

**Corso di Idrogeologia Applicata**  
*Dr Alessio Fileccia*

**Prove in sito**  
**(Le prove di portata)**

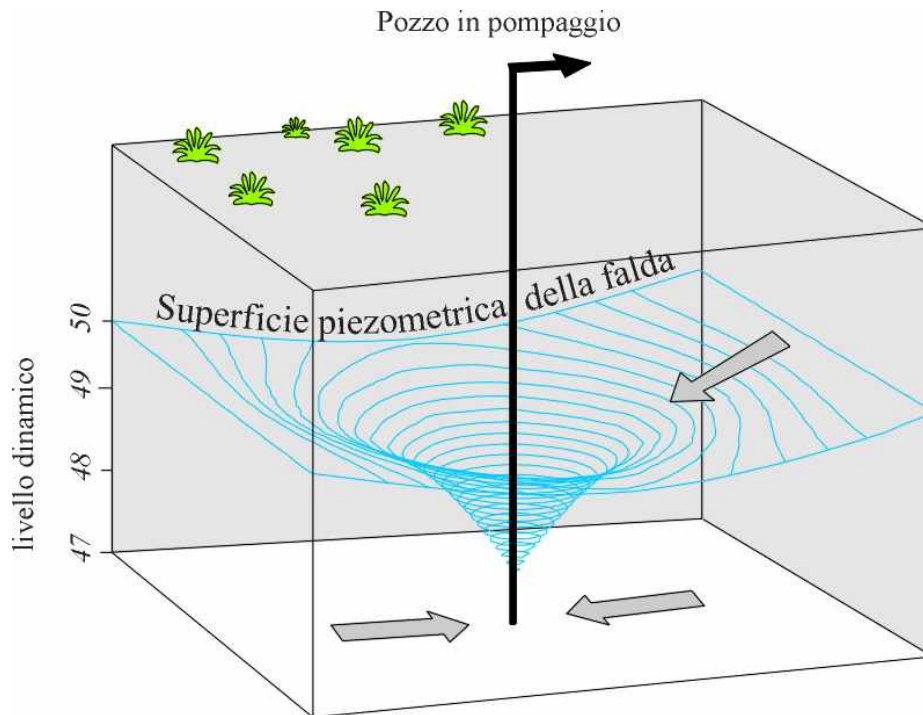
Le immagini ed i testi rappresentano una sintesi, non esaustiva, dell'intero corso di Idrogeologia tenuto presso il Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine dell'Università di Trieste. Il programma completo prevede, oltre agli argomenti in elenco e per ogni capitolo, una serie di esercizi con applicazione delle formule analitiche, la descrizione di alcuni software specifici per geostatistica, prove di portata, modellistica ed un'uscita con prove pratiche in un campo pozzi. Le lezioni sono periodicamente aggiornate e controllate. Per una versione definitiva, informazioni, segnalazione di errori o commenti, rivolgersi a:

Dr Alessio Fileccia ([geofile@libero.it](mailto:geofile@libero.it))

Per scaricare l'intero corso: [www.disgam.units.it/didattica/insegnamenti-13.php](http://www.disgam.units.it/didattica/insegnamenti-13.php)

*(figure e foto sono dell'autore, se non diversamente specificato)*

## Cono di depressione di una falda in pompaggio



## Le prove di pompaggio

Le prove di pompaggio sono utilizzate per ricavare alcuni parametri idrogeologici fondamentali, come la trasmissività ed il coefficiente d'immagazzinamento, oltre che per chiarire la tipologia ed i limiti degli acquiferi; sono effettuate di prassi in acquiferi alluvionali e più raramente in quelli fratturati. Rispetto a quelle in pozzetto superficiale, forniscono informazioni su aree molto più estese di acquifero.

Con i dati in possesso si possono fare svariate valutazioni pratiche, ad esempio sui futuri abbassamenti di una falda in sovrappompaggio, sull'estensione areale di tali abbassamenti, sulle direzioni di propagazione di certi inquinanti, sull'efficacia di un sistema di disinquinamento ecc. La procedura generale prevede il pompaggio di un volume d'acqua da un pozzo e la misura dei livelli dinamici della falda sia nel pozzo principale sia in uno o più piezometri circostanti.

Se si considera un pozzo che pompa per un lungo periodo la superficie piezometrica prende la forma di un cono rovesciato al cui centro si trova il pozzo (vedi figura). Lo scopo è quello di produrre un aumento del gradiente idraulico, tale da spostare l'acqua verso i filtri. Nel pozzo l'acqua deve entrare attraverso una superficie cilindrica (quella dei filtri) relativamente piccola ed occorre un gradiente notevole (secondo Darcy) affinché il flusso sia uguale alla portata pompata. Attraverso ogni cilindro concentrico al pozzo e di raggio crescente, deve passare una portata costante, ma poiché la superficie aumenta proporzionalmente al raggio, il gradiente necessario a mantenere il flusso, diminuisce all'aumentare della distanza dal pozzo e questo produce una forma ad imbuto della superficie dinamica di depressione.

## Regime permanente e transitorio

Quando inizia il pompaggio, nei primi istanti l'acqua estratta proviene dall'interno del pozzo e dalla zona immediatamente circostante (più permeabile).

A poco a poco il cono di influenza si estende così da compensare il volume estratto.

Il periodo durante il quale  $\Delta s$  aumenta è definito regime non permanente (o transitorio).

In un acquifero limitato o senza apporti esterni, tutta la portata estratta proviene dall'immagazzinamento e quindi il regime è sempre non permanente.

Se l'acquifero è di grande estensione la velocità di abbassamento diminuisce gradualmente finché diventa così lenta da essere trascurabile e si può ammettere che  $\Delta s$  si è stabilizzato, si raggiunge pertanto un regime quasi permanente.

La caratteristica fondamentale del regime permanente è che non viene prelevata acqua dalla zona di immagazzinamento dell'acquifero, mentre invece in un regime variabile esso la fornisce (entra in gioco il coefficiente di immagazzinamento)

# Metodologia delle prove di pompaggio

Le prove consistono nel sottoporre un pozzo ad emungimento, tramite una pompa sommersa od aspirante, e nel misurare gli abbassamenti di falda provocati nello stesso pozzo e/o in piezometri vicini. A seconda del metodo di interpretazione scelto e della tipologia di acquifero, si costruiscono i grafici: tempo-abbassamento, abbassamento-distanza, abbassamento specifico-portata, portata-abbassamento ecc. che permettono di ricavare i parametri idrogeologici caratteristici dell'acquifero, nonché alcune valutazioni sulla correttezza esecutiva dell'opera. In genere è stata quindi sviluppata un'equazione che correla il tasso di abbassamento in un pozzo di osservazione con le proprietà complessive dell'acquifero. In altri termini, partendo dai dati di portata estratta, abbassamento, distanza pozzo-piezometri, si ricava la trasmissività, e l'immagazzinamento dell'acquifero mediante una procedura grafica. E' importante inoltre ricordare che la geometria della prova ed il metodo di interpretazione scelto, variano a seconda delle caratteristiche del pozzo e dell'acquifero (freatico, confinato, semiconfinato, vicino ad un limite alimentante od impermeabile, ecc.). Nel caso in cui la prova è effettuata in un unico pozzo viene indicata come prova in pozzo, se invece le misure sono effettuate anche in uno più piezometri vicini si parla di prova su acquifero. Comunque sia effettuata la prova è fondamentale che l'acquifero sia sollecitato in modo tale da produrre abbassamenti misurabili e di una certa entità.

# PROVE DI PORTATA

(o pompaggio)

## Regime di equilibrio / non equilibrio

### Prove in pozzo

Di solito effettuate per determinare l'efficienza dell'opera, mediante calcolo della portata specifica e perdite di carico. Le misure in risalita possono servire anche per il calcolo di T. Sono effettuate in regime di non equilibrio.

#### Prove in pozzo a gradini

(Stepdrawdown test SDT in regime transitorio)  
Jacob, Bierschenk, Kasenow; perdite di carico ricavabili anche senza SDT;

Rappresentazione:  $s - Q$ ;  $s/Q - Q$ ;  $s - \log t$ ;  $s' - \log t/t'$   
Parametri: T, Qs, Qc, WE, perdite di carico

### Casi particolari

Pozzo incompleto  
Pozzo vicino a limiti  
Pozzi multipli (sovrapposizione degli effetti)

Parametri:  
R, stima di T da Qs (formule ed abachi)

### Prove su acquifero

(con uno o più piezometri)

#### Regime di equilibrio

(o permanente; steady state, si effettuano in discesa)

Acquifero artesiano (metodo di Thiem)  
Acquifero freatico (metodo di Dupuit)  
Rappresentazione:  $s/\log r$ ;  $H^2 - h^2 / \log r$   
Parametri: T, R, Qs

#### Regime di non equilibrio

(Transitorio o non permanente; unsteady state si effettuano in discesa e risalita)

Acquifero artesiano (metodo di Theis, Cooper-Jacob)  
Acquifero freatico (metodo di Theis, Cooper-Jacob)  
Acquifero freatico (scarico ritardato, Neuman)  
Acquifero semiartesiano (Hantush)  
Rappresentazione:  
 $\log 1/u - \log W(u)$ ;  
 $\log 1/u - \log W(u, r/B)$ ;  $s / \log t$ ;  $s / \log r$ ;  $s / \log t/r^2$ ;  
 $s' / \log t/t'$

Parametri: T, R, S, B, Qs, K'

## Parametri richiesti

### Tipo d'acquifero

- Raccolta dati geostratigrafici
- Elenco flussi naturali ed artificiali
- Punti d'acqua
- Ricostruzione della piezometria locale
- Modello idrogeologico locale

## Caratteristiche di pozzo e/o piezometri

### Pozzo

- Diametro
- Profondità
- Filtraggio, tubaggio e cementazioni
- Pompa e portate
- Scarico acqua durante la prova
- Numero, distanza, profondità dei piezometri

## Aspetti da considerare

### Esecuzione della prova di portata

### Tipo di prova

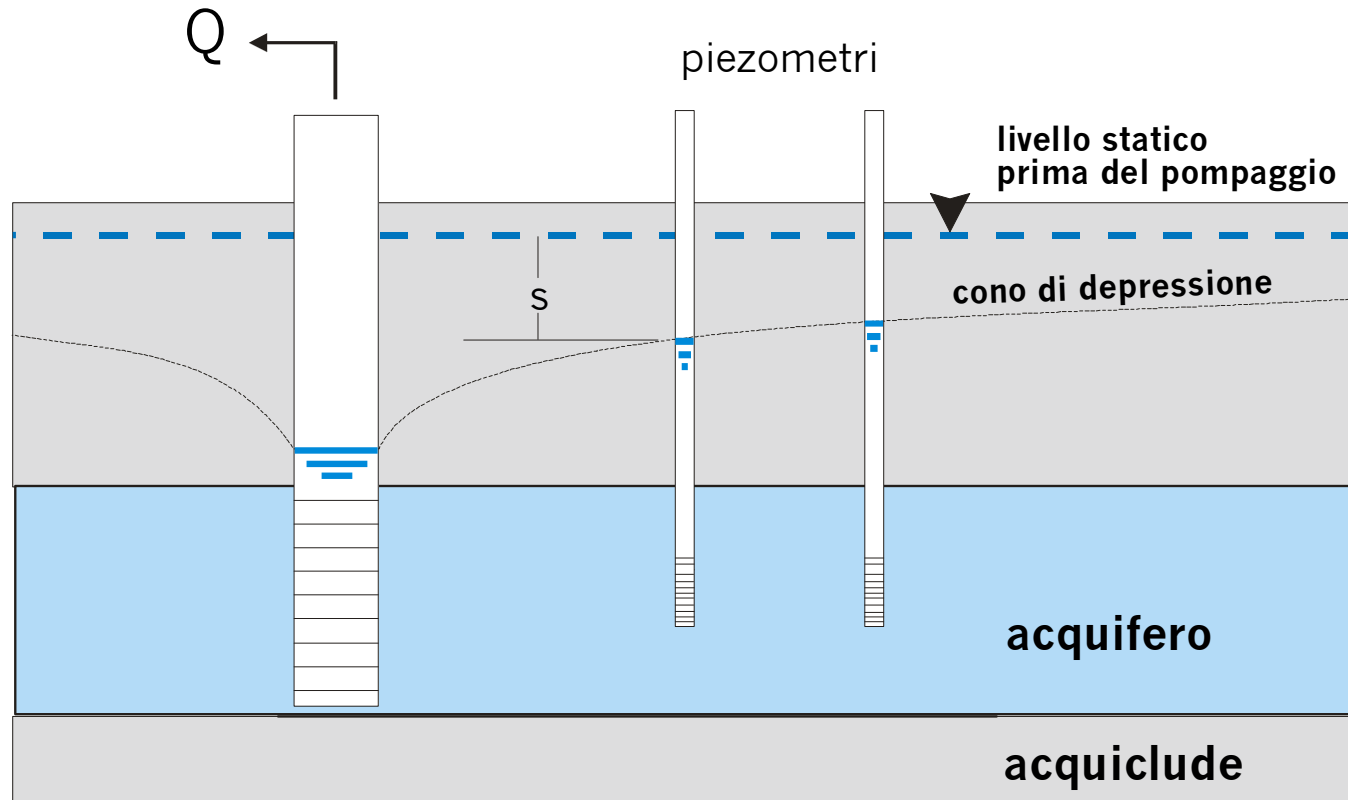
(Q costante, Q variabile, equilibrio, non equilibrio)

### Metodo d'interpretazione

(Thiem, Dupuit, Theis, Cooper-Jacob ecc.) grafici semilog o log-log, metodo tempi-abbassamenti o distanza-abbassamenti, in discesa o risalita

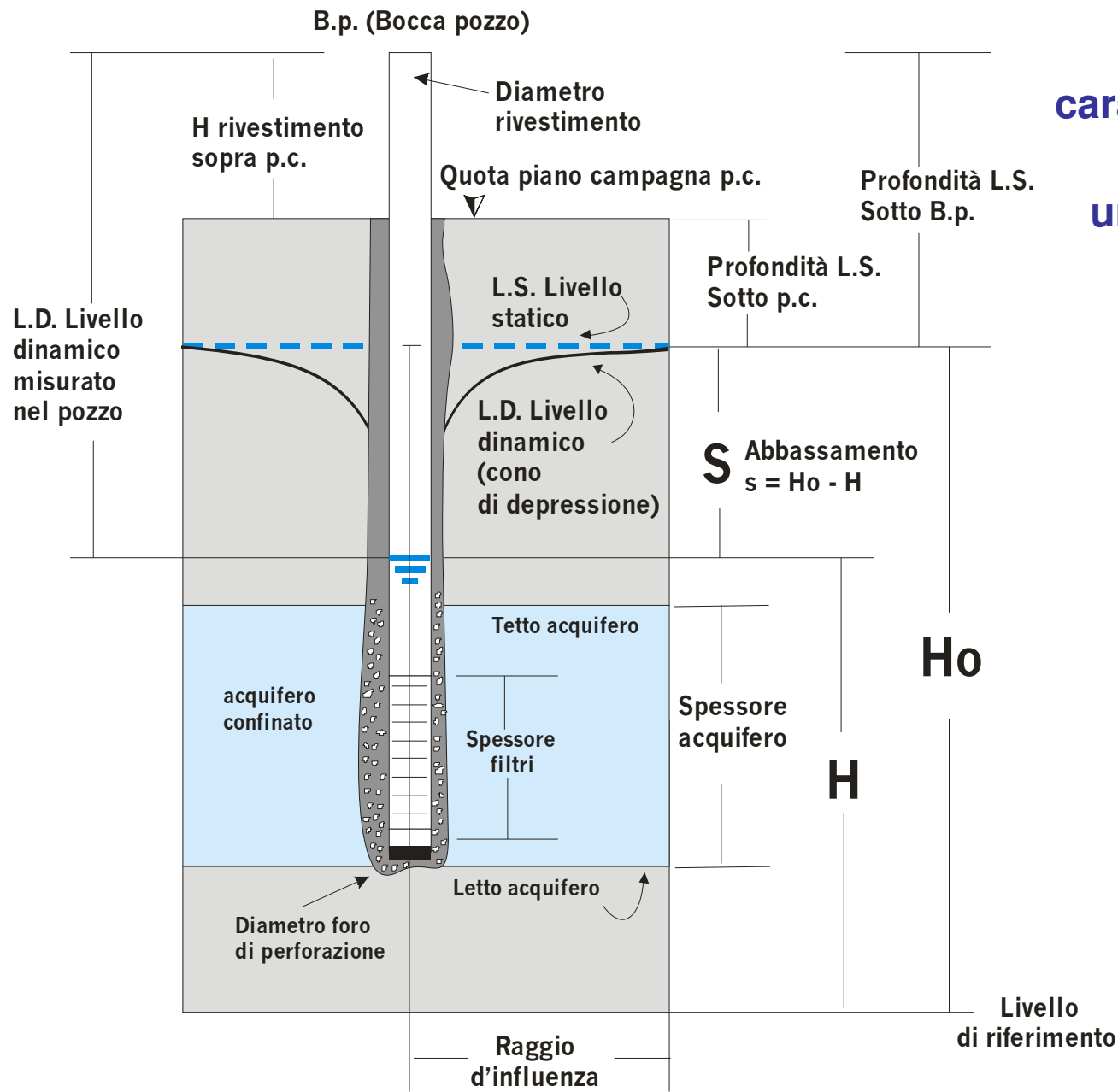
## Schema pozzo-piezometri per una prova di portata

