

## METODI DI CONTENIMENTO DEGLI INQUINANTI

I metodi di contenimento degli inquinanti sono fondamentalmente di due tipi: diaframmi (barriere fisiche) e dreni (barriere idrauliche), ma non di rado vengono adottate soluzioni miste.

### Barriere idrauliche

Le barriere idrauliche, costituite da uno o più pozzi, assorbono le contaminazioni incanalandole verso la depressione piezometrica creata dai loro prelievi. La figura 1 mostra come l'azione contemporanea di più pozzi produca una depressione piezometrica calcolabile con il metodo della sovrapposizione degli effetti.

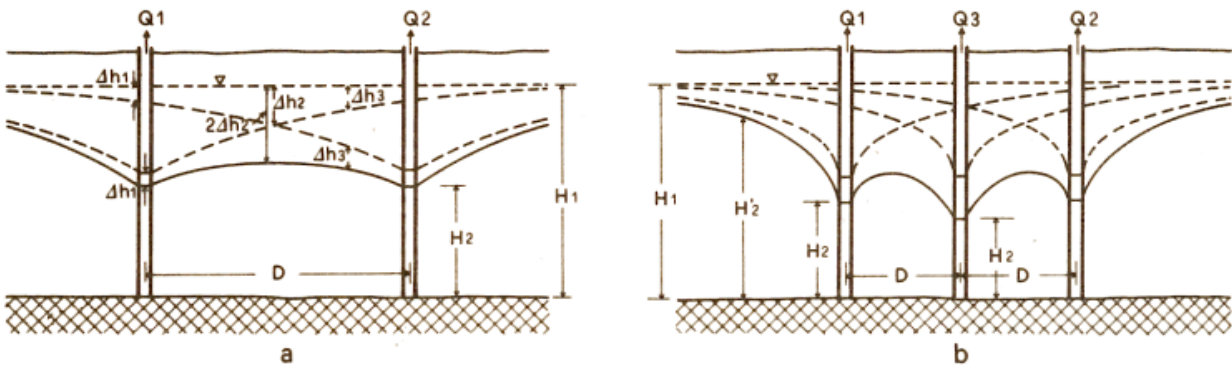


Figura 1 : sovrapposizione degli effetti di più pozzi allineati (J.Bear, 1979)

Ciascun pozzo agisce richiamando verso di sé le acque di falda da un bacino delimitato da uno spartiacque piezometrico, in cui le acque entrano attraverso un fronte di richiamo  $F$  disposto lungo una linea isopiezometrica.

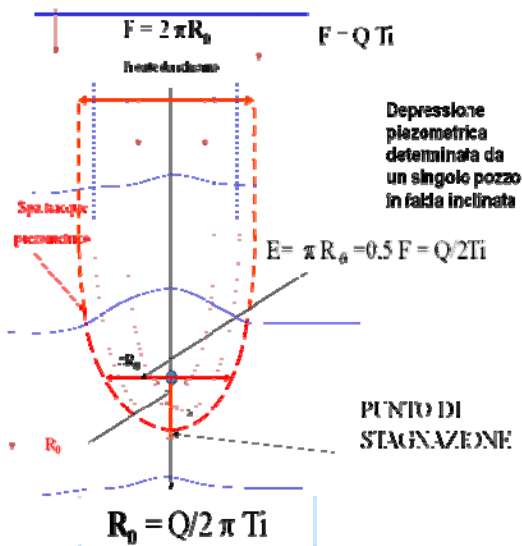


Figura 2: spartiacque e altri elementi della depressione piezometrica

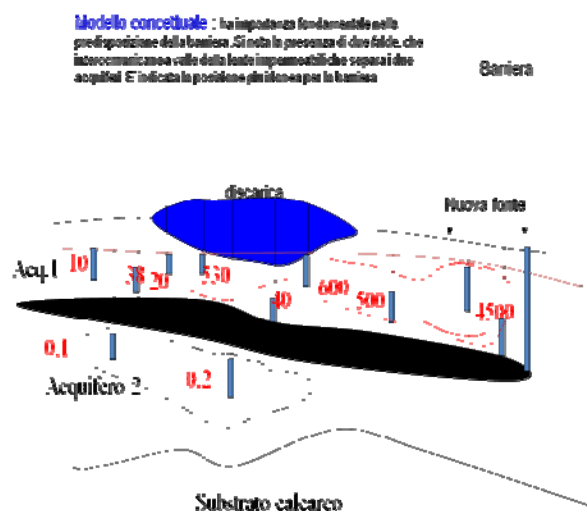


Figura 3: esempio di modello concettuale di una contaminazione ( in rosso i valori di conducibilità elettrica specifica in microSiemes/cm)

