

Analiza wybranych metod minimalizacji migracji wód zasolonych w gruncie

Dr inż. Maciej Dembski

Wojewódzki Sąd Administracyjny w Gdańsku

Prezentowane zagadnienie było tematem pracy doktorskiej, przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Macieja Werno i obronionej w roku 2003 na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej.

Ochrona przed degradacją jakości wód podziemnych jest jednym z najistotniejszych elementów ochrony środowiska naturalnego ze względu na życie i zdrowie ludzkie oraz zwierzęce.

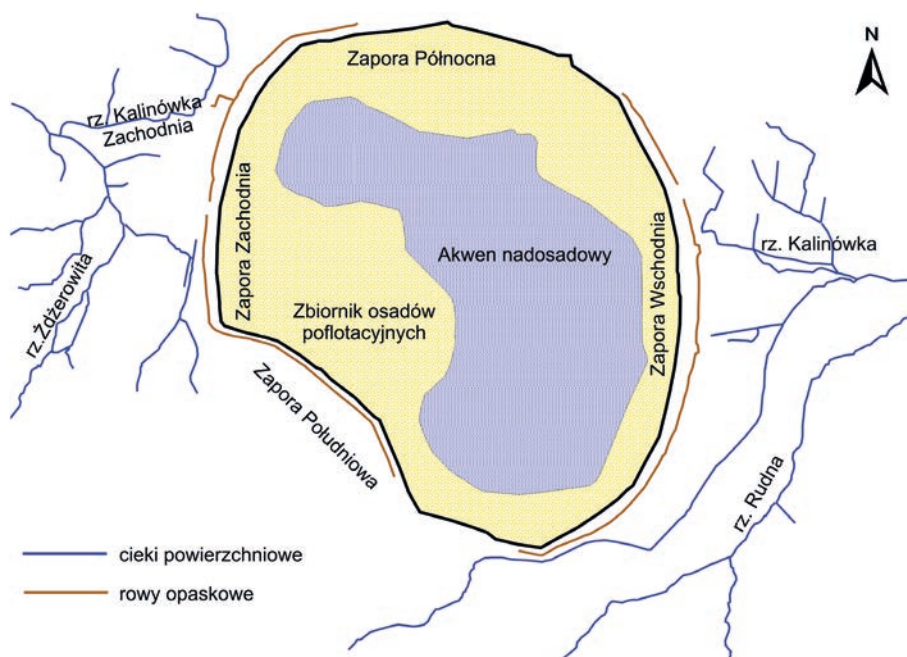
W wodach podziemnych degradacja następuje poprzez wprowadzenie do nich szkodliwych związków powodujących wzrost zawartości substancji już w nich występujących albo substancji obcych naturalnemu lub pierwotnemu stanowi. Zmiany jakościowe mogą być spowodowane przez działanie zamierzone, jednak nie nastawione na zanieczyszczenie wód, na przykład przez konieczność budowy składowisk różnego rodzaju odpadów.

W warunkach polskich jednym z czynników najbardziej wpływających na degradację wód podziemnych są bardzo liczne ogniska zanieczyszczeń w postaci składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych, zwłaszcza odpadów przemysłu wydobywczego. Problem ten dotyczy szczególnie składowisk budowanych w okresie, kiedy nie zwracano we właściwy sposób

uwagi na potrzeby ochrony środowiska naturalnego. W związku z tym w niniejszej pracy skoncentrowano się wyłącznie na metodach ograniczenia migracji zanieczyszczeń z tego rodzaju ognisk ze szczególnym uwzględnieniem składowisk odpadów przemysłowych [3].

W celu zahamowania procesu degradacji wód podziemnych w otoczeniu wspomnianych składowisk konieczne jest stosowanie skutecznych, a zarazem kosztowo uzasadnionych, metod ograniczenia lub likwidacji migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych. W każdym przypadku dobór metody wymaga indywidualnego podejścia uwzględniającego źródła i rodzaje zanieczyszczeń oraz miejscowe warunki geologiczne i hydrogeologiczne.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na drodze obliczeń numerycznych, skuteczności wybranych metod minimalizacji migracji wód zasolonych w gruncie na przykładzie rzeczywistego ogniska skażenia wód gruntowych, tj. największego w Europie składowiska odpadów przemysłowych zlokalizowanego w Lubieńsko-Głogowskim Okręgu Miedziowym w rejonie miejscowości Żelazny Most, będącego składowiskiem odpadów poftotacyjnych rudy miedzi.



Rys. 1. Schemat składowiska i sieci hydrograficznej przedpola

Składowisko odpadów poftłocyjnych KGHM o powierzchni 14 km², otoczone czterema zaporami, jest czynne od 1977 roku (rys. 1). Odpady składowane są w postaci płynnej, w ilości około 90 mln kg masy suchej dziennie. Szczegółowy obiekt badań to przedpole najdłuższej i najwyższej zapory wschodniej, dla której istnieją bogate rzeczywiste dane z badań i pomiarów oraz modele hydrogeologiczne i wyniki prognoz migracji wód słonych [5].

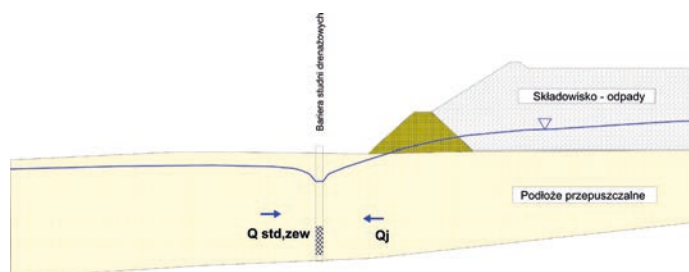
W celu realizacji założonego programu badań dokonano analizy wyników dotychczasowych działań ograniczających migrację wód zasolonych. Co więcej, podstawą do analiz obiektu badawczego był zbudowany przez AGH w Krakowie model hydrogeologiczny, w którym konieczne było dokonanie modyfikacji polegającej na zagęszczeniu kroku przestrzennego siatki obliczeniowej [1].

Praktycznym celem pracy było zaproponowanie, w istniejących warunkach składowiska Żelazny Most, rozwiązania ochrony wód gruntowych na przedpolu składowiska, skuteczniejszego i możliwego do wykonania, z wykorzystaniem obiektów istniejących, od dotychczas zastosowanego zespołu pionowych studni drenazowych.

W badaniach założono, że pod pojęciem migracji wód słonych rozumie się przenoszenie wszystkich soli znajdujących się w wodach gruntowych (mineralizacja całkowita) lub w szczególnych przypadkach przenoszenie jonu chloru Cl⁻.

WYBRANE SPOSOBY MINIMALIZACJI MIGRACJI WÓD SŁONYCH

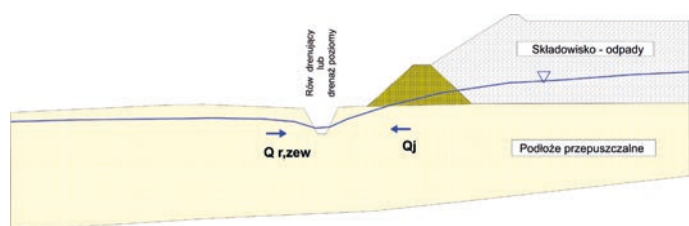
Drenaże pionowe – bariery studni



- Q_j – jednostkowe natężenie dopływu od strony składowiska,
 $Q_{std,zew}$ – jednostkowe natężenie dopływu do studni od strony przedpola zbiornika,

Rys. 2. Schemat drenażu pionowego w postaci bariery studni pompowych

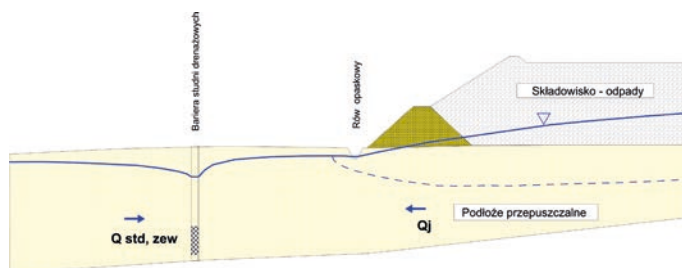
Drenaże poziome – dreny rurowe i rowy opaskowe