Il pozzo in pompaggio deve essere completo ed i piezometri filtrare la parte mediana dell'acquifero. La loro distanza massima dal pozzo principale, dipende da vari fattori, ma in genere non supera i 100-300 m



*(Idrogeologia: prove in sito)*





**Grandezze che caratterizzano un pozzo durante una prova di portata**

**Nella figura sono sintetizzate le caratteristiche da ricavare durante la prova ed in base alla geometria pozzo-acquifero**

## Indagini preliminari

Prima di iniziare la prova è necessario ottenere una serie di dati o condurre delle indagini preliminari, che aiuteranno a scegliere la metodologia esecutiva ed interpretativa più adeguate:

- informazioni stratigrafiche del sito e possibilmente ricostruzione geometrica dell'acquifero
- condizioni al contorno e regime
- superficie piezometrica
- punti d'acqua nelle vicinanze

## Zona della prova

- La situazione stratigrafica ed idrogeologica dovrebbe essere costante nei dintorni
- La zona dovrebbe essere lontana da pozzi in emungimento o di ricarica
- L'acqua pompata deve essere allontanata ad una distanza tale a non ricaricare l'acquifero studiato
- Il gradiente piezometrico circostante deve essere basso
- Il luogo deve essere facilmente accessibile da uomini e mezzi

*Prova di portata, Libia*



## Il pozzo

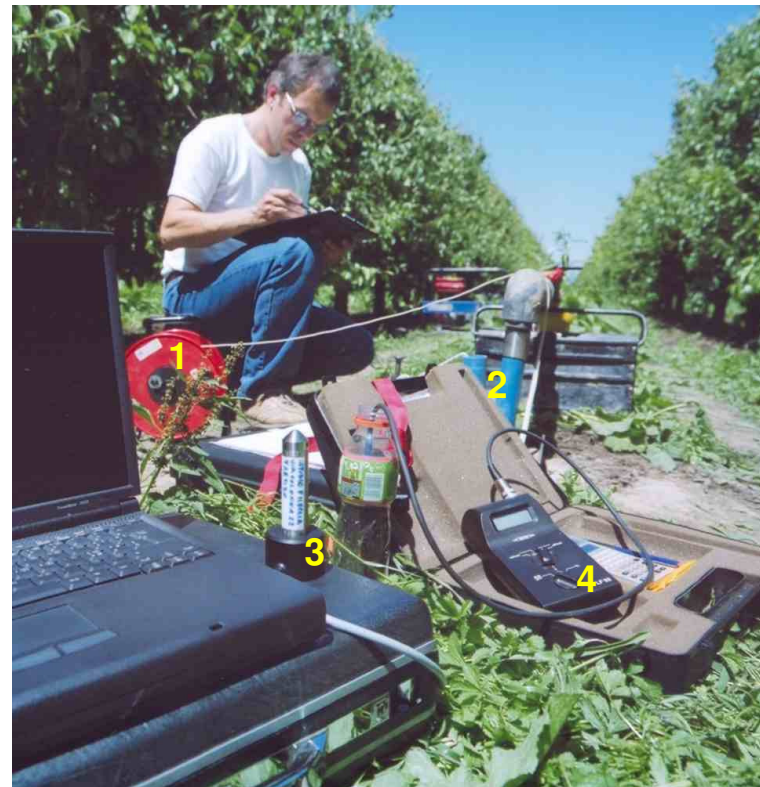
Per quanto riguarda il disegno del pozzo si tenga in considerazione:

- Diametro
- Capacità della pompa
- Profondità, lunghezza e tipo di filtro oltre che al dreno
- Durata del tempo di pompaggio

## I piezometri

Lo scopo dei piezometri è misurare il progressivo abbassamento della falda distante dal pozzo in pompaggio, di ricavare il coefficiente d'immagazzinamento (S) oltre che il raggio d'azione.

L'utilità dei piezometri si rivela nel fatto che gli abbassamenti non sono influenzati dalle perdite di carico, presenti invece nel pozzo. Con le sole misure nel pozzo in pompaggio non è possibile ricavare un valore attendibile di S.

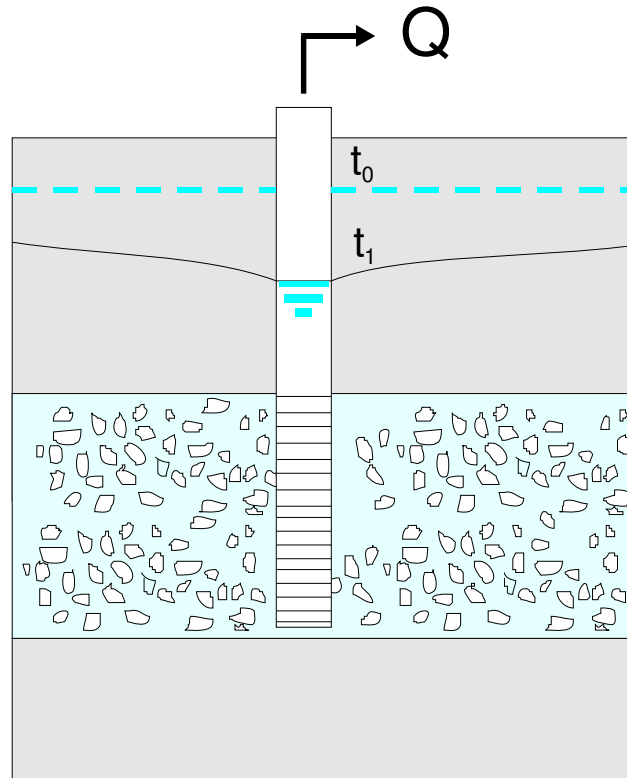


1: freatimetro; 2: pozzo; 3: sonda automatica di livello; 4: conducimetro

La distanza dei piezometri dal pozzo dipende dal tipo e permeabilità dell'acquifero, durata ed entità del pompaggio, lunghezza dei filtri.

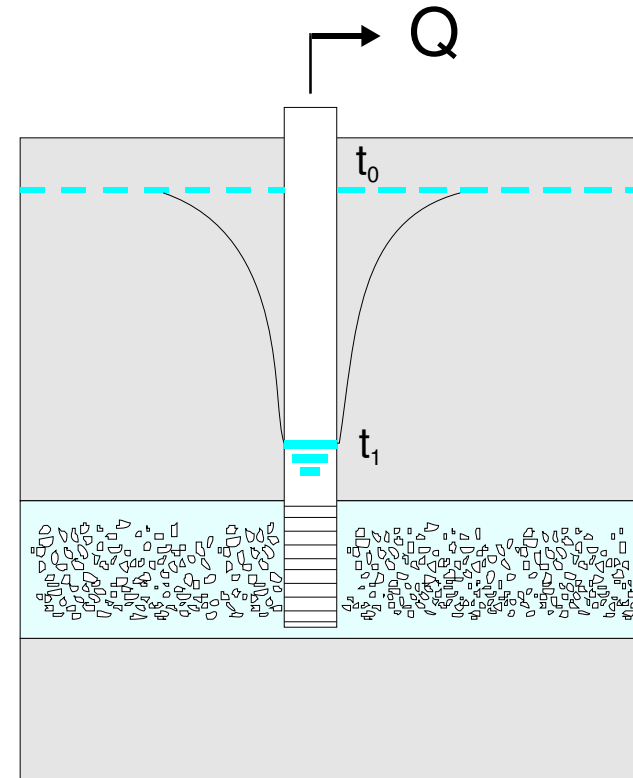
Ad esempio, se la trasmissività è elevata il cono di depressione è largo e piatto, mentre se la trasmissività è bassa, il cono è più pronunciato e poco esteso.

Nel primo caso i piezometri possono essere più distanti.



Acquifero ad alta trasmissività  
 $T = 1240 \text{ mq/d}$   
 $s = 0,8 \text{ m}$   
 $Q = 62,7 \text{ l/s}$

$T > T'$



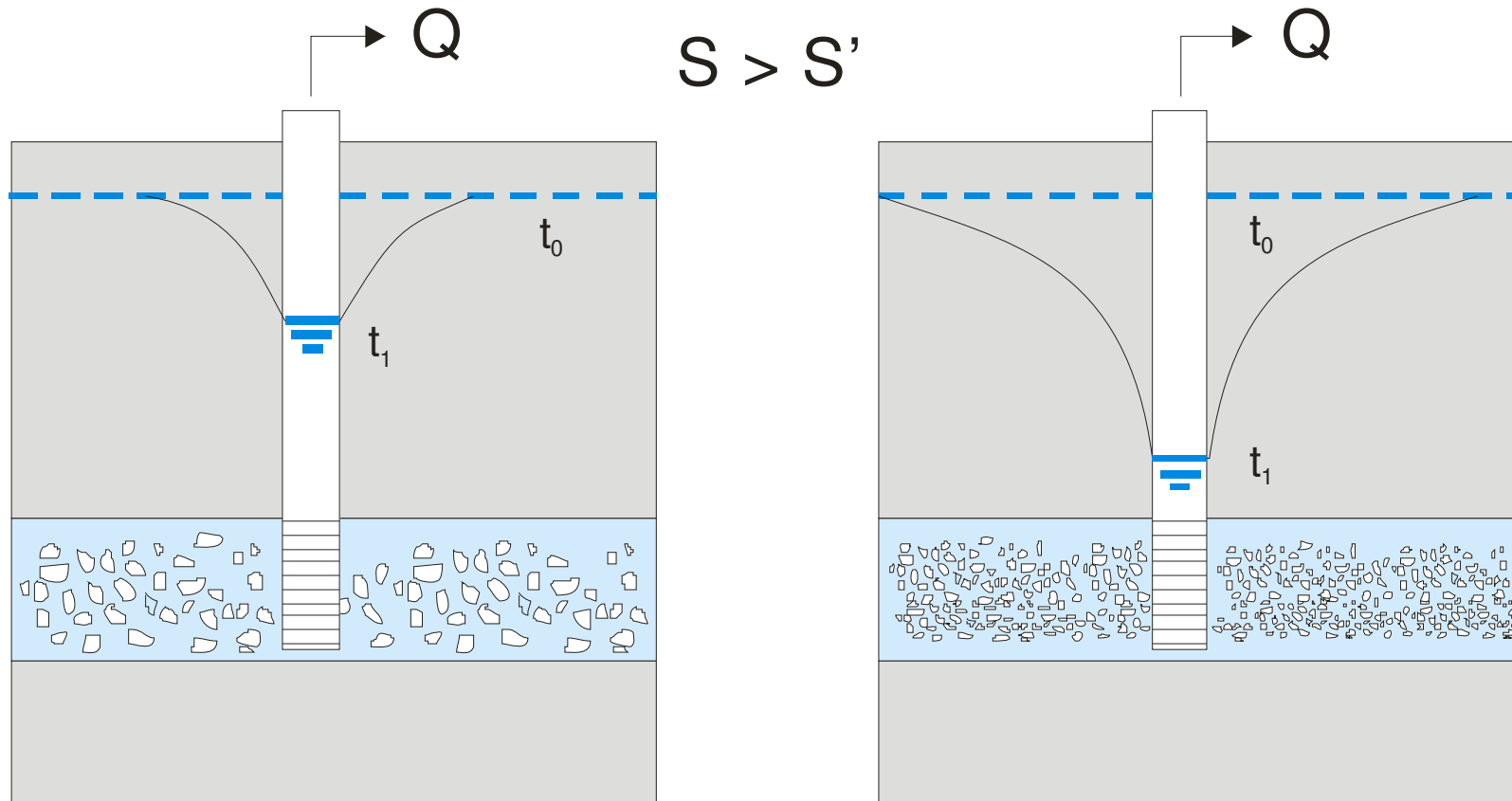
Acquifero a bassa trasmissività  
 $T = 124 \text{ mq/d}$   
 $s = 7,9 \text{ m}$   
 $Q = 62,7 \text{ l/s m}$

(Idrogeologia: prove in sito)

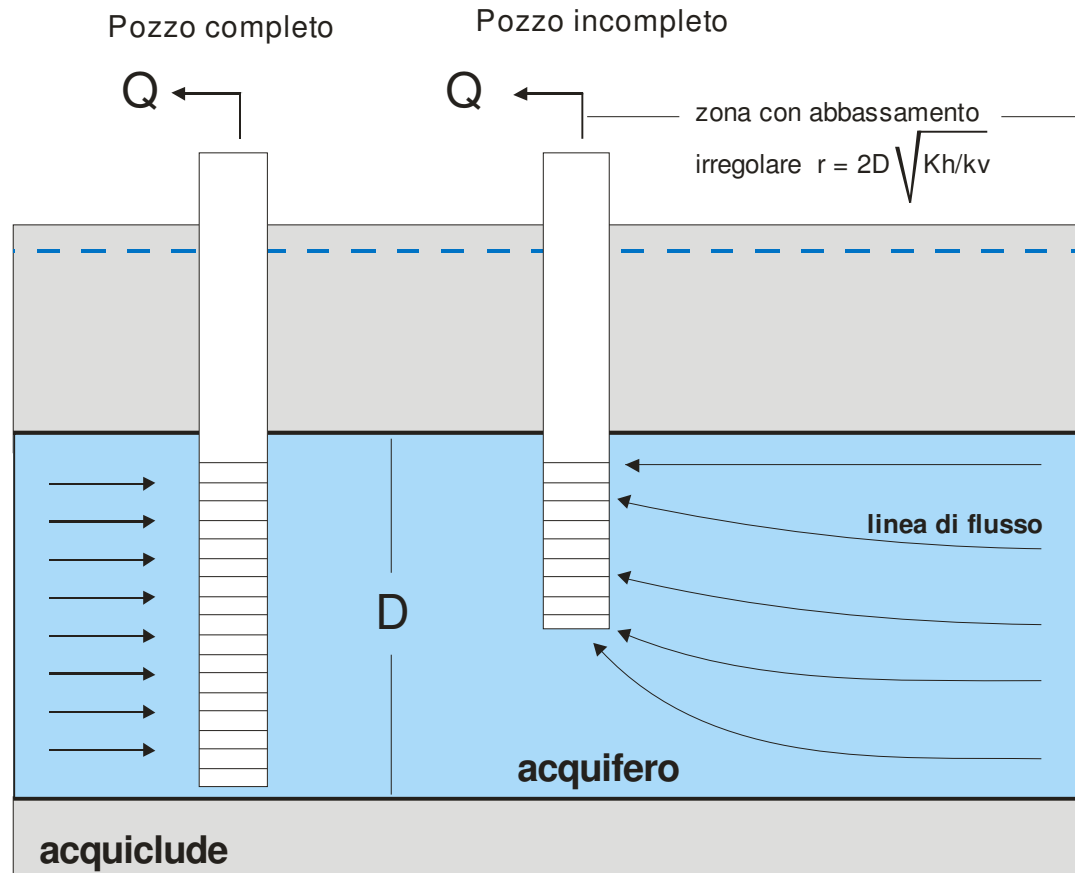
Analogamente si verifica quando si considera l'immagazzinamento dell'acquifero.

Ad esempio, a parità di altri fattori, il raggio di azione è molto più esteso in acquiferi artesiani, che non in quelli freatici. Secondo Lohman il rapporto può essere di 1 a 10.

