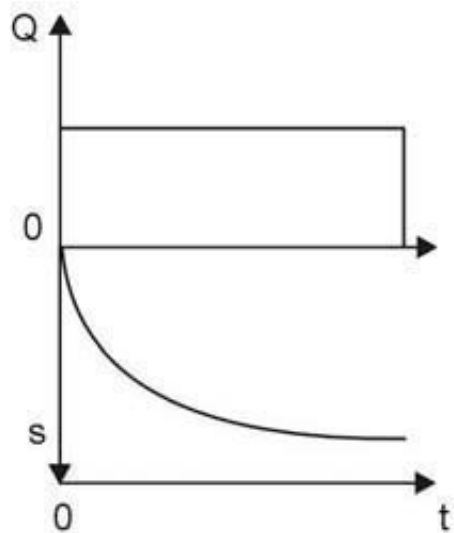


Lezione 3

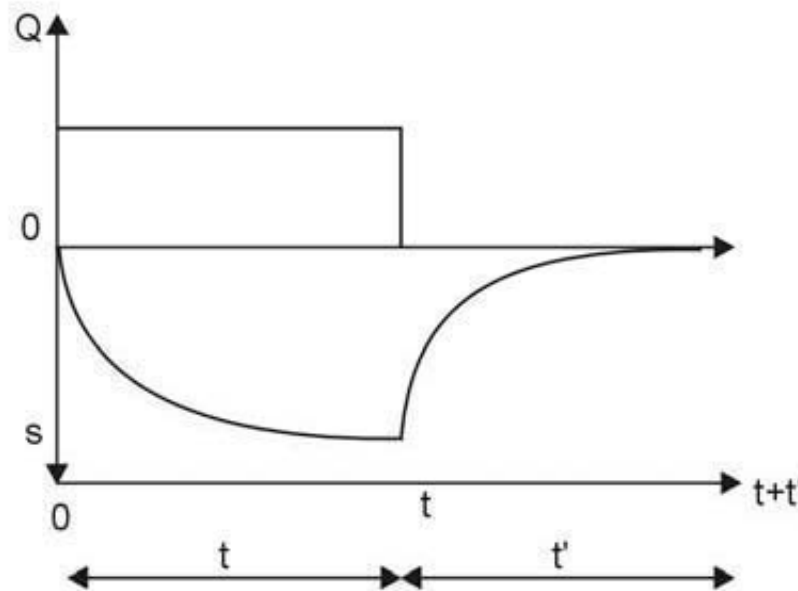
Idraulica dei pozzi II

Metodo dell'equilibrio - Prove in foro

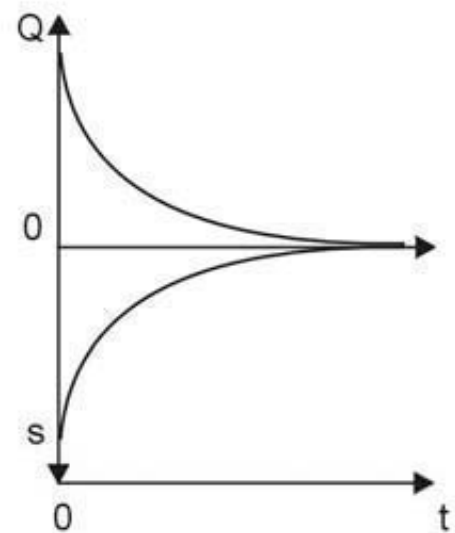
Q costante Q nulla (risalita) Q istantanea (slug test)



A



B

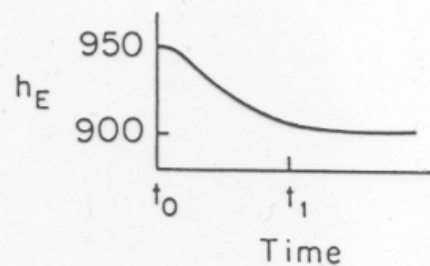
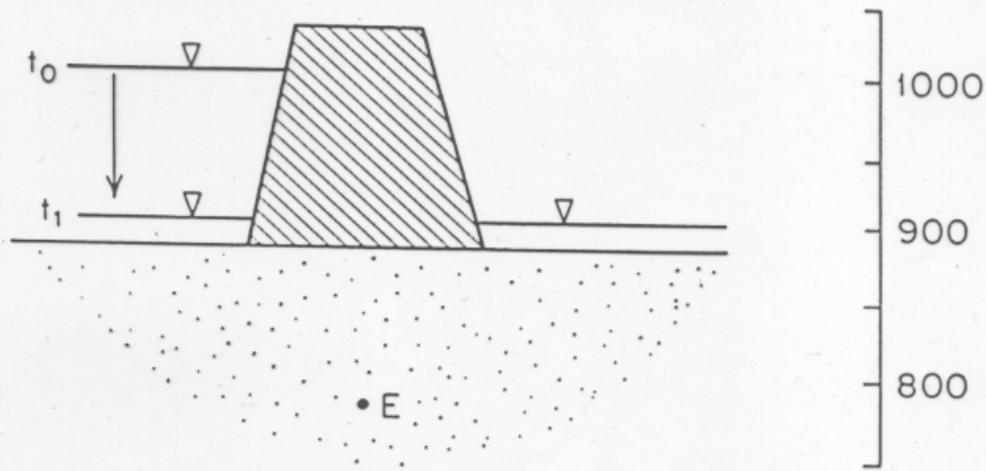
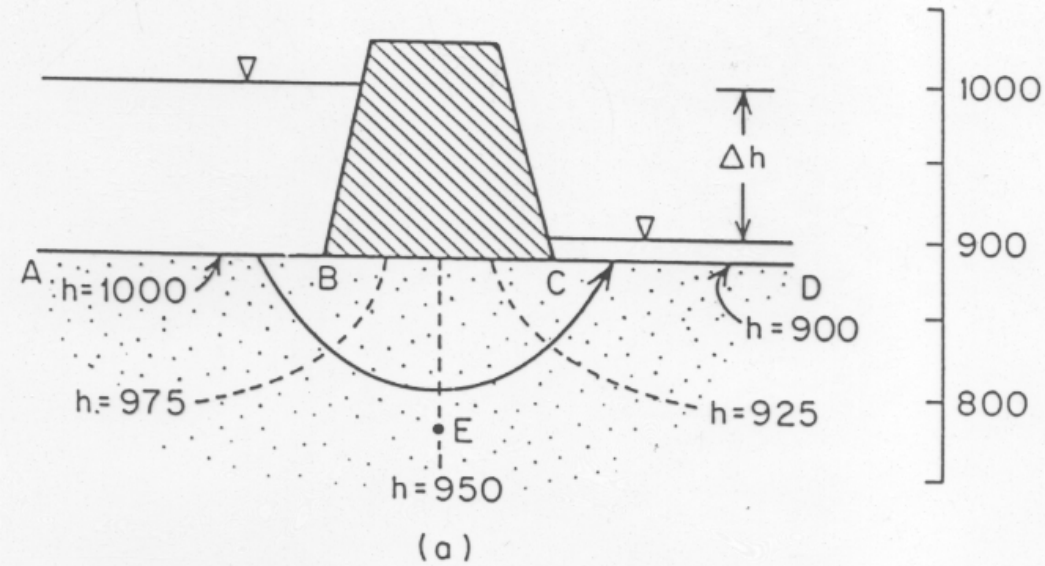


C

ARGOMENTI

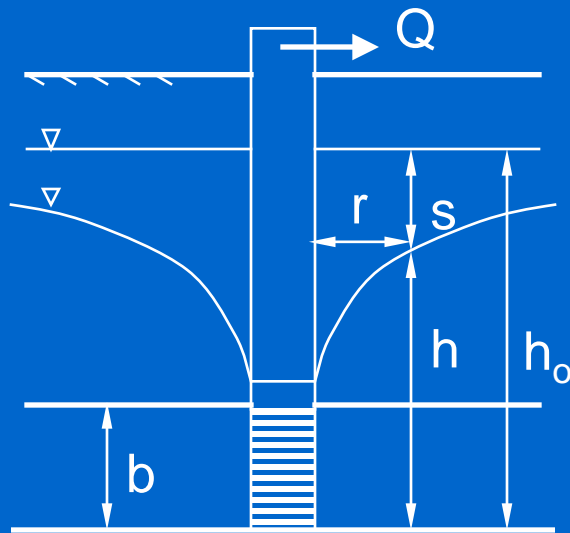
- Metodo dell'equilibrio-Portata specifica
- Prova a gradini-Efficienza del pozzo
- Slug test
- Test di immissione, Lefranc, Lugeon

**STATO
STAZIONARIO
(STEADY
STATE)**



**STATO
TRANSITORIO
(TRANSIENT
STATE)**

Flusso radiale stazionario confinato



- Legge di Darcy $Q = -2\pi r b K \partial h / \partial r$
- Riarrangiando $\partial h = \frac{-Q}{2\pi K b} \frac{\partial r}{r}$
- Integrando $h = \frac{-Q}{2\pi K b} \ln(r) + c$
- $h = h_0$ con $r = R$

