

ANALIZA SKUTECZNOŚCI PRACY BARIERY HYDRAULICZNEJ NA PRZEDPOLU SKŁADOWISKA OSADÓW POFLOTACYJNYCH NA PODSTAWIE BADAŃ MODELOWYCH

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE HYDRAULIC BARRIER AT THE FOREGROUND OF THE POST-FLOTATION SLUDGE DEPOSIT ON THE BASIS OF NUMERICAL MODELLING

Jacek Gurwin, Mirosław Wąsik - Zakład Hydrogeologii Stosowanej ING, Pracownia Modelowania Procesów Hydrogeologicznych, Uniwersytet Wrocławski

Celem artykułu jest przedstawienie problemów związanych ze zjawiskami filtracji wód podziemnych w otoczeniu składowiska odpadów poflotacyjnych, które zostały odtworzone na numerycznym modelu wybranej części zachodniego przedpola. Wykonane badania miały na celu: rozpoznanie systemu krążenia wód, ustalenie bilansu przepływów dla poszczególnych poziomów wodonośnych, określenie skuteczności bariery zabezpieczającej przed migracją zanieczyszczeń ze składowiska. Zbudowany został model o charakterze lokalnym dla obszaru o powierzchni 1,87 km². Warunki brzegowe przyjęto według naturalnych granic hydraulicznych, związanych z ciekami powierzchniowymi, na wschodzie na podstawie stanu hydrodynamicznego i dopływu od strony składowiska, a na południu po zasięgu utworów wodonośnych. Z uwagi na skalę i złożone warunki hydrogeologiczne zbudowano model 3-warstwowy z regularnym krokiem siatki dyskretyzacyjnej 20x20 m. Na podstawie prognoz numerycznych, analizy pola prędkości i linii prądu ustalono potencjalny zasięg migracji zanieczyszczeń w warunkach funkcjonowania sześciu studni drenażowych, o łącznym poborze w wysokości 2670,5 m³/d. Wykazano, w których rejonach działanie bariery jest skuteczne, a w których możliwy jest intensywny przepływ strumieni spod składowiska na przedpolu i dalej w kierunku cieków powierzchniowych.

Słowa kluczowe: numeryczny model filtracji, bariera hydrauliczna, migracja zanieczyszczeń

The aim of the work is to present problems related to the phenomena of groundwater filtration in the vicinity of post-flotation tailings pond, which have been reconstructed on the numerical model of a selected part of the western foreground. The research carried out was aimed at: identification of the water circulation system, determination of the flow balance for individual aquifer, determination of the effectiveness of the barrier preventing migration of pollutants from the landfill. A local model for the area of 1.87 km² was built. The boundary conditions were adopted according to the natural hydraulic boundaries associated with surface watercourses, in the east on the basis of the hydrodynamic state and the inflow from the landfill site and in the south after the range of aquiferous deposits. Due to the scale and complex hydrogeological conditions, a 3-layer model was built with a regular step of 20x20 m discretisation grid. Based on numerical predictions, velocity field and pathlines analysis, the potential range of migration of pollutants in the conditions of functioning of six drainage wells was determined, with a total intake of 2670,5 m³/d. It was revealed in which regions the barrier operation is effective, and in which it is possible to intense flow from the landfill to the foreland and further towards surface watercourses.

Keywords: numerical groundwater flow model, hydraulic barrier, pollution migration

Wstęp

Składowiska odpadów poflotacyjnych stanowią zagrożenie dla środowiska wodnego, dlatego w celach ochronnych buduje się między innymi bariery hydrauliczne w postaci studni wierconych i drenów poziomych. Z doświadczeń autorów wynika, że często bariery takie wykonuje się bez wcześniejszej symulacji na modelu, a ich szczelność określa się poprzez prowadzenie monitoringu jakościowego. Numeryczny model filtracji jest

najlepszym narzędziem dającym możliwość wskazania nieszczelności i optymalizacji systemu. Celem artykułu jest wskazanie technicznych/metodycznych uwarunkowań prowadzenia tego typu analiz na modelu, rozpoznanie systemu krążenia wód, ustalenie bilansu przepływów dla poszczególnych poziomów wodonośnych, określenie skuteczności bariery zabezpieczającej przed migracją zanieczyszczeń ze składowiska. Prace dotyczą obiektu zlokalizowanego w niewielkiej zlewni, gdzie w podłożu występują utwory czwartorzędowe.

Schematyzacja warunków krążenia wód podziemnych

Jako podstawę warunków krążenia wód podziemnych przyjęto istnienie dwóch niejednorodnych warstw wodonośnych, utworzonych przez różnego rodzaju piaski i żwiry, współdziałających ze sobą za pośrednictwem kontaktów hydraulicznych poprzez warstwę rozdzielającą, zbudowaną z utworów półprzepuszczalnych i nieprzepuszczalnych:

- pierwsza modelowana warstwa – pierwsza warstwa wodonośna – pierwsza od powierzchni czwartorzędowa warstwa wodonośna zbudowana z piasków i żwirów o różnej gradacji, piasków pylastych i gliniastych; jej miąższość zmienia się od poniżej 1 m w południowej części modelowanego obszaru do 14 m w części środkowej, najczęściej nie przekracza jednak 5 m,
- druga modelowana warstwa – warstwa rozdzielająca - tworzą ją w zdecydowanej przewadze czwartorzędowe gliny i gliny piaszczyste oraz lokalnie pyły, pyły gliniaste i ropy trzeciorzędowe; jej miąższość zmienia się od poniżej 5 m do ponad 45 m, przeważnie jednak osiąga miąższość 10-30 m,
- trzecia modelowana warstwa – druga warstwa wodonośna – druga od powierzchni czwartorzędowa warstwa wodonośna zbudowana w przewadze z piasków drobnoziarnistych, piasków gliniastych i pylastych sporadycznie z domieszką żwirów; jej miąższość zmienia się od poniżej 2 m do ponad 25 m, najczęściej osiąga 5-15 m.

