

Tomasz SUPONIK  
Politechnika Śląska, Gliwice

## **METODYKA OCENY MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA BARIERY REMEDIACYJNEJ W CELU LIKWIDACJI ZANIECZYSZCZEŃ Z WÓD PODZIEMNYCH**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono procedurę postępowania w ocenie możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej. Przedstawiono najważniejsze czynniki decydujące o tej ocenie oraz zaproponowano wykonywanie w początkowym etapie procedury oceny wstępnej, która ogranicza zakres analizy do kilku najistotniejszych elementów. Ponadto przedstawiono kryteria oceny możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej, które mogą być pomocne w podjęciu decyzji o akceptacji bądź rezygnacji z jej stosowania w pierwszych etapach procedury.

## **METHODOLOGY OF PRB (Permeable Reactive Barrier) ASSESSMENT POSSIBILITY USE FOR TREATING CONTAMINATED GROUNDWATER**

**Summary.** The procedure stage in the assessment of possibilities of using PRB technology is presented in this paper. The most important factors of that assessment have been selected. It was suggested to use preliminary assessment during the initial stage of the procedure, as it limits the range of the analysis to several most important elements. The criteria for the assessment of possibilities to use PRB technology were specified in the paper, as they may be helpful to decide whether this technology should be accepted or not in the first stages of the procedure.

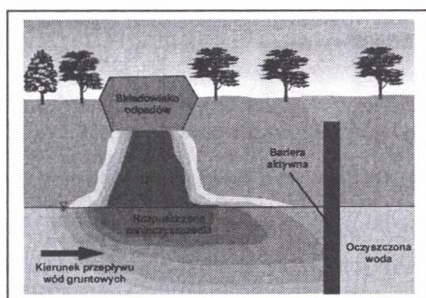
### **1. Wprowadzenie**

W minionych latach, w celu odizolowania skażonego środowiska gruntowo-wodnego od otoczenia, wiele obiektów będących źródłem zanieczyszczeń było opasanych pionowymi ekranami przeciwfiltracyjnymi. W Polsce w KWK „Morcinek”, KWK „Ziemowit” oraz w Zakładach Chemicznych „Hajduki” posłużono się również tą metodą, chroniąc okoliczne

środowisko przed wyciekającymi zanieczyszczeniami [3, 4]. Podstawowym i niezbędnym warunkiem zastosowania tej metody jest obecność poziomej, ciągłej, słabo przepuszczalnej warstwy, leżącej poniżej skażonego obszaru, w którą osadza się ekran przeciwfiltracyjny. Położenie stropu tej warstwy, a tym samym wykonany za pomocą konwencjonalnych metod ekran, nie powinno przekraczać z powodów technicznych i ekonomicznych głębokości 15 m [9]. Znane są jednak, i w ostatnim czasie coraz częściej stosowane nowe metody instalacji ekranów przeciwfiltracyjnych, które pozwalają na ich zagłębienie do poziomu sięgającego nawet 60 m [2].

W większości opasanych ekranem przeciwfiltracyjnym obiektów, w celu poprawy skuteczności ochrony środowiska gruntowo-wodnego oraz ograniczenia uszkodzeń ekranu, stosuje się opisaną w pracach [1, 5] metodę oczyszczania, polegającą na pompowaniu zanieczyszczonych wód z ograniczonego obszaru warstwy wodonośnej i ich uzdatnianiu na powierzchni terenu (tzw. metoda *ang. Pump-and-Treat*). Konieczność utrzymania przez wiele lat tego typu oczyszczania wiąże się jednak z dużym zużyciem energii oraz wysokimi nakładami pracy, co zdecydowanie podnosi koszty inwestycji i eksploatacji oraz tym samym zmniejsza jej atrakcyjność. Praktyczne doświadczenia wskazują ponadto, iż ekrany przeciwfiltracyjne w większości przypadków nie spełniają pokładanych założeń i tylko w niewielkim stopniu minimalizują efekt skażenia środowiska [1]. Powodem tym są głównie niejednorodność przepływu zanieczyszczonych wód, niejednorodność środowiska gruntowo-wodnego, nieregularny rozkład zanieczyszczeń, duża ilość opadów atmosferycznych oraz umiarkowana rozpuszczalność niektórych związków organicznych z grupy chlorowanych węglowodorów oraz węglowodorów aromatycznych.

