



MODELLISTICA IDROGEOLOGICA PER LA PROGETTAZIONE DELLE BARRIERE IDRAULICHE

Antonella Vecchio

ISPRA



Criteri di progettazione delle barriere idrauliche

- A cosa serve una barriera idraulica (Pump & Treat)?
 - **Limitare la dispersione della contaminazione (barriera)**
 - L'efficacia del sistema si valuta unicamente in base al **contenimento idraulico**
 - **Rimozione della contaminazione nell'acquifero (P&T)**
 - L'efficacia del sistema si valuta anche in base ai **rendimenti di rimozione degli inquinanti**
- In base alla funzione che la barriera idraulica deve svolgere (contenimento o contenimento + rimozione) cambieranno i criteri progettuali e le valutazioni prestazionali del sistema:
 - **Contenimento**
 - ubicazione dei pozzi e regime di estrazione delle portate in maniera da garantire la continuità del fronte di cattura
 - **Contenimento + Rimozione**
 - ubicazione dei pozzi e regime di estrazione delle portate in maniera da garantire adeguati rendimenti di rimozione



Dimensionamento dei pozzi barriera

- Occorre definire:
 - L'estensione dell'area contaminata oggetto del barrieramento
 - Andamento della piezometria (nelle diverse condizioni idrologiche)
 - Caratteristiche geologiche/idrauliche dell'acquifero:
 - Conducibilità idraulica
 - Gradiente idraulico
 - Andamento del substrato impermeabile (spessore dell'acquifero)
 - Trasmissività
 - Ubicazione degli eventuali recettori sensibili da preservare (corpi idrici superficiali, mare, pozzi ad uso idropotabile o irriguo, zone residenziali):
 - Ubicazione dei pozzi barriera
 - Determinazione dei punti di stagnazione
 - Effetto delle perdite di carico

Fasi del regime di flusso

- In un pozzo di pompaggio:
 - in una prima fase si osserva l'abbassamento del livello d'acqua nell'opera e nelle zone circostanti:
 - **regime non permanente** (deflusso della falda in condizioni di non equilibrio): il profilo della curva di depressione è variabile, legato ad un raggio d'azione e ad un livello dinamico variabile con il tempo di pompaggio
 - se la portata estratta rimane costante, nella pratica si osserva che il livello "dinamico" nell'opera e nell'acquifero circostante, indotto dal pompaggio, tende a rimanere costante dopo un certo tempo dall'avvio del pompaggio:
 - **regime permanente** (deflusso della falda in condizioni di equilibrio): il profilo della curva di depressione è stabile ed è legato ad un raggio d'azione e ad un livello dinamico costante sino a quando non verrà variata la portata emunta
- Nella realtà il raggio d'azione aumenta con il tempo inizialmente in maniera veloce, successivamente in maniera più debole, ma non perviene mai ad un valore costante per cui si parla di **regime quasi permanente**



Fasi della progettazione

- Generalmente, come in qualsiasi opera, la progettazione avviene per approfondimenti successivi:
 - in una prima fase di **analisi preliminare** si effettua un dimensionamento di massima utilizzando ipotesi semplificative e fattori di cautela (per tener conto delle incertezze)
 - In questa fase si adottano solitamente **modelli di tipo analitico**
 - Successivamente, di solito dopo aver messo in opera già un campo pozzi pilota, si passa ad una **progettazione di dettaglio**
 - In questa fase si possono adottare **modelli di tipo numerico** sulla base dei risultati di prove campo

Analisi preliminare

- Valutazione di massima della portata da estrarre dai pozzi:

$$Q_{T,min} = K \cdot i \cdot b \cdot L_{max} = T \cdot i \cdot L_{max}$$

dove: K è la conducibilità idraulica media e T è la trasmissività media dell'acquifero, i è il gradiente idraulico, b è lo spessore dell'acquifero (supposto contaminato) e L_{max} è l'ampiezza massima del plume in falda.

- Ai fini del dimensionamento preliminare occorre valutare:
 - la distanza dal pozzo in cui l'effetto del pompaggio è trascurabile (**raggio d'influenza del pozzo – R**);
 - la distanza a valle del pozzo in cui si verifica la condizione di flusso nullo (**punto di stagnazione – x_s**);
 - la larghezza della zona, misurata trasversalmente all'asse del flusso, ove si verifica il fenomeno di richiamo di acqua della falda verso il pozzo (**fronte di richiamo del pozzo – F**).

Ipotesi di Dupuit

- Il funzionamento dell'opera determina un regime permanente (condizione di equilibrio);
- Acqua e roccia sono supposte incompressibili;
- La componente orizzontale della velocità dell'acqua è uguale in tutti i punti della stessa verticale (superfici piezometriche piane);
- Applicabilità della legge di Darcy in moto laminare (generalmente valido nella maggior parte dei casi);
- La componente verticale della velocità è trascurabile rispetto alla componente orizzontale;
- Il mezzo poroso è supposto omogeneo ed isotropo;
- Il raggio d'influenza è costante e la curva di depressione si raccorda con regolarità al livello piezometrico indisturbato
- il pozzo ha un'efficienza idraulica del 100% (si trascurano le perdite di carico);
- il pozzo è completo, cioè filtra tutta la falda.

Equazioni di Dupuit

- Falda freatica molto potente (b elevato):

$$Q = \pi \cdot K \cdot \frac{(H^2 - h^2)}{\ln \frac{R}{r}}$$

raggio di influenza

- Falda freatica poco potente e falda in pressione:

$$Q = 2\pi \cdot K \cdot b \cdot \frac{(H - h)}{\ln \frac{R}{r}}$$

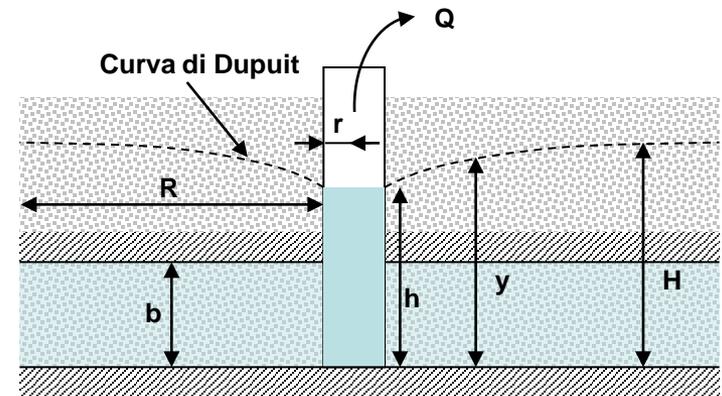
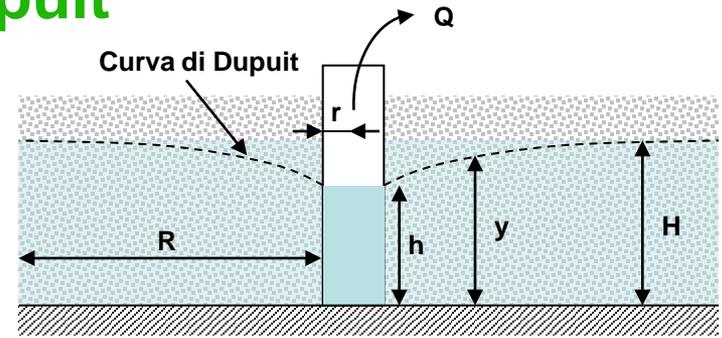
raggio di influenza