Per la progettazione ottimale di una barriera, è indispensabile definire preliminarmente il modello concettuale dell'area da esaminare, che rappresenti schematicamente le modalità di genesi e propagazione della contaminazione presentando i dati geologici e idrochimici fondamentali. Nel caso rappresentato in figura 3, la collocazione dei pozzi barriera tiene conto della presenza di una fonte di contaminazione diversa dalla discarica, definita in base allo studio idrochimico.

## Scelta delle aree favorevoli per motivi geologici

E' necessario verificare che, le aree nelle quali sono posizionati i pozzi, presentino adeguata trasmissività. Si rileva ad esempio che le aree con trasmissività ridotta non consentono spesso la creazione di fronti di richiamo soddisfacenti.

Dalla relazione di Bear (1979) si ricava infatti che

$$R = 1,15 (Tt/S)^{0,5}$$

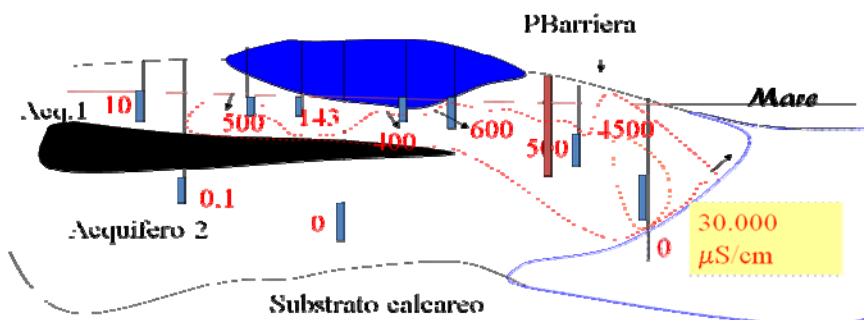
Tale difetto rende necessario il posizionamento di molti pozzi, e incrementa le possibilità di errore, considerando che la variabilità della permeabilità e dello spessore dell'acquifero può dare luogo alla presenza di settori con trasmissività così ridotta da non permettere la formazione di una consistente depressione piezometrica.

Conviene quindi che i pozzi siano posizionati all'interno di aree dotate di buona trasmissività; in tal caso, elemento favorevole all'ampliamento del fronte di richiamo risulta il fatto che la trasmissività diminuisca verso valle, in quanto si può facilmente verificare che gli abbassamenti saranno in tale settore aumentati, e che la depressione piezometrica risulterà più ampia.

Per valutare l'efficacia del pozzo nel determinare il richiamo di inquinanti, è opportuno verificare che l'abbassamento in corrispondenza di  $R_0$  sia sensibile, in base alla relazione:

$$s = H - [h + (R_0 \ln (R_0/r))]$$

Es. se  $H = 100$  m e  $R_0 = 30$  m, con  $h = 98$  m e  $r = 0,3$  m,  $s$  è 1,5 m



**Figura 4:** Caso favorevole per il posizionamento della barriera; la riduzione della trasmissività a valle è garantita dalla presenza del cono di intrusione di acqua marina.

## Tempo necessario alla stabilizzazione piezometrica e idrochimica

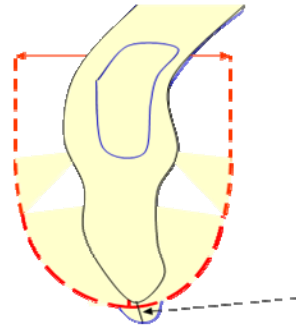
Si nota nel periodo iniziale del funzionamento delle barriere un comportamento molto variabile nel tempo sia della piezometria, sia delle specie chimiche presenti nei pozzi barriera e nei piezometri di controllo.

