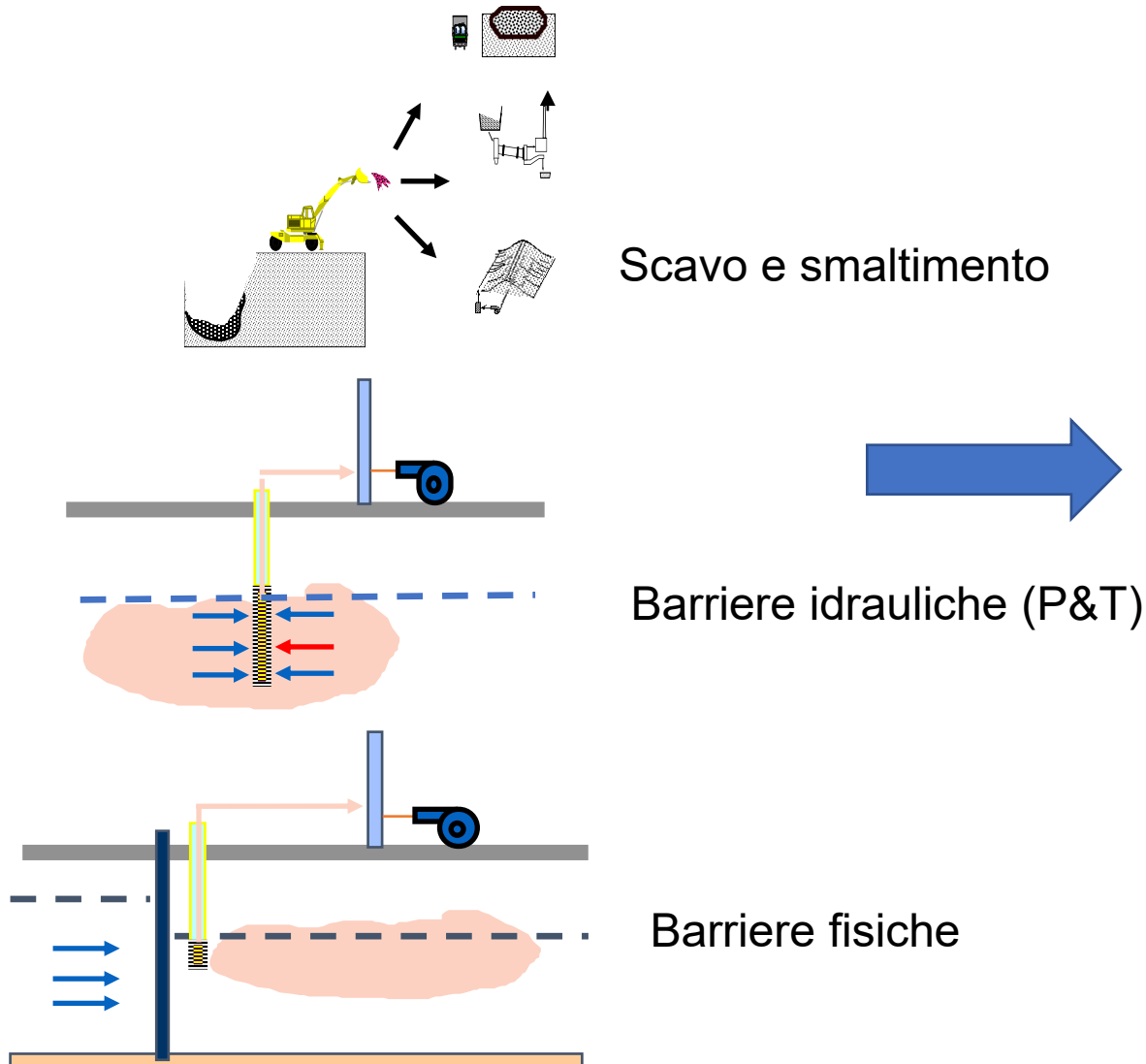


***Tradizione e innovazione tecnologica nella  
caratterizzazione e bonifica di siti contaminati  
e impronta ambientale – 2***

Giovanni Pietro Beretta  
gipiberet@alice.it

# MIGLIORAMENTO TECNOLOGICO DAGLI ANNI OTTANTA DEL SECOLO SCORSO

## *Fase 1 - Tradizione*

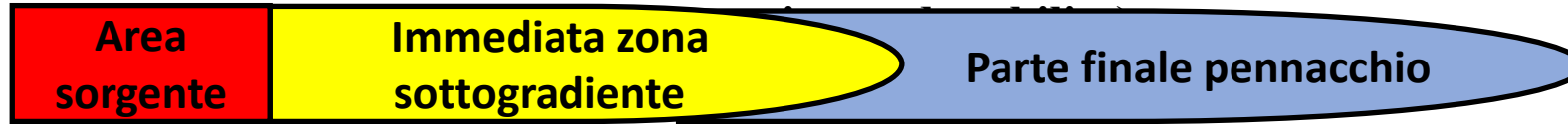


## *Fase 2 - Innovazione*

Air sparging (AS) e biosparging (BS)  
Barriere permeabili reattive (PRB)  
Biopile  
Bioslurping  
Bioventing (BV)  
Desorbimento in situ (TD) (vapore, elettrodi)  
Ferro zerovalente nanoscopico  
Fitorimediaio  
Groundwater circulation well (GCW)  
Landfarming  
Multiphase extraction (MPE)  
Ossidazione in situ (ISCO)  
Nanoparticelle  
Riduzione in situ (ISCR)  
Soil flushing (SF) e soil washing (SW)  
Soil venting (SVE)  
Solidificazione/stabilizzazione

# SEPARAZIONE TEORICA DEI VARI PFAS IN UN PENNACCHIO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Flusso idrico  
sotterraneo