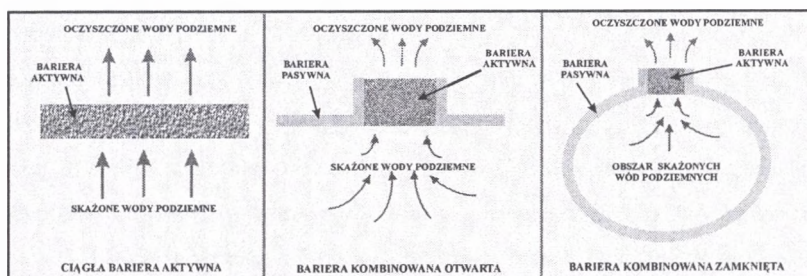
Alternatywą dla zastosowania metody *Pump-and-Treat* w warunkach obecności ekranów przeciwfiltracyjnych może być technologia bariery remediacyjnej (*ang. PRB technology*), której zasada polega na zatrzymaniu lub zmianie składu chemicznego szkodliwych związków [1, 6, 7, 8, 9]. W technologii tej zanieczyszczenia usuwane są bezpośrednio w warstwie wodonośnej poprzez przepływ skażonego strumienia wód podziemnych przez wypełnioną odpowiednim materiałem **barierę aktywną** (rys. 1). Likwidacja zanieczyszczeń w tej barierze oparta jest na procesach fizycznych, chemicznych i/lub biologicznych [5, 10]. Na podstawie literatury przedmiotu opisującej doświadczenia i realizacje technologii bariery remediacyjnej w innych krajach stwierdza się, iż dotychczas najczęściej stosowany był proces chemiczny polegający na redukcji chlorowanych związków organicznych do substancji nietoksycznych [5, 6, 10].



Rys. 1. Zasada oczyszczania wód podziemnych za pomocą technologii bariery remediacyjnej  
Fig. 1. The rule of plume being treated by a PRB technology

Barierę aktywną instaluje się na drodze przepływu zanieczyszczeń. W zależności od ich stężenia oraz rodzaju zachodzących w barierze procesów instaluje się ją w systemie trwałym, wymiennym lub częściowo wymiennym. Bariera aktywna w niewielkim stopniu wpływa na środowisko naturalne i jest na ogół łatwa do zainstalowania i użytkowania. Ze względu na naturalny przepływ wód podziemnych przez strefę oczyszczania technologia ta nie wymaga dostarczania energii i tym samym nie należy do kosztownych w eksploatacji. W opracowaniach [5, 9] oszacowano, iż w niektórych przypadkach można zaoszczędzić co najmniej 50% nakładów na użytkowanie w stosunku do opisaney wcześniej metody *Pump-and-Treat*. Technologia bariery remediacyjnej eliminuje ponadto wiele problemów pojawiających się przy zastosowaniu metody *Pump-and-Treat*.

Znane i obecnie stosowane są dwa typy technologii bariery remediacyjnej; są to **ciągła bariera aktywna** (ang. *Continuous Reactive Barrier*) oraz **bariera kombinowana** (ang. *Funnel-and-Gate System*) [1, 6, 7, 8, 9], która składa się z **bariery kombinowanej otwartej** (ang. *Funnel-and-Gate Open System*) i **bariery kombinowanej zamkniętej** (ang. *Funnel-and-Gate Lock System*) (rys. 2).



Rys. 2. Podstawowe typy barier remediacyjnych [7, 8]  
Fig. 2. Main types of PRB [7, 8]

## 2. Analiza możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej

Stosowana od dziesięciu lat technologia bariery remediacyjnej należy do grupy metod *in situ*, w której wszelkie procesy oczyszczania odbywają się w warunkach występowania zanieczyszczeń, tj. w środowisku gruntowo-wodnym, i tym samym wszystkie operacje muszą być dostosowane do określonych warunków przestrzenno-czasowych. Dlatego mówiąc o ocenie możliwości zastosowania bariery remediacyjnej w obszarach składowisk odpadów, skupiono się na ogólnych zasadach, jakimi należy się kierować podczas oceny, oraz określono ogólne kryteria możliwości zastosowania bariery remediacyjnej.

