

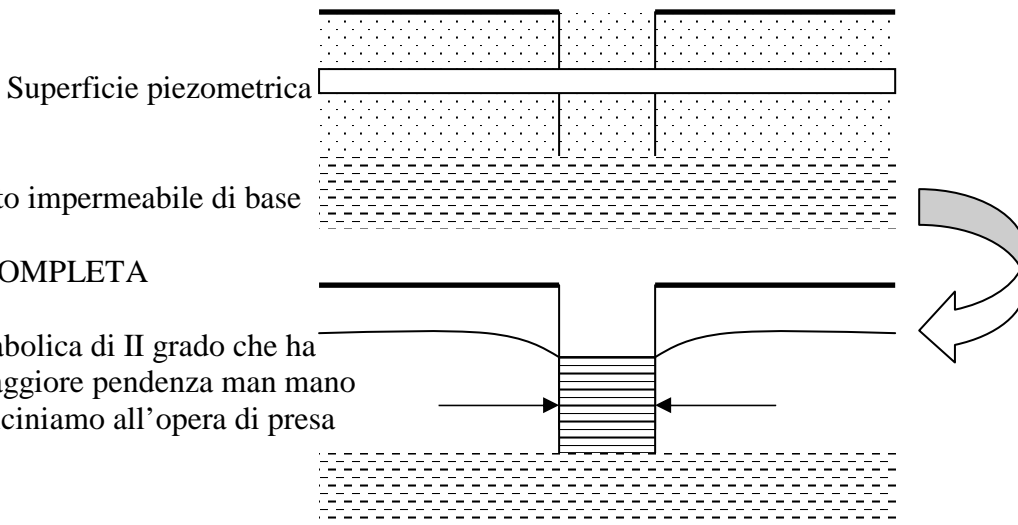
Si hanno due tipi di opere di captazione:

- **Gallerie con trincee drenanti** (opere piuttosto superficiali perpendicolari alla direzione del flusso idrico sotterraneo);
- **Pozzi di prelievo** (scavati anche a mano, si 1 cm di diametro, o meccanicamente fino a molti metri di profondità).

Quando l'opera di captazione raggiunge lo strato impermeabile dell'acquifero l'opera è detta completa.

Per quanto riguarda, ad esempio, gli acquiferi carsici non c'è una superficie di fondo ben definita il pozzo è incompleto e non raggiunge la superficie di contatto tra la zona satura e quella sovrassatura.

### Trincea drenante:

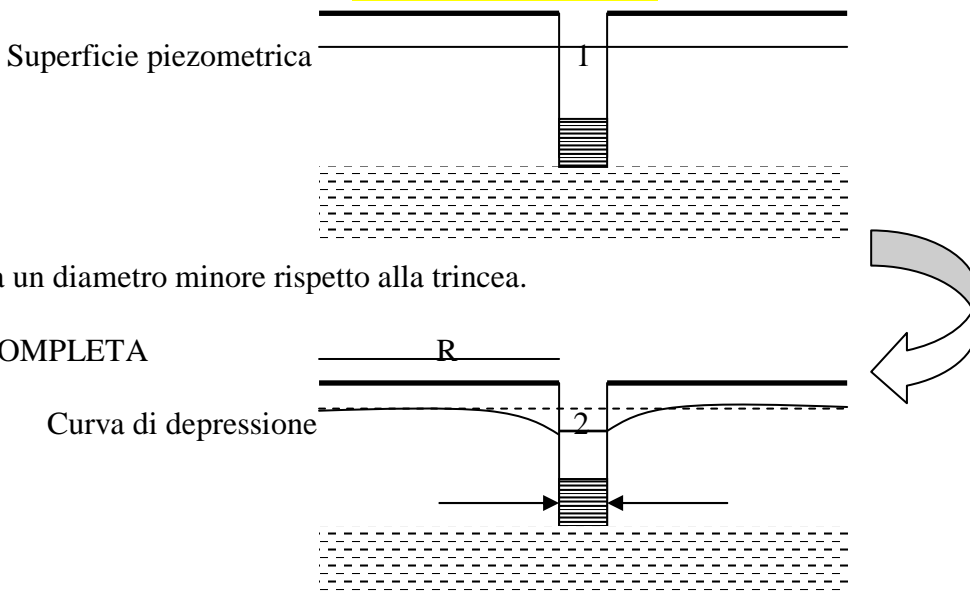


OPERA COMPLETA

Curva parabolica di II grado che ha sempre maggiore pendenza man mano che ci avviciniamo all'opera di presa

La superficie piezometrica si reprime per drenaggio prodotto dalla trincea.

### Pozzi di prelievo :



Il pozzo ha un diametro minore rispetto alla trincea.

OPERA COMPLETA

Curva di depressione

R : raggio d'influenza

1 : condizioni statiche (moto naturale);

2 : condizioni dinamiche (di moto forzato) con pompa azionata.

Il raggio d'influenza nel caso di equilibrio è quello caratteristico del pozzo e dipende anche dalla permeabilità dell'acquifero. E' maggiore per un acquifero molto permeabile (anche valori di 500-600 m). la pendenza della superficie piezometrica aumenta man mano che ci avviciniamo al pozzo.

$$Q = v \cdot A = \text{cost}$$

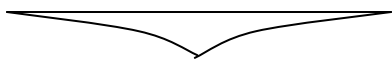
Ma mano che l'acqua è richiamata dal pozzo diminuisce il passaggio e quindi aumenta la  $v$

$$v = K \cdot i$$

Se aumenta  $i$  aumenta anche  $v$ .

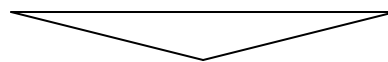
La curva di depressione produce un cono di depressione. La forma della curva o del cono dipendono dalla permeabilità del mezzo. Ecco due casi estremi:

1

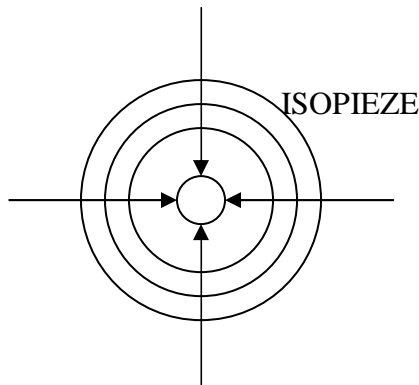


Forma con generatrice ripida ( $K^-$ )

2



Forma svasata ( $K^+$  permeabilità alte)



Falda o filetti idrici convergenti

I filetti idrici sono diretti verso il pozzo in modo radiale e perpendicolare alle isopieze. Quando è in funzione un pozzo le isopieze modificano il loro andamento, la legge di Darcy serve allo studio del moto laminare naturale:  $v = K \cdot i$

Se il moto è forzato si hanno due diverse teorie:

- 1) Teoria di Dupuit o **Teoria del regime di equilibrio** o di moto permanente;
- 2) Teoria di Theis o **Teoria del regime di non equilibrio** o di moto transitorio.

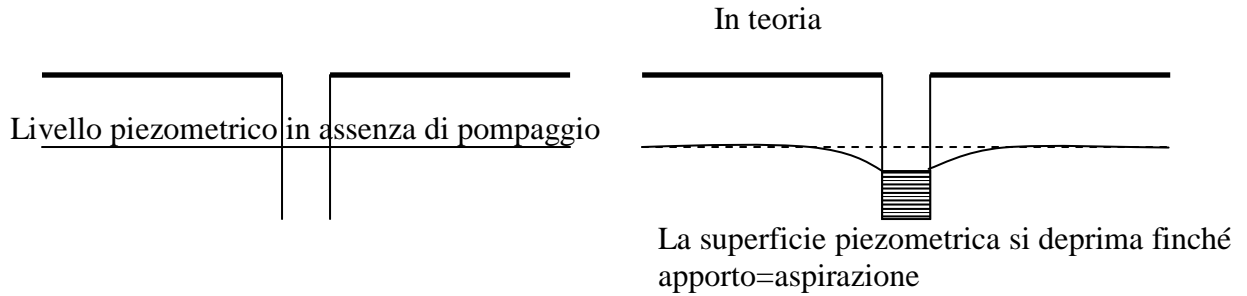
**Dupuit** sostiene che prelevando l'acqua da un'opera di presa la superficie piezometrica si deprime, ma dopo un certo tempo si stabilizza e raggiunge situazione di equilibrio (fra l'acqua prelevata e l'alimentazione). Il moto è di tipo permanente. Il raggio non varia al variare della portata emunta.

**Theis** dice che prelevando acqua con un'opera di presa la superficie piezometrica si deprime in modo indefinito anche se con  $v$  decrescente. Non si raggiunge l'equilibrio e non c'è compensazione tra l'acqua in uscita e quella in entrata. Il raggio aumenta all'aumentare del tempo di prelievo. Il cono di depressione, quindi, non si stabilizza. In realtà la condizione di Dupuit si ha per bassi valori di portata quella di Theis per alti valori di portata.

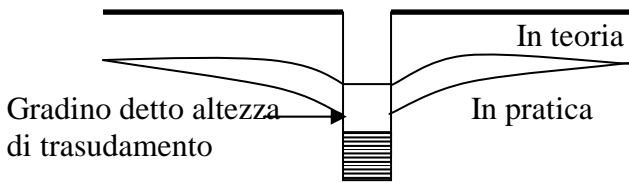
Alla base della teoria di Dupuit ci sono diversi tipi:

- acquifero omogeneo ed isotropo;
- acqua e raggi incompressibili;
- regime di flusso laminar;
- moto permanente;
- componente verticale della  $v$  è trascurabile in rapporto a quella orizzontale;
- la  $v$  dei filetti idrici è la stessa attraverso la stessa superficie di flusso;
- c'è raccordo senza continuità tra superficie di depressione al ritorno dell'opera di presa e il livello dell'acqua all'interno dell'opera stessa.

Esempio:



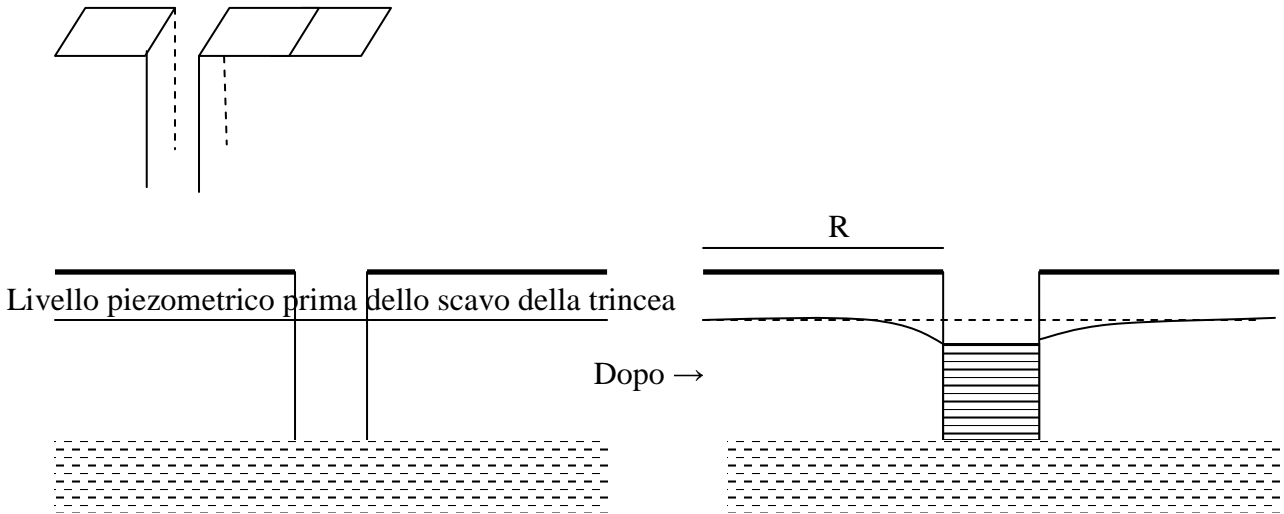
In realtà succede che:



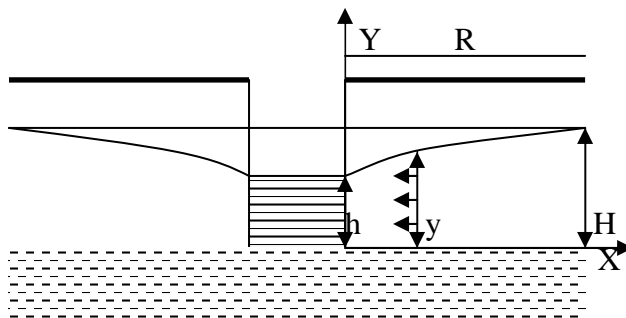
C'è un abbassamento del livello idrico in corrispondenza della parete del pozzo (il gradino è tanto più alto quanto più profondo è il pozzo).