Poziomy wodonośne oraz warstwa izolująca zadane zostały poprzez określenie:

- stropu i spągu warstwy po uprzednim przygotowaniu map w interpolacji metodą krigingu; według danych z prawie 200 otworów wiertniczych, wykonanych przekrojów hydrogeologicznych oraz badań geofizycznych; w pierwszej i drugiej warstwie wodonośnej wyznaczono kilka stref, w których nie stwierdzono jej występowania (na modelu zadane w postaci bloków nieaktywnych),
- współczynnika filtracji zróżnicowanego na wartości od 0,2 m/d do 35 m/d dla warstw wodonośnych oraz od 0,001 m/d do 0,1 m/d dla warstwy rozdzielającej; utwory budujące pierwszą warstwę wodonośną charakteryzują się wartościami współczynnika filtracji przeważnie od 0,5 m/d do 6 m/d, natomiast tworzących drugą warstwę wodonośną od 2 m/d do 10 m/d; wartości współczynnika filtracji w modelowanym obszarze były wyznaczone dla pierwszej warstwy wodonośnej w 8 otworach wiertniczych oraz w 13 otworach dla drugiej,
- współczynnika porowatości całkowitej i efektywnej, współczynnika odsączalności grawitacyjnej i sprężystej – wartości wymienionych współczynników zostały zróżnicowane w zależności od rodzaju skały tworzącej daną warstwę; współczynnik porowatości całkowitej wynosi od 0,15 do 0,40, współczynnik porowatości efektywnej od 0,02 do 0,24, współczynnik odsączalności grawitacyjnej od 0,01 do 0,20 oraz współczynnik odsączalności sprężystej od 0,00008 do 0,009.

Dla pierwszej warstwy wodonośnej przyjęto swobodno-aporowy typ zwierciadła wód podziemnych a dla drugiejaporowy typ zwierciadła wód podziemnych. Pierwsza warstwa wodonośna zasilana jest na drodze infiltracji wód opadowych, dopływ boczny przez zachodnią granicę modelu, infiltrację z cieków powierzchniowych oraz ascensję z drugiej warstwy wodonośnej; natomiast druga warstwa na drodze przesiąkania wód podziemnych z wyżej leżącej warstwy wodonośnej oraz dopływ boczny od strony składowiska.

Konstrukcja modelu

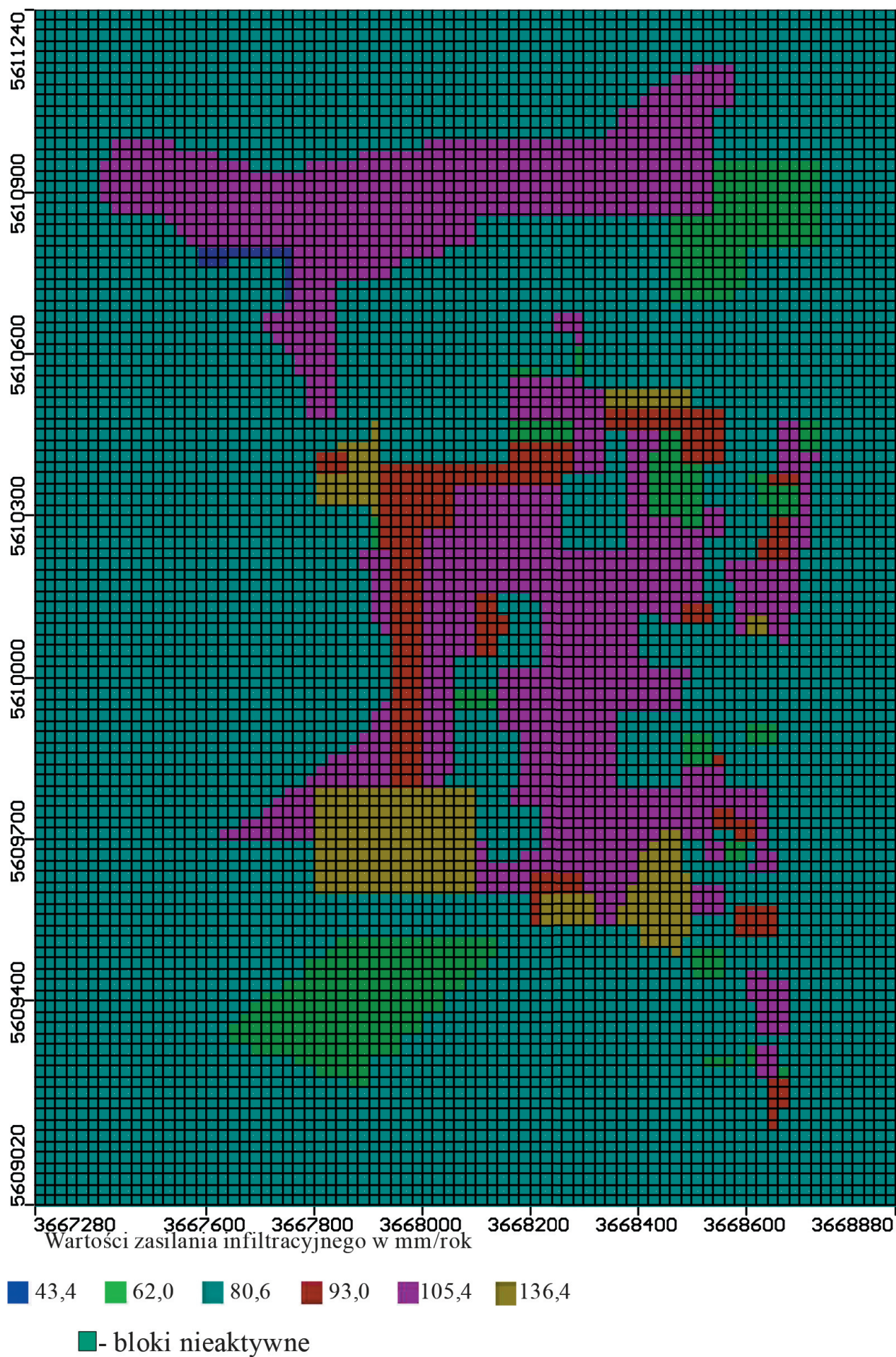
Model numeryczny został skonstruowany dla obszaru o powierzchni 1,87 km², ograniczonego od zachodu i od północy rzekami, od wschodu zaporą składowiska a od południa w sposób sztuczny, linią poprowadzoną w dowiązaniu do lokalnego układu współrzędnych. Dyskretyzacja obszaru filtracji została wykonana jednolitą kwadratową siatką pól elementarnych o długości boku 20 m. Cały obszar badań został podzielony na 111 wierszy i 80 kolumn. Wyznaczona za ich pomocą siatka ma zatem 26640 (8880 x 3 warstwy) bloków obliczeniowych i taką samą liczbę węzłów obliczeniowych zlokalizowanych w centrum każdego z bloków. W pierwszym poziomie wodonośnym aktywnych bloków jest 3406 (rys. 1) oraz 3356 w drugim, co łącznie z poziomem izolującym daje 10118 bloków. Przyjęta duża, dla tej skali modelu, gęstość węzłów obliczeniowych dała możliwość odwzorowania dużych spadków hydraulicznych, obszarów o dużym poborze wody (studnie drenażowe) oraz obszarów, gdzie ma miejsce przepływ wody w ciekach i rowach. Zrezygnowano tym samym z możliwości lokalnego zagęszczania siatki. Do obliczeń wykorzystano zaawansowany, sprawdzony w niezliczonych pracach na świecie program Modflow [5] [6] [7].