W świetle dotychczasowych doświadczeń stwierdzić można, iż technologia bariery remediacyjnej jest ciekawym i perspektywicznym sposobem remediacji wód podziemnych. Technologia ta może być stosowana jako:







- środek zapobiegający degradacji środowiska gruntowo-wodnego dla istniejących, źle usytuowanych i źle zabezpieczonych składowisk odpadów,
- środek zapobiegający degradacji środowiska gruntowo-wodnego dla składowisk odpadów, których zabezpieczenie uległo uszkodzeniu,
- alternatywa sposobu zabezpieczenia nowo projektowanych składowisk odpadów,
- środek służący do likwidacji zanieczyszczeń z wód podziemnych, które znalazły się w nich wskutek nieszczelności zbiorników i rurociągów oraz awarii maszyn i urządzeń.

Ze względu na złożoność procesów oczyszczania oraz migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych, technologia bariery remediacyjnej może być stosowana tylko w określonych warunkach i wymaga dokładnej identyfikacji terenowej, hydrogeologicznej i geologicznej, identyfikacji zanieczyszczeń wód podziemnych oraz określenia szeregu parametrów, nazywanych parametrami bariery remediacyjnej. Nie każde więc skażone środowisko gruntowo-wodne jest odpowiednie do stosowania prezentowanej technologii. Istnieją pewne ograniczenia, uzależnione od wielu czynników i założeń, których poprawne zidentyfikowanie może zadecydować o możliwości jej stosowania. Pełna ocena możliwości stosowania technologii bariery remediacyjnej jest jednak kosztowna. Wraz z poziomem wnikliwości rosną nakłady finansowe na wykonywane badania. Dlatego w początkowym etapie procedury projektowania bariery remediacyjnej proponuje się wykonać ocenę wstępną, która ogranicza zakres analizy do niezbędnych i najistotniejszych czynników. Wstępną ocenę prowadzi się w celu określenia technicznych i ekonomicznych możliwości stosowania technologii bariery remediacyjnej dla wyznaczonego obszaru. Niżej omówiono elementy

wstępnej oceny możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej, zestawione w pierwszym etapie procedury przedstawionej w tabeli 1.