Caso1: **FALDA IDRICA LIBERA** (caso della trincea drenante): a seguito del drenaggio operato dalla trincea avremo superfici piezometriche con forma cilindrica.

Il fondo della trincea è il tetto dello strato impermeabile.



L'influenza del pompaggio si risente fino ad una distanza R



H : altezza acqua in condizioni di moto naturale a distanza R dalla parete della trincea;  
h : altezza acqua in prossimità della parete;

Se per la Legge di Darcy :  $v = K \cdot i$  con  $v = Q/S$  dove  $S = h \cdot L$  avremo:

$$\frac{Q}{y \cdot L} = K \frac{dy}{dx}$$

$$Q dx = K L y dy$$

$$Qx = \frac{1}{2} K L y^2 + c$$

Imponiamo due condizioni limite :

$$\left. \begin{array}{l} 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} x = R \\ y = H \end{array} \right. \\ 2 \quad \left\{ \begin{array}{l} x = 0 \\ y = h \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Avremo:

$$QR = \frac{1}{2} K L H^2 + c$$

$$0 = \frac{1}{2} K L h^2 + c$$

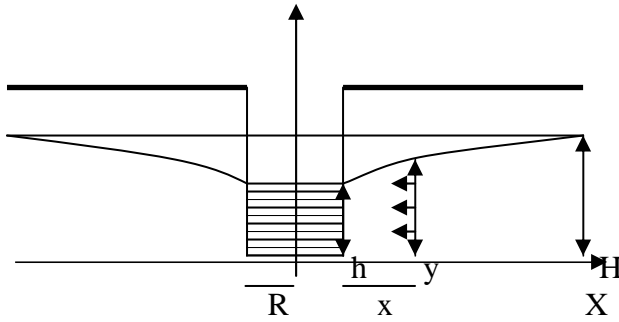
Sottraendo membro a membro avremo:

$$QR = \frac{1}{2} KL (H^2 - h^2) \text{ da cui}$$

$$Q = \frac{1}{2R} KL (H^2 - h^2) \text{ dove } R : \text{raggio d'influenza; } L: \text{lunghezza trincea; } H: \text{altezza piezometrica.}$$

Questa è la portata di una trincea tale da abbassare di un certo livello l'altezza dell'acqua. Per esempio se noi vogliamo lavorare all'asciutto  $h$  dovrà essere uguale a 0; se vogliamo abbassare il livello della falda di 3 m  $h$  dovrà essere uguale a 3.

Caso 2 : **FALDA LIBERA A FILETTI CONVERGENTI** (caso del pozzo freatico);



h : altezza piezometrica alla parete del pozzo  
 H : altezza piezometrica dell'acqua indisturbata;  
 x : distanza dal pozzo;  
 r : raggio del pozzo;  
 y : altezza dell'acqua a distanza x dal

Dalla Legge di Darcy :  $v = K \cdot i \cdot S = 2\pi x \cdot y$  e  $i = dy/dx$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{2\pi x \cdot y} \rightarrow \frac{Q}{2\pi x \cdot y} = K \frac{dy}{dx}$$

$$Q \frac{dx}{x} = 2\pi \cdot K y dy \quad Q \ln x = \pi \cdot K y^2 + c$$

Imponiamo due condizioni limite :

$$\begin{cases} 1 \left\{ \begin{array}{l} x = R \\ y = H \end{array} \right. & \begin{cases} 2 \left\{ \begin{array}{l} x = r \\ y = h \end{array} \right. \end{cases}$$

Avremo:

$$Q \ln R = \pi \cdot K H^2 + c$$

$$Q \ln r = \pi \cdot K h^2 + c$$

Sottraendo membro a membro avremo:

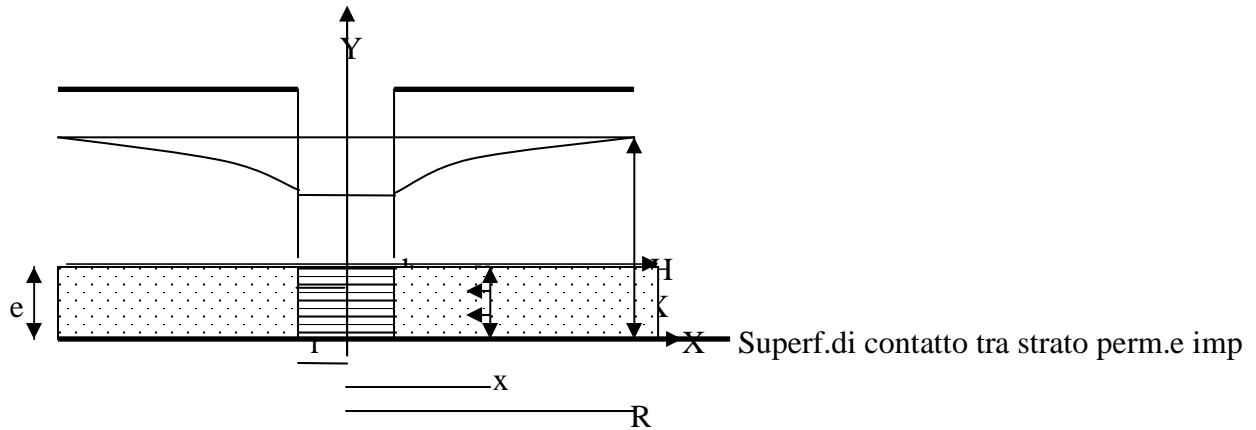
$$Q \ln R/r = \pi \cdot K (H^2 - h^2) \text{ da cui}$$

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

Trasformano il logaritmo naturale in logaritmo decimale

$$Q = \frac{1.366 K (H^2 - h^2)}{\text{Log } R/r}$$

Caso 3 : **FALDA CONFINATA A FILETTI IDRICI CONVERGENTI**



L'acqua risale ad una creta altezza che corrisponde all'altezza piezometrica in condizioni di moto naturale. Prelevando una certa portata  $Q$ , il livello dell'acqua si abbasserà fino all'equilibrio.

$e$  : spessore costante;

$r$  : raggio del pozzo;

In questa circostanza siamo in presenza di un moto laminare, quindi:

$$v = K \cdot i \text{ dove } v = \frac{Q}{2 \pi x \cdot c} = K \frac{dx}{dy}$$

$$Q \frac{dx}{x} = 2 \pi K e dy$$

Integrando :  $Q \ln x = 2 \pi K e dy$

Imponiamo due condizioni limite :

$$\begin{cases} 1 \left\{ \begin{array}{l} x = R \\ y = H \end{array} \right. & \begin{cases} 2 \left\{ \begin{array}{l} x = r \\ y = h \end{array} \right. \end{cases}$$

Avremo:

$$Q \ln R = \pi \cdot K e H + c$$

$$Q \ln r = \pi \cdot K e h + c$$

Sottraendo membro a membro avremo:

$$Q \ln R/r = 2\pi \cdot K e H + c (H - h) \text{ da cui}$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot K e \Delta}{\ln R/r} \quad \text{Dove: } \Delta = (H - h)$$

Trasformano il logaritmo naturale in logaritmo decimale

$$Q = \frac{2.73 K e \Delta}{\text{Log } R/r}$$

Queste prove possono essere utilizzate per l'interpretazione dei dati di una prova di pompaggio eseguita in **regime di equilibrio** o di portata.

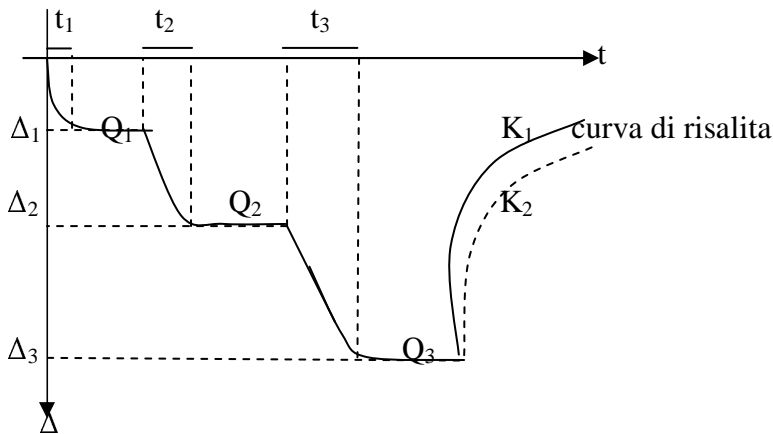
E' detta anche prova di pompaggio a più gradini di portata o prova di pompaggio di breve durata. Queste prove servono a definire la portata critica di un pozzo e conseguentemente la portata di esercizio. Per portata critica si intende la portata max emungibile senza che si alterino gli equilibri fisici dell'acquifero e, quindi, si preleva acqua in condizioni di moto permanente.

La portata di esercizio è quella inferiore a quella critica. Il problema è di quanto dev'essere inferiore (30-40-50%). Bisogna considerare anche lo stato in cui si trova (siccità o piena) e la presenza di altri pozzi da cui si pomperà acqua.

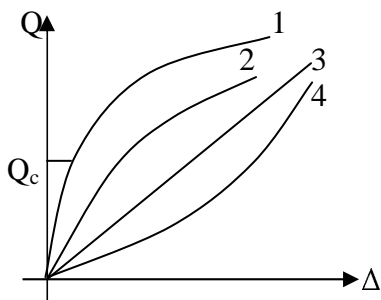
Non bisogna pregiudicare la resa del pozzo.

Si fissa il primo gradino:  $Q_1$ . Si ha un abbassamento finché non si stabilizza il cono. Il secondo gradino è ~ 2 volte il primo :  $2Q_1$ . Si triplica la portata per il terzo gradino:  $3Q_1$ . E' impossibile tenersi su valori bassi per non rientrare in condizioni di disequilibrio. Dobbiamo avere uno strumento che misuri l'abbassamento del livello idrico nel pozzo di prelievo. Si misura il  $\Delta_1$  (in condizioni stabilizzate corrispondenti al  $Q_1$ ), il  $\Delta_2$  ( $\rightarrow 2Q_1$ ), il  $\Delta_3$  ( $\rightarrow 3Q_1$ ).

Si ha un grafico che mostra bene le modalità di prova:



Questo grafico è rappresentativo della prova. Si ha un altro grafico detto **CURVA RAPPRESENTATIVA DEL POZZO**.



1 caso:  $Q_c$  punto in cui le depressioni sono più rapide delle portate (FALDA LIBERA);

2 caso: condizione particolarmente favorevole (FALDA IN PRESSIONE/CONFINATA);

3 caso: ha una fascia di portata critica  $\rightarrow$  possibilità di errore maggiore;

4 caso: prova sbagliata perché o vi è un calo tensione o i filtri della camicia sono intasati, la prova va rifatta.

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

$$H^2 - h^2 = (H + h) (H - h) = (H + H - \Delta) \cdot \Delta$$

$$Q = c \cdot (2H - \Delta) \Delta \text{ equazione propria della parabola di } 2^\circ \text{ grado}$$

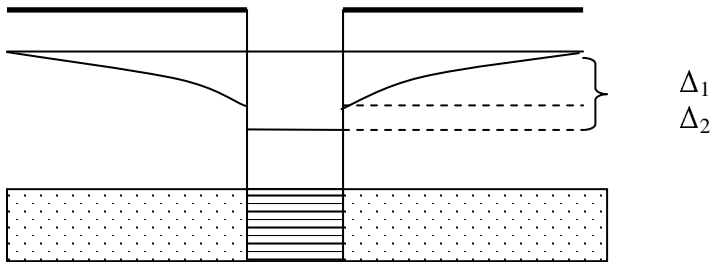
$$Q = \frac{2\pi \cdot K e \Delta}{\ln R/r}$$

$$\text{Equazione di una retta passante per l'origine (3) } Q = c \cdot \Delta$$



Tutto va bene se non si verificano PERDITE DI CARICO QUADRATICHE.

