

**Corso di laurea specialistica in
Ingegneria delle Acque e della Difesa del Suolo**

Corso di

**GESTIONE delle
RISORSE IDRICHE**

a.a. 2003-2004



Prof. Luca Lanza

Dipartimento di Ingegneria Ambientale - DIAM

IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino

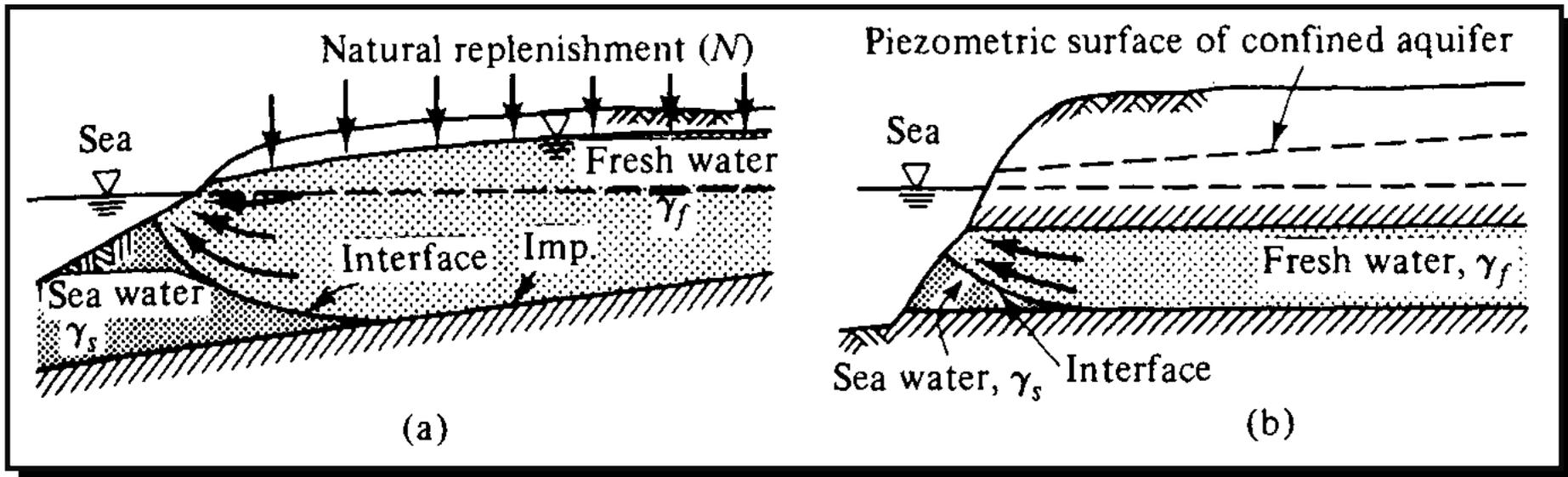
Le falde acquifere costiere costituiscono una fonte di alimentazione importante. Le zone costiere sono anche intensamente urbanizzate, il che rende più acuta la pressione ambientale.

Tuttavia, in prossimità della costa – dove avviene il contatto tra l'acqua dolce dell'acquifero e l'acqua salata del mare – sono necessarie attenzioni speciali ed opportune tecniche di gestione.