*Innovazione*

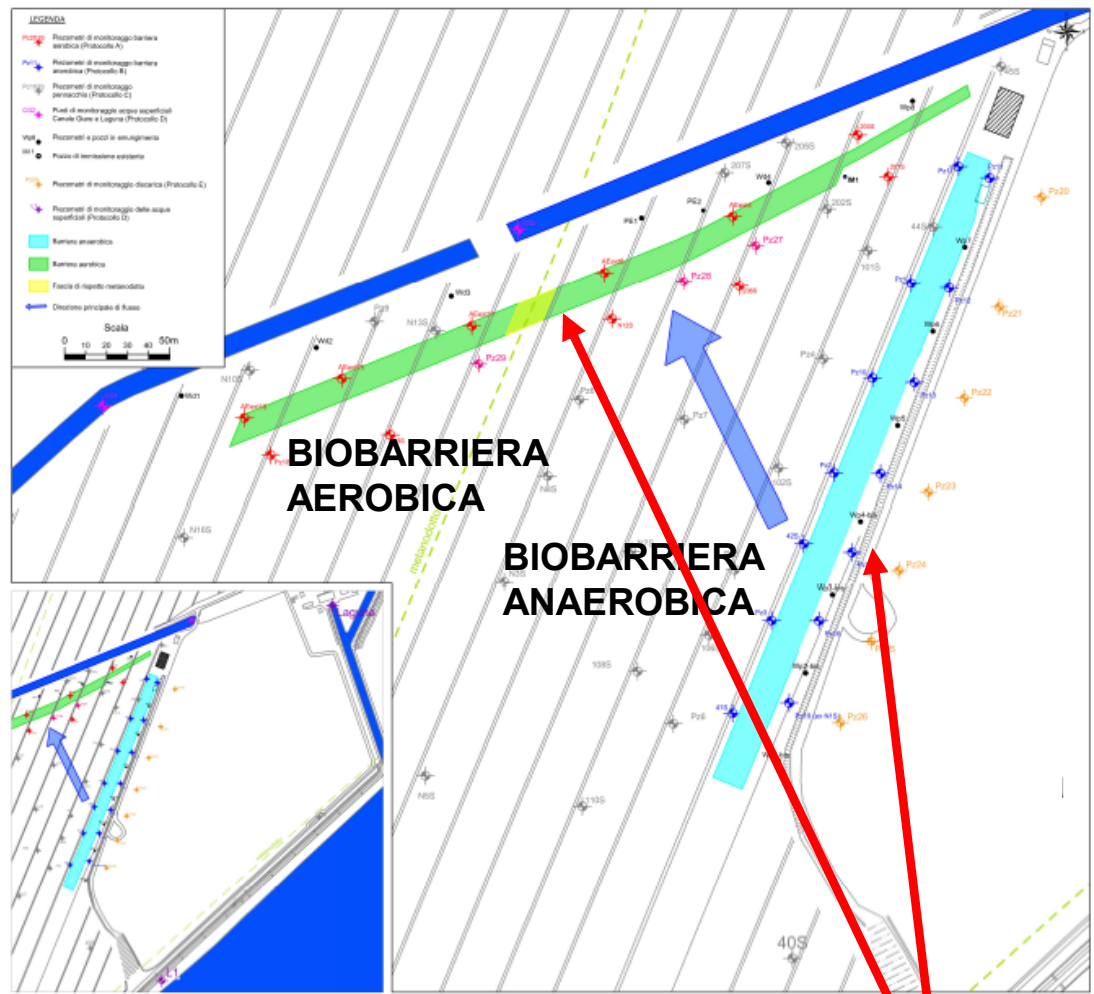
Decremento mobilità ↓

HFPO-DA <sup>-</sup>	HFPO-DA <sup>-</sup>	HFPO-DA <sup>-</sup>
PFHxA <sup>-</sup>	PFHxA <sup>-</sup>	PFHxA <sup>-</sup>
PFPeA <sup>-</sup>	PFPeA <sup>-</sup>	PFPeA <sup>-</sup>
PFBS <sup>-</sup>	PFBS <sup>-</sup>	PFBS <sup>-</sup>
PFHpA <sup>-</sup>	PFHpA <sup>-</sup>	PFHpA <sup>-</sup>
PFBA <sup>-</sup>	PFBA <sup>-</sup>	PFBA <sup>-</sup>
PFOA <sup>-</sup>	PFOA <sup>-</sup>	
PFHxS <sup>-</sup>	PFHxS <sup>-</sup>	
PFDA <sup>-</sup>	PFDA <sup>-</sup>	
PFNA <sup>-</sup>	PFNA <sup>-</sup>	
PFOS <sup>-</sup>	PFOS <sup>-</sup>	
PFHpS <sup>-</sup>	PFHpS <sup>-</sup>	
PFUnDA <sup>-</sup>		
PFDS <sup>-</sup>		
PFOSA <sup>-</sup>		
PFDoDA <sup>-</sup>		
PFTTrDA <sup>-</sup>		
PFTeDA <sup>-</sup>		

*Tradizione*

- Alto adsorbimento PFAS concentrato vicino all'area sorgente
- Basso adsorbimento PFAS all'estremità del pennacchio
- Significativa differenza dei vari PFAS nell'area sorgente rispetto alla fine del pennacchio

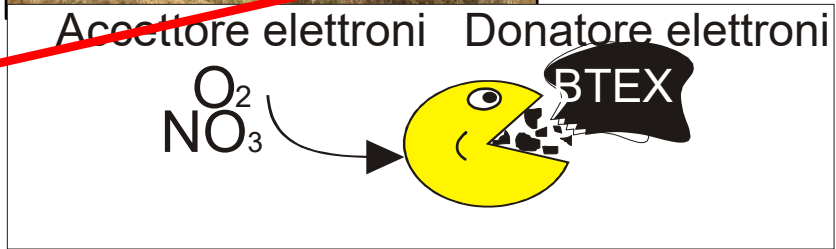
# BIORISANAMENTO IN SERIE ANAEROBICO-AEROBICO



