

Tomasz SUPONIK
Politechnika Śląska, Gliwice

OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH BARIERY REMEDIACYJNEJ DLA WÓD PODZIEMNYCH W REJONIE SKŁADOWISKA ODPADÓW „HAJDUKI”

Streszczenie. W artykule przedstawiono procedurę projektowania bariery remediacyjnej dla wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów „Hajduki”. Procedura ta dla zastosowanego typu bariery kombinowanej zamkniętej obejmuje określenie najlepszej lokalizacji, orientacji, szerokości oraz grubości bariery aktywnej. Optymalizacja parametrów geometrycznych bariery remediacyjnej została wykonana przy użyciu programu *Visual MODFLOW 2.8*. W barierze aktywnej jako procesy oczyszczania wód podziemnych zastosowano adsorpcję na węglu aktywnym.

OPTIMISATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE REMEDIATION BARRIER IN VICINITY OF THE “HAJDUKI” DUMPING SITE

Summary. In this paper PRB (Permeable Reactive Barrier) design for the Hajduki waste dumping site has been presented. The design procedure for a funnel-and-gate locked system means optimizing the best reactive barrier location, orientation, width and thickness. Optimisation of geometrical parameters of the remediation barrier has been created using *Visual MODFLOW 2.8* program. The contaminants have been removed from the groundwater by adsorption on the granular activated carbon, which is situated in a reactive barrier.

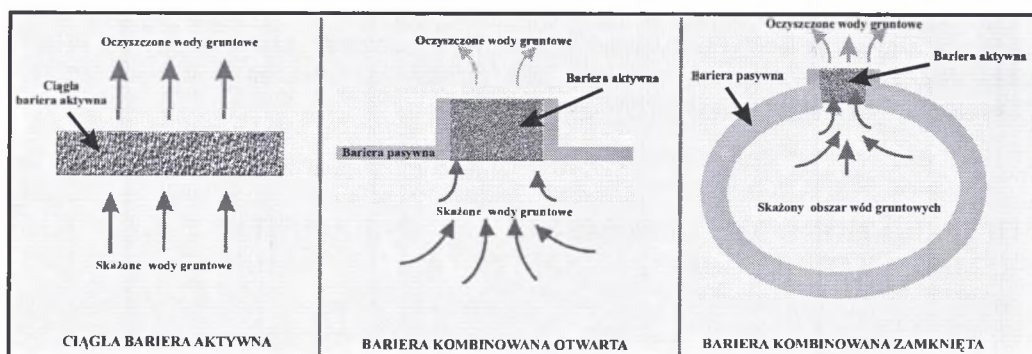
1. Wprowadzenie

Technologia bariery remediacyjnej (*ang. PRB technology – Permeable Reactive Barrier*) jest ciekawym i perspektywicznym sposobem remediacji zanieczyszczonych wód podziemnych. W technologii tej zanieczyszczenia usuwane są bezpośrednio w warstwie

wodonośnej poprzez przepływ skażonego strumienia wód podziemnych przez wypełnioną odpowiednim materiałem barierę aktywną. Technologia ta może być stosowana [6]:

1. w celu zapobiegania degradacji środowiska gruntowo-wodnego dla istniejących, źle usytuowanych i źle zabezpieczonych składowisk odpadów,
2. w celu zapobiegania degradacji środowiska gruntowo-wodnego dla składowisk odpadów, których zabezpieczenie uległo uszkodzeniu,
3. jako alternatywny sposób zabezpieczenia nowo projektowanych składowisk odpadów,
4. do likwidacji zanieczyszczeń, które znalazły się w wodzie podziemnej wskutek nieszczelności zbiorników i rurociągów oraz awarii maszyn i urządzeń.

