

Wykorzystanie modelu numerycznego do oceny skuteczności działania drenaży, ograniczających transport zanieczyszczeń w wodach podziemnych

Zbigniew Maruszewski
DAMARIS INVESTMENTS Ltd., Nikozja, Cypr

Bogumił Dembski
Geostab Sp. z o.o., Gdańsk

1. Wprowadzenie

Jednym z efektów ubocznych działalności zakładów przemysłowych jest zanieczyszczanie środowiska wodno-gruntowego. Przedostające się do gruntu zanieczyszczenia wchodzą w reakcje ze szkieletem gruntowym oraz z wodami podziemnymi, a następnie transportowane są wraz ze strumieniem wód podziemnych zasilając wody powierzchniowe. Umiejętność określenia zasad rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w wodach podziemnych jest istotna zwłaszcza z punktu widzenia monitoringu jakości i ochrony wód, zarówno podziemnych jak i powierzchniowych, przeznaczonych do ujęcia, zwłaszcza jako wodę do picia lub wodę do celów gospodarczych.

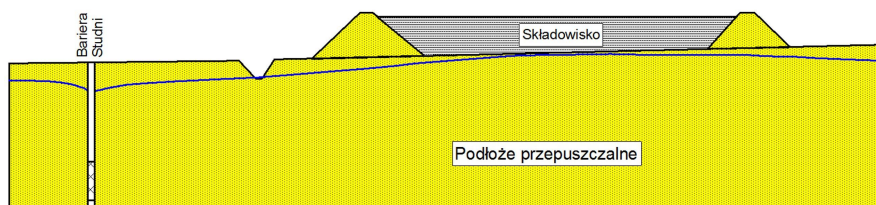
Celem niniejszej pracy jest zbadanie, na podstawie numerycznych badań modelowych, skuteczności wybranych sposobów ograniczenia transportu określonych grup zanieczyszczeń w wodach podziemnych, ze szczególnym uwzględnieniem zanieczyszczeń pochodzących ze składowiska odpadów przemysłowych i oczyszczalni ścieków – poletek odciekowych osadów ściekowych – na przykładzie zakładu papierniczego. Ze względów formalnych nazwa tego zakładu nie może być ujawniona. Zakład ten powstał na początku lat 60-tych ubiegłego stulecia, kiedy to zagadnienia negatywnego oddziaływania zakładów produkcyjnych na środowisko naturalne nie były traktowane priorytetowo. Dopiero po prywatyzacji zakładu w latach 90-tych nowy właściciel

położył nacisk na zmniejszenie i likwidację zanieczyszczenia środowiska na skutek działalności produkcyjnej. Między innymi w tym celu założona została sieć piezometrów na terenie zakładu i w jego okolicy do monitorowania zanieczyszczeń wód podziemnych i powierzchniowych [16,17,18].

Do oceny procesów migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych wybrano chlorki i suchą pozostałość, które często stosowane są w tego rodzaju badaniach.

2. Wybór sposobu ograniczenia transportu zanieczyszczeń

Spośród wielu sposobów ograniczenia transportu zanieczyszczeń w wodach podziemnych, najczęściej spotyka się drenaż pionowy w postaci bariery studni. Polega on na tym, że na przedpolu w kierunku zgodnym z przepływem strumienia wód podziemnych wykonuje się barierę ze studni pompowych. Poprzez pompowanie wód podziemnych zawierających zanieczyszczenia wypływające ze źródła skażeń, na przykład spod składowiska, uniemożliwia się wydostawanie tych zanieczyszczeń na przedpole poza obręb bariery. Wykonanie takiej bariery musi uwzględniać warunki hydrogeologiczne panujące na danym obszarze. W zależności od wielkości ładunku zanieczyszczeń wody z pompowania mogą być zawracane do procesu technologicznego, oczyszczane lub zrzucane z powrotem na składowisko.

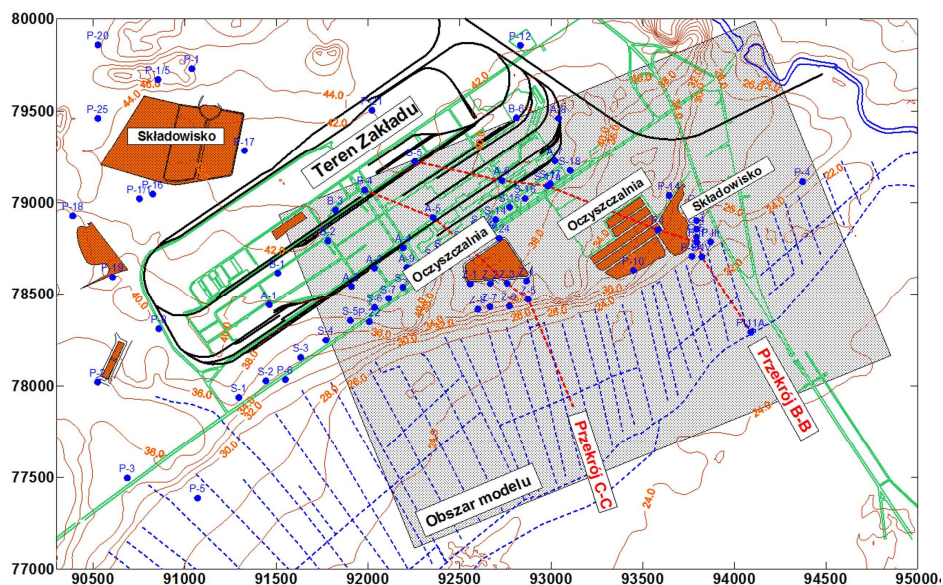


Rys. 1. Schemat drenażu pionowego w postaci bariery studni pompowych
Fig. 1. Diagram of drainage barrier of pumping wells

3. Hydrogeologiczny model numeryczny obszaru badań

Na podstawie analizy występowania i przebiegu w czasie, zanieczyszczeń wód podziemnych, stwierdzono występowanie dwóch głównych źródeł zanieczyszczeń wód podziemnych w obszarze badań: jednym jest oczyszczalnia ścieków – poletka odciekowe osadów ściekowych, drugim zaś nieczynne składowisko odpadów przemysłowych. Analiza pomiarów i obserwacji chemizmu wód podziemnych wykazuje, iż obszar zainteresowania można ograniczyć do zasadniczych stref źródeł zagrożenia, przez które przebiegają dwa założone przekroje hydrogeochemiczne: przekrój B-B, gdzie

źródłem zanieczyszczeń jest składowisko pomiędzy piezometrami P-I i P-II oraz przekrój C-C z ogniskiem zanieczyszczeń w postaci oczyszczalni ścieków pomiędzy piezometrami S-12 i Z-2. Obszar badań numerycznych ograniczono do wycinka o wymiarach 2800 m x 2000 m. Na rysunku 2 pokazano mapę powierzchni terenu zakładu wraz z przebiegiem przekrojów B-B i C-C oraz siecią piezometrów.



