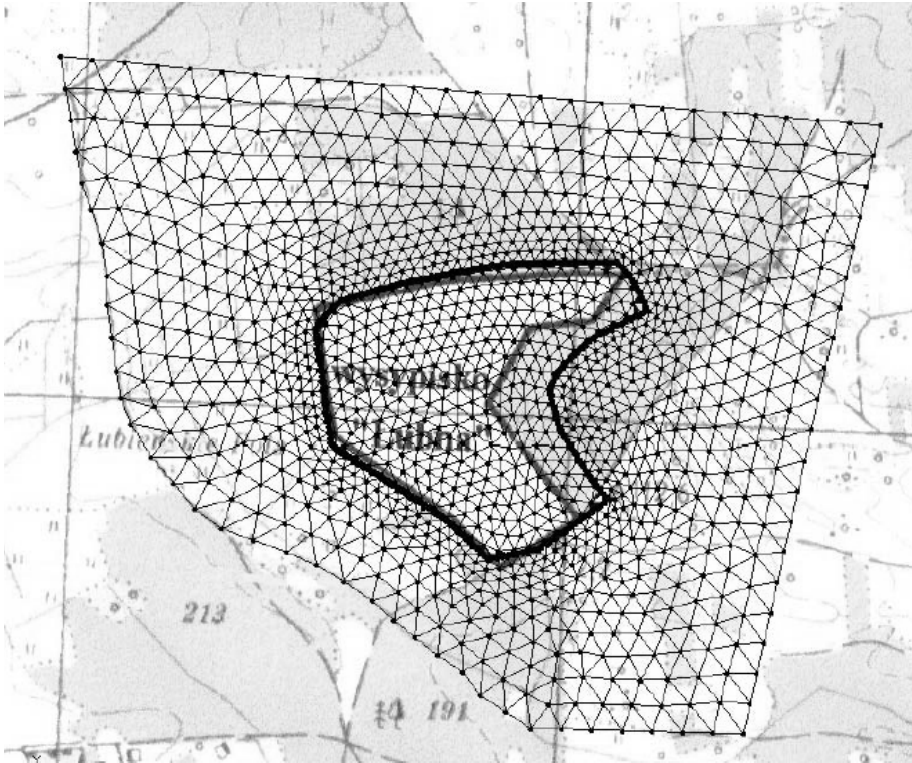
Model numeryczny składowiska Lubna stworzono na podstawie wyników badań archiwalnych oraz wykonanych dodatkowych otworów rozpoznawczych. Do modelowania wykorzystano program FEMWATER z pakietu GMS stosowany do symulacji przepływu i transportu substancji rozpuszczonych w wodzie oraz ich wymiany między wodą a gruntem. Powierzchnia obszaru objętego modelem wyniosła około 90 ha. Do modelu wykonano dyskretyzację badanego obszaru w postaci siatki trójkątów (rys. 5). Wiercenia geologiczne wykorzystano do określenia miąższości oraz układu warstw podłoża, co pozwoliło na stworzenie trójwymiarowego modelu składowiska i terenów przyległych (rys. 6).



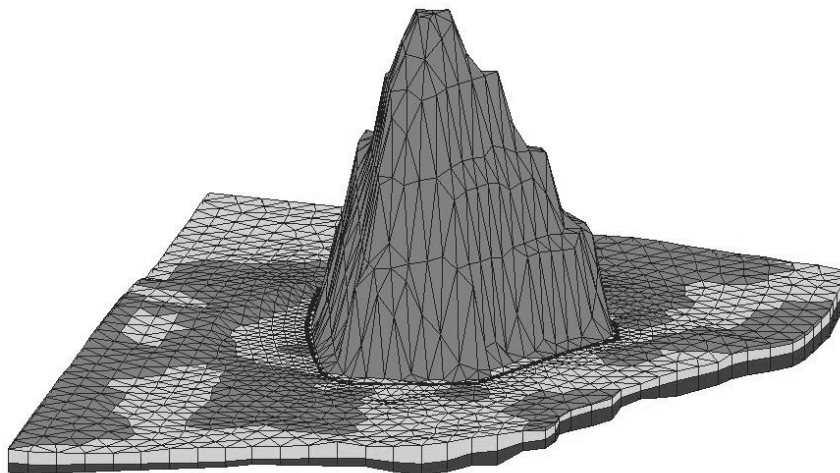
RYSUNEK 3. Schemat starego składowiska po wykonaniu systemu ochrony wód (Koda 2009)  
 FIGURE 3. Scheme of the old sanitary landfill with the groundwater protection system