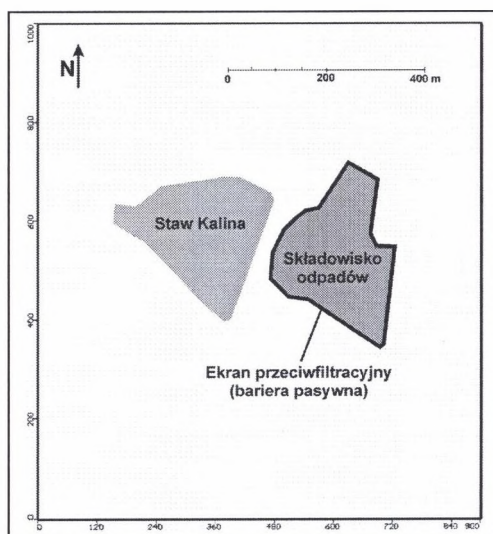
Znane i obecnie stosowane są dwa typy barier remediacyjnych: *ciągła bariera aktywna* (ang. *Continuous Reactive Barrier*) oraz *bariera kombinowana* (ang. *Funnel-and-Gate System*) [4], która składa się z bariery kombinowanej otwartej (ang. *Funnel-and-Gate Open System*) i bariery kombinowanej zamkniętej (ang. *Funnel-and-Gate Lock System*) (rys. 1) [6].



Rys. 1. Podstawowe typy barier remediacyjnych
Fig. 1. Main types of PRB

Odcieki ze składowisk odpadów w szczególnym stopniu oddziałują na wody podziemne o swobodnym zwierciadle. Z powodu braku izolacji zanieczyszczenia dostają i przemieszczają się w nich prawie bez żadnych przeszkód i na znaczne odległości. Wody podziemne w konsekwencji same stają się źródłem skażenia zbiorników wód powierzchniowych, powodując zarówno straty w sferze gospodarczej, jak również rekreacyjno-krajobrazowej. Przykładem takim jest obszar składowiska odpadów przemysłowych „Hajduki” w Świętochłowicach (rys. 2). W latach 1993 – 1994 celem ograniczenia migracji zanieczyszczeń poza teren składowiska jego podłoże gruntowe zostało opasane ekranem przeciwfiltacyjnym, który w technologii bariery remediacyjnej nazywany jest barierą pasywną. Wody podziemne w rejonie składowiska odpadów zanieczyszczone są

głównie związkami organicznymi, wśród których dominują fenole oraz benzen – stanowiący zagrożenie dla człowieka oraz dla środowiska naturalnego. Te substancje chemiczne będą stanowiły podstawę oceny skuteczności zabiegów remediacji w przypadku analizowanych wód podziemnych.



Rys. 2. Obszar składowiska odpadów przemysłowych „Hajduki”
Fig. 2. The area of the Hajduki dumping site

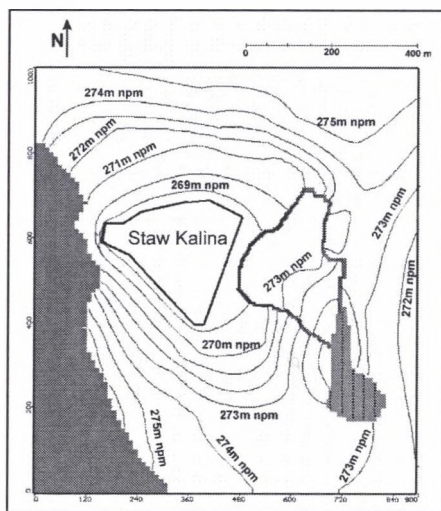
2. Optymalizacja parametrów geometrycznych bariery remediacyjnej

Wykorzystanie bariery remediacyjnej w przypadku obecności ekranu przeciwfiltracyjnego wokół skażonego obszaru wymaga zastosowania bariery kombinowanej zamkniętej. Strefę aktywną w tych warunkach tworzy się przez otwarcie bariery pasywnej w takim miejscu, które zapewni maksymalną i skuteczną likwidację zanieczyszczeń. *Parametry geometryczne bariery remediacyjnej* w tym przypadku to: **lokalizacja, orientacja oraz szerokość i grubość bariery aktywnej**.

Określenie odpowiedniej lokalizacji bariery aktywnej lub kilku barier ustala się na podstawie rozkładu plamy zanieczyszczeń oraz natężenia i kierunku spływu wód podziemnych za zidentyfikowanym źródłem zanieczyszczeń [5].

