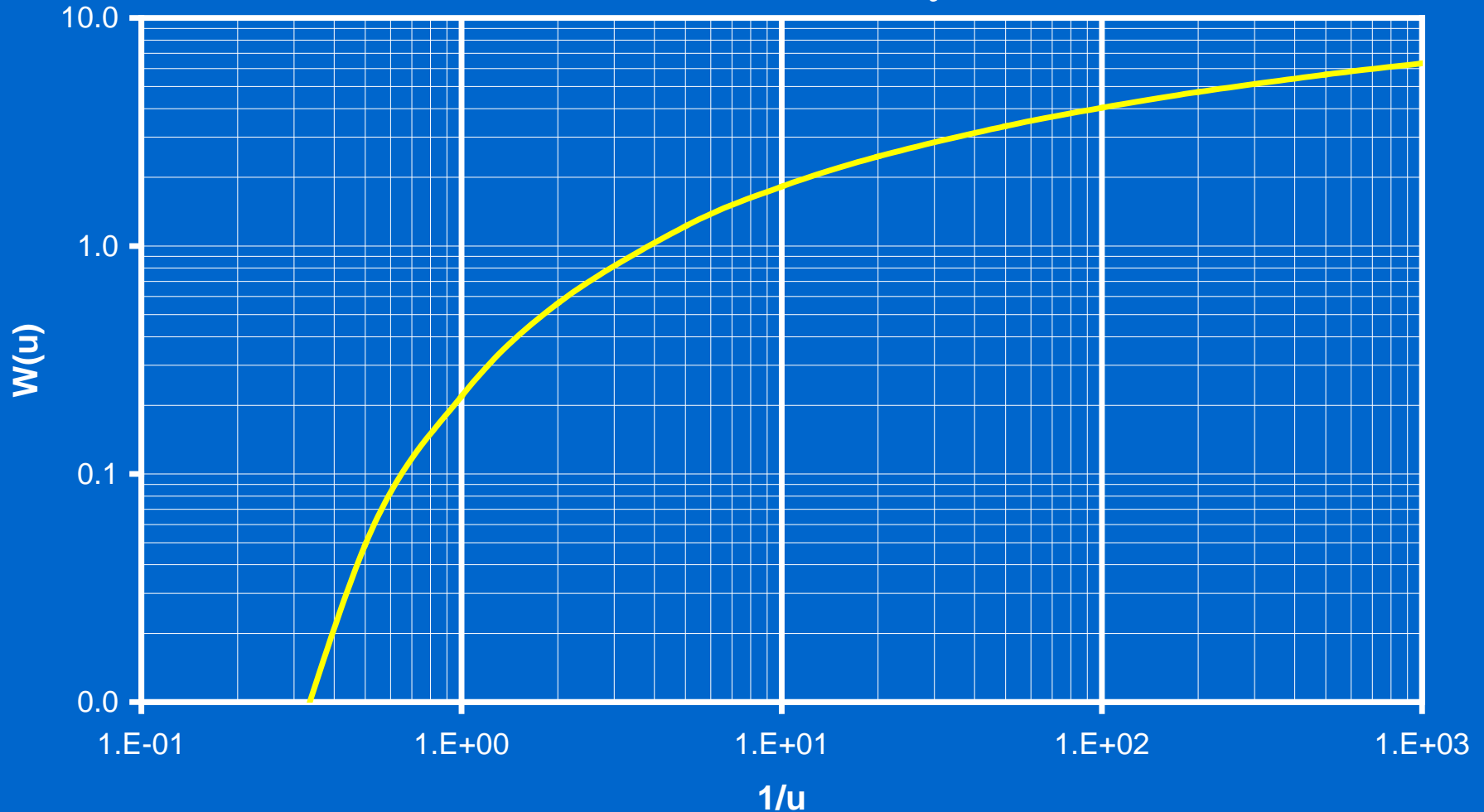


Lezione 2

Idraulica dei pozzi I

Metodo del non equilibrio



ARGOMENTI

- Concetti base di trasmissività ed immagazzinamento
- Metodo di Theis
- Metodo di Cooper-Jacob
- Limiti di alimentazione-Barriera di permeabilità
- Metodo della risalita
- Metodo di Hantush e Jacob (acquifero semiconfinato)
- Metodo di Neumann (acquifero libero)

Immagazzinamento specifico

- L'immagazzinamento specifico (**Specific storage, S_s**) è il volume di acqua rilasciata o presa in immagazzinamento da un volume unitario di mezzo poroso per cambiamento unitario di carico di pressione [L^{-1}].

$$S_s = \rho_f * g(\alpha + n\beta)$$

dove

$\rho_f * g = \gamma_w$ è peso specifico dell'acqua [FL^{-3}];

α è la compressibilità della matrice porosa [$F^{-1}L^2$];

β è la compressibilità del fluido [$F^{-1}L^2$]; e

n è la porosità.

- **Il coefficiente di immagazzinamento S (Storativity)** è il prodotto adimensionale dell'immagazzinamento specifico per lo spessore dell'acquifero.

Immagazzinamento Specifico, S_s

$$S_s = \rho_f g (\beta n + \alpha)$$

$$\alpha = \frac{-db/b}{d\sigma_e}$$

Compressibilità del mezzo
poroso, α

$$\beta = \frac{-dV_w/V_w}{dP}$$

Compressibilità del
fluido, β

Argilla $\alpha \approx 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{N}$

Sabbia $\alpha \approx 1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$

Ghiaia-Roccia fratturata $\alpha \approx 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$

Roccia integra $\alpha \approx 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$

Acqua $\beta = 4.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$

Specific Yield, S_y

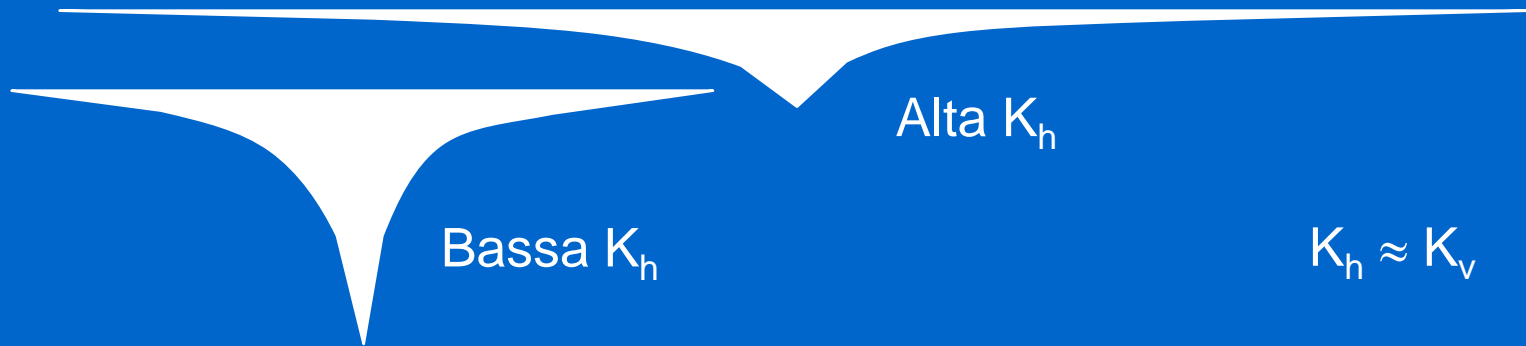
- Termine di immagazzinamento valido solo per acquifero libero.
- $S_y \gg S_s$
- Il coefficiente di immagazzinamento complessivo per un acquifero libero
- $S = S_y + b S_s$

• Parametri idrodinamici dell'acquifero

- **Tramissività (idraulica)** ($T = Kb$) è il prodotto della conducibilità idraulica e dello spessore dell'acquifero
- **Coefficiente di immagazzinamento**
($S = S_s b$) per acquifero confinato è il prodotto dell'immagazzinamento specifico e dello spessore dell'acquifero
($S = S_y + S_s b$) per acquifero libero

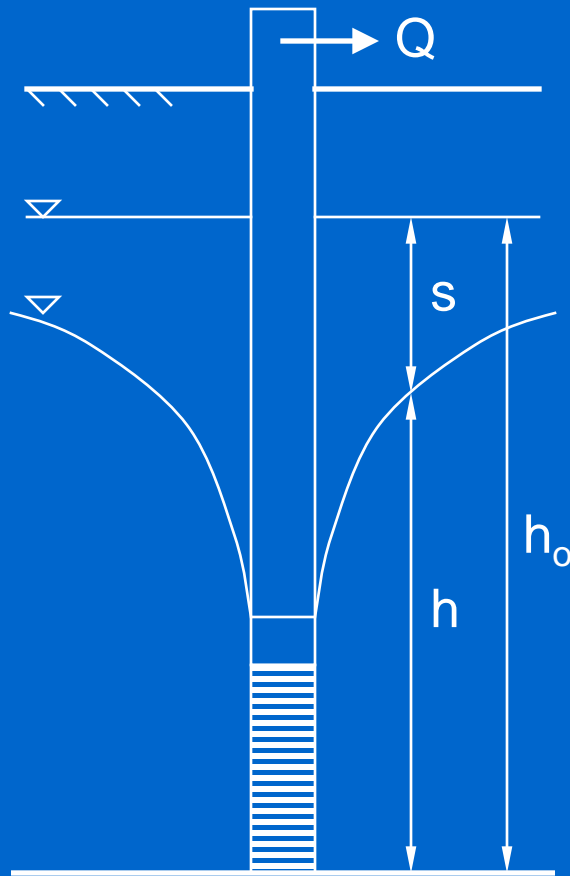
•
•
•

Quando un pozzo è in pompaggio nell'acquifero si forma un cono di depressione



- Si forma come zona depressa centrata nel pozzo che pompa
- Abbassamento massimo al pozzo e si riduce radialmente
- Il gradiente idraulico diminuisce allontanandosi dal pozzo
- Il cono si estende nello spazio fino a che gli afflussi (da limiti di vario tipo) controbilanciano l'estrazione di acqua
- La forma del cono è controllata dal valore di K
- Il volume del cono è controllato dall'immagazzinamento

Terminologia

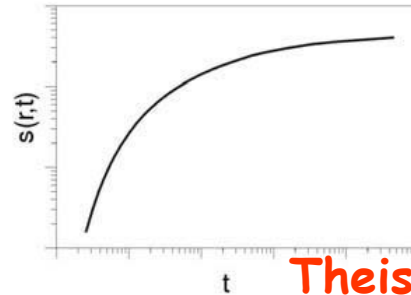
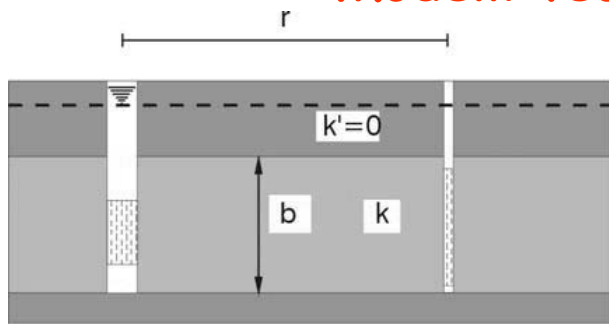


- **Livello statico** (h_0) è il livello piezometrico d'equilibrio prima che la prova inizi
- **Livello dinamico** (h) è il livello d'acqua durante il pompaggio
- **Abbassamento** ($s = h_0 - h$) è la differenza fra i 2 livelli
- **Portata di emungimento** (Q) è il volume di acqua pompata per unità di tempo
- **Capacità specifica** (Q/s) è la portata per abbassamento unitario (o Portata Specifica)

METODI DELLA TEORIA DEL NON EQUILIBRIO

- **ACQUIFERO CONFINATO**
 - Metodo di Theis – curva della funzione del pozzo
 - Metodo di Cooper-Jacob (approssimazione logaritmica)
 - Metodo della sovrapposizione degli effetti
 - Metodo della risalita (applicazione della sovrapposizione degli effetti)
- **ACQUIFERO SEMICONFINATO**
 - Metodo di Hantush & Jacob – Soluzione di Walton
- **ACQUIFERO LIBERO**
 - Metodo di Neumann

Modelli teorici di acquifero e curve diagnostiche

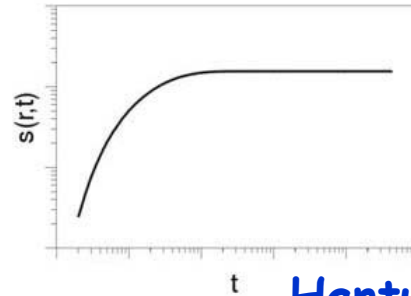
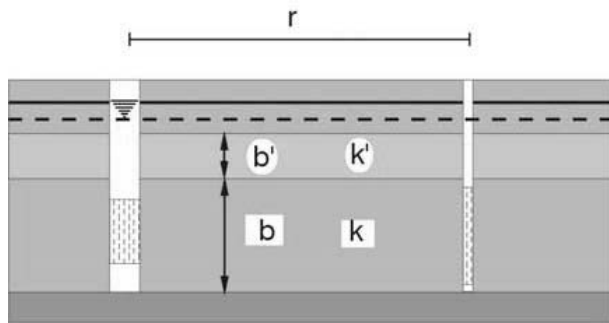