• Ipotesi

Isotropia, omogeneità, acquifero infinito, flusso radiale 2-D

• Condizioni iniziali

$h(r,0) = h_0$ per ogni r

• Condizioni al contorno

$h(R,t) = h_0$ per ogni t

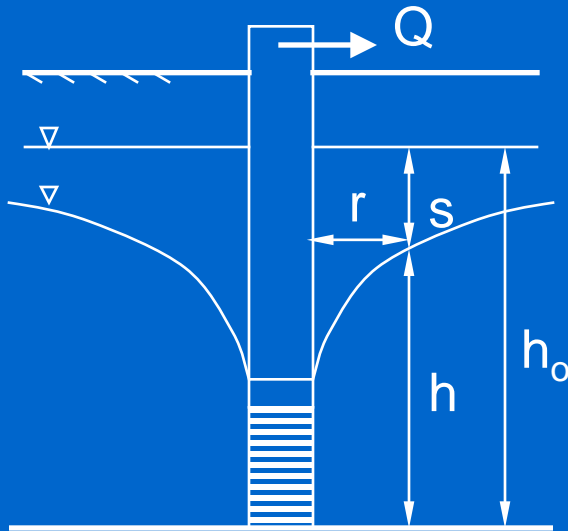
- Con $h_0 = \frac{-Q}{2\pi K b} \ln(R) + c$

- Eliminando costante (c)

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{2\pi K b} \ln(R/r)$$

Questa è l'equazione di **Thiem**

Flusso radiale stazionario libero



Ipotesi

Isotropia, omogeneità,
acquifero infinito, flusso
radiale 2-D

- **Condizioni iniziali**
 $h(r,0) = h_0$ per ogni r
- **Condizioni al contorno**
 $h(R,t) = h_0$ per ogni t

- Legge di Darcy $Q=2\pi rhK\partial h/\partial r$
- Riarrangiando $h\partial h = \frac{-Q}{2\pi K} \frac{\partial r}{r}$
- Integrando $\frac{h^2}{2} = \frac{-Q}{2\pi K} \ln(r) + c$
- $h = h_0$ con $r = R$

- Con $h_0^2 = \frac{-Q}{\pi K} \ln(R) + c$
- Eliminando costante (c) si ha

$$h_0^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln(R/r)$$

Equazione di Thiem

Applicazioni Equazione di Thiem

- Per flusso non confinato si può scrivere:

$$K = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln(R/r)}{(h_0^2 - h^2)}$$

- E per il confinato:

$$K = \frac{Q}{2\pi b} \frac{\ln(R/r)}{(h_0 - h)}$$

- Il raggio di azione R è difficile da stimare ma si possono usare 2 piezometri a diversa distanza radiale

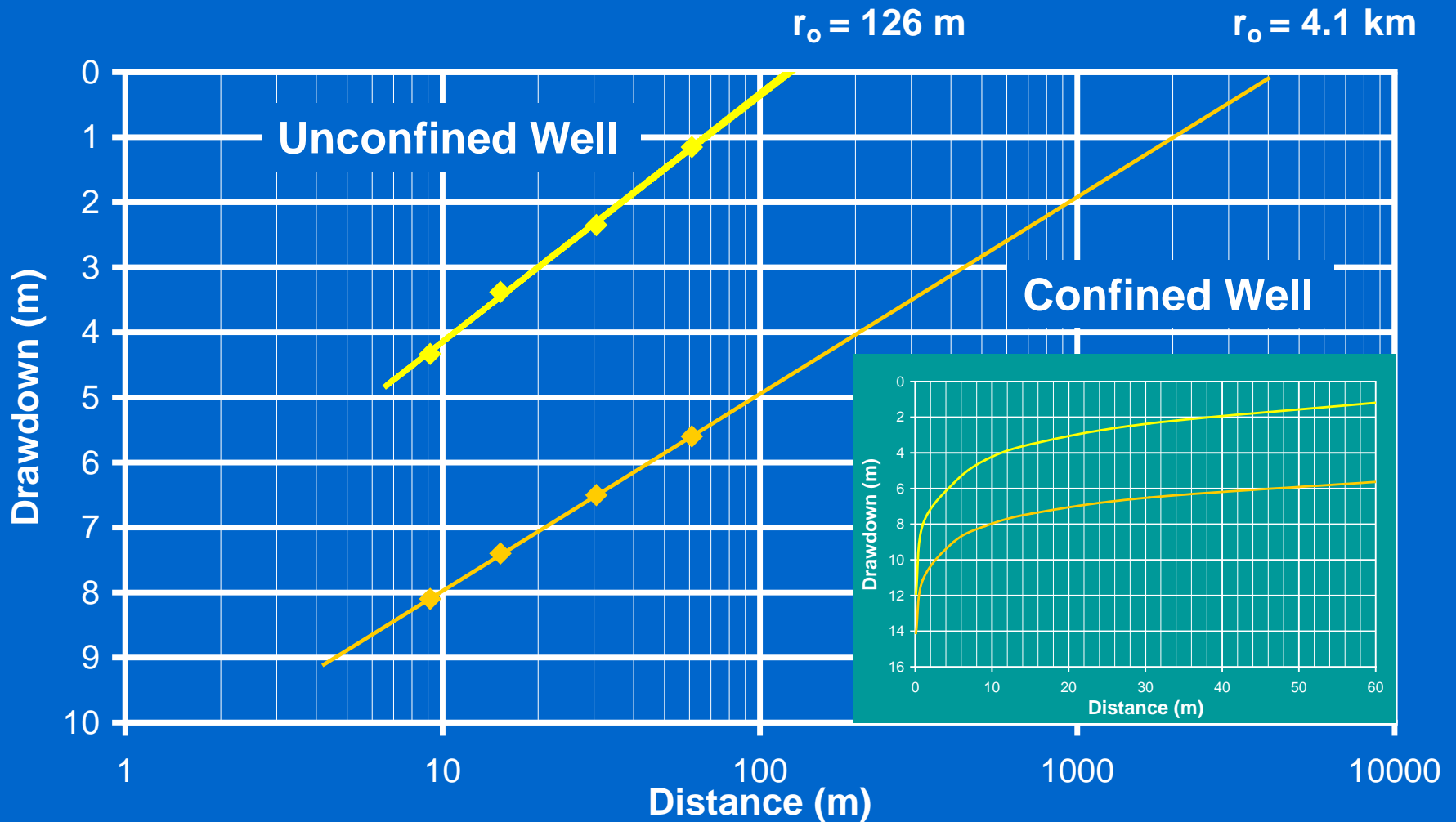
$$K = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln(r_2/r_1)}{(h_2^2 - h_1^2)} \quad \text{e} \quad K = \frac{Q}{2\pi b} \frac{\ln(r_2/r_1)}{(h_2 - h_1)}$$

- Quindi se abbiamo un pozzo a portata costante ed abbassamento stabilizzato, K può essere stimata disponendo di una coppia di piezometri a distanza diversa dal pozzo

Raggio di azione

- Il raggio di azione di un pozzo può essere determinato da un grafico distanza-abbassamento.
- Per scopi pratici si considera l'intercetta del grafico distanza-abbassamento con l'asse delle distanze.
- Il raggio di influenza può essere usato come guida per evitare interferenza fra pozzi
- Poichè il raggio di influenza dipende dal bilancio fra ricarica e scarica dell'acquifero il raggio di influenza può variare da un anno all'altro
- In acquiferi liberi il raggio di influenza è tipicamente di poche centinaia di metri
- In acquiferi confinati il raggio si può estendere per diversi chilometri

Determinare r_o



Metodo della Capacità specifica

- ◆ Per pozzo in acquifero confinato a portata costante (Q) la capacità specifica è data da:

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{2\pi K b}{\ln(R/r_w)}$$

- ◆ La capacità specifica è quindi costante. La relazione portata-abbassamento è lineare

- ◆ $Q = C s_w$

- ◆ Per flusso non confinato:

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{\pi K}{\ln(R/r_w)} (h_o + h_w)$$

- ◆ Ponendo $h_w = h_o - s_w$ si ha:

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{\pi K}{\ln(R/r_w)} (-s_w + 2h_o)$$

- ◆ Quindi:

$$Q = C (-s_w + 2h_o) s_w$$

Calcolo della T da capacità specifica

- ◆ Per pozzo in acquifero confinato ponendo $R=400$ m si ha:

$$T = Q_s [0.95 - (\ln r_w) / 2\pi]$$

- ◆ Per pozzo in acquifero libero ponendo $R=200$ m si ha:

$$T = Q_s [0.84 - (\ln r_w) / 2\pi]$$

Correzione stimata per perdite di carico in acquifero libero

- L'abbassamento corretto è dato da:

$$s_c = \left(1 - \frac{s_a}{2b}\right) s_a$$

dove b è lo spessore saturo iniziale;

s_a è l'abbassamento misurato; e

s_c l'abbassamento corretto

- Ad esempio, se $b = 20$ m; $s_a = 6$ m; quindi l'abbassamento corretto $s_c = 0.85s_a = 5.1$ m
- Se l'abbassamento non viene corretto, l'analisi di Jacob e Theis sottostima la trasmissività reale di un fattore pari a s_c / s_a .