Rys. 2. Mapa powierzchni terenu zakładu, oczyszczalni ścieków, składowiska, położenia piezometrów i przekrojów B-B i C-C oraz obszaru modelu numerycznego VisualModflow

Fig. 2. Map of plant area; wastewater treatment plant; industrial waste landfill; location of observation wells; cross sections B-B, C-C and the area of numerical model Visual Modflow

Informacje te stały się podstawą do budowy hydrogeologicznego modelu numerycznego wybranego obszaru dla opisu zagadnienia przepływu wód gruntowych oraz modelowania transportu zanieczyszczeń w wodach podziemnych [1,7,8,13,14]. Model hydrogeologiczny obszaru zakładu został opracowany w postaci map cyfrowych przydatnych do wykorzystania przez pakiet Visual Modflow. Mapy te obejmują:

- powierzchnię terenu z systemem rowów melioracyjnych, zarysem infrastruktury zakładu, w szczególności źródeł skażenia, na podstawie map topograficznych w skali 1 : 10.000,

- powierzchnię swobodnego zwierciadła wody podziemnej oraz zanieczyszczenia gruntów w oparciu o badania z lat 1996÷2001,
- powierzchnię spągu utworów czwartorzędowych na podstawie danych z map geologicznych,
- powierzchnię izolacji współczynników wodoprzepuszczalności utworów czwartorzędowych na podstawie danych dokumentacyjnych z wierceń sieci piezometrów na obszarze badań.

4. Weryfikacja numerycznego modelu hydrogeologicznego

Bardzo ważnym etapem weryfikacji modelu numerycznego przepływu wód podziemnych było odwzorowanie rzeczywistego poziomu wód podziemnych na podstawie pomiarów i obserwacji z położeniem obliczeniowego zwierciadła wód gruntowych. W tym przypadku przyjęto, że stanem wyjściowym był stan według danych dla 2001 roku [15,16,17,18]. Jako kryterium poprawności przyjęto, iż dla założonych parametrów do modelu numerycznego przepływu wód gruntowych, różnice pomiędzy poziomem wody w modelu numerycznym a stanem rzeczywistym z pomiarów piezometrycznych są mniejsze niż $\pm 1,0$ m (rys. 4). Weryfikacja modelu numerycznego wymagała wielu prób obliczeniowych, ponieważ rozpoznanie właściwości filtracyjnych rzeczywistego ośrodka gruntowego oraz warunki zasilania warstwy wodonośnej są obarczone błędami i trudne do określenia. W obliczeniach rozważony został wpływ właściwości filtracyjnych utworów czwartorzędowych na obszarze objętym modelowaniem numerycznym. W tabeli 1 przedstawiono warianty, w których zmieniano właściwości filtracyjne utworów czwartorzędowych:

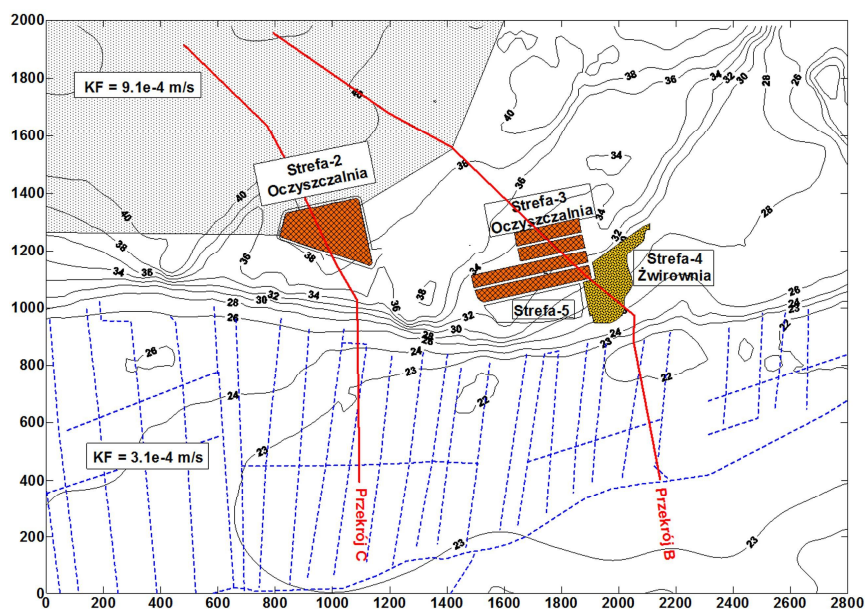
- na podstawie mapy izolacji współczynników wodoprzepuszczalności zmodyfikowanych przez pominięcie wartości współczynnika KF dla otworów P-2 oraz P-10,
- jako strefową zmianę wartości współczynników wodoprzepuszczalności w przedziale od $3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s do $9,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, (rys. 3).

W obliczeniach weryfikacyjnych rozpatrywano również wariantowo sposoby zasilania modelu przepływu wód gruntowych, z poszczególnych stref oczyszczalni ścieków i składowiska odpadów, jako stały poziom piezometryczny lub założonego strumienia infiltracji. Wyniki obliczeń weryfikacyjnych, przykładowo dla wybranego wariantu obliczeniowego, pokazano w postaci graficznej jako mapę różnicową między poziomem zwierciadła wody według założonego stanu wyjściowego z obserwacji piezometrycznych a obliczeniowym zwierciadłem wody z modelu numerycznego Visual Modflow dla przepływu wód podziemnych. Warunki brzegowe zostały przyjęte zgodnie z mapą poziomu zwierciadła wody podziemnej oraz mapą powierzchni terenu szcze-

gólnie w rejonie rowów melioracyjnych na tarasie odbiornika – rzeki [15,16,17,18]. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń weryfikacyjnych numerycznego modelu przepływu wód podziemnych stwierdzono, że zasilanie powierzchniowe z opadów wynosiło $q_{inf} = 100$ mm/rok lub 200 mm/rok i nie miało istotnego wpływu na obliczeniowe poziomy piezometryczne. Analiza właściwości filtracyjnych pozwoliła na przyjęcie uproszczonego schematu zmiany właściwości filtracyjnych to jest w postaci strefowej zmiany współczynnika wodoprzepuszczalności w zależności od wartości $KF = 3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s do $KF = 9,1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Największą zgodność pomiędzy poziomem zwierciadła wody podziemnej według założonego stanu wyjściowego a obliczeniowym zwierciadłem wody w różnych wariantach symulacji numerycznych wykazały wyniki z wariantu 7 lub wariantu 8, dla zasilania (vide tabela 1):

- w strefie #2 $q_{strefy} = 40000$ mm/rok
- oraz
- w strefie #3 $q_{strefy} = 8000$ mm/rok

gdzie różnice poziomów wody wynosiły od $-1,0$ m do $+1,0$ m. Dalsze badania prowadzono zatem w oparciu o wariant 8 zasilania.