Na podstawie dostępnej dokumentacji [1] oraz pola hydrodynamicznego przedstawionego na rys. 3 stwierdzono, iż Staw Kalina stanowi bazę drenażu dla zanieczyszczonych wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów. Zatem bariera aktywna powinna zostać usytuowana na drodze spływu wód podziemnych do stawu, w miejscu maksymalnego

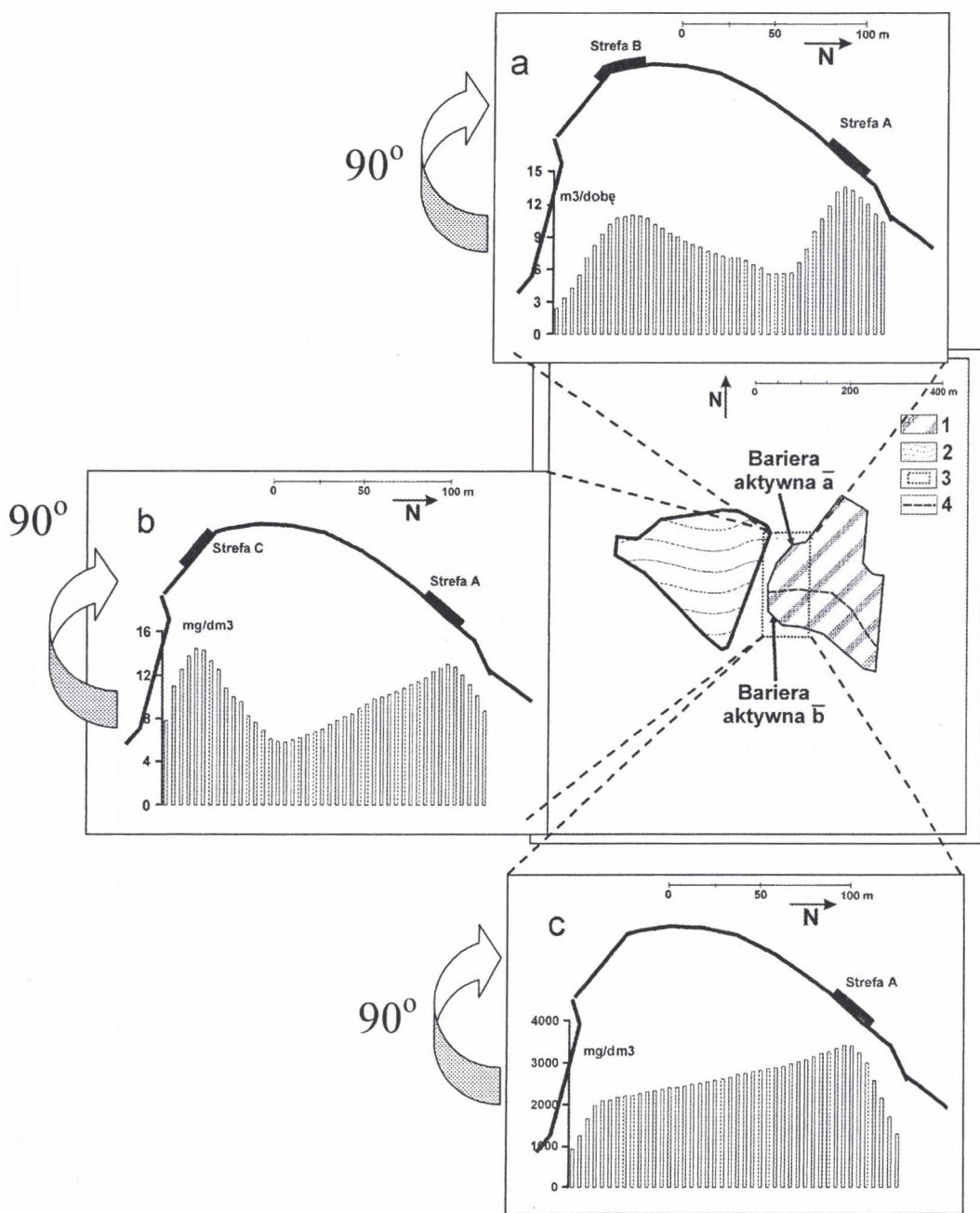
natężenia przepływu i stężenia zanieczyszczeń. W celu wyznaczenia tych miejsc, na drodze spływu wód podziemnych do Stawu Kalina wyznaczono: jednostkowy wydatek strumienia filtracyjnego oraz jednostkowe stężenie benzenu i fenoli w wodach. Badania realizowano korzystając z modułów *Zone Budget*, *MT3DMS* programu *Visual MODFLOW 2.8*, wykonując przed każdą symulacją otwór w barierze pasywnej o szerokości bloku obliczeniowego. Rezultaty badań zostały przedstawione na rys. 4, gdzie każda kolumna z wykresu naniesionego na fragment obszaru składowiska odnosi się do miejsca przeprowadzonego badania.