Pozzi in pompaggio

- L'abbassamento misurato in un pozzo in pompaggio ha 2 componenti:
 - **Perdite di acquifero**
 - abbassamento dovuto al flusso laminare nell'acquifero
 - **Perdite del pozzo**
 - Abbassamento dovuto al flusso turbolento nelle immediate vicinanze del pozzo attraverso il filtro e/o il dreno
- La perdita del pozzo è considerata in genere proporzionale al quadrato della portata di emungimento:

$$s_w = CQ^2$$

Cause di inefficienza del pozzo

- I fattori di inefficienza (eccesso di perdite di carico) ricadono in 2 gruppi:
 - Carenze del progetto del pozzo
 - Scarsa superficie delle luci dei filtri
 - Distribuzione non corretta delle luci dei filtri
 - Insufficiente lunghezza del filtro
 - Dreno scelto non correttamente
 - Carenze di esecuzione del pozzo
 - Spurgo non adeguato, presenza residua di fango
 - Non corretto posizionamento del filtro rispetto all'acquifero

Efficienza del pozzo

- L'abbassamento totale di un pozzo in pompaggio è dato da:

$$s_t = s + s_w = \frac{Q}{4\pi T} W(u) + CQ^2 = BQ + CQ^2$$

- Il rapporto fra perdita di acquifero e perdita totale (s/s_t) è noto come efficienza del pozzo.

$$\frac{s}{s_t} = \frac{W(u)}{W(u) + 4\pi TCQ} = \frac{B}{B + CQ}$$

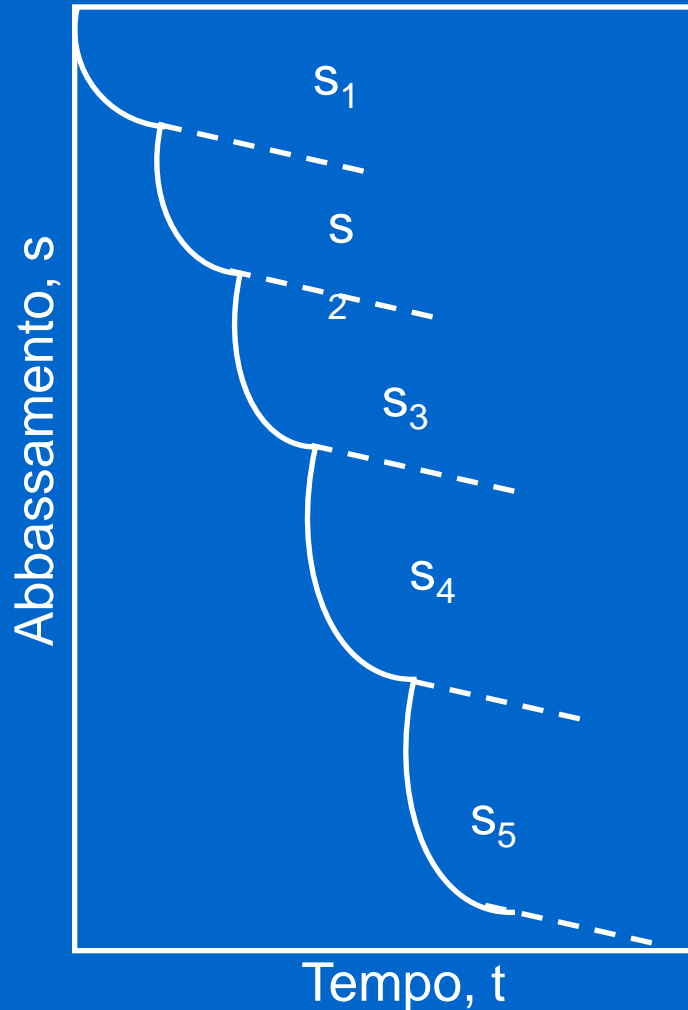
- Pertanto, scrivendo $W(u)$ secondo l'approssimazione di Cooper-Jacob si ha:

$$\frac{s}{s_t} = \frac{1}{1 + 4\pi TCQ / [\ln(2.25Tt/S) - 2 \ln(r_w)]} = \frac{1}{1 + CQ/B(r_w)}$$

- L'efficienza è inversamente proporzionale alla portata (Q) ed aumenta con il raggio del pozzo (r_w), mentre B è inversamente proporzionale al raggio del pozzo.

- La capacità specifica è data da: $\frac{Q}{s_t} = \frac{1}{B + CQ}$

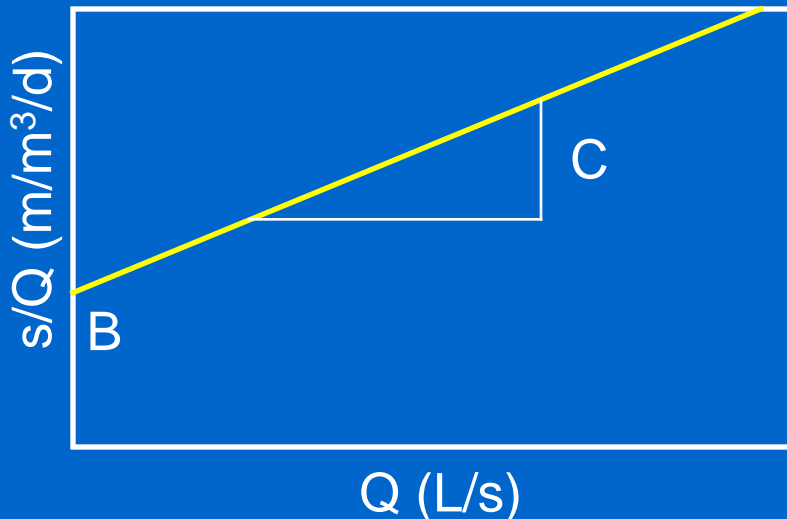
Prova a gradini



- Le prove a gradini di portata (Q) sono effettuate per determinare efficienza del pozzo e la portata d'esercizio.
- Si opera con portata crescente $Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 < Q_5$ per 1-2 ore (Δt) e da 5 a 8 gradini. In 1 giornata di completa la prova.
- Durate dei gradini uguali (Δt) semplificano l'analisi.
- Alla fine di ogni gradino si determina la portata (Q) e l'abbassamento (s) .

Analisi della prova a gradini

- Si plotta il reciproco della portata specifica (s/Q) verso la portata (Q).



- L'intercetta a $Q=0$ è B e la pendenza è il coefficiente delle perdite del pozzo, C.
- Per $Q = 2700 \text{ m}^3/\text{d}$ e $s = 33.3 \text{ m}$, $B = 0.012 \text{ m}/\text{m}^3/\text{d}$
- Se $C = 4 \times 10^{-5}$, allora $CQ^2 = 18.2 \text{ m}$
- L'efficienza del pozzo è $33.3/(33.3+18.2) = 65\%$

Test di Acquifero

Quali sono i vantaggi?

- buona e attendibile stima dei parametri idrodinamici (T,S)
- affidabile rappresentatività volumetrica di T,S e K
- valutazione di anisotropie ed eterogeneità alla macroscale.
- "collaudo" della risposta di acquiferi ed acquitardi alla stimolazione da pompaggio
- prove codificabili e basate su standard di riferimento.

Quali sono gli svantaggi?

- problemi in aree contaminate (smaltimento acqua)
- tempo, soldi e personale.
- poco valide per analizzare acquitardi.

Test di Acquifero

Modello concettuale preliminare ai test

- GEOLOGIA DEL SITO:** geometrie e spessori delle unità idrogeologiche (acquiferi, acquitardi), grado di fratturazione
- Grado di omogeneità e di anisotropia
- Morfologia della superficie piezometrica relativa ai diversi livelli acquiferi
- Aree di ricarica – Relazioni con acque superficiali
- Parametri meteo
- Condizioni al contorno del sistema
- Presenza di altri pozzi potenzialmente perturbanti

Test di Acquifero

Da pianificare in sede di esecuzione del test

- Trend regionale di andamento del livello piezometrico (*ante test*)**
- Controllo della portata di emungimento**
- Gruppo di continuità (se necessario)//misurazione in continuo (*data-logger+sensori*)**
- Accuratezza dei rilievi piezometrici in fase di pompaggio e di risalita – calibrazione delle sonde freaticometriche**
- Scelta dei metodi analitici di interpretazione**

Slug Test

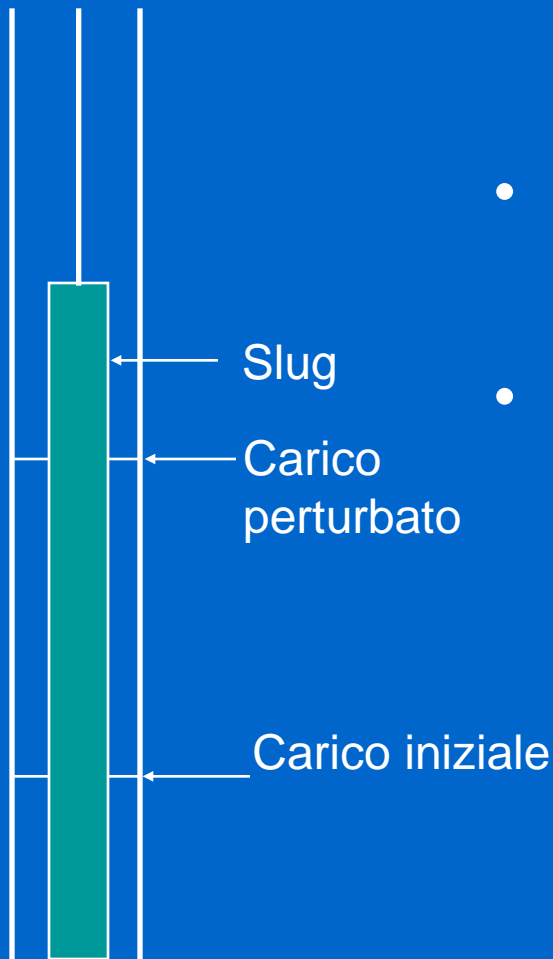
Si definisce *slug test* una prova di falda eseguita in maniera da produrre una istantanea variazione del livello statico in un piezometro e misurare, in funzione del tempo, il conseguente recupero del livello originario nello stesso piezometro.