RYSUNEK 4. Mapa ukształtowania zwierciadła wody pierwszego poziomu wodonośnego w rejonie składowiska Łubna (czerwiec 2012)  
 FIGURE 4. The contour map of the groundwater level on the Łubna landfill surroundings (June 2012)



RYSUNEK 5. Dyskretyzacja badanego obszaru wraz z zasięgiem terytorialnym modelu  
 FIGURE 5. Discretization of the study area, along with the territorial scope of the model



RYSUNEK 6. Składowisko i tereny przyległe z budową geologiczną (w 10-krotnym przewyższeniu)  
 FIGURE 6. The landfill and the surroundings with geological structure (a 10-fold the excess)

W modelu numerycznym odwzorowano dwie grupy materiałów antropogenicznych (odpady i przesłona bentonitowa) oraz trzy warstwy gruntów, z których zbudowane jest podłoże: utwory zastoiskowo-rzeczne holocenu (namuły piaszczyste, piaski humusowe), osady rzeczno-lodowcowe (piaski  $P_s$ ,  $P_\pi$ ,  $P_d$ ) i osady zlodowacenia Warty (glina zwałowa). W celu odwzorowania budowy geologicznej w modelu oraz warunków hydrogeologicznych przyjęto dla wyróżnionych warstw podłoża parametry hydrauliczne (tab. 1), takie jak: przewodność hydrauliczna ( $k_s$ ), objętościowa zawartość wody w strefie pełnego nasycenia ( $\theta_s$ ) i szczątkowa objętościowa zawartość wody ( $\theta_r$ ).

Podstawowym równaniem różniczkowym, które posłużyło do opisu prze-

$h$  – wysokość ciśnienia [L],

$z$  – wysokość położenia [L],

$q$  – funkcja wyrażająca zasilanie lub pobór wody odniesione do jednostkowej objętości ośrodka i jednostki czasu [ $L \cdot T^{-1}$ ],

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

na, gdzie  $\theta$  to objętościowa zawartość wody [ $L^3 \cdot L^{-3}$ ],

$t$  – czas [T].

Objętościowa zawartość wody ( $\theta_s$ ) w wymienionych gruntach i bentonicie została przyjęta na podstawie Carsela i Parrisha (1988), a dla odpadów komunalnych wielkość ta została określona na podstawie badań polowych (Koda i Żakowicz 1998).

TABELA 1. Parametry materiałowe przyjęte w modelu numerycznym (Koda 2011)

TABLE 1. Soils/material parameters for numerical modeling

Rodzaj materiału / Material types	$k_s$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$k_s$ [ $m \cdot d^{-1}$ ]	$\theta_s$ [ $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ]	$\theta_r$
Bentonit / Bentonite	$1 \cdot 10^{-10}$	$8,64 \cdot 10^{-6}$	0,35	0,068
Odpady / Wastes	$1 \cdot 10^{-4}$	8,64	0,43	0,045
Piaski humusowe / Sands with humus	$3 \cdot 10^{-5}$	2,592	0,43	0,045
Piaski średnie i drobne / Medium and coarse sands	$2 \cdot 10^{-4}$	17,28	0,44	0,045
Glina zwałowa / Boulder clay	$2,7 \cdot 10^{-9}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$	0,4	0,068

plywu wód podziemnych w programie FEMWATER, jest równanie Richardsa (Lin i in. 2000):

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

gdzie:

$k_r$  – względna wartość współczynnika filtracji [–],

$k_s$  – tensor współczynnika filtracji strefy saturacji [ $L \cdot T^{-1}$ ],

## Wpływ wykonanej przesłony i modernizacji rowu nr 2 na przepływ wód gruntowych

Do oceny wpływu przesłony przeciwfiltracyjnej na migrację zanieczyszczeń w rejonie składowiska Łubna w kolejnym etapie przeprowadzono numeryczną symulację przepływu wód gruntowych w pierwszej warstwie wodonośnej dla stanu bez składowiska i przesłony.