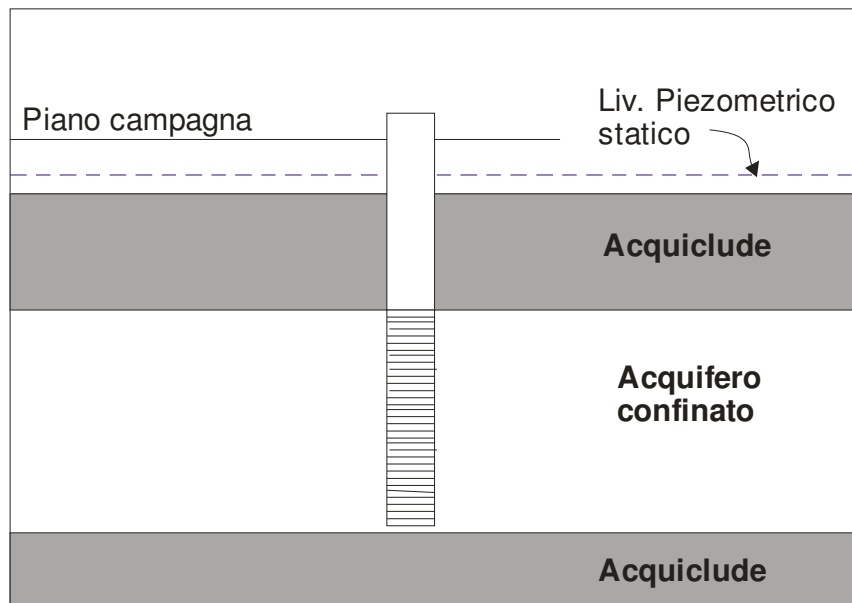
Ad esempio, per  $Q$  e  $T$  costanti, se il raggio di azione in un acquifero freatico è di 120 m, in uno artesiano può arrivare a 1200 m.



Se il pozzo non è completo, come è spesso il caso in acquiferi molto potenti, il flusso ha una componente verticale che si estende dai filtri, fino ad una distanza di circa 1,5 - 2 volte lo spessore dell'acquifero. Gli abbassamenti misurati necessitano quindi di una correzione, per potere essere utilizzati nelle formule.



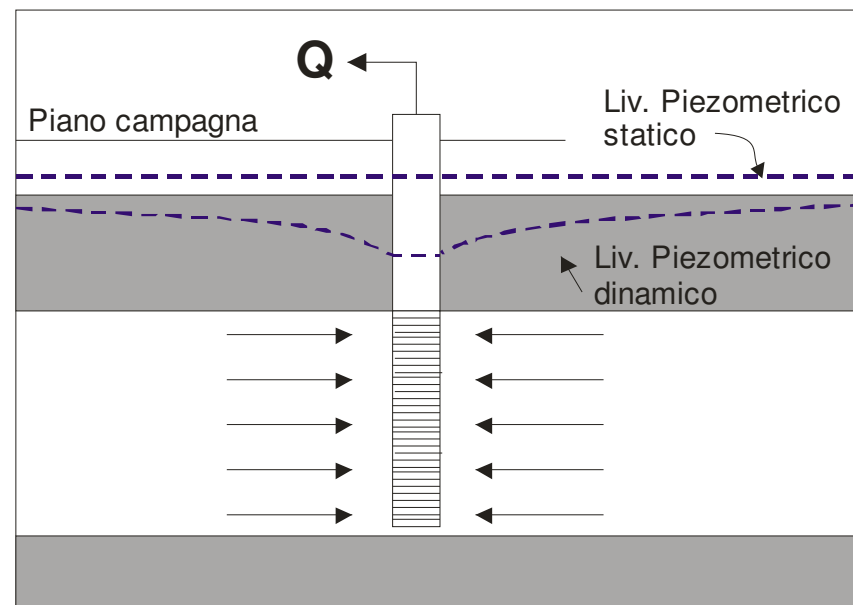
(Idrogeologia: prove in sito)



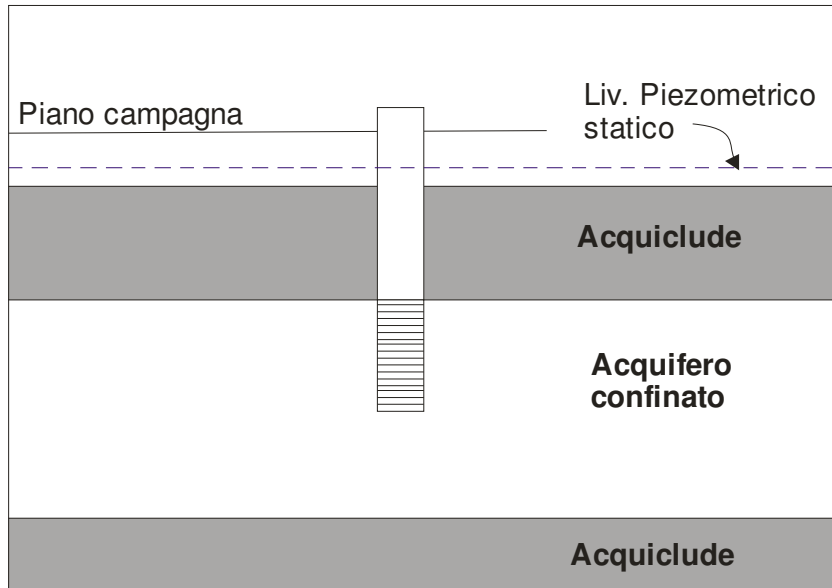
A: pozzo completo, situazione iniziale

**A**

## Modifica del flusso e degli abbassamenti in pozzo in base alla percentuale di completamento

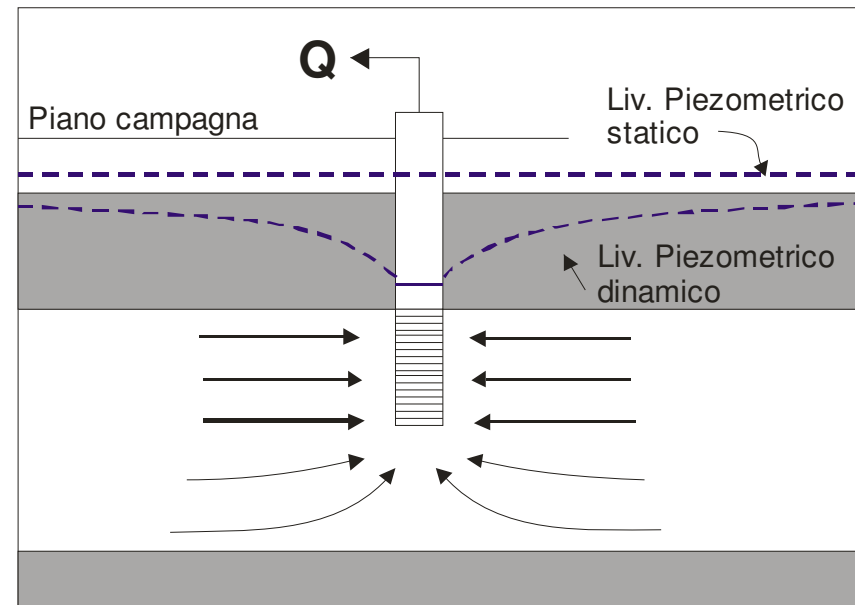


A: pozzo completo in pompaggio



B: pozzo completo al 50%, situazione iniziale

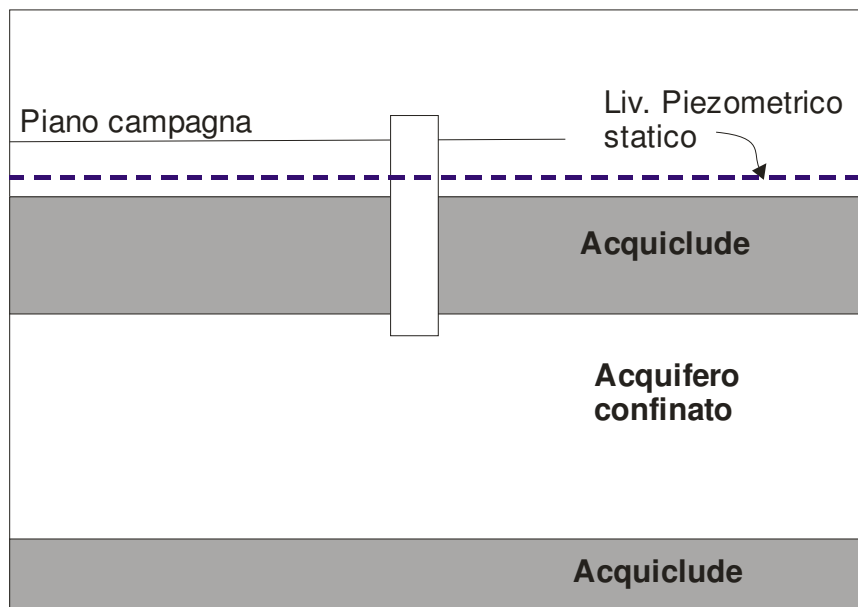
## Modifica del flusso e degli abbassamenti in pozzo in base alla percentuale di completamento



B: pozzo completo al 50% in pompaggio

**B**

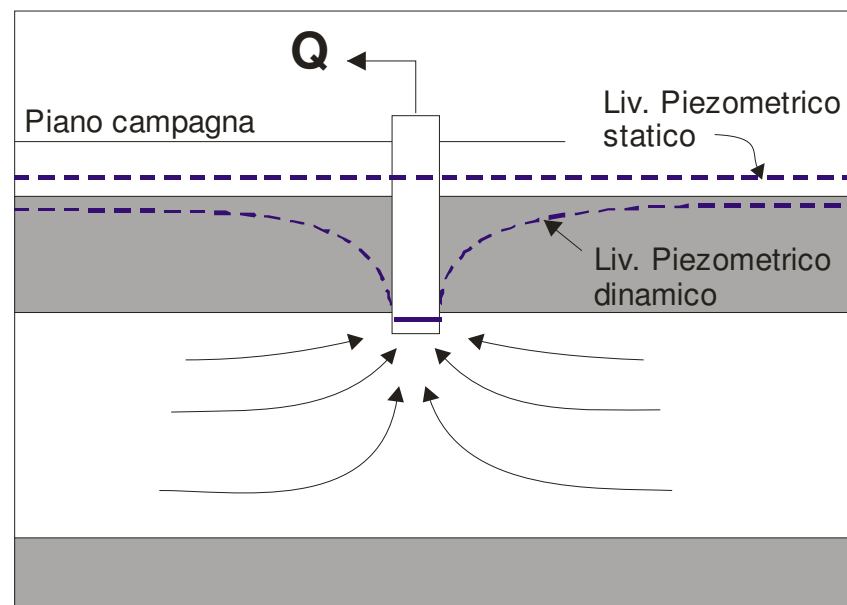




C: pozzo non completo, situazione iniziale

**C**

## Modifica del flusso e degli abbassamenti in pozzo in base alla percentuale di completamento



C: pozzo non completo in pompaggio

## **Abbassamento e limiti (condizioni idrauliche al contorno)**

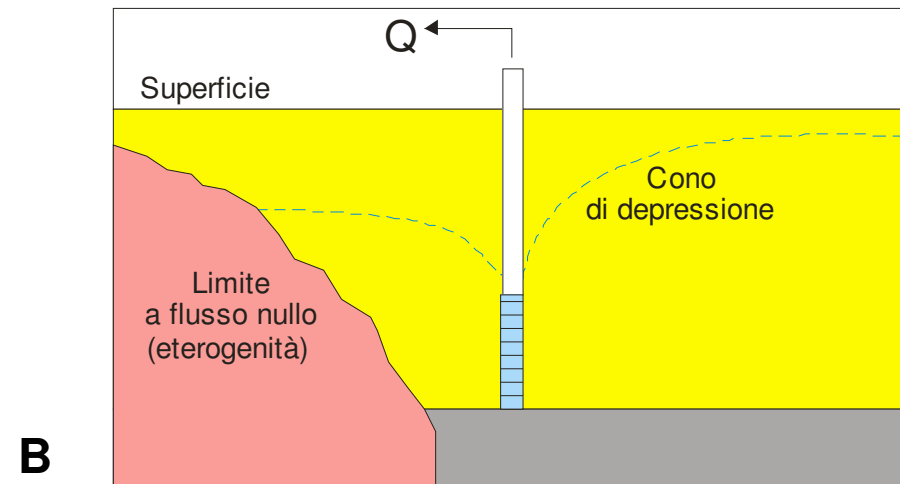
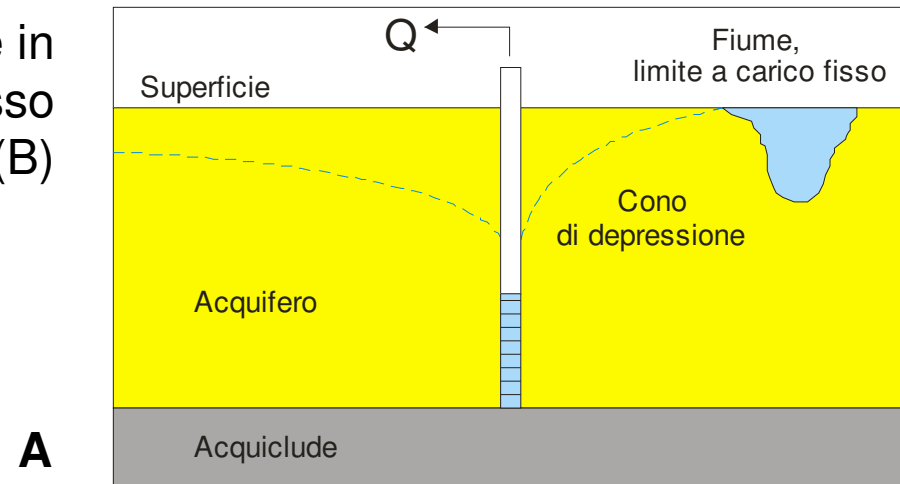
Tra i numerosi parametri che influiscono il flusso di falda verso una zona od un pozzo in pompaggio, oltre che la porosità e la conducibilità idraulica, ve ne sono altri, spesso sottovalutati e non solo dovuti alle caratteristiche costruttive del pozzo, si tratta delle condizioni idrauliche al contorno.

Una condizione al contorno è spesso utilizzata per descrivere in maniera più realistica quello che si verifica ai limiti dell'area di investigazione.

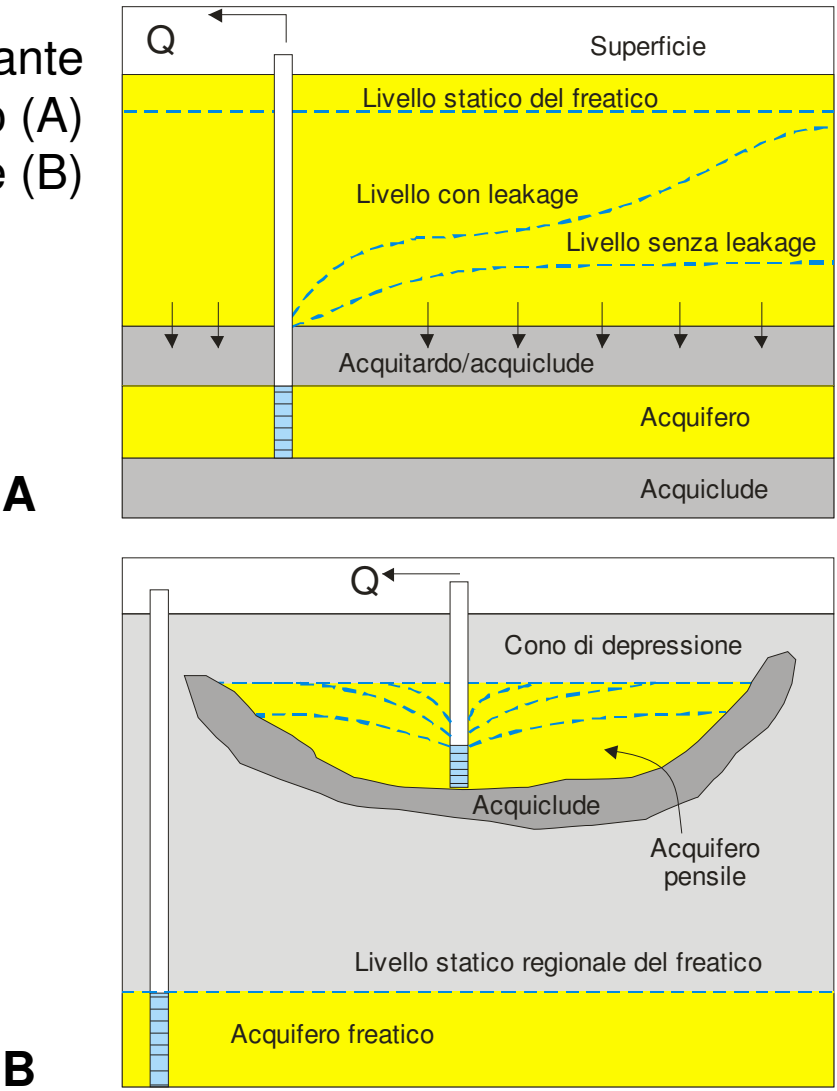
Tale procedura è normale nel caso di applicazione di un modello numerico, ma andrebbe lo stesso prevista per le prove di portata. In pratica si tratta di ipotizzare una ampiezza di zona influenzata dalla prova, valutando quantità e velocità del flusso idrico in entrata od uscita.