Do konstrukcji modelu numerycznego wykorzystano: dane z prawie 200 otworów wiertniczych, archiwalne wyniki badań geofizycznych, informacje dotyczące wielkości drenażu prowadzonego w rejonie składowiska oraz wielkości przepływów w ciekach powierzchniowych w badanym obszarze. Biorąc pod uwagę powierzchnię, dla której wykonano model numeryczny (1,87 km²) wydaje się, że dane z ponad 100 otworów wiertniczych na 1 km² jest liczbą niezwykle dużą. Jednak nierównomierny rozkład dostępnych danych i przyjęta skala modelu powodowały miejscami niedostatek szczególnie w zakresie parametrów filtracyjnych. Większa część otworów wiertniczych zlokalizowana jest w środkowej części obszaru, kosztem zdecydowanie mniejszej liczby w częściach północnej i południowej.

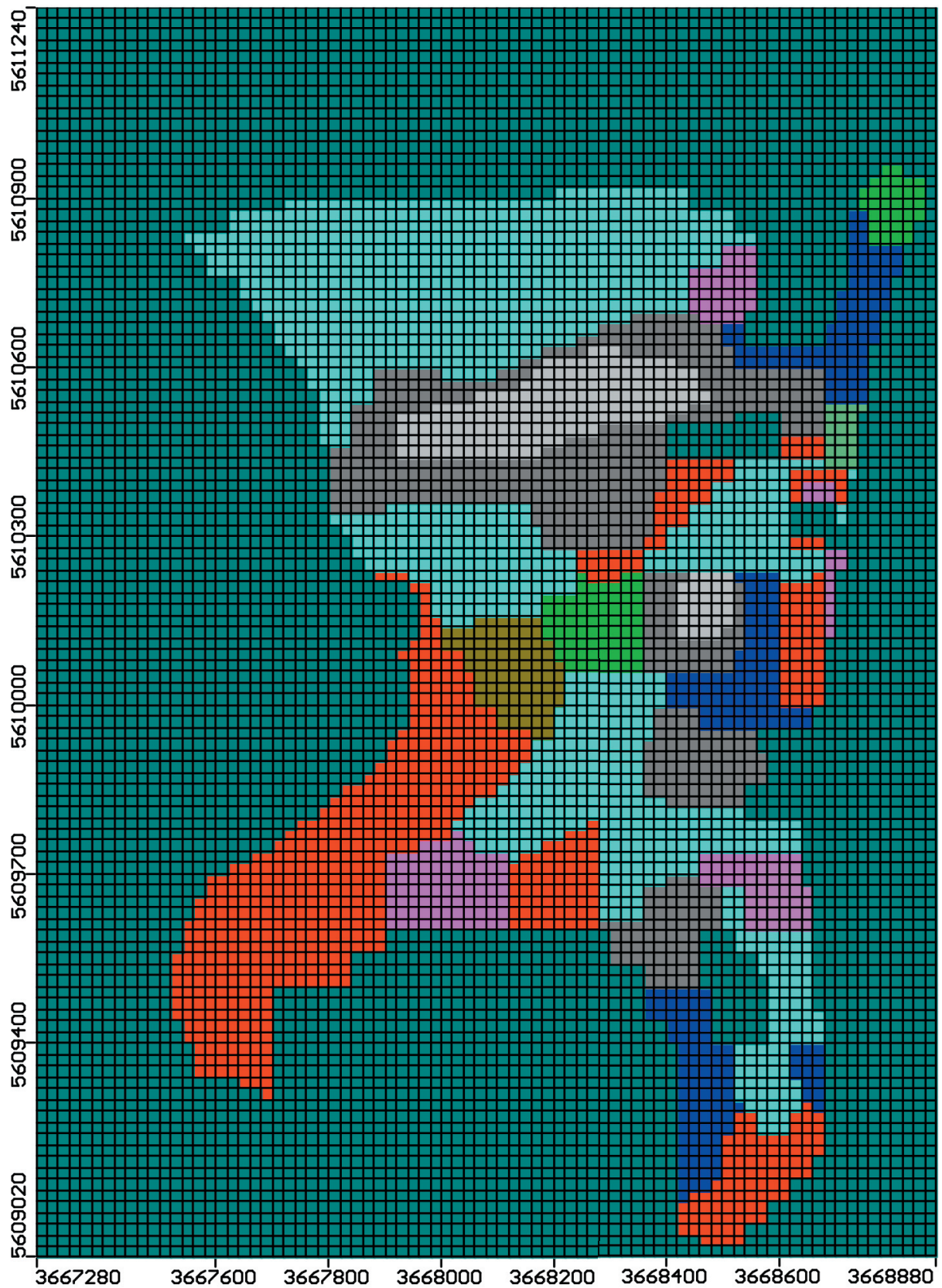
Warunki brzegowe I-go rodzaju - typu $H=\text{const}$ (Dirichleta) [1] - przyjęto na północno-zachodnim krańcu dokumentowanego obszaru, w dolinie rzeki, w kilku blokach obliczeniowych. Warunek brzegowy II-go rodzaju (Neumana) typu $Q=0$ przyjęto na zewnętrznych granicach obszaru badań w miejscach, gdzie stwierdzono brak przepływu. Takie granice przyjęto w miejscach wyklinowywania się danej warstwy wodonośnej. Granice $Q=0$ przyjmowano także wzdłuż linii prądu wyznaczonej przebiegiem hydroizohips w modelu przyrodniczym. Generalnie dla obu warstw wodonośnych warunek brzegowy II-go rodzaju został przyjęty wzdłuż zewnętrznej północnej i południowej granicy.