Rys. 3. Pole hydrodynamiczne w rejonie składowiska odpadów
Fig. 3. The hydrodynamic field at the dumping site

Wyniki badań zarówno jednostkowych stężeń benzenu i fenoli, jak i jednostkowego wydatku strumienia filtracyjnego wskazują, iż istnieje obszar charakteryzujący się podwyższonymi wartościami. W obszarze tym, nazwanym strefą A, zlokalizowana została bariera aktywna \bar{a} . Maksymalne jednostkowe stężenia benzenu występują jednak po lewej stronie wykresu (strefa C), a miejsce to odpowiada strefie B, tj. strefie o podwyższonych wartościach wydatku strumienia filtracyjnego. W obszarze tych stref zlokalizowana została bariera aktywna \bar{b} . Lokalizację obu barier aktywnych przedstawiono na rys. 4.

Szerokość i grubość barier aktywnych w rozpatrywanym typie PRB wyznacza się w taki sposób, aby zanieczyszczona woda podziemna w obszarze ograniczonym barierą pasywną przepływała przez jedną z barier aktywnych i ulegała oczyszczaniu – do wartości stężenia wymaganego zgodnie z rozporządzeniem [7]. W badaniach należy ustalić taką szerokość barier aktywnych, dla której suma wydatków wód podziemnych poszczególnych barier będzie równa całkowitemu wydatkowi wód podziemnych spływających do Stawu Kalina.

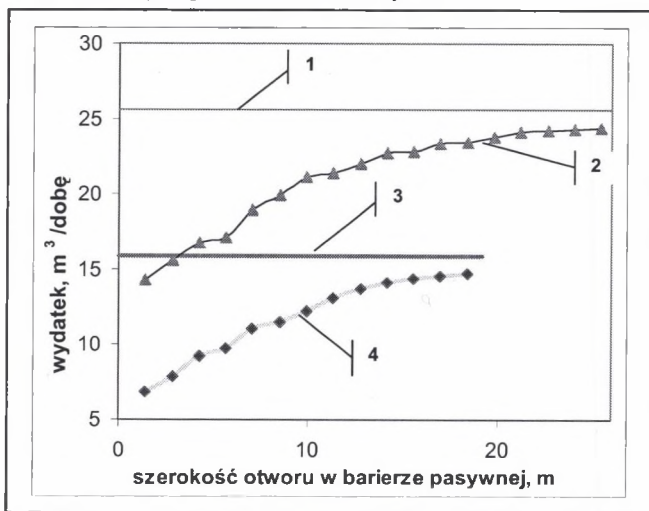


Rys. 4. Wykresy jednostkowego: a) wydatku strumienia filtracyjnego, b) stężenia benzenu, c) stężenia fenoli. 1 – składowisko odpadów, 2 – Staw Kalina, 3 – fragment bariery pasywnej poddany badaniom, 4 – linia podziału obszarów wpływu bariery aktywnej \bar{a} i \bar{b}

Fig. 4. Graphs of unit: a) water flux discharge, b) benzene concentration, c) phenols concentration. 1 – waste dump, 2 – Kalina pond, 3 – part of investigated a cut-off wall, 4 – a division line of \bar{a} and \bar{b} reactive barrier's impact area

Każda z projektowanych barier aktywnych przejmuje jednak inną ilość wód podziemnych, dzieląc ograniczone barierą pasywną pole na dwa obszary. Linia podziału obszarów wpływu bariery aktywnej \bar{a} i \bar{b} została przedstawiona na rys. 4. Całkowity wydatek wód podziemnych z obszaru wpływu bariery aktywnej \bar{a} oraz \bar{b} wynosi odpowiednio $25,58 \text{ m}^3/\text{dobę}$ i $15,92 \text{ m}^3/\text{dobę}$.