Facendo riferimento ad esempio al documento EPA "Evaluation of Subsurface Engineered Barriers at Waste Sites, EPA-98" sul contenimento (in questo caso relativo alle barriere attive), si vede che **la prima fase di**

**stabilizzazione (legata principalmente all'assestamento piezometrico) può durare da alcuni mesi a un anno.**

Variazioni idrochimiche dopo stabilizzazione

(USEPA, 2002), "a causa della lentezza del flusso sotterraneo gli **impatti sui pozzi di monitoraggio** potrebbero essere registrati solo dopo anni. Quindi "dopo avere raggiunto la condizione di stato stazionario piezometrico e idrochimico del sistema di contenimento, si deve ammettere la possibilità di registrare dati non in linea con la tendenza generale (di diminuzione, ndr) e che occorra un certo periodo di tempo per raggiungere i livelli di bonifica" (USEPA, 1998b, pag. c5), ovvero è necessario ammettere che inizialmente, si possano registrare

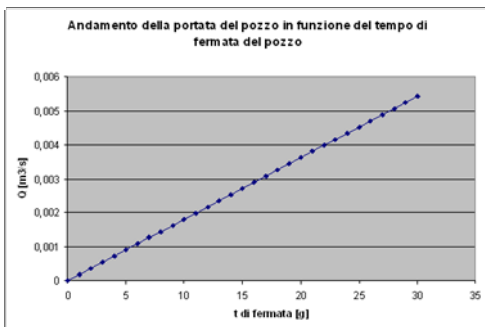


Spostamento del fronte nel periodo di sospensione

in alcuni punti di monitoraggio dei risultati di non univoca interpretazione, per contaminazioni preesistenti o in dipendenza di fattori che sono in grado di aumentare la velocità di flusso dei contaminanti (es. importanti variazioni del gradiente idraulico in seguito a precipitazioni). EPA prevede che, dopo il

raggiungimento della stazionarietà occorrano uno-due anni per avere una stabilizzazione definitiva. Altri riferimenti in:

*Cohen et Al. (Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems, EPA/540/S-97/504, 1997*



$$Q'' = R'' \cdot 2 \cdot \pi \cdot T \cdot i = \left[ R' + \frac{k \cdot t \cdot i}{C \cdot m_e} \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot T \cdot i = Q' + \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot i^2 \cdot t \cdot k}{C \cdot m_e}$$

C rappresenta il fattore di ritardo dell'inquinante. La portata "Q" è quella da imporre per recuperare il contaminante sfuggito durante la sosta t.

### Necessità di sistemi di allarme

Lungo la linea di flusso principale, l'inquinante si muove verso il pozzo finché questo è in funzione; dal momento in cui il pompaggio si arresta, il contaminante a valle del pozzo si sposta verso valle con la velocità della falda. Tenendo conto del ritardo proprio di ciascun inquinante, questo moto avviene con velocità u pari al rapporto fra il prodotto ki e il prodotto del ritardo per la porosità cinematica.

Ad esempio per un punto localizzato in corrispondenza del pozzo, in caso di ritardo 2, i pari a 0,005, k pari a 10<sup>-3</sup> m/s e porosità cinematica 0,15, abbiamo che la velocità reale dell'inquinante è di 1,7·10<sup>-5</sup> m/s, che comporta uno spostamento di poco più di un metro/giorno verso valle.