$$x_s = \frac{-Q}{\pi \cdot K \cdot i \cdot b}$$

punto di stagnazione

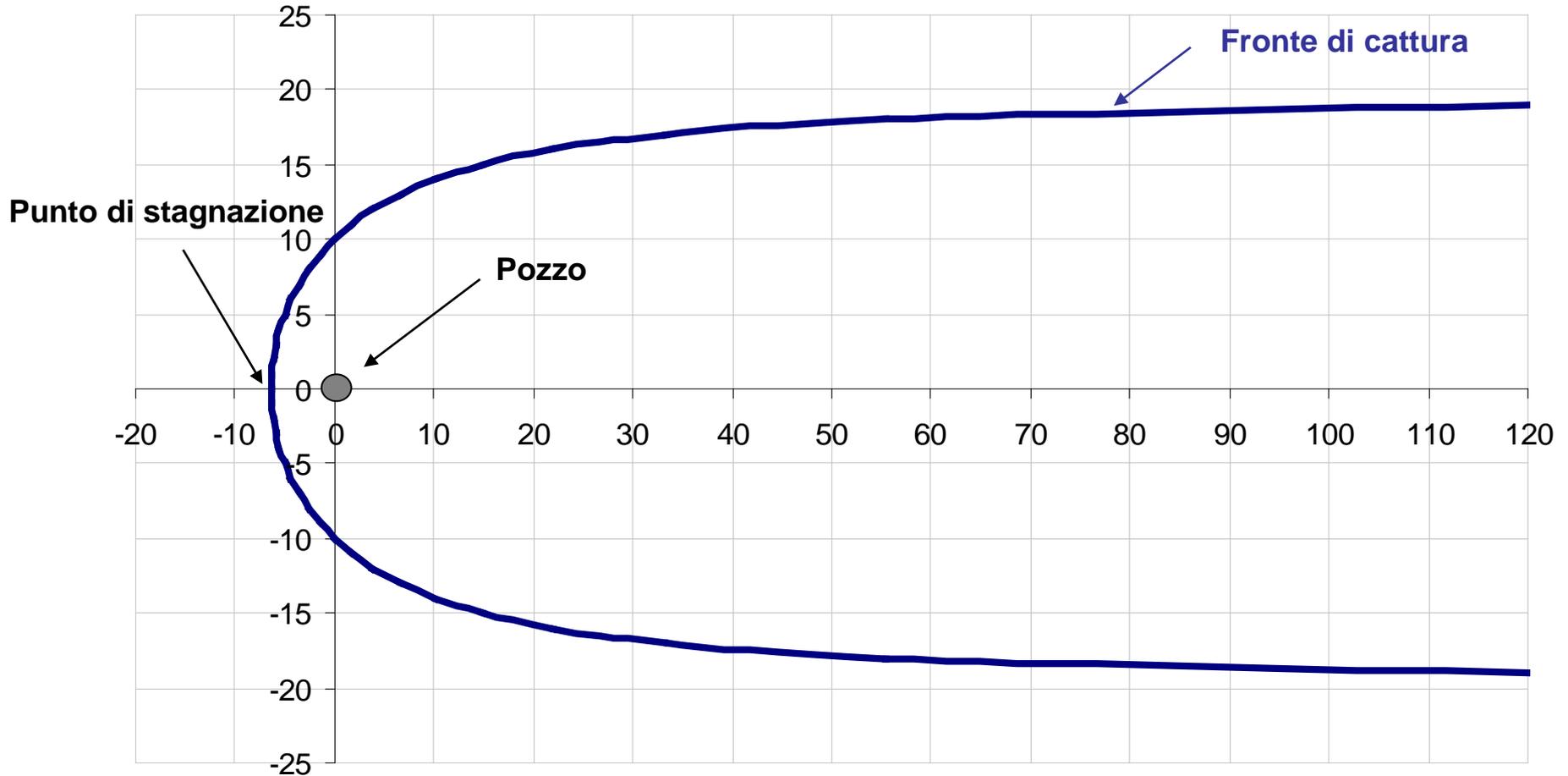
$$x = \frac{-y}{\tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i \cdot y}{Q}\right)}$$

eq. fronte di cattura





Andamento del fronte di cattura (Dupuit)



Q = 20000 m³/giorno b = 100 m K = 1000 m/giorno i = 0.005

Raggio di influenza

- Equazioni empiriche:

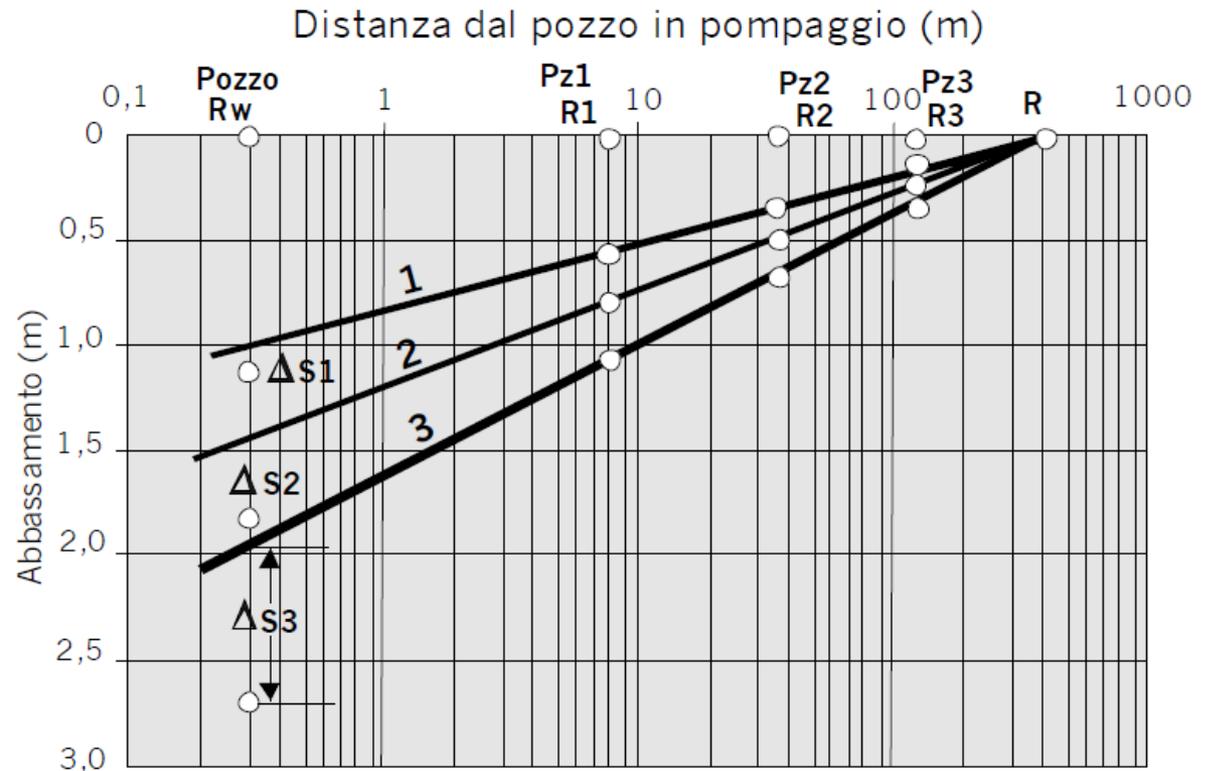
$$R = 3000 \cdot (H - h) \cdot \sqrt{K}$$