Ora analizziamo il caso di una falda in pressione:



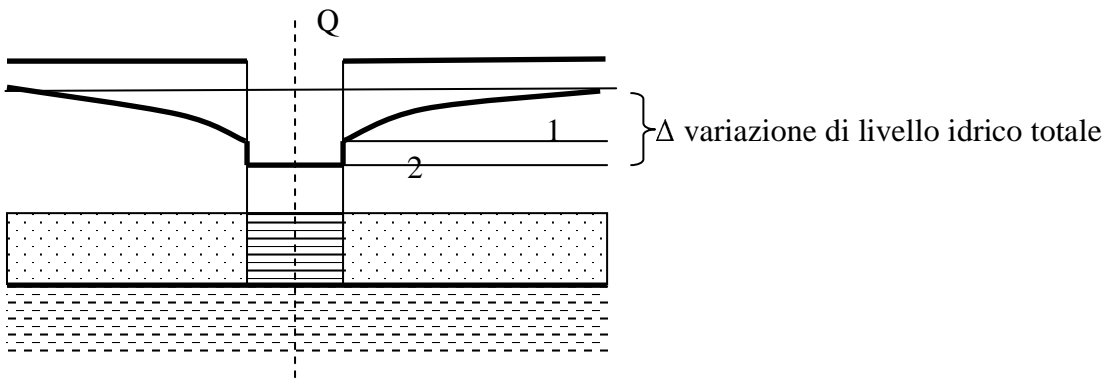
Non sempre in una falda in pressione si ha una retta;  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$

$\Delta_1$  : perdita di carico lineare (che si realizza all'interno del pozzo);

$\Delta_2$  : perdita di carico quadratica (che si realizza in corrispondenza della parete del pozzo).

$\Delta_1$  e  $\Delta_2$  possono essere misurate.

Falda in pressione confinata fra due strati impermeabili:



Prelevando una certa quantità di acqua si generano un gradino in corrispondenza del pozzo e un cono di depressione con asse corrispondente all'asse del pozzo.

1)  $C \cdot Q =$  perdita di carico lineare;

2)  $B \cdot Q^2 =$  perdita di carico quadratica

$$Q = 2 \pi K e \cdot \frac{\Delta}{\text{Log } R/r} \quad \Delta = \frac{Q}{2 \pi K e} \cdot \frac{\text{Log } R}{r} = C \cdot Q \text{ (perdita di carico lineare)}$$

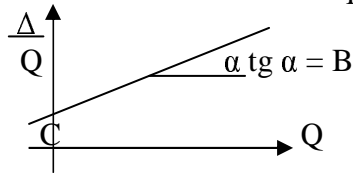
Questa è la relazione di Dupuit

Secondo Jacob la perdita di carico quadratica è uguale a:

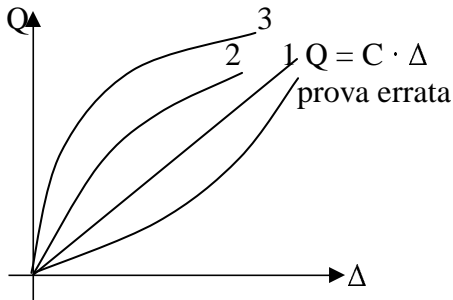
$$\Delta = C \cdot Q + B \cdot Q^2$$

La depressione che si può determinare in un pozzo in pressione confinata a due strati impermeabili deve considerarsi sia la perdita di carico lineare che quella quadratica.

$$\frac{\Delta}{Q} = C + B \cdot Q$$



L'intercetta ci fornisce il valore di  $c$  e la tangente di  $\alpha$  il valore di  $B$ .  
La curva caratteristica del pozzo è una retta



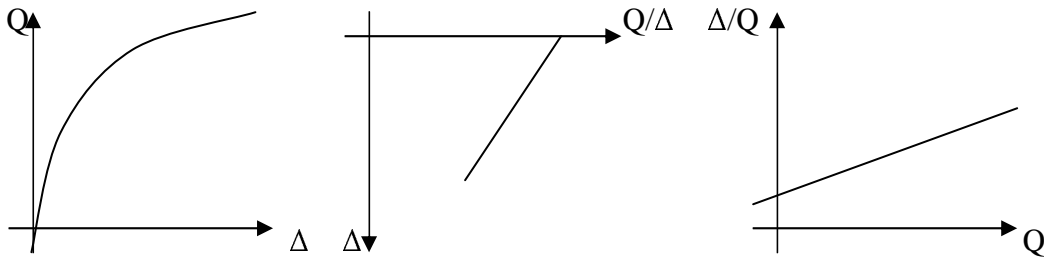
Se ci troviamo in situazioni in cui ci sono dei pozzi vicini dobbiamo effettuare misure di livello anche in questi. Naturalmente nel pozzo da noi realizzato dovremo effettuare delle misure con maggior frequenza.

La **portata specifica** (si esprime in  $l/\text{sec} \cdot m$ ) di un pozzo è uguale a:

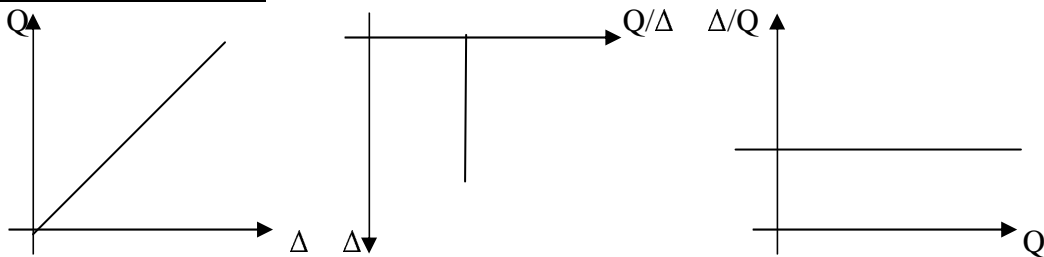
$$Q_s = \frac{Q}{\Delta}$$

Si hanno quattro casi:

1) **FALDA LIBERA**

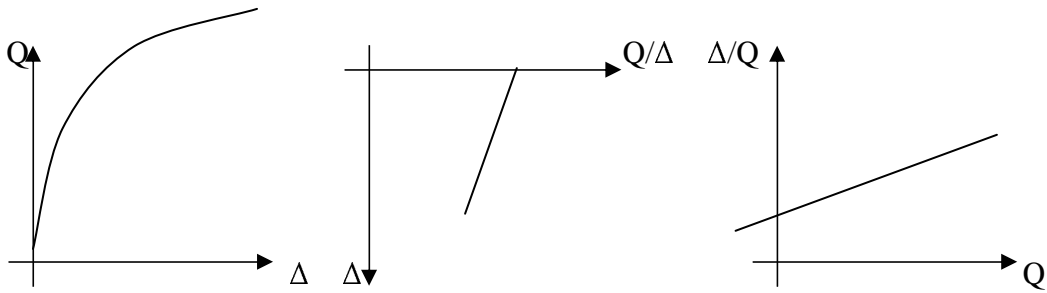


2) **FALDA IN PRESSIONE**



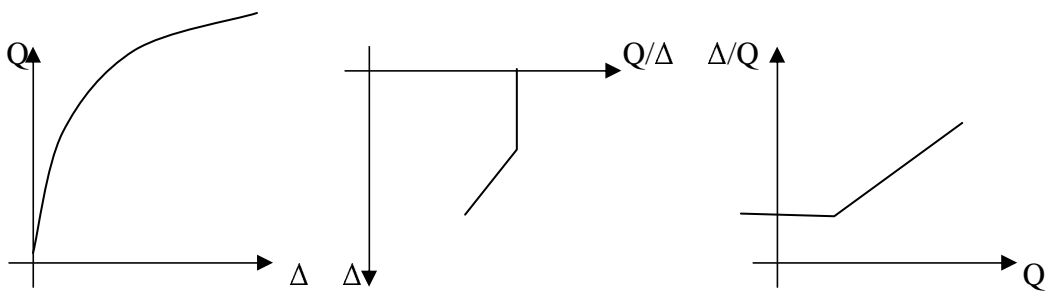
Più è inclinata la retta meglio è stato realizzato il pozzo

3) **FALDA IN PRESSIONE**



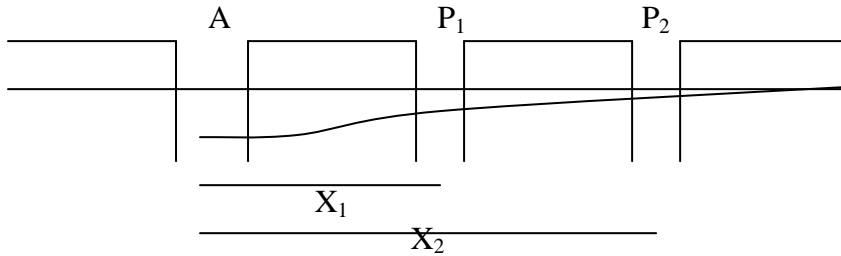
C'è perdita quadratica dall'inizio.

4) **FALDA IN PRESSIONE**



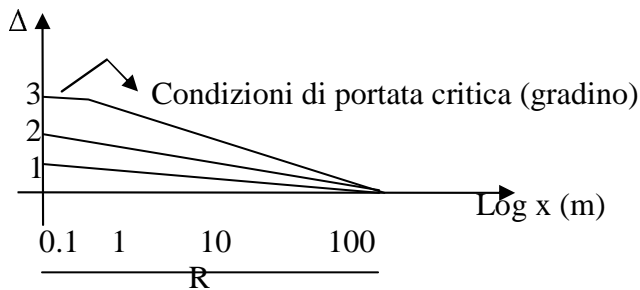
In cui si individua subito la portata critica.

Misurando le depressioni dei pozzi vicini (entro 500 m) si ottengono altre informazioni.



$P_1$  e  $P_2$  pozzi di controllo;  
A : pozzo di prelievo.

I risultati di queste altre prove ci forniscono un altro grafico:

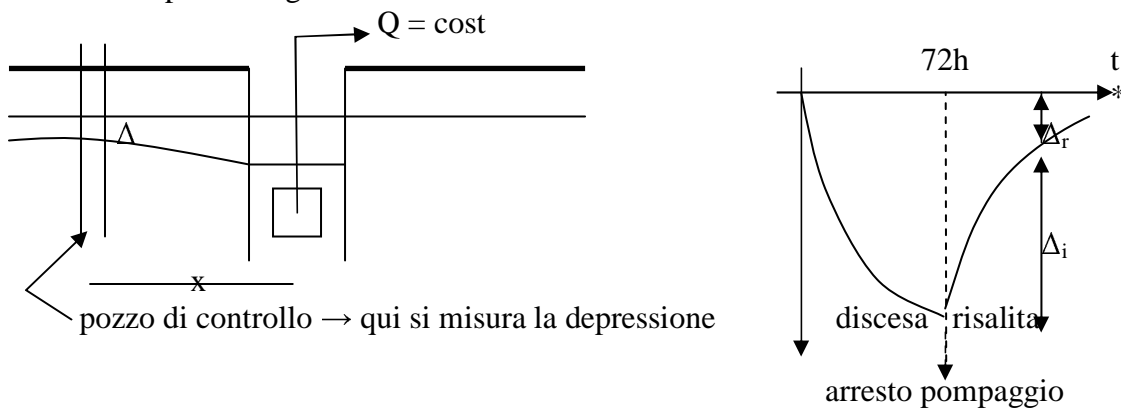


R : raggio d'influenza, ovvero in cui la depressione è  $\phi$ . Il raggio resta costante anche se ci sono variazioni di portata (Teoria di Deputi)

## Teoria di Theis (1935)

Prelevando da un pozzo una determinata portata si verifica un abbassamento della superficie piezometrica che si propaga a porzione sempre maggiore di acquifero senza che il cono si stabilizzi. Quindi, l'effetto del pompaggio si sente in modo radiale e il cono di deiezione si propaga all'infinito anche se con  $v$  decrescente. Qui siamo in condizioni di **regime transitorio**. Theis ha applicato la sua teoria ad una falda confinata illimitata. Le prove di emungimento che si eseguono seguendo la teoria di Theis sono dette prove di lunga durata. Sono fatte in pozzi di prelievo con misura di abbassamento dei pozzi vicini e dura almeno 72 ore.

Schema della prova → grafico



\* : dopo un certo tempo (lungo) si ripristinano le condizioni iniziali

$\Delta_i$  : innalzamento parziale

$\Delta_r$  : innalzamento residuo

In questa prova si ha un solo gradino di portata mentre con Deputi erano di più.

La formula di Theis è una funzione integrale esponenziale:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u) \quad \text{dove } u = \frac{x^2 \cdot S}{4 T t}$$

Dove:

$\Delta$  : abbassamento misurato nel pozzo di controllo (m);

$Q$  : portata di prelievo ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$W(u)$  : è la funzione del pozzo che ha uno sviluppo in serie;

$T$  : trasmissione idraulica ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$x^2$  : distanza tra gli assi dei due pozzi (m);

$S$  : coefficiente di immagazzinamento;

$t$  : tempo trascorso dall'inizio del pompaggio (s).