Microrganismi anaerobici



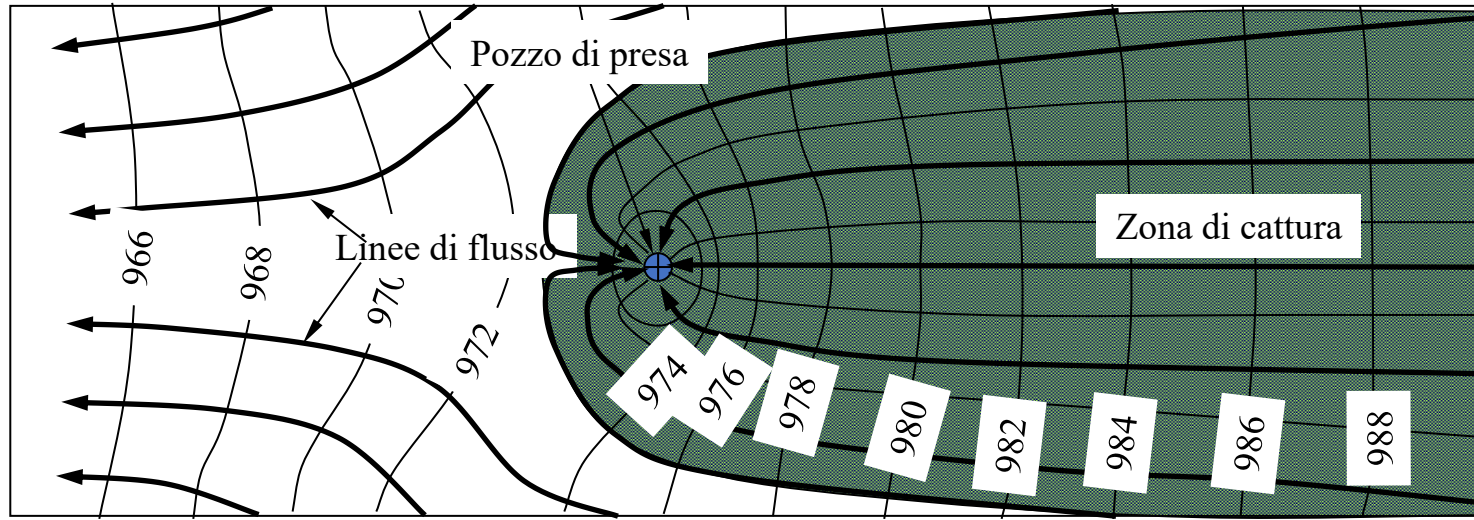
Microrganismi aerobici



Passaggio di scala spaziale: 10<sup>2</sup> - 10<sup>-8</sup> m

# BARRIERE IDRAULICHE

## Zona di cattura - Planimetria

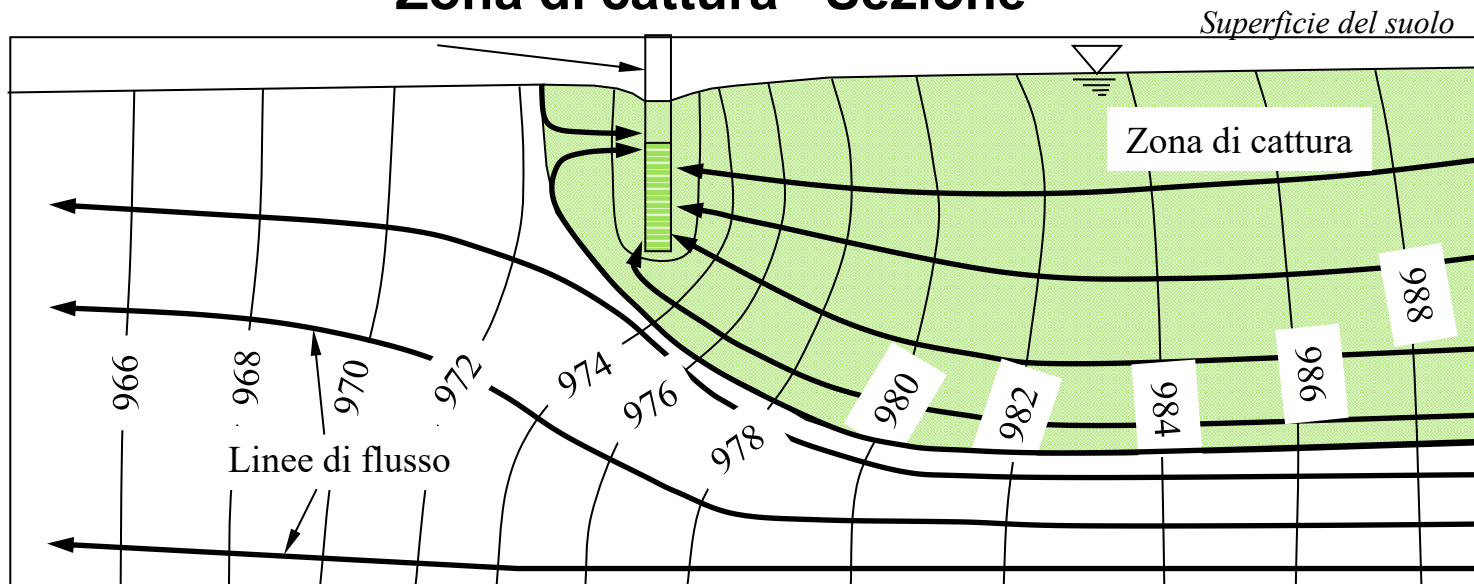


Principi di

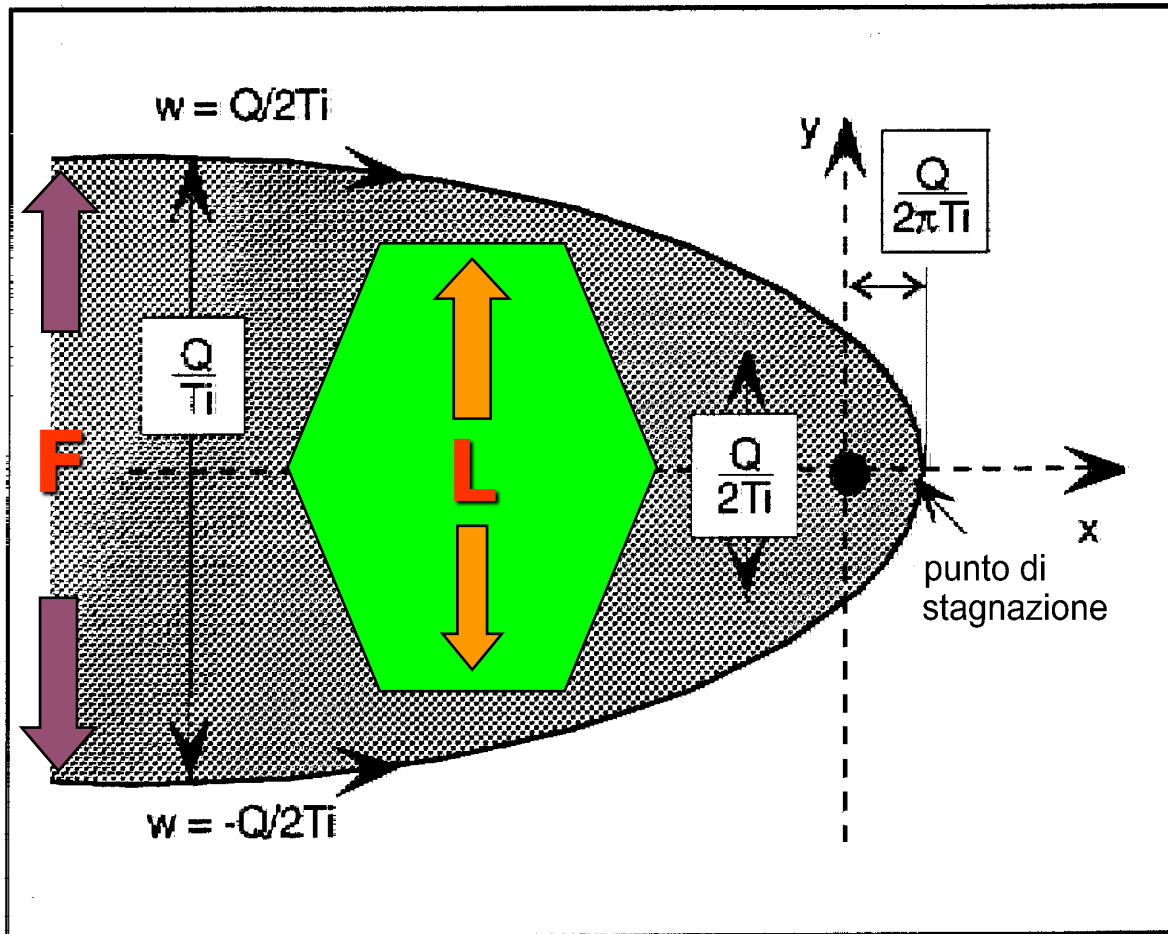
**EFFICIENZA IDRAULICA**

**EFFICACIA IDROCHIMICA**

## Zona di cattura - Sezione



# EFFICIENZA IDRAULICA



## Dimensionamento pozzo-barriera

$$E_i = L/F$$

$L$  (m) - valore della larghezza massima del fronte inquinante (o dell' **area da mettere in sicurezza**) misurata perpendicolarmente ad una linea di flusso

$F$  (m) - valore del fronte di richiamo del pozzo

\*  $L < F$  in quanto un sistema sottodimensionato non consente di estrarre completamente l'inquinante

$Q$  = portata pozzo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$T$  = trasmissività acquifero ( $\text{m/s}$ )

$i$  = gradiente idraulico

$F$  = fronte di richiamo del pozzo (m)

$L$  = larghezza area contaminata (normale alla direzione di flusso idrico sotterraneo) (m)

## EFFICACIA IDROCHIMICA

Rapporto tra la massa di inquinante rimossa in un dato intervallo di tempo e il volume di acqua estratto nello stesso tempo (Kinzelbach W., 1985)

Confrontando  $\eta^*$  con la concentrazione media  $C_m$  rilevata a  $t=0$  (prima dell'inizio del pompaggio) si ottiene l'efficacia idrochimica  $E_{id}$