Riferendosi ad esempio, al caso seguente (A), la prova mostra la presenza di una condizione al contorno a "carico fisso", in altre parole lungo il limite della zona influenzata dal cono di depressione, il carico idraulico rimane costante qualunque sia la portata estratta, per la presenza di una fonte di alimentazione considerata infinita (fiume, lago) ed in contatto idraulico con l'acquifero testato; gli abbassamenti diventano pertanto non misurabili. E' evidente che l'elaborazione dei dati, per essere attendibile, deve tenere conto di una tale situazione reale.

Dissimetria del cono di depressione in presenza di un limite a carico fisso (A) ed a flusso nullo (B)



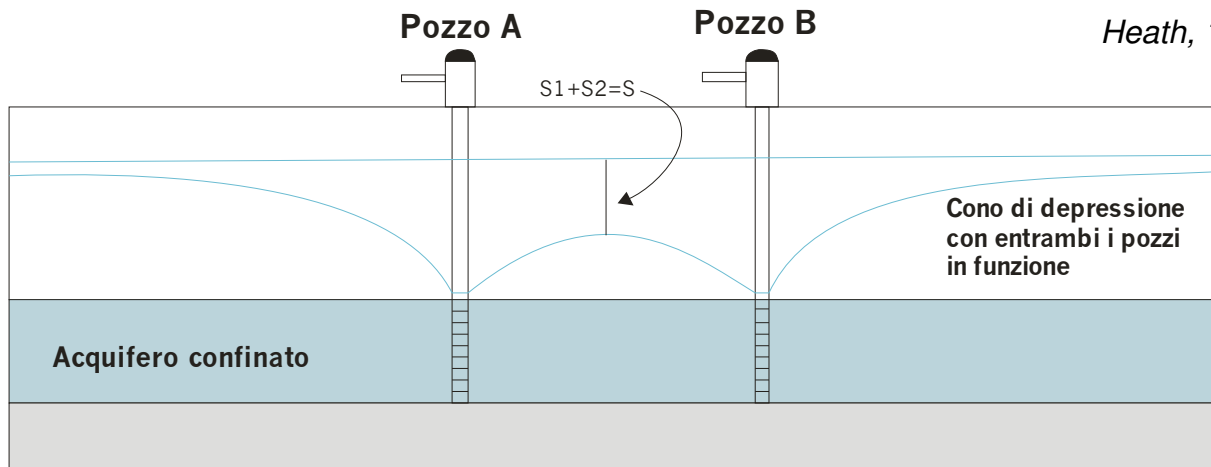
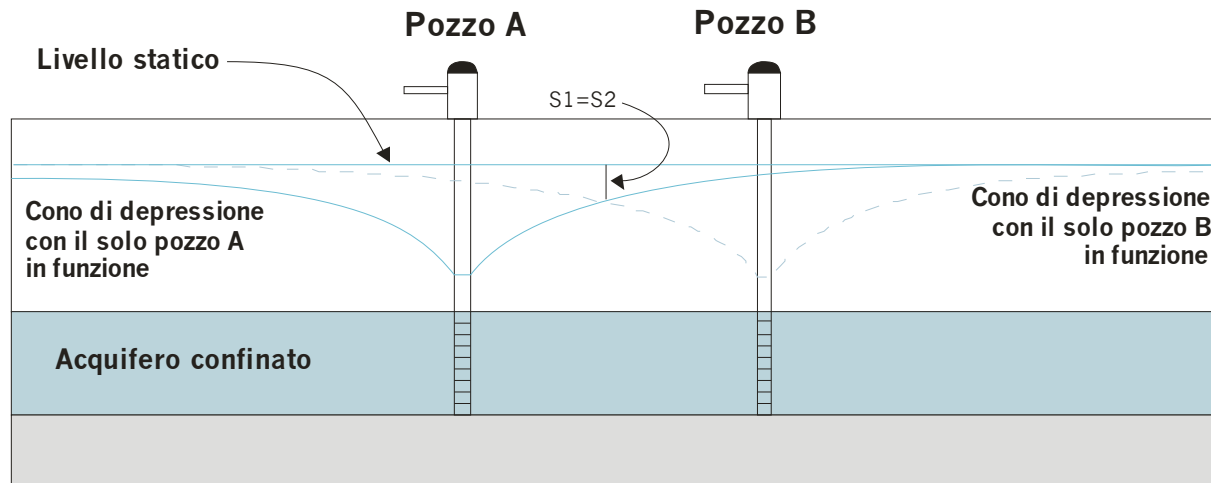
Modifica del cono di depressione durante una prova su acquifero semiconfinato (A) o pensile (B)



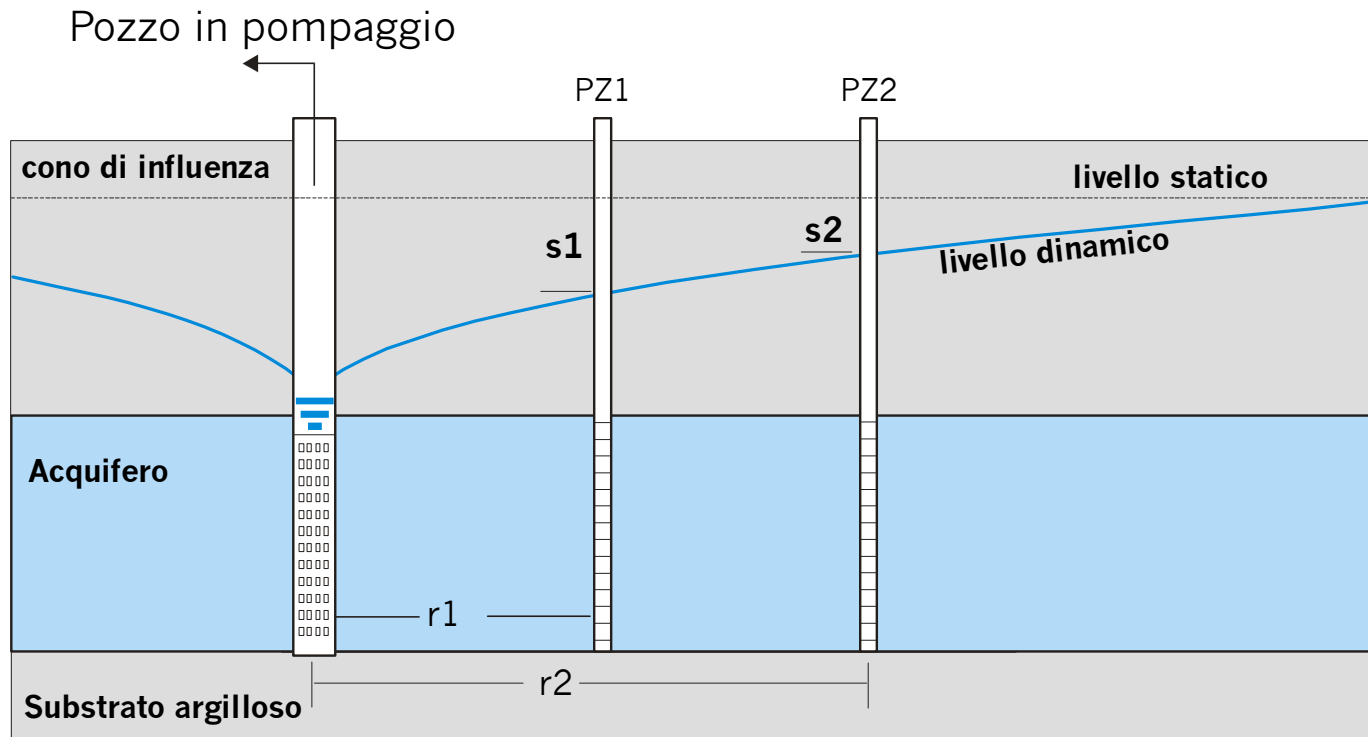
## Principio di sovrapposizione degli effetti

Il principio stabilisce che, in sistemi lineari, l'effetto di ogni sollecitazione può essere studiato separatamente e quindi sommato algebricamente agli altri. In altri termini gli abbassamenti causati da più pozzi possono essere calcolati separatamente e quindi sommati per avere l'abbassamento totale in un determinato punto. Per essere valido il principio, il sistema deve essere lineare; un acquifero freatico od una condizione di limite dipendente dal carico con variazioni brusche di flusso non sono lineari e quindi la sovrapposizione degli effetti non è strettamente valida.

(Idrogeologia: prove in sito)



## Soluzione in regime permanente *Metodo di Thiem*: acquifero confinato



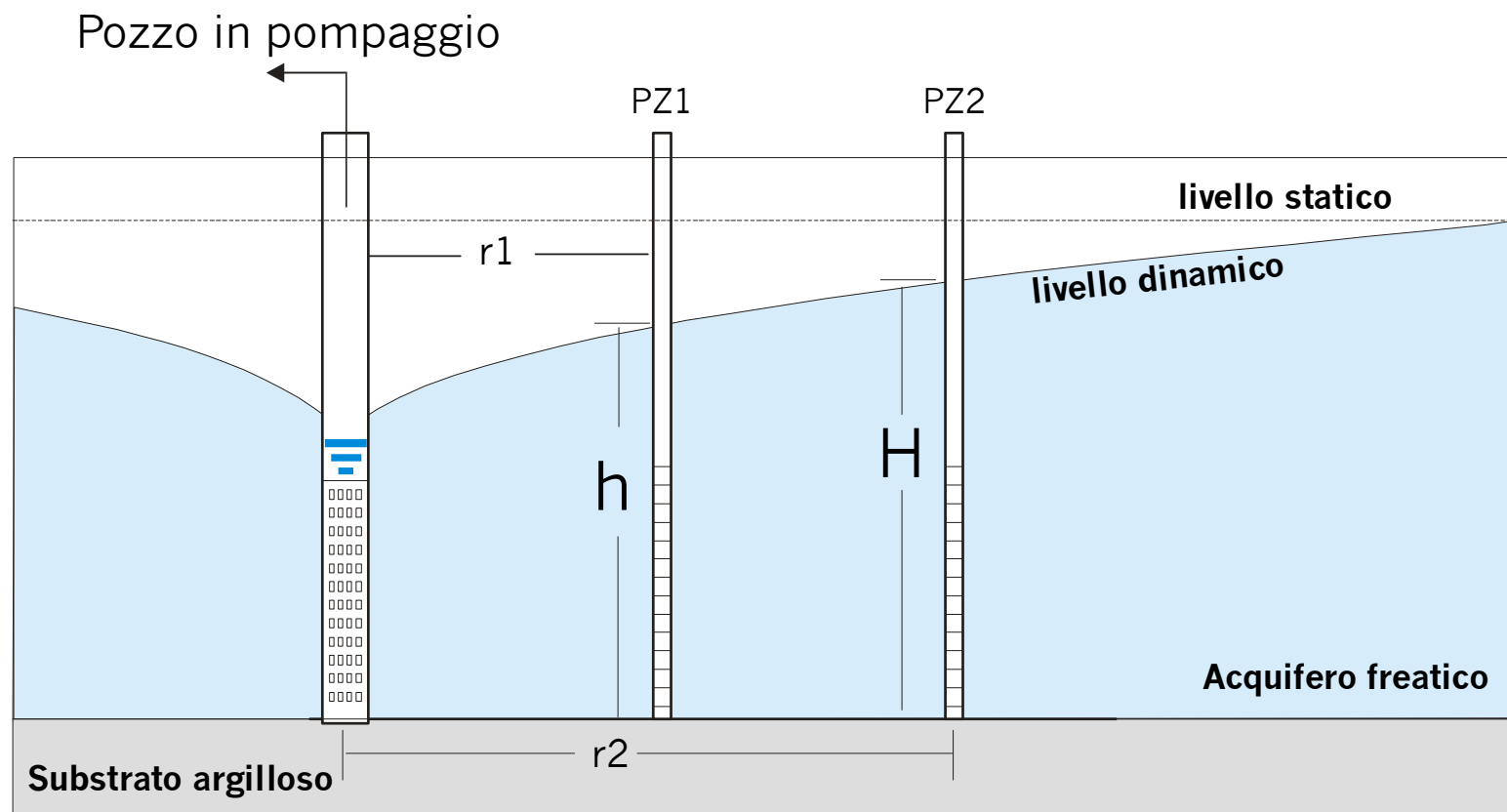
Conoscendo la portata costante, estratta durante la prova, le distanze dei piezometri dal pozzo e gli abbassamenti misurati, la trasmissività è data da:

$$T = \frac{0,366Q}{(s_1 - s_2)} \log \frac{r_2}{r_1}$$

condizioni di validità:

- pozzo completo
- Q costante
- flusso radiale, laminare
- acquifero omogeneo, isotropo, letto orizzontale, spessore costante
- dopo la stabilizzazione il livello dinamico resta costante (la portata non proviene dall'immagazzinamento)

## Soluzione in regime permanente *Metodo di Dupuit*: acquifero freatico



$$K = \frac{0,733 Q}{(H^2 - h^2)} \text{ Log } r_2/r_1$$

condizioni di validità:

- Q costante
- acquifero omogeneo, isotropo, letto orizzontale
- dopo la stabilizzazione il livello dinamico resta costante (la portata non proviene dall'immagazzinamento)

- le equipotenziali sono verticali
- la velocità è costante sulla verticale
- il vettore  $v$  non ha componente verticale

## Condizioni di validità per il pozzo

Deve essere completo fino al substrato impermeabile

Il flusso verso i filtri è laminare con numero di Reynolds  $< 10$   
(velocità d'ingresso  $\leq 3$  cm/sec)

L'acqua pompata è scaricata all'esterno  
(senza che si reinfiltri nell'acquifero)

Il diametro del pozzo è piccolo così da trascurare il volume d'acqua  
nel tubo e le perdite di carico

La portata è costante

Il regime è permanente, il tempo non compare, infatti, nelle formule,  
quindi  $\Delta s$  è costante, a parità di sollecitazione

Gli abbassamenti sono piccoli, rispetto allo spessore saturo  
( $\Delta s \leq 0,15 H - 0,25 H$ )



## Condizioni di validità per l'acquifero

Deve essere confinato, omogeneo, isotropo, a spessore costante ed infinitamente esteso

La sua potenza deve essere piccola rispetto all'estensione laterale (in pratica il raggio d'azione non deve essere influenzato da limiti alimentanti od impermeabili)

La falda è considerata piatta, all'inizio della prova

È valida la legge di Darcy ed il flusso è radiale verso il pozzo

La componente verticale della velocità di flusso è trascurabile ( $v_z = 0$ )

Le componenti orizzontali della velocità di flusso sono uguali ( $v_x = v_y$ )

# Metodi di soluzione in regime transitorio

Quando un pozzo in un acquifero infinito, è pompato a portata costante, il prelievo si estende radialmente nel tempo.

Poichè l'acqua prelevata deriva da una riduzione d'immagazzinamento dell'acquifero, il carico piezometrico continua a scendere dato che lo stesso è infinitamente esteso.

Si verifica pertanto una situazione di non equilibrio e, con il tempo, gli abbassamenti interessano aree sempre più vaste e quindi diventano trascurabili, tanto che si possono utilizzare dei metodi d'approssimazione che permettono di ricavare  $S$  e  $T$ .

Questa procedura è preferita rispetto alle formule d'equilibrio per i seguenti motivi:

- Permette di ricavare  $S$
- È sufficiente un periodo di pompaggio inferiore, dato che non serve raggiungere l'equilibrio con la ricarica
- È sufficiente solo un piezometro
- Non sono necessarie alcune delle ipotesi restrittive del regime d'equilibrio

Utilizzando i grafici tempo-abbassamenti, i metodi più noti sono (*Todd*):

- Soluzione di Theis
- Soluzione semplificata di Cooper-Jacob

Il primo si basa sull'equazione di Theis (1935)

$$s = W(u) \frac{Q}{4\pi T} \quad \text{con } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

dove  $W(u)$  è chiamata funzione di pozzo e viene fornita da tabelle. Si tratta di uno sviluppo in serie di una funzione esponenziale i cui termini diventano trascurabili quando  $t$  aumenta ed  $r$  decresce.