Per  $x < 150$  m (distanze brevi) e  $t \geq 2$  gg (i tempi più lunghi): i termini dello sviluppo in serie sono trascurabili rispetto ai primi due, quindi la formula di Theis si può scrivere come segue:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi \cdot T} (-0,577 - \ln u)$$

**Formula approssimata di Jacob (1950)**

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi \cdot T} (\ln \frac{1}{u} + \ln 1.78) =$$

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \ln \frac{4 T t}{x^2 \cdot S \cdot 1.78}$$

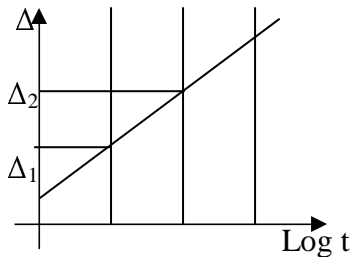
$$\Delta = \frac{Q}{4\pi \cdot T} 2.3 \log \frac{2.25 T t}{x^2 \cdot S}$$

$$\Delta = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{2.25 T t}{x^2 \cdot S}$$

All'aumentare di t aumentano l'entità dell'abbassamento Δ (anche se con v decrescente). L'abbassamento che si deve verificare nel pozzo di controllo dev'essere inferiore al 20% dello strato dell'acquifero Δ ≤ 0.20 H.

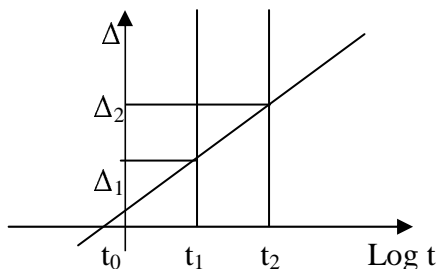
La formula di Jacob, appena calcolata, consente di valutare la depressione nel pozzo di controllo a seguito del pompaggio in un pozzo di prelievo in un tempo t. siamo in condizioni di **moto transitorio**.

La trasmissione (T) idraulica si può determinare mediante la curva di discesa, ossia con la pompa in funzione.



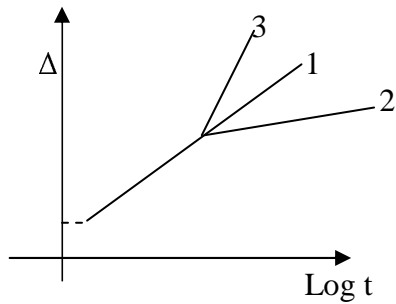
Dopo pochi minuti avremo punti che si allineano lungo una retta. Prima non si verifica un abbassamento del livello idrico nella falda circostante (durante i primi prelievi).

Se  $C = 0.183 \frac{Q}{T}$  prendendo un valore  $t_2 = 10 t_1$  allora  $C = \Delta_2 - \Delta_1$ . Il coefficiente angolare della retta è dato e quindi è facile determinare il valore di T. possiamo anche determinare il coefficiente di immagazzinamento prolungando la retta fino ad incontrare l'asse delle x.



A t<sub>0</sub> corrisponde un abbassamento 0

Riepilogando le varie fasi del processo sono queste:

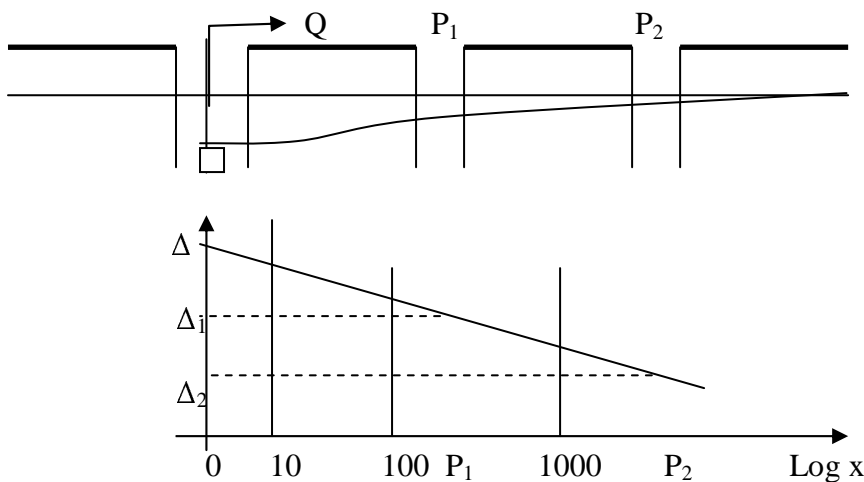


Si emunge l'acqua dal pozzo di prelievo e si effettua il controllo sull'altro, questo procedimento è rappresentato da un andamento parallelo all'asse del t perché nel pozzo di misura non si ha alcun abbassamento del livello idrico. Con il procedere del tempo il cono di repressione interessa porzioni di acquifero sempre più distanti. Naturalmente si possono verificare condizioni idrogeologiche diverse:

- Caso 1 : acquifero illimitato; il cono si propaga, le condizioni idrogeologiche non variano. L'acquifero è piuttosto omogeneo come caratteristiche litologiche (permeabilità) e di alimentazione;
- Caso 2 : acquifero con limite di alimentazione; gli abbassamenti si riducono sensibilmente fino ad annullarsi. E' il caso in cui aumenta la permeabilità o c'è un surplus di acqua. Questo tratto non è mai parallelo all'asse delle x;
- Caso 3 : acquifero con limite stagno; l'abbassamento si fa sempre più evidente, questo può essere dovuto al contatto con terreni permeabili (faglie o frane).

**N.B. L'analisi della curva ci permette di determinare le condizioni del sottosuolo e le caratteristiche dell'acquifero.**

La trasmissione idraulica (T) può essere calcolata anche sulla base di due pozzi di controllo allineati con il pozzo di prelievo. I due pozzi sono distanziati rispettivamente di 10 e 100 metri da quello di prelievo:

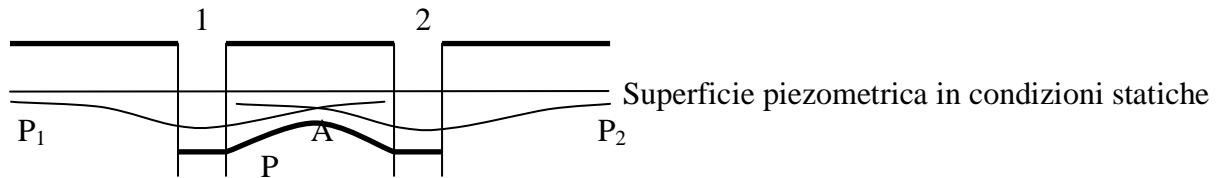


$$\Delta_1 - \Delta_2 = 0.183 \frac{Q \log \frac{x_2^2}{x_1^2}}{T}$$

Questa retta ci permette di calcolare il valore della trasmissione idraulica (T)

## **Principio di sovrapposizione degli effetti**

Se due pozzi vicini fra loro prelevano acqua da una stessa falda ed interferiscono fra loro, la depressione risultante è la somma delle depressioni che si avrebbero nel caso in cui ciascuno dei due pozzi funzionasse singolarmente (cioè nel caso in cui si avesse un pompaggio simultaneo nei due pozzi).



$P_1$  e  $P_2$  coni di repressione per il pozzi 1 e 2.

Nel punto A il cono sarà doppio rispetto a quello che si avrebbe se i pozzi funzionassero singolarmente. Questo punto è quello in cui i coni dei due pozzi si intersecano. P rappresenta il profilo di repressione risultante.

$$\Delta = \Sigma \Delta_i = \frac{0.183 \Sigma Q_i \cdot \log 2.25 \frac{T \cdot t}{x_i^2 \cdot S}}{T}$$

Questa equazione rappresenta la **DEPRESSIONE COMPLESSIVA**.

Dove:

$\Delta_i$  = depressione nel pozzo i-simo;

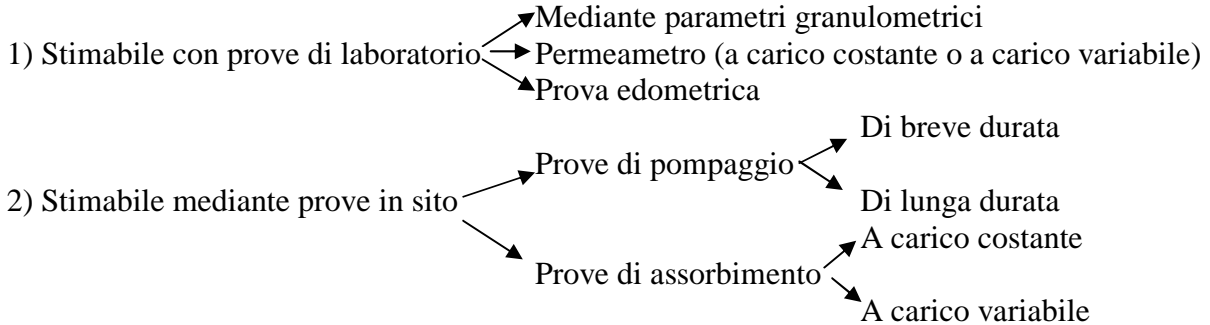
$x_i$  = distanza nel punto considerato del pozzo i-simo.

Dall'equazione precedente è facile comprendere che gli effetti dei pozzi si sommano.

Una regola fondamentale da rispettare è quella di non prelevare quantitativi di acqua superiori alle risorse idriche. Quindi, prima di prelevare dell'acqua bisogna fare il bilancio idrico. Aumentare il raggio del pozzo non fa aumentare proporzionalmente la portata. La cosa più corretta da fare è quella di realizzare due pozzi con diametri uguali e vicini..

## Definizione del coefficiente di permeabilità

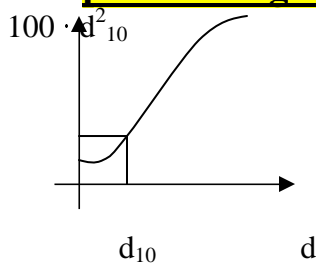
il coefficiente di permeabilità può essere stimato secondo due metodi:



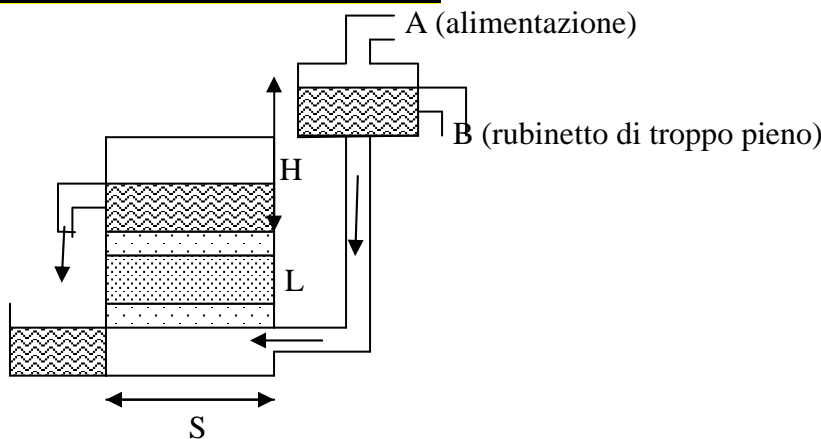
Prove di laboratorio:

- Parametri granulometrici: questo metodo si utilizza per le sabbie;
- Permeametro a carico costante: questo metodo si utilizza per terre con coefficiente di permeabilità medio-alto (sabbie e ghiaie) ( $K > 10^{-3}$  cm/s);
- Permeametro a carico variabile: questo metodo si utilizza per terre con coefficiente di permeabilità medio-bassa (limi) ( $10^{-7} < K < 10^{-3}$  cm/s);
- Prove edometriche: questo metodo si utilizza per terreni argillosi.