Wyznaczanie szerokości barier aktywnych w modelu numerycznym polegało na badaniu wydatku wód podziemnych w barierach aktywnych \bar{a} i \bar{b} dla różnych szerokości otworu w barierze pasywnej. Badania w poszczególnych barierach aktywnych prowadzone były niezależnie, z zachowaniem w przeciwległej barierze otworu o szerokości 30 m. Wyniki badań wydatków wód podziemnych przedstawiono na rys. 5.



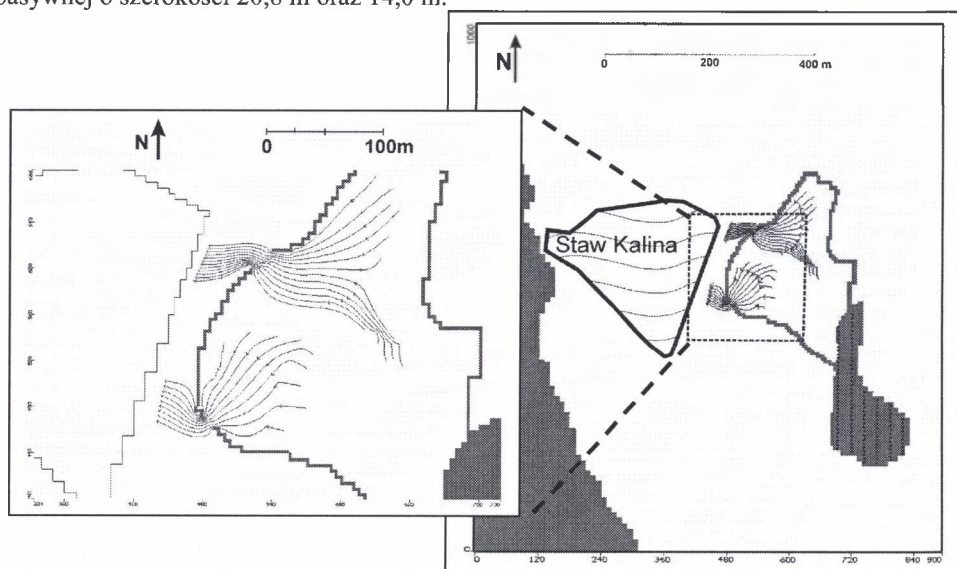
Rys. 5. Zależność pomiędzy szerokością otworu w barierze pasywnej a wydatkiem wód podziemnych w barierze aktywnej \bar{a} (2) oraz w barierze aktywnej \bar{b} (4) wobec całkowitego wydatku wód podziemnych dla obszaru wpływu bariery aktywnej \bar{a} (1) oraz bariery aktywnej \bar{b} (3)

Fig. 5. The relation between the width of a cut-off wall's hole and groundwater discharge in the reactive barrier \bar{a} (2) and reactive barrier \bar{b} (4) compared to the total groundwater discharge of \bar{a} (1) and \bar{b} (3) reactive barrier's impact area

W obu przedstawionych przypadkach wydatek wód podziemnych obliczony dla różnych szerokości otworu w barierze pasywnej wzrasta wraz ze wzrostem szerokości otworu, zbliżając się do wartości całkowitych wydatków wód podziemnych opisanych na rys. 5 liniami nr 1 i 3. Powyżej pewnej szerokości otworu w barierze pasywnej wzrost ten jest jednak bardzo mały lub nie występuje w ogóle. Szerokość otworu w barierze pasywnej, po której nie następuje wyraźny wzrost wydatku wód podziemnych, uznano za szerokość bariery aktywnej. W barierze aktywnej \bar{a} szerokość ta wynosi 20,8 m, w barierze aktywnej \bar{b} zaś

14,0 m. Wydatki wód podziemnych dla tych szerokości wynoszą odpowiednio 24,42 m³/dobę oraz 14,12 m³/dobę.