Rys. 3. Obszar modelowania numerycznego – lokalizacja źródeł skażenia oraz strefy współczynnika wodoprzepuszczalności

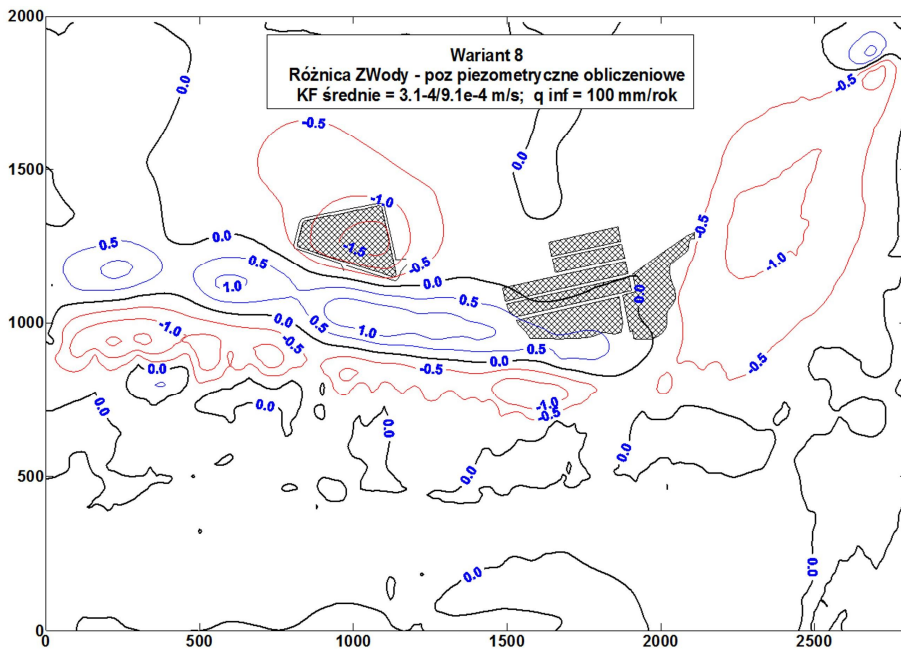
Fig. 3. Numerical modelling area: situation of the pollution sources and permeability coefficient zones

Wyniki tych analiz stanowiły podstawę do budowy modelu transportu zanieczyszczeń z założeniem wariantowych rozwiązań ograniczających migrację wybranych grup zanieczyszczeń w wodach podziemnych [1,3,12,13,14].

Tabela 1. Warianty zasilania powierzchniowego i właściwości filtracyjnych warstwy wodonośnej w obliczeniach weryfikacyjnych numerycznego przepływu wód podziemnych

Table 1. Variants of infiltration from surface and filtration properties of the aquifer in the numerical verification of the ground water flow

| Współczynniki wodoprzepuszczalności | Warianty zasilania powierzchniowego | |
|--|---|--|
| | $q_{inf} = 100 \text{ mm/rok}$ | $q_{inf} = 200 \text{ mm/rok}$ |
| Bez zasilania z oczyszczalni | | |
| $K_F \text{ wg. mapy}$ | wariant 1 | wariant 2 |
| Zasilanie z oczyszczalni jako zadany poziom piezometryczny - H_{strefy} | | |
| $K_F \text{ wg. mapy}$ | wariant 1 + zasilanie | wariant 2 + zasilanie |
| $K_F \text{ \acute{s}redn} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ | wariant 3 - jednorodny | wariant 4 - jednorodny |
| $K_F \text{ strefy} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ $K_F \text{ strefy} = 9,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ | wariant 3 + strefy K_F | wariant 4 + strefy K_F |
| Zasilanie z oczyszczalni zadane jako strumień ze strefy $q_{strefy} = \text{const}$ | | |
| $K_F \text{ strefy} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ $K_F \text{ strefy} = 9,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ | wariant 5= wariant 3 + $q_{strefy} = 20000 \text{ mm/rok}$ | wariant 6 = wariant 4 + $q_{strefy} = 30000 \text{ mm/rok}$ |
| Zasilanie z oczyszczalni jako zadany strumień zmienny | | |
| wariant 7; q_{strefy} zmienne | | |
| $K_F \text{ strefy} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ $K_F \text{ strefy} = 9,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ | #2 = 40000 mm/rok #3 = 10000 mm/rok #4 = 5000 mm/rok #5 = 100 mm/rok | |
| wariant 8; q_{strefy} zmienne | | |
| $K_F \text{ strefy} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ $K_F \text{ strefy} = 9,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ | #2 = 45000 mm/rok #3 = 8000 mm/rok #4 = 4000 mm/rok #5 = 100 mm/rok | |



Rys. 4. Różnice poziomu zwierciadła wody – wariant 8 dla $K_F=3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s oraz $9,1 \cdot 10^{-4}$ m/s

Fig. 4. Differences between observed and calculated water table; variant 8, for $K_F=3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s and $K_F=9,1 \cdot 10^{-4}$ m/s

5. Analizy numeryczne transportu zanieczyszczeń

Do analiz numerycznych transportu zanieczyszczeń w wybranym obszarze badań, w wodach podziemnych oraz prognozy rozwoju sytuacji, zastosowano pakiet obliczeniowy VisualModflow i MT3D [4,5,6]. Jako barierę ograniczającą rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w wodach podziemnych przyjęto drenaż pionowy w postaci bariery studni pompowych [2,9,10].