$$E_{id} = \frac{\eta^*}{C_m}$$

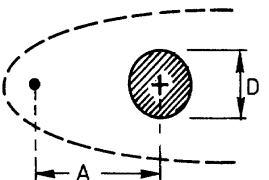
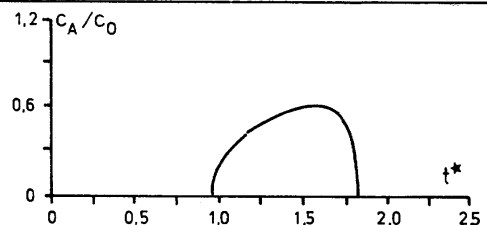
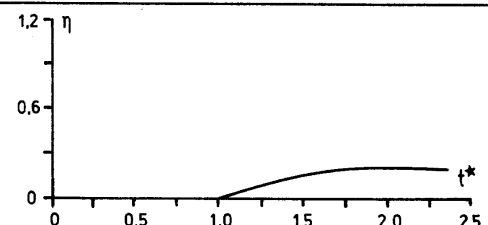
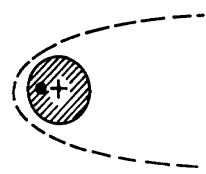
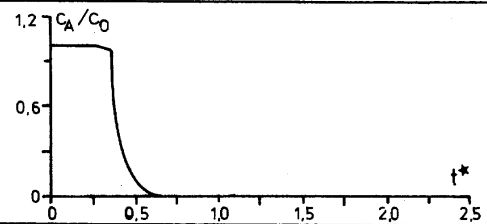
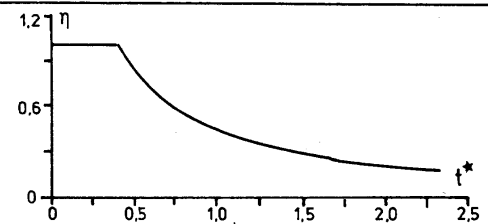
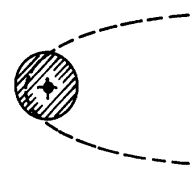
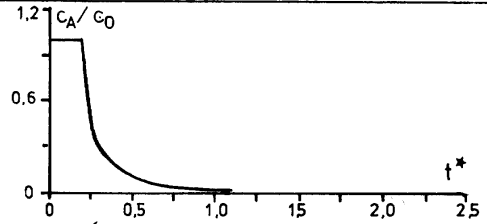
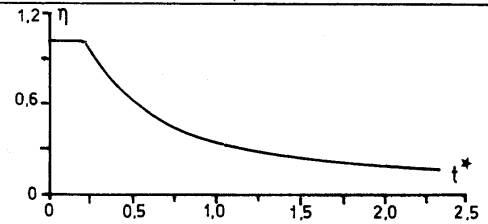

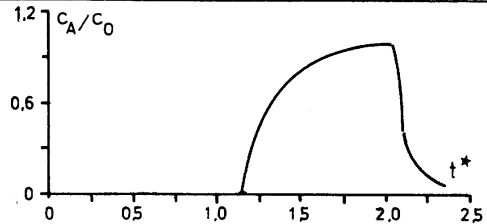
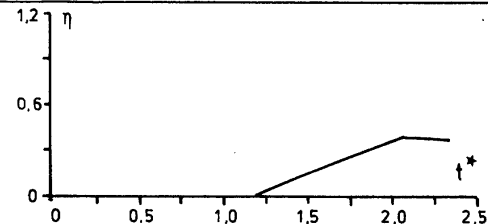
$$\eta^* = \frac{\int_0^t C_p \cdot Q \cdot dt}{\int_0^t Q \cdot dt}$$

$C_p$  (mg/L) = concentrazione inquinante nel pozzo

$\eta^*$  (mg/L) = concentrazione media inquinante nell'acqua falda estratta durante il tempo  $t$  (s)

$Q$  = portata nel pozzo ( $m^3/s$ )

# SCHEMATIZZAZIONE DELL'EFFICACIA IDROCHIMICA

A/D	Q*	configurazione	concentrazioni in arrivo	efficacia idrochimica	$t_{95}^*$	$\eta (t_{95})$
2	0,3				1,79	0,22
0,25	0,3				0,41	0,97
0	0,3				$\infty$	inquinante recuperato in modo non completo
2	0,2				$\infty$	"

• pozzo  
 + centro zona inquinata  
 ----- spartiacque sotterraneo

$$t^* = v_0 t / (n_e D f)$$

$$Q^* = Q / (2 \pi m v_0 D)$$

tempo adimensionalizzato  
 portata adimensionalizzata



# Tempo di funzionamento di un pozzo-barriera

Stima sulla base del numero di volumi dei pori (NVP) da sostituire con il pompaggio (U.S. EPA, 1988, Zheng, 1992)

$$\text{NVP} = -R \ln (C_f/C_o)$$

$R = u_w/u_i$  = fattore di ritardo

$C_f$  = concentrazione finale da raggiungere (mg/L): esempio CSC

$C_o$  = concentrazione iniziale dell'inquinante (mg/L)

# Calcolo del tempo di funzionamento di un pozzo barriera

Stima sulla base del numero di volumi dei pori (N) da sostituire con il pompaggio (U.S. EPA, 1988, Zheng, 1992)

$$N = -R \ln (C_f/C_o) \qquad VP = V \cdot n$$

VP = volume dei pori (m<sup>3</sup>)

V = Volume di acquifero interessato dal pompaggio (m<sup>3</sup>)

n = porosità efficace

R =  $u_w/u_i$  = fattore di ritardo

C<sub>f</sub> = concentrazione finale da raggiungere (mg/l) (ad esempio CSC)

C<sub>o</sub> = concentrazione iniziale (mg/l)

$$t = \frac{VP}{Q} N$$

t = tempo di funzionamento del sistema (s)

Q = portata prelevata del sistema (m<sup>3</sup>/s)

# BARRIERE VERTICALI

(da Veggi S., 2002)

## SCAVO E SOSTITUZIONE

TIPO		TERRENO	MATERIALE BARRIERA	DIMENSIONI	
				Spessore (m)	Profondità (m)
Diaframma plastico monofase		Possibili problemi in presenza di inquinati	Miscela cemento bentonite	0.4 - 1.6	100 - 170
Diaframma plastico bifase			Miscela cemento bentonite	0.4 - 1.6	40 - 70
Diaframma plastico con geomembrana			Miscela cemento bentonite, geomembrana	0.4 - 1.6	20 - 50
Diaframma formato da pali secanti		Nessuna restrizione se i pali sono eseguiti con rivestimento	Miscela cemento bentonite o calcestruzzo	0.4 - 1.5	20 - 40

## SPIAZZAMENTO E SOSTITUZIONE

TIPO		TERRENO	MATERIALE BARRIERA	DIMENSIONI	
				Spessore (m)	Profondità (m)
Diaframma sottile		Terreni dove è possibile infiggere elementi per battitura e/o vibrazione	Miscela cemento bentonite con inerti o additivi	0.05 - 0.3	10 - 35
Diaframma sottile con geomembrana			Miscela cemento bentonite, geomembrana (*)	(*)/ 0.002	10 - 40
Palancole			Acciaio	≈ 0.02	20 - 30
Diaframma con elementi prefabbricati infissi (con giunti)			Calcestruzzo	/ 0.4	15 - 25