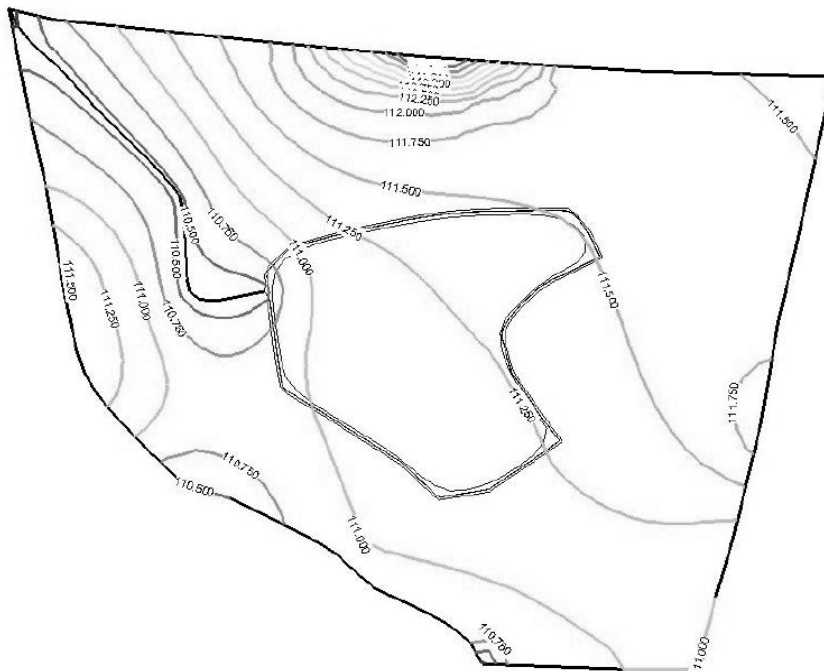
W celu określenia warunków brzegowych modelu wykorzystano pomiary stanów wody z 24 piezometrów. Przyjęto stały poziom zwierciadła wody gruntowej, zgodnie z warunkami Dirichleta. Zwierciadło wody układało się na rzędnych od 109,94 do 113,21 m n.p.m.

Stan ustalony zwierciadła wody (przed wykonaniem przesłony) definiował warunki początkowe symulacji przepływu wód gruntowych. Przyjęta wartość infiltracji dla składowiska wyniosła 0 mm na rok ze względu na przeprowadzone prace rekultywacyjne uwzględniające uszczelnienie powierzchni składowiska. Dla obszaru wokół składowiska wartość infiltracji przyjęto na poziomie 30 mm na rok. Rów nr 2, którym odpływają wody z rejonu składowiska, został

uwzględniony w modelu również przez warunki brzegowe Dirichleta. W modelu uwzględniono zmianę (pogłębienie) rzędnych dna rowu w 2012 roku.

Warunki brzegowe w przepływie nieustalonym nie uległy zmianie. Podobnie jak dla symulacji ustalonej, przyjęto stały poziom zwierciadła wody według warunków Dirichleta i wielkość infiltracji wód opadowych. Jako warunki początkowe symulacji nieustalonej przyjęto wcześniej przeprowadzoną symulację dla stanu ustalonego. Symulacja stanu nieustalonego obejmowała dwa etapy:

- symulację przepływu wód gruntowych od powstania przesłony do 2012 roku; w tym etapie wartości z modelowania numerycznego porów-



RYSUNEK 7. Mapa ukształtowania zwierciadła wody pierwszego poziomu wodonośnego w rejonie składowiska Łubna przed wbdowaniem przesłony przeciwfiltracyjnej  
 FIGURE 7. The contour map of changes of the groundwater level on the landfill and surroundings before the vertical barrier construction