Na podstawie wyników pomiarów zawartości jonów chlorkowych i suchej pozostałości w przekrojach B-B oraz C-C, wykonano obwiednię tych pomiarów dla okresu od 1991r. do 2001r. Obwiednię zastąpiono funkcją schodkową jako zadane warunki brzegowe w tych przekrojach. Na rys. 5 pokazano „skokową” zmianę koncentracji suchej pozostałości, która w analizach numerycznych traktowana była jako nieaktywna, to znaczy nie ulegała znaczącej sorpcji lub desorpcji między fazą ciekłą i szkieletem gruntowym.

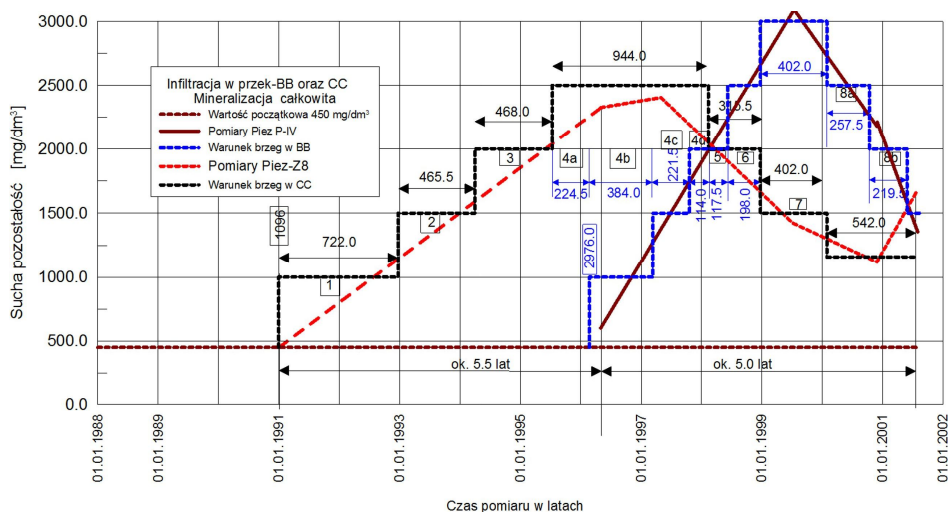
Weryfikacja obliczeniowego poziomu wód gruntowych pokazała, iż dobrą zgodność uzyskuje się z wynikami z mapy hydroizohips przedstawionej w dokumentacji POLGEOL [15, 16], dla strumienia infiltracji z przedziału od:

$$q_{2 \text{ strefy}} = 40000 \text{ mm/rok do } 45000 \text{ mm/rok}$$

oraz dla $q_{3 \text{ strefy}} = 8000 \text{ mm/rok}$

Pierwszy etap modelowania obejmował okres około 7,12 lat tj. 2600 dób od 1.01.1991 roku do 13.02.1998 roku, czyli zmiany warunków brzegowych w okresach od 1 do 4d, pokazanych graficznie na rysunku 5 oraz w tabeli 2. Celem tego etapu obliczeń było uzyskanie stanu zawartości suchej pozostałości po okresie ponad 7 lat procesu zanieczyszczania warstwy wodonośnej jako stanu wyjściowego do następnego okresu symulacji, w którym włączona została bariera studni. Rozpatrzono dwa warianty lokalizacji bariery studni pompowych, co pozwoliło ocenić wpływ lokalizacji studni na efekt działania bariery:

- studnie bliskie – w odległości około 40÷50 m od źródła skażenia w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu wód podziemnych,
- studnie dalekie – w odległości około 220÷230 m od źródła skażenia w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu wód podziemnych.



Rys. 5. Zmiana warunków brzegowych w strefach infiltracji zanieczyszczeń z obszaru składowiska i oczyszczalni w przekrojach B-B oraz C-C

Fig. 5. Variation of boundary conditions for infiltration zones from the pollution sources: wastewater treatment plant and industrial waste landfill, in cross sections B-B and C-C

Tabela 2. Zestawienie czasów symulacji oraz warunki brzegowe na obrysie składowiska i oczyszczalni bez pracy bariery studni

Table 2. Simulation times and boundary conditions for the zones of pollution sources: wastewater treatment plant and industrial waste landfill without wells barrier

| Warunek początkowy | | Przekrój B-B | Przekrój C-C |
|--------------------|--------------|--|--------------------------|
| | | 450,0 mg/dm ³ | 450,0 mg/dm ³ |
| Okres symulacji | Czas trwania | Warunek brzegowy [mg/dm ³] | |
| | [doby] | Przekrój B-B | Przekrój C-C |
| 1 | 7220 | 450 | 1000 |
| 2 | 4655 | 450 | 1500 |
| 3 | 4680 | 450 | 2000 |
| 4 | a | 450 | 2500 |
| | b | 1000 | 2500 |
| | c | 1500 | 2500 |
| | d | 2000 | 2500 |

Następny okres symulacji obejmował okres kolejnych 5 lat, w którym włączone zostały bariery studni. Warunkiem początkowym dla tego okresu jest wynikowy stan obliczeniowy mineralizacji dla końca okresu 4d. W obszarze oddziaływania oczyszczalni i składowiska zadane były warunki brzegowe koncentracji (przez kolejne 5 lat) zgodnie z danymi zestawionymi w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie warunków brzegowych na obrysie składowiska i oczyszczalni dla działania bariery studni przez kolejne 5 lat, po czasie t = 2600 dób (po 7,12 latach)

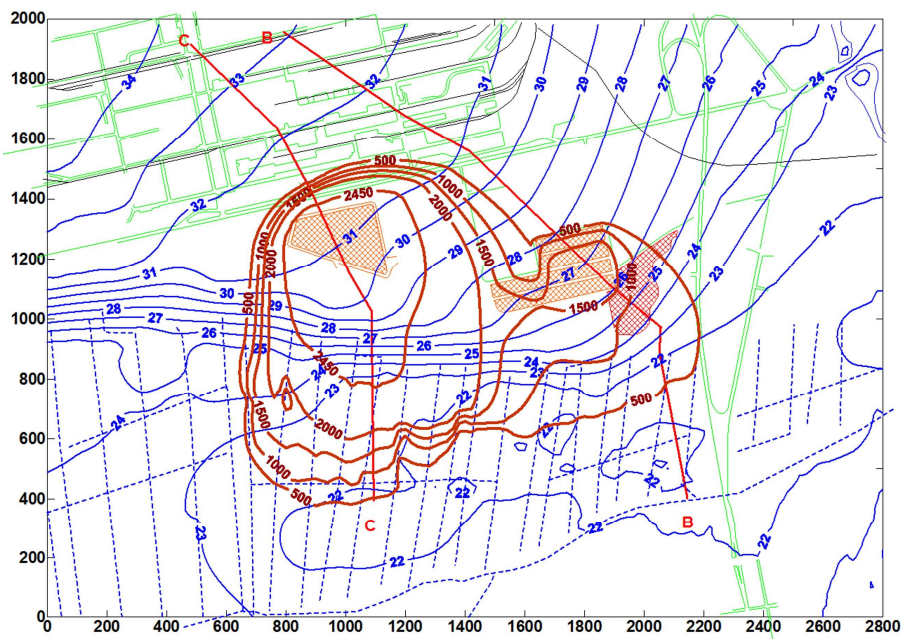
Table 3. Boundary conditions for the zones of pollution sources: wastewater treatment plant and industrial waste landfill during successive 5 years, after a period of time t=2600 days (t=7.12 years)