- Q_j – jednostkowe natężenie dopływu od strony składowiska,
 $Q_{r,zew}$ – jednostkowe natężenie dopływu do rowu od strony przedpola zbiornika,

Rys. 3. Schemat drenażu poziomego w postaci rowu opaskowego

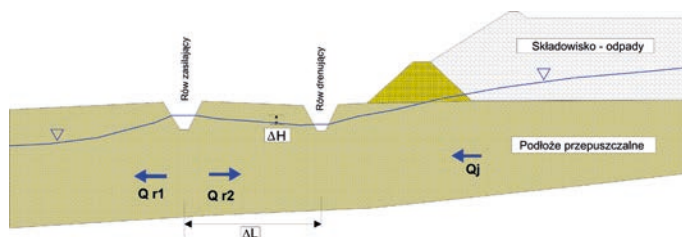
Drenaże kombinowane – poziome i pionowe



- Q_j – jednostkowe natężenie dopływu od strony składowiska,
 $Q_{std,zew}$ – jednostkowe natężenie dopływu do studni od strony przedpola zbiornika,

Rys. 4. Schemat drenażu kombinowanego – rów opaskowy i bariera studni

Lokalny wododział – system dwóch równoległych rowów



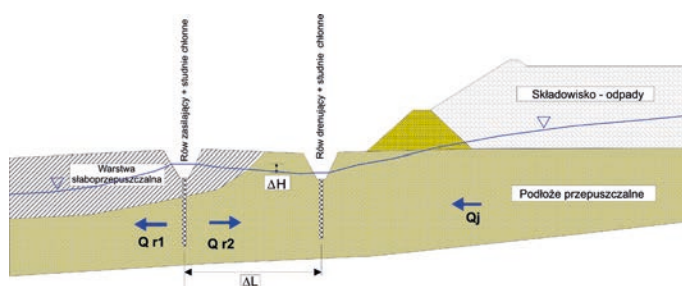
Rys. 5. Schemat systemu dwóch równoległych rowów

Natężenie dopływu wody słodkiej z rowu zasilającego – Q_r rozdzieli się na wartości:

- Q_{r2} – wywołujące efekt lokalnego wododziału hydraulicznego,
 Q_{r1} – stanowiące wynikowe natężenie odpływu na przedpole,
 Q_j – jednostkowe natężenie dopływu od strony składowiska.

W systemie tym jeden jest rowem opaskowym zbierającym wody ze składowiska, a drugi rowem zasilającym warstwę wodonośną od strony przedpola. Rów zasilający ma regulowany poziom wody, który jest wyższy o ΔH i oddalony od istniejącego rowu opaskowego o odległość ΔL w stronę przedpola. Rów zasilający spełnia rolę lokalnego wododziału, poprzez zasilanie podłoża obszaru chronionego wodą czystą (w ujęciu chemicznym – nisko zmineralizowaną).

Lokalny wododział – system dwóch równoległych rowów w połączeniu ze studniami



Rys. 6. Schemat systemu dwóch równoległych rowów w połączeniu ze studniami

System ten rozszerzony jest o hydrauliczne „przełączenie” rowu zasilającego w postaci studni chłonnych, które ułatwiają infiltrację wód słodkich z rowu do podłoża.

ZASTOSOWANE MODELE OBLICZENIOWE

Pakiety programów wykorzystywanych w pracy to:

- Model numeryczny przepływu wód gruntowych – pakiet MODFLOW,
- Model transportu zanieczyszczeń – pakiet MT3D’96.

W symulacji zagadnienia przepływu wód gruntowych i migracji wód zasolonych wykorzystano pakiet programów VISUALMODFLOW [7], który stanowi rozwinięcie i połączenie stosowanych przez autora programów MODFLOW [2, 4] – do modelowania trójwymiarowego przepływu wody w gruncie oraz MT3D’96 [8, 9] – do modelowania transportu zanieczyszczeń w wodzie gruntowej. Pakiet VISUALMODFLOW pracuje w środowisku WINDOWS i umożliwia graficzne przygotowanie danych oraz wizualizację wyników. Stanowi to znaczne ułatwienie w przygotowaniu modeli numerycznych i ich weryfikacji.

Model numeryczny przepływu wód gruntowych – pakiet MODFLOW – model numeryczny przestrzennego przepływu wód gruntowych w złożonych warunkach hydrogeologicznych oparto na pakiecie programów MODFLOW, który pozwala na kompletowanie potrzebnego zestawu modułów programowych koniecznych do rozwiązania sformułowanego zadania. Pakiet MODFLOW został opracowany przez US Geological Survey i oparty jest na metodzie różnic skończonych, dla zagadnienia trójwymiarowego oraz stanu ustalonego lub zmiennego w czasie.

Model transportu zanieczyszczeń – pakiet MT3D’96 – model numeryczny trójwymiarowego transportu masy zanieczyszczeń w wodach gruntowych oparto na pakiecie programów MT3D, opracowany przez S. S. Papadopoulos & Associates, Inc. Pakiet MT3D ma strukturę modułową. Zastosowana struktura modułowa jest analogiczna do struktury przyjętej w pakiecie MODFLOW.

Pakiet programów MT3D, dla transportu zanieczyszczeń, jest stosowany do modelowania zmian koncentracji zanieczyszczeń w wodach gruntowych, w których rozpatruje się zjawiska:

- adwekcji,
- dyspersji,
- reakcji chemicznych związanych z liniową i nieliniową sorpcją/desorpcją lub nieodwracalne procesy rozpadu albo biodegradacji związków rozpuszczonych.

Pakiet MT3D’96 jest stosowany łącznie z modelem przepływu wody gruntowej MODFLOW. Zakłada się, że zmiany pola

koncentracji zanieczyszczeń nie wpływają w sposób istotny na pole prędkości wód gruntowych. Założenie to pozwala na niezależną weryfikację modelu przepływu. W obliczeniach transportu zanieczyszczeń z wykorzystaniem MT3D konieczne jest przekazanie pola poziomów piezometrycznych i obliczonych składowych natężeń przepływu z pakietu MODFLOW jako danych wejściowych do modelu MT3D. Równocześnie przekazywane są warunki brzegowe z modelu MODFLOW.

PROCEDURA BADAWCZA

Badania obejmowały trzy etapy:

- etap I – weryfikację poprawności modelu transportu zanieczyszczeń MT3D’96,
- etap II – badania na modelu interpretacyjnym,
- etap III – badania z zastosowaniem lokalnego wododziału na przedpolu składowiska Żelazny Most.

Etap I – Weryfikacja poprawności modelu transportu zanieczyszczeń MT3D’96

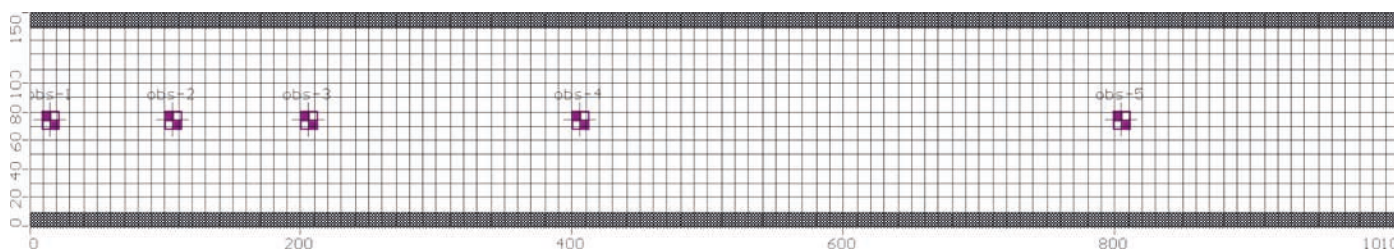
Obliczenia weryfikacyjne wykonano dla wybranych przypadków, dla których znane są rozwiązania analityczne, to jest:

- jednowymiarowy transport zanieczyszczeń, w jednorodnym polu prędkości,
- dwuwymiarowy transport zanieczyszczeń, w jednowymiarowym polu prędkości,
- osiowo-symetryczne zadanie zmiany koncentracji w studni iniekcyjno-drenującej.