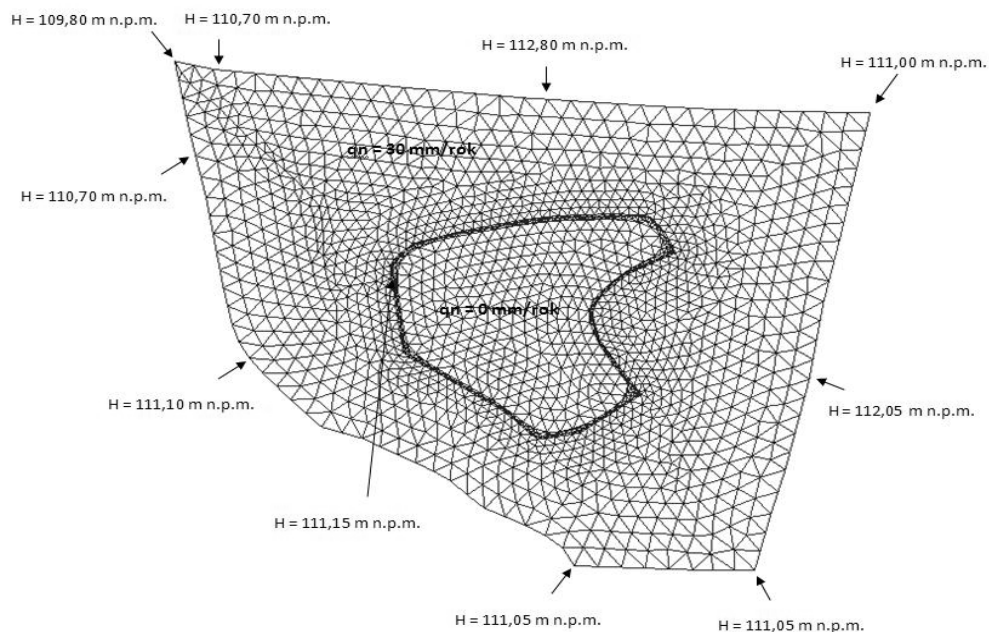




TABELA 2. Porównanie rzędnych zwierciadła wody z piezometrów (lokalizację przedstawiono na rys. 4) z wielkościami uzyskanymi z symulacji nieustalonej

TABLE 2. Comparison of the groundwater level from piezometers (location on Fig. 4) with the values obtained from transient numerical simulation

Nr piezometru Piezometr No	Pomiar z 2.06.2012 Tests dd. 2.06.2012 [m n.p.m.]	Rzędne z modelowania Level from simulation [m n.p.m., m a.s.l.]	Różnice Differences [m]
1A	111,61	110,65	0,96
21 2A	110,72	110,71	0,01
3	110,93	110,76	0,17
4	111,27	110,73	0,54
5A	110,65	110,55	0,1
9A	111,19	111,55	-0,36
10	111,62	111,72	-0,1
15A	111,47	111,63	-0,16
16	111,29	111,02	0,27
30	110,56	111,53	-0,97



RYSUNEK 9. Warunki brzegowe symulacji przepływu nieustalonego dla stanu z drugiej połowy 2012 roku

FIGURE 9. The boundary conditions for the transient flow simulation in the second half of 2012



konaną metodą jednofazową. Przesłona spowodowała zaburzenia naturalnego przepływu wód gruntowych pierwszego poziomu wodonośnego. Na podstawie modelowania stwierdzono, że zwierciadło wody ustabilizowało się w ciągu 2 lat od wykonania przesłony.

Porównując wyniki modelowania numerycznego przepływu wód gruntowych z pomiarami w piezometrach, można uznać, że model wykonano poprawnie. Modelowanie numeryczne wykorzystane do oceny jakościowej wpływu bariery pionowej na przepływ wód gruntowych i wykonana symulacja potwierdziły, iż nie występuje kontakt hydrauliczny pomiędzy podłożem składowiska a wodami pierwszego poziomu wodonośnego na terenach przyległych, czyli migracja odcieków ze składowiska do pierwszego poziomu wodonośnego oraz do rowów melioracyjnych została wyeliminowana.

Odnotowano korzystny wpływ modernizacji rowu odpływowego nr 2 na wymianę wód gruntowych w pierwszej warstwie wodonośnej, co powinno sprzyjać zintensyfikowaniu procesów samooczyszczania środowiska wodno-gruntowego w rejonie składowiska.