Per i **parametri granulometrici** una delle formule più utilizzate è quella di Hazen :  $K_d \sim$



## Permeametro a carico costante:



Questo schema di permeametro si trova in condizioni di moto laminare  $i_f < i_c$  cioè  $i_f$  gradiente infiltrazione  $i_c$  gradiente critico

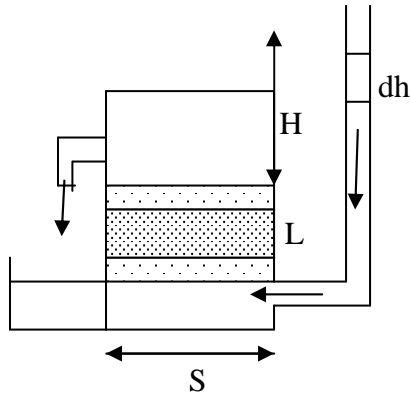
$$i_c = \gamma' / \gamma_w \text{ e } i_f = H/L$$

dove  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$  dove  $\gamma_{sat} - \gamma_w$  dove  $\gamma_{sat} = \gamma_d + \eta \cdot \gamma_w$



Nota  $\eta$  e  $\gamma_r$  (peso specifico reale) possiamo determinare  $\gamma_d = (1 - \eta) \gamma_r$

**Permeametro a carico variabile:**



Questo schema è molto simile a quello del permeametro a carico costante con la sola differenza che in questo c'è il manometro:

$v = K \cdot i$       $v = Q/S$  dove  $Q$ : portata che si libera dall'abbassamento  $dh \rightarrow Q = V/S dt \rightarrow S dh/S dt$

$$\frac{s L dh}{S h} = K dt$$

Integrando :

$$K dt = \frac{s L}{S} \left( \frac{dh}{h} \right) = K dt$$

$$K (t_1 - t_0) = \frac{s L}{S} (\ln h_0 - \ln h_1) \quad \boxed{K = \frac{2.3 s L \log \frac{h_0}{h_1}}{S \Delta t}}$$

**Prova edometrica:**

$$\boxed{K = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w}$$

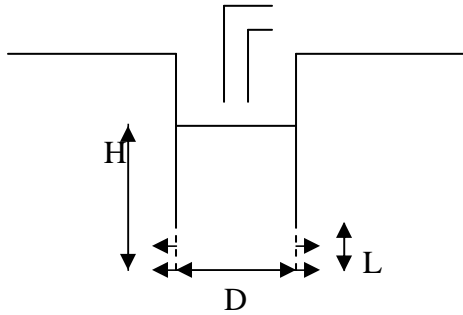
Dove:

- $c_v$  : coefficiente di consolidazione;
- $m_v$  : coefficiente di compressibilità edometrica.

La permeabilità può essere determinata con metodi aventi formule generali basate sulla legge di Darcy. Si suppone che la filtrazione avvenga in regime laminare. Le prove in sito sono svolte con pompaggio o immissione di acqua.

Ora analizzeremo le prove che si effettuano mediante prove in sito:

### **Prova di assorbimento a carico costante:**



L : lunghezza del tratto di prova  
D : diametro  
H : carico idraulico mantenuto costante

Si mantiene costante il livello idrico.

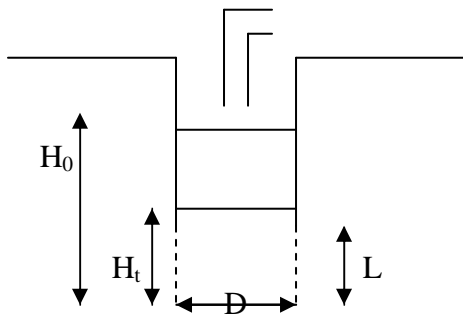
$$Q = C \cdot K \cdot H$$

Dove C è il coefficiente di forma, che nei fori di sondaggio (lanterne cilindriche) è uguale a

$$\frac{2\pi L}{\text{Log}2L/D} \quad \text{Se } L \gg D \rightarrow C = L$$

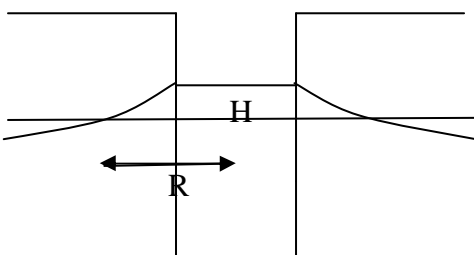
Si possono ripetere più prove con diversi carichi idraulici per ricavare un grafico e di conseguenza una retta. Questa può essere una curva di controllo della prova all'aumentare del carico idraulico. Se la retta diventa una spezzata sono intervenuti vari fattori che devono essere valutati.

### **Prova di assorbimento a carico variabile:**

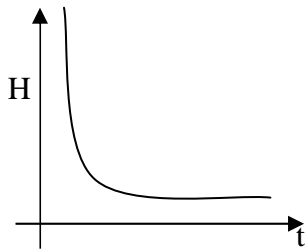


Si misurano gli abbassamenti del livello idrico nel tempo.

N.B. se si trova una falda lo schema sarà così rappresentato:



In condizioni di moto laminare abbiamo una curva di abbassamento esponenziale:



$$H_t = H_0 e^{-\alpha t}$$

Questa curva viene detta di “svaso”.

$$\alpha = \frac{C \cdot K}{A}$$

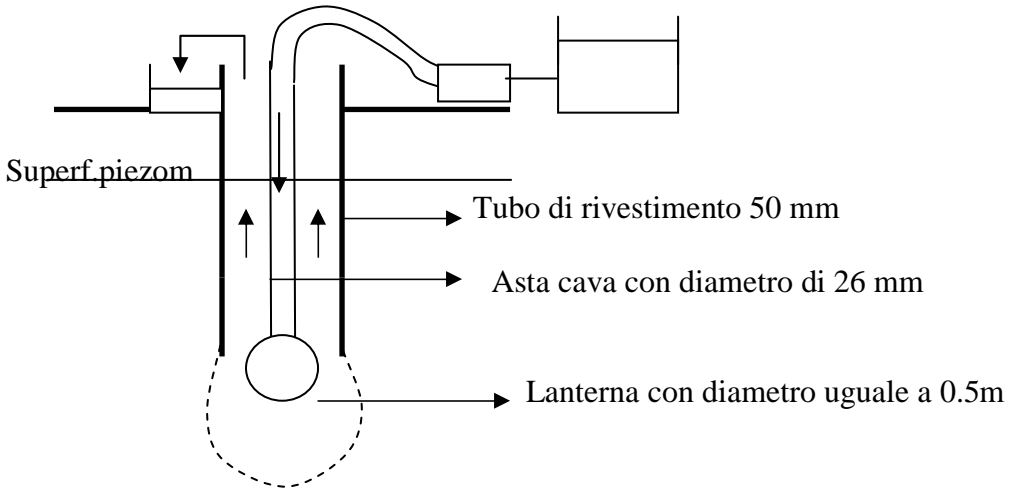
Dove A rappresenta l'area della sezione del foro. Esprimiamo tutto con i logaritmi naturali:

$$\ln H_t = \ln H_0 - \alpha t \quad \frac{C K t}{A} = \ln \frac{H_0}{H_t} \quad K = \frac{A \ln H_0}{C t H_t} = 2.3 \frac{A \log H_0}{C t H_t}$$

Il primo tratto della curva è talvolta tralasciato perché l'acqua immessa nel pozzo viene assorbita e non immediatamente trasmessa (perché il terreno deve prima saturarsi).

## **Prove di assorbimento in foro:**

Questa tecnica fu sperimentata e adottata per la prima volta nel 1936 da Lefranc, viene applicata soprattutto a depositi alluvionali incoerenti e pulverulenti per determinare la permeabilità per mezzo di una piccola sonda a percussione (è andata in disuso col tempo).



Questa è una tubazione infissa nel suolo a battitura. Per rimuovere il terreno all'interno del foro si utilizza un'asta cava metallica con ugelli taglienti. Con quest'asta viene inserita acqua in pressione (che rimuove il terreno e ripulisce il foro). Si forma una cavità sferica del diametro di 0,5m detta lanterna. L'asta cava è legata a una pompa e ad un recipiente con 200 l di acqua. Il rivestimento isolava il foro dalla falda. L'acqua iniettata (in parte viene assorbita dalle pareti della lanterna e in parte risale dal tubo e viene raccolta) è poi recuperata e inserita in un altro recipiente. I 200 l di acqua vengono immessi in circa 4 minuti.

$$V_{H_2O} (\text{assorbita}) = V_{H_2O} (\text{immessa nel foro}) - H_2O (\text{recuperata})$$

$$K = \frac{Q}{C \cdot H}$$

## **Prova di risalita:**

Prelevando acqua dal pozzo, si determina un abbassamento consistente del livello idrico e si misura l'innalzamento del livello nel tempo fino a che non si ripristinano le condizioni iniziali che sono quelle di livello statico indisturbato. Dalla misura del tempo necessario a fare ciò si ottiene una stima della permeabilità media del tratto di foro corrispondente alla finestratura del pozzo. Queste prove sono indicate per valutare la permeabilità di un acquifero caratterizzato da uniformità litologica. Per il calcolo della permeabilità si usa la stessa formula vista nella prova a carico variabile.

$$h = h_0 e^{-\alpha t} \quad \ln h = \ln h_0 - \frac{K \cdot C}{A} t$$

$$K = \left( \ln \frac{h_0}{h} \right) \frac{A}{C} \quad K = \ln \frac{3.15}{0.04} \frac{0.03}{15 \cdot 760} = 0.4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

## **Prova Lugeon:**

Questa prova serve a determinare la permeabilità iniettando acqua a diversi gradini di pressione. Questa prova è utilizzabile in qualsiasi roccia, però si preferisce a rocce lapidee e argille. E' indispensabile in due casi: 1) per la realizzazione di una diga (per determinare la tenuta idraulica dei terreni in zona d'invaso in condizioni di max invaso e nella zona di posta); 2) per verificare la riuscita di un'operazione di impermeabilizzazione o consolidamento di un terreno (sia prima che dopo la realizzazione). Si effettua in fori di sondaggio di 100 o 150 mm di diametro e provando tratti di foro della lunghezza di 3 o 5 m.

Fasi:

- 1 Estrazione carote;
- 2 Misura della tenuta idraulica;
- 3 S'inserisce nel foro un tubo solidale con un otturatore ad espansione (di gomma, che aderisce alle pareti del foro). Questo isola il tratto da esaminare con il resto del foro;
- 4 Iniezione di acqua in pressione. L'acqua penetra nella roccia. Si misura la portata assorbita per metro unitario di foro:  $Q = \frac{V_{H_2O}}{L \cdot \Delta t \cdot L}$  Nel momento in cui si satura il terreno valuto l'acqua assorbita in 5-10 min
- 5 Dopodiché si ripete il ciclo a pressioni maggiori.

Questa prova è effettuata con valori crescenti e poi decrescenti. Per valori di pressione maggiori a 6 o 9 atm si rischia di alterare le condizioni del sottosuolo.

## **Propagazione di un inquinante in un mezzo poroso saturo**

Le fonti inquinanti sono diverse per natura:

- inquinanti da reflui civili;
- inquinanti dovuti all'attività agricola;
- inquinanti di tipo industriale.

Anche le caratteristiche delle sorgenti di contaminazione sono diverse:

- sorgenti di contaminazione di tipo lineare;
- sorgenti puntiformi;
- sorgenti diffuse.

In prossimità delle sorgenti di contaminazione si registra un'anomalia dell'inquinante che arriva in falda e che è messa in evidenza con linee di ugual concentrazione. Le linee di ugual concentrazione vengono dette **isocone**.

### **Sorgenti di contaminazione di tipo lineare**

- Un esempio di contaminazione di tipo lineare si può trovare in prossimità delle coste, dove l'acqua del mare tende ad progredire verso l'interno andando ad interessare la falda acquifera e contaminandola con sale;
- Un altro esempio è rappresentato dalle vie di comunicazione, il dilavamento dell'acqua piovana provoca l'assorbimento di inquinanti come il piombo;
- L'acqua dei fiumi è inquinata e la contaminazione avviene nelle falde al di sotto del corso d'acqua.

### **Sorgenti di contaminazione di tipo puntiforme**

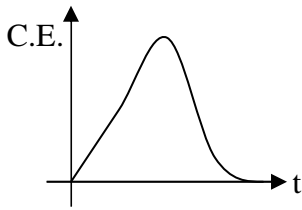
In questo caso si determinano nel mezzo poroso saturo una zona di contaminazione di forma ellissoidica allungata nella direzione di scorrimento della falda. Il fronte di contaminazione di forma ellissoidica è detto pennacchio di contaminazione ( che gli anglosassoni indicano con il nome di PLUME)

La contaminazione puntiforme può essere:

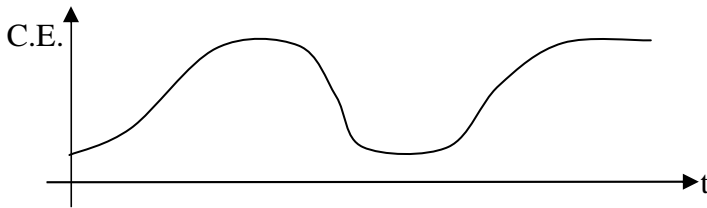
- Istantanea (sversamento occasionale in falda di un inquinante, la contaminazione ha breve durata);
- Stagionale (o periodica);
- Continua.