$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

(a)

Theis (confinato)

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

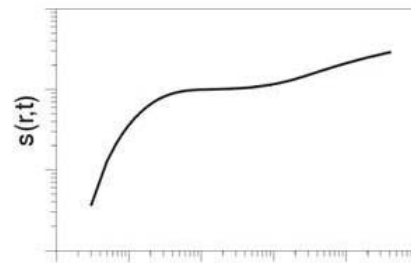
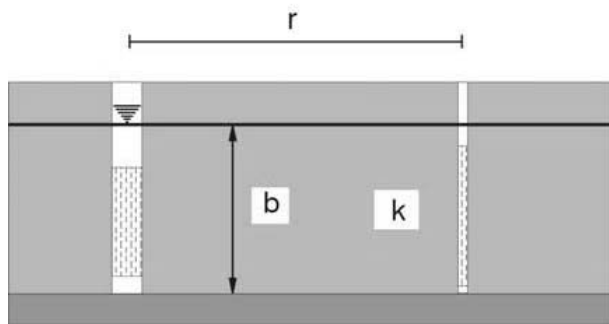


$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B)$$

(b)

Hantush-Jacob (semi-confinato)

$$B = (Tb'/K')^{1/2}$$



$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_b, u_A, \eta)$$

(c)

$$\eta = r^2 K_v / b^2 K h$$

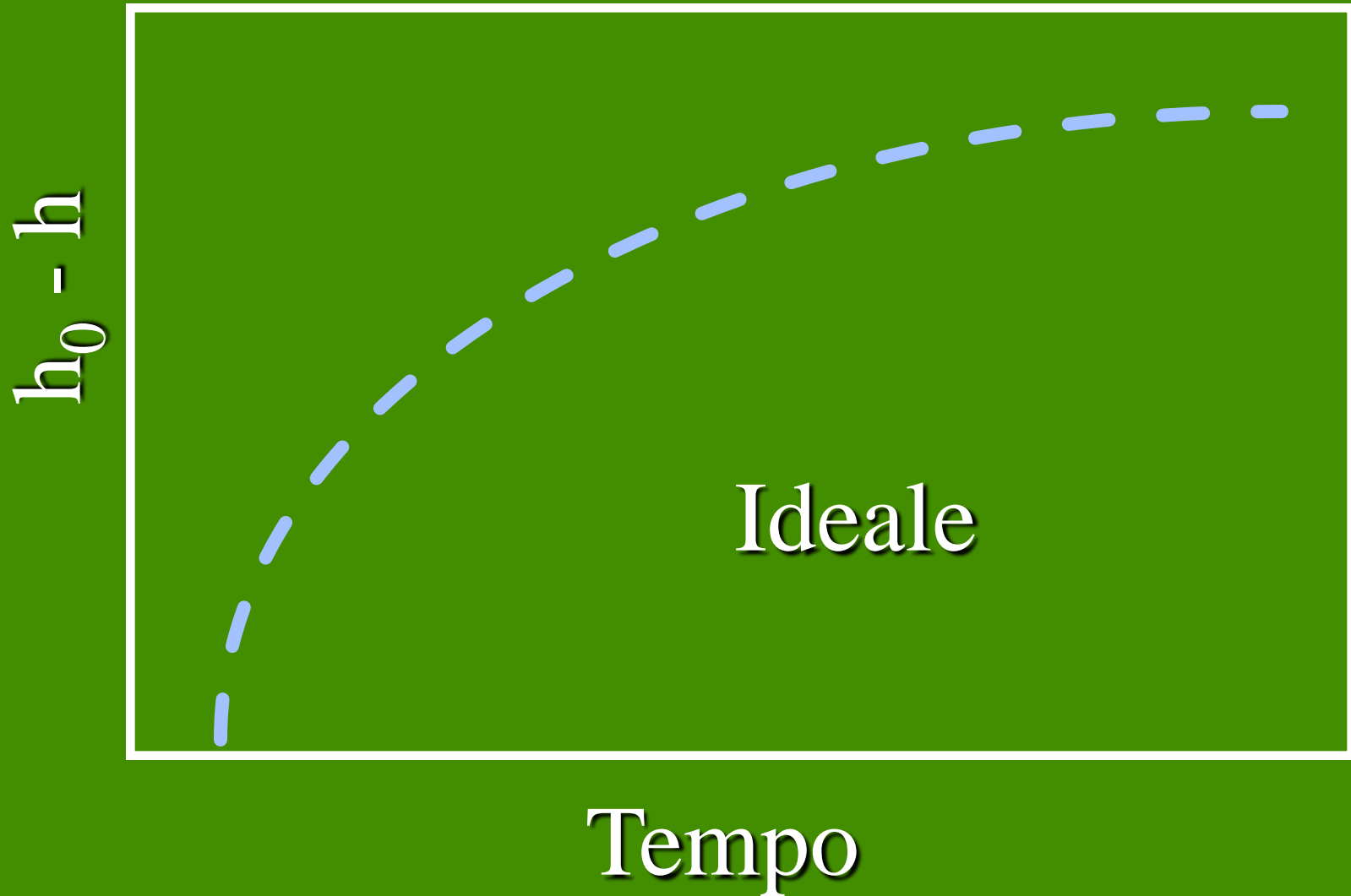
Neuman (libero)