## Errori frequenti nel progetto delle barriere

### 1. Caso di inquinamenti profondi

Non è raro che la profondità dei filtri dei pozzi sia insufficiente per assorbire tutto l'inquinamento che si desidera estrarre. Nella figura accanto (figura 5) si osserva, infatti, che la profondità della sezione di flusso è minore di quella alla quale si

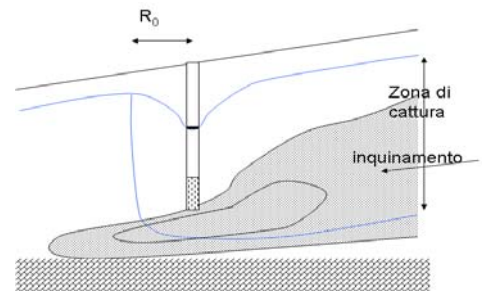
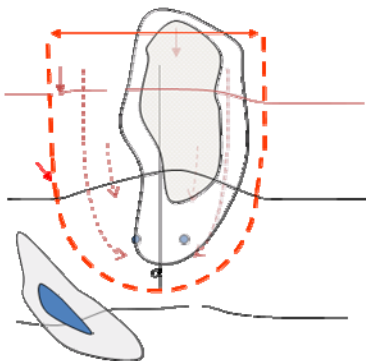


Figura 5: inquinamento parzialmente intercettato

spinge la contaminazione. E' quindi necessaria, tramite una preventiva modellazione della zona di cattura, una preliminare valutazione del suo spessore. Quando la T è sufficientemente elevata, si possono fare queste rilevazioni sul campo, posizionando un sufficiente numero di piezometri a monte del pozzo e verificando per quale portata del pozzo la depressione piezometrica da esso prodotta è sufficientemente ampia per inglobare tutta la contaminazione.

### 2. La barriera non raggiunge tutti i nuclei di contaminazione di valle



Talora la barriera idraulica viene disposta in modo da intercettare solo una parte della contaminazione, per necessità o per scelta, come indicato nella figura accanto (figura 6). In quest'ultimo caso, una parte dell'inquinamento deve essere contenuta con altri interventi per evitarne la propagazione. E' quindi necessario che, nella fase preliminare dello studio, al momento dell'identificazione del modello concettuale, la ricostruzione dei dati idrochimici copra un'area sufficientemente estesa.

Figura 6: Inquinamento preesistente non intercettato

## Disposizione dei punti di monitoraggio

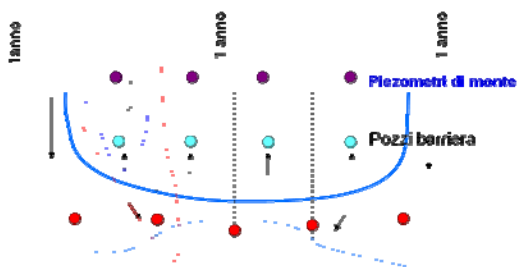


Figura 7: disposizione ideale dei piezometri

Il sistema più idoneo di monitoraggio idrochimico dell'efficacia della barriera è quello di disporre di piezometri posti a **monte e a valle** della barriera, questi ultimi in posizione di **interasse** che ne rivelano il buon funzionamento con una sostanziale diminuzione nel tempo delle contaminazioni. Il sistema deve essere adattato al caso in cui siano presenti nuclei di contaminazione a valle della depressione piezometrica prodotta dalla barriera.

Ad esempio, se come nella figura 8, il piezometro di interasse è soggetto a un inquinamento già presente nel settore in cui è posizionato, questo fatto è rivelato dall'assenza di analogie con il comportamento idrochimico degli altri piezometri, che nel caso specifico non rilevano alcuna contaminazione.