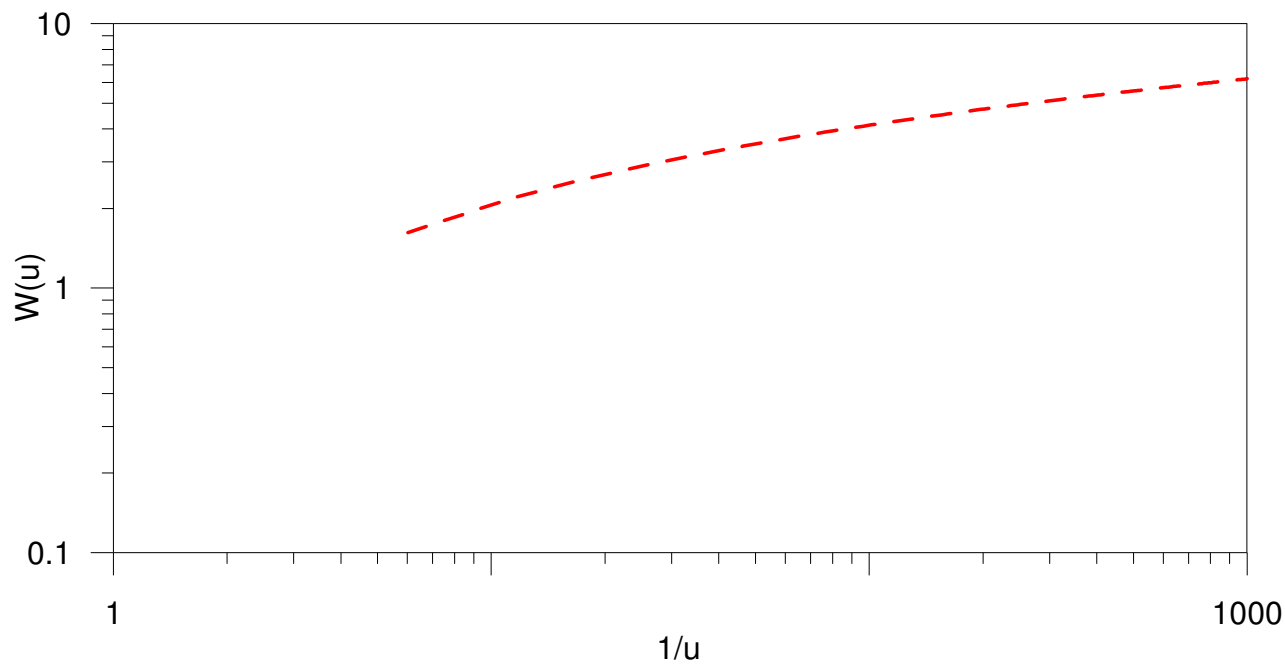
Il metodo prevede di costruire due grafici bilog, uno per le misure di campagna ( $\log t - \log s$ ) ed uno per i valori di  $1/u - W(u)$  (anch'esso bilog).

Se i dati di partenza sono  $1/u - W(u)$  sul grafico di campagna si riporta  $\log s$  e  $\log t$ . La curva di campagna si sovrappone a quella teorica mantenendo gli assi paralleli fino a trovare la migliore sovrapposizione. Si scelgono quindi due valori qualunque di  $1/u$  e  $W(u)$  e quelli ottenuti dalle intersezioni con gli assi della curva di campagna.

Si calcola quindi:

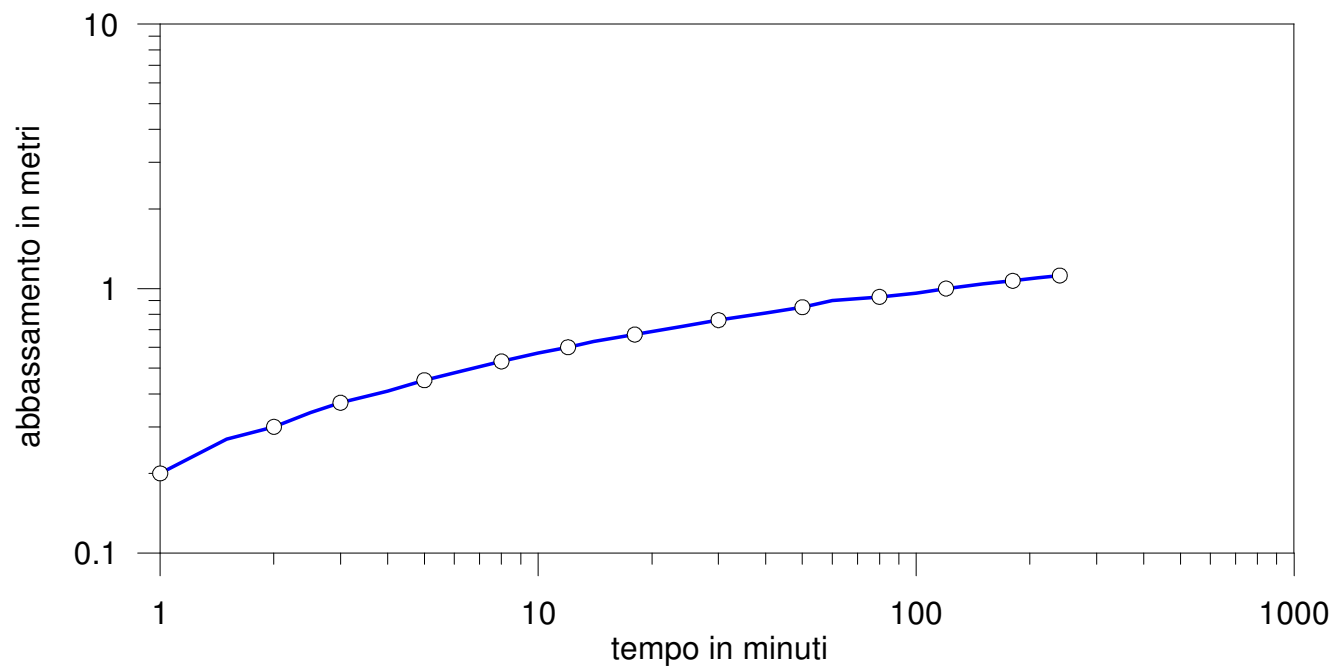
$$T = \frac{Q W(u)}{4\pi s} \quad \text{il valore di } T \text{ si inserisce nella seguente per ottenere } S$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2}$$



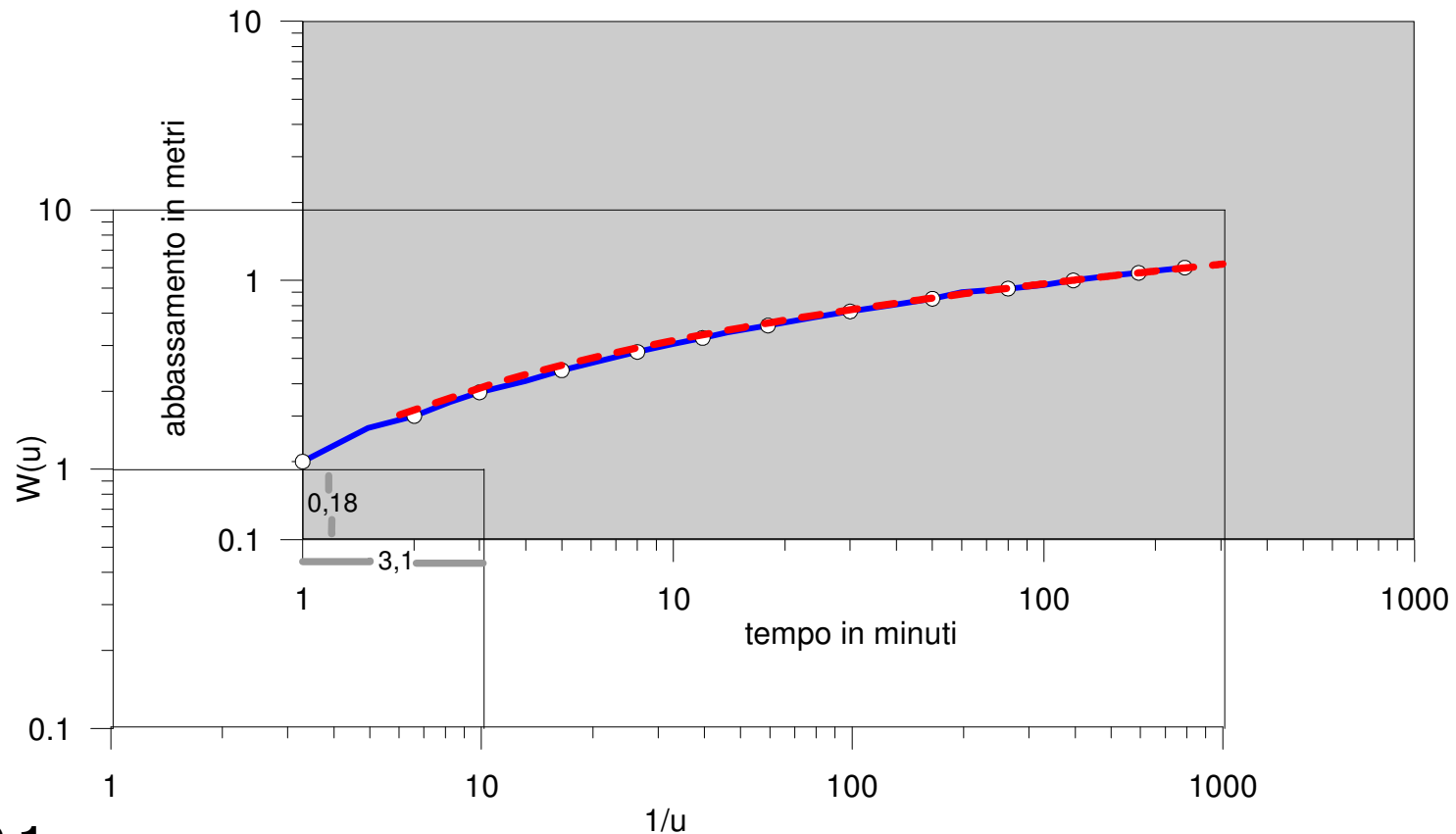
**Curva teorica  
1/u – W(u)**

**Curva  
di campagna  
s - t**



*(Idrogeologia: prove in sito)*

## Metodo di Theis (sovrapposizione della curva teorica a quella di campagna)



**$u = 0,1$**   
 **$W(u) = 1$**   
 **$s = 0,18 \text{ m}$**   
 **$t = 3,1 \text{ min (186 sec)}$**

**$Q = 2500 \text{ mc/d (0,028 mc/s)}$**   
 **$T = Q W(u) / 4\pi s$**   
 **$T = 0,012 \text{ mq/s (1069 mq/d)}$**   
 **$u = r^2 S / 4T t \quad S = 4 u T t / r^2$**   
 **$S = 2,48 \cdot 10^{-4}$**

*(Idrogeologia: prove in sito)*

Il metodo di soluzione Cooper-Jacob, è basato su di un'approssimazione logaritmica della formula di Theis e prevede un grafico semilog, con  $\Delta s$  in scala aritmetica ed il tempo in scala logaritmica.

Con questo metodo i dati in abbassamento si utilizzano dapprima calcolando il valore di T e quindi quello di S.

Il metodo è applicabile nei casi in cui il valore di u, dell'equazione differenziale di Theis, sia  $< 0,05$ ; dove  $u = r^2 S/4Tt$  (eq. di Theis  $s = W(u) Q/4\pi T$ )

La formula approssimata è:

$$\Delta s = \frac{0.183 Q}{T} \log 2,25 Tt / r^2 S \quad (1)$$

Da cui si ricava T:

$$T = 0,183 Q / \Delta s \quad (\text{con } \Delta s \text{ misurato in un ciclo logaritmico})$$

le misure nel piezometro possono essere utilizzate per il calcolo dell'immagazzinamento:

$$S = 2,25 Tt_0 / r^2 \quad (\text{applicabile solo per il piezometro}) \quad (2)$$

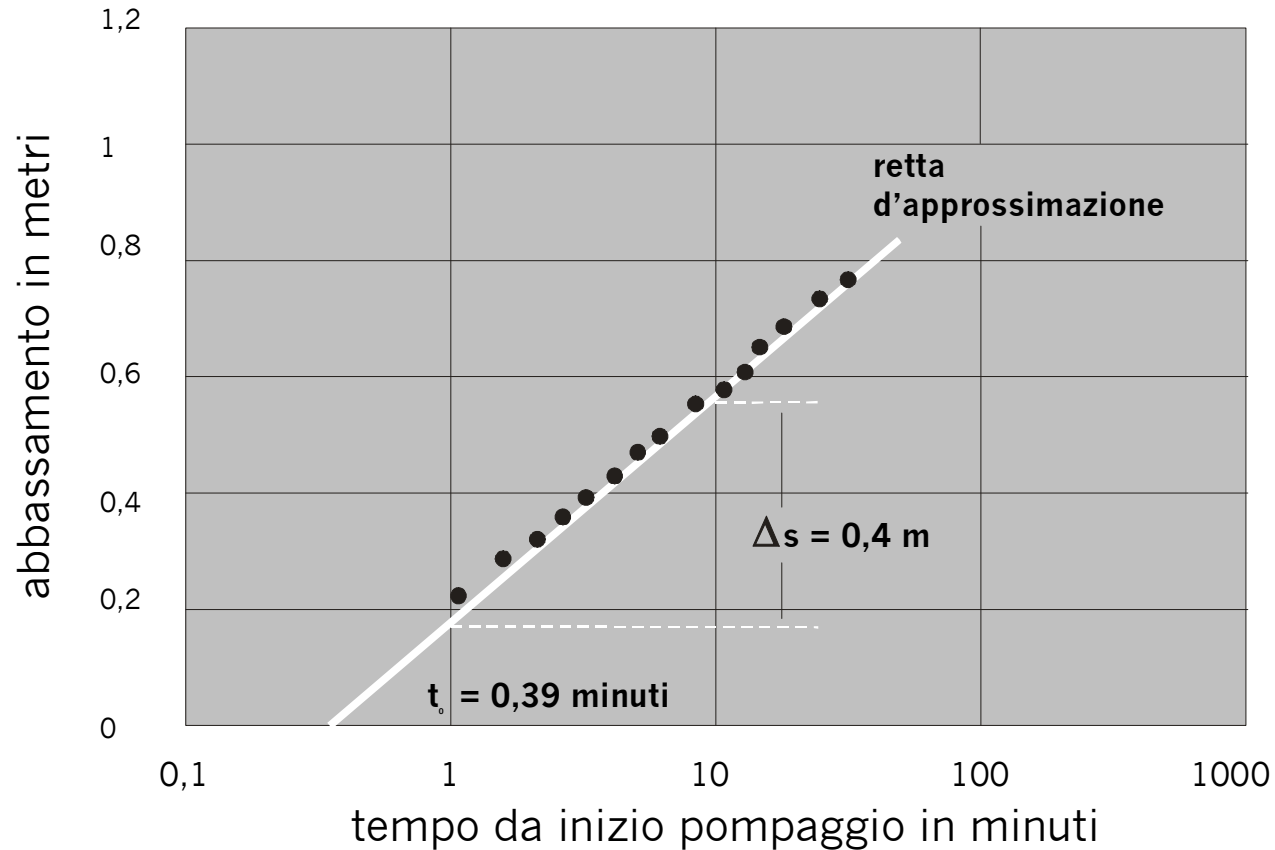
T = trasmissività; S = immagazzinamento;  $t_0$  = tempo corrispondente a  $\Delta s = 0$

Q = portata durante la prova

Il raggio di azione si ricava ponendo  $\Delta s = 0$  dalla (2), cioè  $R = 1,5 \sqrt{Tt / S}$

## Metodo di soluzione Cooper-Jacob

(regime di non equilibrio, misure in abbassamento)



$$u = r^2 S / 4Tt$$

$$u < 0,02$$

$$t > r^2 S / 4Tu$$

$$T = 0,183 Q / \Delta s$$

(con  $\Delta s$  misurato  
in un ciclo logaritmico)

$$S = 2,25 Tt_0 / r^2$$

$$\Delta s = \frac{0.183 Q}{T} \log 2,25 Tt / r^2 S$$

# Metodo di soluzione Cooper-Jacob

(regime di non equilibrio, misure in risalita)

Al termine del pompaggio, i livelli nel pozzo e nei piezometri iniziano a risalire e le misure di livello dinamico si riferiscono agli abbassamenti residui.