## Literatura

- BŁASZCZYK T., GÓRSKI J. 1996: Odpady a problemy zagrożenia i ochrony wód podziemnych. PIOŚ. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- CARSEL R.F., PARRISH R.S. 1998: Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. *Water Resources Research* 24, 5: 755–769.
- Infrastruktura komunalna w 2011 roku, 2012. GUS, Warszawa ([http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/IK\\_infrastruktura\\_komunalna\\_2011.pdf](http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/IK_infrastruktura_komunalna_2011.pdf)).
- HYPTA S. 2013: Ocena efektywności pionowych przesłon przeciwfiltracyjnych na podstawie modelowania przepływu i transportu. Praca magisterska. SGGW, Warszawa.
- KLIMEK A., WYSOKIŃSKI L., ZAWADZKA-KOS M., CHRZĄSZCZ J. 2010. Poradnik metodyczny w zakresie PRTR dla składowisk odpadów komunalnych. NFOŚiGW, Warszawa.
- KODA E. 1999: Remediation of the old embankment sanitary landfills. In: *Geoenvironmental Engineering: Ground Contamination*. Ed. R. Yong, H. Thomas, T. Telford Ltd., London: 29–38.
- KODA E. 2009: Geośrodowiskowe aspekty rekultywacji składowisk odpadów. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 3: 134–151.
- KODA E. 2011: Stateczność rekultywowanych składowisk odpadów i migracja zanieczyszczeń przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- KODA E., ŻAKOWICZ S. 1998: Physical and hydraulics properties of the MSW for water balance of the landfill. III International Congress on Environmental Geotechnics, Lisbona, 1: 692–707.
- KODA E., KOŁANKA T., WIENCLAW E. 2008: Adwekcyjno-dyspersyjny model transportu w rejonie składowiska z pionową przesłoną przeciwfiltracyjną. *Biuletyn PIG* 431: 99–104.
- LERSKI P. 2006: Modelowanie przepływu i transportu w rejonie składowiska odpadów z przesłoną przeciwfiltracyjną. Praca magisterska. 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, Report CHL. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- ZADROGA B. 2005: Wpływ zanieczyszczeń gruntu substancjami ropopochodnymi na stateczność obiektów budowlanych i dobór technik oczyszczania podłoża gruntowego. 51 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Krynica, 1: 33–54.

## Streszczenie

**Modelowanie przepływu wód gruntowych w rejonie starego składowiska z pionową przesłoną przeciwnfiltracyjną.** Budowa pionowych przesłon przeciwnfiltracyjnych jest skutecznym rozwiązaniem zamykającym stare składowiska i tereny silnie zanieczyszczone. Najczęściej budowa pionowych przesłon przeciwnfiltracyjnych jest realizowana z wykorzystaniem technologii jednofazowej ściany szczelinowej, z wypełnieniem mieszaniną bentonitowo-cementową. W artykule przedstawiono przykład modelowania numerycznego przepływu wód gruntowych dla składowiska odpadów Łubna, wokół którego wykonano pionową przesłonę bentonitową. Modelowanie przeprowadzono z wykorzystaniem programu numerycznego FEMWATER, w którym do rozwiązania równań przepływu zastosowano metodę elementów skończonych. Przeprowadzone modelowanie miało na celu ocenę skuteczności działania wykonanej przesłony przeciwnfiltracyjnej wokół składowiska Łubna oraz ocenę efektywności wykonanych prac rekultywacyjnych. Przykład przedstawia wymagania dotyczące rozpoznania warunków wodno-gruntowych w rejonie składowiska oraz zdefiniowania warunków początkowych i brzegowych i doboru parametrów materiałowych, mających decydujący wpływ na poprawność procesu modelowania. W końcowej części pracy przedstawiono porównanie wyników modelowania numerycznego z wynikami pomiarów i badań prowadzonych w ramach monitoringu składowiska.

## Summary

**Groundwater flow modeling in the surrounding area of the old landfill with vertical barrier.** The construction of vertical bentonite barriers is a common solution applied in old landfill containment and land reclamation. Most commonly the construction of vertical barriers is based on cut-off wall monophase technology with the use of bentonite-cement mixture as a filling material. The content of the paper is focused on groundwater flow numerical modeling conducted on the landfill area where vertical bentonite barrier was constructed. The modeling process was conducted with the use of FEMWATER software which employs analysis based on finite element method. There is an example of the software application presented in the paper, which concerns such case studies as i.e. reclamation of Łubna sanitary landfill site. This example is provided to prove that the appropriate investigation of ground conditions as well as definition of initial and boundary conditions and correct selection of material parameters to be fed into the software, are crucial for the overall modeling process. Moreover, a comparison of results obtained from the numerical simulation and the groundwater monitoring on the surrounding area is presented for proposed case studies.

### Author's address:

Eugeniusz Koda  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail: eugeniusz\_koda@sggw.pl