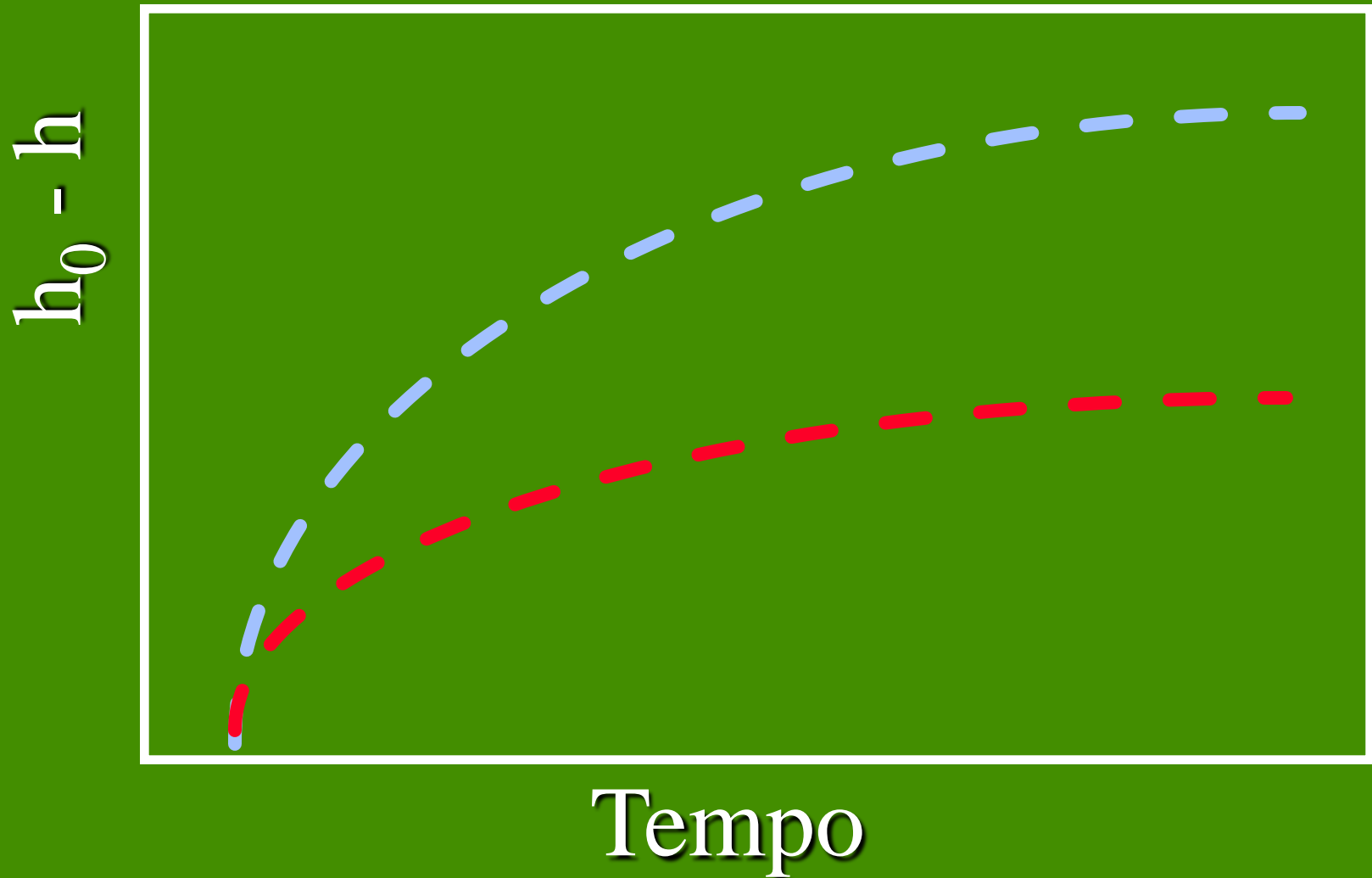
————— Superficie freatica

- - - - - Superficie piezometrica

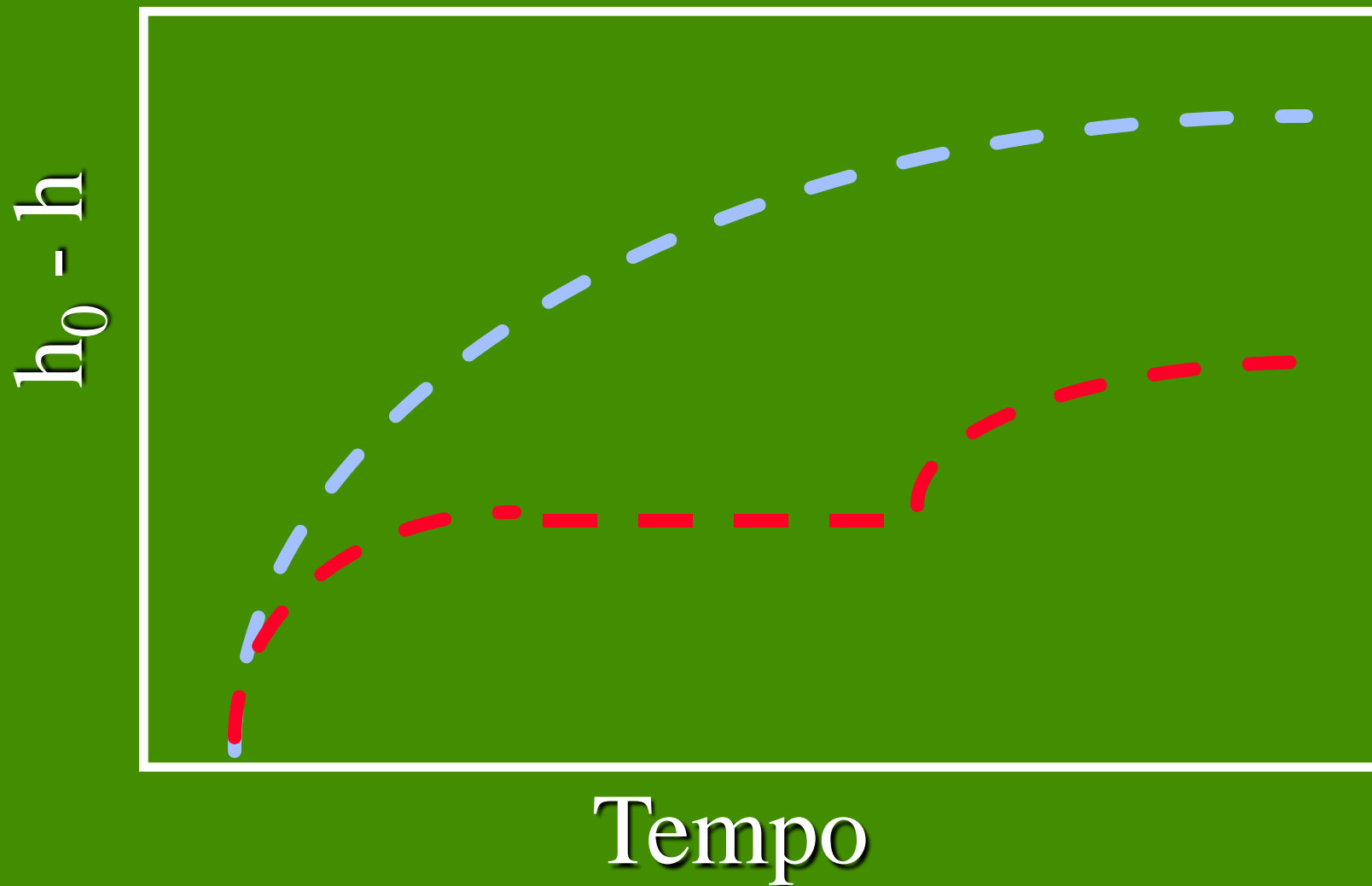
Prove di pompaggio



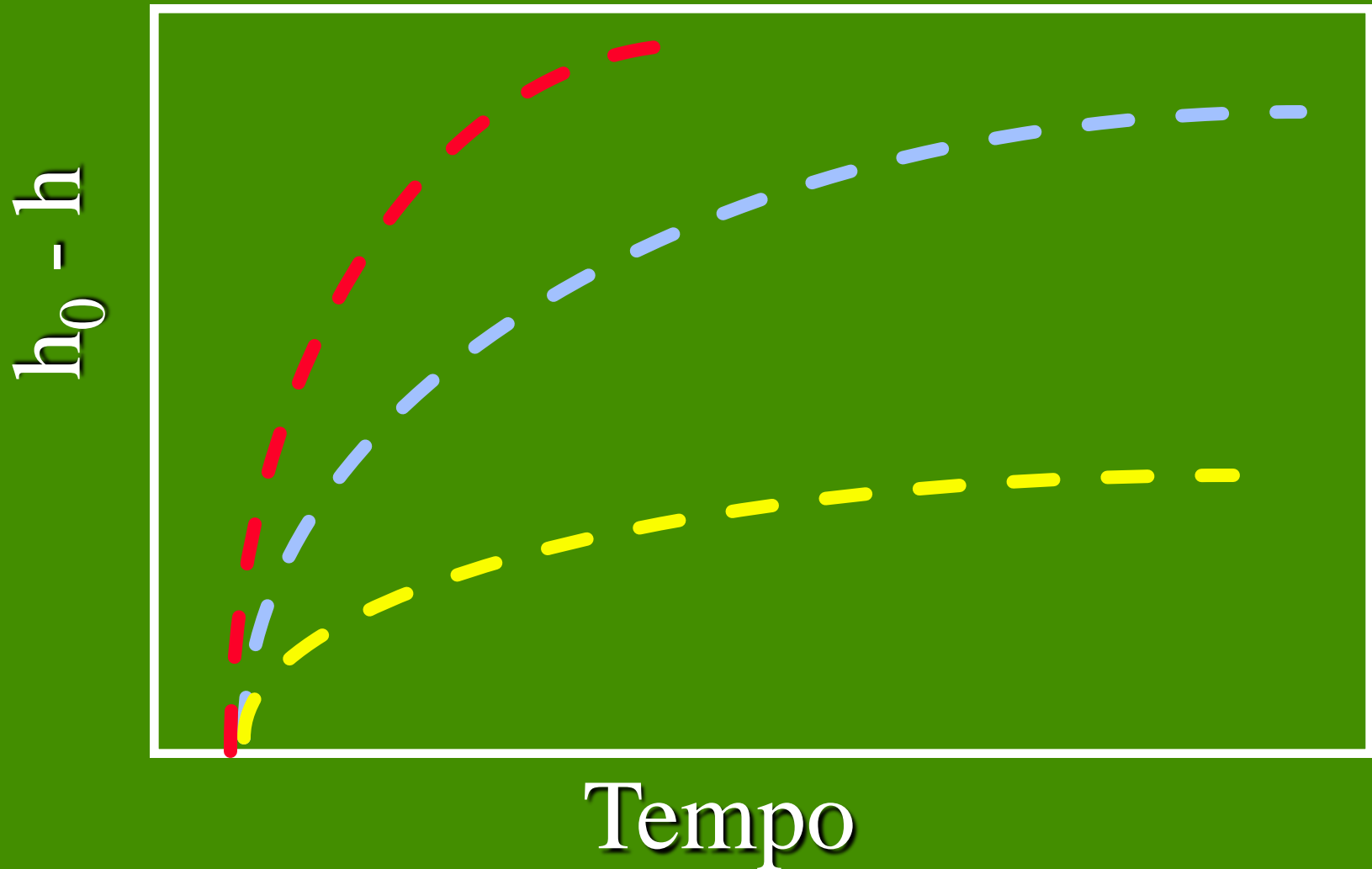
Semiconfinato (leaky)



Libero

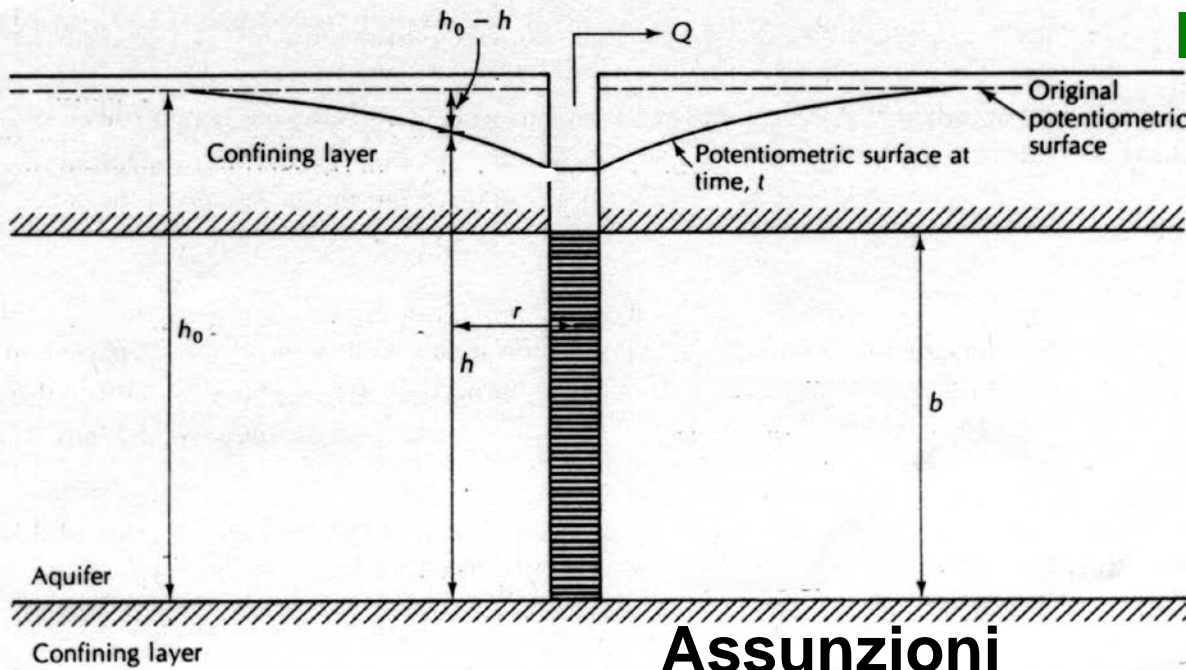


Limiti di alimentazione ed a flusso nullo



Metodo di Theis (1935)

Prima analisi
matematica degli
effetti
di abbassamento
in transitorio in un
acquifero
confinato



Assunzioni

- Isotropo, omogeneo, spessore uniforme
- Acquifero confinato al tetto ed al letto
- Estensione illimitata
- Pozzo completo, portata di emungimento costante
- Flusso laminare
- Carico idraulico orizzontale prima del pompaggio
- No ricarica
- Acqua rilasciata istantaneamente

Modello analitico di THEIS

analogia fra flusso di calore e flusso in acquifero confinato

$$\Delta h = h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad u = r^2 S / 4 T t$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = [-0.5772 - \ln u + u - u^2/2 \cdot 2! + u^3/3 \cdot 3! - u^4/4 \cdot 4! + ..]$$

W(u) = funzione del pozzo; integrale esponenziale, serie infinita

$$\Delta h = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Q = portata di emungimento (L^3/T ; m^3/s)

h = livello piezometrico (L; m)

h_o = livello piezometrico prima del pompaggio (L; m)

$\Delta h = h - h_o$ = abbassamento (L; m)

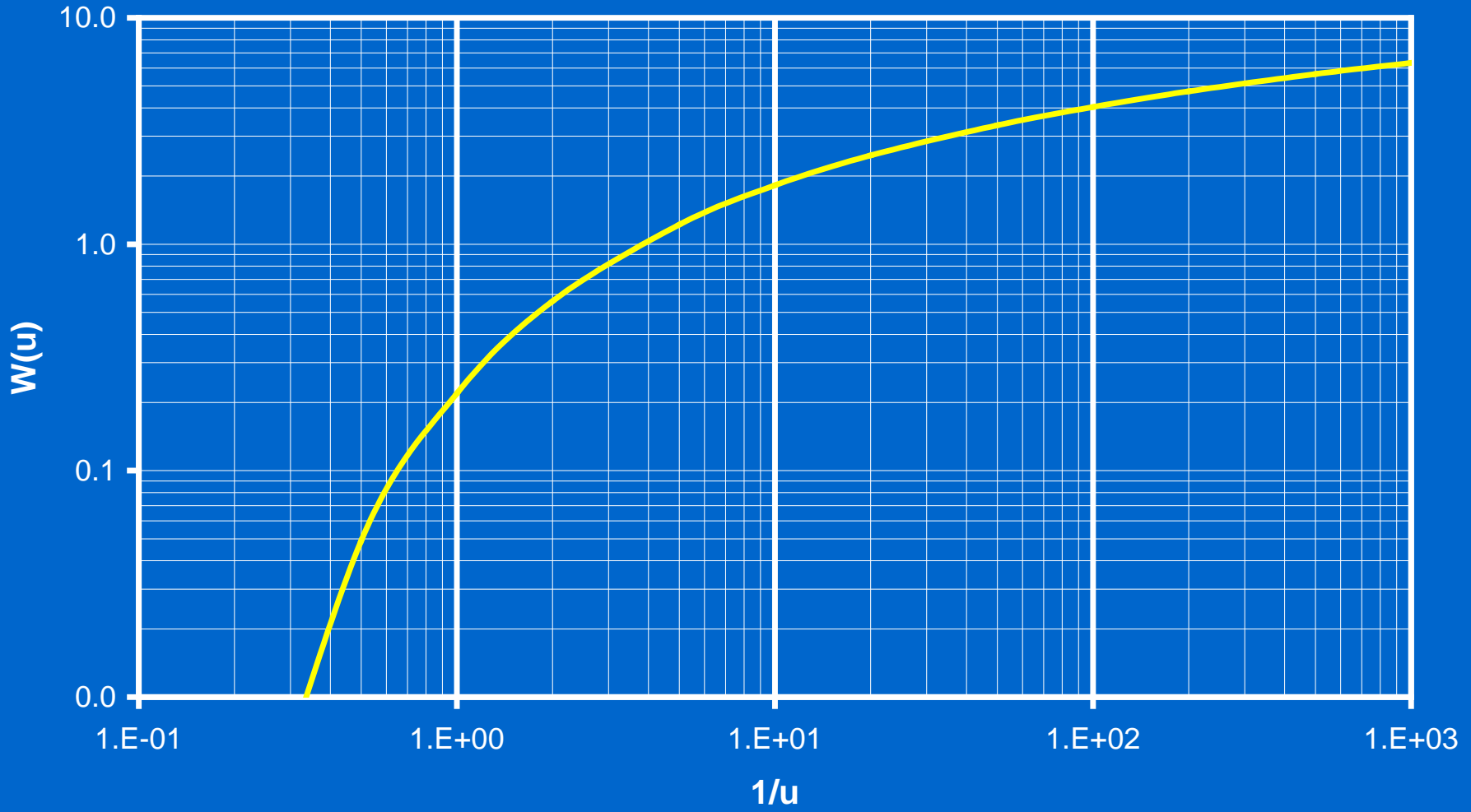
T = trasmissività (L^2/T ; m^2/s)

t = tempo da inizio pompaggio

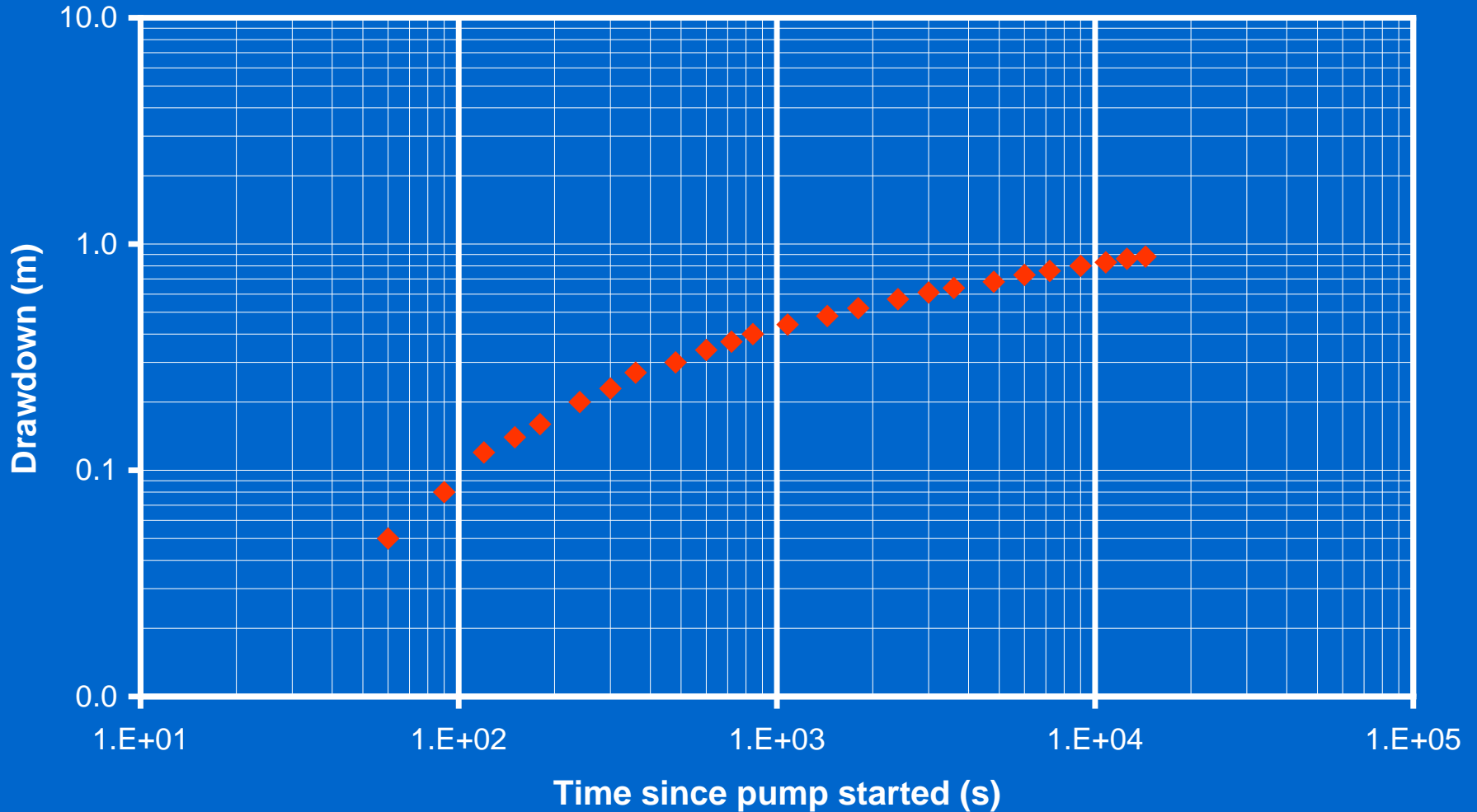
r = Distanza radiale dal pozzo in pompaggio