| Warunek początkowy | | Wyniki z okresu 4d | |
|--------------------|--------------|--|--------------|
| Praca studni | Czas trwania | Warunek brzegowy [mg/dm ³] | |
| | [doby] | Przekrój B-B | Przekrój C-C |
| | 1825 (5 lat) | 2000 | 2500 |

Dla oceny efektywności i skuteczności bariery studni zmieniane były parametry bariery w symulacjach numerycznych przy zastosowaniu pakietu obliczeniowego VisualModflow.

Wyniki symulacji i ich analiza została pokazana na zestawieniach graficznych. Wariant wyjściowy – stan odniesienia – stanowią wyniki migracji zanieczyszczeń bez uwzględnienia bariery studni, pokazane w postaci rozwoju obszaru izolinii koncentracji przedstawione na rysunku 6 dla czasu symulacji

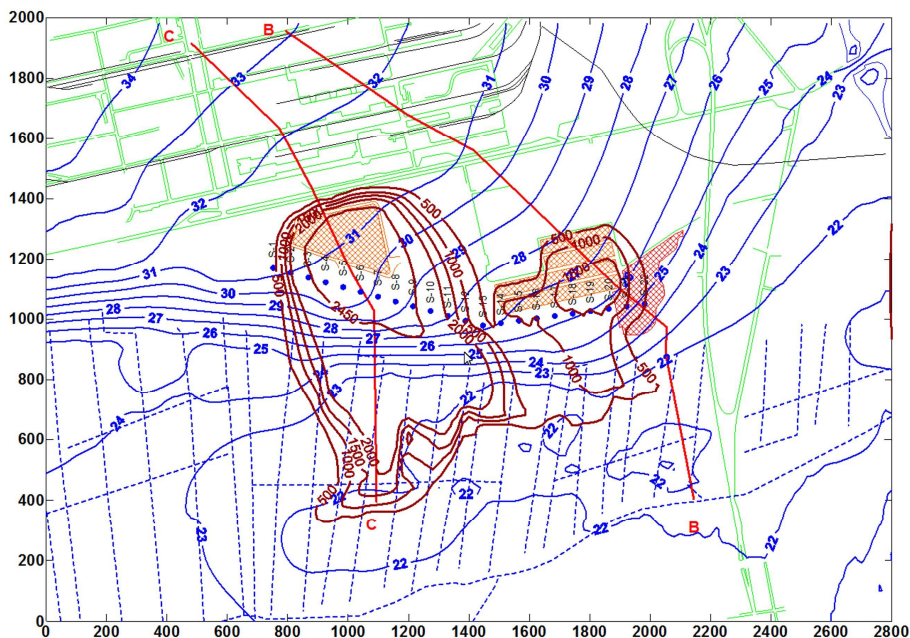
$t = 2.600$ dób (7,12 lat – koniec okresu 4d). Na rysunku widoczne są rozchodzące się izolinie stężenia zanieczyszczeń z wyraźnie widocznymi lokalnymi ogniskami zanieczyszczeń, to znaczy oczyszczalni ścieków i składowiska odpadów przemysłowych.



Rys. 6. Wynik symulacji bez uwzględnienia pracy bariery studni po okresie $T=7,12$ lat (po okresie 4d) – mapy izolinii koncentracji suchej pozostałości [mg/dm^3]
Fig. 6. Map of the total solids concentration [mg/dm^3]; results without the drainage barrier for $T = 7.12$ years (after a period of 4d)

Po upływie założonego okresu $t = 2\,600$ dób (koniec okresu 4d) została włączona do pracy bariera studni. Wyniki symulacji zostały pokazane jako rozwój i zmiany w obszarze zanieczyszczeń przez kolejne 5 lat, zakładając jako stan wyjściowy, obszar skażeń z rysunku 6 przy równoczesnym utrzymaniu zasilania ze źródeł zanieczyszczeń zgodnie z danymi zestawionymi w tabeli 3.

Na rysunku 7 pokazano przykładowo wyniki symulacji jako izolinie koncentracji dla wybranych kombinacji parametrów bariery studni, których zadaniem było ograniczenie migracji zanieczyszczeń, po czasie $t = 5$ lat działania bariery i rozstawu studni w barierze $B = 60$ m dla wariantu studni „bliskich” o wydajności $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$.

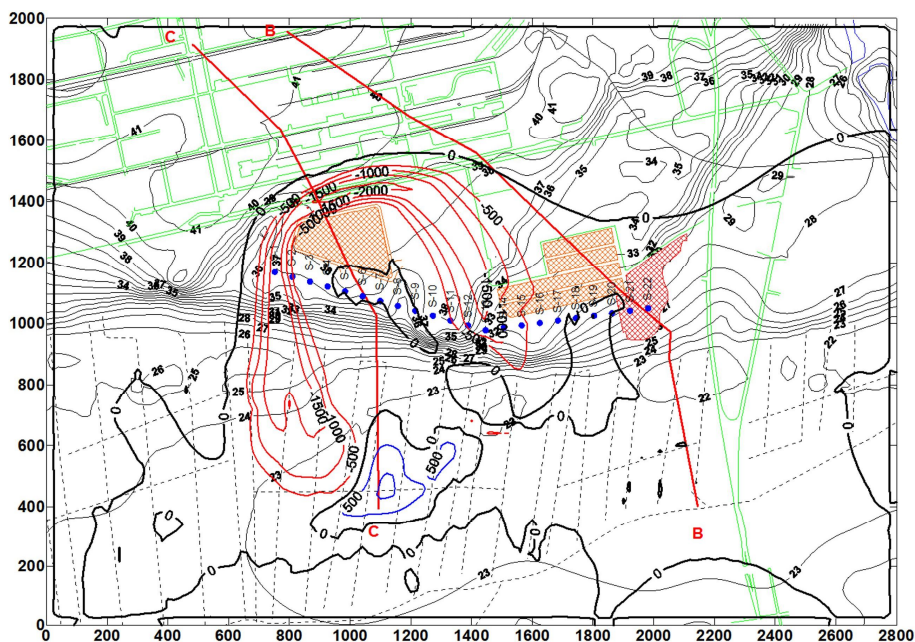


Rys. 7. Wynik symulacji dla bariery studni „bliskich“ $Q_{\text{studni}}=360 \text{ m}^3/\text{d}$ po okresie $t = 5$ lat – mapy izolinyi koncentracji suchej pozostałości $[\text{mg}/\text{dm}^3]$