Celem tych obliczeń było udokumentowanie zgodności rozwiązań numerycznych, z trójwymiarowego modelu transportu zanieczyszczeń MT3D’96 z analogicznymi przypadkami rozwiązań analitycznych. W ten sposób pokazano przydatność pakietu MT3D’96 do poszukiwania rozwiązań numerycznych, w zagadnieniach hydrogeologicznych, dla których nie istnieją rozwiązania analityczne.

Poniżej przedstawiono przykład weryfikacji dla jednowymiarowego transportu zanieczyszczeń w jednorodnym polu prędkości.

Model numeryczny transportu wód zasolonych z wykorzystaniem pakietu MT3D’96 zbudowano w postaci jednorodnego obszaru dwuwymiarowego (rys. 7), w którym wymuszono jednorodne pole prędkości, w kierunku osi x. Obszar modelu składa się z 101 kolumn o kroku $\Delta x = 10.0$ ft (3,048 m) oraz 15 wierszy o kroku $\Delta y = 10.0$ ft (3,048 m). W pierwszej kolumnie założono



Rys. 7. Schemat obszaru modelu transportu zanieczyszczeń dla zadania jednowymiarowego, z jednorodnym polem prędkości

stałą koncentrację względną. Wszystkie jednostki oraz wymiary przyjęto dokładnie takie same jak w przypadku opisanym w literaturze.

Obliczenia przeprowadzono dla czterech różnych zestawów danych dla parametrów: dyspersyjności α_L , współczynnika opóźnienia R_f oraz stałej zaniku masy λ , zgodnie z tabl. 1.

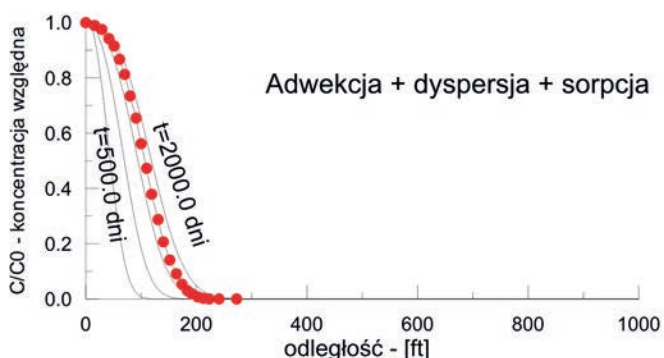
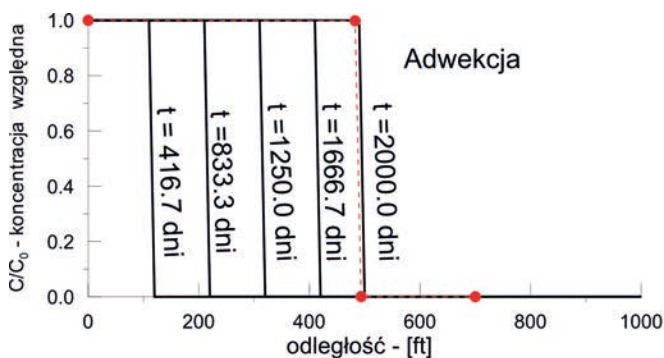
Tabl. 1. Zestawienie danych obliczeniowych dla zadania jednowymiarowego

Przypadek			Opis
$\alpha_L = 0,0$	$R_f = 0$	$\lambda = 0$	Adwekcja
$\alpha_L = 10$ ft	$R_f = 0$	$\lambda = 0$	Adwekcja i dyspersja
$\alpha_L = 10$ ft	$R_f = 5$	$\lambda = 0$	Adwekcja, dyspersja i sorpcja
$\alpha_L = 10$ ft	$R_f = 5$	$\lambda = 0,002$ doba ⁻¹	Adwekcja, dyspersja, sorpcja i zanik

Wyniki obliczeń analitycznych porównano z wynikami obliczeń numerycznych (metodą różnic skończonych) dla modelu dwuwymiarowego, w którym parametry geometryczne, hydrauliczne warstwy wodonośnej oraz czas prognozowania przyjęto zgodnie z tabl. 2.

Tabl. 2. Parametry modelu numerycznego (pakiet MT3D'96) dla jednowymiarowego zagadnienia transportu zanieczyszczeń

Krok przestrzenny	$\Delta x = 10$ ft (3,048 m); $\Delta y = 10$ ft (3,048 m)
Mięszość warstwy	$\Delta z = 1$ ft (0,3048 m)
Prędkość wody gruntowej	$v = 0,24$ ft/dobę (8,46667e-7 m/s)
Porowatość	$n = 0,25$
Czas symulacji	$t_{\max} = 2000$ dni ($1,728 \cdot 10^8$ s)



Na rys. 8 przedstawiono porównanie wyników obliczeń autora – naniesionych w postaci punktów dla czasu symulacji $t_{\max} = 2000$ dni z wynikami obliczeń dla rozwiązania analitycznego [9]. Jak widać na rys. 8 obliczenia wykonane obiema metodami: z modelu MT3D'96 i wyników literaturowych (Van Genuchten i Alves – [6]) wykazują bardzo dobrą zgodność.

Tak samo w pozostałych dwóch przypadkach (dwuwymiarowego transportu zanieczyszczeń w jednowymiarowym polu prędkości przepływu wód gruntowych i osiowo-symetrycznego zadania zmiany koncentracji w studni iniekcyjno-drenującej) uzyskano dobrą zgodność wyników używanych programów z rozwiązaniami analitycznymi.

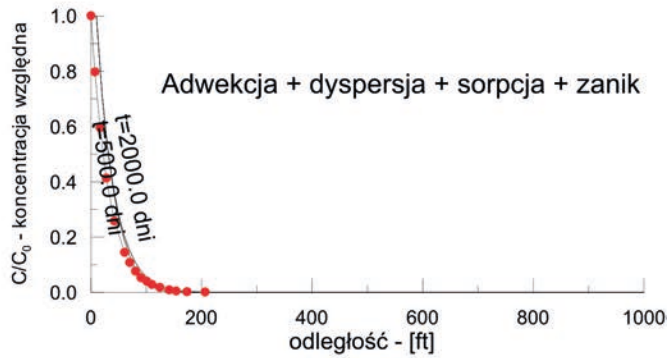
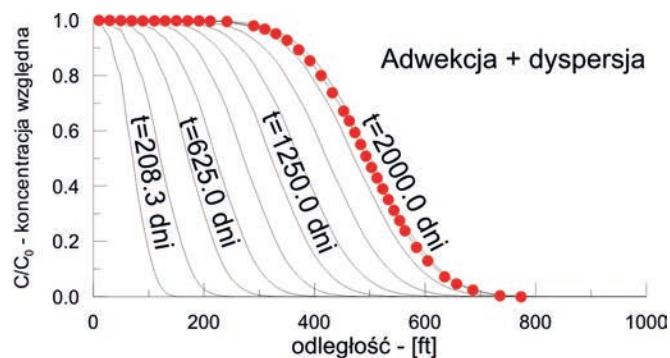
Dzięki uzyskaniu dobrej zgodności wyników pakiet programów VISUAL MODFLOW wykorzystano do dalszych analiz jako obiektywne narzędzie do oszacowania efektów ograniczania migracji wód zasolonych w gruncie.