formula di Sichardt

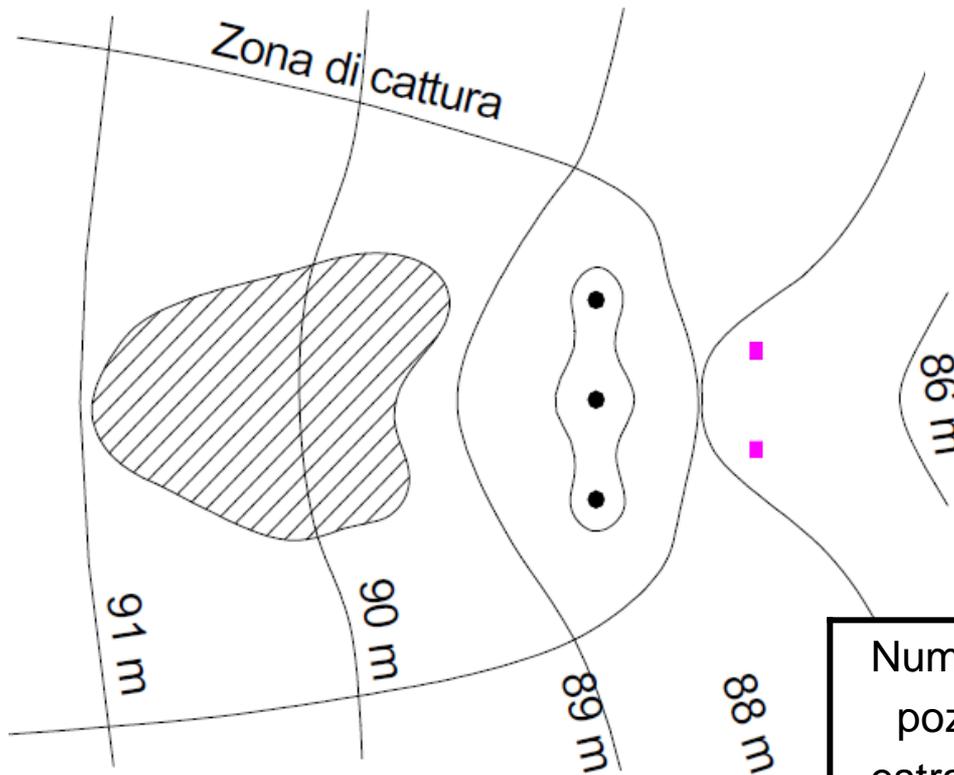
$$R = 550 \cdot \sqrt[4]{H \cdot K \cdot i}$$

formula di Cambert

- Prove in sito:
 - Prove di portata
 - Prova a gradini

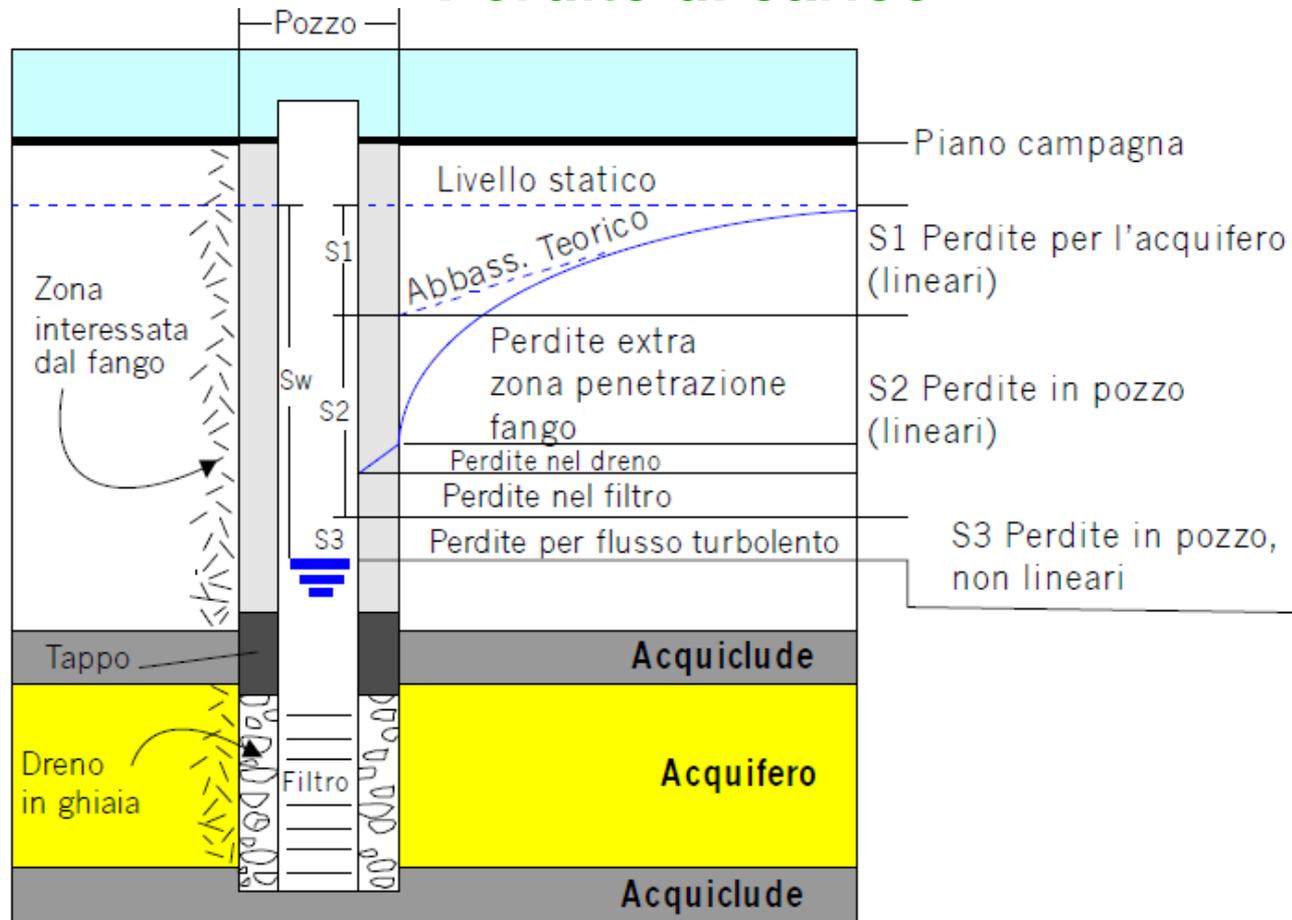


Distanze ottimali tra pozzi adiacenti



Numero di pozzi di estrazione	Distanza ottimale tra pozzi adiacenti	Massima ampiezza della zona di cattura
1	---	$0.5 Q_n / (Kbi)$
2	$0.32 Q_n / (Kbi)$	$Q_n / (Kbi)$
3	$0.40 Q_n / (Kbi)$	$1.5 Q_n / (Kbi)$
4	$0.38 Q_n / (Kbi)$	$2 Q_n / (Kbi)$