S = Coefficiente di immagazzinamento (adimensionale)

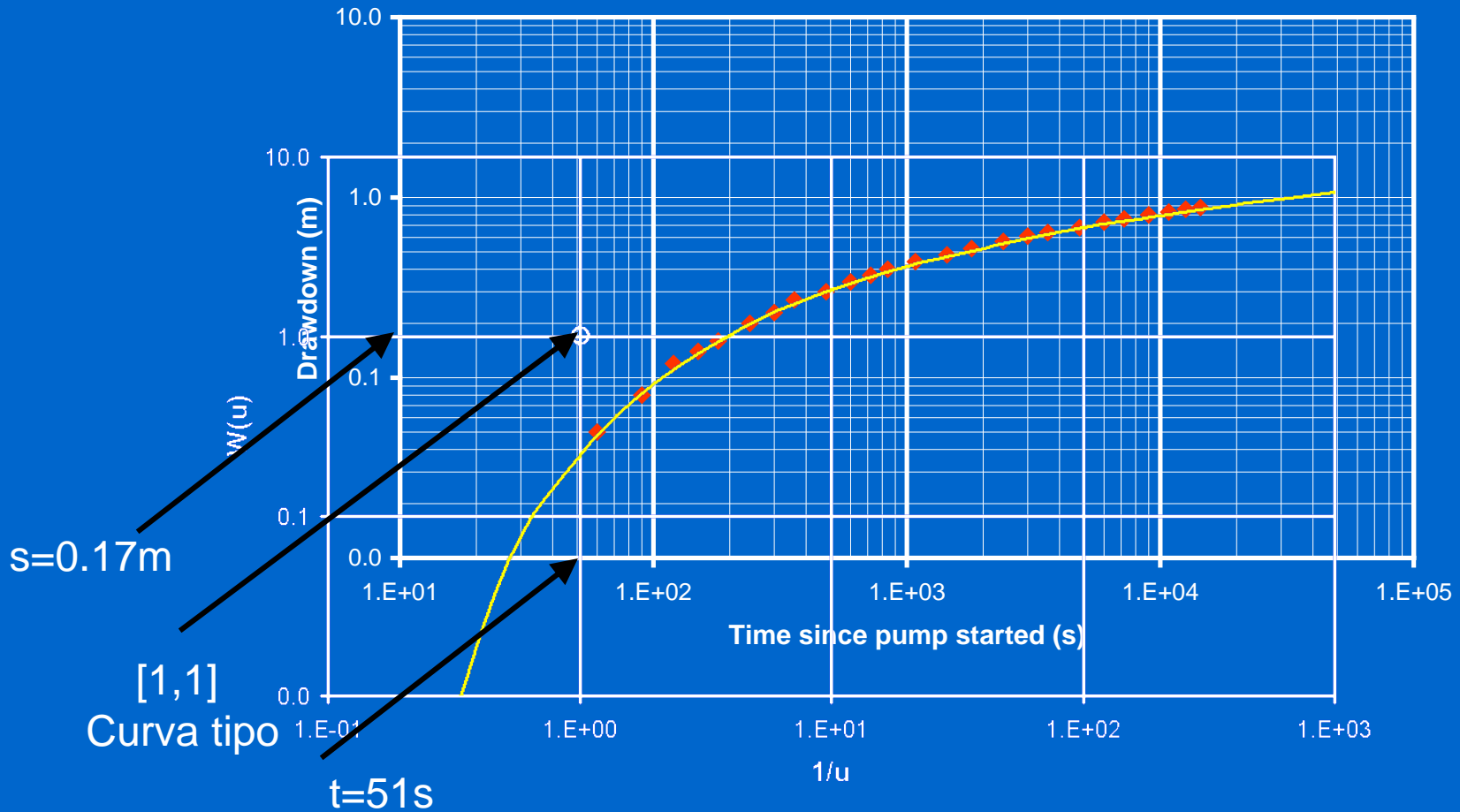
Risoluzione tramite curva teorica di Theis : $1/u$ vs $W(u)$



Curva sperimentale di Theis: Log(t) vs Log(s)



Sovrapposizione (*matching*)



RISOLUZIONE TRAMITE APPROSSIMAZIONE LOGARITMICA (metodo di Cooper-Jacob)

u tende a diventare piccolo via via che passa il tempo del pompaggio. Diventano trascurabili termini della serie. Riscrittura dell'equazione

1. u deve essere < 0.05

$$u = r^2 S / 4 T t \quad \text{con } u < 0.05$$

2. Riscrivere:

$$T = Q / 4 \pi (h - h_o) [-0.5772 - \ln(r^2 S / 4 T t)]$$

oppure

$$T = Q / 4 \pi (h - h_o) [-\ln(1.78) - \ln(r^2 S / 4 T t)]$$

Operazione sui logaritmi naturali:

$$T = Q / 4 \pi (h - h_o) \ln(4 T t / 1.78 r^2 S)$$

Conversione a logaritmo decimale ed evidenzio $(h - h_o)$:

$$(h - h_o) = 0.183 Q / T \log(2.25 T t / r^2 S)$$

3. Plottare abbassamento (asse verticale; 0 all'origine) contro Tempo (asse orizzontale) su carta semi-log dopo che si realizza $u < 0.05$. *Dovrebbe allinearsi su una linea retta*

4. I piezometri più vicini verificheranno prima la condizione.

5. Tracciare la retta fino ad incontrare la retta delle ascisse per abbassamento zero. Registrare l'intercetta positiva su asse dei tempi (t_0). L'abbassamento per un ciclo logaritmico è la pendenza della retta $\Delta(h_1 - h_2)$

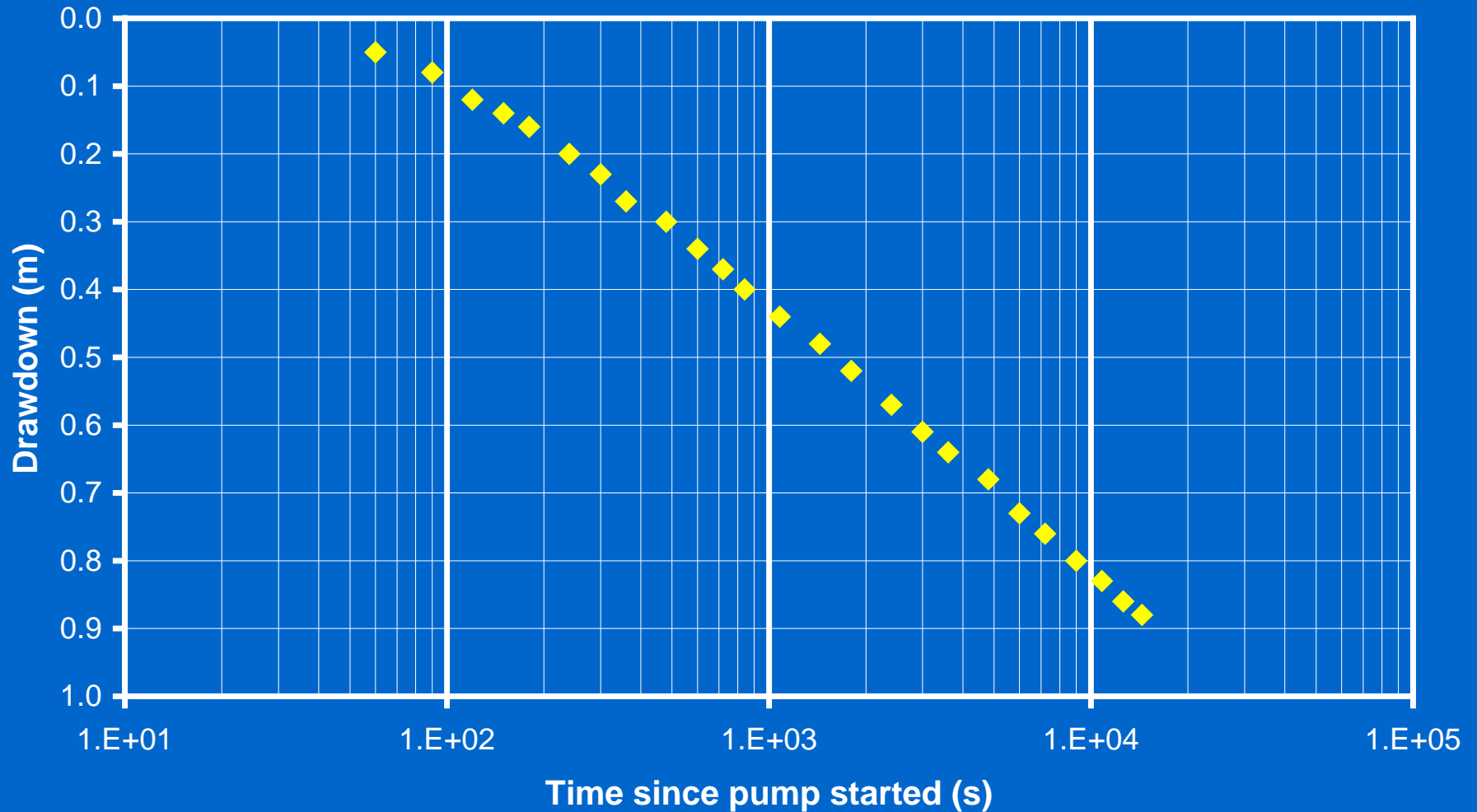
6. Determinazione della Trasmissività e del Coefficiente di Immagazzinamento:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta(h_1 - h_2)}$$