## RIDUZIONE PERMEABILITA' TERRENO IN SITO

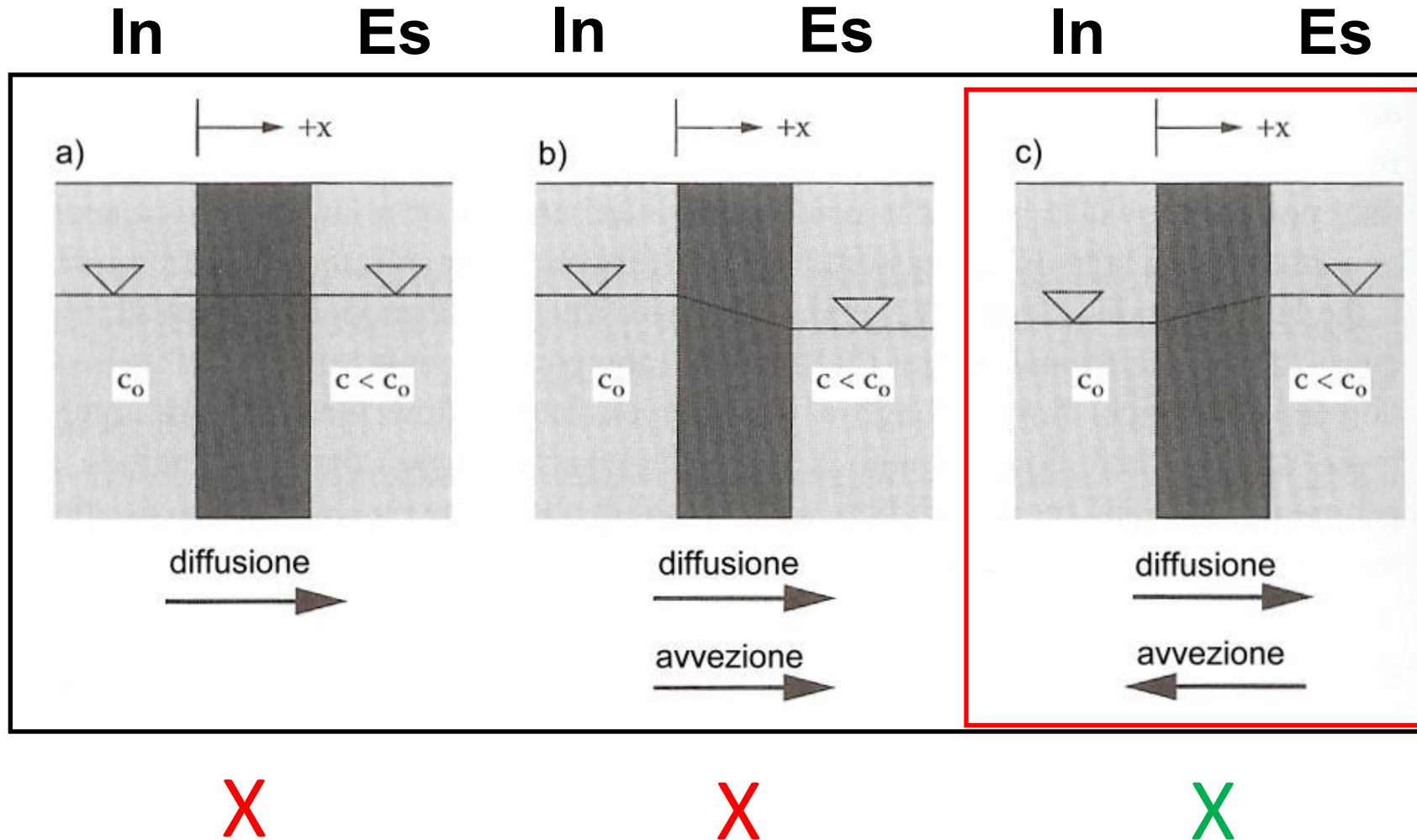
TIPO		TERRENO	MATERIALE BARRIERA	DIMENSIONI	
				Spessore (m)	Profondità (m)
Iniezioni		Terreni iniettabili	Miscela cemento bentonite, silicati, miscele cementizie con/senza filler	1.5 - 2.5	20 - 80
Jet - grouting		Possibile esecuzione anche in terreni fini	Miscele bentonitiche con cemento	0.15 - 0.30 0.4 - 2.5	20 - 30 30 - 70
Colonne di terreno miscelato in sito			Calce, cemento, bentonite	0.8 - 1.5	30 - 60
Congelamento			Azoto liquido con impianto di congelamento	/ 0.7	50 - 100

Tipologia diaframma	K (m/s)
Diaframmi plastici (cemento – bentonite)	$10^{-8} - 10^{-10}$
Diaframmi plastici (terreno – bentonite)	$10^{-9} - 10^{-10}$
Diaframmi plastici compositi	$10^{-10} - 10^{-12}$
Diaframmi in calcestruzzo	$10^{-8} - 10^{-9}$
Diaframmi plastici sottili	$10^{-7} - 10^{-8}$
Jet grouting	$10^{-7} - 10^{-9}$
Palancole metalliche	$10^{-6} - 10^{-8}$
Barriere verticali iniettate	$10^{-6} - 10^{-8}$

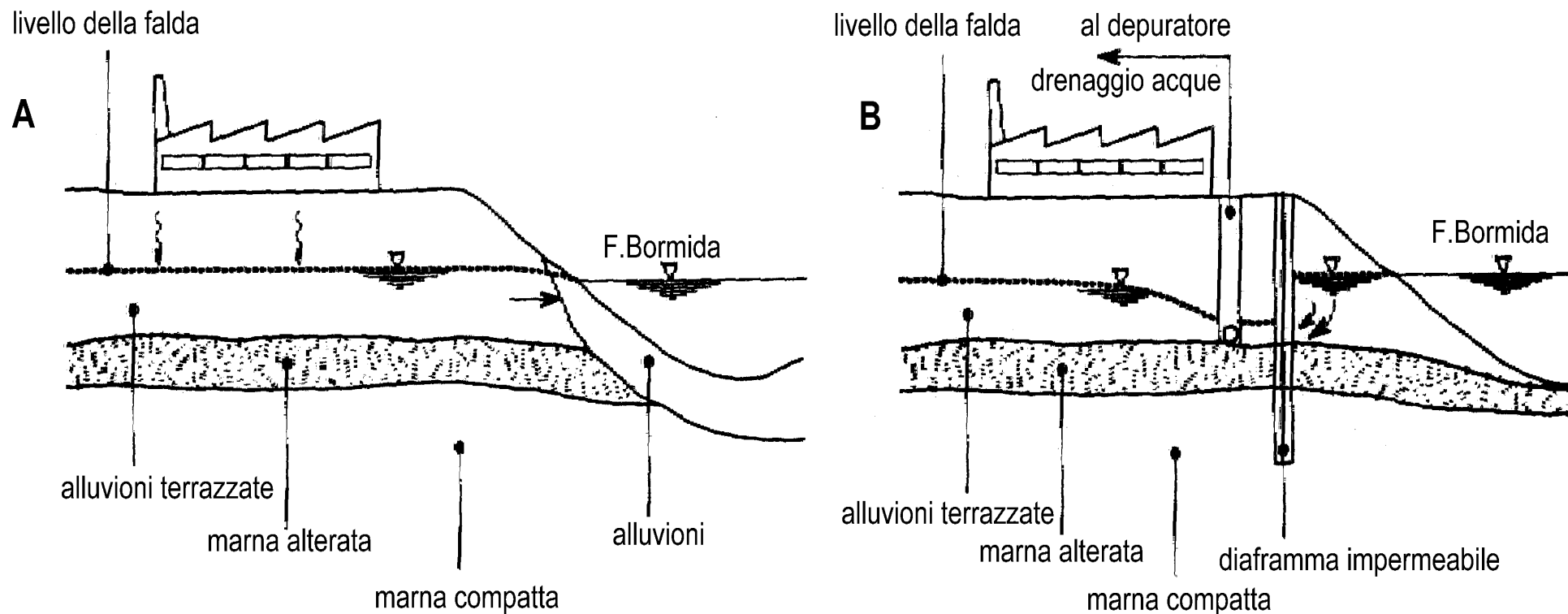
U.S. EPA, 1984 e 1988 = portata unitaria  
 $< 1.71-6.831 \text{ (l/m}^2\text{)}/\text{anno}$  (sotto gradiente idraulico unitario)