Si tratta, perciò, di una prova di falda a pozzo singolo, eseguita in regime transitorio, A PORTATA NULLA, la cui finalità consiste nella determinazione della conducibilità idraulica dell'acquifero nelle immediate vicinanze del piezometro.

La prova può essere eseguita in due modi:

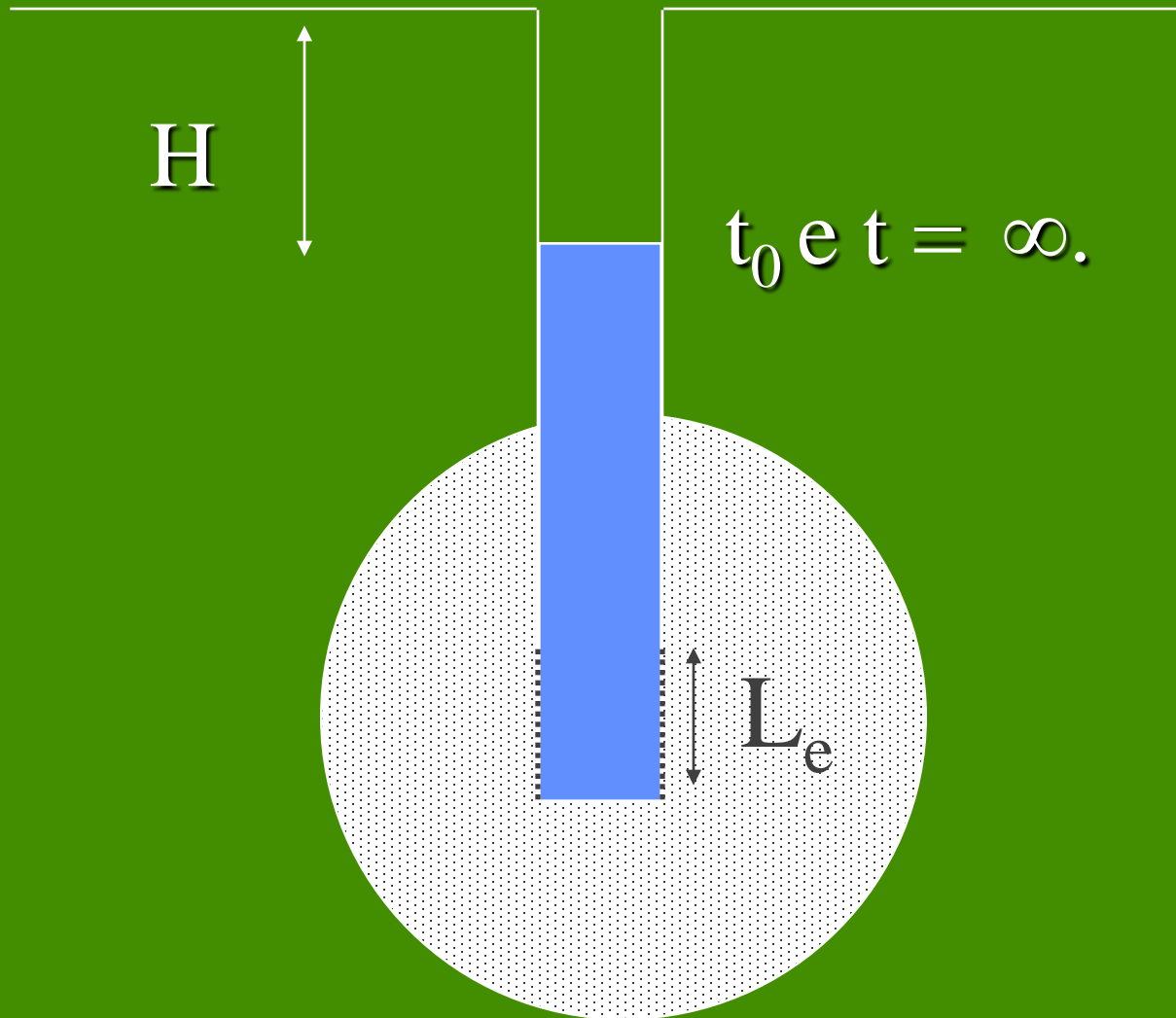
- 1) aumentando bruscamente il livello statico misurato nel pozzo attivo (tramite aggiunta di un volume d'acqua detto *slug*) e monitorando il conseguente declino di livello che si crea per il flusso dal pozzo verso l'acquifero dello slug medesimo (test in declino o con carico decrescente o SLUG TEST s.s.) o,
- 2) producendo una brusca diminuzione di livello (per sottrazione immediata di uno *slug*) e monitorando la conseguente risalita che si crea per il flusso dall'acquifero verso il pozzo (test in risalita o con carico crescente, detto anche BAIL TEST).

Slug Test

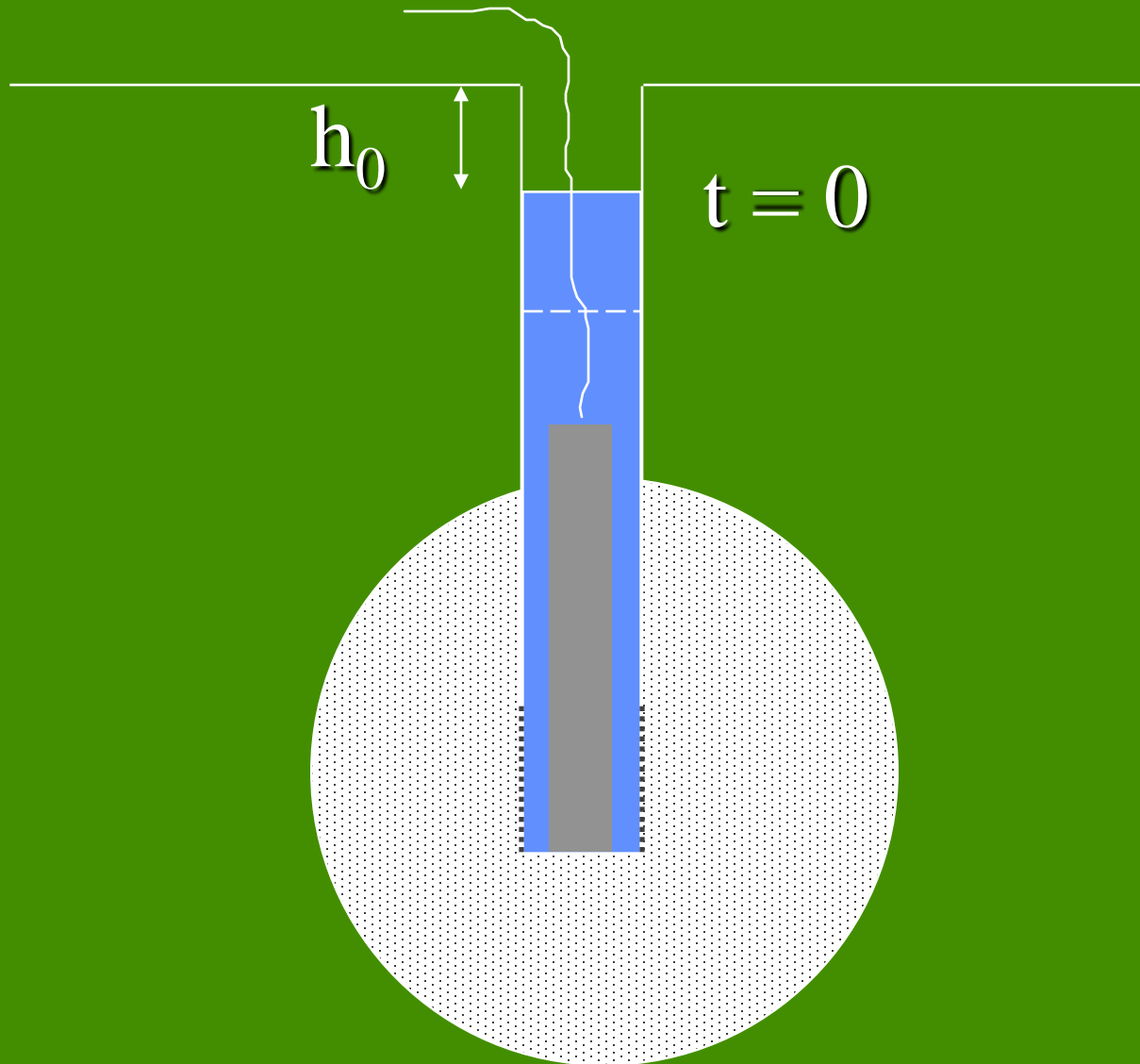


- Il test di risalita in un foro dopo l'asportazione o l'iniezione di un volume d'acqua noto è detto **slug test (volume di 15 litri, originariamente)**.
- Lo slug test è un test speditivo di campo per la stima di valori di K da bassi a medi in un pozzo singolo.
- La procedura è:
 - Carico iniziale è noto
 - Lo slug è rimosso, aggiunto o spostato istantaneamente (lo spostamento è la cosa migliore)
 - Viene monitorato il ripristino del livello (in genere con un trasduttore di pressione)
 - Cambi tipici di carico sono 2-3 m in piezometri di 25-50 mm diametro quindi il volume dello slug è tipicamente di solo 1-10 litri