Fig. 7. Map of the total solids concentration $[\text{mg}/\text{dm}^3]$; results for the drainage barrier of “close” pumping wells $Q_{\text{well}}=360 \text{ m}^3/\text{day}$ after $t = 5$ years

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowo różnice koncentracji zanieczyszczeń po 5 latach działania bariery studni „bliskich” o wydajności $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$ i rozstawie $B = 60 \text{ m}$, przy równoczesnym zasilaniu warstwy wodonośnej zanieczyszczeniami pochodzącymi z oczyszczalni i składowiska zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 3 w odniesieniu do koncentracji początkowej – założonego stanu odniesienia (rys. 6). Analizowano również wyniki symulacji dla przypadków studni „dalekich” o wydajności $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$.

Z otrzymanych wyników symulacji widoczny jest niewielki wpływ bariery studni – zarówno „bliskich” jak też „dalekich” – na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w wodach podziemnych. Nie obserwuje się wyraźnych zmian w obrazie izolinyi, jako efekt działania bariery studni „dalekich” po okresie $t = 5$ lat, przy równoczesnym zasilaniu warstwy wodonośnej zanieczyszczeniami pochodzącymi z oczyszczalni i składowiska zarówno w wypadku natężenia dopływu do studni pojedynczej $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$ jak i $Q_{\text{studni}} = 120 \text{ m}^3/\text{d}$.



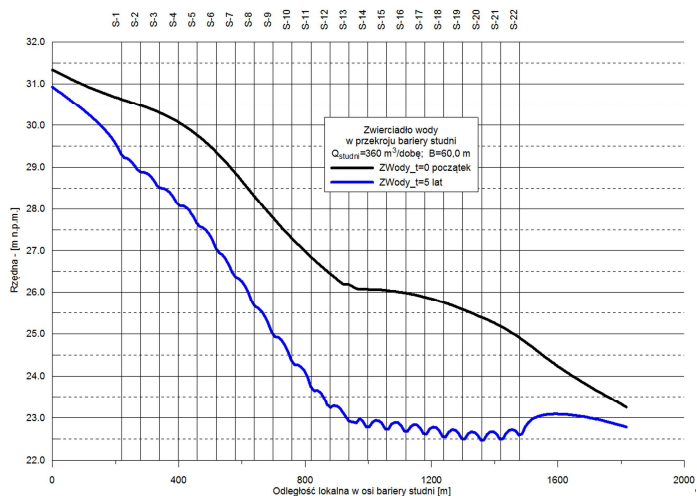
Rys. 8. Mapa izolinii różnicy koncentracji suchej pozostałości jako wynik symulacji dla bariery studni “bliskich” $Q_{\text{studni}}=360 \text{ m}^3/\text{d}$ po okresie $t = 5$ lat, w odniesieniu do stanu początkowego według rysunku 6 [mg/dm^3]

Fig. 8. Map of the total solids concentration differences [mg/dm^3]; results for the drainage barrier of “close” pumping wells $Q_{\text{well}}=360 \text{ m}^3/\text{day}$ after $t = 5$ years compared with the initial condition shown in fig. 6

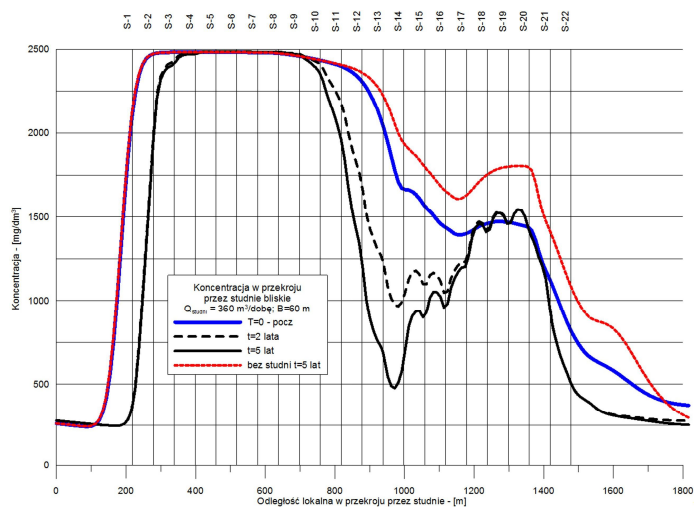
Na rysunkach 9, 10 i 11 pokazany jest wpływ działania bariery studni na położenie zwierciadła wody podziemnej oraz na zmianę koncentracji wybranej grupy zanieczyszczeń – suchej pozostałości w przekrojach:

- przez studnie (w osi studni),
- równoległym do przekroju przez studnie, w odległości $\Delta L=100 \text{ m}$, w kierunku przedpola,

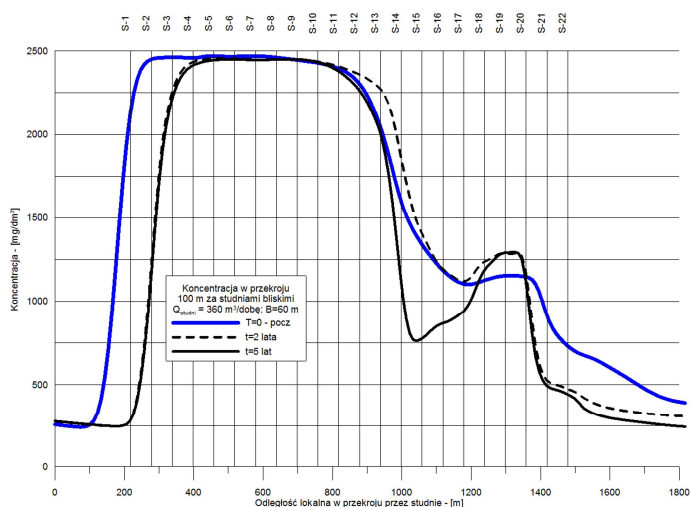
w porównaniu do stanu początkowego, jak i na poziom stężenia zanieczyszczeń (obniżenie zawartości suchej pozostałości średnio o $250 \text{ mg}/\text{dm}^3$).