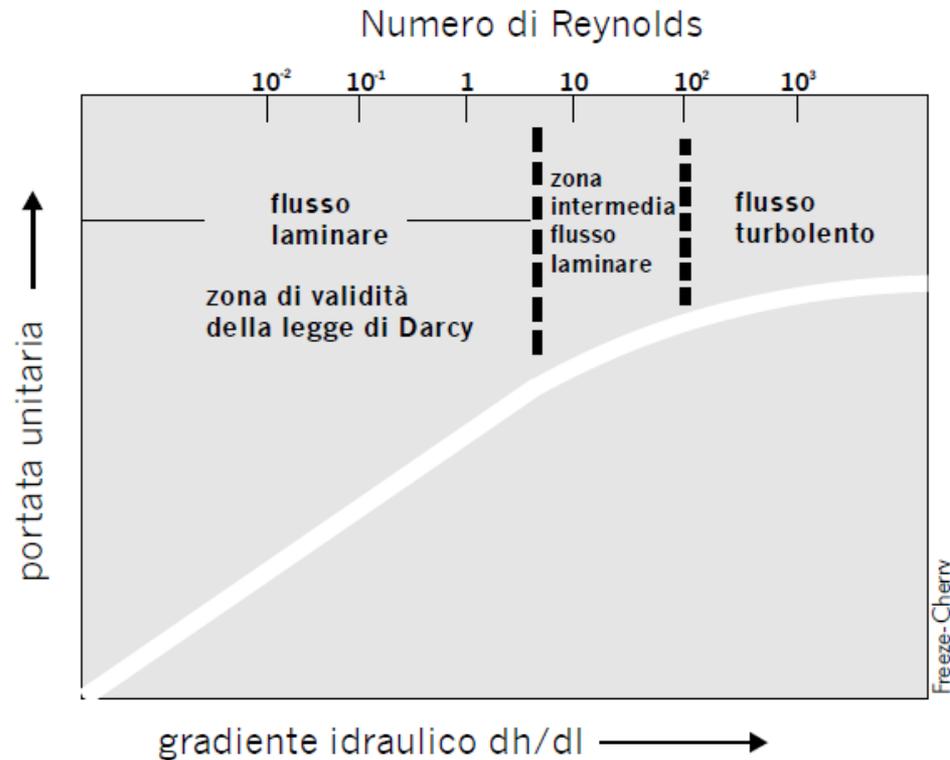
Perdite di carico



$$S = S_{falda} + S_{pozzo} = S_1 + (S_2 + S_3)$$

$$S_{pozzo} = B \cdot Q + C \cdot Q^2$$

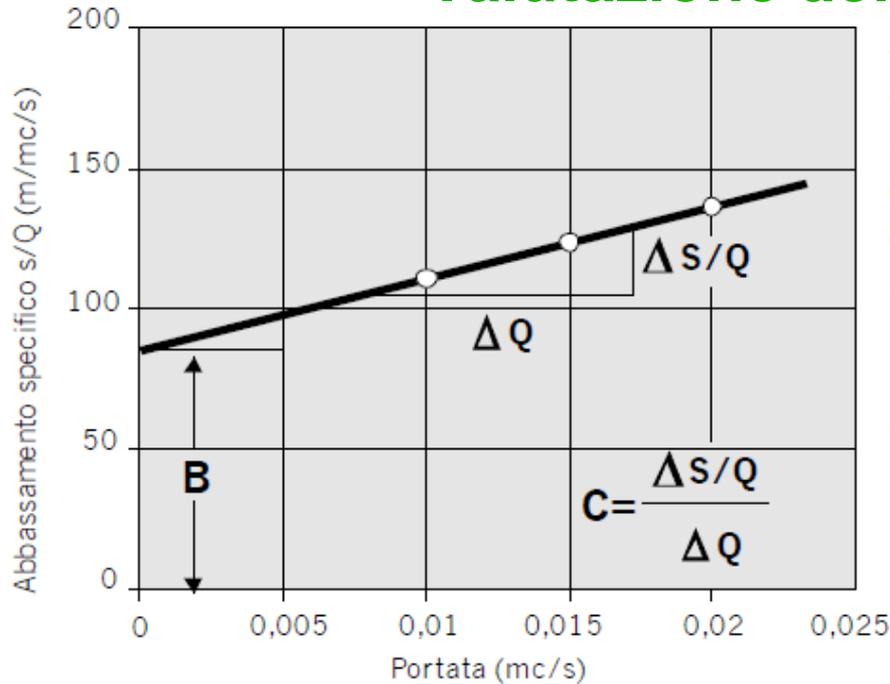
Perdite di carico non lineari



$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_{50}}{\mu}$$

- Se il numero di Reynolds supera il valore soglia (circa 10), la legge di Darcy non è applicabile e si entra in regime turbolento.
- La velocità di flusso varia con la radice quadrata del gradiente idraulico e quindi gli abbassamenti registrati in pozzo con il quadrato della portata (in alcuni casi l'esponente è anche maggiore di 2)
- Gli abbassamenti di tipo non lineare sono importanti, ad esempio, in pozzi di piccolo diametro, con filtri corti, poco porosi o con uno sviluppo insufficiente

Valutazione della perdite di carico



$$S_{\text{pozzo}} = B \cdot Q + C \cdot Q^2$$

- Gradini di portata:

- $Q_1 = 10 \text{ l/s}$

- $Q_2 = 15 \text{ l/s}$

- $Q_3 = 20 \text{ l/s}$

- Coefficienti:

- **B = ordinata all'origine**

- **C = coefficiente angolare**

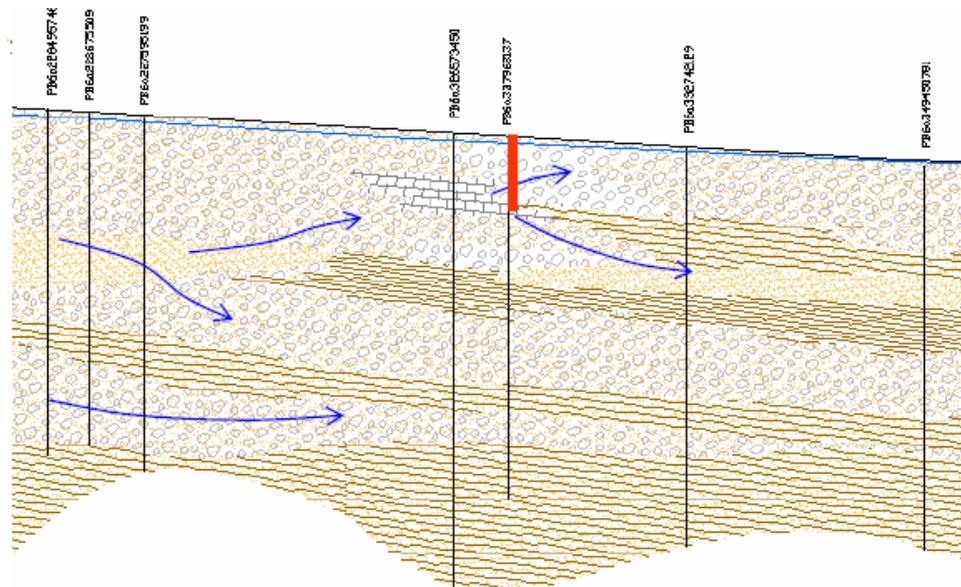
	Abbassamento specifico s/Q (m/mc/s)			
	Pozzo	Pz1	Pz2	PZ3
Primo gradino	110	54	32	17
Secondo gradino	123	53	32	16
Terzo gradino	136	54	32,5	16,5

Utilizzo dei modelli analitici in casi complessi

- I valori rappresentativi assegnati ai parametri idrogeologici corrispondono ai **valori medi** sulla base dei dati di caratterizzazione.
- Consentono una riproduzione schematica delle modalità di circolazione idrica anche in sistemi complessi, e di evidenziare il peso dei diversi parametri della struttura geologica nel determinare piezometria, portate e bilancio.
- Sono quindi utili, nella fase preliminare della modellazione, ad un dimensionamento di massima della barriera magari per una prima applicazione di campo
- Sono utili inoltre per valutare quali elementi della struttura idrogeologica sia necessario approfondire con ulteriori indagini di campo al fine di evitare errori nella successiva modellazione numerica.