Tabela 1

## Procedura analizy możliwości zastosowania bariery remediacyjnej

Etapy procedury	Charakterystyka terenowa, hydrogeologiczna i geologiczna	Identyfikacja zanieczyszczeń wód podziemnych
wstępna ocena możliwości zastosowania bariery remediacyjnej	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ warunki powierzchniowe (obiekty nadziemne lub podziemne, ukształtowanie terenu),</li> <li>▪ prędkość przepływu wód podziemnych,</li> <li>▪ charakterystyka warstwy słabo przepuszczalnej (ciągłość, miąższość, głębokość zalegania, współczynnik filtracji)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ rodzaj i stężenie zanieczyszczeń (możliwość i konieczność oczyszczenia),</li> <li>▪ rozkład plamy zanieczyszczeń (głębokość występowania),</li> </ul>
	kryteria oceny (tabela 3)	
	decyzja o zastosowaniu technologii bariery remediacyjnej	
	akceptacja 	rezygnacja 
pełna ocena możliwości zastosowania bariery remediacyjnej	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bilans opadów atmosferycznych,</li> <li>▪ powierzchnia, kształt i objętość składowiska,</li> <li>▪ techniczne własności obiektów zabezpieczających składowisko odpadów (np. ekran przeciwfiltracyjny, system drenażu odcieków),</li> <li>▪ własności hydrogeologiczne gruntów oraz składowanego odpadu (gęstość objętościowa, współczynniki filtracji, porowatości, parametry dyspersji),</li> <li>▪ miąższość, ciągłość i głębokość zalegania warstw przepuszczalnych i słabo przepuszczalnych</li> <li>▪ prędkość i kierunek przepływu wód podziemnych,</li> <li>▪ wysokość zwierciadła wód podziemnych,</li> <li>▪ własności zbiorników wód powierzchniowych oraz obiektów hydrologicznych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ rodzaj i własności składowanych odpadów (wg katalogu odpadów),</li> <li>▪ tło hydrogeochemiczne wód podziemnych,</li> <li>▪ wskaźniki fizykochemiczne wód podziemnych (np. przewodność elektrolityczna, pH, Eh)</li> <li>▪ rodzaj i stężenie substancji chemicznych w wodach podziemnych - wytypowanie substancji chemicznej (lub grupy substancji) do remediacji (ze względu na toksyczność, stężenie itp.),</li> <li>▪ własności wytypowanych substancji chemicznych,</li> <li>▪ rozkład plamy wytypowanych zanieczyszczeń (szerokość, głębokość występowania),</li> <li>▪ dopuszczalne wartości stężeń analizowanych substancji chemicznych (wg norm)</li> <li>▪ czas emisji zanieczyszczeń,</li> <li>▪ obecność mikroorganizmów,</li> </ul>
	kryteria oceny (tabela 3) – ocena na podstawie modeli filtracji wód podziemnych i migracji zanieczyszczeń	
	decyzja o zastosowaniu technologii bariery remediacyjnej	
	akceptacja 	rezygnacja 
optymalizacja parametrów bariery remediacyjnej	parametry charakteryzujące materiał aktywny	
	parametry charakteryzujące procesy oczyszczania	
	parametry geometryczne bariery remediacyjnej	
	ocena porównawcza wyników optymalizacji parametrów bariery remediacyjnej z innymi metodami dekontaminacyjnymi	
	kryteria oceny – ekonomiczne, środowiskowe i techniczne	
	decyzja o zastosowaniu technologii bariery remediacyjnej	
	akceptacja 	rezygnacja 

Identyfikacja zanieczyszczeń wód podziemnych stanowi ważne kryterium określające możliwość stosowania technologii bariery remediacyjnej i dotyczy głównie rodzaju i stężenia zanieczyszczeń oraz sposobu ich występowania w wodach podziemnych. Na tym etapie oceny wstępnej, na podstawie naukowych i technicznych doświadczeń, określa się możliwość

oczyszczenia zidentyfikowanych substancji chemicznych o określonym stężeniu, przez dostępny, stosunkowo tani i nieszkodliwy dla środowiska materiał aktywny. Zarówno zanieczyszczenia organiczne, jak i nieorganiczne oraz ich mieszaniny podlegają procesom oczyszczania lub zatrzymania w barierze aktywnej. W tabeli 2, na podstawie prac [9, 10], przedstawiono te z nich, które w badaniach laboratoryjnych lub polowych przy zastosowaniu podanego materiału aktywnego, zostały przetestowane i potwierdzone jako możliwe do oczyszczania. W niektórych przypadkach materiał aktywny może występować jako naturalny grunt, w którym poprzez pewne działania techniczne stymuluje się wzrost mikroorganizmów powodujących rozkład zanieczyszczeń.

Tabela 2

Zanieczyszczenia zidentyfikowane (na podstawie badań laboratoryjnych lub polowych) jako możliwe do remediacji za pomocą technologii bariery remediacyjnej przy użyciu odpowiedniego materiału aktywnego [9, 10]