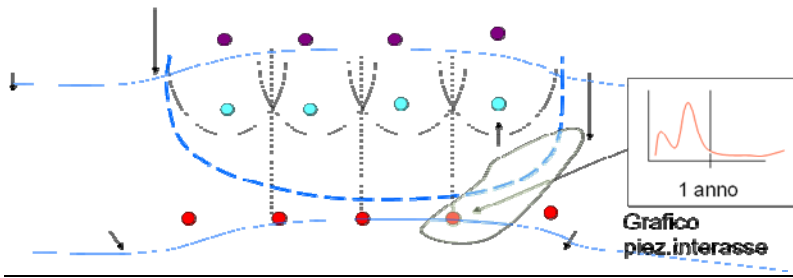
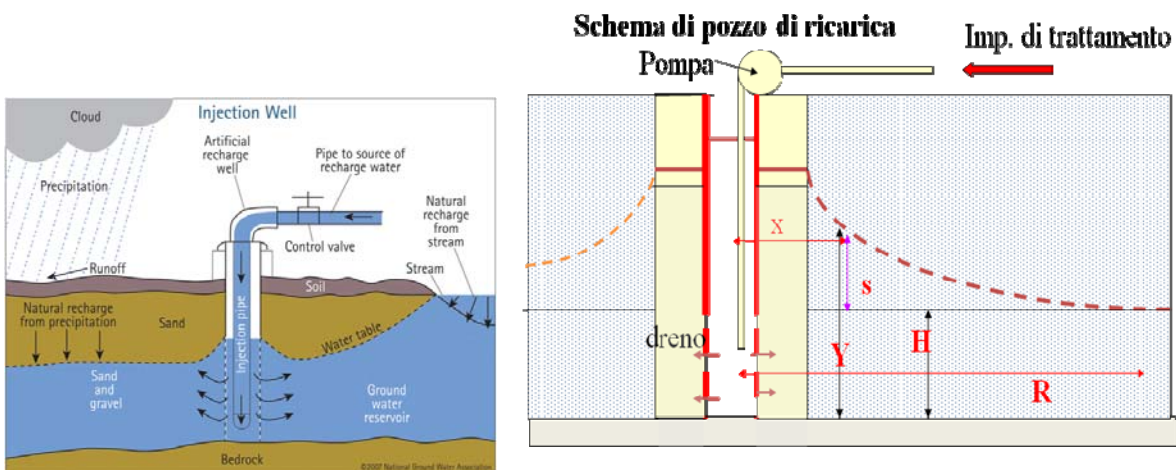


Figura 8: piezometro di interasse localizzato in un punto in cui è presente un nucleo di contaminazione e grafico delle concentrazioni del contaminante nel tempo

### Le barriere di ricarica

Un importante aiuto al funzionamento della barriera idraulica costituita da pozzi di estrazione, può essere fornito con l'impiego dei pozzi di ricarica, disposti in serie come i pozzi delle barriere di estrazione, i quali consentono di iniettare nell'acquifero una portata correttamente calibrata in modo da creare una "dorsale piezometrica" atta a respingere e contenere il flusso di contaminanti.

Nella figura di seguito riportata dal sito [ngwa.org](http://ngwa.org), si nota come per calcolare il sollevamento del livello piezometrico che consegue a questa operazione, si possa applicare la relazione di Dupuit.



$Y = H + \frac{Q \ln(R/x)}{2\pi T}$  (è la medesima relazione di Dupuit)

$Y - H = s = \frac{Q \ln(R/x)}{2\pi T}$  = sollevamento  $H$  = livello iniziale indisturbato

### Distanza pozzi di ricarica – pozzi di estrazione

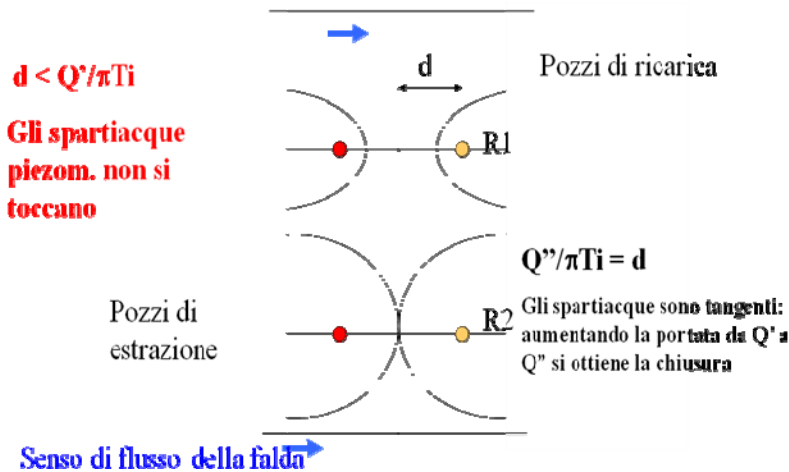
Abbinando le barriere di ricarica e quelle di estrazione si rafforza la sicurezza del sistema di contenimento. Generalmente le barriere di ricarica si rendono particolarmente efficaci in prossimità delle coste, dove il posizionamento di pozzi di estrazione potrebbe determinare l'ingressione di acque salate.