Etap II – Badania na modelu interpretacyjnym

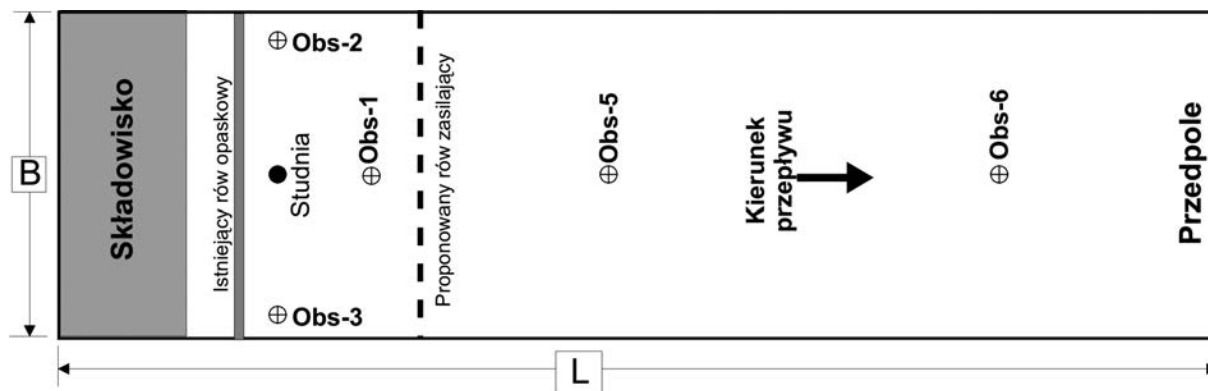
Dla założonego szerokiego zakresu badań opracowano tzw. model interpretacyjny przepływu wód gruntowych i migracji wód słonych, stwarzający uproszczone warunki obliczeniowe. Obszar modelu interpretacyjnego reprezentuje rzeczywiste uśrednione warunki hydrogeologiczne w wybranym rejonie zapory wschodniej składowiska.

W modelu interpretacyjnym określono charakterystyki ośrodka gruntowego i warunki brzegowe oraz początkowe przepływu wód gruntowych i migracji wód słonych oraz przeprowadzono weryfikację modelu.

Na modelu interpretacyjnym dokonano oceny działania wybranych sposobów ograniczenia migracji wód słonych na przed-



Rys. 8. Porównanie wyników autora (punkty z modelu MT3D'96) z wynikami rozwiązania analitycznego, Van Genuchten i Alves [9]



Rys. 9. Schemat modelu interpretacyjnego

pole składowiska. Efekty działania poszczególnych rozwiązań oceniono na podstawie zmiany koncentracji soli, to jest mineralizacji całkowitej w różnych przedziałach czasu w wybranych punktach obserwacyjnych w modelu interpretacyjnym.

Założenia i zakres zmienności parametrów modelu interpretacyjnego (rys. 9):

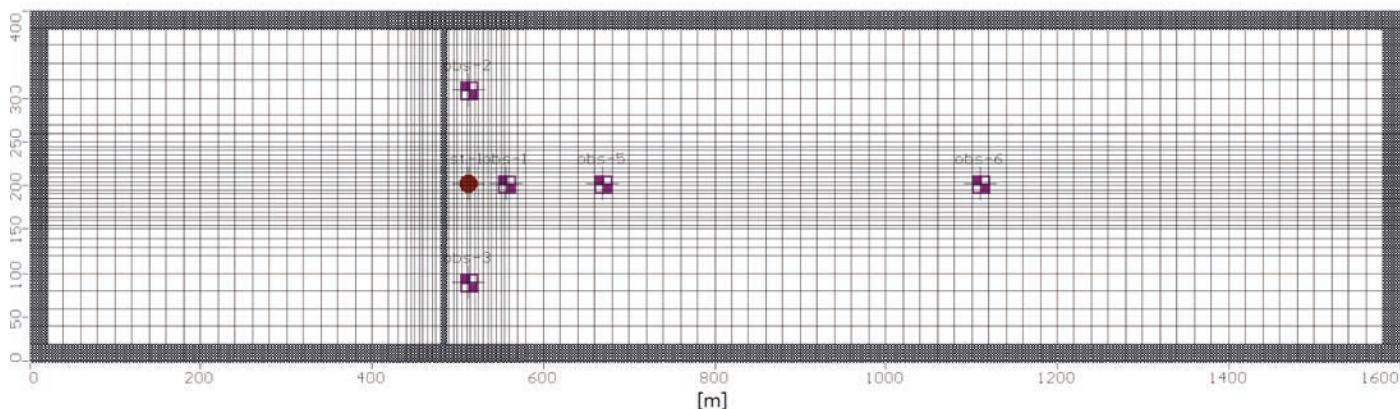
- $L = 1600$ m – długość obszaru modelu,
- $B = 160, 240, 360$ m – rozstaw studni,
- $Q = 90, 150, 250, 350$ m³ – dobową wydajność studni,
- $\Delta L = 50, 100$ m – rozstaw rowu opaskowego: drenującego i zasilającego,
- $\Delta H = 0,5, 1,0$ m – różnica poziomów rowu drenującego i zasilającego.

Na poniższym rysunku na górnej i dolnej krawędzi obszaru zadano nieprzepuszczalne elementy siatki obliczeniowej (warunek zerowego strumienia normalnego), a na lewej i prawej krawędzi obszaru zadano elementy siatki z warunkiem poziomu

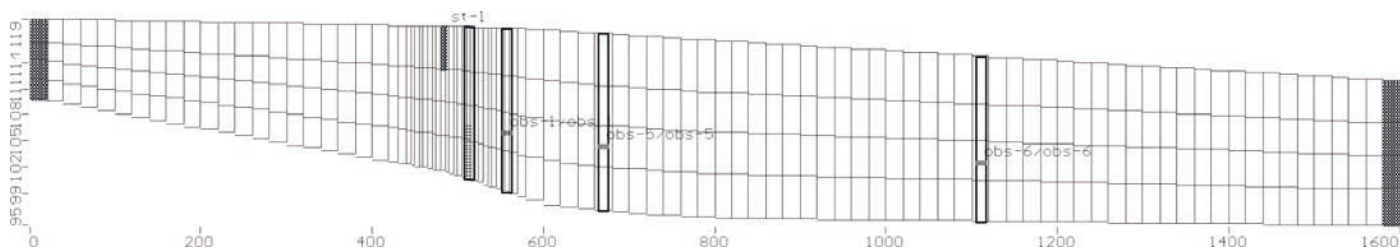
piezometrycznego $H = \text{const}$. Ponadto na schematach pokazano położenie studni i punktów obserwacyjnych, w obszarze modelu interpretacyjnego, w których zbierane są informacje o zmianach mineralizacji w procesie obliczeniowym (rys. 10). Wymiary obszaru zadano w metrach.

Na rys. 11 pokazano przekrój pionowy dyskretnego obszaru modelu interpretacyjnego w osi obszaru. Przekrój pionowy pokazuje, że czwartorzędową warstwę wodonośną podzielono na cztery warstwy obliczeniowe. W warstwie pierwszej (od góry) odwzorowany jest rów opaskowy. Filtr studni jest odwzorowany w spągowej części warstwy wodonośnej (St-1), a punkty obserwacyjne **obs-1**, **obs-5**, **obs-6** położone są w trzeciej (od góry) warstwie obliczeniowej. Na lewej i prawej stronie obszaru zaznaczono warunki brzegowe w postaci zadanej wartości poziomu piezometrycznego $H = \text{const}$:

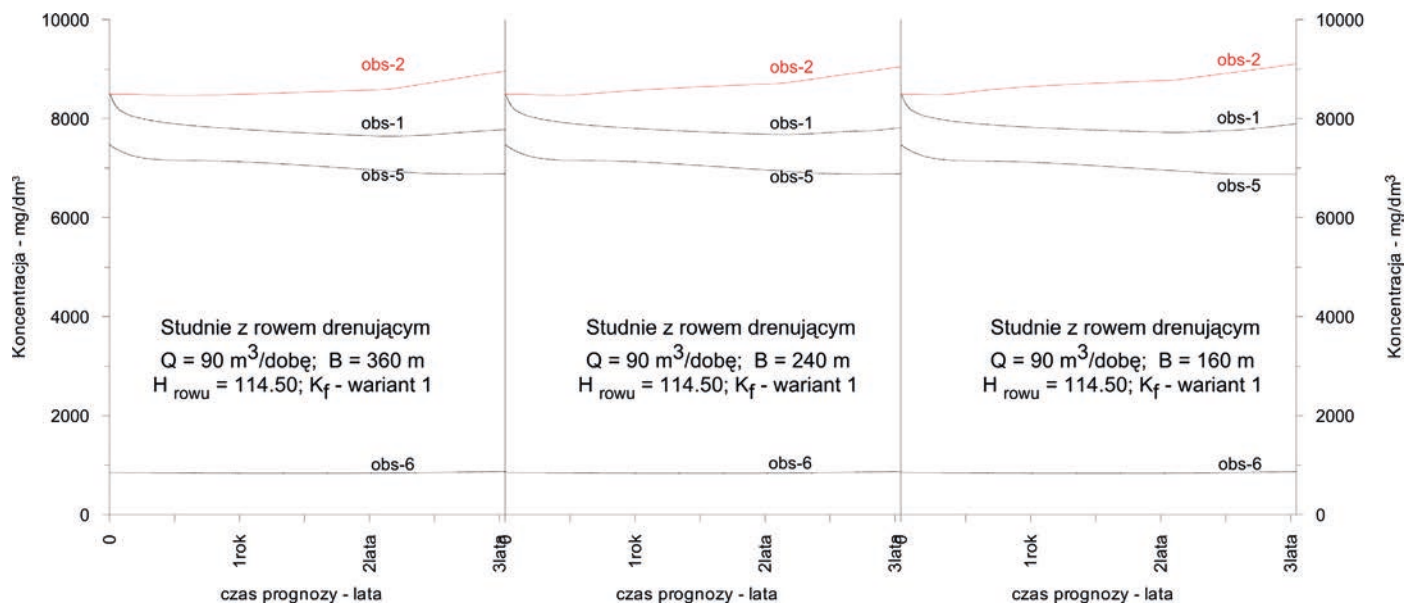
- pod składowiskiem, w odległości $X = 0$ m,
- na przedpolu składowiska, w odległości $X = 1600$ m.



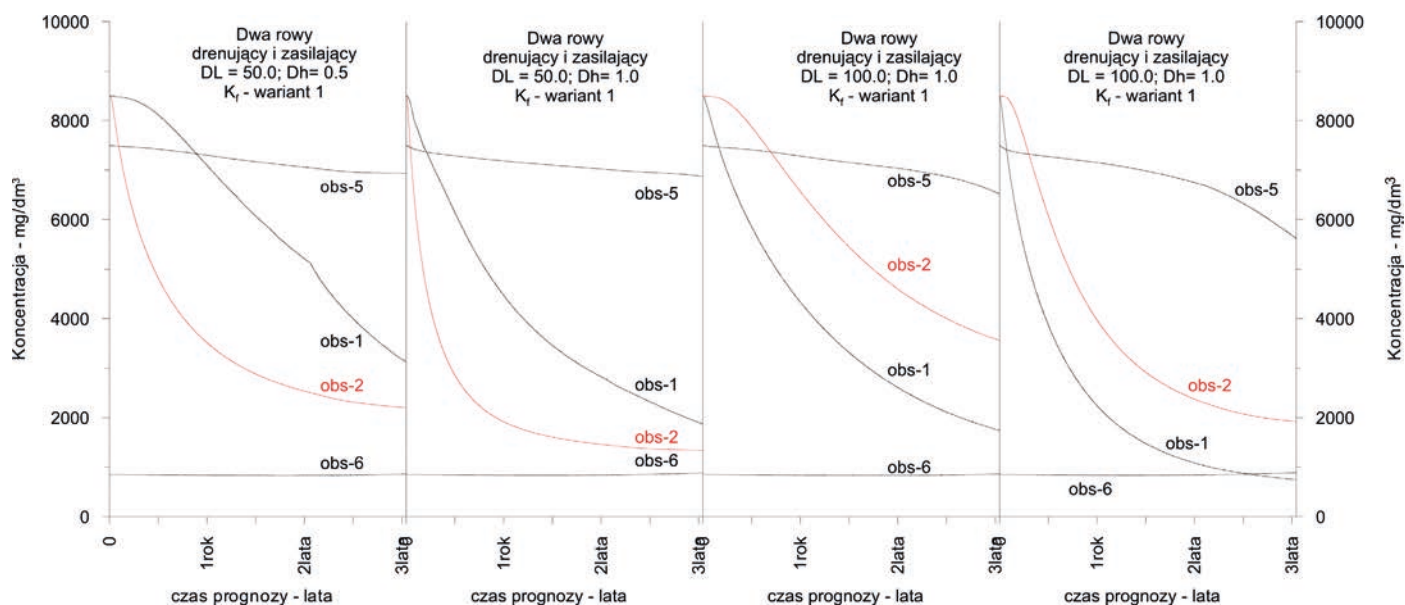
Rys. 10. Siatka obliczeniowa modelu interpretacyjnego



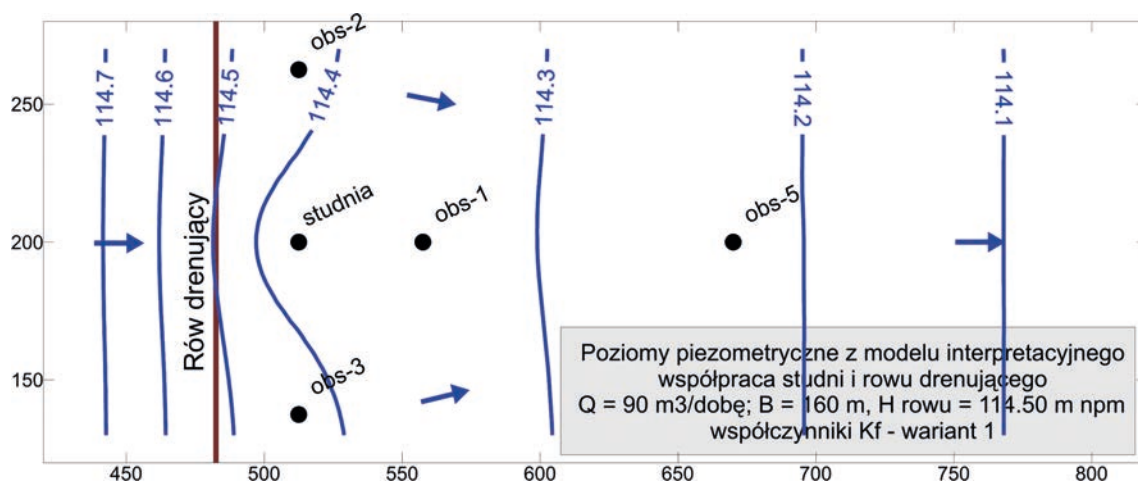
Rys. 11. Przekrój pionowy siatki obliczeniowej w osi modelu interpretacyjnego



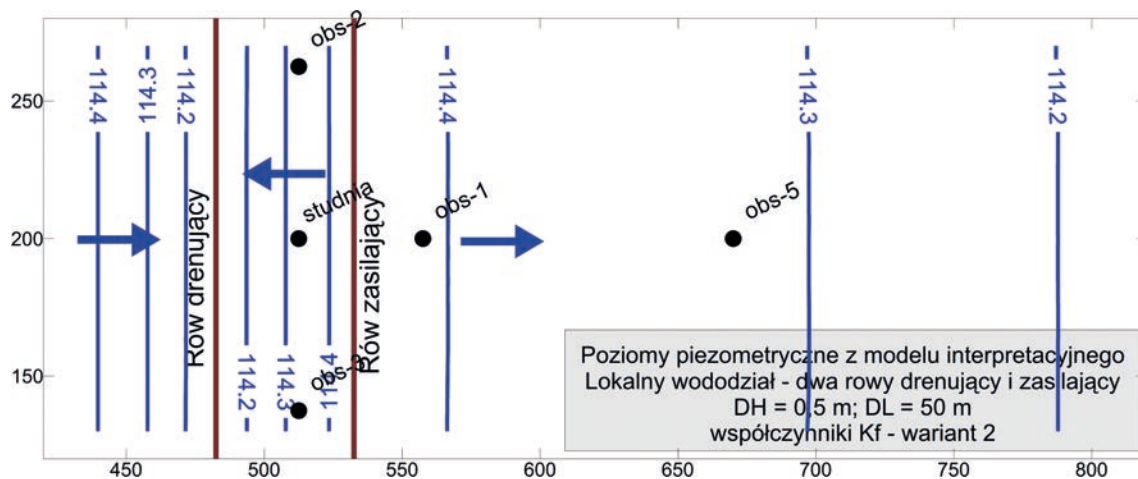
Rys. 12. Wyniki obliczeń dla studni $Q = 90 \text{ m}^3/\text{dobę}$, $B = 160 \div 360 \text{ m}$, z drenującym rowem opaskowym, $H_{\text{rowu}} = 114,50 \text{ m n.p.m.}$, współczynniki K_f wariant 1