Ora vedremo le **curve di restituzione** (o breakthrough) per ogni caso:

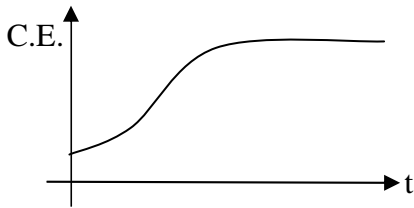
**Contaminazione istantanea:**



**Contaminazione stagionale:**



**Contaminazione continua:**

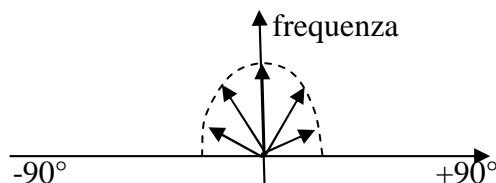


C.E. : rappresenta la conducibilità elettrica.

La contaminazione interessa porzioni di acquifero sempre maggiori. Questo avviene per un fenomeno molto conosciuto in idrogeologia la **DISPERSIONE**. Questo fenomeno meccanico è dovuto alla tortuosità dei percorsi che i filetti idrici compiono all'interno dei pori del mezzo dell'acquifero.

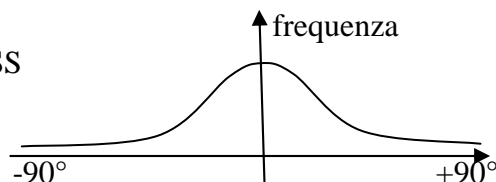
I filetti idrici compiono percorsi diversi. Ecco perché il contaminamento si allarga. La quantità di contaminante è sempre la stessa. I vettori che rappresentano i percorsi dei filetti idrici hanno direzioni diverse ed intensità diverse. La dispersione, è regolata da leggi statistiche perché l'andamento dei vettori di velocità è casuale. Quindi, la direzione dei singoli vettori è diversa, ma la distribuzione più frequente è lungo la direzione del vettore generale del flusso e man mano diminuisce.

DIAGRAMMA A ROSE



oppure

DIAGRAMMA TIPO GAUSS



Questa curva è funzione del rapporto: dispersività longitudinale/dispersività trasversale =  $\alpha l / \alpha l = 10 \alpha l$

**DISPERSIVITA'**: esprime la capacità che ha un mezzo acquifero di disperdere un inquinante e dipende dalla porosità e dalla tessitura, quindi è una caratteristica intrinseca dell'acquifero .

Per una sabbia fine  $\alpha = 0.05$  cm

Per un calcare con diversa gamma di porosità  $\alpha = 0.05-500$  cm

Un'altra grandezza che esprime la capacità di disperdere un soluto è il **COEFFICIENTE DI DISPERSIONE** ( $D_H$ ) :  $D_H = D_m + D_o$

Dove:

$D_H \rightarrow$  si realizza in un mezzo poroso;

$D_m \rightarrow$  coefficiente di dispersione meccanico o di advezione;

$D_o \rightarrow$  coefficiente di dispersione per diffusione molecolare.

Un soluto può disperdersi sotto un gradiente idraulico:

$$v_x = - K \frac{\Delta h}{\Delta x}$$

O sotto un gradiente di concentrazione, l'acqua è immobile e il soluto si sposta da una zona a maggiore concentrazione ad una a minore concentrazione

**Legge di Fick** : la massa di soluto che si propaga attraverso una sezione unitaria perpendicolare alla direzione del movimento nell'unità di tempo è direttamente proporzionale alla differenza di concentrazione che si ha tra i due punti tra cui avviene il movimento:

$$F = - D_o \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

F : flusso di soluto che passa nell'unità di tempo in una sezione unitaria;

$D_o$  : coefficiente di diffusione molecolare del soluto in soluzione libera.

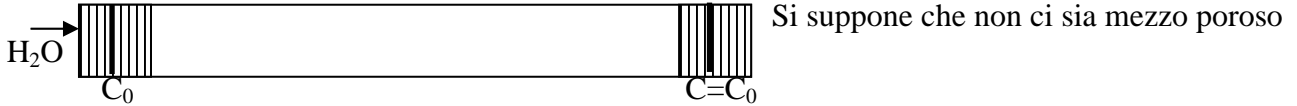
$D_o$  è anche funzione della temperatura, maggiore è la temperatura maggiore è il gradiente di diffusione ( $v$ ).

$D_o^* = \omega D_o$  dove  $\omega = 0.01 - 0.5$  questo parametro è detto COEFFICIENTE DI RIDUZIONE LIBERA e varia in base alle caratteristiche tessiturali del mezzo poroso  $\omega = 0,01$  per bassa porosità;  $\omega = 0,5$  per alta porosità.



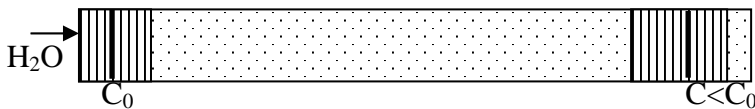
Supponiamo di avere una sorgente di contaminazione, e di rilevarlo in un punto a una certa distanza  $x$  (punto di misura o rilevazione del contaminante).

1) Caso dell'ADVEZIONE;



Il contaminante nel punto di misura ha uguale concentrazione del punto di immissione.

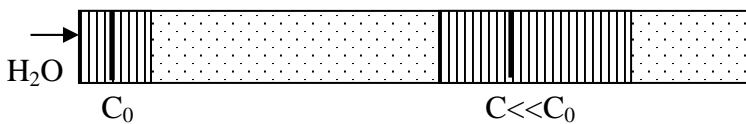
2) Caso della DISPERSIONE (o del soluto inerte);



Migrazione dell'inquinante nel mezzo poroso.

Il fronte di contaminazione si allarga ma non è ritardato. Il nucleo del contaminante si muove alla stessa velocità del caso dell'advezione, ma la concentrazione nel punto di misura è minore

3) Caso dell'ATTENUAZIONE (o del soluto interattivo);

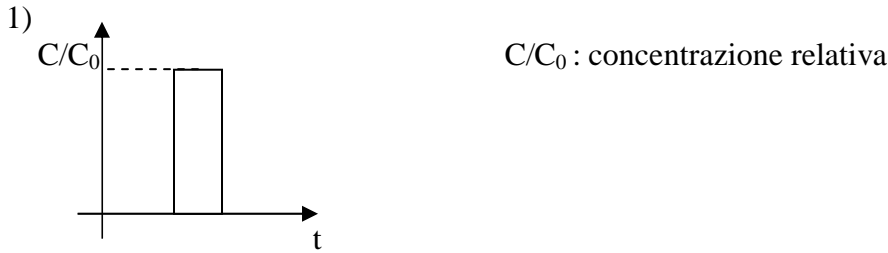


In questo caso si ha il mezzo poroso + advezione + dispersione + interazione.

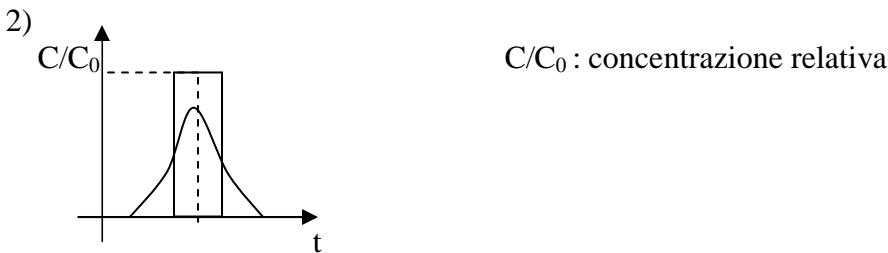
Il fronte di contaminazione si frange ed è ritardato. In questo caso il contaminante è interattivo e si propaga con velocità minore rispetto alla velocità prodotta dalla sola advezione. La concentrazione nel punto di misura è molto minore.

$$R = \frac{\text{Volume del soluto inerte}}{\text{Volume del soluto interattivo}}$$

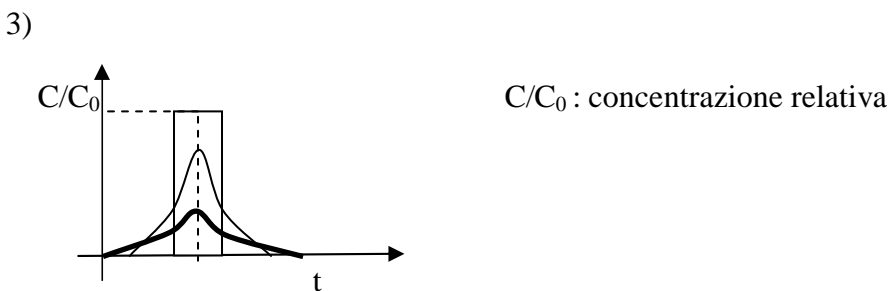
**Curve di restituzione del soluto durante la sua propagazione in falda:**



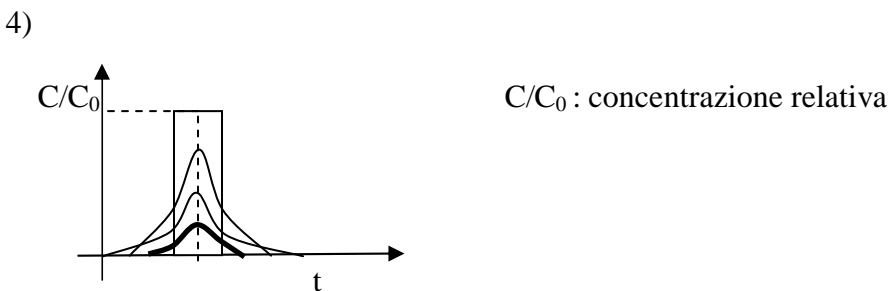
Caso della solo DVEZIONE (CASO DI UN SOLUTO INERTE CHE NON SI DISPENDE).



Caso della DISPERSIONE (CASO DI UN SOLUTO INERTE CHE SI DISPENDE IN UN MEZZO POROSO SATURO CON  $\alpha$ ).



CASO DI UN SOLUTO INERTE CHE SI DISPENDE IN UN MEZZO POROSO SATURO CON  $\alpha^+$  dove  $\alpha > 0$  dispersività). La dispersione avviene prima (maggiore potere di autodepurazione) e la concentrazione diminuisce. Questo perché il mezzo poroso è più dispersivo.



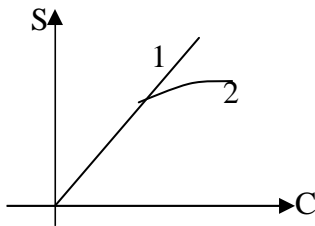
CASO DI UN SOLUTO INTERATTIVO. Oltre ad essere bassa la concentrazione, diminuisce la massa inquinante; infatti l'area sottesa da questa curva è minore rispetto alla prima e terza curva di restituzione (dove l'area è la stessa e la massa d'inquinante rimane la stessa).

R può essere determinato o tramite formule matematiche:

$$R = v_x \frac{\Delta c}{\Delta x} + D_x \frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2}$$

Oppure R può essere determinato in laboratorio mediante le isoterme di equilibrio con analisi di tipo BATCH, che consistono nel mettere a contatto piccole quantità di un terreno rappresentativo della fase solida (quindi dell'acquifero) con una soluzione acquosa contenente il soluto contaminante a diverse concentrazioni.

Terra e soluzione sono messe in un contenitore chiuso ermeticamente e si lascia il tutto per 24 ore (tempo sufficiente a raggiungere l'equilibrio, cioè necessario a fare trattenere il soluto dalla terra nella concentrazione Max). per centrifugazione il liquido è estratto dalla terra e si misura C nella fase liquida. Per differenza calcoliamo la concentrazione del soluto trattenuta dalla fase solida  $S = C_0 - C$  avremo così tre punti  $(S_1, C_1)$ ;  $(S_2, C_2)$ ;  $(S_3, C_3)$



1 Caso del **modello lineare** o di **Nerst**; la relazione è:  $S = K_d \cdot C$

dove:  $K_d$ : coefficiente di distribuzione perché ci indica come si è distribuito l'inquinante nella fase liquida o solida.

2 Caso del **modello non-lineare** o di **Freundlich**; la relazione è:  $S = K \cdot C^{1/n}$

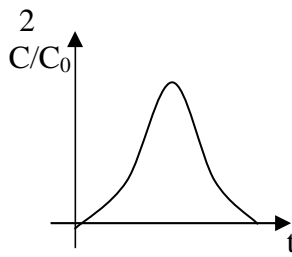
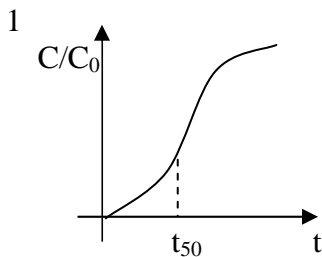
Di solito si applica il modello lineare perché la concentrazione dell'inquinante in falda è minimo.

$$\frac{S}{C} = K_d \text{ Se non c'è interazione il soluto è inerte } \rightarrow S = 0 \rightarrow K_d = S/C = 0 \rightarrow R = 1$$

L'equazione diviene:

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = -v_x \frac{\Delta c}{\Delta x} + D_x \frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2}$$

Questa è l'equazione della dispersione per un soluto inerte. Ci sono solo i termini legati al flusso dell'acqua. La soluzione di questa equazione è una funzione complementare di errore nel caso di una contaminazione continua (1), ed è una funzione di errore nel caso di contaminazione istantanea (2).