W technologii PRB orientację bariery aktywnej ustala się w taki sposób, aby dla danych warunków nastąpiło maksymalne przechwycenie zanieczyszczeń. Kierunek ustawienia bariery aktywnej w przypadku obecności wokół skażonego obszaru bariery pasywnej ustala się jako równoległy do kierunku przepływu zanieczyszczonych wód podziemnych przez otwory w barierze pasywnej. Wybór tak zdefiniowanej orientacji bariery aktywnej jest podyktowany koniecznością zapewnienia jak najmniejszego oddziaływania wód podziemnych znajdujących się na zewnątrz oraz wewnątrz projektowanej bariery aktywnej. Na rys. 6 przedstawiono kierunek przepływu wód podziemnych przez otwory w barierze pasywnej o szerokości 20,8 m oraz 14,0 m.



Rys. 6. Kierunek przepływu wód podziemnych przez otwory w barierze pasywnej
Fig. 6. The groundwater flow direction through a cut-off wall's holes

Szybkość procesu adsorpcji benzenu i fenoli na węglu aktywnym jest bardzo wysoka w stosunku do ich migracji w wodach podziemnych w rejonie składowiska odpadów. W związku z tym grubość bariery aktywnej może być ustalana na podstawie czasu przebiecia strefy oczyszczania, który wskazuje na wyczerpanie pojemności adsorpcyjnej i konieczność wymiany (regeneracji) adsorbentu. Czas przebiecia strefy oczyszczania oblicza się wg równania [3]:

$$t_p = \frac{m \cdot C_a}{m} \quad (1)$$

gdzie :

m - masa węgla aktywnego wypełniającego barierę aktywną, [kg],

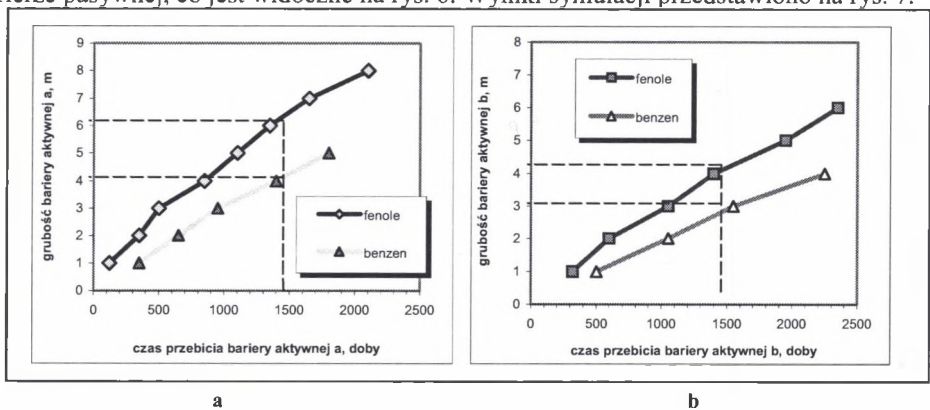
C_a - masa substancji zaadsorbowanej odniesiona do masy adsorbentu, [mg/g],

t_p - czas przebiecia strefy oczyszczania, [doby],

•

m - wydatek masowy, [kg/doba].

Czas przebiecia obu stref oczyszczania w modelu określany był na podstawie identyfikacji dopuszczalnych stężeń benzenu i fenoli [7] w odpływach z barier aktywnych. Przebiecie bariery aktywnej \bar{a} i \bar{b} obliczane było dla różnych grubości stref oczyszczania za pomocą modułu *MT3DMS* programu *Visual MODFLOW 2.8*. Ze względu na oczekiwaną - kilkumetrową grubość obu barier aktywnych, w modelu przyjęto prostopadłą ich orientację w stosunku do bariery pasywnej. Tak ustalona orientacja bariery aktywnej \bar{a} i \bar{b} odpowiadała kierunkowi przepływu wód podziemnych w pierwszej fazie przechodzenia przez oba otwory w barierze pasywnej, co jest widoczne na rys. 6. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Czas przebiecia strefy oczyszczania dla benzenu i fenoli dla różnych grubości: a) bariery aktywnej \bar{a} , b) bariery aktywnej \bar{b}