Modellazione numerica

- E' sicuramente necessaria nei casi in cui non può essere trascurata l'eterogeneità della matrice acquifero
- La presenza di eterogeneità nel sottosuolo, determina l'afflusso di contaminanti verso le porzioni dell'acquifero dotate di maggiore trasmissività.





Equazioni generali del trasporto in falda

Equazioni di trasporto

Le equazioni di trasporto in falda sono le seguenti:

- Equazione di moto del fluido: **Equazione della filtrazione o Equazione di Richards**
- Equazione di trasporto dei contaminanti: **Equazione del moto convettivo/dispersivo o ADE Equation (“Advection Dispersion Equation”)**

Le due equazioni di trasporto servono a descrivere rispettivamente:

- il moto del fluido (**acqua**) in un mezzo poroso (**terreno permeabile per porosità**)
- il moto delle sostanze (**contaminanti**) nel fluido (**acqua**)

Equazione di Richards

Ipotesi

Analisi monofase: l'unica fase in movimento è la fase liquida (**acqua**); l'eventuale fase aeriforme presente è a pressione costante.

Campo di moto e di pressione: conoscenza nell'intorno della porzione di acquifero esaminata (**dominio di studio**) del campo di moto (**velocità**) e di pressione (**carico idraulico**).

Caratteristiche dell'acquifero: conoscenza delle proprietà dell'acquifero (**conducibilità idraulica, trasmissività**) in ogni punto del dominio di studio.

Legge di conservazione della massa: la massa d'acqua in uscita deve eguagliare la diminuzione subita dalla massa stessa all'interno di un volume elementare (**v.e.**).

$$\frac{\partial(\rho \theta_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \pm W$$

$$\frac{\partial(\rho \theta_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \pm W$$

Variazione della massa nel tempo
Nel saturo $\theta_w = \theta_T$

Flusso di massa in uscita

Termine generativo
(pozzi/sorgenti)

Variazione massa nel tempo: l'aumento (immagazzinamento) o riduzione della massa d'acqua nel tempo è dovuta alla variazione del grado di saturazione del mezzo (terreno insaturo), alla variazione della porosità con la pressione (deformazione/consolidazione in mezzo saturo), alla variazione della densità del fluido (temperatura, concentrazione sostanze disciolte).

Termine generativo: considera la presenza di pozzi (riduzione della massa) o sorgenti/ricariche (aumento della massa) nel dominio studiato.

Flusso di massa: vale la Legge di Darcy

$$v_i = -K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad \text{con } x_i = x, y, z$$

Meccanismi di trasporto degli inquinanti

Convezione (“Advection”): in scala microscopica le particelle di soluto si muovono con la stessa velocità dell’acqua all’interno dei pori ovvero **il trasporto degli inquinanti non influenza il modello del flusso di falda**; la velocità di flusso è pari alla **“velocità efficace”**

$$v_{e,i} = \frac{v_i}{\theta_e}$$

con

$v_{e,i}$ = velocità efficace ($i = x, y, z$)

v_i = velocità di Darcy ($i = x, y, z$)

θ_e = porosità efficace

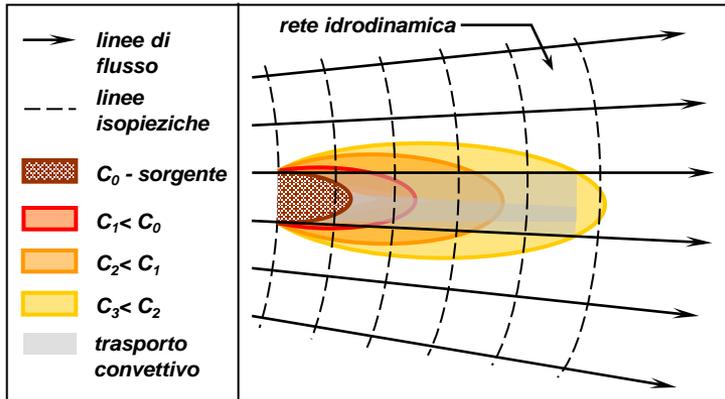
Dispersione idrodinamica: si compone di due processi la **diffusione molecolare** (indipendente dal trasporto e dovuta a variazioni di concentrazione) e **dispersione meccanica** (dovuta a variazioni locali della velocità del flusso). Si ipotizza una **relazione lineare** tra il coefficiente di dispersione meccanica e la velocità del flusso. Il coefficiente di proporzionalità è dato dalla **“dispersività”**

$$D_i = D_0 + \alpha_i \cdot v_{e,i}$$

con

α_i = dispersività ($i = x, y, z$)

D_0 = coeff. di diffusione



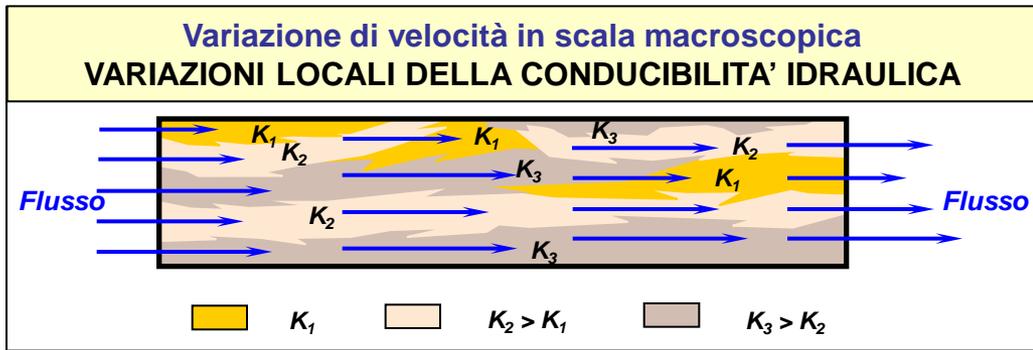
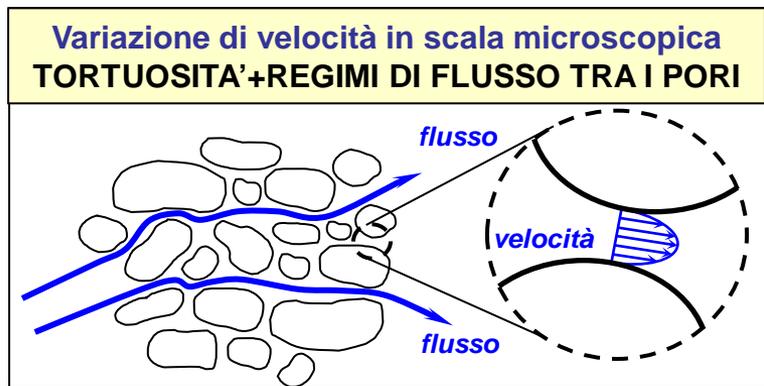
CONVEZIONE + DISPERSIONE IDRODINAMICA