Lo schema dell'interfaccia

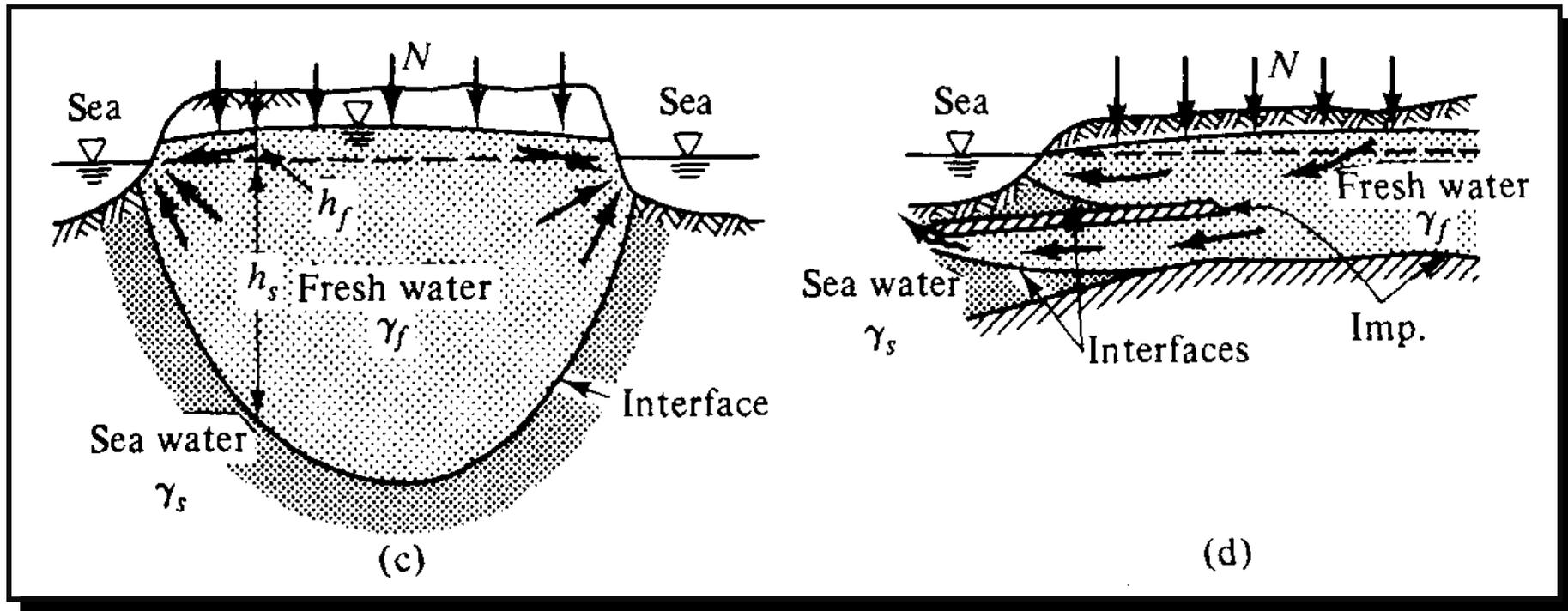
A causa della presenza di acqua salata all'interno dell'acquifero sotto al livello del mare, si viene a creare una zona di contatto tra

- l'acqua dolce più leggera che scorre verso il mare (di peso specifico γ_f);
- l'acqua salata più pesante che si incunea dal mare (di peso specifico $\gamma_s > \gamma_f$).



IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino



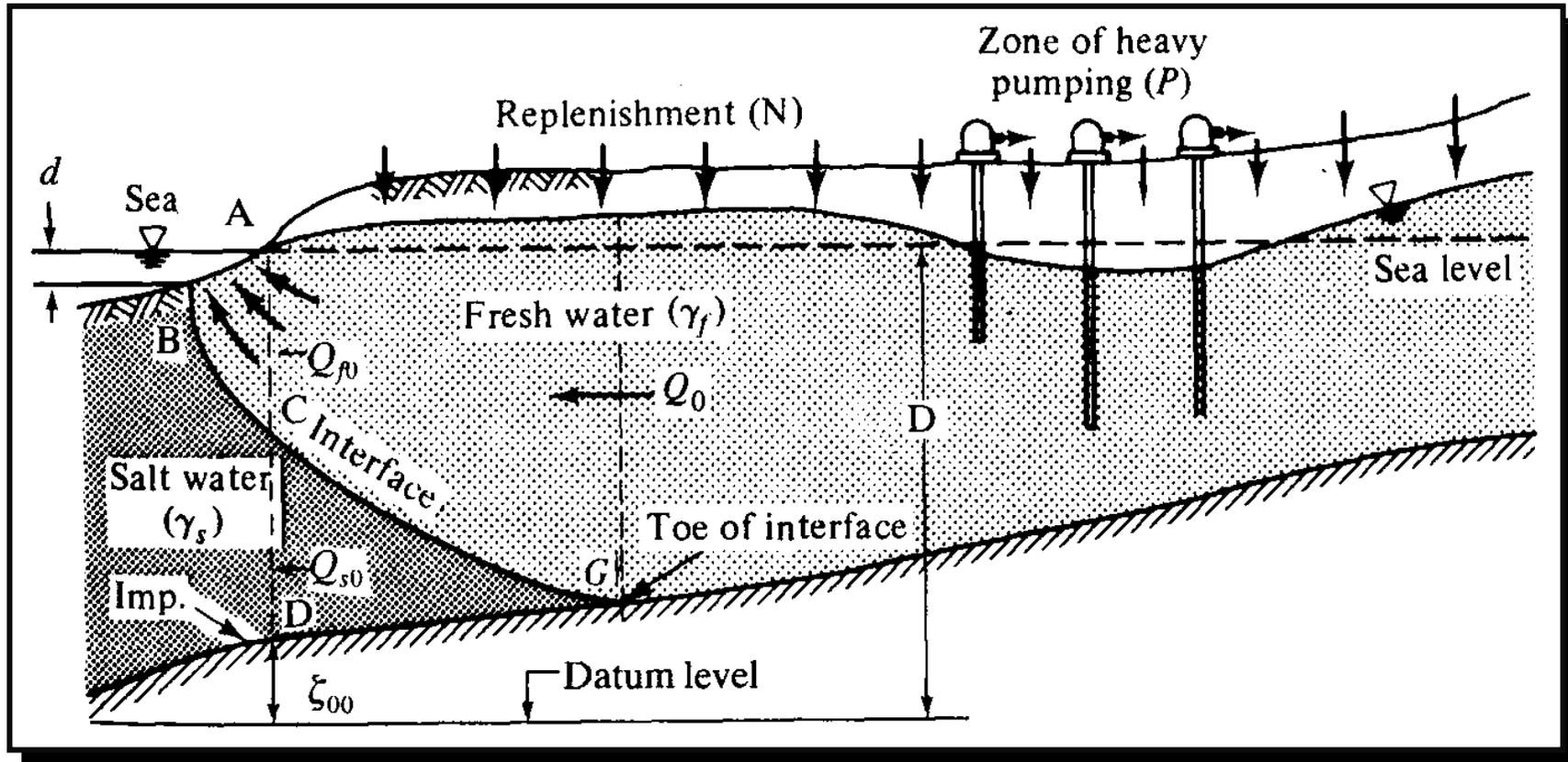
*In realtà l'acqua dolce e l'acqua salata sono fluidi miscibili e pertanto la zona di contatto tra i due assume la forma di una **zona di transizione** generata dalla dispersione idrodinamica.*