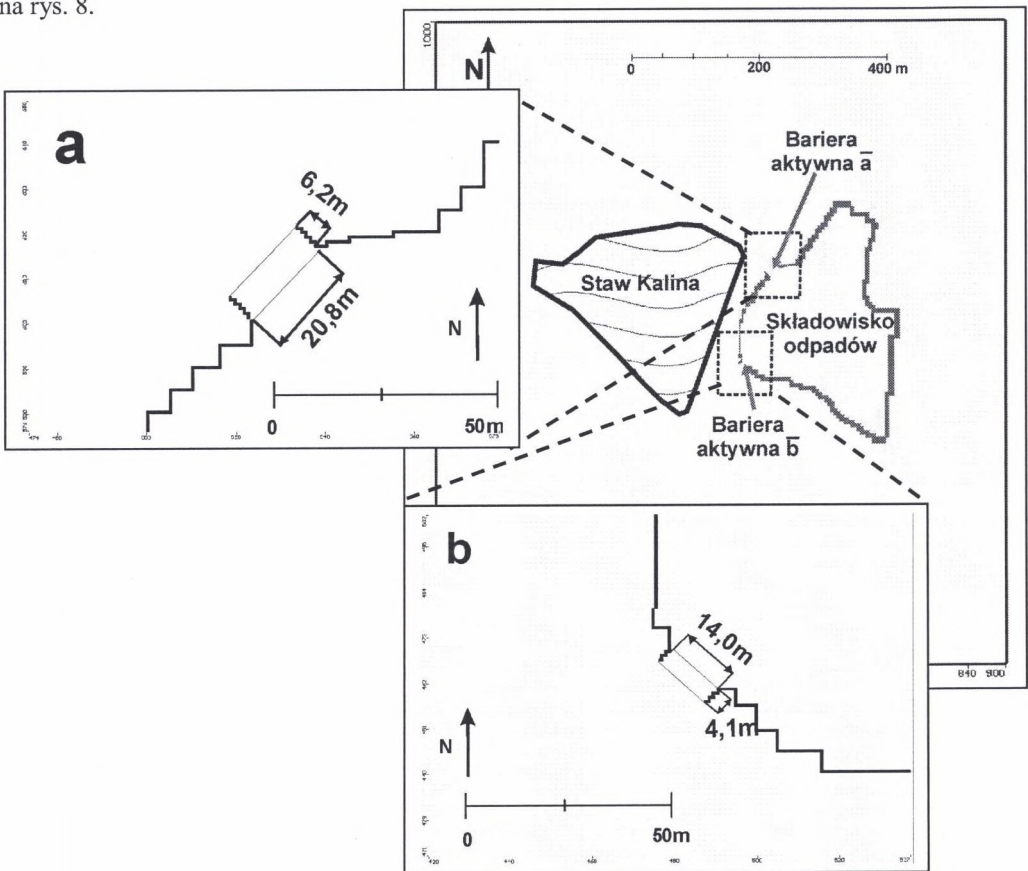
Fig. 7. Cleaning zone's breakthrough time for benzen and phenols for various thickness of: a) reactive barrier \bar{a} , b) reactive barrier \bar{b}

Z równania (1) wynika, iż w celu określenia grubości bariery aktywnej \bar{a} i \bar{b} założyć należy oczekiwany czas ich pracy, po którym nastąpi wymiana adsorbentu. Czas pracy barier aktywnych ustalony został na 4 lata (1460 dni), głównie ze względu na ograniczenie grubości barier aktywnych oraz możliwość zmiany własności hydrogeologicznych materiału aktywnego [2]. Dla założonego czasu pracy grubości bariery aktywnej \bar{a} dla fenoli i benzenu wynoszą odpowiednio 6,2 m oraz 4,2 m, a grubości bariery aktywnej \bar{b} odpowiednio 4,1 m oraz 2,8 m. W obu przypadkach fenole wymagają grubszej strefy oczyszczania, w związku

z tym w modelu numerycznym zastosowano grubości barier aktywnych odpowiadające tym związkom.

3. Wyniki optymalizacji parametrów geometrycznych bariery remediacyjnej

W konsekwencji przedstawionych w niniejszym artykule działań otrzymano *parametry geometryczne bariery remediacyjnej*, które dla obu barier aktywnych zostały przedstawione na rys. 8.



Rys. 8. Parametry geometryczne bariery remediacyjnej dla: a) bariery aktywnej \bar{a} , b) bariery aktywnej \bar{b}

Fig. 8. Geometrical PRB parameters for: a) reactive barrier \bar{a} , b) reactive barrier \bar{b}

Optymalizacja tych parametrów wykonana dla obszaru składowiska odpadów „Hajduki” w Świętochłowicach wskazuje na konieczność zastosowania dwóch barier aktywnych \bar{a} i \bar{b} o szerokościach odpowiednio 20,8 m i 14,0 m oraz o grubościach 6,2 m i 4,1 m.