Anche in questa fase della prova è utile registrare i dati, visto che le procedure permettono di ricavare T (anche nei piezometri) e quindi di avere un controllo dei valori ottenuti in fase di pompaggio.

Nel grafico semilog va riportato in ascissa il rapporto  $t/t'$  ed in ordinata l'abbassamento residuo.

$t$  = tempo totale della prova da inizio pompaggio

$t'$  = tempo dalla chiusura della pompa (solo tempo di risalita)

$\Delta s'$  = abbassamento residuo

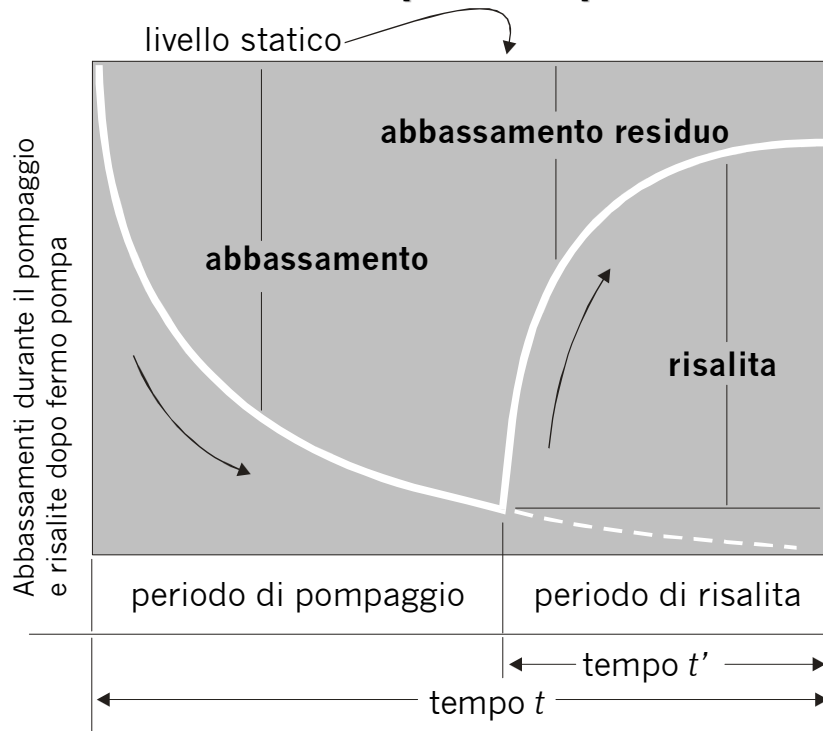
La formula approssimata è: 
$$\Delta s' = \frac{0,183 Q}{T} \log t / t'$$

Per ricavare la trasmissività al posto di  $s$  va inserito  $s'$ , l'abbassamento residuo

$T = 0,183Q / \Delta s'$  (in un ciclo logaritmico)



## Abbassamento e risalita in un pozzo durante la prova di portata



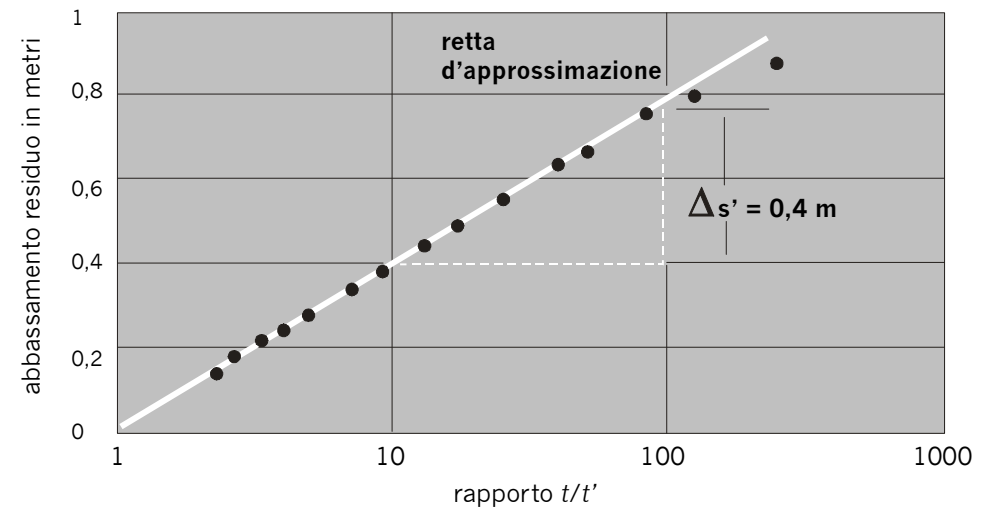
Discesa:

$$\Delta s = \frac{0,183 Q}{T} \log 2,25 Tt / r^2 S$$

$$\text{Risalita: } \Delta s' = \frac{0,183 Q}{T} \log t / t'$$

$$T = 0,183Q / \Delta s'$$

## Metodo di soluzione Cooper-Jacob (regime di non equilibrio)

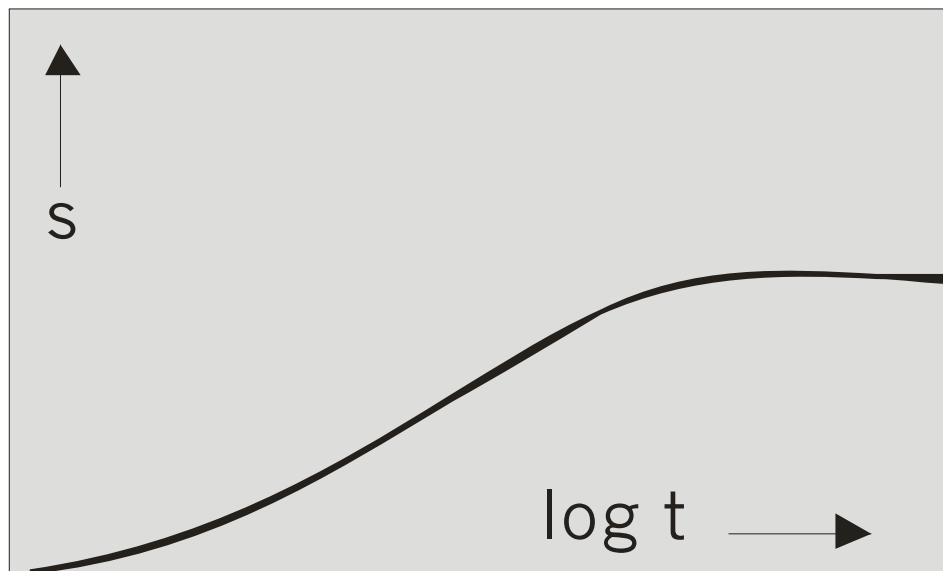


## Regime transitorio in acquifero semiconfinato

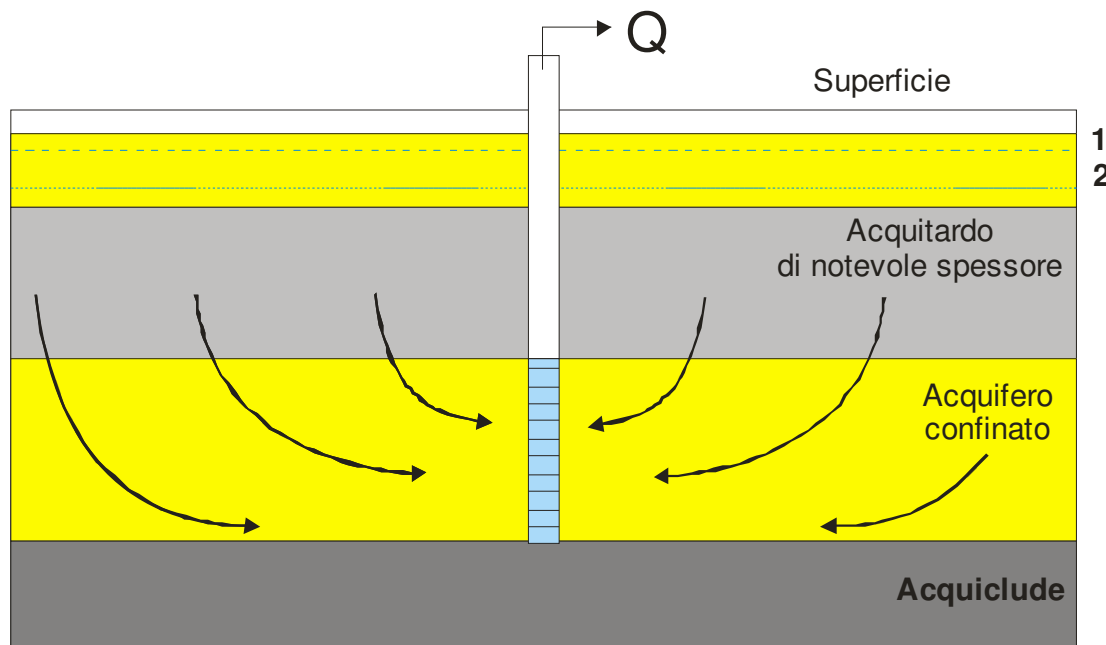
**Molti acquiferi che sembrano confinati ad un primo esame della stratigrafia risultano di tipo semiconfinato durante le prove.**

**Il fenomeno si verifica, ad esempio, quando il pozzo richiama acqua attraverso l'acquitardo da un acquifero freatico superiore, oppure è lo stesso acquitardo, di spessore notevole, che la fornisce.**

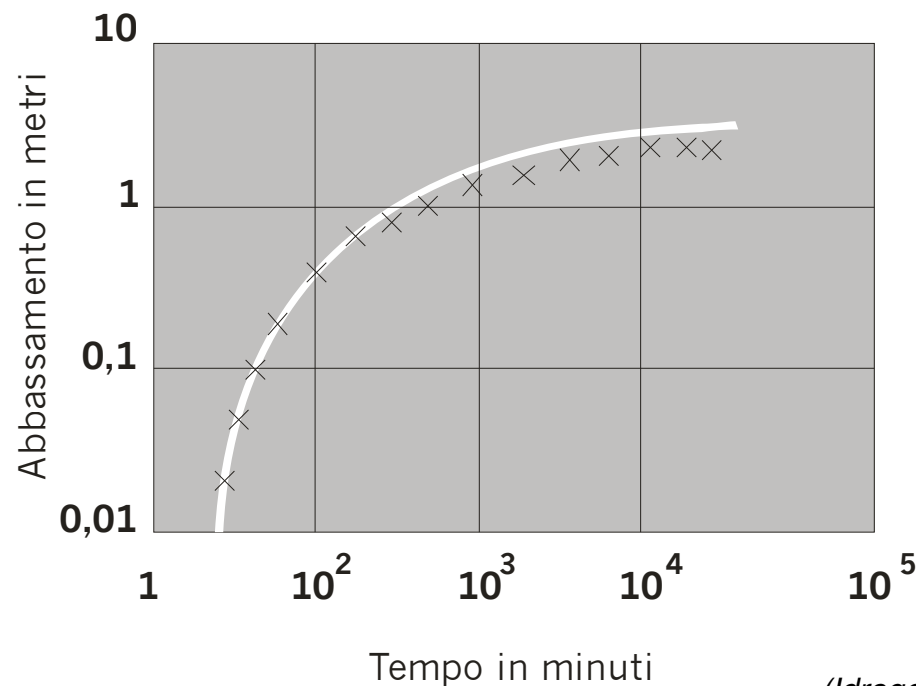
**In entrambi i casi le curve teoriche di Theis non sono utilizzabili a causa di una cattiva sovrapposizione con la curva di campagna.**



curva abbassamento – logaritmo del tempo, durante una prova che ha interessato un acquifero semiconfinato, il tratto orizzontale indica un apporto proveniente dall'immagazzinamento dell'acquitardo, o da un acquifero soprastante



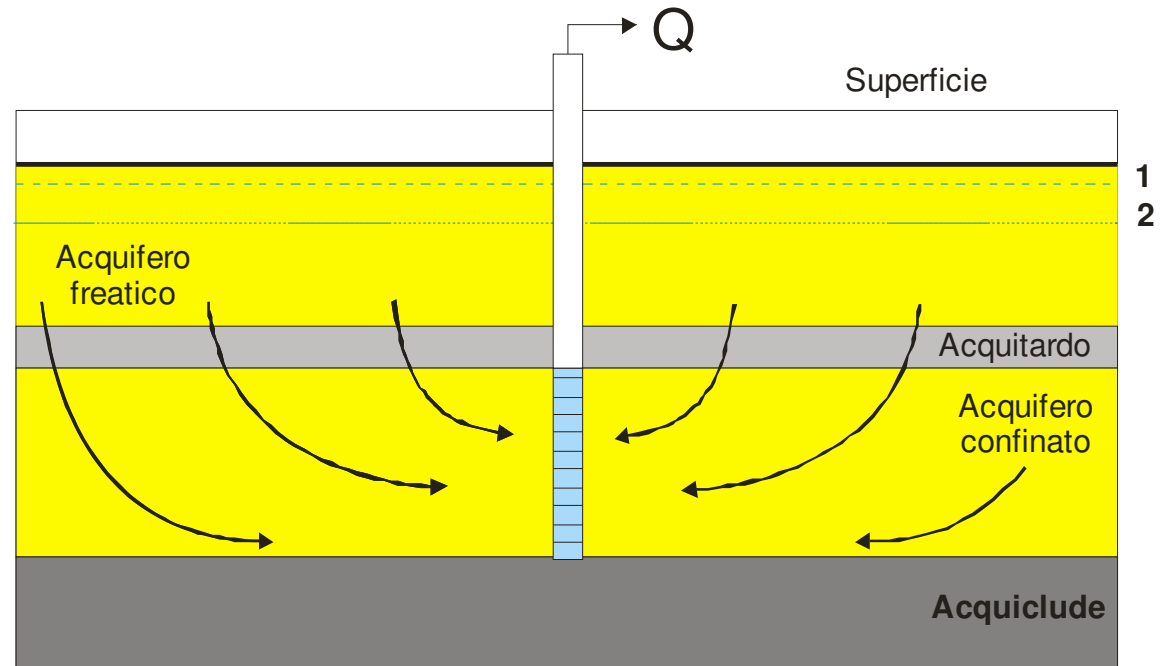
il fenomeno della rialimentazione del pozzo può verificarsi direttamente tramite l'acquitardo, da un acquifero freatico superiore, oppure dallo stesso acquitardo quando questo ha uno spessore notevole; 1 = livello piezometrico dell'acquitardo; 2 = livello piezometrico del semiconfinito



scostamento della curva di campagna da quella teorica di Theis ricavata per acquifero confinato; una situazione di questo tipo può indicare la presenza di acquifero tipo "leaky".