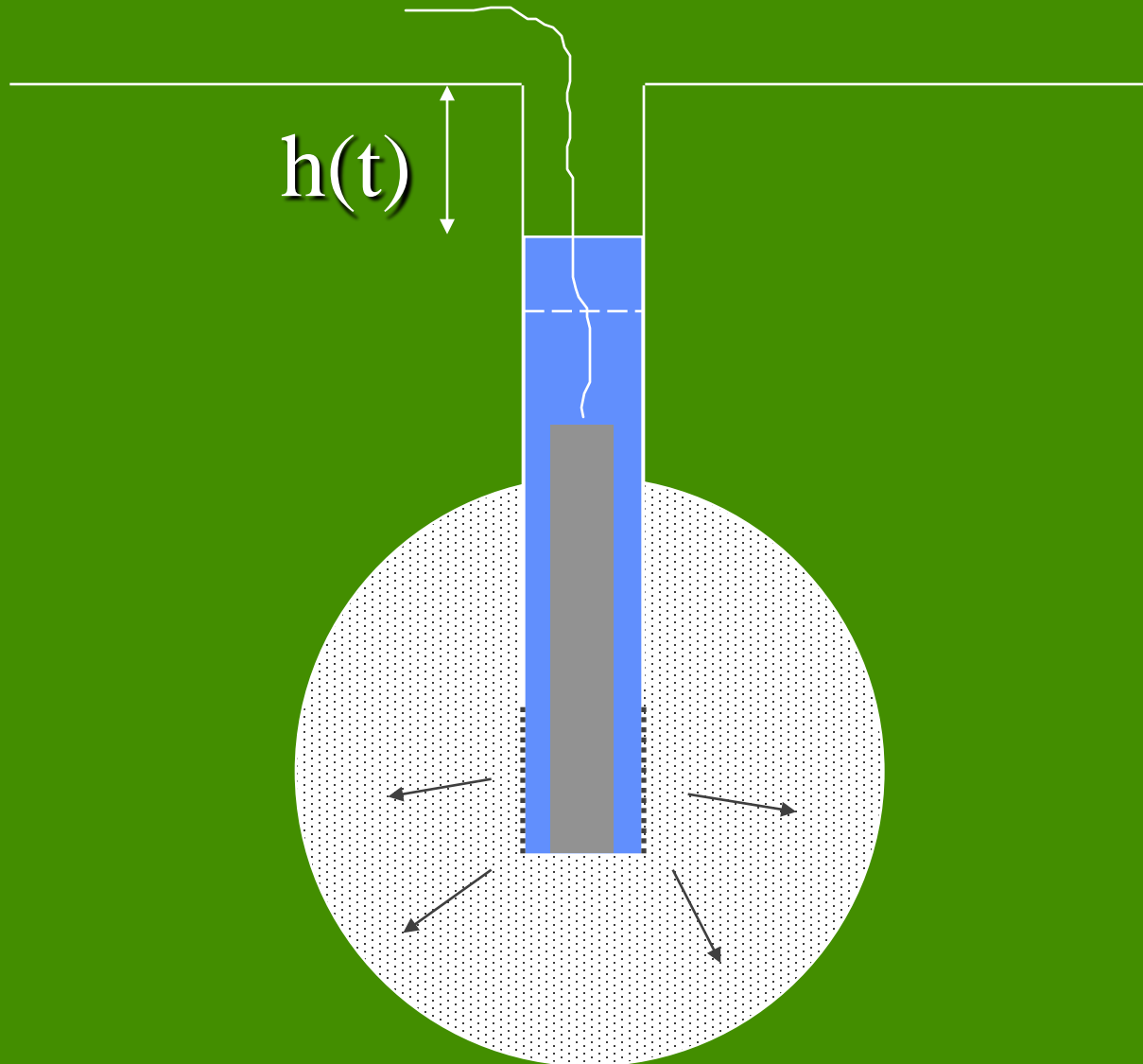
Condizione Statica



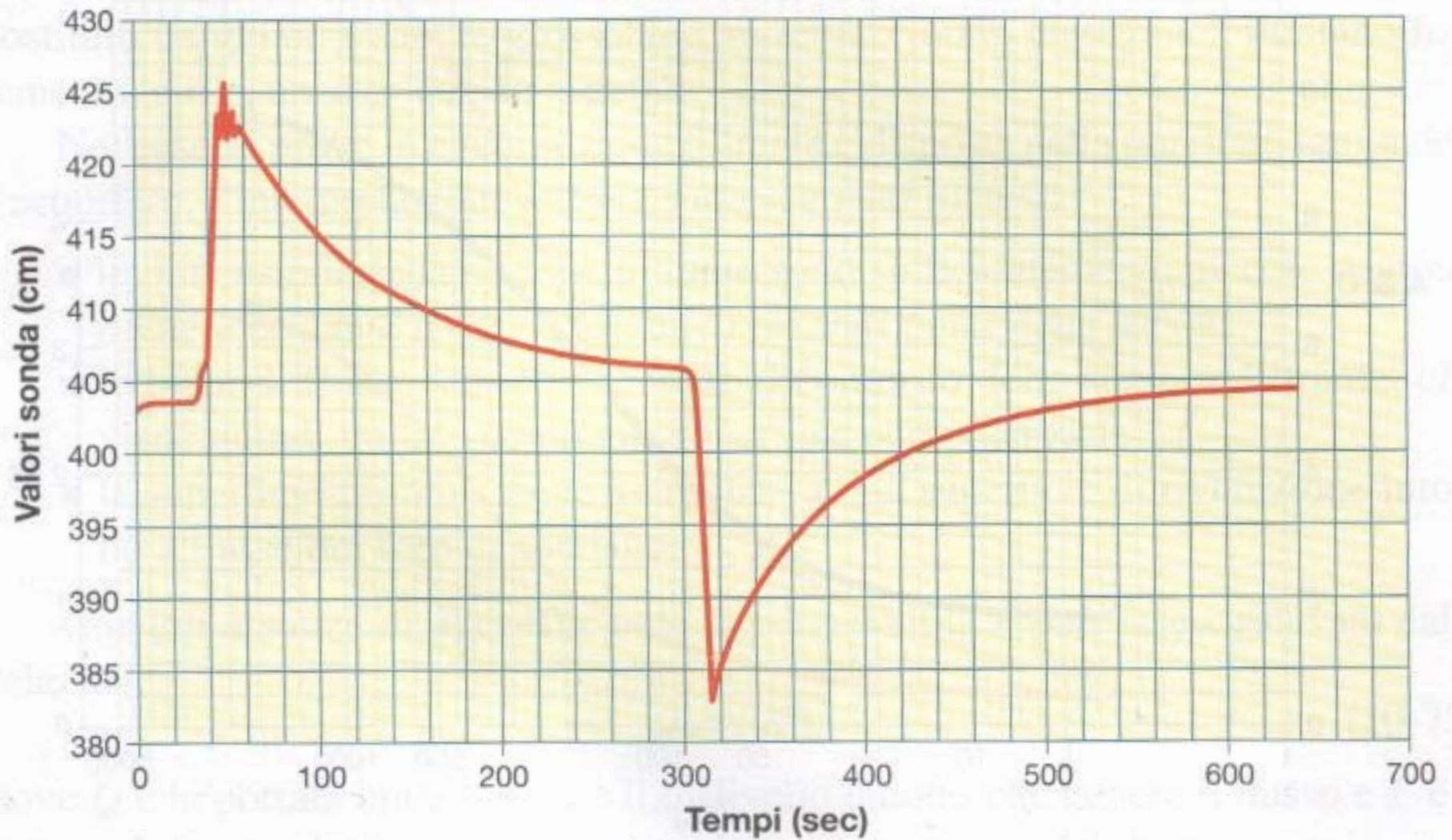
Aggiunta slug



Misura del ripristino



SLUG TEST + BAIL TEST



Vantaggi rispetto alla classica prova di falda

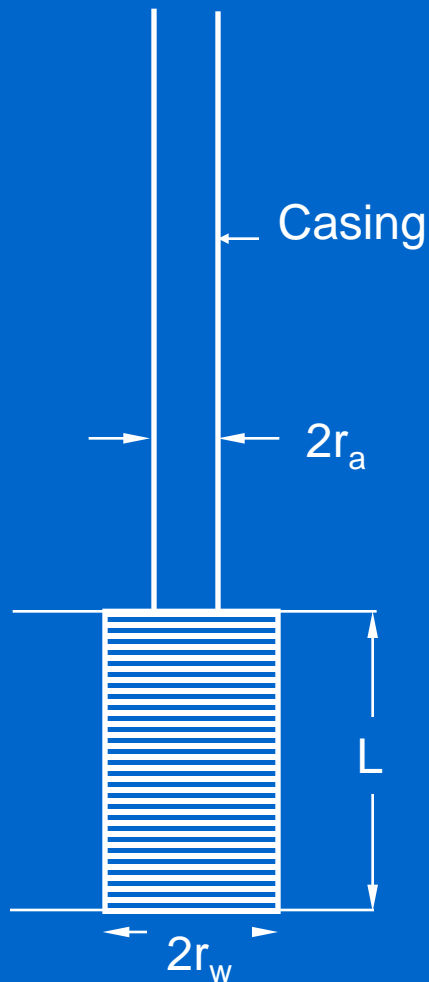
- semplicità e rapidità di esecuzione
- conseguente minor costo: in particolare, l'esecuzione di uno *slug test* non richiede la disponibilità di pompe o attrezzature complesse, né di un pozzo di osservazione diverso dal pozzo attivo.