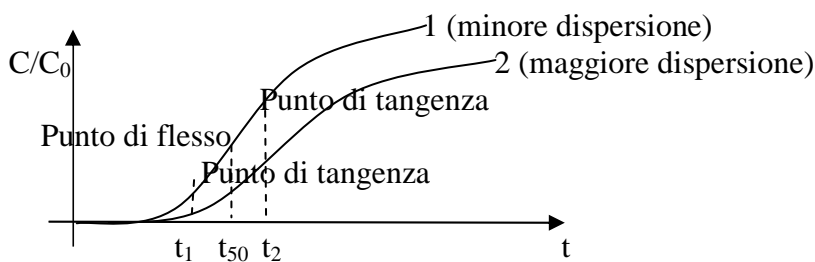


Per l'equazione della dispersione idrodinamica appena vista è possibile ricavare la soluzione per via analitica, posto il mezzo omogeneo ed il flusso costante. Essa nel caso di un flusso a pistone, è stata ottenuta da Gershon e Nir (1969) nella forma:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{x - vt}{\sqrt{4Dt}}$$

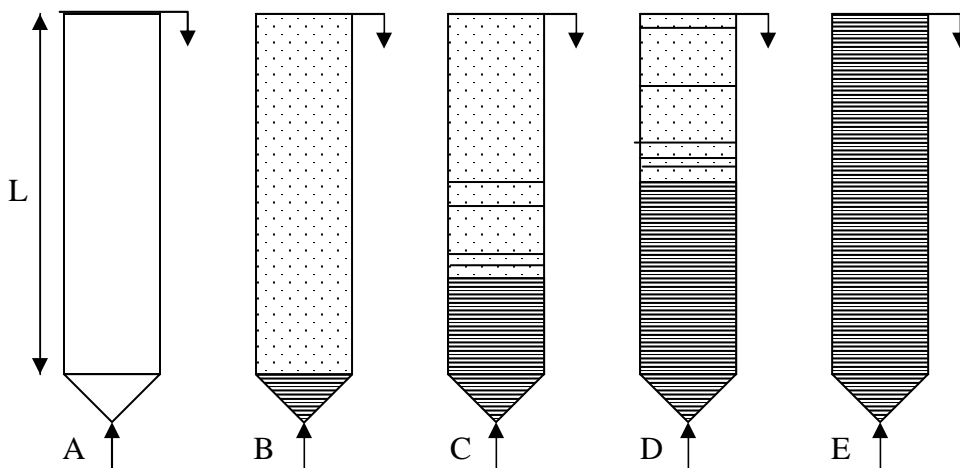
C: concentrazione Max;  
erfc: funzione complementare di errore

Questa formula ci permette di determinare il coefficiente di dispersione D e corrisponde ad una curva gaussiana:



$t_{50}$  : tempo che impiega il baricentro della nuvola di contaminazione ad una certa distanza  $t_m=t_{50}$  e  $\sigma = \frac{t_1 - t_2}{2}$  dove  $t_1$  e  $t_2$  indicano la deviazione standard.

Per determinare i principali parametri idrodispersivi del mezzo (D, K,  $n_e$ ) si può far ricorso ad apposite prove di campo o di laboratorio. Utilizzando apposite attrezzature (colonne di dispersione) è possibile, ad esempio, realizzare un flusso a pistone di un soluto attraverso una colonna di materiale poroso.



- A : Saturo il campione con acqua e calcolo la permeabilità K con la Legge di Darcy;
- B : Immetto al tempo  $t_0$  un soluto (cloruro di sodio) nella soluzione acquosa con concentrazione  $C_0$  ;
- C : Continua l'immissione del tracciante dal basso e avrà raggiunto una certa h;
- D : La concentrazione in uscita corrisponde al baricentro della nuvola di contaminazione  $t = t_{50}$ ;
- E : In uscita si avrà una concentrazione C uguale alla concentrazione iniziale  $C_0$ .

La curva di restituzione consente di calcolare il coefficiente di dispersione longitudinale, la velocità di flusso e la porosità efficace del campione. Il coefficiente di dispersione longitudinale è in

relazione con l'ampiezza della curva, espressa da  $\sigma$ . Per la funzione considerata, nell'ipotesi che  $x = D/v$ , la deviazione standard è data da:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{2Dx}{v^3}} = \sqrt{\frac{2Dt_{50}}{v^2}}$$

Da cui si ricava il coefficiente di dispersione longitudinale:

$$D = \frac{\sigma^2 v^3}{2L} = \frac{\sigma^2 L^2}{2t_{50}}$$

la velocità di flusso, essendo il tracciante inerte, è uguale alla velocità del fronte del soluto ricavata dalla curva di restituzione:

$$v = \frac{L}{t_{50}}$$

mentre la porosità efficace è uguale al volume effluito attraverso la colonna dall'istante  $t = 0$  all'istante  $t_{50}$ , rapportato al volume del campione:

$$n_e = \frac{qt_{50}}{V}$$

Con  $q$  portata attraverso il campione.

## **Traccianti**

Vengono adoperati per ricostruire i percorsi che l'acqua compie nel sottosuolo e determinare le zone di alimentazione delle risorgenze carsiche.

Sono usati per avere la portata dei corsi d'acqua superficiali o sotterranei e anche la velocità del flusso idrico sotterraneo.

Un tracciante dev'essere facilmente rilevabile anche a basse concentrazioni, non dev'essere tossico per gli esseri viventi e alterare il chimismo delle acque per lungo termine; dev'essere solubile in acqua e avere costi bassi.

	<b>Solidi:</b>	(lievito di birra, farina, spore, batteri) utilizzati soprattutto in ambito carsico;
	<b>Chimici solubili:</b>	( NaCl, KCl ecc...);
Traccianti	<b>Coloranti:</b>	(Fluoresceina, Rodamina, Blu di metilene);
	<b>Isotopi stabili:</b>	(deuterio, ossigeno); Nell'atmosfera: trizio;
	Naturali:	Nelle rocce: dovuto al decadimento di minerali radioattivi;
	<b>Radio isotopi:</b>	
		Artificiali: Sostanze radioattive immesse dall'uomo.

**I traccianti chimici:** meno costosi, più solubili, ricettabili anche con il conduttimetro. Normalmente sono traccianti inerti, cioè non producono un ritardo di movimento nella nuvola di tracciante.

**I traccianti colorati:** la **fluoresceina** → largo uso in speleologia, risulta tossica in concentrazione di 50 gr/l, è rilevabile a vista anche a concentrazione di 0.1 ppm e strumentalmente in concentrazioni dell'ordine di milligrammi/l. e'n facilmente riducibile in polvere di colore rosso scuro. Tale colore è conservato se viene diluito in quantità minime, altrimenti assume dei colori che vanno dal verde al giallo. La quantità di fluoresceina da utilizzare, affinché sia rilevabile a vista dove avviene la risorgenza carsica, dev'essere precisa (Legge di Martel):

$$F = L \cdot Q$$

Dove:

F = quantità di fluoresceina in Kg;

L = Distanza in Km dal punto di immissione e il punto di recapito;

Q = portata della sorgente in m<sup>3</sup>/s.

Rilevazione con i fluocaptori: cartucce di carbone attivo aventi dimensioni di 4 o 5 cm che hanno la capacità di fissare la fluoresceina e di trattenerla anche per qualche settimana. Legge di Aley:

$$F = 1.5 \sqrt{\frac{L \cdot Q}{v}} \quad v: \text{velocità dell'acqua in m/h}$$

Le misure strumentali sono fatte con lo spettrofluorimetro ( si basa sulla fluorescenza). La luce monocromatica con una determinata lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), produce una riflessione del raggio con una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) caratteristica della sostanza. Viene misurata la fluorescenza in modo quantitativo.

**Rodamina** (tracciante colorante) subisce un ritardo perché reagisce con la fase solida. Sia per la rodamina che per la fluoresceina si usa il fluorimetro.

La legge prescrive che per monitorare l'inquinamento causato da una discarica debbano essere eseguiti tre pozzi : uno a monte ideologico e 2 a valle

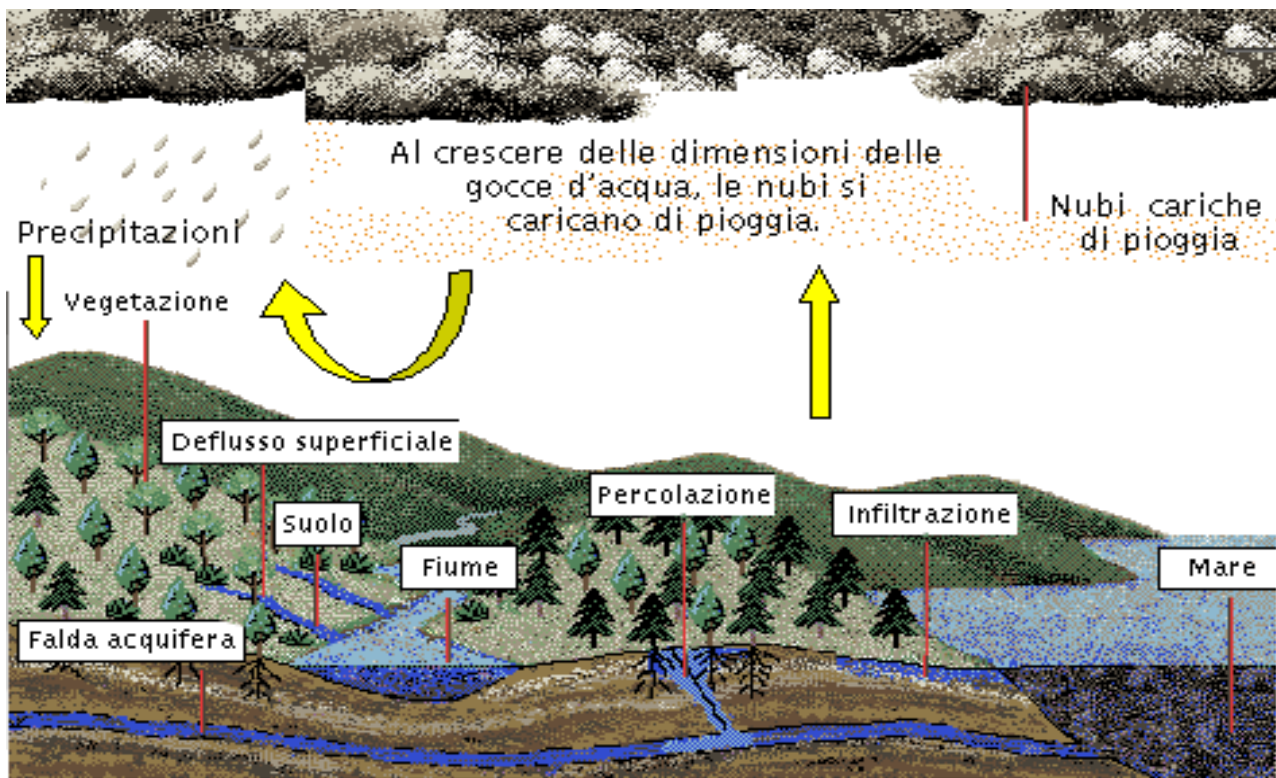
Possiamo rilevare la velocità effettiva dell'acqua all'interno dei pori perché è nota la distanza tra il punto di immissione e quello di misura e il  $t_m$  dell'arrivo della nuvola di tracciante, infatti:

$$v_e = \frac{L}{t_m}$$

**I traccianti solubili** utilizzati: NaCl, KCl, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>Cl. Le concentrazioni sono rilevabili con il conduttimetro.

**Isotopi stabili:** D (<sup>2</sup>H) ; <sup>18</sup>O

Vengono utilizzati per individuare la zona di ricarica degli acquiferi. Questi sono naturalmente presenti nelle acque oceaniche con una concentrazione standard.



Dello schema illustrato qui sopra possiamo dire che nelle acque marine il deuterio ha una concentrazione  $D_1$ ; nel vapore acqueo il deuterio ha una concentrazione  $D_2$  mentre nell'acqua piovana la concentrazione è pari a  $D_3$ .

Per effetto di condensazione successiva  $D_1 > D_2 > D_3$

Allontanandoci dalla linea di costa l'acqua di pioggia diviene isotopicamente più leggera e i prelievi di acqua di pioggia a diverse quote evidenziano che il deuterio diminuisce con l'altitudine. E da questa importante scoperta che noi possiamo risalire alla concentrazione di deuterio in funzione della quota da dove l'acqua meteorica si è infiltrata.