	ZANIECZYSZCZENIE	MATERIAŁ AKTYWNY
pierwiastki i substancje nieorganiczne	arsen	aktywowany korund, boksyt
	molibden, uran, technet	węgiel aktywny
	molibden, rtęć, uran, arsen, fosfor, selen	tlenek żelazowy
	molibden, uran, glin, kadm, mangan, rtęć, nikiel	magnetyt
	molibden, uran, chrom, arsen, ołów, siarczany	torf, lignit, węgiel
	molibden, uran, technet, ołów, kadm, cynk	fosforyt
	glin, bar, kadm, mangan, rtęć, stront-90, arsen, chrom, ołów, selen	zeolit
	molibden, uran, rtęć, technet, arsen, chrom	wodorotlenek żelazawy, węglan żelazawy, siarczek żelazawy
	molibden, uran	wapno, popiół lotny
	molibden, uran, arsen, kadm, selen, siarczany	kamień wapienny
	molibden, uran, arsen	Mg(OH) <sub>2</sub> , MgCO <sub>3</sub> , CaCl <sub>2</sub> , CaSO <sub>4</sub> , BaCl <sub>2</sub>
	arsen, mangan, molibden, selen, uran, technet, glin, bar, kadm, rtęć, nikiel, technet, chrom, stront, siarczany, azotany	metale granulowane
węgiel nieorganiczny, siarczany, wapń, magnez, azotany	żelazo granulowane	
substancje organiczne	chlorowane związki organiczne	żelazo granulowane
	benzen, toluen, etylobenzen, ksylen, metyl, butyl, eter	komponent ORC®
	trójchloroetylen, dwuchloroetylen, dwufenyl polichlorowany, lotne chlorowane związki organiczne, nitrobenzen, nitrofenole, chlorofenole, chlorek winylu, trójchloroetan, czterochlorek węgla, trójchlorometan, dwuchlorometan, feron, dwuchloroetan, trichloroetylen, benzen, toluen, ksylen, fenol	metale granulowane
		zeolit, węgiel aktywny

Bardzo istotną kwestią podczas oceny wstępnej, zależną od właściwości substancji, warunków terenowych oraz elementu czasowego jest szerokość oraz głębokość występowania

zanieczyszczeń. Czynniki te rzutują na poziom kosztów koniecznych do poniesienia w celu przechwycenia oraz likwidacji całej plamy zanieczyszczeń. Rozpatrywana w tym miejscu głębokość występowania zanieczyszczeń jest uzależniona w dużym stopniu od warunków geologicznych i hydrogeologicznych analizowanego obszaru i łącznie z nimi powinna być rozpatrywana. Identyfikacja bowiem głębokości występowania warstwy słabo przepuszczalnej, wraz z oceną jej miąższości oraz ciągłości, pozwala na określenie możliwości pionowej migracji zanieczyszczeń i należy do podstawowych kryteriów zastosowania technologii bariery remediacyjnej. Jak wspomniano we wstępie, warstwa ta, ze względu na możliwości techniczne wykonywania głębokich wykopów za pomocą konwencjonalnych metod, nie powinna przekraczać głębokości 15 m. Trzeba w tym miejscu jednak zaznaczyć, iż nie we wszystkich przypadkach konieczna jest obecność słabo przepuszczalnej warstwy zalegającej bezpośrednio pod skażonym obszarem. W sytuacji gdy zanieczyszczenia migrują na powierzchni zwierciadła wód podziemnych w postaci fazy LNAPL (*ang. Light Non-Aqueous Phase Liquid*), bariera remediacyjna może zostać „zawieszona” w warstwie wodonośnej i nieobecność słabo przepuszczalnej warstwy pod skażonym obszarem nie wpłynie na skuteczność jej pracy.

Odrębnym aspektem koniecznym do analizy podczas oceny wstępnej jest prędkość przepływu wód podziemnych. Stosowanie technologii bariery remediacyjnej w przypadku zbyt dużych, jak i zbyt małych prędkości może być z różnych względów niekorzystne. Duża prędkość przepływu wód podziemnych może wymagać stworzenia grubej strefy oczyszczania, co podnosi koszty inwestycji. Wynika to z zachowania koniecznego czasu kontaktu zanieczyszczeń z materiałem aktywnym. Zbyt niska prędkość natomiast może obniżać atrakcyjność rozpatrywanej technologii wobec innych stacjonarnych metod remediacji. Ocena możliwości stosowania technologii bariery remediacyjnej dla dużych prędkości wód podziemnych uzależniona jest w dużej mierze od rodzaju i stężenia zanieczyszczeń oraz od proponowanych procesów oczyszczania.

W niektórych warunkach o możliwości stosowania technologii bariery remediacyjnej mogą decydować dodatkowo istniejące obiekty nadziemne lub podziemne oraz niekorzystne ukształtowanie terenu i rodzaj gruntu.