La progettazione e la messa in opera di questi sistema è particolarmente complessa, e necessita di una continua assistenza basata su un efficace monitoraggio dei livelli piezometrici e della qualità delle acque.

Una regola fondamentale è quella di evitare che si mantenga nello spazio fra le due barriere un canale preferenziale entro il quale si muovano acque contaminate che non siano trattenute dalla dorsale

piezometrica creata a valle dalla ricarica. Si può adottare, al fine di evitare questa possibilità, il criterio di fare in modo che le deformazioni piezometriche prodotte dalle due barriere si sovrappongano parzialmente, avvicinandole finché avvenga questa saldatura.

Nel caso di un solo pozzo di ricarica e di uno di prelievo, distanti  $d$  da un asse centrale, **dotati della medesima portata  $Q$** , abbiamo la saldatura delle depressioni quando la distanza  $d$  è uguale alla portata  $Q$  divisa per il prodotto  $\pi T_i$ .



### Miglioramento delle barriere di ricarica: la ricarica selettiva

L'efficacia di questi sistemi dipende dalla disponibilità di acqua di buona qualità, oltre che dalla convenienza del costo; è quindi indispensabile il minimo dispendio possibile di acqua. E' opportuno pertanto adottare il criterio della **ricarica selettiva**, che prevede di attuare il contenimento degli inquinanti alimentando solamente gli acquiferi che garantiscono una "dorsale piezometrica" estesa e un sensibile incremento dei livelli piezometrici della falda di acqua dolce lungo l'interfaccia.

### Diaframmi parziali

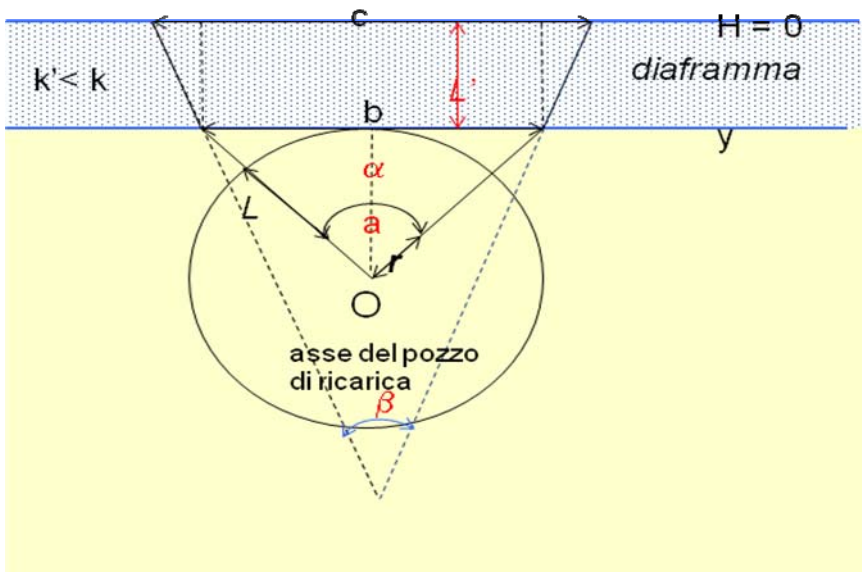
I diaframmi che interessano solo un acquifero (solitamente quello inferiore) svolgono un'importante funzione di contenimento degli inquinanti.

Dal momento che nelle aree costiere non è possibile ottenere lo sbarramento del flusso inquinante senza ridurre eccessivamente la portata della falda né richiamare il cono d'intrusione salino, è utile il posizionamento di una barriera di ricarica dell'acquifero intercettato dal diaframma a valle dello sbarramento.

### Scelta della permeabilità del diaframma

E' possibile scegliere la permeabilità del diaframma, attuando tecniche di iniezione idonee e controllando con prove in sito il raggiungimento della permeabilità che si ritiene ideale.