Warunek brzegowy II rodzaju typu $Q=\text{const}$. [1] przyjęto w postaci stałego zasilania powierzchniowego z opadów. Wprowadzono 6 różnych wartości infiltracji efektywnej od 43,4 do 136,4 mm/rok. Rozkład przyjętych wielkości w poszczególnych blokach obliczeniowych był uzależniony od litologii utworów przypowierzchniowych. Dla przeważającej powierzchni badanego obszaru przyjęto zasilanie w wysokości 80-105 mm/rok.

Warunek brzegowy II rodzaju został przyjęty również jako stały dopływ lub odpływ z warstw wodonośnych. W pierwszej i drugiej warstwie wodonośnej stały dopływ został zadany w aktywnych blokach obliczeniowych wzdłuż wschodniej



Rys. 1. Rozkład zasilania infiltracyjnego
 Fig. 1. Distribution of recharge



Wartości współczynnika filtracji w m/d:



Rys. 2. Rozkład współczynnika filtracji drugiej warstwy modelu
 Fig. 2. Distribution of hydraulic conductivity of the second layer

granicy modelu numerycznego, przedstawiając w ten sposób dopływ od strony składowiska. Dodatkowo w drugiej warstwie wodonośnej na granicy zachodniej zadany został warunek $Q=const.$, jako stały odpływ z obszaru. Wielkości przepływów na granicach zostały wyznaczone dla poszczególnych bloków obliczeniowych metodą hydrodynamiczną, uwzględniając wartości współczynnika filtracji, miąższości warstwy wodonośnej oraz spadków hydraulicznych. Przyjmując wielkości odpływu z drugiej warstwy wodonośnej na zachodniej granicy modelu uwzględniono, że znaczna część wód tej warstwy jest drenowana przez rzekę. Przy konstrukcji modelu uwzględniono również studnie drenażu pionowego zadając w nich warunek brzegowy II rodzaju $Q=const.$, jako wielkość prowadzonej eksploatacji wód podziemnych. W modelowanym obszarze funkcjonuje sześć studni drenażowych pracujących w sposób ciągły bądź okresowy. W modelu zafiltrowano je w drugiej warstwie wodonośnej i zadano łączny pobór wody w wysokości 2670,5 m³/d.

Warunki brzegowe III rodzaju zastosowano w celu odwzorowania wpływu wód powierzchniowych na poziom wód podziemnych, zadając na rzekach jak również rowach opaskowych. W modelu uwzględnione zostały tylko te odcinki rowów, które są technicznie sprawne, nie uwzględniono natomiast rowów neutralnych, źle zbudowanych i nie spełniających funkcji drenażowych.

Kalibracja modelu

Kalibracja modelu została przeprowadzona metodą kolejnych przybliżeń, tzw. metodą prób i błędów [1] [3]. Do korekty parametrów modelu wykorzystano następujące informacje: dane o położeniu zwierciadła wód podziemnych uzyskane z pomiarów w piezometrach i nowo wykonanych otworach wiertniczych, dane o wielkościach przepływu w ciekach powierzchniowych oraz intensywności prowadzonego drenażu wody przez rowy opaskowe składowiska. Procesowi tarowania poddane zostały następujące parametry: wielkość infiltracji efektywnej, współczynniki filtracji, przewodność osadów korytowych rzek, geometria poziomów wodonośnych oraz wielkości dopływu lub odpływu bocznego.