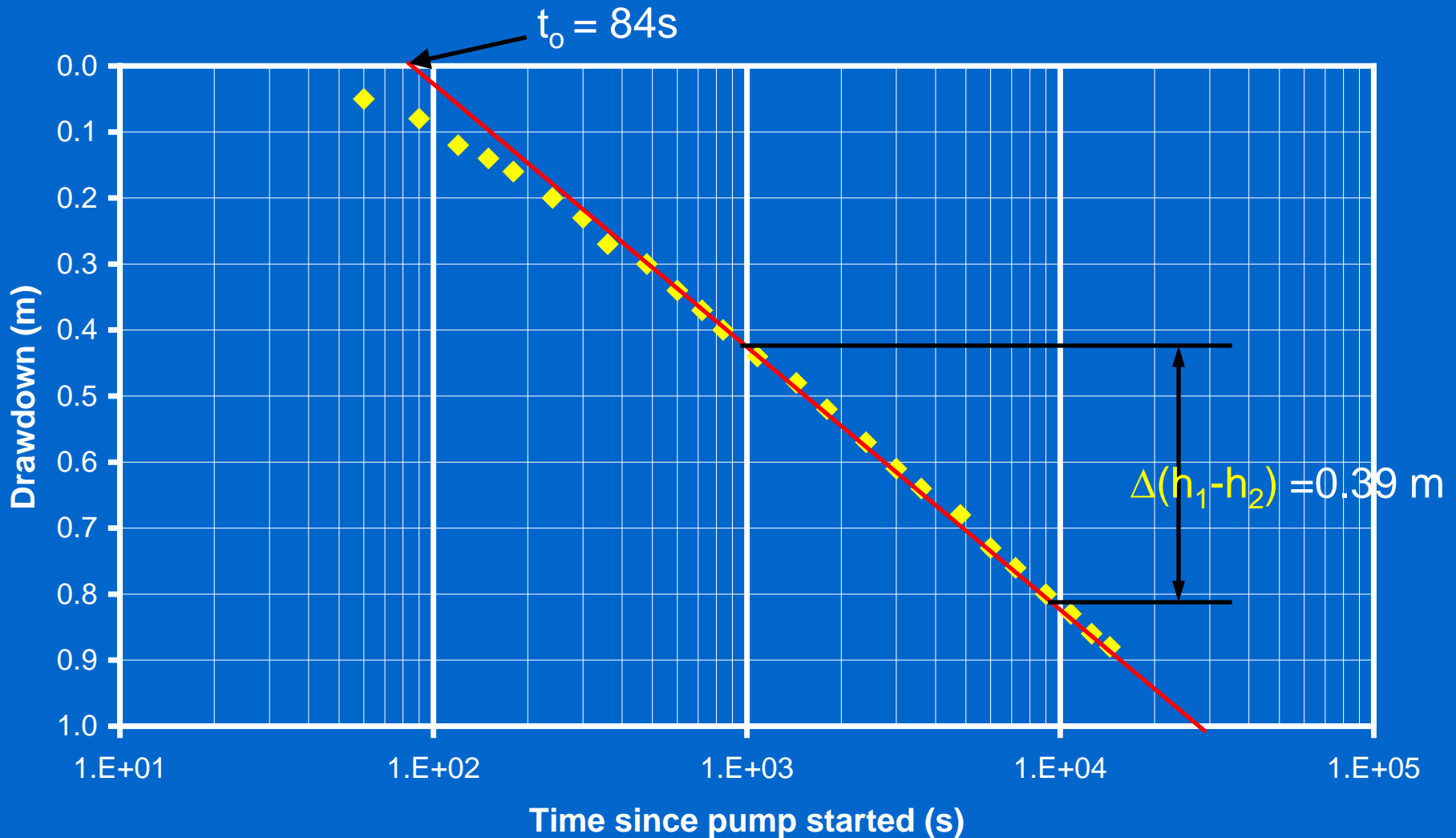
o

$$S = 2.25 T t_0 / r^2$$

Cooper-Jacob : Log(t) vs s

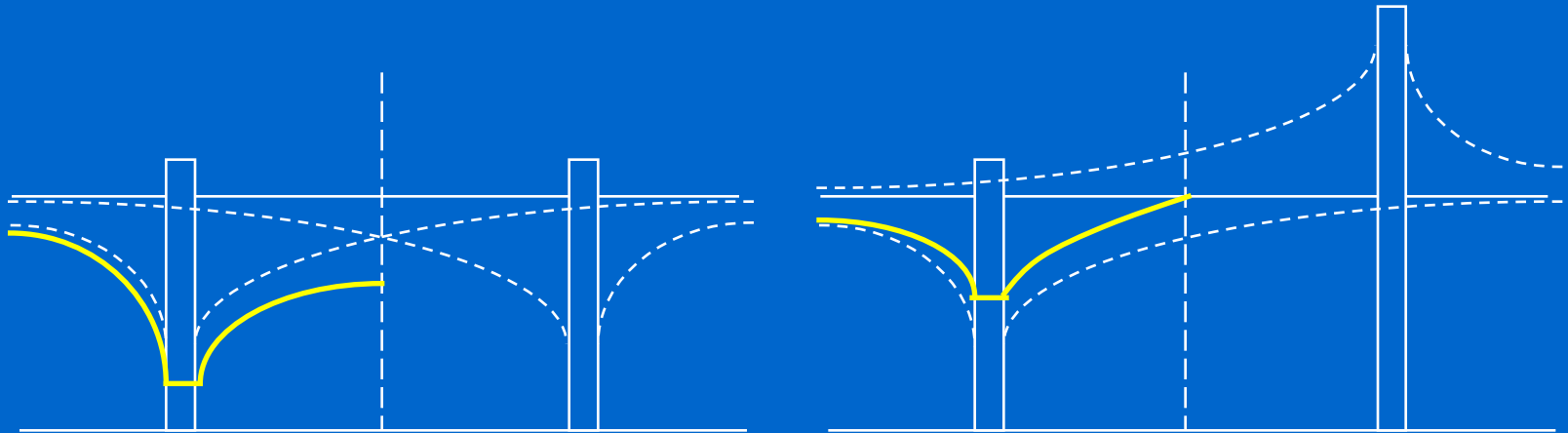


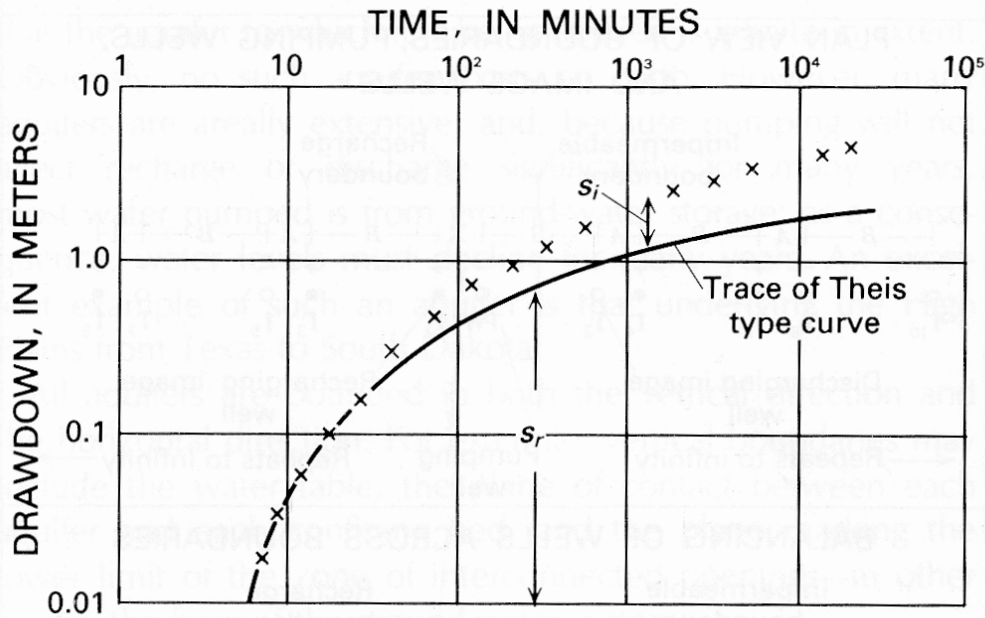
Cooper-Jacob: Log(t) vs s



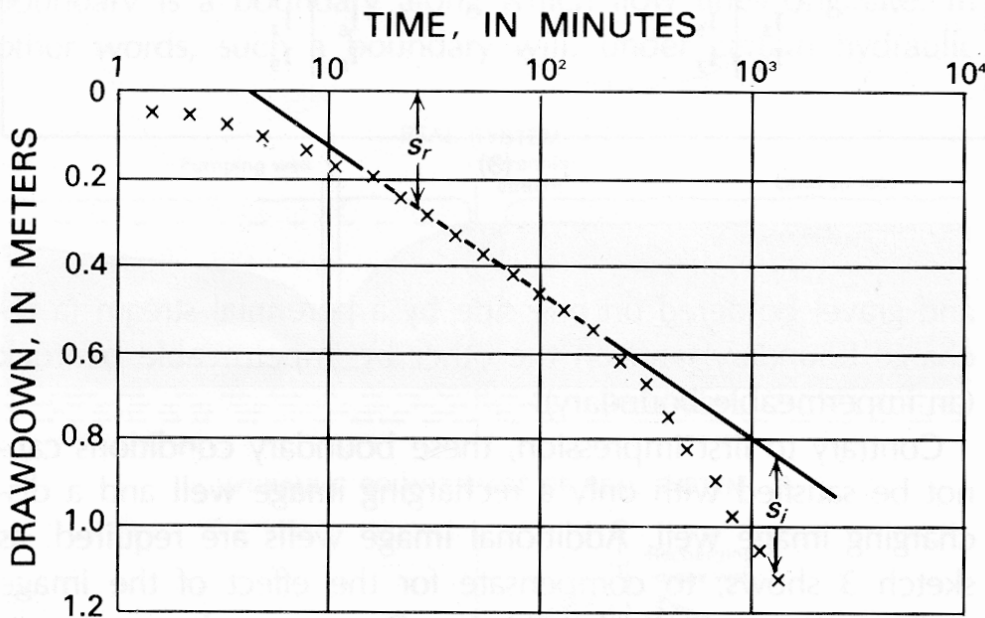
Approssimazione logaritmica

- Usando l'approssimazione logaritmica di Cooper-Jacob è applicabile solo con $u < 0.05$ per ogni r

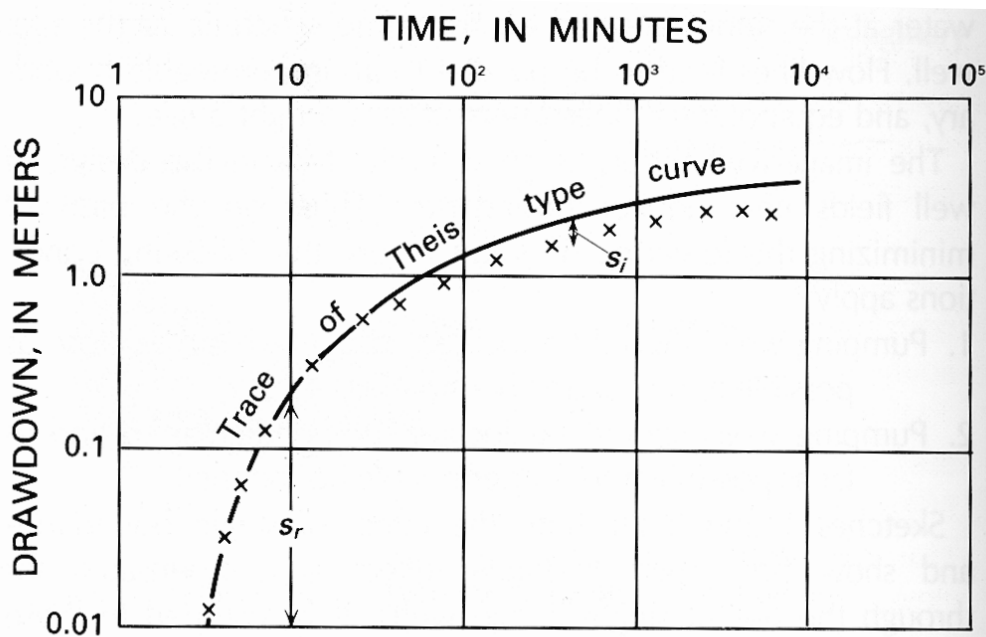




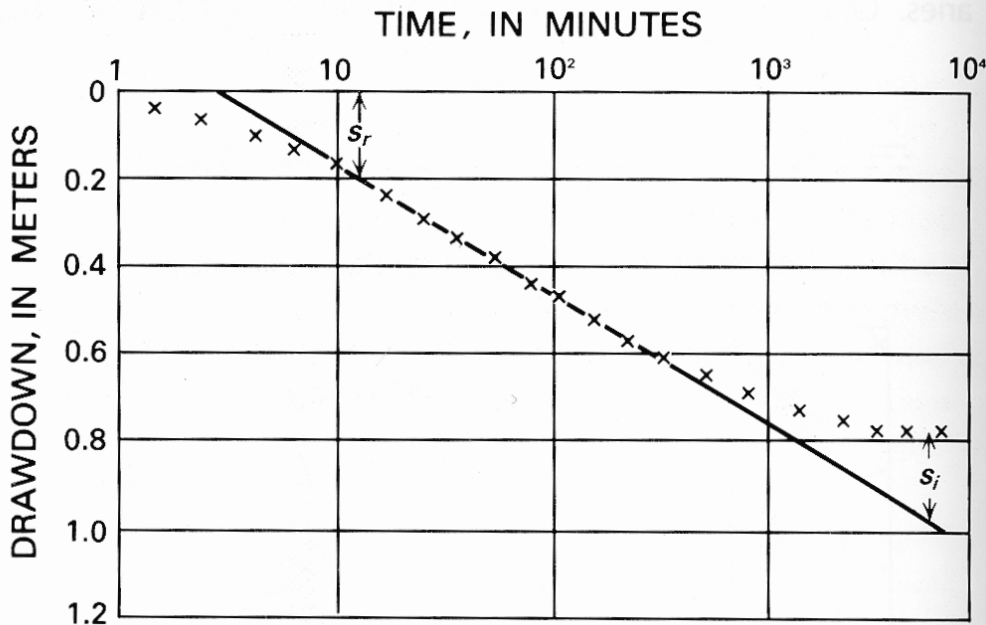
(1)



**LIMITE
DI
PERMEABILITÀ**
L'abbassamento nel
tempo devia dalla
curva tipo; vi è più
abbassamento di
quanto previsto dalla
teoria