E' opportuno che la scelta della permeabilità del diaframma sia fatta sulla base di quella dell'acquifero: infatti, si osserva che al disotto di un rapporto di 1/100 fra la permeabilità del diaframma e quella dell'acquifero, i benefici di ulteriori riduzioni di permeabilità sono molto ridotti.



**Abbinamento pozzi di ricarica-diaframmi: valutazione della ricarica uscente dal diaframma in base al rapporto  $k'/k$**

Il rapporto fra la portata  $Q$  immessa in falda orizzontale nel pozzo di ricarica con asse nel punto  $O$ , e la  $Q'$  che si ha con l'introduzione del diaframma, è dato da

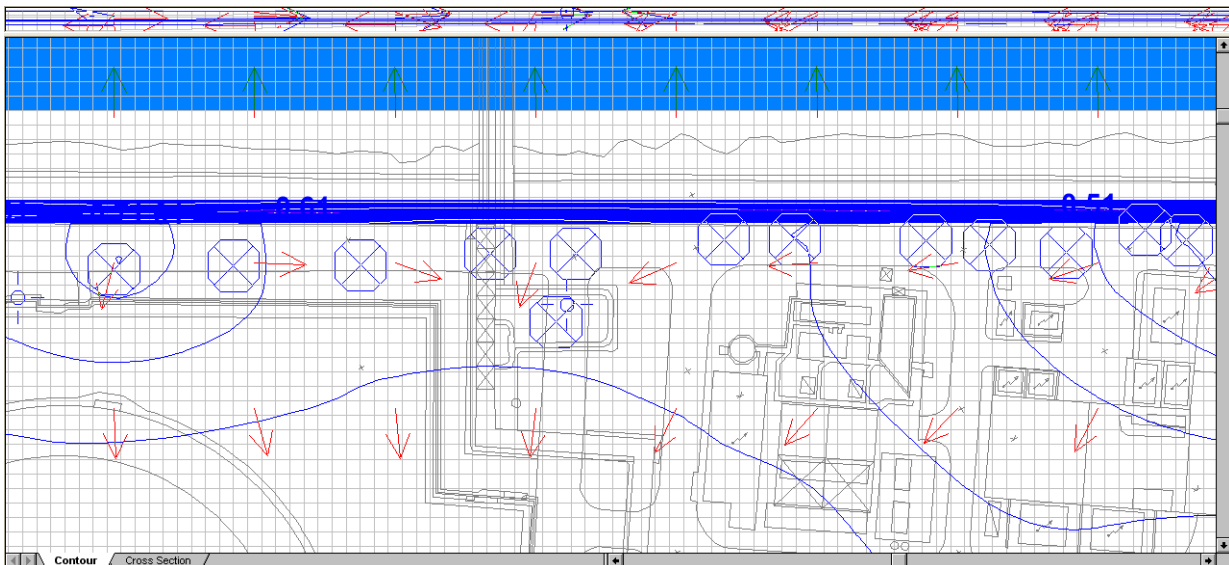
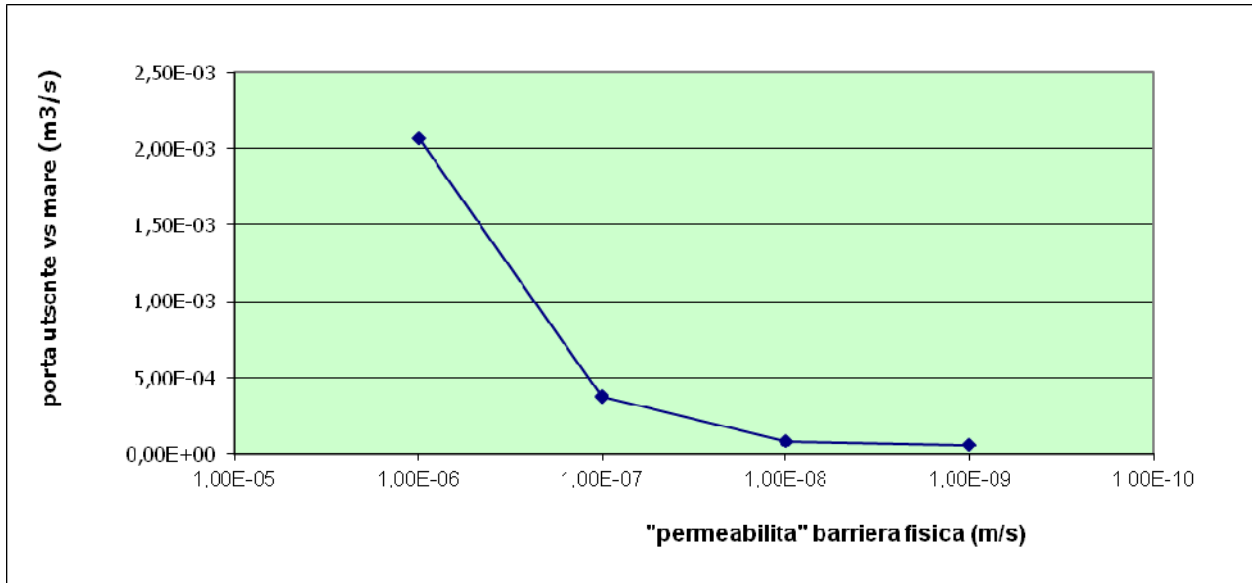
$$Q/Q' = aT \cdot [1 + (\ln(b/a)/\ln(c/b)) \cdot (bT'/aT)]$$