Rys. 9. Położenie zwierciadła wody podziemnej w przekroju przez barierę studni “bliskich” przy wydajności $Q_{\text{studni}}=360 \text{ m}^3/\text{d}$ i rozstawie studni w barierze $B=60 \text{ m}$
Fig. 9. Water table in cross section along the drainage barrier of “close” pumping wells $Q_{\text{well}}=360 \text{ m}^3/\text{day}$ in the distance between wells of $B=60 \text{ m}$



Rys. 10. Zmiana koncentracji suchej pozostałości $[\text{mg}/\text{dm}^3]$ w przekroju przez barierę studni “bliskich” przy wydajności $Q_{\text{studni}}=360 \text{ m}^3/\text{d}$ i rozstawie studni w barierze $B=60 \text{ m}$
Fig. 10. Variation of the total solids concentration $[\text{mg}/\text{dm}^3]$ in cross section along the drainage barrier of “close” pumping wells $Q_{\text{well}}=360 \text{ m}^3/\text{day}$ in the distance between wells of $B=60 \text{ m}$



Rys. 11. Zmiana koncentracji suchej pozostałości [mg/dm^3] za barierą studni “bliskich” w przekroju $DL = 100 \text{ m}$ w kierunku na przedpole, przy wydajności $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$ i rozstawie studni w barierze $B = 60 \text{ m}$

Fig. 11. Variation of the total solids concentration [mg/dm^3] in the cross section $DL = 100 \text{ m}$ of the drainage barrier of “closely” pumping wells $Q_{\text{well}} = 360 \text{ m}^3/\text{day}$ and distance between wells of $B = 60 \text{ m}$

6. Analiza wyników obliczeń numerycznych transportu zanieczyszczeń wraz z wnioskami

W badaniach numerycznych ograniczania migracji zanieczyszczeń rozpatrzono kilka rozwiązań (tabela 4) bariery studni.

Tabela 4. Charakterystyka parametrów uwzględnionych w badaniach studni

Table 4. Parameters of pumping wells used in the numerical simulation

| Opis parametrów w badaniach bariery studni | Zakres parametrów |
|---|--|
| rozstaw studni w barierze, [m] | 60 |
| wydajność pojedynczej studni w barierze Q_{studni} , [m^3/d] | 120 lub 360 |
| odległość bariery od źródła skażenia | |
| a) studnie „bliskie” [m] | 40÷50 m |
| b) studnie „dalekie” [m] | 220÷230 m |
| liczba studni w barierze | 22 szt. lub 26 szt. |
| Czas prognozy dla działania bariery studni | $t = 5 \text{ lat}$ |
| Gęstość siatki obliczeniowej dla studni (podstawowa) | $\Delta x = \Delta y = 10,0 \text{ m}$. |

Wyniki symulacji dla wariantu studni "bliskich" $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$; $B = 60 \text{ m}$ zostały pokazane na rysunkach 7, 8, 9, 10, 11. Analiza wyników symulacji pozwala stwierdzić, że:

- Przebieg izolinii koncentracji zanieczyszczeń pokazuje znikomy wpływ działania bariery studni na ograniczenie transportu zanieczyszczeń (rys. 7). Fakt ten potwierdza mapa różnicowa (rys. 8), pomiędzy stanem początkowym i wynikiem symulacji dla $t=5$ lat. Za barierą studni dla wydajności $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$ obserwuje się zmniejszenie koncentracji o wartość od -500 do $-1000 \text{ mg}/\text{dm}^3$.
- Nie obserwuje się istotnych zmian jako efekt działania bariery studni „dalekich” lub studni "bliskich" przez okres 5 lat zarówno w wypadku natężenia dopływu do studni pojedynczej $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$ jak i $Q_{\text{studni}} = 120 \text{ m}^3/\text{d}$, w obszarze między źródłami zanieczyszczania warstwy wodonośnej a barierą.
- Położenie zwierciadła wody podziemnej w przekroju przez barierę studni o wydajności $Q_{\text{studni}} = 360 \text{ m}^3/\text{d}$ (w osi studni - rys. 9) wykazuje obniżenie zwierciadła wody od 1,50 m. do 3,20 m. W przypadku studni o wydajności $Q_{\text{studni}} = 120 \text{ m}^3/\text{d}$ efekt obniżenia zwierciadła wody jest mniejszy i wynosi od 0,6 m. do 1,0 m.
- Efekty działania bariery na zmianę koncentracji wybranej grupy zanieczyszczeń – suchej pozostałości pokazano na rysunkach 10 i 11, w przekrojach:
 - przez barierę studni (rys. 10),
 - poza barierą w kierunku na przedpole $\Delta L=100 \text{ m}$ (rys. 11).
- W porównaniu do stanu początkowego można stwierdzić niewielki wpływ oddziaływania bariery studni, czy to „bliskich“ czy też „dalekich na poziom stężenia zanieczyszczeń (obniżenie zawartości suchej pozostałości średnio o $250 \text{ mg}/\text{dm}^3$). Świadczy to o niewielkim wpływie oddziaływania założonej bariery studni przy zadanych parametrach pracy, zasilaniu strumieniem zanieczyszczeń i rozstawie na poziom zwierciadła wody podziemnej jak i na poziomu stężenia zanieczyszczeń przed i poza barierą studni.
- Wpływ bariery studni widoczny jest tylko w ograniczonym zakresie i to na odcinku krótszym niż 800 m. Poza tym nie widać istotnych zmian w przebiegu koncentracji zanieczyszczeń między stanem początkowym ($t=0$), symulacją działania bariery studni dla czasu $t=2$ lata i $t=5$ lat, oraz symulacją zanieczyszczania ośrodka bez działania bariery studni przez okres 5 lat ($t=+5$ lat).