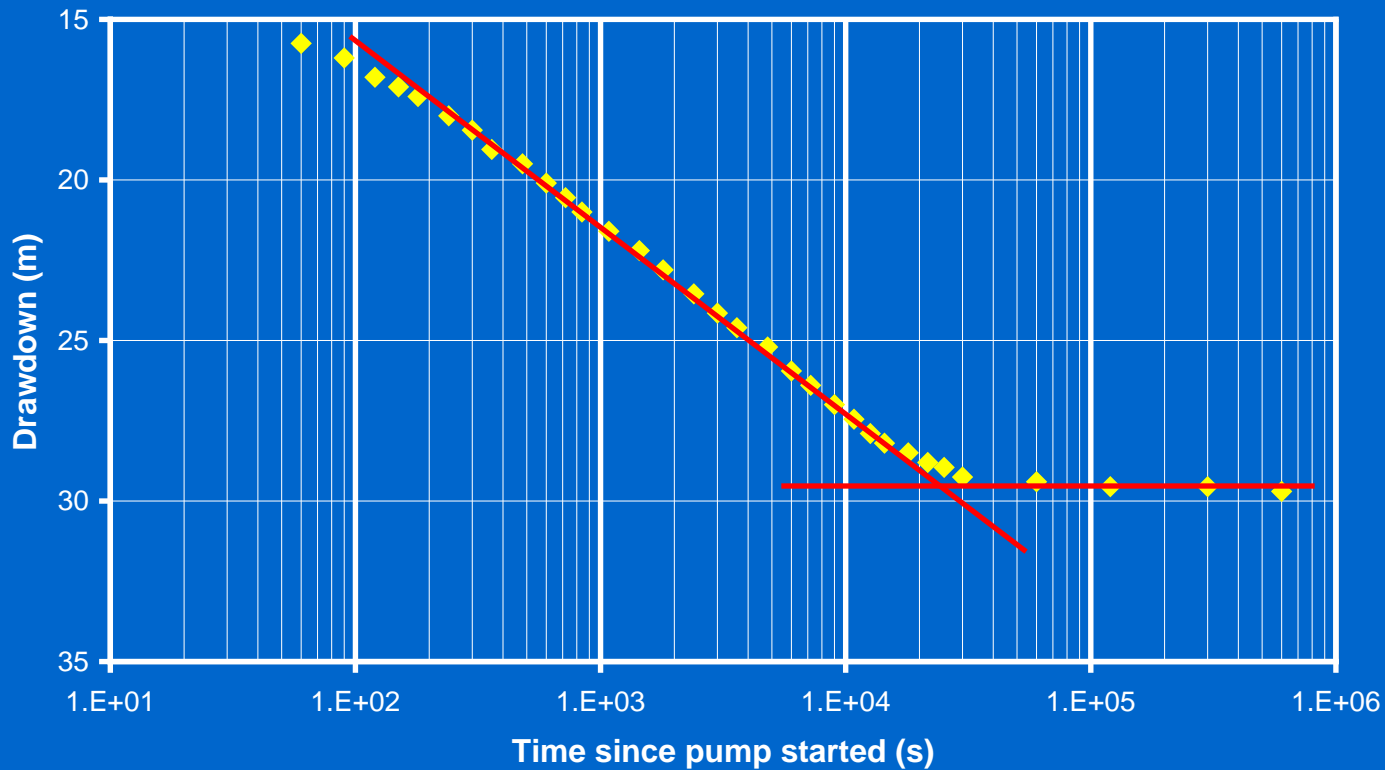
(3)



(4)

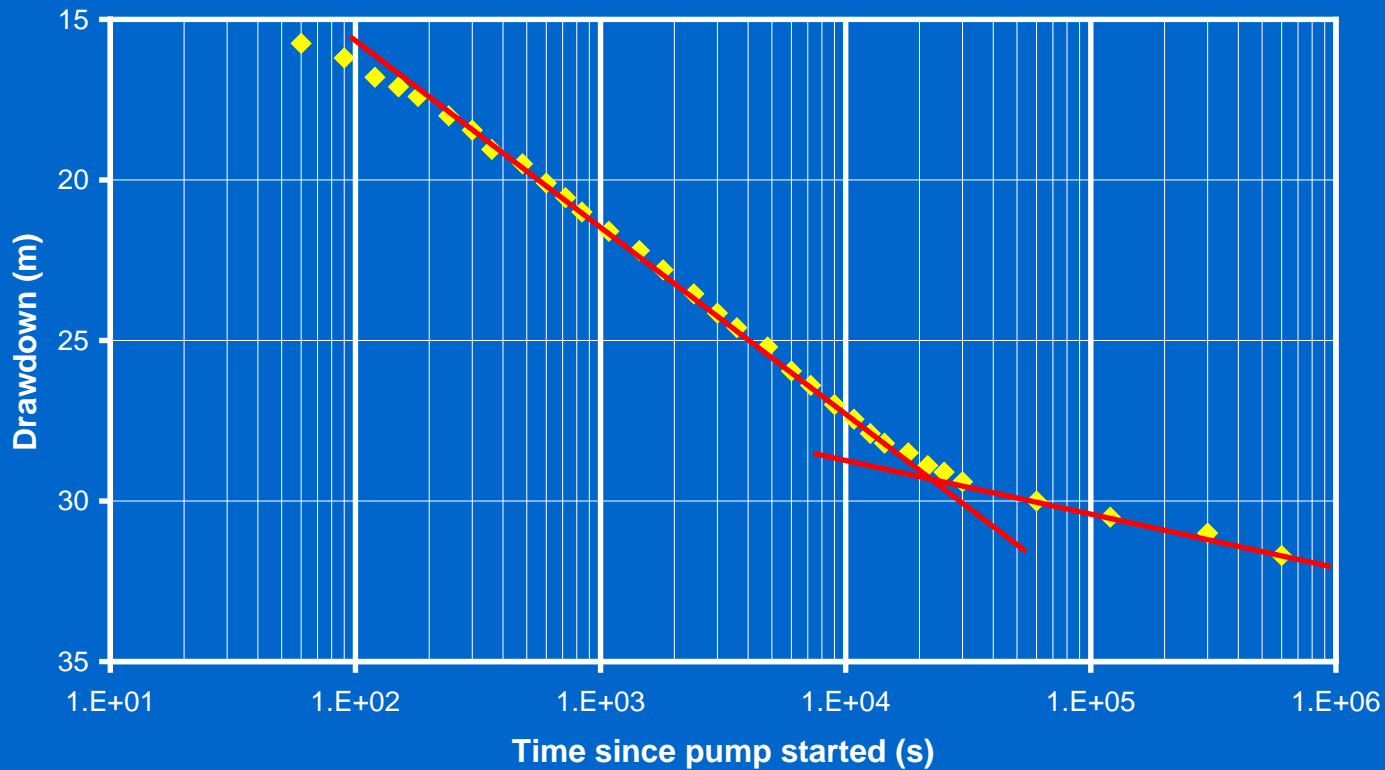
**LIMITE
DI
ALIMENTAZIONE**
L'abbassamento nel
tempo devia dalla
curva tipo; vi è meno
abbassamento di
quanto previsto dalla
teoria

Limite di ricarica : Ricarica > Portata pozzo



L'alimentazione determina un appiattimento della pendenza della curva log(tempo)/abbassamento nel momento in cui la ricarica, nella zona di influenza del pompaggio, bilancia il pompaggio. Il metodo di Cooper-Jacob si applica alla prima parte della curva

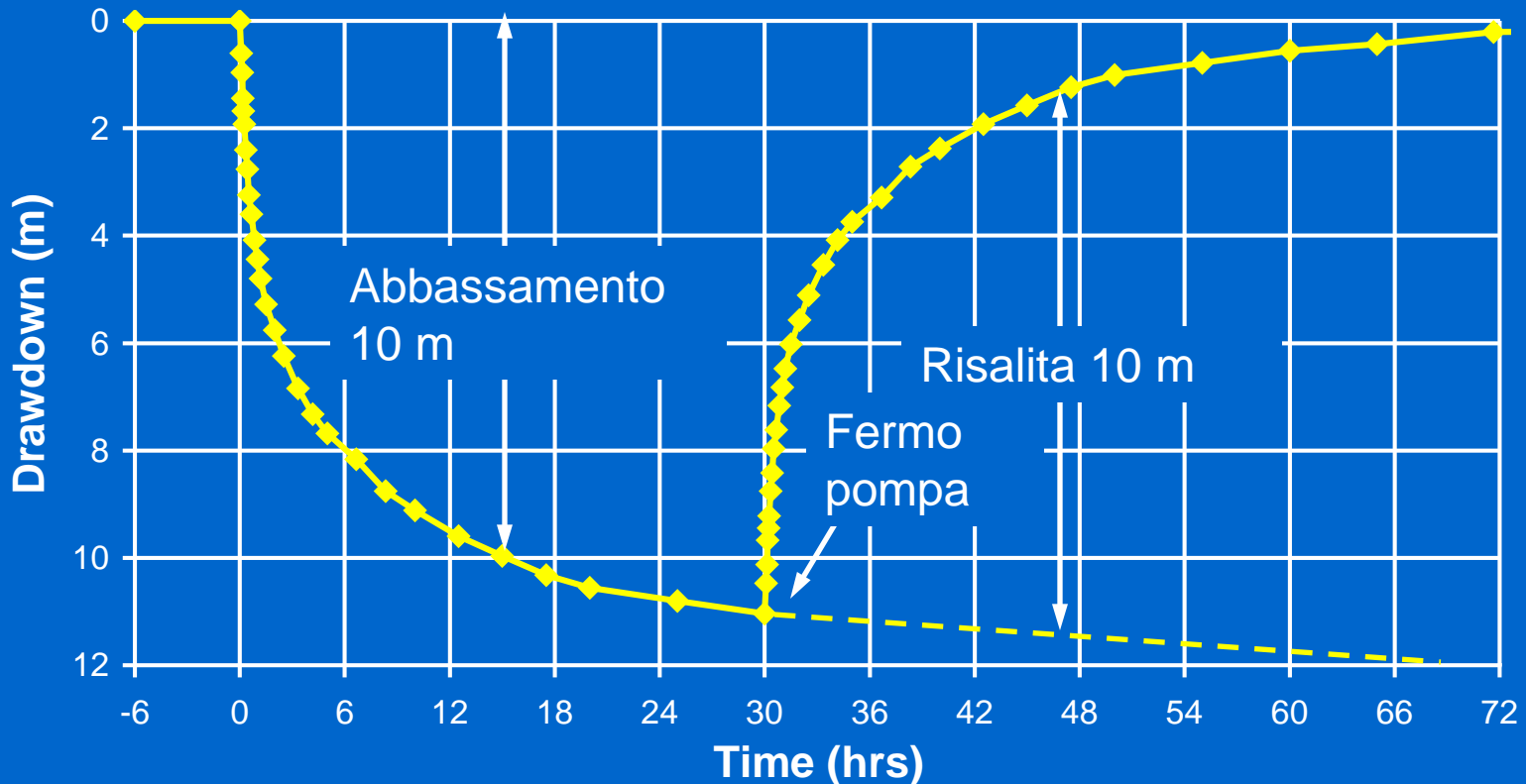
Limite di ricarica : Ricarica < Portata pozzo



Se la alimentazione è insufficiente per bilanciare lo scarico, c'è una diminuzione di pendenza ma non fino all'orizzontalità e l'abbassamento continua ad aumentare, anche se ad un tasso ridotto. T ed S possono essere stimati dal primo pezzo della curva.

Metodo della risalita

Applicazione della teoria delle immagini al pozzo singolo



La curva di risalita in un diagramma bi-lineare è una immagine invertita della curva di abbassamento. La parte tratteggiata è la continuazione della curva di pompaggio.