D. Lgs. 121/2020 = spessore **5 m** e conducibilità idraulica  
 $< 10^{-9} \text{ m/s}$  (o strato equivalente)

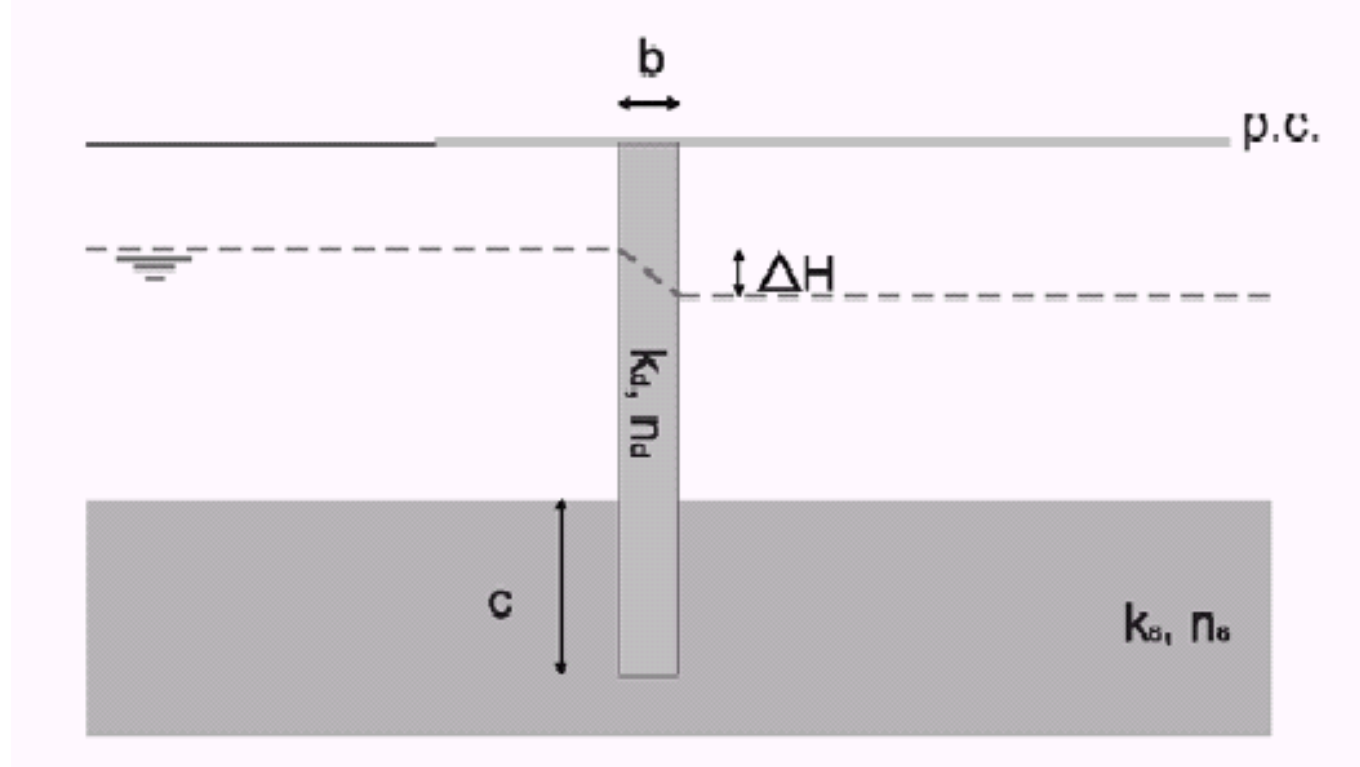
# SCENARI DI MIGRAZIONE IN UN DIAFRAMMA IMPERMEABILE (Shackelford, 1989 e Manassero e Shackelford, 1994)



# Utilizzo di diaframma plastico per cinturazione perimetrale (ACNA - Cengio)



## Spessore diaframma - b



$$b = \sqrt{[(k_d \Delta H t_a)/n_d]}$$

$t_a$  = tempo di attraversamento (s)

$k_d$  = conducibilità idraulica diaframma (m/s)

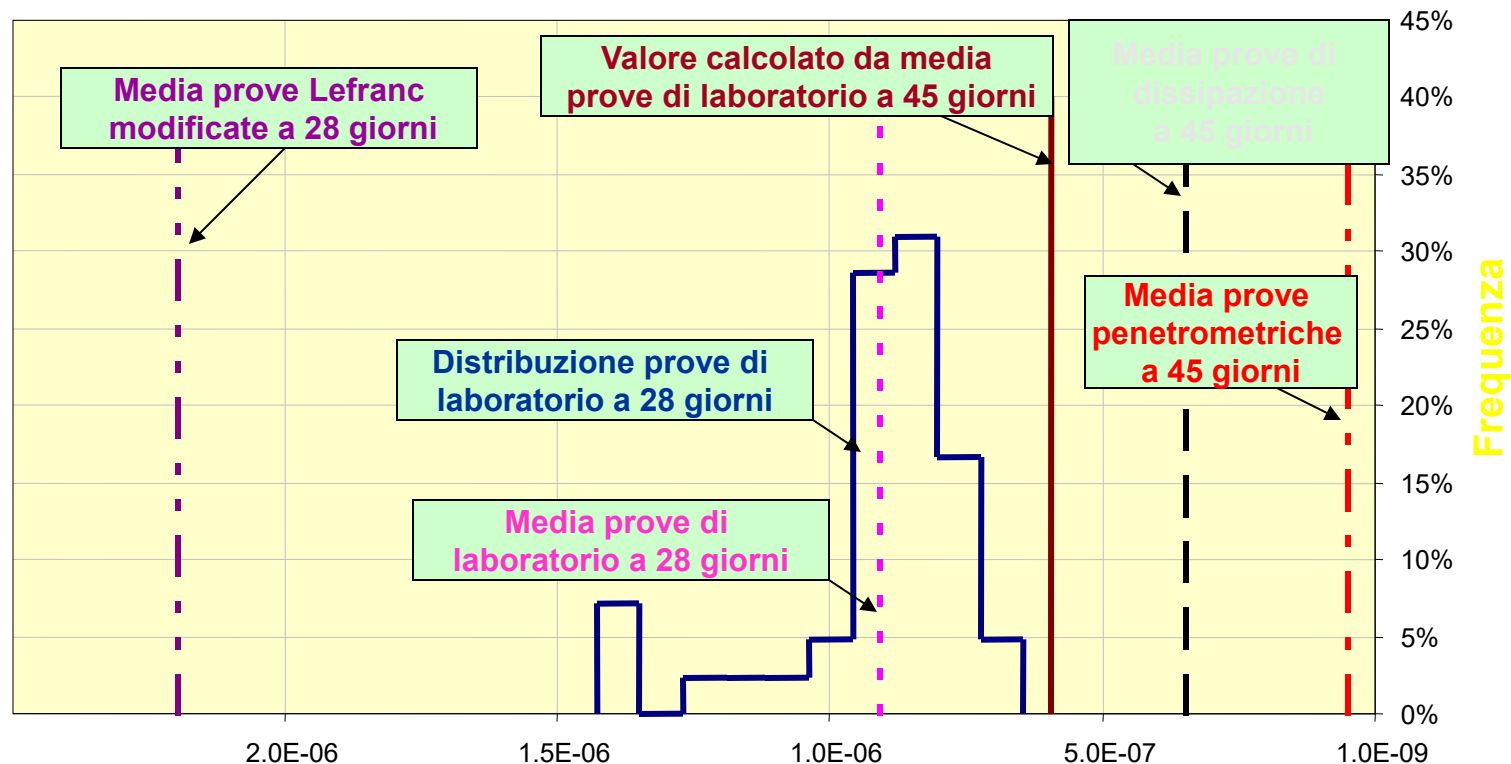
$\Delta H$  = differenza di carico idraulico (m)

$n_s$  = porosità efficace del diaframma (-)