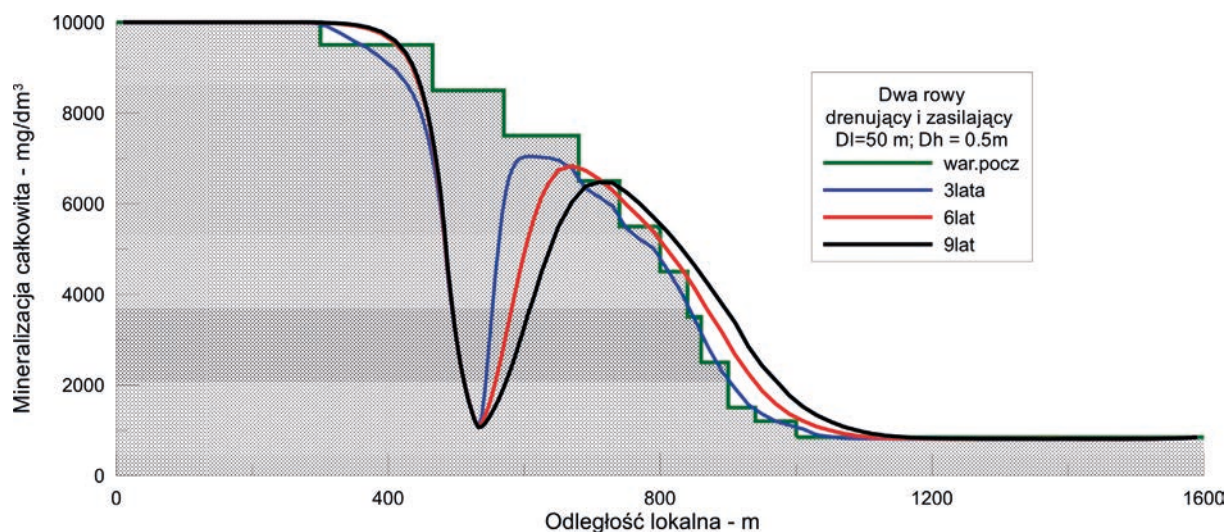
Rys. 13. Wyniki obliczeń dla dwóch rowów drenującego i zasilającego K_f wariant 1



Rys. 14. Mapa poziomów piezometrycznych $Q = 90 \text{ m}^3/\text{dobę}$, $B = 160 \text{ m}$



Rys. 15. Mapa poziomów piezometrycznych dla dwóch rowów, rozstaw rowów $\Delta L = 50$ m; różnica poziomów $\Delta H = 0,5$ m



Rys. 16. Wyniki obliczeń jako zmiana mineralizacji w przestrzeni, w wybranych czasach prognozy, dla dwóch rowów drenującego i zasilającego K_f , wariant 2, rozstaw rowów $\Delta L = 50$ m; różnica poziomów $\Delta H = 0,5$ m

Generalnie wyniki obliczeń na modelu interpretacyjnym wykazały małą skuteczność bariery drenażu pionowego i drenażu kombinowanego na ograniczenie migracji wód słonych na przedpolu składowiska (rys. 12). Natomiast lokalny wododział, w postaci dwóch rowów drenującego i zasilającego, wykazał skuteczne ograniczenie migracji wód słonych (rys. 13).

Opracowane mapy poziomów piezometrycznych dla każdego rozwiązania w przypadku studni z rowem drenującym (rys. 14) lub bez rowu pokazują, że zawsze pojawia się przepływ wody zasolonej, od strony składowiska poza linię studni, w kierunku na przedpole.

Natomiast w przypadku lokalnego wododziału mapy wskazują na zatrzymanie strumienia wody ze składowiska i odpływ wody słodkiej z rowu zasilającego na przedpole (rys 15 i 16)

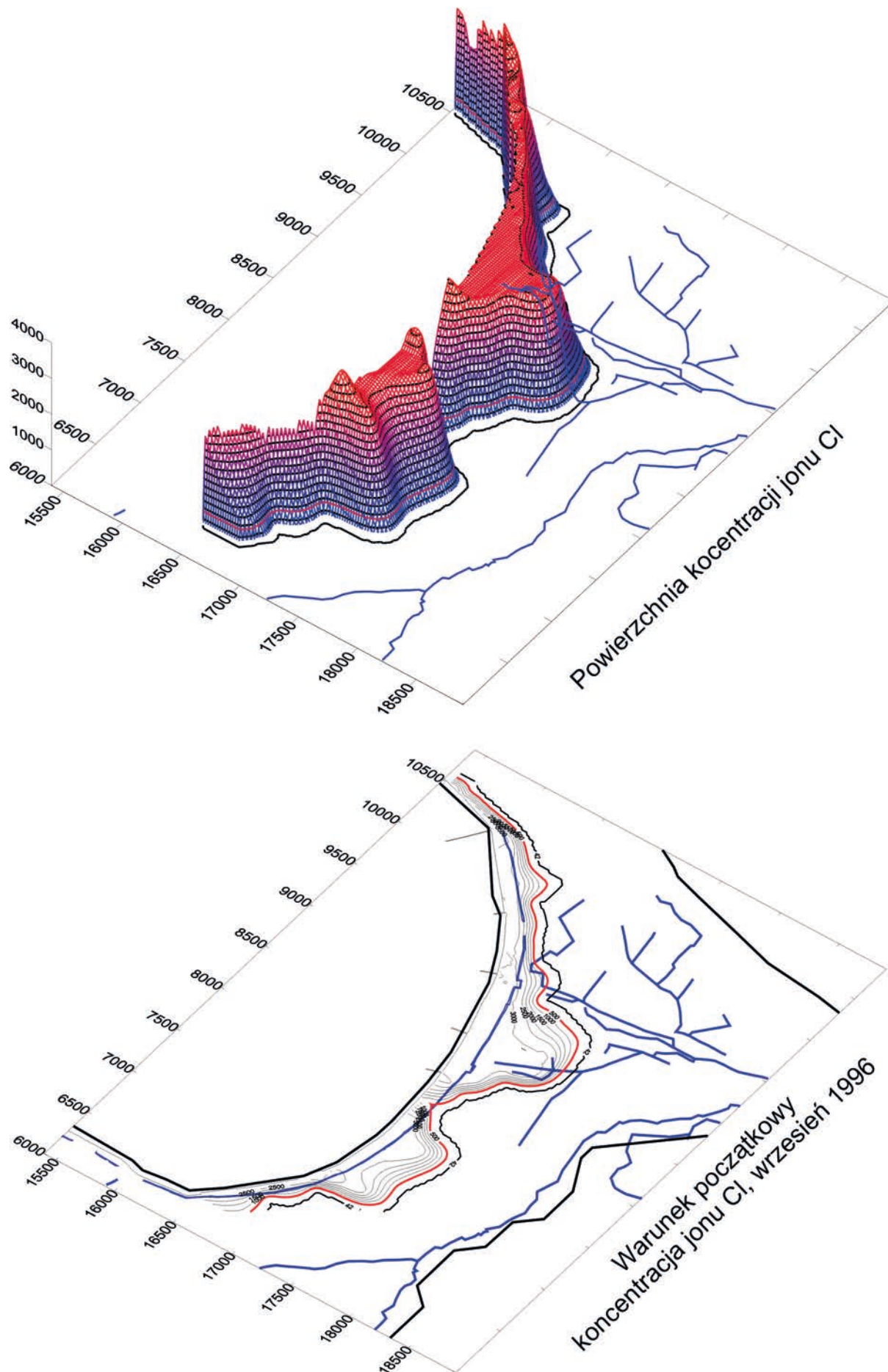
Etap III – Lokalny wododział na przedpolu składowiska Żelazny Most