Dispersione Idrodinamica
 il contaminante si "disperde" al di fuori della regione in cui si muoverebbe per effetto della sola convezione

Convezione ("Advection")
 il contaminante viene veicolato dal flusso di falda lungo la direzione del moto

Dispersione Meccanica
 il contaminante si disperde lungo la direzione di moto a causa della tortuosità dei pori e di disomogeneità locali

Diffusione molecolare
 il contaminante si diffonde per effetto del gradiente di concentrazione



Equazione ADE

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_{e,x} \frac{\partial C}{\partial x} - v_{e,y} \frac{\partial C}{\partial y} - v_{e,z} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t} \pm r$$

Termine dispersivo

Termine convettivo

Termine generativo
(trasformazione inquinanti)

Termine generativo: considera i meccanismi di trasformazione degli inquinanti

- Degradazione del primo ordine: degradazione chimica e/o biologica degli inquinanti.
- Ritardo: anche se a livello microscopico le particelle si muovono con la stessa velocità del fluido, l'interazione con le particelle di suolo (adsorbimento/rilascio) provoca a scala macroscopica una riduzione della velocità media degli inquinanti rispetto alla velocità media della falda ("ritardo").

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_{e,x} \frac{\partial C}{\partial x} - v_{e,y} \frac{\partial C}{\partial y} - v_{e,z} \frac{\partial C}{\partial z} = R \frac{\partial C}{\partial t} + \lambda C$$

Ritardo

Degradazione

DEGRADAZIONE DEL 1° ORDINE

La riduzione percentuale di massa di contaminante è data da:

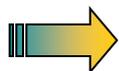
$$\frac{dM}{M} = \lambda * dt$$

Integrando e passando alle concentrazioni si ottiene:

$$C = C_0 * e^{-\lambda * t}$$

COSTANTE DI DECADIMENTO

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{0,5}}$$



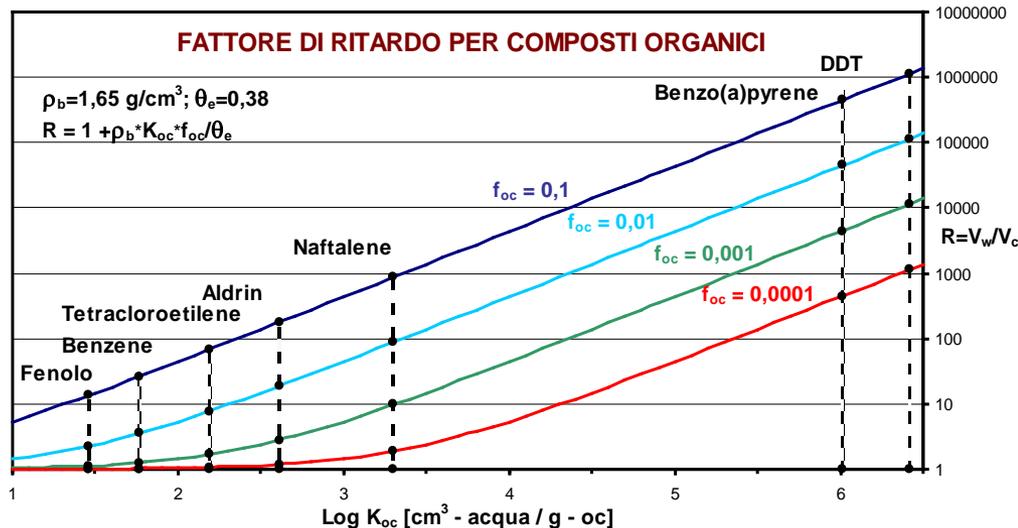
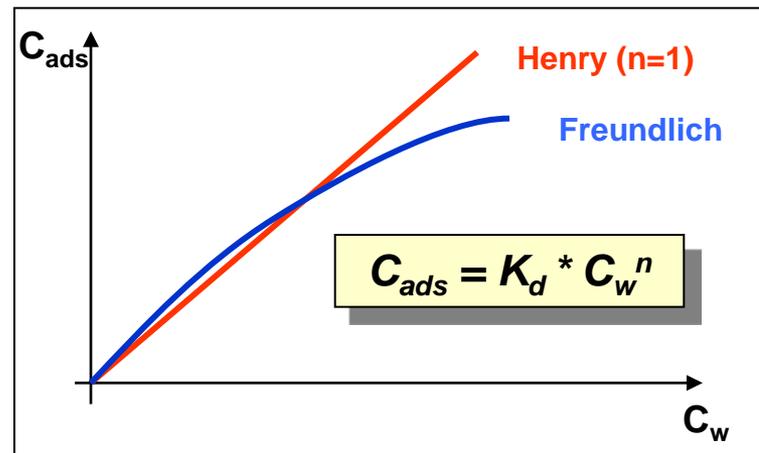
volume di contaminante che si è consumato nella reazione per unità di volume e per unità di tempo

TEMPO DI EMIVITA

$$t_{0,5}$$



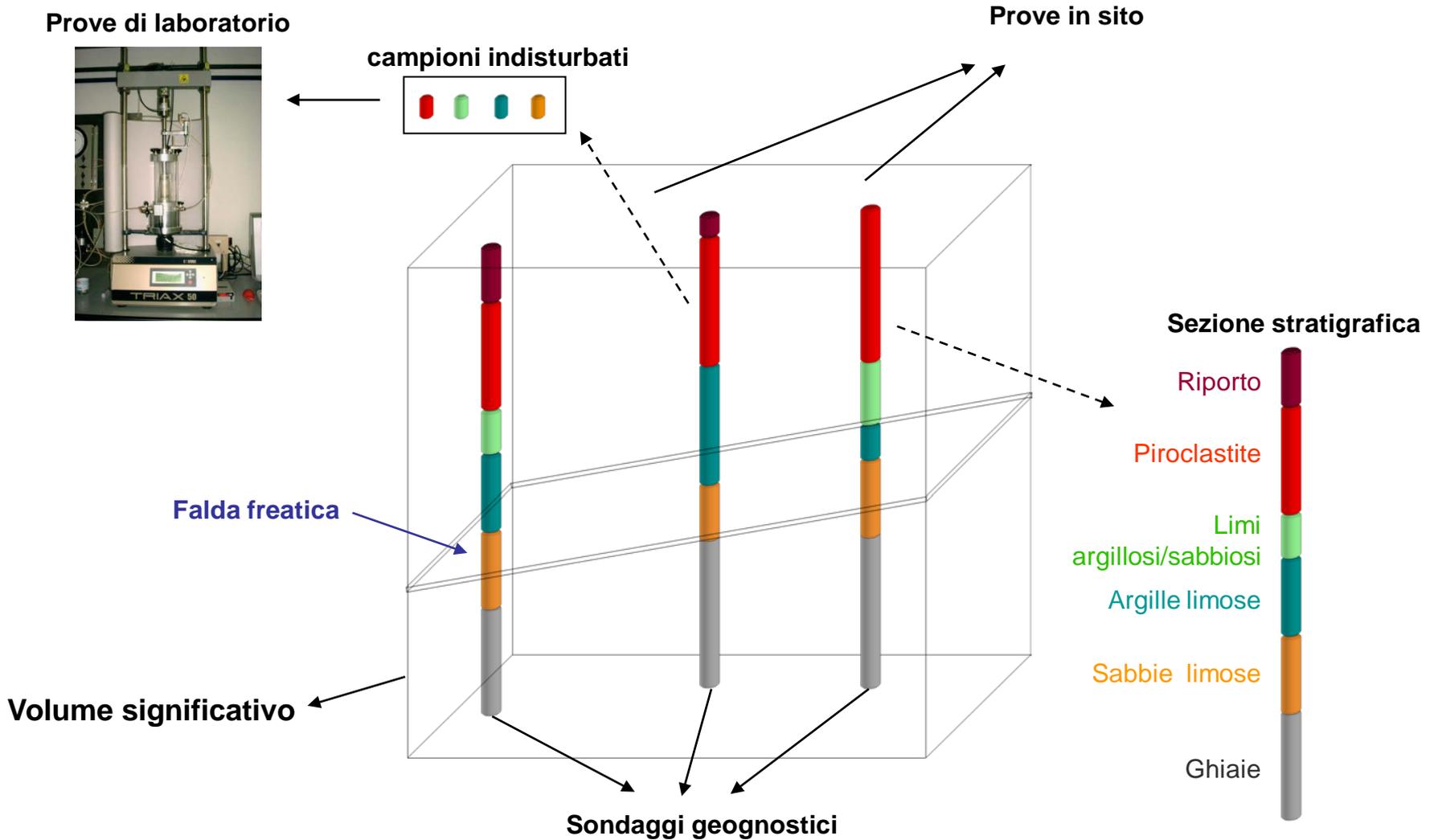
tempo in cui la concentrazione di contaminante si riduce alla metà di quella iniziale