Per contro, il flusso indotto da uno *slug test* è molto limitato (nell'intorno del piezometro).

**PROVA DI TIPO PUNTUALE FORTEMENTE
CONDIZIONATA DAL COMPLETAMENTO DEL
PIEZOMETRO**



Geometria del test



- r_a raggio interno tubo di accesso
- r_w raggio esterno tratto filtrato incluso dreno
- L lunghezza tratto filtrato
- h_0 carico iniziale, $t = t_0$
- $h(t)$ carico dopo tempo t
- A è la sezione trasversale tubo $= \pi r_a^2$
- F è un fattore di forma $= 2\pi L / \ln(L/r_w)$
(tratto testato di forma cilindrica)

Modelli di analisi

Per l'interpretazione degli slug test, a partire dagli anni '50 sono stati sviluppati diversi modelli matematici bidimensionali di tipo analitico e semianalitico: i più utilizzati sono quelli di

- Hvorslev (Hvorslev, 1951)

- Cooper, Bredehoeft e Papadopulos (Cooper et al., 1967)

(solo per acquiferi confinati)

- Bouwer & Rice (Bouwer and Rice, 1976).

assunzioni:

- l'acquifero è omogeneo e isotropo e pertanto non esiste danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo;
- è valida la legge di Darcy;
- l'acquifero è illimitatamente esteso in tutte le direzioni;
- l'immagazzinamento della formazione acquifera è trascurabile;
- le perdite di carico per il flusso attraverso le finestrate sono trascurabili;
- la posizione della tavola d'acqua non cambia con il tempo;
- il flusso creato dalla variazione di carico idraulico è esclusivamente orizzontale (i piani orizzontali virtuali passanti per il *top* e il *bottom* del tratto finestrato si comportano da limiti impermeabili).

Metodo di Hvorslev

Il metodo di Hvorslev è stato sviluppato allo scopo di stimare la conducibilità idraulica del materiale costituente l'acquifero, nella zona circostante i filtri di un piezometro/pozzo.

Le ipotesi che stanno alla base del metodo sono le stesse del metodo precedente.

Hvorslev ha introdotto nella formula di calcolo un fattore T_0 "time lag" o "tempo base di ritardo", definito come l'intervallo di tempo trascorso per arrivare ad un rapporto h/h_0 pari a 0.37 (utile per semplificare poi la formula dato che $\ln 0.37 = -1$).

Secondo Hvorslev:

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}/(\mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_0)) * \mathbf{ln}(\mathbf{h}/\mathbf{h}_0)$$

dove :

A: $(\pi * r_a^2)$ = sezione del tubo piezometrico di raggio r_a ;

F: fattore di forma, che dipende dalla geometria del perforo = $2\pi L / \ln(L/r_w)$

K: conducibilità idraulica (m/s);

h: carico idraulico al tempo t ;

L = lunghezza del tratto filtrato;

r_w = raggio del perforo compreso il dreno

Riportando su un grafico in ascissa il tempo e in ordinata il rapporto h/h_0 (scala logaritmica) si ottiene un andamento lineare.

Si sceglie $h/h_0 = 0.37$,

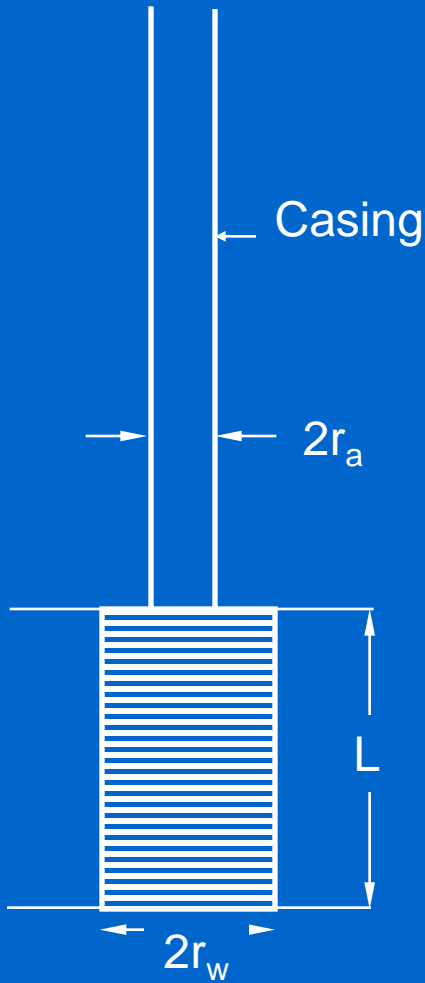
allora $\ln h/h_0 - 1$,

E si definisce il tempo corrispondente $t_1 = T_L = \text{time lag}$.