In tale zona la densità dell'acqua passa da quella dell'acqua dolce a quella dell'acqua salata.

Tuttavia, in certe condizioni, l'ampiezza della zona di transizione è piccola rispetto allo spessore dell'acquifero, e la zona di passaggio graduale dall'acqua dolce a quella salata può essere approssimata con un **fronte netto di interfaccia**.

IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino



In un certo senso tale approssimazione è analoga a quella della superficie freatica al posto della variazione graduale del contenuto di umidità del suolo.

Le osservazioni effettuate lungo la costa di Israele (Schmorak, 1967) confermano tale ipotesi, mentre in altri casi (Cooper, 1959) la zona di transizione è molto ampia, ed in tal caso l'approssimazione dell'interfaccia non è più valida.

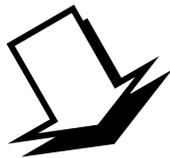
IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino

In condizioni naturali indisturbate, in un acquifero costiero si instaura una condizione di equilibrio caratterizzato da un'**interfaccia stazionaria**, al di sopra della quale l'acqua dolce scorre verso il mare.

In ogni punto dell'interfaccia la profondità e la pendenza sono determinate dalla velocità del flusso, e la continua variazione di pendenza deriva dal fatto che – avvicinandosi al mare – la portata specifica di acqua dolce tangente all'interfaccia aumenta.

Se l'emungimento dai pozzi di un acquifero costiero supera la ricarica, la superficie freatica (o la superficie piezometrica in caso di acquifero confinato) si abbassa in vicinanza della costa fino al punto che il carico piezometrico nella porzione di acqua dolce diviene inferiore a quello della porzione contigua di acqua salata.



L'interfaccia inizia ad avanzare verso l'interno fino al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio.

Questo fenomeno è detto **INTRUSIONE DEL CUNEO SALINO**.

Man mano che il cuneo salino avanza verso l'interno la zona di transizione si allarga, ma verrà comunque considerata un fronte netto in qualsiasi posizione.

Se l'interfaccia che avanza raggiunge i pozzi di emungimento, si verifica l'inquinamento dei pozzi da parte del cuneo salino.

IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino

Se un pozzo di emungimento posizionato al di sopra della superficie di interfaccia è attivo, l'acqua salata risale verso il pozzo stesso. Se il tasso di emungimento non viene controllato opportunamente l'acqua salata raggiunge il pozzo.

In realtà, a causa della zona di dispersione tra l'acqua dolce e quella salata, quest'ultima raggiunge il pozzo con concentrazioni inizialmente limitate.

Grazie alla zona di transizione l'aumento di salinità in un pozzo di emungimento serve da avvertimento nei confronti del rischio di intrusione del cuneo salino.