Występowanie w określonym obszarze niekorzystnych warunków i czynników nie musi oznaczać rezygnacji z zastosowania rozpatrywanej technologii. Może natomiast powodować wzrost kosztów inwestycji oraz trudności techniczne podczas jej realizacji. Zaprojektowanie efektywnej remediacji jest więc okupione pewnego rodzaju kompromisem pomiędzy wymaganiami środowiskowymi a finansowymi i technicznymi możliwościami podczas

realizacji przedsięwzięcia. W tabeli 3 przedstawiono kryteria oceny możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej w obszarze zanieczyszczeń wód podziemnych składowisk odpadów, które mogą być pomocne w podjęciu decyzji o akceptacji bądź rezygnacji z jej stosowania w pierwszych etapach procedury.

Tabela 3  
Kryteria oceny możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej [8]

Kryteria oceny możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej
<ul style="list-style-type: none"> <li>• brak obiektów nadziemnych dyskwalifikujących lokalizację bariery remediacyjnej,</li> <li>• brak obiektów podziemnych dyskwalifikujących lokalizację bariery remediacyjnej,</li> <li>• korzystne ukształtowanie terenu,</li> <li>• prędkość przepływu wód podziemnych               <ul style="list-style-type: none"> <li>- duża prędkość – <math>f(C, S, P)</math>,</li> <li>- mała prędkość – porównanie z innymi metodami remediacji,</li> </ul> </li> <li>• obecność jednorodnej warstwy słabo przepuszczalnej pod skażonym obszarem – głębokość warstwy do 15 m, miąższość min. 2 m, współczynnik filtracji <math>k \leq 1,0E-9</math> m/s ,</li> <li>• rodzaj zanieczyszczeń <math>f(W)</math>, ocena możliwości likwidacji zanieczyszczeń przy użyciu dostępnych materiałów – tabela 2,</li> <li>• stężenia zanieczyszczeń – <math>f(N, F)</math>,</li> <li>• głębokość występowania plamy zanieczyszczeń – <math>f(G, M)</math>,</li> <li>• szerokość występowania plamy zanieczyszczeń – <math>f(O)</math>.</li> </ul>
gdzie: C - stężenie zanieczyszczeń, S - rodzaj zanieczyszczeń, P - zastosowane procesy oczyszczania, W - możliwość powstania substancji wtórnych bardziej toksycznych od pierwotnych, F - techniczne i finansowe możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej dla bardzo wysokich stężeń; N - konieczność oczyszczania dla niskich stężeń – wg aktów prawnych, G - głębokość zalegania warstwy słabo przepuszczalnej, M - gęstość zanieczyszczeń - możliwość pionowej migracji zanieczyszczeń, O - techniczne i finansowe możliwości stosowania technologii bariery remediacyjnej dla dużych szerokości plamy zanieczyszczeń.

Po zaakceptowaniu, w wyniku oceny wstępnej, możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej kolejnymi etapami procedury postępowania podczas projektowania bariery remediacyjnej są przedstawione w tabeli 1:

- I. powtórna, pełna ocena możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej poprzez wnikliwą identyfikację skażonego obszaru i zanieczyszczeń,
- II. optymalizacja parametrów bariery remediacyjnej [4, 7].

Powtórna, szczegółowa identyfikacja zanieczyszczeń wód podziemnych oraz charakterystyka terenowa, hydrogeologiczna i geologiczna (tab. 1) pozwalają na wykonanie modeli filtracji wód podziemnych i migracji zanieczyszczeń, które poza pełną oceną możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej (poprzez wizualizację wyników i odniesienie się do kryteriów przedstawionych w tabeli 3) służą do optymalizacji parametrów geometrycznych bariery remediacyjnej (tab. 1).

Na podstawie wyników tego etapu można w warunkach laboratoryjnych i polowych dokonać wyboru procesów oczyszczania i materiału aktywnego oraz uzyskać parametry charakteryzujące procesy oczyszczania i materiał aktywny. Dane te w kolejnym etapie



procedury stanowią podstawę optymalizacji parametrów geometrycznych bariery remediacyjnej.