Wielkość zasilania infiltracyjnego została zmieniona w niewielkim zakresie. Nie zmieniono wartości przyjętych pierwotnie sześciu klas zasilania o wartościach od 43,4 do 136,4 mm/rok, a uzyskany ostatecznie rozkład przedstawia rysunek 1. Dla poszczególnych warstw wodonośnych otrzymano następujące wartości wskaźnika zasilania: pierwsza – około 13,5 %, druga – około 14,9 %. Wysoką wartość wskaźnika zasilania uzyskaną dla drugiej warstwy wodonośnej należy tłumaczyć dwoma czynnikami: relatywnie wysoką przepuszczalnością warstwy rozdzielającej zbudowanej na znacznej powierzchni z glin piaszczystych oraz wzmożonym przeciekaniem wód pierwszej warstwy wodonośnej do drugiej wymuszonym prowadzonym odwadnianiem studniami drugiej warstwy wodonośnej.

Wartości współczynnika filtracji k dla warstwy rozdzielającej na znacznym obszarze nie uległy zmianie, jednakże w kilku niewielkich strefach dokonano pewnych korekt. W przypadku warstw wodonośnych wartości uległy zmianom na znacznych obszarach w obu warstwach. Przyjęty pierwotnie zakres wartości tego parametru uległ zmianie. W wytarowanym numerycznym modelu współczynnik filtracji utworów wodonośnych przyjmuje wartości z przedziału od 0,1 m/d do 50 m/d

(rys. 2). Największe zmiany zostały poczynione w obszarach, gdzie z powodu mniejszej ilości otworów wiertniczych lub ich braku, wiarygodność danych wejściowych do modelu była niewielka. Tak było w części południowej i północnej modelowanego obszaru.

Model numeryczny został wytarowany dla warunków hydrogeologicznych uwzględniających pracę studni pełniących rolę drenażu pionowego przedpola składowiska. W modelowanym obszarze pracuje 6 studni, dla których została przyjęta wielkość eksploatacji w wysokości 2670,5 m³/d. W rejonie pracujących studni starano się w miarę wiarygodnie przedstawić poziom dynamicznego zwierciadła wody, uwzględniając obniżenia zwierciadła w pobliskich piezometrach.

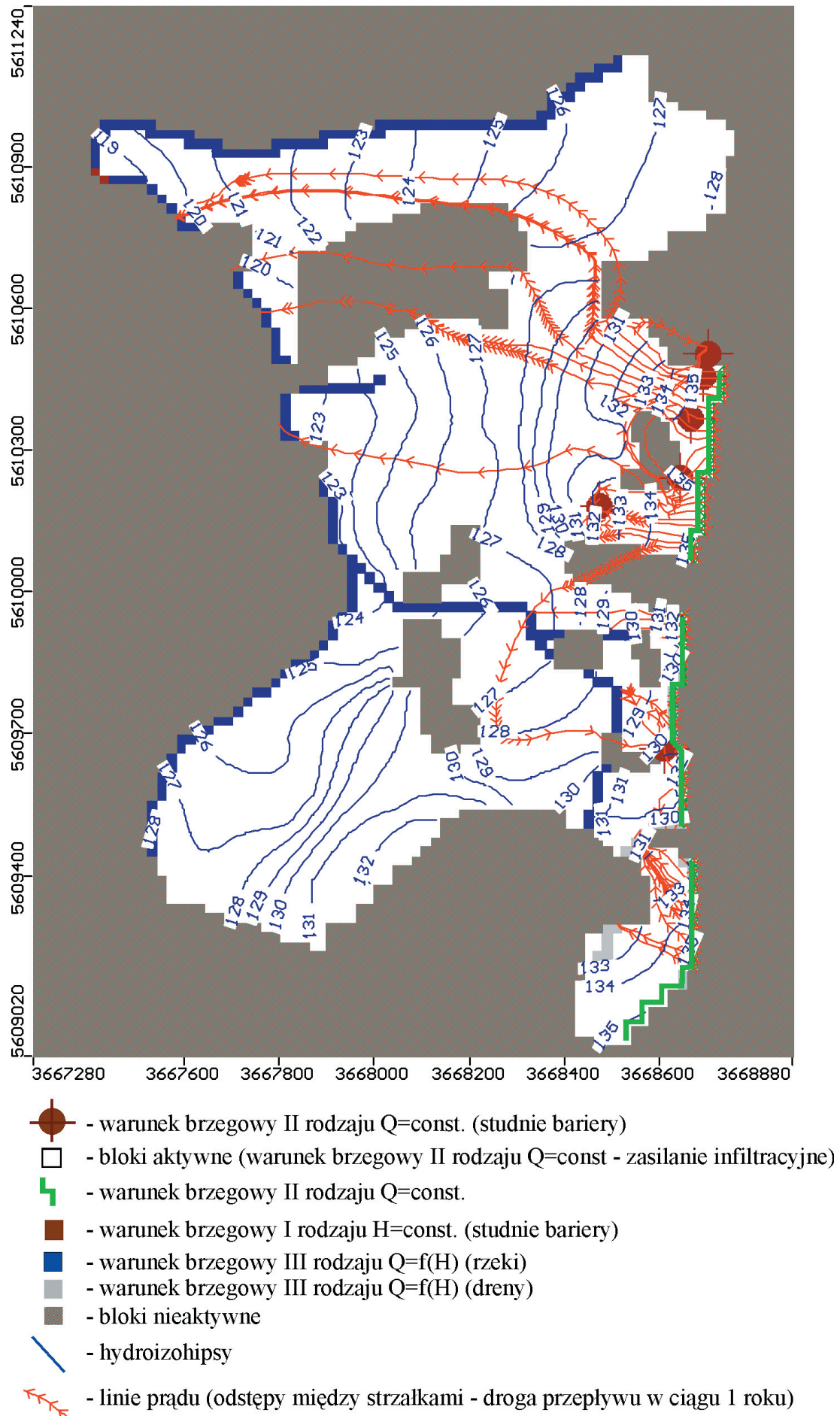
Przewodność osadów korytowych rzek została zwiększona od wartości 40 m²/d do 100 m²/d w jednym cieku, oraz zmniejszona w przypadku drugiego oraz głównego rowu, szczególnie w blokach symulujących ich górne odcinki.