(Idrogeologia: prove in sito)

alimentazione da parte di un acquifero freatico, attraverso l'acquitardo di spessore limitato; 1 = livello piezometrico del freatico, 2 = livello piezometrico dell'acquifero confinato



Nel caso in cui l'acqua provenga da un acquifero superiore attraverso un setto semipermeabile sono disponibili le curve campione Hantush-Jacob. Il metodo è simile a quello di Theis, basato sulla sovrapposizione della curva di campagna a quella teorica. In questo caso la funzione del pozzo è:

$W(u, r/B)$  e l'equazione generale:  $s = Q W(u, r/B) / 4\pi T$ ;  $u = r^2 S / 4Tt$ ;  $B = \sqrt{T b'/K'}$

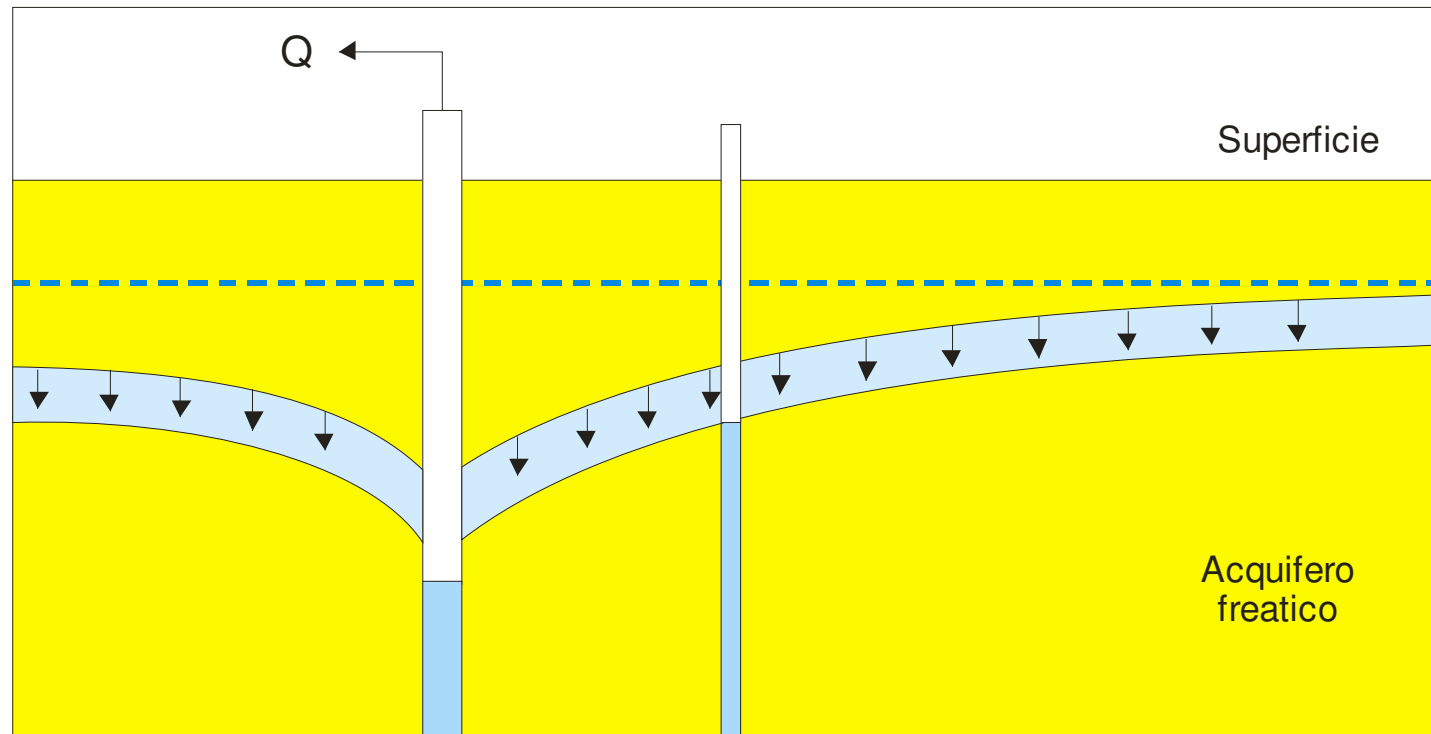
Una volta scelta la curva che meglio si sovrappone a quella di prova, si ricava anche quella teorica caratterizzata dal particolare valore  $r/B$ .

Le condizioni di validità sono analoghe a quelle per il metodo di Theis con in più che l'acquitardo non fornisce acqua al pozzo ( $S = 0$ ) ed è incompressibile

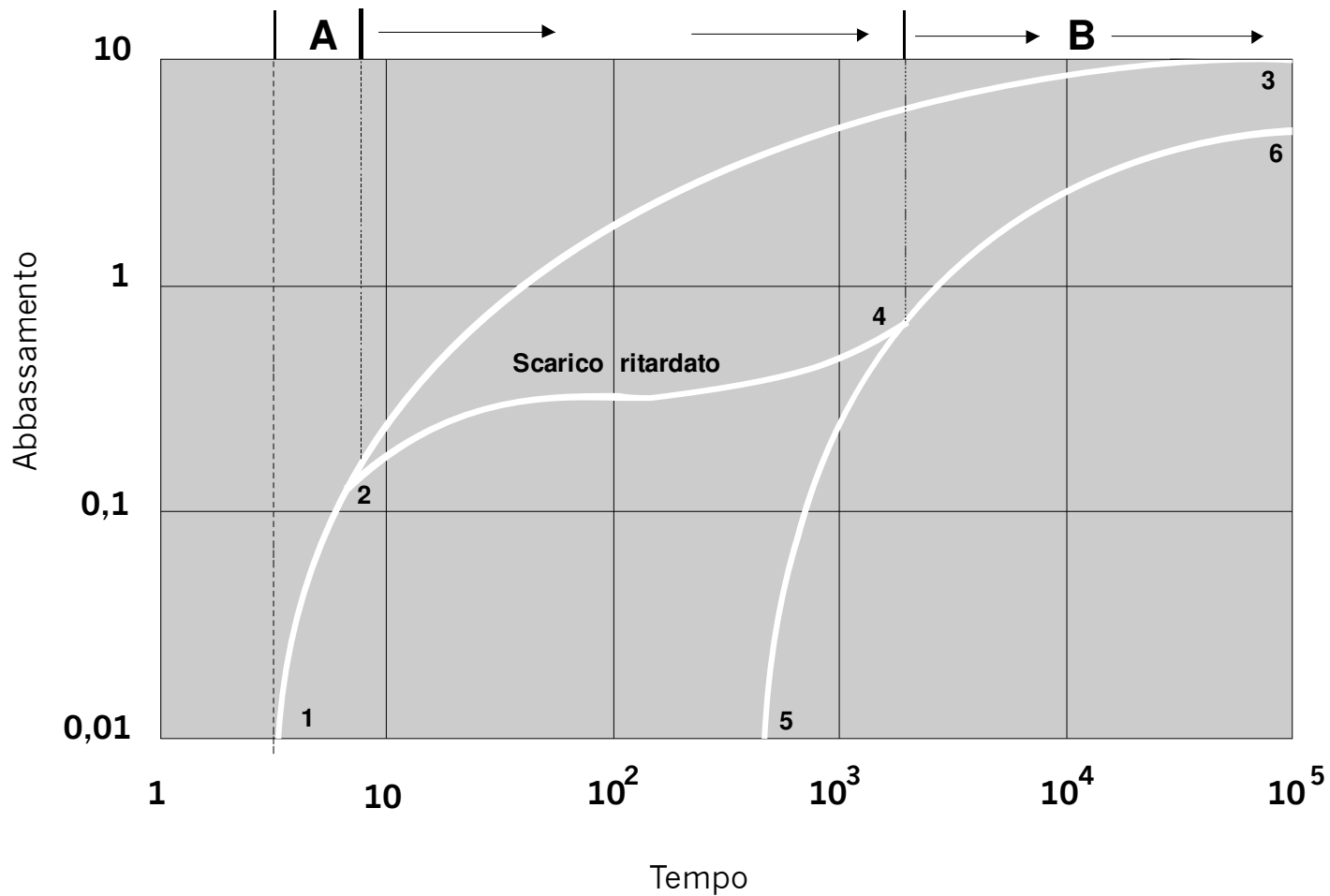
# Regime transitorio in acquifero freatico

(drenaggio ritardato, delayed yield)

Gli acquiferi freatici sottoposti ad un lungo pompaggio, presentano il fenomeno del delayed yield dovuto alla lenta e progressiva desaturazione dei granuli al di sopra della superficie del cono di depressione. Il fenomeno viene registrato durante la prova come un improvviso apporto che appiattisce la curva tempo-abbassamento.



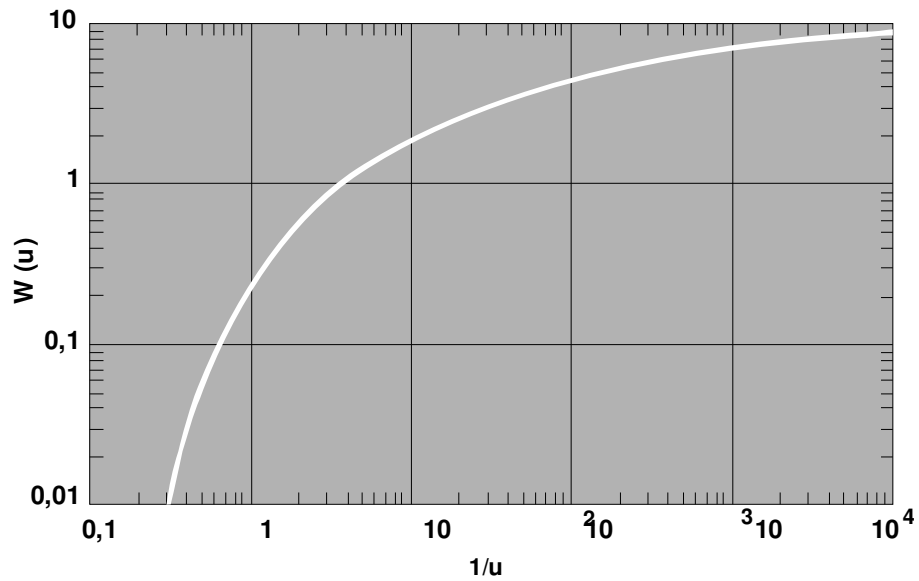
*(Idrogeologia: prove in sito)*



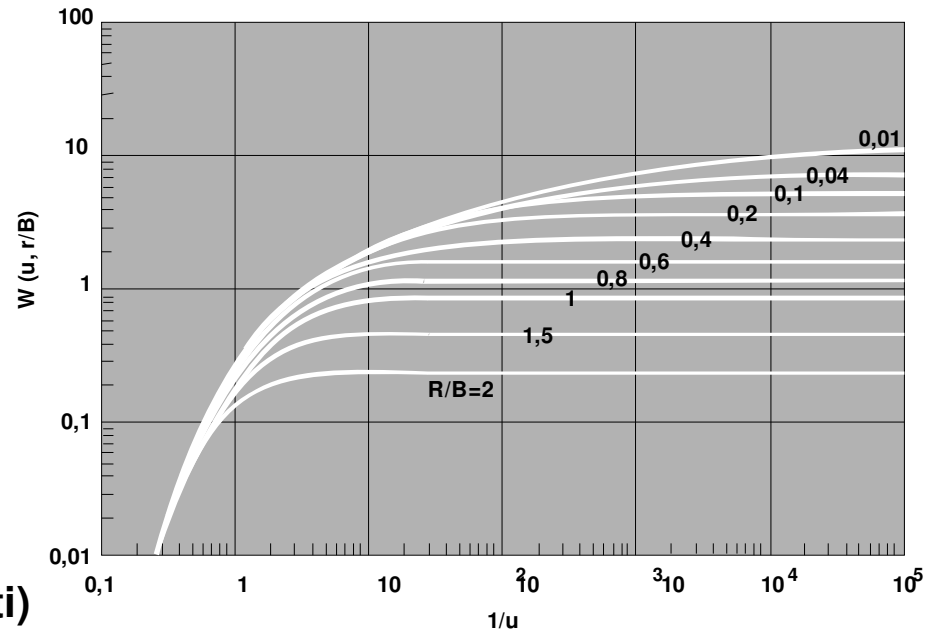
il tratto di curva 1-2-3 è quello di Theis, se l'acquifero fosse confinato e si sovrappone alla curva teorica di Theis solo all'inizio (1-2), il tratto 5-4 rappresenta la risposta del freatico; la trasmissività e la porosità efficace del freatico si calcolano sul tratto 4-6.

Neuman ha elaborato le seguenti equazioni per il calcolo dei parametri idrogeologici:

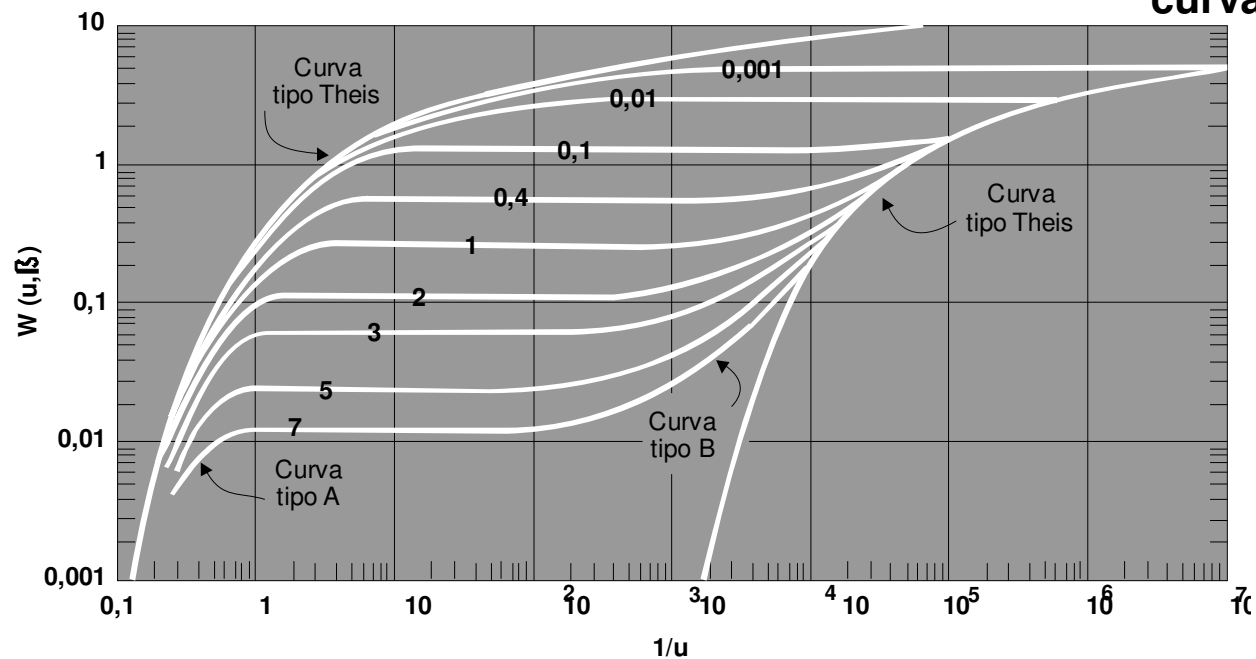
$$s = Q W(u, \beta) / 4\pi T ; \quad u = r^2 S / 4Tt \quad Kh = T/b; \quad Kv = \beta b^2 Kh / r^2 ;$$



**curva teorica tipo Theis (acquiferi confinati)**



**curva teoriche Hantush – Jacob (acquiferi leaky)**



**curva teorica tipo Neuman (acquiferi freatici)**

*(Idrogeologia: prove in sito)*

# Elaborazione dei dati

*“E’ un errore madornale teorizzare senza dati, involontariamente uno inizia ad adattare i fatti alle ipotesi e non le ipotesi ai fatti” (Sherlock Holmes)*

In letteratura esistono moltissimi metodi di elaborazione in base alle diverse tipologie acquifero ma l’analisi dei dati di una prove di portata dovrebbe seguire le seguenti fasi:

## **Sviluppo del modello concettuale**

- Il modello concettuale trasferisce gli elementi del flusso sotterraneo in uno schema adatto alla formulazione matematica.
- Che tipo di acquifero stiamo testando? Quale è la sua geometria? E’ isotropo ?
- Quali sono le caratteristiche del pozzo ?
- Quali sono le portate estratte ? (costanti, variabili ?)
- Nel caso di una prova K, quale è la variazione iniziale di livello, quale il livello statico, è presente un filtro in ghiaia? Di che porosità ?
- L’acquifero è infinito ?,c’è una ricarica ? quali sono le condizioni al contorno ? vi sono altri pozzi in pompaggio nelle vicinanze ?
- La pressione barometrica può influenzare le misure ? o le oscillazioni di marea ?