Il problema del cuneo salino può essere affrontato mediante le equazioni complete della dispersione-diffusione, in base alla variazione di concentrazione salina e quindi di densità dell'acqua nell'acquifero.

Tuttavia, in molti casi di interesse pratico, l'approssimazione del fronte netto di interfaccia, specialmente in combinazione con le approssimazioni di flusso essenzialmente orizzontale, consente di semplificare notevolmente la modellazione.

*Come vedremo, esiste una relazione tra la portata di acqua dolce verso il mare e l'entità dell'intrusione salina. Ciò rende il problema dell'intrusione salina essenzialmente un problema di **GESTIONE della RISORSA**, dal momento che la portata dell'acquifero verso il mare non è altro che la differenza tra il tasso di ricarica naturale dell'acquifero ed il tasso di emungimento.*

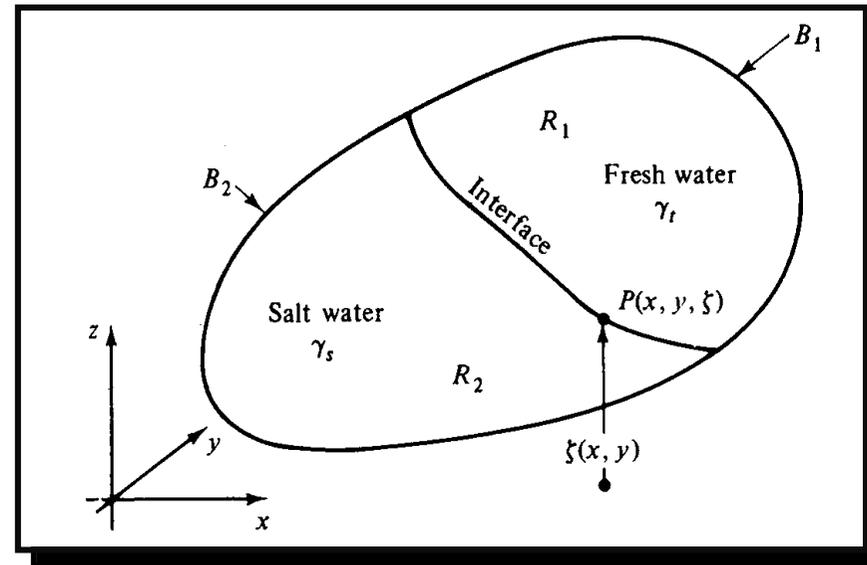
IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino

$$\nabla \cdot (\mathbf{K}_f \cdot \nabla \phi_f) = S_0 \frac{\partial \phi_f}{\partial t} \quad \text{in } R_1$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{K}_s \cdot \nabla \phi_s) = S_0 \frac{\partial \phi_s}{\partial t} \quad \text{in } R_2$$

Spesso si trascura il coefficiente di immagazzinamento S_0 poiché la variazione di immagazzinamento è qui dovuta allo spostamento dell'interfaccia.



Anche in tal caso, devono essere specificate le condizioni iniziali ed al contorno.

Oltre alle normali condizioni al contorno in questo caso sono importanti le condizioni in corrispondenza dell'interfaccia, che tuttavia è qui un'incognita del problema.

Indicando con $F(x,y,z,t) = 0$ l'equazione dell'interfaccia si ha:

- stessa portata specifica da entrambi i lati: $(q_n)_f = (q_n)_s$ su F ;
 - uguale pressione da entrambi i lati: $\gamma_f \phi_f = \gamma_s \phi_s$ su F .
- $$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{V}_f \cdot \nabla F = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{V}_s \cdot \nabla F = 0$$

Pertanto le condizioni al contorno all'interfaccia assumono la forma di due equazioni non lineari alle derivate parziali in termini di ϕ_f e ϕ_s .

Per tale ragione la derivazione completa della forma e posizione dell'interfaccia mediante la risoluzione di tale sistema di equazioni è praticamente impossibile.

IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

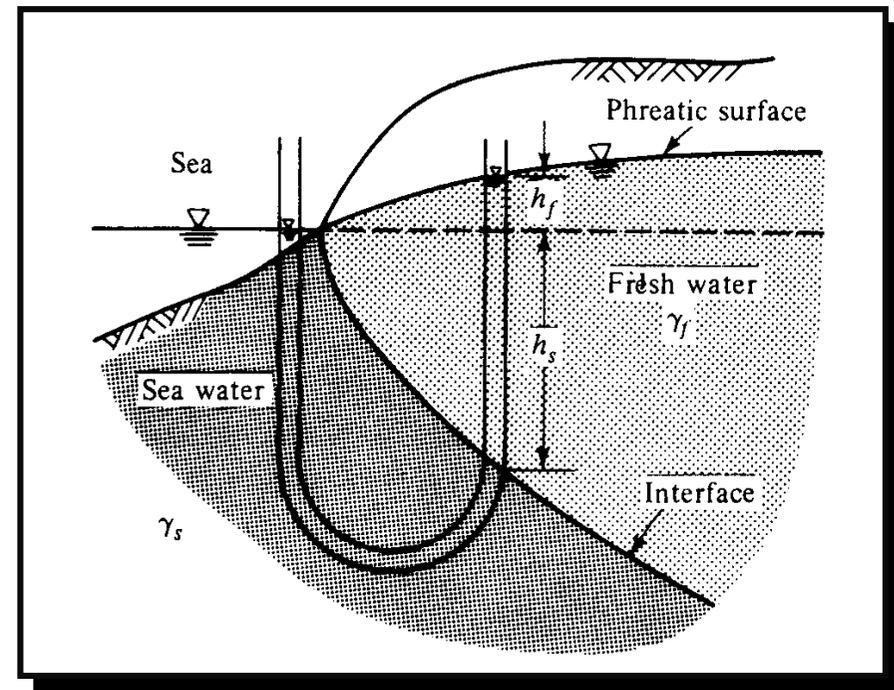
➤ L'intrusione del cuneo salino

Normalmente il problema viene risolto con il cosiddetto “**approccio idraulico**”, ovvero mediante uno schema bi-dimensionale che consente di eliminare le condizioni al contorno sull'interfaccia.

L'approssimazione di Ghyben-Herzberg

Il modello idealizzato dell'interfaccia in un acquifero costiero proposto da Ghyben-Herzberg è quello di una condizione di *equilibrio statico* con distribuzione idrostatica della pressione per l'acqua dolce e acqua salata stazionaria.

È anche possibile assumere condizioni di equilibrio dinamico, ovvero di moto permanente ma con velocità orizzontali nella regione di acqua dolce.



Ciò significa che le linee o superfici equipotenziali sono verticali, *esattamente come per l'ipotesi di Dupuit*. In tali condizioni si ha:

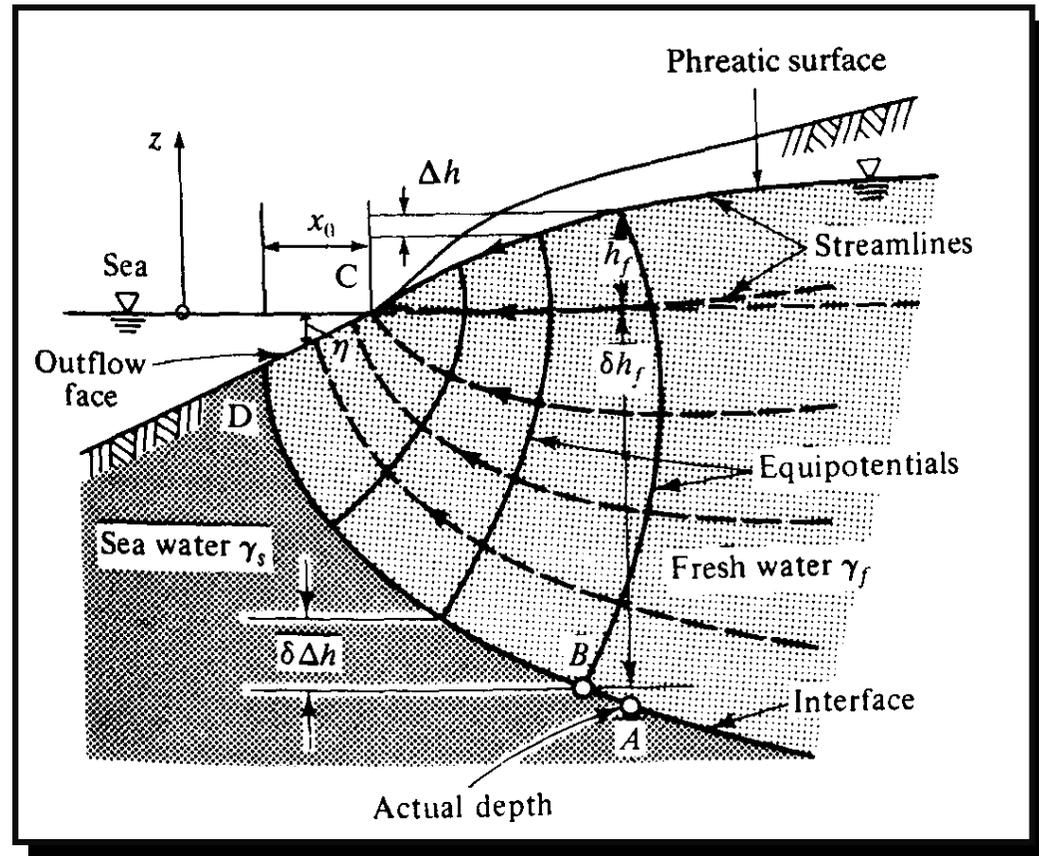
$$h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f = \delta \cdot h_f$$

IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino

Ad esempio, per $\gamma_s = 1.025 \text{ gr/cm}^3$, e $\gamma_f = 1.000 \text{ gr/cm}^3$, si ha $\delta = 40$ e quindi $h_s = 40 h_f$, ovvero a qualsiasi distanza dal mare la profondità di un'interfaccia stazionaria sarà 40 volte l'altezza della quota della superficie freatica s.l.m.

Ovviamente, avvicinandosi alla costa non è più valida l'ipotesi di flusso essenzialmente orizzontale, e le componenti verticali non possono più essere trascurate. Infatti, nella figura precedente non esiste alcuna possibilità di uscita dell'acqua dolce verso il mare.



Reali condizioni di flusso in prossimità della costa

Il punto A in figura indica l'effettiva profondità dell'interfaccia ad una certa distanza dalla costa. Il punto B indica l'intersezione dell'interfaccia con la superficie equipotenziale nell'acqua dolce. Pertanto il punto B si trova a profondità δh_f come previsto dall'approssimazione di Ghyben-Herzberg.

→ La profondità effettiva dell'interfaccia è maggiore di quella ottenuta con tale approssimazione.

IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino

Integrando tali equazioni con le condizioni $\phi = \phi_0$ per $x = 0$ (o per $h = B$), si ottiene:

$$Q_0 x = \frac{K[B^2 - h^2(x)]}{2\delta}, \quad Q_0 x = \frac{K\delta[\phi_0^2 - \phi^2]}{2} - Kd(\phi_0 - \phi)$$

che mostra come l'interfaccia abbia la forma di una parabola.

Per $x = L$ si ha $h = 0$ e $\phi = d/\delta$. Pertanto, con $\phi_0 = (B + d)/\delta$ si ottiene:

$$Q_0 L = \frac{K\phi_0}{2}(\delta\phi_0 - 2d) + \frac{Kd^2}{2\delta} = \frac{KB^2}{2\delta}$$

Che consente di determinare la lunghezza del cuneo di intrusione salina $L = KB^2/2\delta Q_0$ in funzione della portata dell'acquifero, e del carico piezometrico sull'interfaccia ϕ_0 .

L'espressione così ricavata indica che L diminuisce all'aumentare di Q_0 .

Ciò significa che l'estensione del cuneo di intrusione salina è una **variabile decisionale** nella gestione di un acquifero costiero, ed è controllabile attraverso la modifica di Q_0 o in alternativa modificando la ricarica e/o l'emungimento nella zona costiera.

IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

➤ L'intrusione del cuneo salino

In caso di acquifero non confinato con fondo orizzontale, e ricarica costante N si ha:

$$Q_0 + Nx = -K(1+\delta)h_f \frac{\partial h_f}{\partial x}$$

Integrando tale equazione tra $x = 0$, $h_f = \phi_0$, $h = B$, ed una generica x si ha:

$$\phi_0^2 - h_f^2 = \frac{2Q_0x + Nx^2}{K(1+\delta)}$$

Per $x = L$, ed $h_f = 0$ si ottiene:

$$\phi_0^2 = \frac{2Q_0L + NL^2}{K(1+\delta)}$$

Ovvero, poiché $\phi_0 = B/\delta$:

$$Q_0 = \frac{KB^2}{2L} \frac{1+\delta}{\delta^2} - \frac{NL}{2}$$

e per $N = 0$:

$$\phi_0^2 = \frac{B^2}{\delta^2} = \frac{2Q_0L}{K(1+\delta)}$$

ed anche in questo caso l'interfaccia ha la forma di una parabola e si ottiene una relazione tra L e Q_0 .