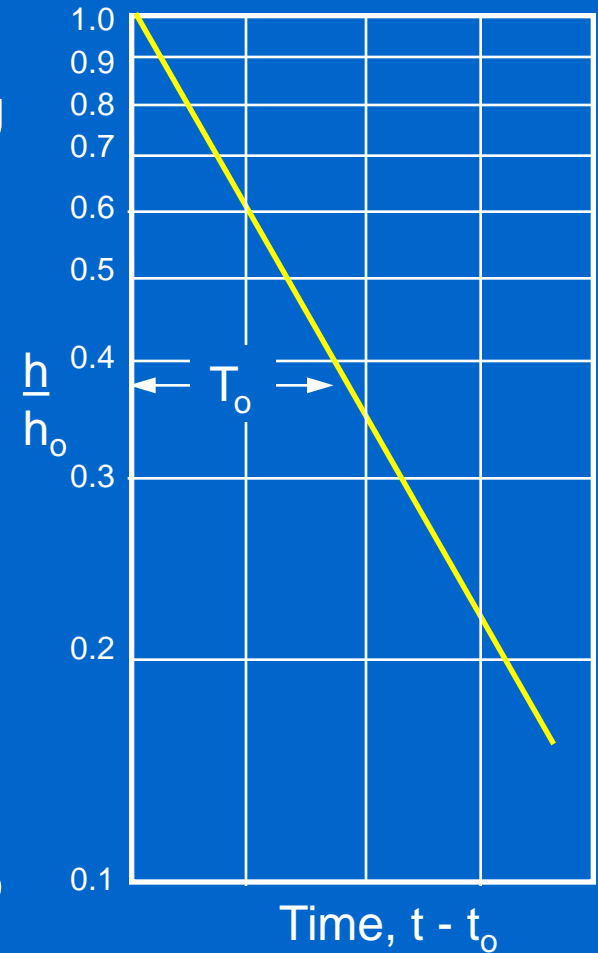
Per cui,

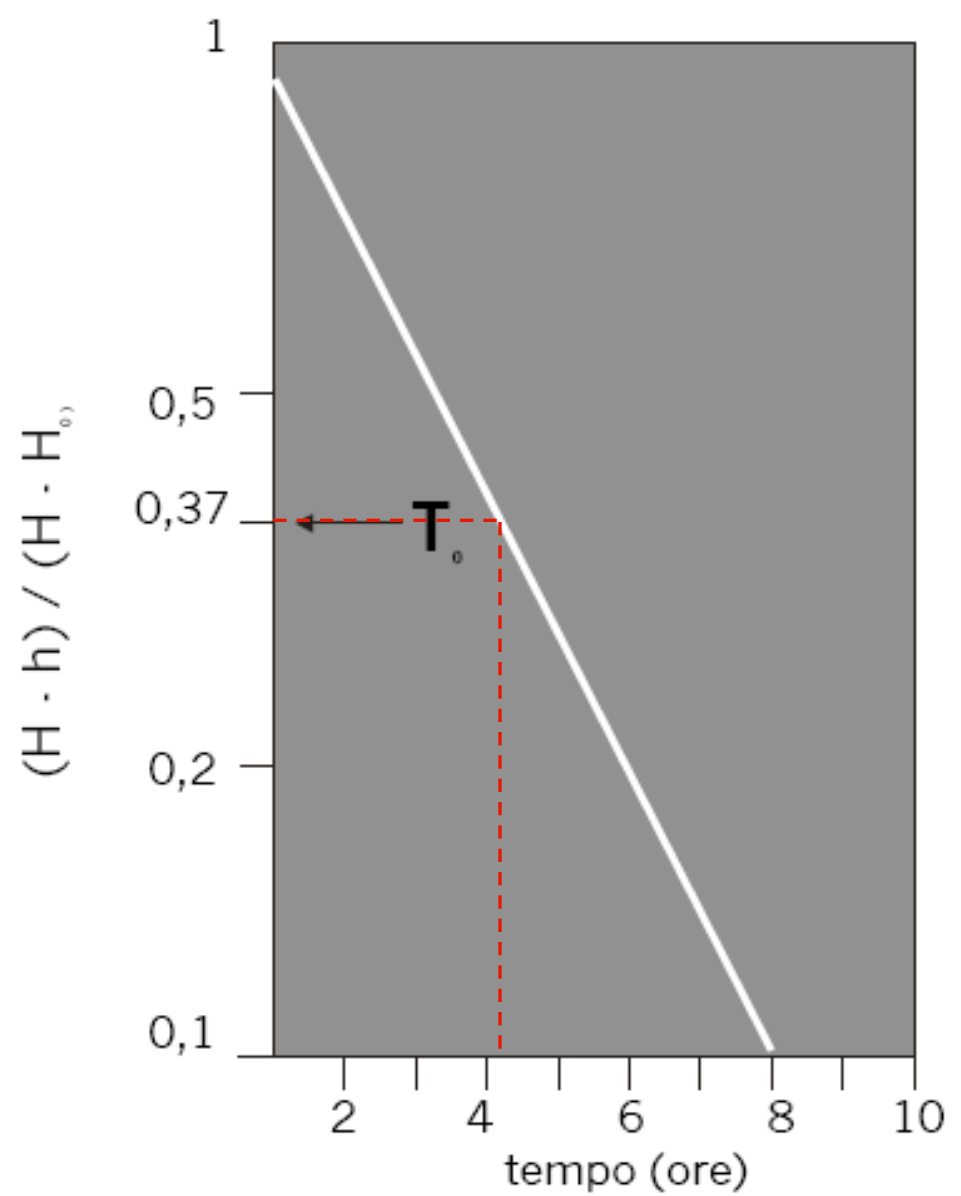
$$K = [(r_a^2) * \ln (L/r_w)] / (2L * T_L)$$

Analisi di Hvorslev (1951)

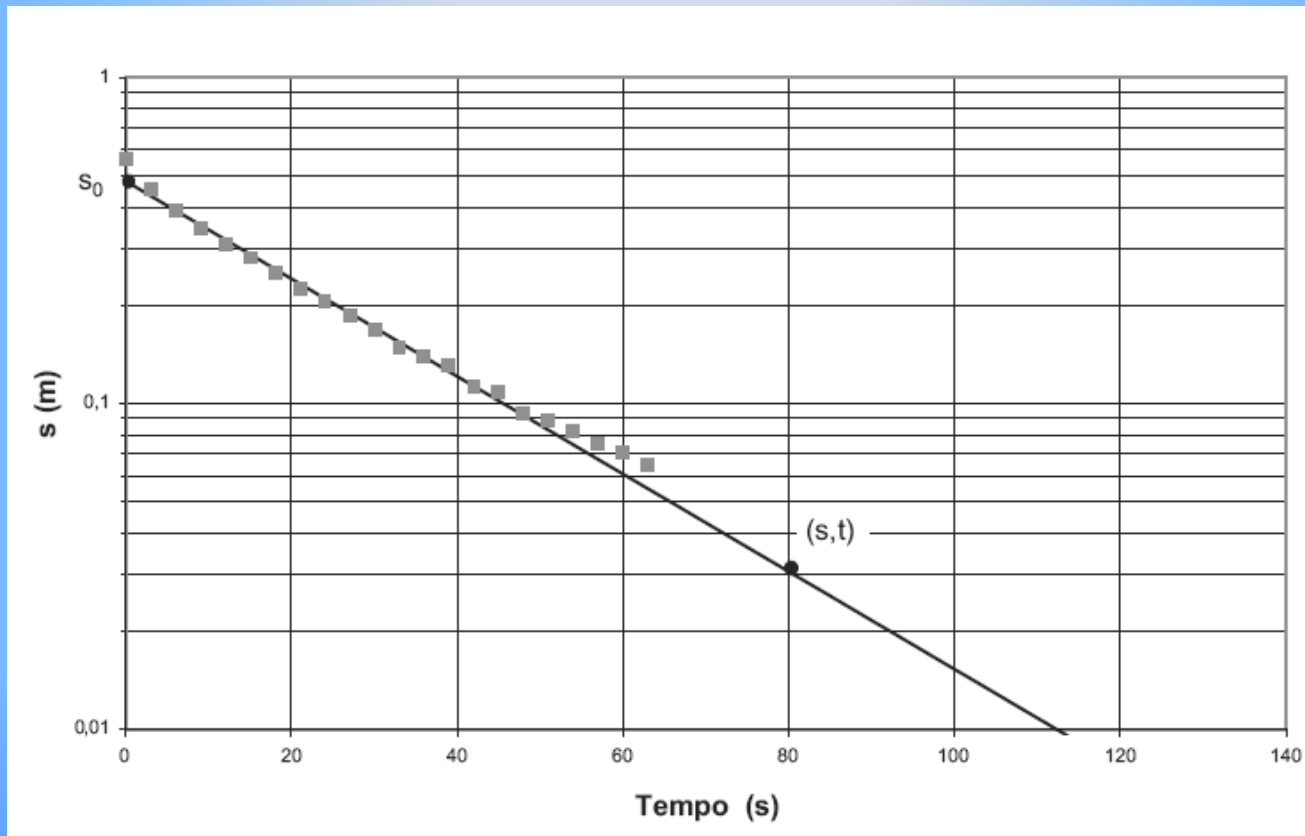


- $$K = \frac{r_a^2}{2L(t - t_o)} \ln\left(\frac{L}{r_w}\right) \ln\left(\frac{h_o}{h}\right)$$
- Plottare tempo contro $\log(h/h_o)$
- Misurare il time lag T_o when $\ln(h_o/h) = 1$
- $$K = \frac{r_a^2}{2LT_o} \ln\left(\frac{L}{r_w}\right)$$
- T_o si ha quando:
- $h = e^{-1}h_o = 0.37h_o$
- Se $T_o = 1000$ s per un diametro di 50 mm x 1 m lunghezza con 38 mm diametro tubo di accesso si ha $K = 2 \times 10^{-6}$ m/s





La soluzione di *Bouwer e Rice* indica che la variazione di livello in pozzo, s , varia rispetto al tempo con una legge di tipo semilogaritmico; pertanto, in un caso ideale, i punti $\ln(s)$ vs t dovrebbero allinearsi lungo una retta il cui coefficiente angolare m è proporzionale alla conducibilità idraulica della formazione



Per la determinazione di m è sufficiente scegliere un punto su tale retta e poi calcolare:

$$m = [\ln(S_0/S)]/t$$

e quindi:

$$K = m * [r_a^2 * \ln(R_e/r_w)] / (2L)$$

Fattore di forma
descrive la geometria
del tratto testato

in cui:

S_0 : innalzamento o abbassamento iniziale;

S : innalzamento o abbassamento al tempo t ;

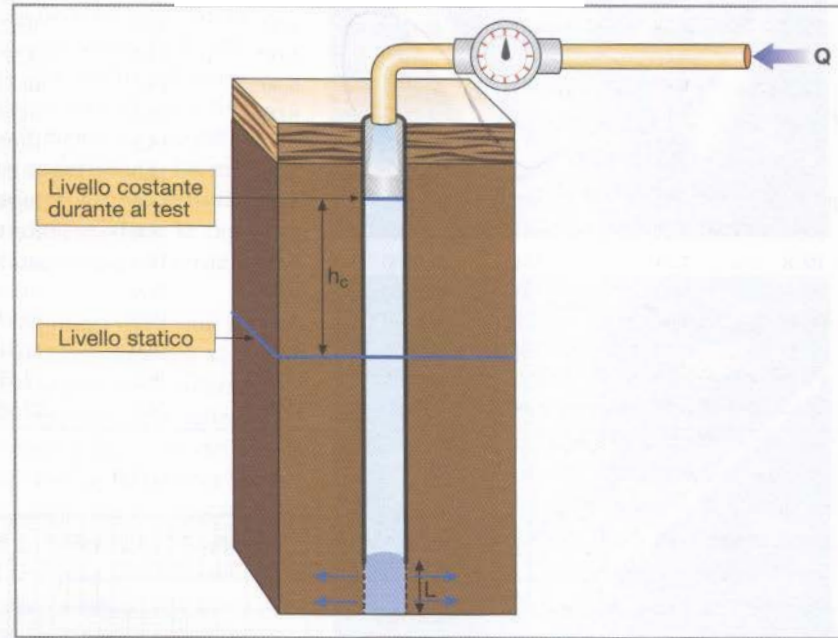
r_a : raggio del tubo piezometrico;

R_e : raggio effettivo, distanza a cui si fa risentire l'effetto entro il mezzo poroso;

r_w : raggio del perforo;