7. Podsumowanie

W konkretnych warunkach hydrogeologicznych, przy dużych wartościach współczynników wodoprzepuszczalności warstwy wodonośnej oraz dużych natężeniach infiltracji zanieczyszczeń do podłoża gruntowego, **obliczenia numeryczne wykazały bardzo niską efektywność zastosowania drenażu pionowego w postaci bariery pompowych studni pionowych.** Należy przy tym podkreślić, iż założona wydajność całkowita bariery studni wyniosła dla obu wariantów bariery:

$$\Sigma Q_{\text{bariery}} = 26 \cdot 120 = 3\,120 \text{ m}^3/\text{d},$$

$$\Sigma Q_{\text{bariery}} = 26 \cdot 360 = 9\,360 \text{ m}^3/\text{d}.$$

Literatura

1. **Bear A.L., et al.:** *Estimating Spatial Variability Of Recharge In Southern New Jersey From Unsaturated-Zone Measurements.* U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 02-4288, West Trenton, 2003.
2. **Barton, G.J., et al.:** *Case Study for Delineating a Contributing Area to a Well in a Fractured Siliciclastic-Bedrock Aquifer Near Lansdale, Pennsylvania.* U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 02-4271, New Cumberland, 2003.
3. **Chiang W.-H.:** *3D-Groundwater Modeling with PMWIN, A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Process.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
4. **Goode D.J., et al.:** *Contamination in Fractured-Rock Aquifers – Research at former Naval Air Warfare Center, West Trenton, New Jersey.* U.S. Geological Survey Fact Sheet 2007-3074, September 2007.
5. **Goode D.J., Konikow L.F., et al.:** *A three dimensional method of characteristics solute-transport model (MOC3D).* U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96-4267, September 2007.
6. **Goode D.J.:** *Modifications to the Solute-Transport Model MOC3D for Simple Reactions, Double Porosity, and Age, with Application at Mirror Lake, New Hampshire, and Other Sites.* U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 99-4018. Charleston, March 1999.
7. **Goode D.J.:** *Simulating Contaminant Attenuation, Double-Porosity Exchange, and Water Age in Aquifers using MOC3D.* U.S. Geological Survey Fact Sheet 086-99, April 1999.
8. **Goode D.J., Senior L.A.:** *Simulation of Aquifer Tests and Ground-Water Flowpaths at the Local Scale in Fractured Shales and Sandstones of the Brunswick Group and Lokatong Formation, Lansdale, Montgomery County, Pennsylvania.* U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Open-File Report 00-97, Lemoine 2000.

9. **Harbaugh A.W., et al.:** *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process.* U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, Reston 2000.
10. **Harbaugh A.W., McDonald M.G.:** *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 Open-File Report 96-485, Virginia 1996.
11. **Heberton C.I., et al.:** *A Three-Dimensional Finite Volume Eulerian-Lagrangian Adjoint Method (ELLAM) for Solute-Transport Modeling.* U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 00-4087, Reston 2000.
12. **Kennedy C., et al.:** *Gaussian Plume Modeling of Contaminant Transport.* Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 2005.
13. **Konikow L.F., Neuzil C.E.:** *A method to estimate groundwater depletion from confining layers.* Water Resources Research, Vol. 43, W07417, July 2007.
14. **Konikow L.F., et al.:** *A Three-Dimensional Method-of-Characteristics Solute-Transport Model (MOC3D).* U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96-4267, Reston 1996.
15. *Przegląd ekologiczny składowisk odpadów przemysłowych (...).* Politechnika Łódzka Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Systemów Inżynierii Środowiska, Łódź, czerwiec 2002.
16. *Raport z monitoringu jakości wód podziemnych i powierzchniowych oraz zanieczyszczenia gruntów wykonanego w latach 1999-2001 w rejonie Zakładów (...).* Przedsiębiorstwo Geologiczne w Warszawie POLGEOL w likwidacji w celu prywatyzacji, Zakład w Gdańsku, Gdańsk, grudzień 1999 r.
17. *Raport z monitoringu jakości wód podziemnych i powierzchniowych oraz zanieczyszczenia gruntów w rejonie Zakładów (...).* (1999), POLGEOL, Gdańsk. luty 2002.
18. *Wniosek o wydanie pozwolenia zintegrowanego na wprowadzenie zanieczyszczeń do środowiska (...).* Tom IX. Stan środowiska wodno – gruntowego, Politechnika Łódzka Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Systemów Inżynierii Środowiska, Łódź, październik 2003.
19. *Wniosek o wydanie pozwolenia zintegrowanego na wprowadzenie zanieczyszczeń do środowiska (...).* Tom IV. Gospodarka ściekowa, Politechnika Łódzka Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Systemów Inżynierii Środowiska, Łódź, październik 2003.

Application of Numerical Model for Assessment of Vertical Drainage System Efficiency for Limitation of Pollutants Migration in Ground Waters

Abstract

One of the side effects of activities of industrial plants is pollution of water soil environment. Pollutants penetrating to soil react soil skeleton and with underground waters, and are transported together with the stream of underground waters and supply superficial waters. Ability of assessment of pollutants spreading in underground waters principles is essential especially from the point of view of monitoring of quality and protection of waters, both underground and superficial, destined to be intaken, especially as drinking or industrial water.

Vertical drainage realised as barrier of wells is most often used, among many ways of the limitation of the transportation of pollutants in underground waters. On the ground in direction along with the flow of underground waters stream barrier of pumping wells is built. By pumping underground waters containing pollutants flowing from the source of contaminations, eg. from under landfill, pollutants can not flow out of the area enclosed with the barrier. Realization of such barrier has to take into account hydrological conditions on the given area. Waters pumped out from wells, in dependence on size of pollutants loading, may be turned back to the technological process, treated or pumped back to the landfill.

The paper presents numerical analysis of the pumping wells barrier efficiency for limitation of pollutants migration in ground waters. The numerical assessment is based on measurement results carried out at a certain production plant. For this purpose two groups of representative pollutants were selected with a special focus on pollutants deriving from the industrial waste lagoon and from sludge drying beds of the sewage station.

The numerical simulations were carried out using hydrogeological model of the production plant area elaborated in form of digital maps for the further application in the Visual Modflow Software. As a first step of the numerical modelling of the ground water flow was its verifying. It was assumed that the difference between assessed ground water table and the real taken from the measurements ground water table be less than ± 1.0 m.

The pollutants migration analyses were divided into two phases: the first one dealt with a development of the pollution areas within a period of 2,600 days when the infiltration from the industrial waste lagoon and sewage station were as an input according to the envelope of the measurements results. The next simulation period covered the subsequent 5 years when the barrier of pumping wells was put into operation.

Under the given hydrogeological circumstances the numerical assessment showed a very low efficiency of the drainage barrier of vertical pumping wells.