Metodo della risalita

- L'abbassamento (s) per un pozzo in pompaggio a portata costante (Q) per un periodo (t) è dato da:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{where } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

- Gli effetti della risalita possono essere ottenuti sovrapponendo effetti di un pozzo in pompaggio a quelli di un pozzo ricarica.
- L'abbassamento (s_r) per un pozzo di ricarica a portata costante ($-Q$) per un periodo ($t' = t - t_r$) iniziante al tempo t_r è dato da:

$$s' = \frac{-Q}{4\pi T} W(u') \quad \text{dove } u' = \frac{r^2 S}{4Tt'}$$

- L'abbassamento residuo totale per $t > t_r$ è:

$$s_r = s + s' = \frac{Q}{4\pi T} (W(u) - W(u'))$$

Metodo della Risalita

- L'abbassamento residuo totale per $t > t_r$ è:

$$s_r = s + s' = \frac{Q}{4\pi T} (W(u) - W(u'))$$

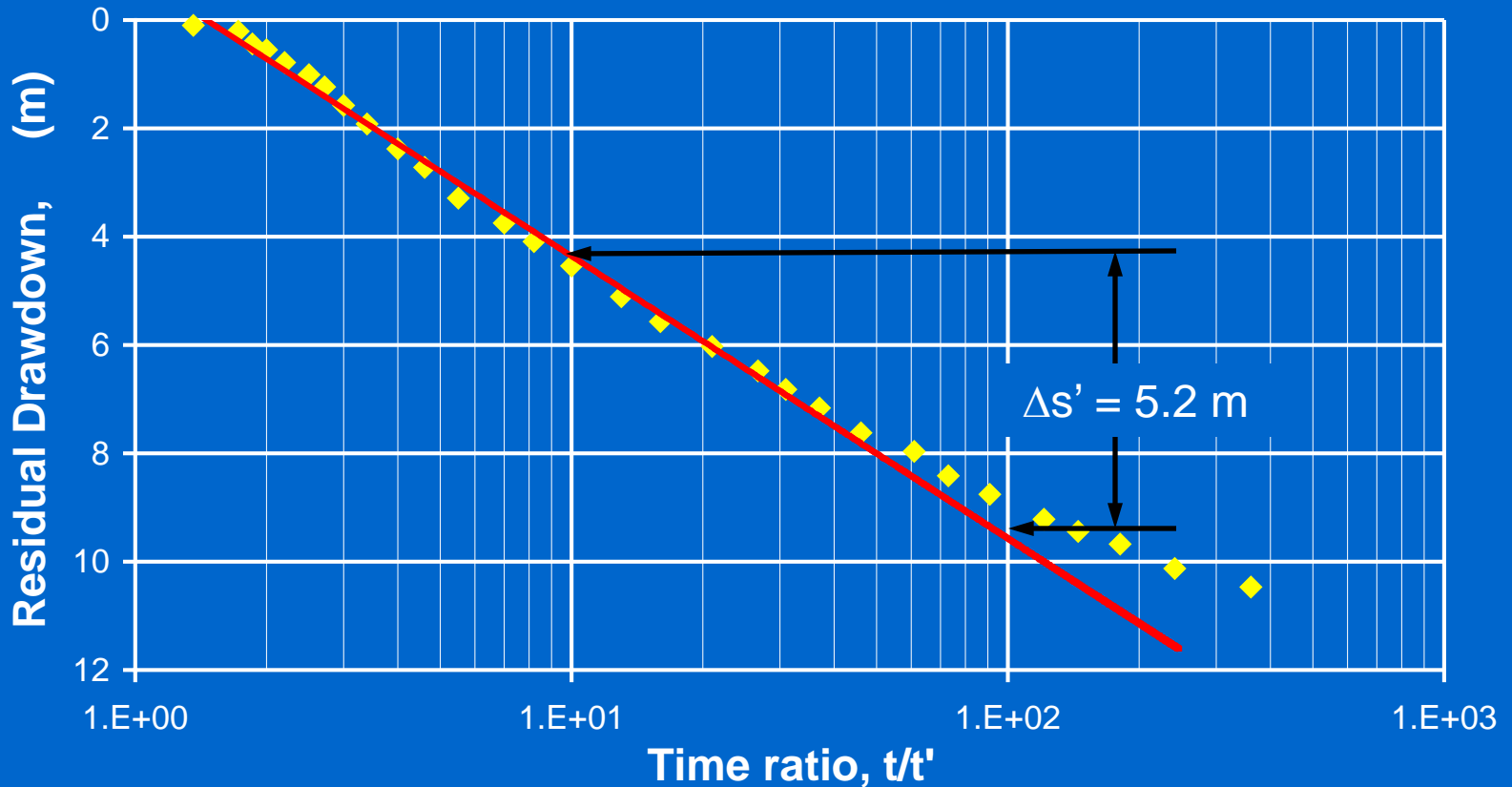
- L'approssimazione di Cooper-Jacob viene applicata:

$$s_r = s + s' = \frac{Q}{4\pi T} (\ln(2.25Tt) - \ln(2.25Tt'))$$

- Una semplificazione fornisce l'abbassamento residuo:

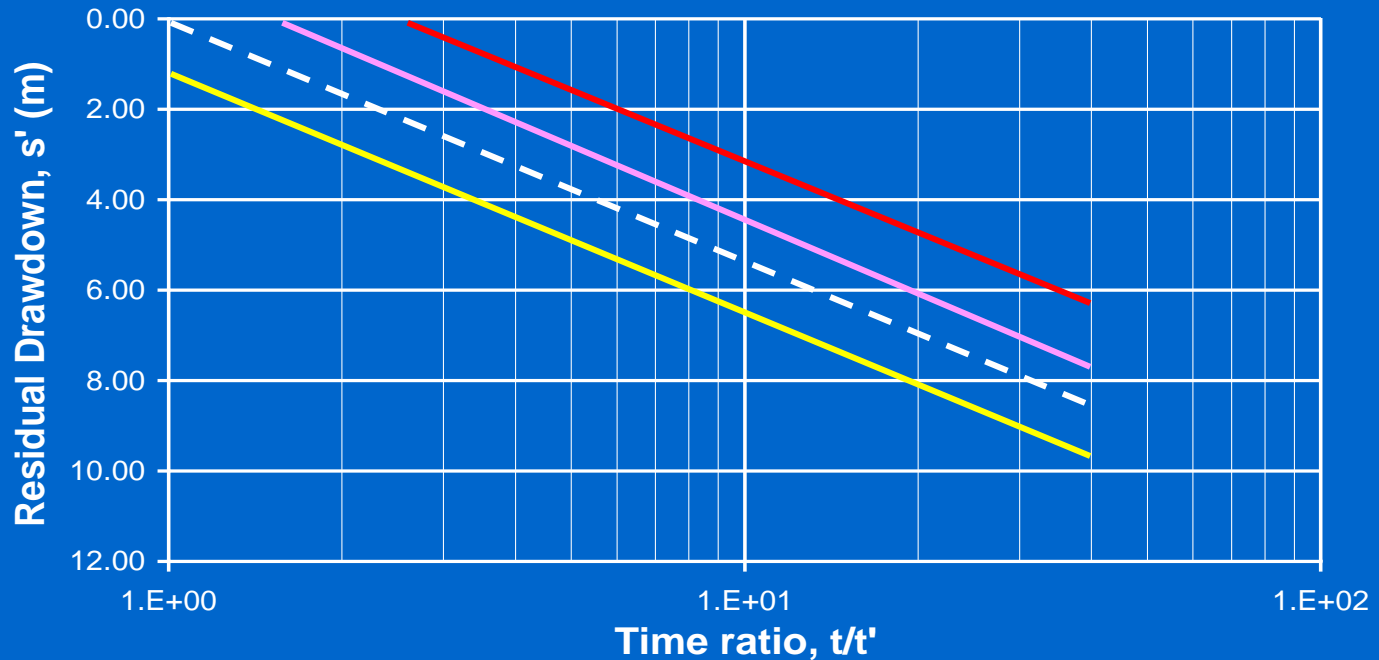
$$s_r = s + s' = \frac{Q}{4\pi T} \ln(t)$$

Tempo-Abbassamento residuo



T può essere calcolata da un grafico log(rapporto dei tempi)-abbassamento residuo (s_r).

Abbassamento residuo

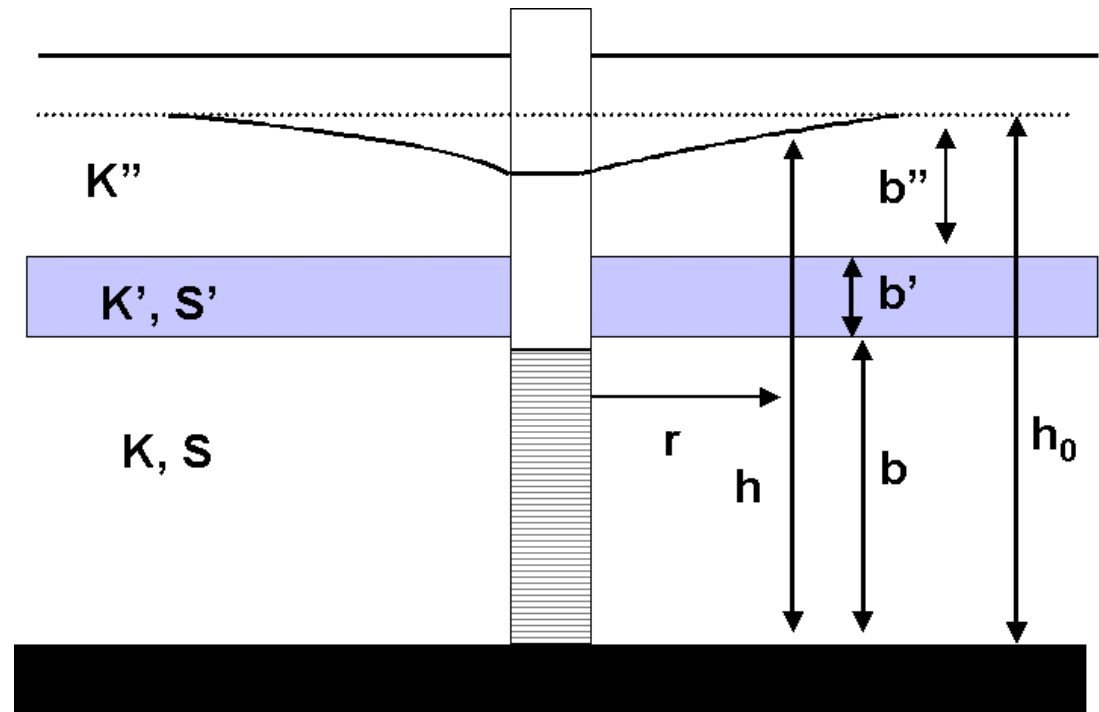


- Intercetta teorica è 1
- $\gg 1$ indica un effetto ricarica
- > 1 maggiore S per pompaggio che per risalita
- < 1 incompleta risalita – acquifero di volume finito
- $\ll 1$ incompleta risalita – acquifero di piccolo volume

Flusso in un acquifero semiconfinato (Hantush & Jacob, 1955)

Tutta l'acqua viene da immagazzinamento del confinato o drenanza

Acqua non viene da immagazzinamento acquitardo



Ipotesi aggiuntive

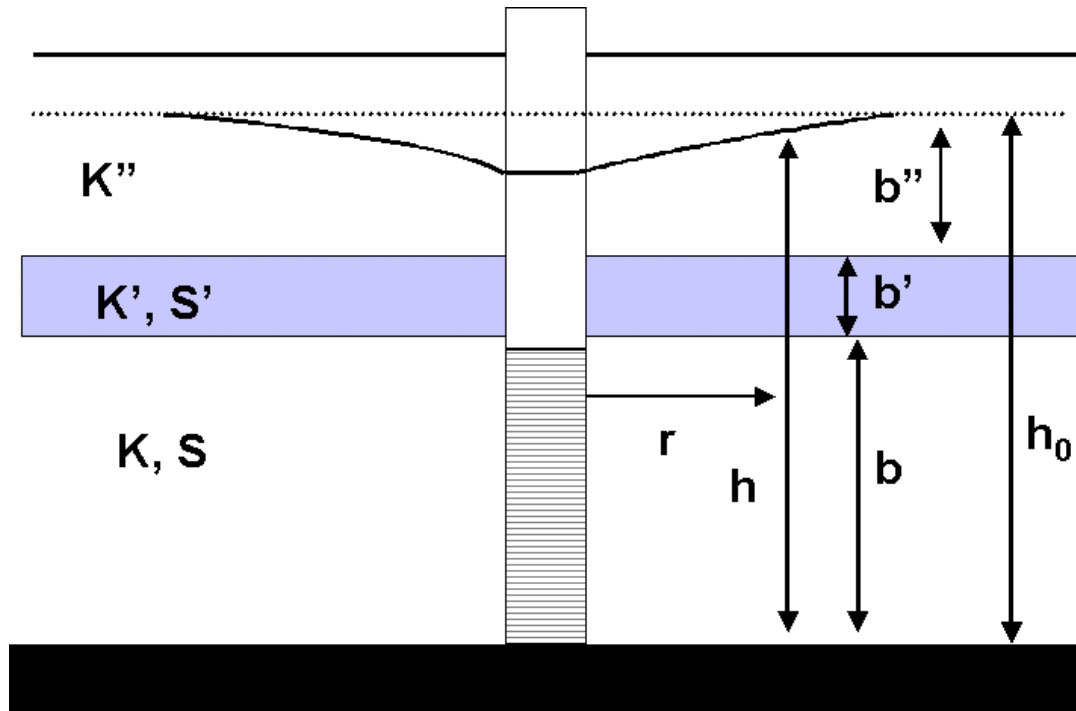
1. Acquifero con acquitardo al tetto
2. Acquifero libero sopra acquitardo.
3. Tavola d'acqua inizialmente orizzontale nell'acquifero libero.
4. Tavola d'acqua non si abbassa durante pompaggio.
5. Flusso nell'acquitardo è verticale.
6. Acquifero è compressibile.
7. Acquitardo è incompressibile.