# DIAFRAMMI PLASTICI CEMENTO-BENTONITE

## *CONTROLLI IN CORSO D'OPERA E AD OPERA ULTIMATA*

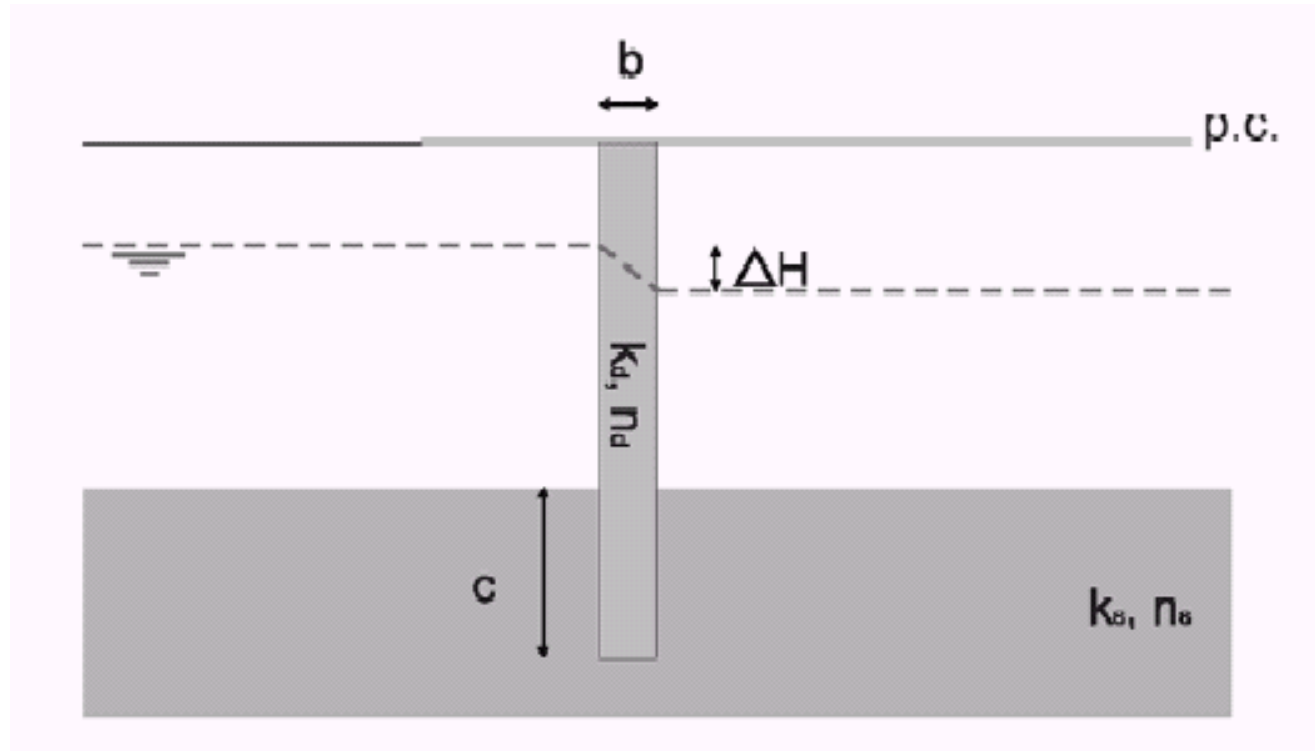
Conducibilità idraulica (cm/s) da prove in sito e di laboratorio



BUON ACCORDO TRA I RISULTATI DELLE PROVE IN SITO (PANNELLI DI PROVA) E DI LABORATORIO (CAMPIONI PRELEVATI DURANTE TUTTI I GETTI)



## Differenza di carico idraulico - $\Delta H$



$$\Delta H = [-\ln(C/Co)][(nd D)/kd]$$

**C** = concentrazione al tempo  $t$  (mg/l)

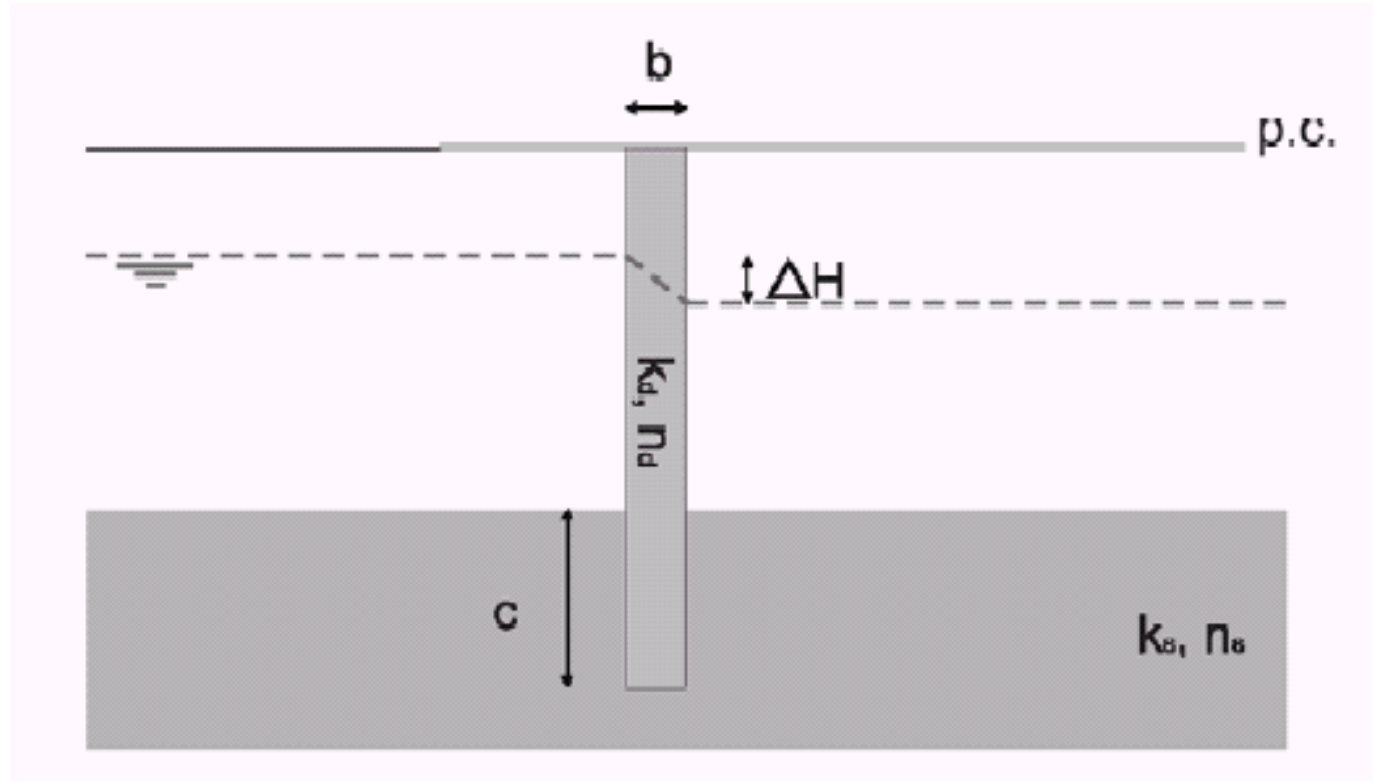
**Co** = concentrazione iniziale (mg/l)