Przedstawione wyniki badań numerycznych na modelu interpretacyjnym wykazały bardzo dużą skuteczność lokalnego wododziału, który spowodował powstanie stałego frontu kon-

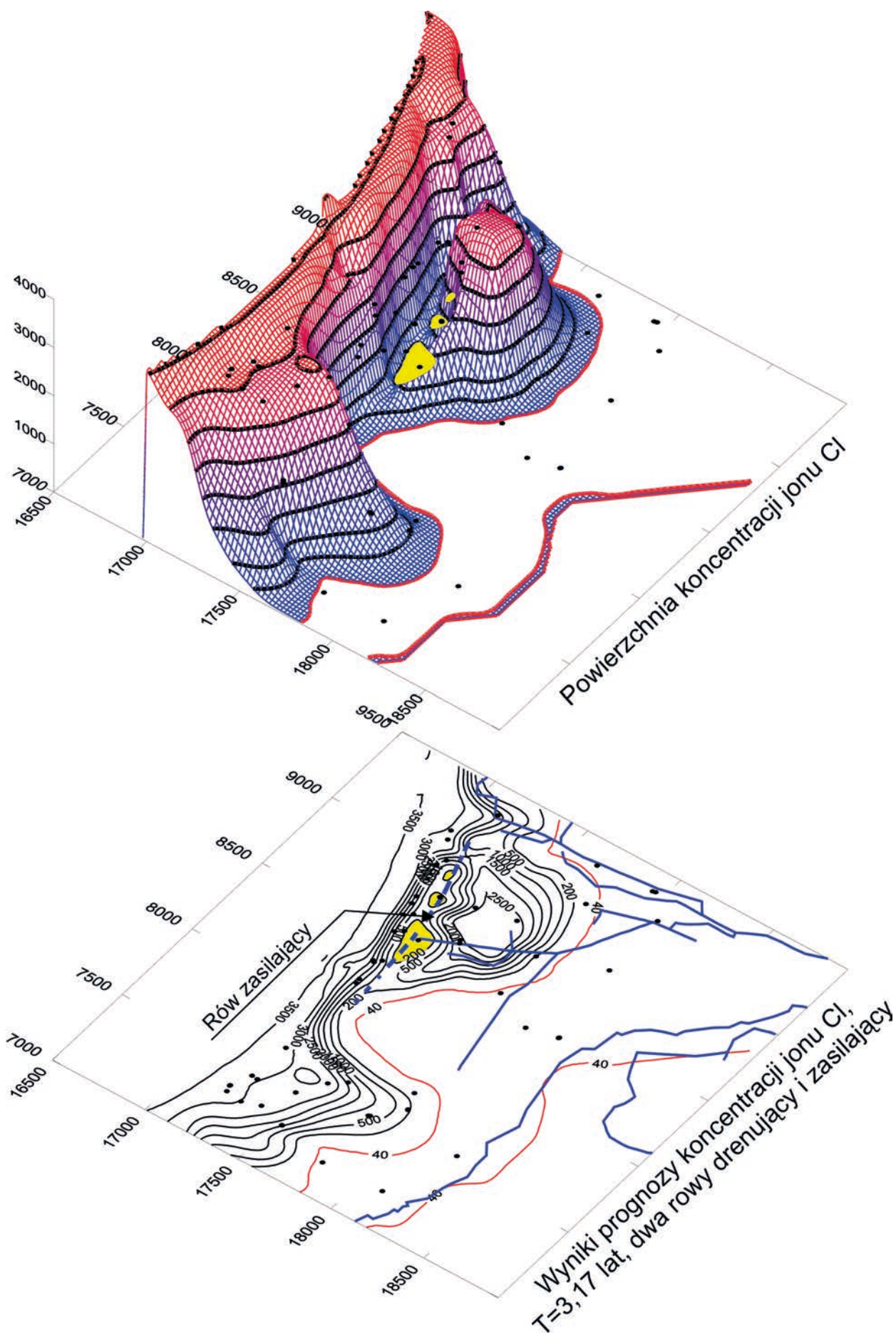
centracji między składowiskiem i rowami: drenującym oraz zasilającym, a także przesuwanie się „plamy” wód zasolonych na przedpole, poza lokalny wododział.

W związku z tym dokonano uogólnienia sposobu ograniczania migracji wód zasolonych za pomocą sztucznego wododziału, na odcinku 1100 m przedpola zapory wschodniej składowiska Żelazny Most, na którym dotychczas działa bariera studni drenażowych oraz rów opaskowy u podnóża zapory. Analizy były poprzedzone zweryfikowaniem wyników z modelu numerycznego przepływu wód gruntowych z wynikami obserwacji piezometrycznych dla określonego stanu.

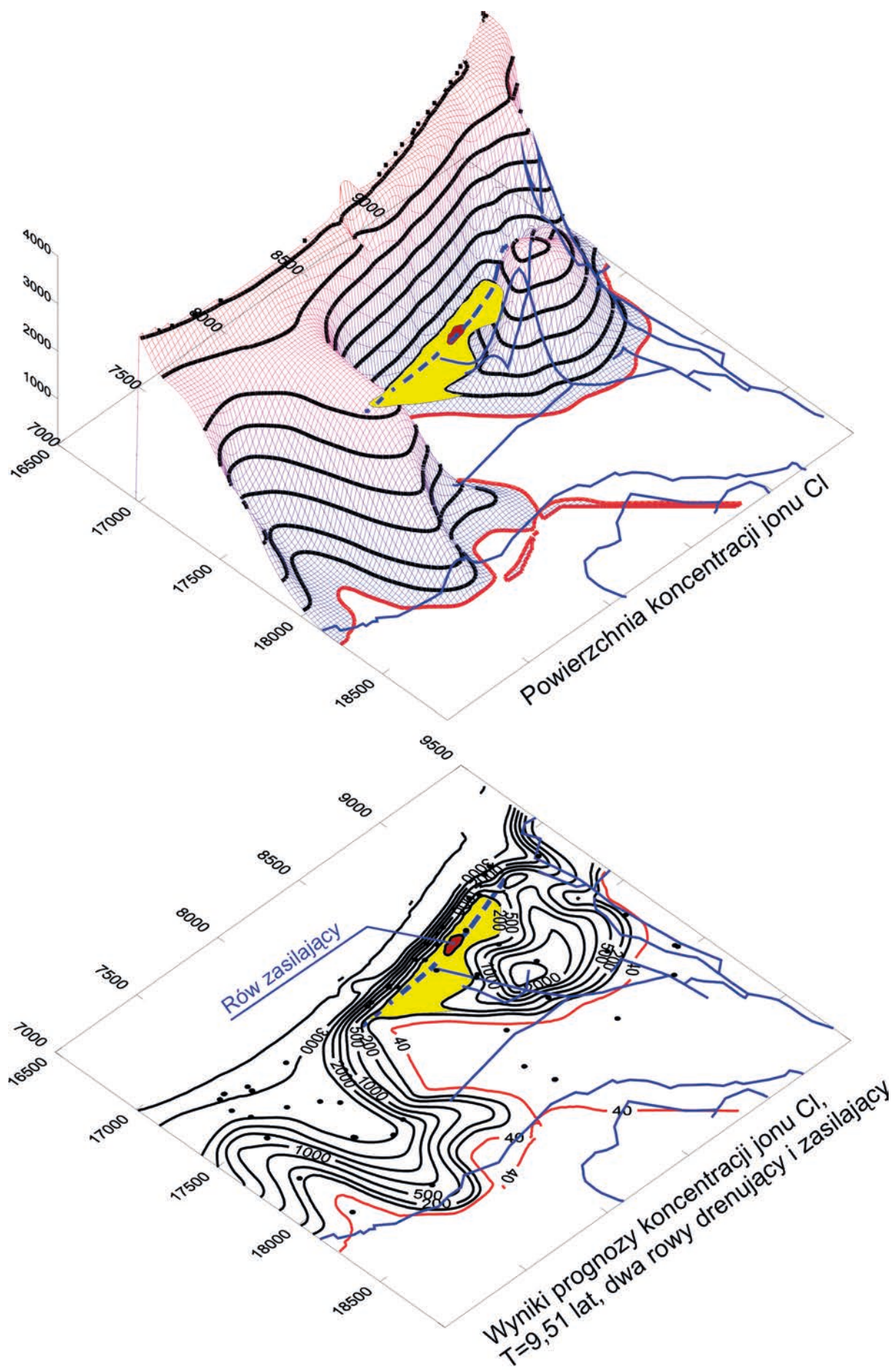
W przypadku lokalnego wododziału wyniki prognozy pokazano na rys. 17 ÷ 19. Włączenie drugiego rowu zasilającego, w warunkach stanu początkowego, pokazuje efekty zatrzymania frontu wód słonych między rowem zasilającym i składowiskiem. W rejonie rowu zasilającego, po okresie prognozy $t = 3,17$ lat, ($1,0 \cdot 10^8$ s) pojawia się obszar o koncentracji jonu Cl poniżej wartości $C = 200$ mg/dm³ (rys. 18). Natomiast po okresie $t = 9,51$ lat ($3,0 \cdot 10^8$ s) ten sam obszar koncentracji jonu chloru poniżej wartości 200 mg/dm³ jest znacznie większy – rys. 19, a na przedpolu następuje zmniejszenie się plamy zanieczyszczeń.