L : lunghezza tratto fenestrato

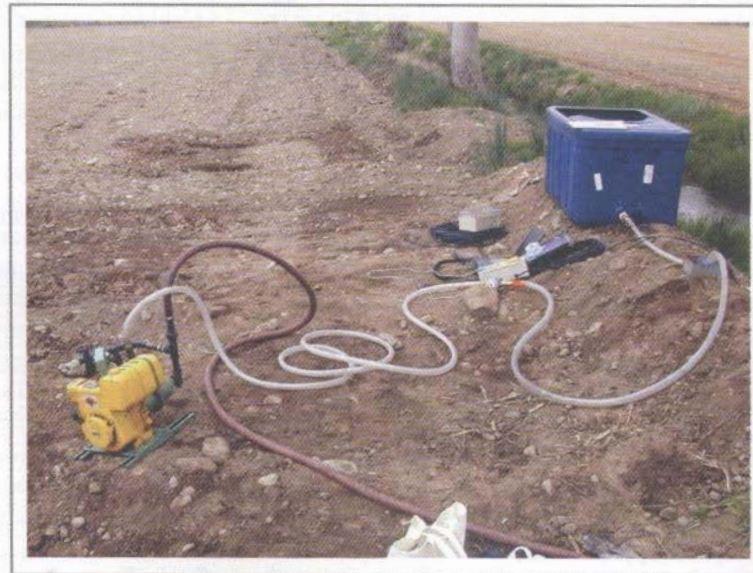
$$K = (5,8/\pi L) * (Q/h) * 10^{-5}$$



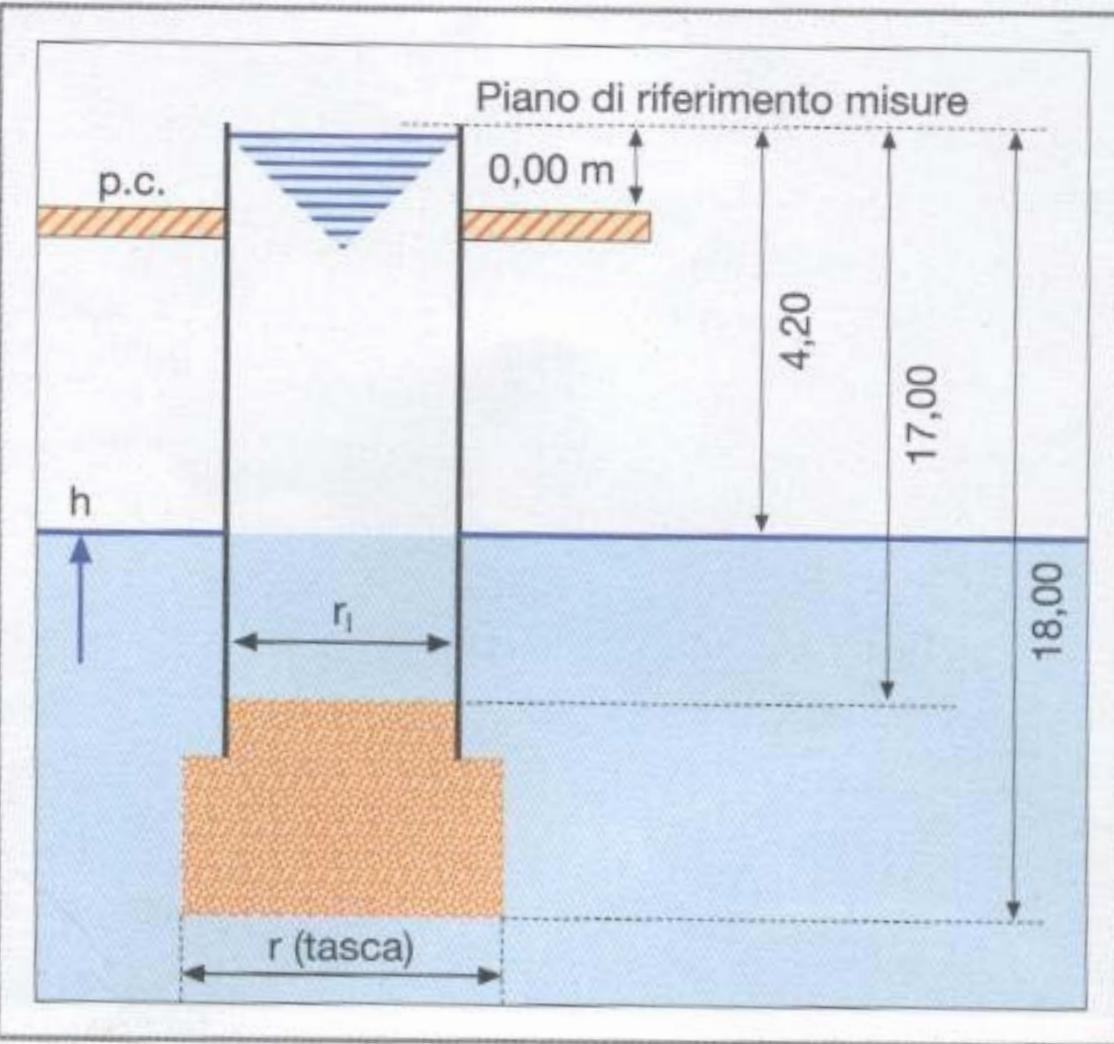
Q in L/s

lunghezze in m

**PROVE DI
IMMISSIONE
IN
PIEZOMETRO A
PORTATA
COSTANTE**



PROVA "LEFRANC" (a carico variabile)



$$K = \frac{A}{[C(t_2 - t_1)]} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

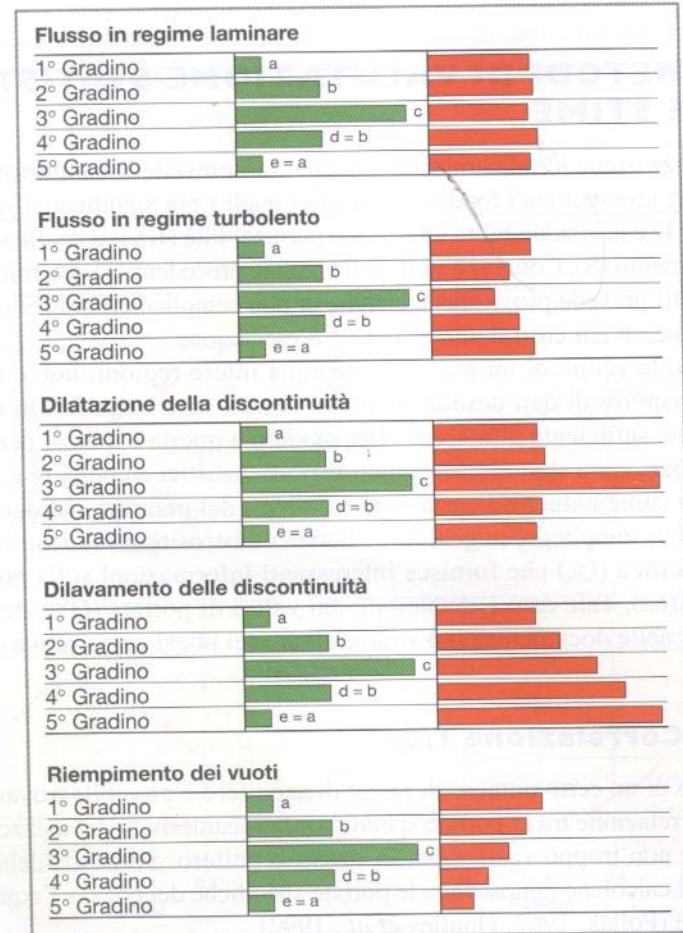
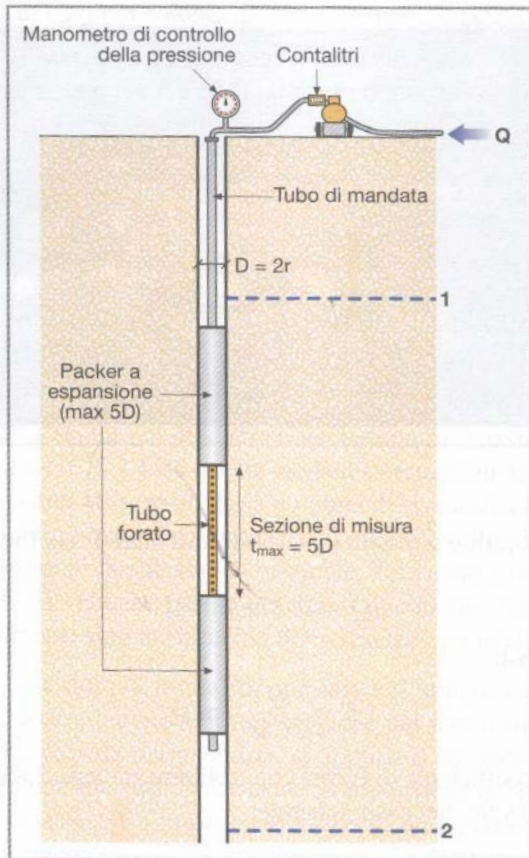
A = area di base del perforo

C = coefficiente di forma

PROVA LUGEON

$$K = Q / [(2\pi L P_c) * \ln(L/r)]$$

0 Determinazione dei parametri idrogeologici degli acquiferi



$$UL = n (10/Pe)$$

$$1 UL = 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

n = assorbimento in L/min per metro

Pe = pressione in bar

Per approfondire.....



Civita, pag. 297-336
Pranzini, par. 11.2, 11.4