ADSORBIMENTO


Determinazione dei parametri idrogeologici

- Nel caso di acquiferi eterogenei (anche soltanto per l'effetto di compattazione del materiale con la profondità e per la presenza di paleoalvei molto più permeabili) i filetti fluidi si muovono con velocità diverse alle diverse profondità e tendono a muoversi verso gli strati a maggiore permeabilità.
- La posizione dei filtri nei piezometri deve quindi tener conto, anche nel caso di acquifero monostrato, di questa particolarità, predisponendo le prove di permeabilità nei tratti più significativi.
- I tratti meno permeabili, purchè identificati in fase di raccolta dati e di caratterizzazione del sito, possono essere schematizzati anche attraverso una stima di massima dei parametri idrogeologici (permeabilità, trasmissività).

Modello Idrogeologico



Condizioni al contorno

Per l'applicazione di un modello numerico è necessario fissare le condizioni al contorno:

Moto del fluido (Equazione di Richards):

- Carico idraulico al contorno (condizione di Diriclet)
- Flusso/velocità al contorno (condizione di Neumann)
- Trasferimento di massa in/out dal dominio (condizione di Cauchy)
- Presenza di Pozzi (termine generativo)

Trasporto dei contaminanti (ADE Equation):

- Massa/concentrazione al contorno (condizione di Diriclet)
- Flusso convettivo/dispersivo al contorno (condizione di Neumann)
- Trasferimento di massa in/out dal dominio (condizione di Cauchy)
- Presenza di Pozzi (termine generativo)



Volume significativo

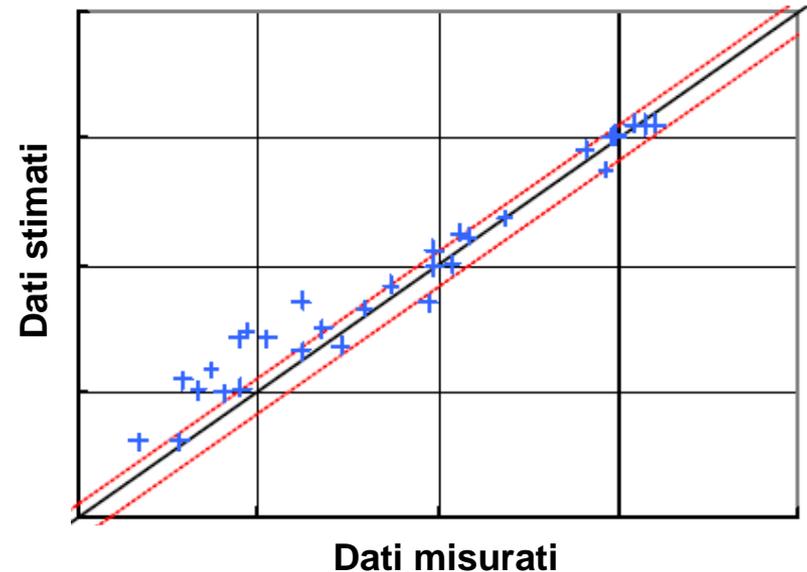
- Quanto estendere le indagini?
- Fino a dove estendere il dominio della modellazione?

Volume significativo:

“La parte di sottosuolo che, con le sue proprietà, influenza in modo apprezzabile il comportamento di un’opera o di un sistema”

Calibrazione

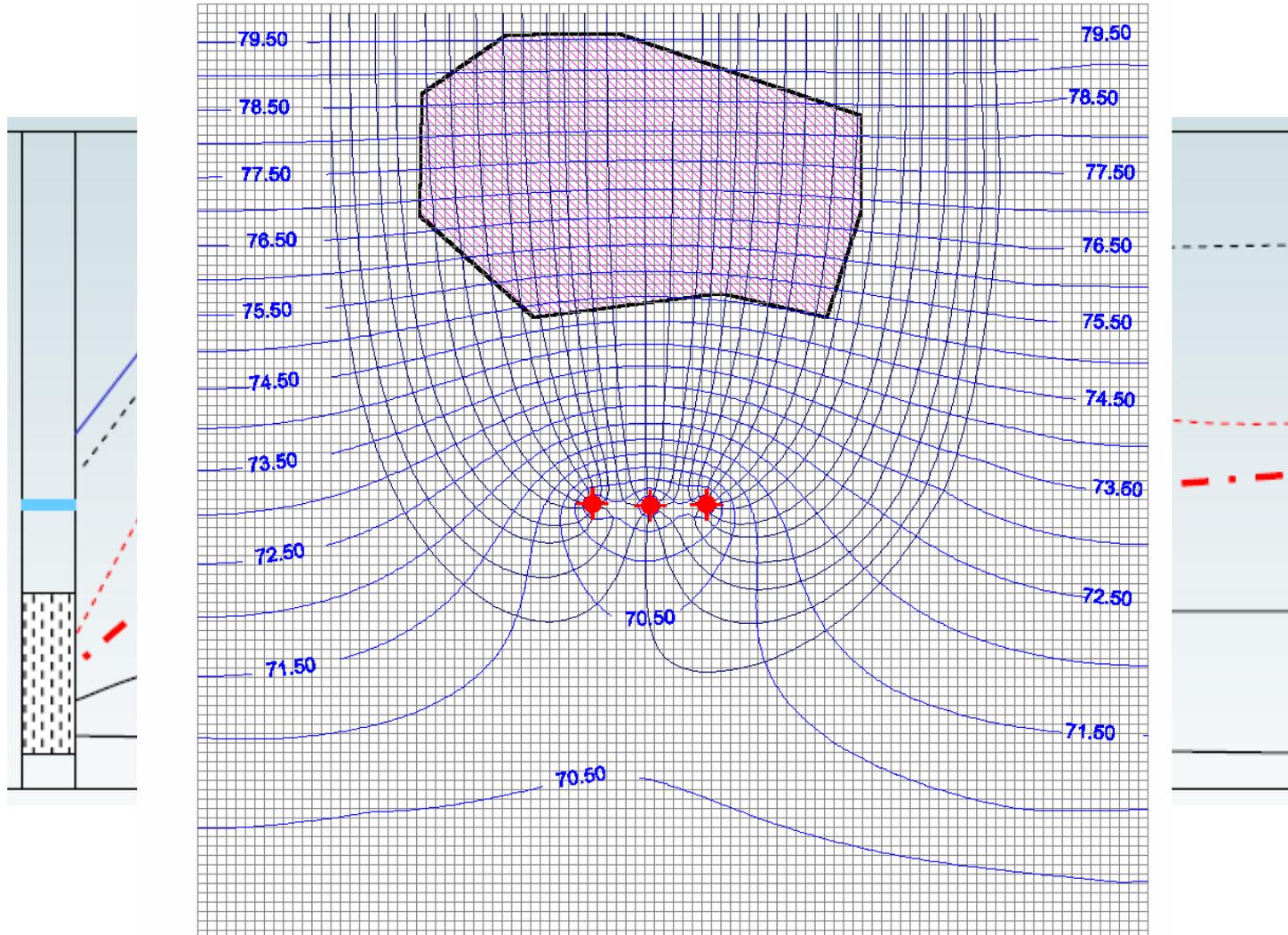
- Una volta definito il dominio di studio, con le opportune caratteristiche idrogeologiche e le condizioni al contorno si passa alla fase di **calibrazione**.
- La calibrazione viene effettuata effettuando una simulazione del modello in caso di barriera assente o, nel caso di presenza di un campo pozzi di prova, nel caso di pozzi in marcia, confrontando i dati piezometrici simulati dal modello con quelli misurati nei piezometri di monitoraggio.
- Il confronto può essere effettuato:
 - in via qualitativa (**analisi di regressione**)
 - In via quantitativa (**calcolo dello scostamento**) in termini di Errore Medio (**MAE**) e di Scarto Quadratico Medio (**RMSE**)