Rys. 17. Mapa przedpola zapory wschodniej, warunek początkowy koncentracji jonów Cl^- , IX 1996 roku, wizualizacja 3D



Rys. 18. Wyniki prognozy dla dwóch rowów: drenującego i zasilającego, czas $T = 3,17$ lat ($1,0 \cdot 10^8$ s)



Rys. 19. Wyniki prognozy dla dwóch rowów: drenującego i zasilającego, czas $T = 9,51$ lat ($3,0 \cdot 10^8$ s)

W wyniku przeprowadzonych analiz numerycznych pięciu wybranych sposobów migracji wód zasolonych na zbudowanym modelu interpretacyjnym w oparciu o rzeczywiste hydrogeologiczne warunki obiektu badawczego, którym jest przedpole zapory wschodniej składowiska odpadów poftotacyjnych Żelazny Most, stwierdzono:

Małą skuteczność trzech różnych kombinacji drenażu w postaci bariery studni pionowych i istniejącego rowu drenującego, w przypadku których mineralizacja ulega zmniejszeniu w przedziale od 8,5% do 69,4% wartości początkowej przyjętej w modelu, w zależności od wydajności studni i ich rozstawu. Należy jednakże zastrzec, że górna granica tego przedziału dotycząca wyłącznie przypadku rozwiązania studni drenażu pionowego z dużym wydatkiem i małym rozstawem współpracującej z rowem opaskowym jest znacznie zawyżona, co wynika z ograniczeń modelu interpretacyjnego.

Istotne zmniejszenie mineralizacji wód gruntowych w przypadku zastosowania lokalnego wododziału w postaci dwóch rowów zasilającego i drenującego lub ich przegłębienia za pomocą studni chłonnych. W tych przypadkach zmniejszenie mineralizacji zawiera się w przedziale od 63,2% do 91,2%. W przypadku lokalnego wododziału wyniki obliczeń numerycznych nie są zależne od ograniczenia szerokości modelu interpretacyjnego.

Małą skuteczność rozwiązania studni drenażu pionowego i drenującego rowu opaskowego zastosowanego na przedpolu zapory wschodniej udokumentowano wynikami obserwacji poziomów piezometrycznych i badań hydrochemicznych. Analiza wspomnianych wyników wykazała, że nie zachodzi związek pomiędzy zmniejszeniem się mineralizacji wód gruntowych a pracą zespołu studni drenażu pionowego. W piezometrach, które są położone najbliżej rowu opaskowego i studni drenażu pionowego, mineralizacja całkowita wód gruntowych osiąga wartości od około 7000 mg/dm³ do 14000 mg/dm³. Zmniejszenie zawartości soli w okresie 5 lat pracy studni wynosi od 5,0% do 15,0% wartości początkowej w analizowanym okresie. Równocześnie w piezometrach oddalonych od studni i rowu opaskowego, w kierunku na przedpole składowiska, widać wyraźny, niekorzystny wzrost zawartości soli w wodach gruntowych w porównaniu do wartości początkowej.

Zgodnie z wynikami obliczeń numerycznych i obserwacji terenowych mała skuteczność istniejącego rozwiązania drenażu pionowego i drenującego rowu opaskowego spowodowana jest występującymi strefami opływu wód zasolonych wokół studni, co wskazuje na ich ograniczone oddziaływanie pomimo dużych wydajności studni.

W przypadku zastosowania lokalnego wododziału jednoznaczność uzyskanych wyników na modelu interpretacyjnym udokumentowano obliczeniami numerycznymi na quasi trójwymiarowym modelu przedpola zapory wschodniej. Analiza wyników obliczeń pozwoliła zaobserwować powstanie stałego, niezmiennego w czasie, progu mineralizacji wód gruntowych pomiędzy rowem zasilającym a zaporą oraz przemieszczanie się frontu wód zasolonych na przedpole. W tym przypadku, już po dwóch latach obserwuje się zmniejszenie zawartości soli o 96,6% lub o 87,0% wartości początkowej przyjętej w modelu.

Natomiast zmniejszenie zawartości soli do podobnych wartości, w punktach obserwacyjnych bardziej oddalonych, można oczekiwać dopiero po sześciu lub dziewięciu latach.

Jak wykazały analizy numeryczne obie wersje lokalnego wododziału, to jest dwóch rowów zasilającego i drenującego lub ich przegłębienia za pomocą studni charakteryzują się podobną skutecznością w ograniczaniu migracji wód zasolonych na przedpole składowiska. Zastosowanie jednej z wersji zależy od lokalnych warunków morfologicznych terenu i warunków hydrogeologicznych. W określonych warunkach może to być kombinacja obu wersji.

Praktyczne szerokie zastosowanie lokalnego wododziału w warunkach składowiska Żelazny Most powinno być poprzedzone wykonaniem odcinka próbnego.

Zastosowanie lokalnego wododziału nie wymaga w porównaniu ze studniami drenażu pionowego wysokich kosztów eksploatacji, to jest kosztów stałego pompowania studni.

Wykorzystane w pracy narzędzia do obliczeń numerycznych, w postaci pakietu programów VisualModflow i MT3D'96, zweryfikowano pozytywnie, biorąc za podstawę trzy różne zagadnienia: jedno i dwuwymiarowe oraz osiowo symetryczne, dla których znane są literaturowe rozwiązania analityczne transportu wód zasolonych.

LITERATURA

1. Duda R., Witczak S.: Stały model hydrogeologiczny rejonu zbiornika Żelazny Most jako podstawowe narzędzie do oceny oddziaływania na środowisko i sposobów ochrony wód podziemnych. Współczesne problemy hydrogeologii, tom VI, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław 1993.
2. Harbaugh A. W., McDonald J. M.: User's Documentation For MODFLOW-96, AN Update To The U. S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey - Report 96-485, 1996.
3. Kleczkowski A. S., praca zbiorowa, Ochrona Wód Podziemnych, Instytut Geologiczny, 1984.
4. McDonald J. M., Harbaugh A. W.: A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model. Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 6, 1988.
5. Piestrzyński A., redakcja i edycja, praca zbiorowa: Monografia KGHM Polska Miedź, Cz. V. Składowisko odpadów Żelazny Most, Lubin 1996.
6. Van Genuchten M. Th. and Alves W. J.: 1982. Analytical solutions of the one-dimensional convective – dispersive solute transport equation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No.1661.
7. VISUAL MODFLOW: The Fully Integrated Three Dimensional, Graphical Modelling Environment For Professional Groundwater Flow And Contaminant Transport Modelling, User's Manual, 1999 – Waterloo Hydrogeologic Inc. Canada,.
8. Zheng C.: MT3D'96 – A modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems, Documentation and Guide. S.S. Papadopoulos & Associates, Inc., 1996.
9. Zheng C.: New solution and model for evaluation of groundwater pollution control. Ph.D. Dissertation, Univ. of Wisconsin – Madison, 1988.