Wyniki optymalizacji parametrów bariery remediacyjnej oraz techniczną charakterystykę bariery można w konsekwencji poddać analizie porównawczej z innymi metodami dekontaminacyjnymi celem doboru najodpowiedniejszego sposobu usunięcia zanieczyszczeń znajdujących się w wodach podziemnych. Podstawowym kryterium doboru odpowiedniej technologii powinien być czynnik ekonomiczny, środowiskowy (skuteczność działań) oraz techniczny.

### 3. Wnioski

- W celu określenia technicznych i ekonomicznych możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej dla wyznaczonego obszaru proponuje się wykonanie oceny wstępnej, która ogranicza zakres analizy od niezbędnych i najistotniejszych czynników.
- Wstępną ocenę możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej określa się na podstawie:
  - identyfikacji stopnia i rodzaju zanieczyszczeń wód podziemnych,
  - identyfikacji szerokości i głębokości występowania zanieczyszczeń,
  - obecności warstwy słabo przepuszczalnej - jej ciągłości, miąższości i głębokości zalegania,
  - prędkości przepływu wód podziemnych,
  - obecności obiektów nadziemnych lub podziemnych,
  - ukształtowania terenu.
- Przedstawione w tabeli 3 kryteria oceny możliwości zastosowania technologii bariery remediacyjnej mogą stanowić podstawę do podjęcia decyzji o akceptacji bądź rezygnacji z jej stosowania w pierwszych etapach procedury.
- W przypadku pozytywnego zaopiniowania technologii bariery remediacyjnej dla wyznaczonego obszaru należy przeprowadzić ocenę porównawczą tej technologii z innymi metodami dekontaminacyjnymi z uwzględnieniem czynnika ekonomicznego, środowiskowego oraz technicznego.

## LITERATURA

1. Bradl H.B., Bartl U.: Reactive walls – a possible solution to the remediation of old landfills? Environmental impact, aftercare and remediation of landfills. Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari 1999, pp. 525-532.
2. Debreczeni E., Meggyes T.: Construction of cut-off walls and reactive barriers using jet technology. Environmental impact, aftercare and remediation of landfills. Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari 1999, pp. 533-540.
3. Kłosiński B., Rafalski L.: Bentonite-cement cut-off diaphragms as barriers against migration of polluting agents. Contaminated and derelict land, Green 2. Thomas Telford, London 1998, pp. 376-381.
4. Lutyński A., Suponik T.: Dobór geometrii barier aktywnych dla wód podziemnych wybranego składowiska odpadów. ZN Wydz. Budownictwa i Inżynierii Środowiska Pol. Koszalińskiej Seria: Inżynieria Środowiska nr 22, Koszalin 2005, s. 787-800.
5. Meggyes T., Simon F.G., Debreczeni E.: New developments in reactive barrier technology. The exploitation of natural resources and the consequences, Green 3. Thomas Telford, London 2001, pp. 474-483.
6. Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned / New Directions. Technical / Regulatory Guidelines. PRB-4. Washington, DC.: Interstate Technology & Regulatory Council. Permeable Reactive Barriers Team. 2005. ([www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org)).
7. Suponik T., Toborowicz K.: Dobór własności węgla aktywnego w celu zastosowania go w technologii bariery remediacyjnej. ZN Pol. Śląskiej, Seria: Górnictwo nr 266, Gliwice 2005, s. 215-225.
8. Suponik T.: Optymalizacja parametrów bariery remediacyjnej dla zanieczyszczonych wód gruntowych obszaru składowiska odpadów. Praca doktorska – praca niepublikowana, Politechnika Śl. w Gliwicach, Gliwice wrzesień 2004.
9. U.S. Department of Defense: Evaluating the longevity and hydraulic performance of Permeable Reactive Barriers at Department of Defense Sites. ESTCP Cost and Performance Report CU-9907, 2003.
10. Wilkin R. T., Puls R.W.: Capstone report on the application, monitoring, and performance of permeable reactive barriers for ground-water remediation. Vol-1, Office of Research and Development, US EPA, Cincinnati 2003.

Recenzent: Dr hab. Anna Karczewska