Introducendo un diaframma la cui permeabilità  $k'$  sia tale che il rapporto  $k'/k$  sia inferiore a  $1/100$ , farebbe diminuire di oltre 10.000 volte la portata che attraversa il diaframma, se ciò non comportasse un aumento del dislivello fra il pozzo di ricarica e il mare tale da ostacolare fortemente la riduzione della portata. Si ha infatti che (noto  $h$  e dato che  $H = 0$ ) :  $(h-y)/y = L'/L$ . Questo valore di  $y$  vale per il punto del diaframma distante  $L$  dal pozzo, lungo una sezione normale al diaframma, passante per il pozzo di ricarica.

Si riporta un esempio ricavato da uno scenario modellistico realizzato a supporto della progettazione di un sistema di contenimento fisico in un sito costiero in cui era già attivo un sistema di messa in sicurezza della falda attraverso una barriera idraulica di prelievo e reimmissione (reiniezione) in cui si è verificato come il valore di "permeabilità" della barriera fisica non comporta, al di sotto di  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s, evidenti ulteriori riduzioni alla portata uscente verso gli obiettivi sensibili (parametro utilizzato come target del problema). I dati principali sitospecifici sono i seguenti:

- permeabilità del terreno:  $3 \cdot 10^{-4}$  -  $5 \cdot 10^{-4}$ ;
- "permeabilità" della barriera fisica: variabile fra  $10^{-6}$  e  $10^{-9}$  m/s
- spessore della barriera fisica: 0.8 m
- spessore dell'acquifero: circa 20 m;
- portata iniettata da ciascun pozzo (IW): circa 0.5 – 1 l/s (ridotta in presenza della BF fino a 0.25 l/s);

- portata prelevata dai pozzi di prelievo (PW): variabile da 1.5 – 8 l/s;



Estratto della simulazione modellistica finale in cui sono rappresentate le linee piezometriche e i vettori velocità (scenario con  $k$  barriera fisica =  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s).

## Conclusioni

E' quindi dimostrato che un **buon sistema di controllo** dell'efficienza della barriera, che segnali arresti o malfunzionamenti di uno o più pozzi, permette interventi che, se attuati rapidamente, possono contenere gli inquinanti. Deve quindi essere predisposto un sistema di piezometri **di monte e di interesse**.

L'adozione della **ricarica selettiva** può consentire un miglioramento nella resa delle barriere di ricarica quando se ne rende necessaria l'adozione a completamento delle barriere idrauliche tradizionali.

L'utilizzo di diaframmi è da riservare a casi specifici in cui non si abbiano ripercussioni ambientali negative.

E' consigliato invece l'uso di **diaframmi parziali** abbinati alla ricarica, e l'uso di **diaframmi leggeri** con barriere di ricarica per i casi in cui si vogliono raggiungere elevati livelli di efficienza con costi supportabili.