$$MAE = \frac{\left(\sum |y_i - \hat{y}_i| \right)}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

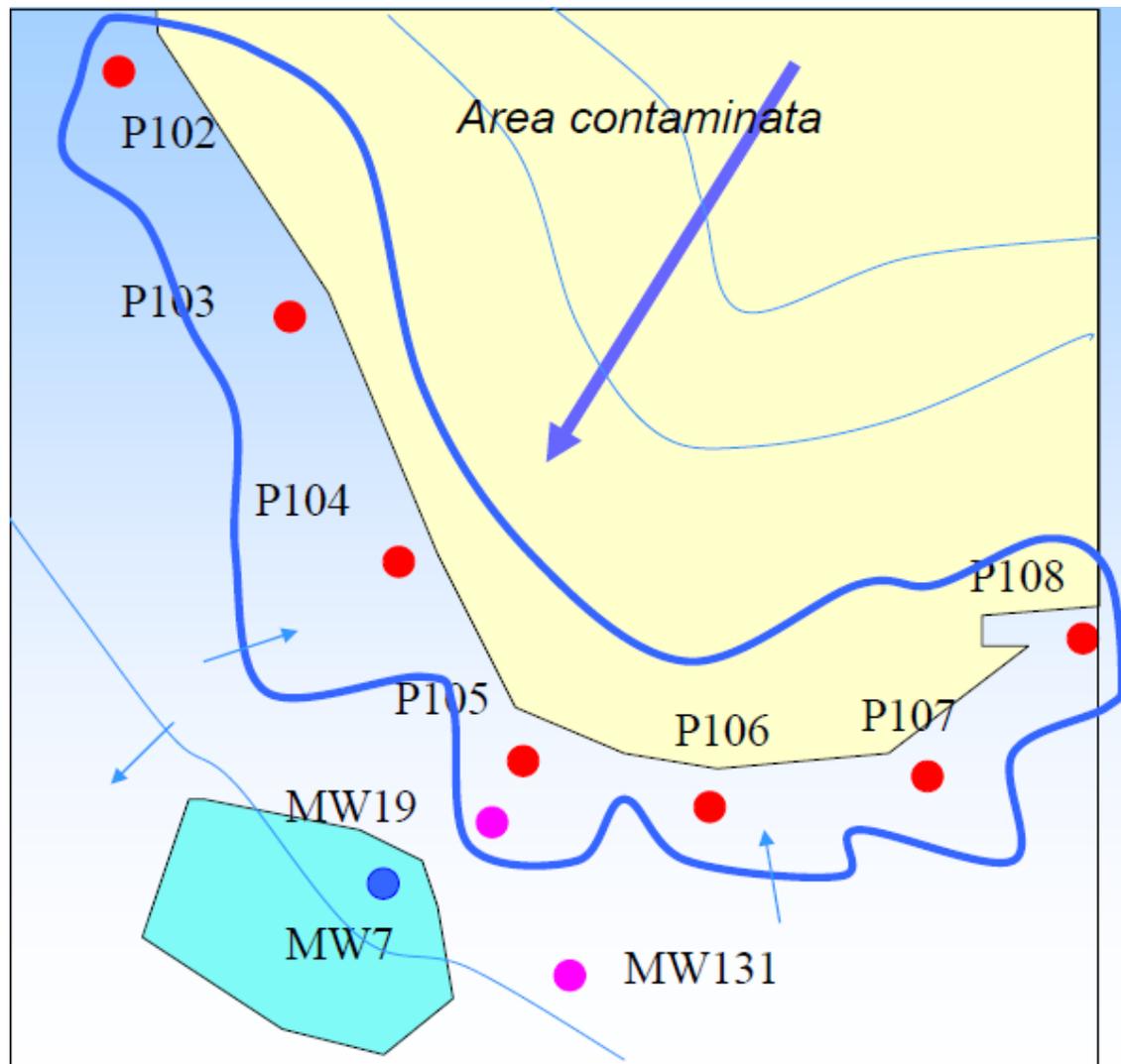
Effetti di una modellazione non corretta



Effetti di una modellazione non corretta

Nonostante le isopieze mostrino che la barriera intercetta il flusso di falda, a valle alcuni pozzi (MW7 e MW131) risultano contaminati.

Ciò perché vi sono strati a permeabilità maggiore che veicolano la contaminazione, mentre la barriera è progettata sulla base del valore medio di permeabilità del mezzo.



Considerazioni conclusive

- La progettazione e realizzazione delle barriere idrauliche richiede una tempistica relativamente breve e per questo le fa preferire ad altri sistemi di contenimento/trattamento delle acque sotterranee.
- Tuttavia le barriere idrauliche sono sempre di più viste come un'opera provvisoria a causa del fatto che spesso i dati di campo contraddicono le previsioni incoraggianti in fase modellistica
- Pertanto la modellistica di progettazione deve seguire necessariamente step successivi di approfondimento ed essere finalizzata sempre più ad indirizzare gli sforzi di indagine/monitoraggio per la successiva messa a punto del sistema.
- In tal modo sarà possibile consolidare questa strategia di contenimento idraulico e renderla più accettabile ed affidabile da parte degli stakeholders coinvolti
- Importante da questo punto di vista è la ritaratura del modello sulla base dei dati di campo una volta messo in marcia il sistema.