4. Wnioski

W typie bariery kombinowanej zamkniętej parametrami geometrycznymi bariery remediacyjnej są lokalizacja, orientacja, szerokość i grubość bariery aktywnej. Parametry te wyznacza w następujący sposób:

- bariere aktywną lokalizuje się na drodze spływu wód podziemnych, w miejscu maksymalnego natężenia przepływu i stężenia zanieczyszczeń,
- orientację bariery aktywnej ustala się jako równoległą do kierunku przepływu zanieczyszczonych wód podziemnych,
- szerokość i grubość bariery aktywnej wyznacza się w taki sposób, aby zanieczyszczona woda podziemna w obszarze ograniczonym barierą pasywną przepływała przez jedną z barier aktywnych i ulegała oczyszczaniu – do wartości stężenia wymaganego zgodnie z rozporządzeniem [7].

Ograniczona pojemność adsorpcyjna węgla aktywnego i wiążąca się z tym konieczność jego wymiany i regeneracji jest w technologii bariery remediacyjnej głównym problemem. W celu ułatwienia okresowej wymiany węgla aktywnego barierę aktywną można wykonać z gotowych prefabrykatów lub kolumn filtracyjnych. Trzeba jednak zaznaczyć, iż stosując przedstawione elementy konstrukcyjne, należy w warunkach analizowanego obszaru składowiska odpadów zapewnić odpowiednią grubość strefy oczyszczania, bowiem w przeciwnym razie częstotliwość wymiany węgla aktywnego mogłaby być bardzo duża.

LITERATURA

1. COMCO MARTECH POLSKA sp. z o.o.: Projekt Stawu Kalina. Dodatek do trzeciego kwartalnego sprawozdania z postępu prac. Wrzesień 1992.
2. Lutyński A., Suponik T.: Oczyszczanie wód gruntowych z benzenu i fenoli. – oddana do wydawnictwa „OCHRONA ŚRODOWISKA”, luty 2004.
3. Paderewski M.: Adsorpcja i adsorbery. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1980.

4. Puls R. W., Powell M. R., Blowes D. W., Gillham R. W., Schultz D., Sivavec T., Vogan J. L., Powell P. D.: Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation. US EPA, RTDF, 1998.
5. Suponik T., Czechowicz D.: Biodegradacja węglowodorów aromatycznych w technologii PRB dla wód gruntowych wybranego składowiska odpadów. ZN. Pol. Śląskiej Seria: Górnictwo nr 257, Gliwice 2003.
6. Suponik T.: Optymalizacja parametrów bariery remediacyjnej dla zanieczyszczonych wód gruntowych obszaru składowiska odpadów. Praca doktorska (oddana do recenzji), Politechnika Śl. w Gliwicach, Gliwice 2004.
7. Rozporządzenie z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. DzU. nr 212, poz. 1799.

Recenzent: Dr hab. inż. Grzegorz Malina, prof. nzw. w Pol. Częstochowskiej

Abstract

PRB technology is an interesting and perspective method for a groundwater remediation. This is passive remediation, where contaminants are removed from an aquifer by flow through a reactive barrier filled with a reactive material. In this paper the granular active carbon has been used as a reactive material sorbent.

The reactive barrier location, orientation, width and thickness are geometrical parameters for a funnel-and-gate locked system which has been applied in vicinity of the Hajduki dumping site. This parameters are designed according to the following ways:

- The reactive barrier is located in a place which is characterized by the highest water flux discharge and the highest concentrations of contaminants (phenols and benzene).
- The reactive barrier is orientated parallelly to the groundwater flow direction.
- The reactive barrier width and thickness are determined in the condition when contaminated groundwater flows through a reactive barrier and the contaminants will be removed below the target cleanup levels.

The results of geometrical parameters of the remediation barrier in vicinity of the "Hajduki" dumping site show the necessity of use of two reactive barriers \bar{a} and \bar{b} , which width amount to respectively 20,8 m and 14,0 m and thickness amount to respectively 6,2 m and 4,1 m.