Wielkości odpływu bocznego z drugiej warstwy wodonośnej w trakcie tarowania zostały obniżone w porównaniu do pierwotnie przyjętych. Było to spowodowane przyjęciem zachodniej granicy modelu numerycznego na rzece (warunek brzegowy III rodzaju) i założeniu, że część wód drugiej warstwy wodonośnej jest drenowana przez rzekę. Natomiast wielkości dopływu bocznego uległy niewielkim zmianom w kilkunastu granicznych blokach obliczeniowych.

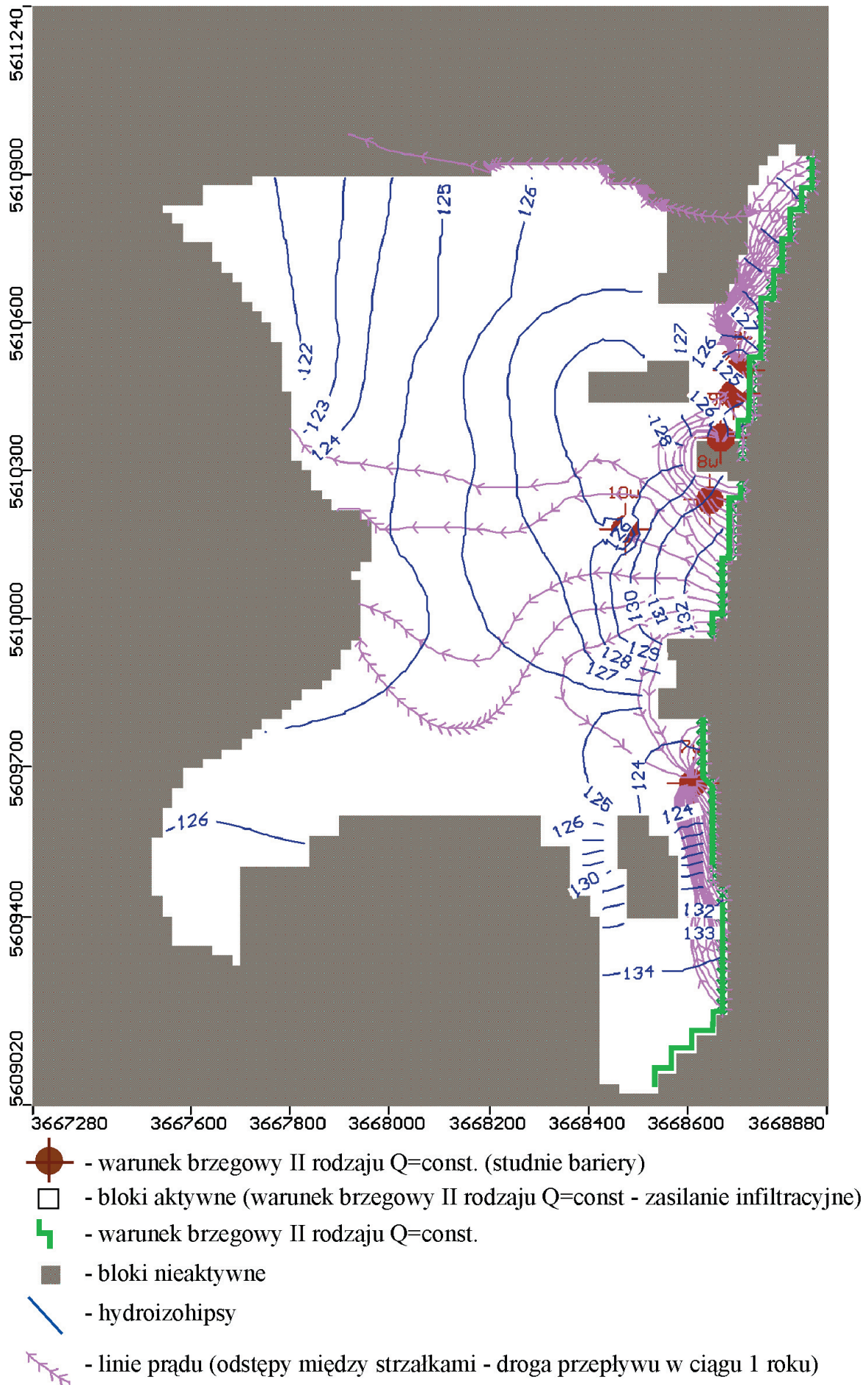
Analiza wyników modelu

Mapa zwierciadła pierwszej warstwy wodonośnej (rys. 3) wskazuje, że odpływ wód podziemnych odbywa się generalnie ze wschodu od rzędnej 130-135 m n.p.m. w kierunku zachodnim do wysokości 119-126 m n.p.m., wyznaczających bazę drenażu, jaką jest rzeka. W części południowej odpływ odbywa się w kierunku drugiej rzeki. Układ hydroizohips pozwala na wydzielenie kilku lokalnych wododziałów wód podziemnych w pierwszej warstwie wodonośnej. Na mapie hydroizohips drugiej warstwy wodonośnej widać, że przepływ wód podziemnych generalnie odbywa się również ze wschodu na zachód od rzędnych 130-134 m n.p.m. do 121-125 m n.p.m., a jedynie lokalnie występują inne kierunki przepływu. Bardzo wyraźnie zaznaczają się leje depresji wywołane pracą studni drenażu pionowego. Obniżenie zwierciadła dynamicznego w tych miejscach dochodzi do poniżej 125 m n.p.m. Taki układ sprzyja przesiąkaniu wód z pierwszej warstwy wodonośnej do drugiej. Inaczej przedstawia się rozkład ciśnień wody w obu warstwach w zachodniej części modelowanego obszaru. Tam wysokości hydrauliczne w drugiej warstwie (rys. 4) są wyższe niż w pierwszej o około 2 m. Możliwa jest zatem ascenzja wód z drugiej warstwy wodonośnej do pierwszej oraz pośredni drenaż wód warstwy drugiej przez rzekę.