Soluzione di Walton (Hantush Jacob)

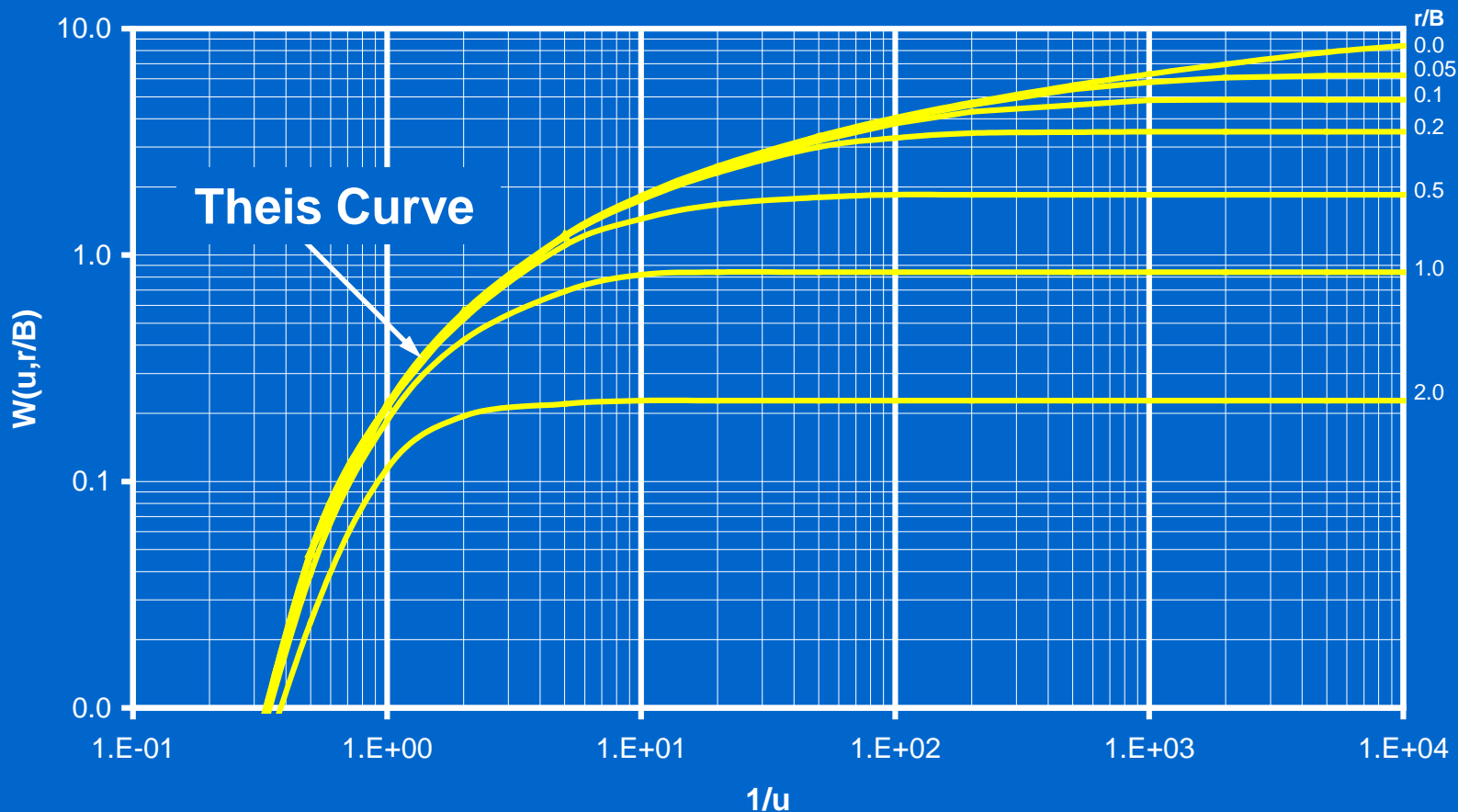
$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$B = \text{fattore di drenanza} = (Tb'/K')^{1/2}$$

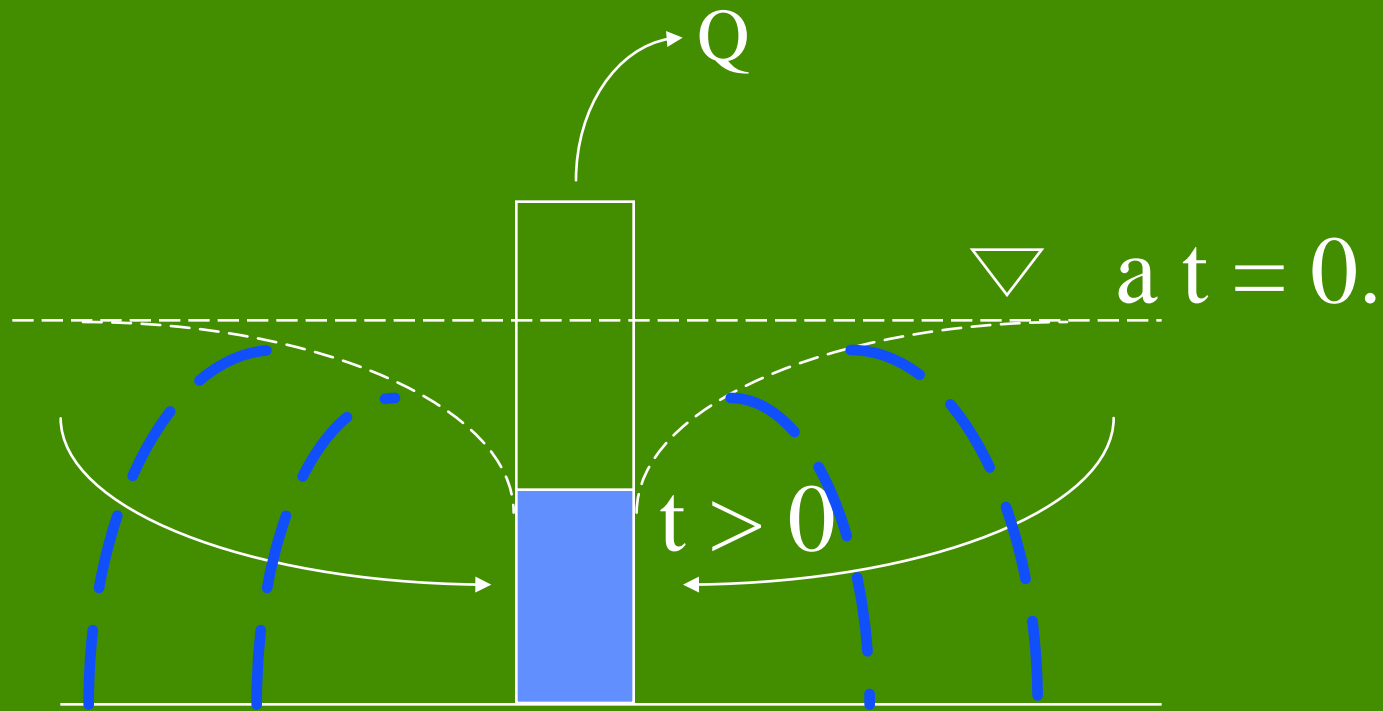


Curve tipo di Walton



Dati sono fittati in maniera simile alla curva di Theis. Il parametro r/B aumenta con la quantità della drenanza.

Pompaggio da acquifero libero

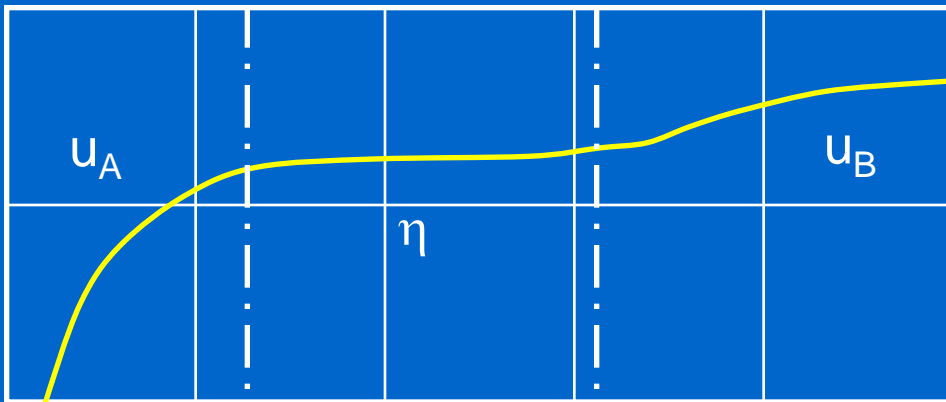


Base impermeabile

Acquiferi liberi

- La maggior parte delle soluzioni analitiche considerano acquiferi isotropi, omogenei, confinati o assumono abbassamenti modesti per acquiferi liberi
- Ci sono 3 parti distinte della curva tempi-abbassamenti in un acquifero libero:
 - Risposta precoce segue modello di Theis con immagazzinamento “elastico” confinato corrispondente alla *storativity* (bS_s); parte ripida della curva
 - A tempi intermedi risponde come un acquifero semiconfinato con flusso verticale nelle vicinanze del pozzo in pompaggio e con rilascio di acqua immagazzinata controllata dal rapporto K_h/K_v ; parte piatta della curva
 - A tempi lunghi la risposta segue il modello di Theis con drenaggio per gravità fornendo acqua dalla “*specific yield*” (S_y); parte più ripida della seconda

Risposta a drenaggio ritardato



- La risposta non confinata è complessa; modelli analitici sviluppati da Boulton, Dagan, Streltsova, Rushton e Neuman.
- Neuman (1975) definisce una funzione del pozzo $W(u_A, u_B, \eta)$ laddove ogni parametro corrisponde ad una differente fase temporale:
 - Risposta precoce controllata da $u_A = r^2 S / 4 T t$
 - Risposta intermedia controllata da $\eta = r^2 K_v / K_h b^2$
 - Risposta tarda controllata da $u_B = r^2 S_y / 4 T t$

Soluzione di
Neuman (1975)
unconfined well function

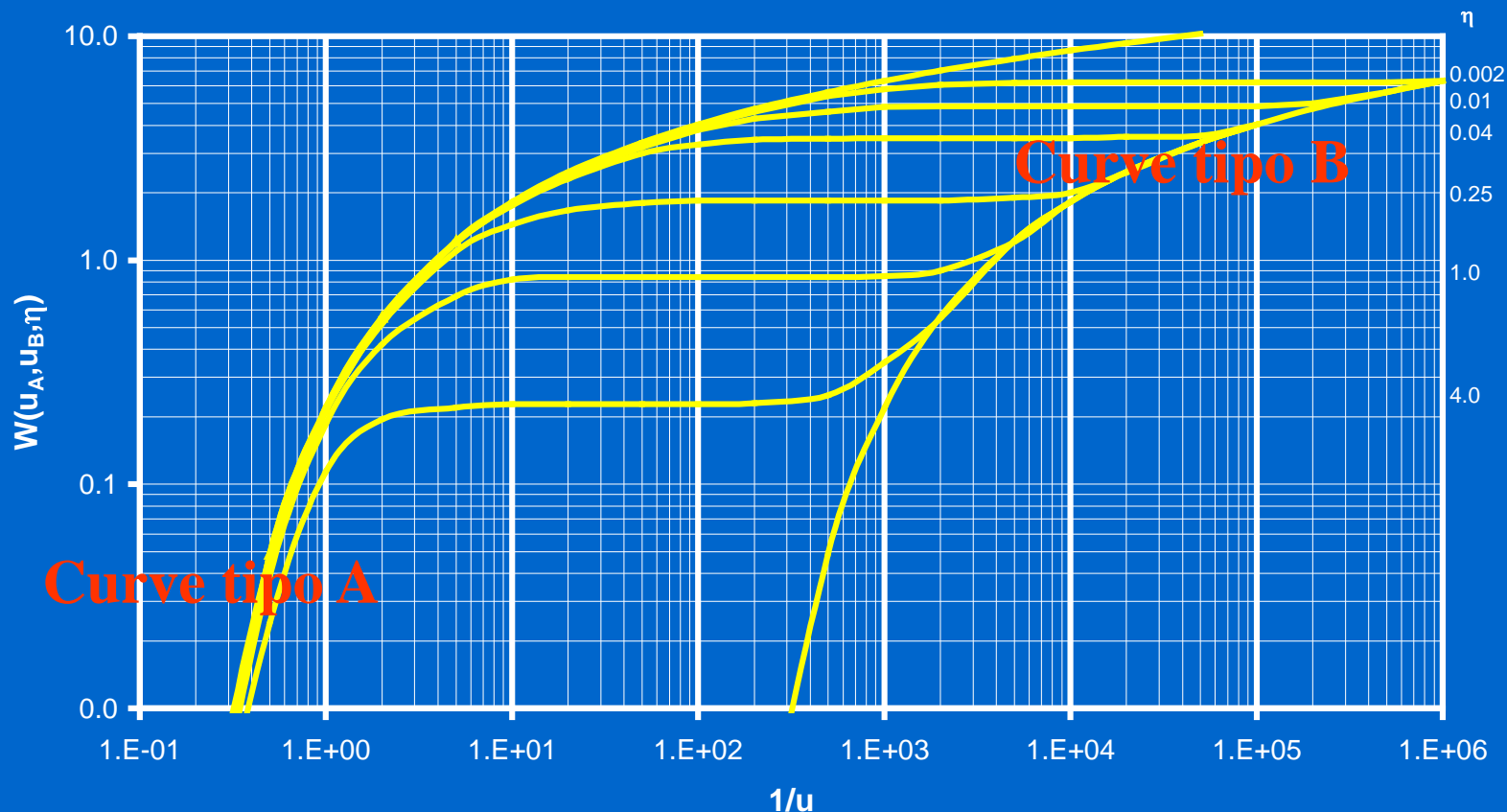
$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \eta)$$

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt}$$

$$\eta = r^2 K_v / b^2 K_h$$

Curve tipo di Neuman



- Le curve tipo di Neuman sono fittate ai dati in maniera simile a quella delle curve di Theis. Valori superiori di η indicano un maggior drenaggio per gravità

Per approfondire.....



Civita, pag. 303-319

Pranzini, capitolo 11, paragrafo 11.3