**Isotopi instabili** (o radioisotopi):

Possono dividersi in naturali ed artificiali.

Gli **isotopi naturali** possono essere presenti nell'atmosfera o nelle rocce. Sono naturalmente presenti nell'atmosfera e permettono di datare un'acqua sotterranea che fuoriesce da una sorgente. Il trizio deriva dal bombardamento delle radiazioni cosmiche dell'azoto ed è presente in concentrazione di 5-25 UT (unità trizio). Combinandosi con l'ossigeno dà luogo all'acqua piovana e la concentrazione di T presente nell'acqua di pioggia è la stessa concentrazione che rinveniamo

nell'atmosfera. Nel sottosuolo la concentrazione del T diminuisce perché i quantitativi di T che decadano non sono rimpiazzati da ulteriori apporti. Prelevando un campione di acqua da un pozzo:  $C = C_0 \cdot e^{-\alpha t}$ . Conoscendo il tempo (t) di decadimento possiamo determinare l'età dell'acqua sino a un max di 50 anni. Il carbonio 14 permette di fare datazioni fino a 30000 anni.

Gli **isotopi artificiali** si immettono nella falda e sono più pericolosi, hanno breve durata, gli strumenti adottati per rilevarli sono semplici e sono molto precisi.

Con tutti i traccianti possiamo misurare la velocità di Darcy misurando nel tempo la concentrazione nello stesso pozzo d'immissione. Questo metodo è detto della diluizione di un tracciante in un pozzo singolo. Possono essere utilizzati i traccianti radioattivi (Br è misurato a distanza di poche ore). La velocità di filtrazione è proporzionale alla velocità con cui si diluisce il tracciante nel tratto di foro del tracciamento. Non si misura la velocità effettiva come spazio su tempo, ma la velocità di Darcy:

$$v_f = \frac{V}{\alpha \cdot S \cdot t} \ln \frac{C_0}{C}$$

Il tracciante è immesso con la siringa a diverse profondità con concentrazioni uguali.

- $v_f$ : velocità di filtrazione dell'acqua attraverso la sezione di flusso;
- $S$ : sezione del tratto di foro interessato dalla misura ed è perpendicolare alla direzione del flusso idrico;
- $V$ : volume di acqua delimitato dal tratto di foro interessato dalla misura;
- $t$ : tempo trascorso dall'inizio del tracciamento al momento della rilevazione del tracciante;
- $C_0$ : concentrazione iniziale;
- $C$ : concentrazione finale;
- $\alpha$ : coefficiente di trasformazione che tiene conto della deformazione ( legata al diametro del pozzo, del tipo di finestratura, dell'eventuale drenaggio di ghiaia tra la parete del foro e la tubazione di rivestimento) subita dai filetti idrici nell'attraversamento del pozzo ( $\alpha = 1.5-4$ ).



## **Pozzi per acqua**

Sono fori realizzati nel sottosuolo fino al ritrovamento di una falda idrica che viene attrezzato per il prelievo di acqua. Bisogna fare in modo che l'opera realizzata sia efficiente, duratura e garantisca una buona qualità dell'acqua senza che avvengano contaminazioni con falde diverse.

La realizzazione di un pozzo comprende tre fasi:

- 1) Perforazione;
- 2) Completamento, che si realizza per esempio con il tubaggio di rivestimento, filtraggio ed eventuale cementazione di alcuni tratti;
- 3) Sviluppo del pozzo, cioè operazione di spurgo e pulizia del foro.

Una volta completato il pozzo, prima di inserire gli strumenti di prelievo bisogna ripulirlo anche dal fango di circolazione e dai detriti.

La perforazione può essere eseguita in diversi modi a seconda del metodo di avanzamento:

- A percussione;
- A rotazione;
- A rotopercussione.

A percussione può essere con sistema :

- A cavo;
- Ad aste (piene o cave).

A rotazione può essere con sistema:

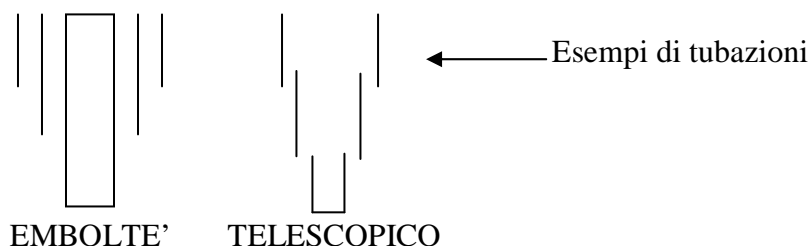
- A carotaggio continuo;
- A distruzione di nucleo (a circolazione di fango o a circolazione d'aria).

A rotopercussione può essere con sistema:

- Con martello a fondoforo (DTH);
- Con martello fuori dal foro (TH).

La scelta dipende dal diametro del foro, dalla natura delle rocce e dalla profondità da raggiungere. Per grandi diametri (600-800-1000 mm) si utilizza **la perforazione a percussione** le profondità sono limitate a 200-300 m. questo sistema utilizza la cucchiaia, la scarpa tagliente o gli scalpelli questi sono strumenti cavi all'interno e lo sportello a valvola che chiude lo strumento per prelevare dal fondo il detrito. L'acqua permette di raffreddare lo strumento e di prelevare più facilmente il detrito. Questo metodo ha velocità di avanzamento di 1-2 m al giorno nei calcari. Per evitare franamenti le pareti del foro vanno rivestite perché non c'è il fango di circolazione che stabilizza le pareti. Un altro strumento è la benna. Vi è un metodo molto comune in idrogeologia di perforazione a percussione detto "**giracolonne**": spezzoni di tubo in acciaio sono inseriti nel foro per battitura o per semirotaazione. A 40-80 cm si riduce il diametro del foro per l'attrito laterale che aumenta con la profondità. Questo è un altro motivo per cui oltre i 150 m è impossibile proseguire la perforazione.

Con il sistema a percussione non essendoci fluido circolante permette un facile riconoscimento della litologia.



La perforazione a percussione è a secco, quindi, c'è la necessità di rivestire le pareti del pozzo. La tubazione è finestrata nella zona dell'acquifero, chiusa nella restante zona.

Inserendo il ghiaietto, si sfilava il rivestimento provvisorio precedentemente inserito e s'inserisce la tubazione definitiva. Il ghiaietto sostiene le pareti del foro, trattiene le particelle più fini del terreno evitando che entrino nella tubazione per mezzo della finestratura, per evitare di prelevare acqua e particelle fini. Infine, si inserisce una pompa sommersa. Il diametro della pompa condiziona la scelta del diametro del foro da realizzare e la profondità, quindi questi due parametri devono essere noti sin dall'inizio della realizzazione.

Tra pompa e pareti del pozzo devono esserci almeno 25-50 mm in più del diametro della pompa. Il diametro della pompa dipende dalla potenza della pompa:

$$P = \frac{Q \cdot H}{\alpha \cdot r} \qquad P = \frac{L}{t} = \frac{F \cdot s}{t}$$

Q: portata di prelievo l/s;

H: potenza monometrica in m;

$\alpha$ : coefficiente di trasformazione;

r: rendimento della pompa e dipende dalle caratteristiche della pompa e può variare da 0.5-0.7.

Come è facile capire dall'equazione all'aumentare del rendimento (r) diminuisce la potenza (p) e quindi si risparmia energia.

H: prevalenza monometrica è dato dalla somma di queste componenti:

- 1) prevalenza geodetica;
- 2) perdite di carico in corrispondenza della condotta di aspirazione;
- 3) perdite di carico lungo le condotte irrigue;
- 4) pressione d'irrigazione.

Quando il pozzo è poco profondo il diametro del pozzo è costante, per diversi metri il diametro si riduce con la profondità. Il diametro dev'essere minore quando si raggiunge l'acquifero per ridurre lo spessore del dreno di ghiaietto.

Un tubo finestrato è meno resistente di un tubo cieco. Il tubo può essere in acciaio zincato o contrarmato per proteggerlo dalla corrosione, per acque minerali i tubi sono in acciaio.

Naturalmente una volta che i tubi sono posti in luogo bisogna fare delle verifiche per vedere quali sono gli effetti della pressione. Lo spessore dei tubi varia da 5-10 mm.

I tubi di diverso diametro possono essere avviati fra loro oppure tenuti insieme attraverso un metodo detto "linear anger" a molle.

**Il sistema a rotazione** consente profondità di un migliaio di metri e diametri compresi tra 200-600 mm (a circolazione diretta). Ci sono altri due tipi di sistemi: Sistema top drive che è un sistema rotante in testa della sonda e il sistema rotare che è un sistema rotante nella parte bassa della sonda. Nel sistema a rotazione il fango in uscita passa per un setaccio che trattiene il detrito che permette il riconoscimento. Il fango circolante è sempre lo stesso. Il fango con la sua pressione controbilancia la pressione litostatica formando una pellicola di ~ 2 mm. Con lo spurgo (getto d'acqua o aria ad alta pressione) si liberano le pareti di questo intonaco.

**Il sistema a rotoperussione** si usa in rocce calcaree autoportanti allo scavo perché è un sistema più veloce, non si ha il fango di circolazione ma solo aria compressa, i diametri sono compresi fra 200-500 mm e le profondità sono molto elevate quelle più profonde sono quelle petrolifere che raggiungono anche i 12-13 Km. Il sistema a rotoperussione è un sistema misto.

## **Gli utensili di perforazione**

- **Scalpellini**: (per la distruzione di nucleo, rocce tenere o sciolte);
- **Carotieri**: (per rocce molto dure, corone diamantate, rocce dure e di maggiori dimensioni).
- **Alesatore**: allarga il foro e ripulisce le pareti del foro;
- **Carotiere semplice**: percentuale di carotaggio inferiore rispetto al carotiere doppio che può raggiungere anche il 100%;
- **Carotiere a fune**: permette il prelievo delle carote senza estrarre la strumentazione dal foro, perché la carota fuoriesce dalla batteria di aste. E' valido per perforazioni geognostiche e non per i pozzi d'acqua perché il diametro delle carote è molto piccolo;

**Perforazione ad aria**: dove non c'è rischio di franamenti delle pareti, quindi dove le pareti sono autoportanti allo scavo. La colonna d'acqua dev'essere inferiore a 100 m perché la pressione dell'aria non riuscirebbe a portare in superficie i detriti.. talvolta insieme all'aria vi è acqua e uno schiumante, questo permette di sparare i detriti permettendo di riportarli più facilmente in superficie.

Naturalmente, nei tubi devono essere inseriti dei filtri, per garantire una migliore qualità dell'acqua.

**Filtri a deflettore** : sostengono i detriti (deviati verso il basso affinché non otturino le aperture);

**Filtri con aperture quadrate**: realizzati mediante delle finestre con tagli in corso d'opera;

**Filtri con tagli verticali**: preferiti perché l'acqua filtra meglio (1-2 mm);

**Filtro a graniglia**: anima in plastica, all'interno ci sono granuli di sabbia legati fra loro con resina (uno ad uno);

**Filtri Johnson**: in acciaio INOX. Filo a sezione triangolare avvolto a spirale attorno ai tondini. Questo offre maggior resistenza allo schiacciamento. Per l'elevata superficie aperta si garantisce una filtrazione di tipo laminare, riducendo la turbolenza e le perdite di carico perché limita la velocità di entrata del flusso d'acqua. Le perdite di carico con questo filtro sono minime. Notevole risparmio energetico nel pompaggio.

Attraverso i filtri bisogna evitare che le particelle più fini entrino nella tubazione, per evitare anche un collasso delle pareti o una corrosione delle tubazione. Per ovviare a questi inconvenienti si costruiscono filtri con ghiaietto calibrato.

Quando l'acquifero è sabbioso-limoso si sceglie l'apertura del filtro Johnson di 0.5 mm e il ghiaietto di 0.8-1.2 mm.

In Puglia, l'intasamento è un problema nel Tavoliere( sia nella falda superficiale, sia per gli starti limoso-argillosi intercalati alle argille subappennine).

I filtri devono avere una superficie aperta comparabile con il terreno, cioè se il terreno ha porosità pari al 25% il filtro deve avere aperture pari al 25% dell'area totale del tubo finestrata.

**Inghiaiamento**: questa operazione si compie con batterie di aste di perforazione con acqua o con aria a pressione, si fa passare il ghiaietto che scende con uno stabilizzatore. L'acqua che scende assesta il dreno e risale dall'intercapedine. Se il pozzo è poco profondo il ghiaietto è immesso con tubicini per gravità.