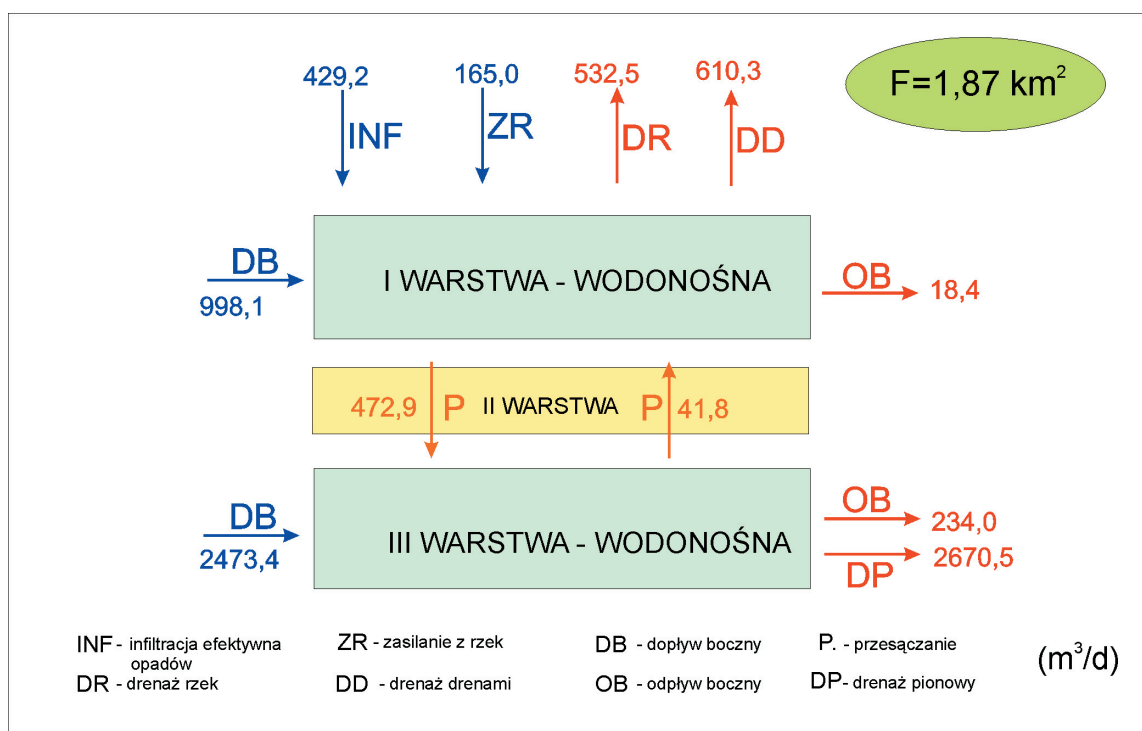
Na wytarowanym modelu zostały przeprowadzone obliczenia bilansowe, których wyniki przedstawiono na schemacie (rys. 5). Zasilanie infiltracyjne wód podziemnych w badanym obszarze oszacowano w wysokości 429,2 m³/d (2,66 l/s km²). Wartość modułu odpływu podziemnego obliczona w oparciu o uzyskane na modelu wielkości dopływów do cieków wynosi 3,29 l/s km². Uwzględnione w modelu cieki na przeważającej długości mają charakter drenujący. Zmienia się on na infiltrujący w strefach, gdzie cieki płyną w sąsiedztwie prowadzonego drenażu oraz w swoich ujściowych odcinkach. Całkowite zasilanie modelowanego kompleksu wodonośnego wynosi



Rys. 3. Mapa hydroizohips dla pierwszej warstwy wodonośnej oraz układ linii prądu od strony składowiska
 Fig. 3. Hydraulic heads for the 1st layer with forward pathlines from the landfill site



Rys. 4. Mapa hydroizohips dla drugiej warstwy wodonośnej oraz układ linii prądu od strony składowiska
 Fig. 4. Hydraulic heads for the 2nd layer with forward pathlines from the landfill site



Rys. 5. Bilans przepływów wody według obliczeń numerycznego modelu
 Fig. 5. Water balance according to the numerical model simulation

4065,7 m³/d. Jest to wartość bardzo wysoka zważywszy na niewielką powierzchnię (1,87 km²). Należy jednak wziąć pod uwagę, że dominującą składową przychodów jest dopływ boczny, który jest wymuszony przez gradient hydrauliczny przy granicy składowiska.