## Costruire il grafico

(ad es. tempo-abbassamento) e paragonarlo a delle curve campione per evidenziare eventuali anomalie o caratteristiche particolari (tipo di acquifero, scarico ritardato, presenza di limiti permeabili, impermeabili ecc.); alcuni software utilizzano allo scopo dei diagrammi diagnostici e l'analisi derivata, i primi si applicano alle prove di pompaggio; i diagrammi a flusso radiale identificano l'entità dell'immagazzinamento in pozzo e gli effetti dei limiti; i diagrammi a flusso lineare evidenziano un flusso lungo frattura; l'analisi derivata evidenzia alcune caratteristiche idrauliche (immagazzinamento del pozzo, scarico ritardato, doppia porosità, flusso radiale)

**A questo punto si esaminano nuovamente i dati stratigrafici e, se necessario, si modificano le ipotesi di partenza**

## Scegliere le procedure

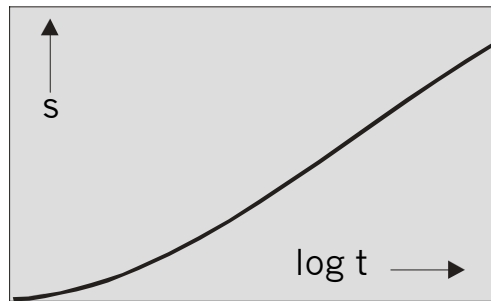
e le formule adatte alla particolare situazione, valutare le proprietà idrogeologiche anche tramite confronto con curve di sovrapposizione; sovrapporre manualmente la retta ad un tratto rappresentativo della curva di campagna; alcuni software suggeriscono il metodo di interpretazione più idoneo in base ai risultati precedenti ed effettuano una stima automatica;

## Valutare l'attendibilità del risultato

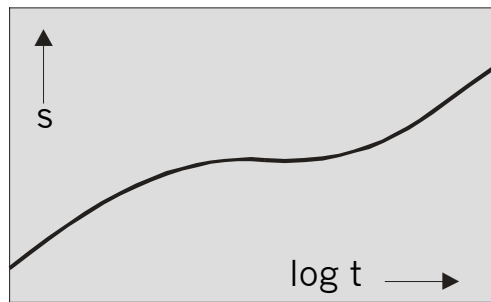
il margine di errore ed i parametri da riverificare

## Classificazione dei diversi acquiferi in base alla curva s - log t

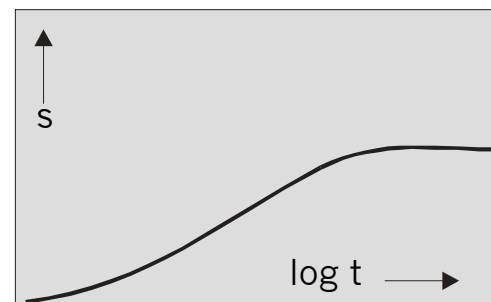
I grafici semilog tempo-abbassamento permettono anche di identificare i diversi acquiferi ed alcune delle condizioni idrauliche al contorno



A



B



C

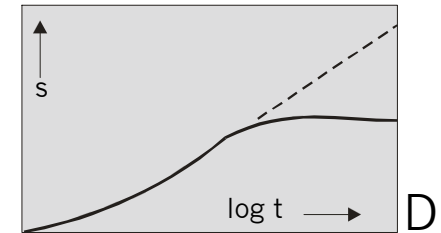
I grafici semilog che si ricavano dalle prove di portata, permettono di classificare i diversi acquiferi e limiti idraulici al contorno. Nelle figure a fianco sono riportati alcuni esempi. A: è un acquifero confinato; la trasmissività va calcolata nel tratto di curva dove l'abbassamento diventa lineare

B: è un acquifero freatico; il tratto orizzontale intermedio è dovuto al fenomeno dello scarico ritardato (delayed yield)

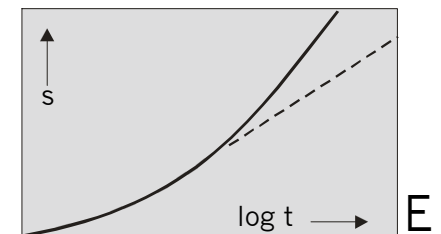
C: è un acquifero semiartesiano; l'inizio del grafico è simile a quello dell'artesiano, in seguito al pompaggio prolungato inizia la ricarica dell'acquifero superiore attraverso l'acquitardo

D: è un acquifero confinato (vedi A), in pompaggio, al quale si sovrappone un limite di ricarica (vedi pagina seguente)

E: è un acquifero confinato (vedi A), al quale si sovrappone un limite impermeabile



D

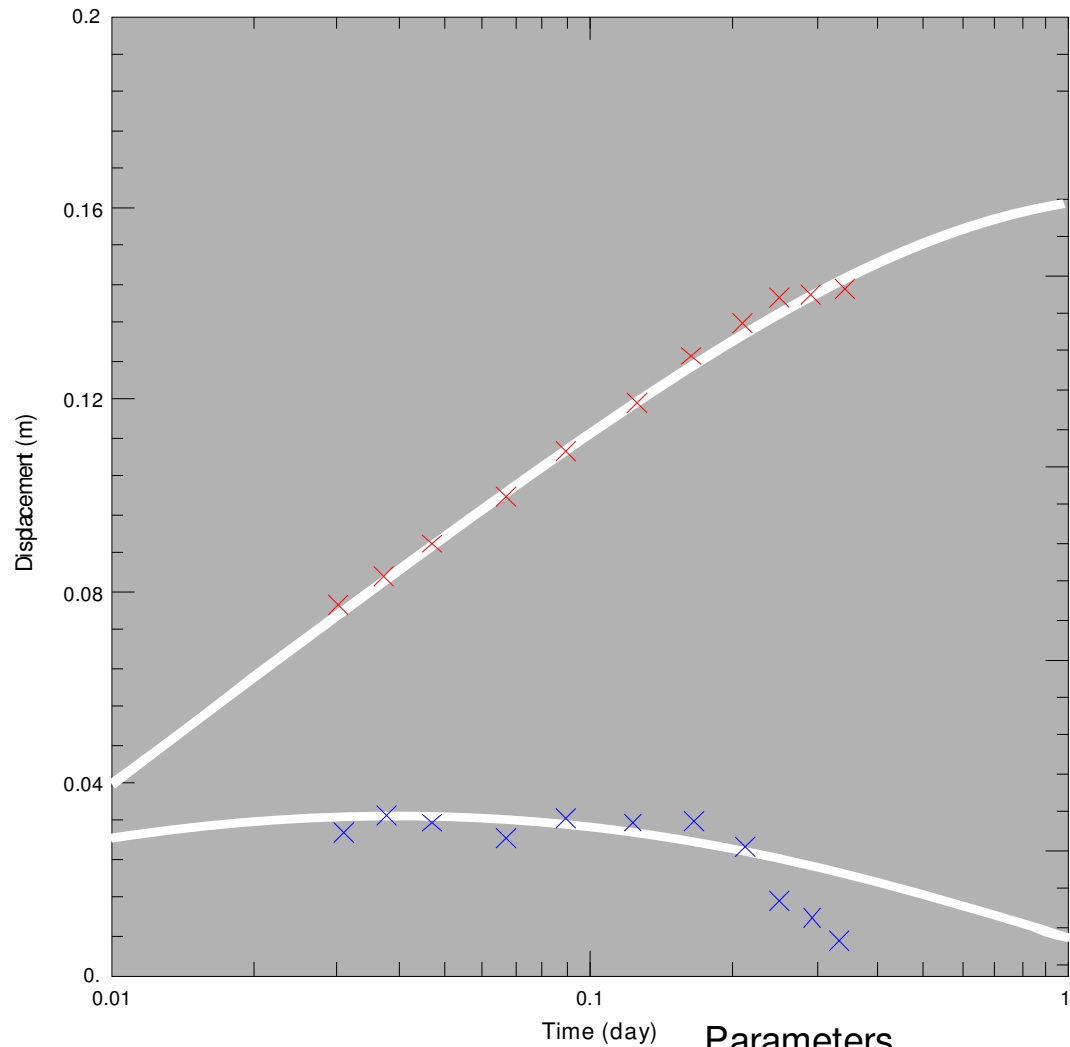


E

(Kruseman, de Ridder)

## Classificazione dei diversi acquiferi

(utilizzo del software Aqtesolv)



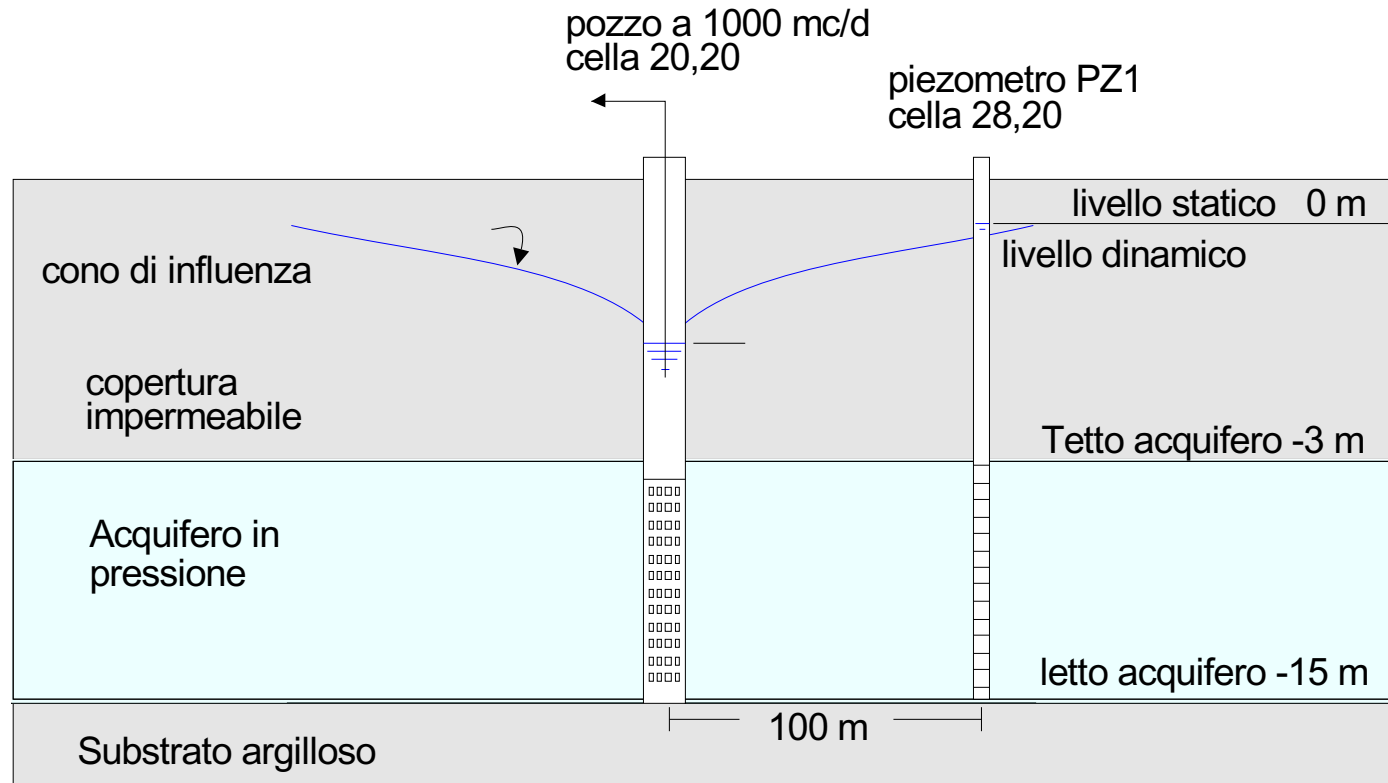
il grafico mostra l'interpretazione di una prova di portata su acquifero semiconfinato (leaky), usando il metodo Hantush-Jacob; la curva di campagna (simboli rossi) tende ad appiattirsi per tempi lunghi, mentre la derivata dello spazio rispetto al tempo, si abbassa, indicando la possibilità di una ricarica; i valori iniziali sono allineati mentre la curva derivata è sub orizzontale indicando un flusso di tipo radiale

Obs. Wells  
 × OW1  
 × Derivative plot  
Aquifer Model  
 Leaky  
Solution  
 Hantush-Jacob

### Parameters

$T = 1642 \text{ m}^2/\text{day}$   
 $S = 0.001933$   
 $r/B = 0.1221$   
 $Kz / Kr = 1$   
 $B = 40 \text{ m}$

## Esempio di interpretazione di una prova su acquifero e controllo mediante codice numerico

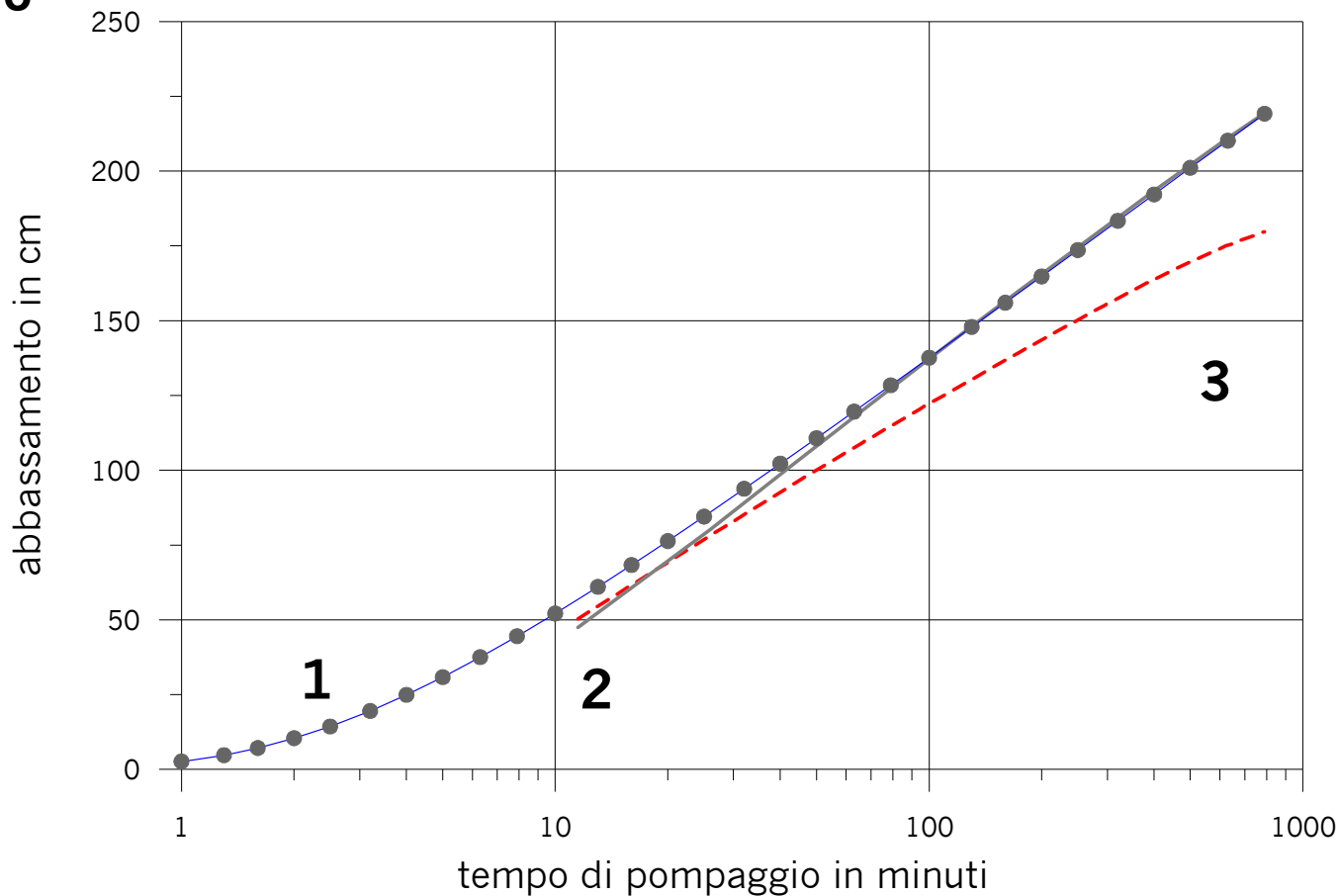


### Geometria della prova

*(Idrogeologia: prove in sito)*

# Misure al piezometro

| tempo in minuti | abbassamento in cm |
|-----------------|--------------------|
| 1               | 2.6                |
| 1.3             | 4.7                |
| 1.6             | 7.1                |
| 2               | 10.4               |
| 2.5             | 14.3               |
| 3.2             | 19.5               |
| 4               | 24.9               |
| 5               | 30.8               |
| 6.3             | 37.5               |
| 7.9             | 44.5               |
| 10              | 52.1               |
| 13              | 61                 |
| 16              | 68.3               |
| 20              | 76.3               |
| 25              | 84.5               |
| 32              | 93.8               |
| 40              | 102.2              |
| 50              | 110.7              |
| 63              | 119.6              |
| 79              | 128.4              |
| 100             | 137.6              |
| 130             | 147.9              |
| 160             | 156                |
| 200             | 164.8              |
| 250             | 173.6              |
| 320             | 183.4              |
| 400             | 192.2              |
| 500             | 201.1              |
| 630             | 210.2              |
| 790             | 219.2              |



| Parametro | Curva di campagna n. 1 | Curva simulata n. 2 | Curva simulata n. 3 |
|-----------|------------------------|---------------------|---------------------|
| T (mq/d)  | 201                    | 201                 | 267                 |
| S         | 0.000097               | 0.000097            | 0.000068            |
| U < 0.01  | T > 173 min            |                     | T > 92 min          |



# Alcune domande di ripasso

Quali sono i vantaggi ed i limiti delle prove su acquifero ?  
Elencate e descrivete alcune prove tipiche?

Cos'è ed a cosa serve una prova di pompaggio ?

Quali sono le condizioni da rispettare per effettuarle ?

Come calcoliamo le proprietà indici dell'acquifero dai dati  
tempo-abbassamento ?

Quale è la procedura consigliata per analizzare i dati di una  
prova di portata ?