Dopływ boczny do obu warstw wodonośnych (3471,5 m³/d) jest zbliżony do wielkości prowadzonego drenażu pionowego studniami oraz rowami opaskowymi (3280,8 m³/d). Zatem ponad 90% wód podziemnych napływających od strony składowiska jest ujmowana systemem drenażowym. Jeśli założymy, że wymuszony (sztuczny) dopływ wód podziemnych do modelowanego obszaru odpowiada w przybliżeniu wielkości drenowanych wód, wówczas wartość całkowitego zasilania wód podziemnych w badanym obszarze można oszacować na około 4,5 l/s km².

Wykalibrowany model wykorzystano również do symulacji w programie MODPATH, wykorzystującym semianalityczną metodę śledzenia cząstek [8] [9] dla obliczenia rzeczywistych prędkości filtracji i wyznaczenia linii prądu, czyli w przybliżeniu także konwekcyjnego transportu konserwatywnych zanieczyszczeń w strumieniu wód podziemnych. Metoda ta jest szeroko wykorzystywana także przy wyznaczaniu stref ochronnych ujęć lub obszarów ochronnych GZWP [2] [4].

W pierwszej warstwie wodonośnej widoczne jest wyraźne oddziaływanie prowadzonego drenażu (rys. 3). W środkowo-wschodniej części badanego obszaru wszystkie linie obrazujące drogę przepływu wprowadzonych cząstek obliczeniowych skupiają się w punktach, gdzie zlokalizowane są studnie drenażowe. Natomiast woda płynąca od południowo-wschodniej strony drenowana jest przez rowy opaskowe. Obliczone czasy przepływu wody od składowiska do rzeki wynoszą przeważnie około 30-35 lat, jedynie na południu uzyskano wartość 15 lat.

W drugiej warstwie wodonośnej również wyraźnie zaznacza się oddziaływanie studni drenażowych na przepływ wody (rys. 4). Drenują one znaczną część wody płynącej od strony

składowiska. Przepływ wody od składowiska w stronę rzeki jest możliwy w modelowanym obszarze jedynie w wąskich strefach w części środkowej. Wyliczone czasy przepływu od składowiska do rzeki wynoszą w tym rejonie kilkanaście lat, maksymalnie do 30.

Przedstawiony układ linii prądu odtwarza warunki przy pracujących studniach drenażowych. W sytuacji, kiedy zostaną one wyłączone, ciśnienie wody w warstwach wodonośnych w sąsiedztwie zapory wzrośnie nawet do 10 m słupa wody. Spowoduje to możliwość przepływu wody od składowiska w kierunku zachodnim szerszym strumieniem i ze znacznie większymi prędkościami.

Podsumowanie

Wykonane obliczenia na modelu numerycznym środkowej i południowej części przedpola składowiska osadów poflotacyjnych wskazują na dopływy wód podziemnych od strony tego obiektu jako główne źródło zasilania obszaru. Wielkości dopływów do obiektów bariery hydrodynamicznej z ich zlewni podziemnej, wyrażone modulem odpływu podziemnego znacznie przekraczają wartości modulem uzyskiwane dla zlewni podziemnych sąsiednich obszarów, leżących w dalszej odległości. Wskazuje to na znaczący udział składowiska w kształtowaniu warunków hydrodynamicznych na jego przedpolu.

Istniejące obiekty drenażowe, działające na przedpolu, przejmują około 90% wód podziemnych napływających od strony składowiska. Analizy chemiczne wód podziemnych i powierzchniowych z tego okresu potwierdziły możliwość przenikania zanieczyszczeń.

Model potwierdził przydatność bariery w zabezpieczeniu przed dopływem zanieczyszczeń. Jednakże, aby w pełni ograniczyć możliwość filtracji wód podziemnych na dalsze odległości od składowiska w kierunku zachodnim, należy usprawnić pracę obiektów drenażowych w części środkowo-wschodniej modelowanego obszaru.

Literatura

- [1] Anderson M., Woessner W., (1992), *Applied Groundwater Modeling*, Academic Press, Inc., London
- [2] Gurwin J., (2000), *Rola struktur pradolinnych w zasilaniu ujęć wód podziemnych na przykładzie modelu pradoliny Odry w rejonie Głogowa*. Problemy wykorzystania wód podziemnych w gospodarce komunalnej – „Problemy eksploatacji ujęć wód podziemnych”, Wyd. PWiK Częstochowa, 85-93
- [3] Gurwin J., (2003), *Dane wejściowe a kalibracja numerycznego modelu filtracji*. Współczesne problemy hydrogeologii, T.XI/1, WBWiŚ, Gdańsk, 301-308
- [4] Gurwin J., (2015), *Integration of numerical models with geoinformatic techniques in delimitation of protection zone of complex multi-aquifer system of MGB 319, SW Poland*. GEOLOGOS 21, 3, 169-177
- [5] Harbaugh A. W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G., (2000), *MODFLOW–2000 The US Geological Survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the groundwater flow process*. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.
- [6] McDonald M.G. & Harbaugh A.W., (1988), *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, U.S. Geological Survey Open-File Report , Washington
- [7] McDonald M.G., Harbaugh A.W., Orr B.R. & Ackerman D.J., (1991), *A Method of Converting No-Flow Cells to Variable-Head Cells for the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. U.S. Geol. Survey Open-File Report, Reston
- [8] Pollock D.W., (1994), *User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3; a particle tracking post-processing package for MODFLOW*, U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464, Washington
- [9] Pollock D.W., (2016), *User guide for MODPATH Version 7—A particle-tracking model for MODFLOW*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1086, Washington



Uzdrowisko Szczawno Zdrój

z arch. Uzdrowiska