**D** = coefficiente di diffusione ( $m^2/s$ )

**nd** = porosità efficace del diaframma (-)

**kd** = conducibilità idraulica del diaframma (m/s)

## Profondità di immersiono - c



$$c = \frac{1}{2} [t_a (k_s \Delta H) / (n_s b) - b]$$

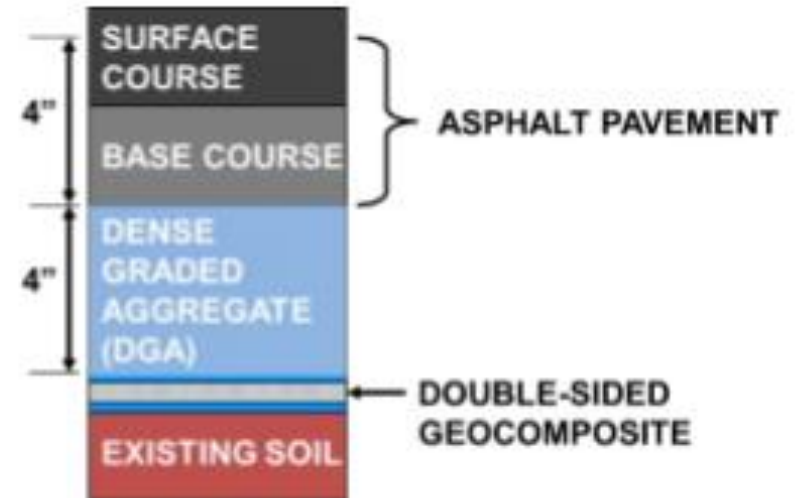
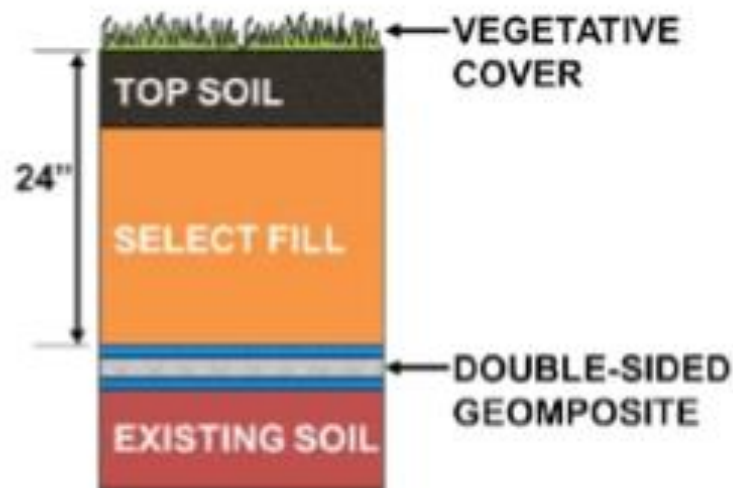
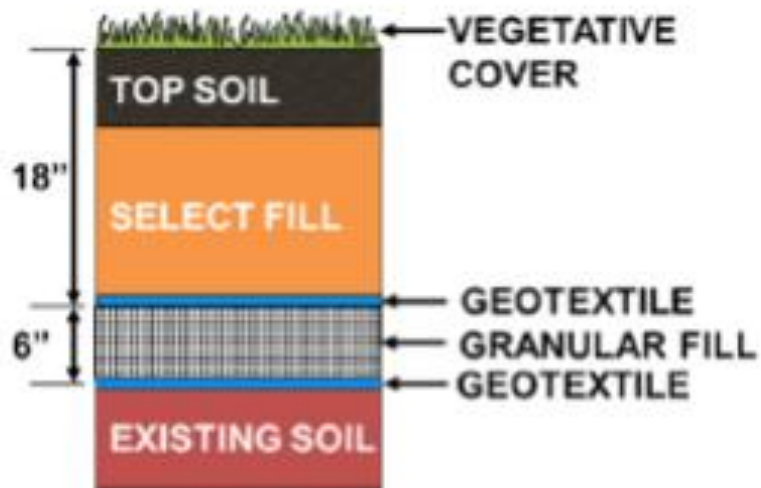
**$t_a$  = tempo di attraversamento (s)**

**$k_s$  = conducibilità idraulica substrato (m/s)**

**$\Delta H$  = differenza di carico idraulico (m)**

**$n_s$  = porosità efficace del substrato (-)**

# Varie tipologie di copertura superficiale nei siti contaminati



# LONGEVITA' DI ALCUNI INTERVENTI (ordini di grandezza temporali)

*BARRIERE FISICHE: riduzione lisciviazione inquinanti e/o trasporto in falda*

Efficienza: minima a  $t_{30}$  : 40% (argilla)  
massima a  $t_{30}$ : 80% (argilla + materiale artificiale)

Dati di  
letteratura

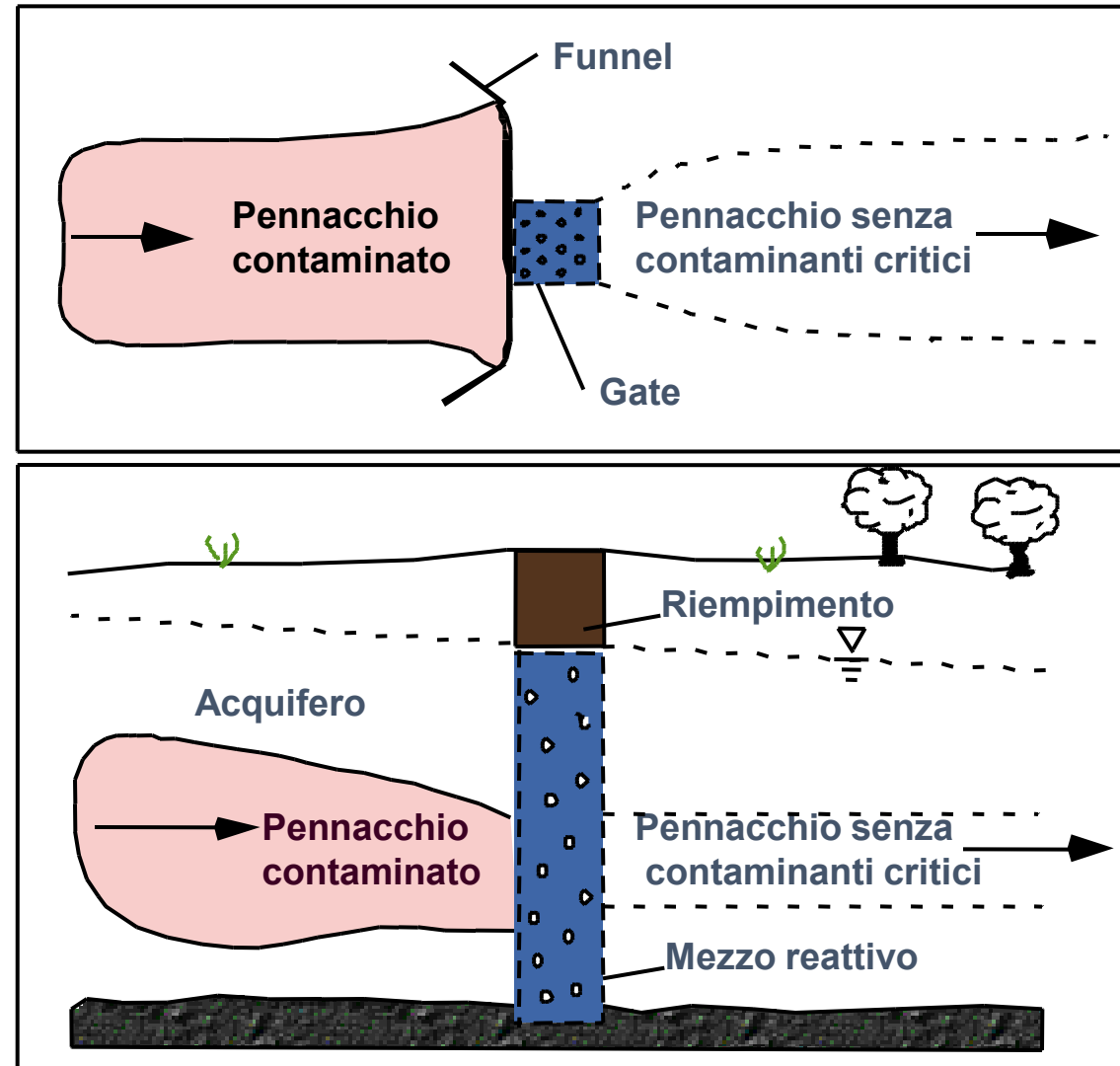
*BARRIERE IDRAULICHE: arresto migrazione inquinanti in soluzione e loro estrazione*

Durata pompaggio e trattamento: **n·10 anni** (esempio: P&T per 50 anni per sversamento alla sorgente di 5x5x10 m TCE in fase libera in acquifero poroso, considerando la retrodiffusione, gli attuali limiti CSC) e senza bonifica sorgente

Dati da  
modellazione

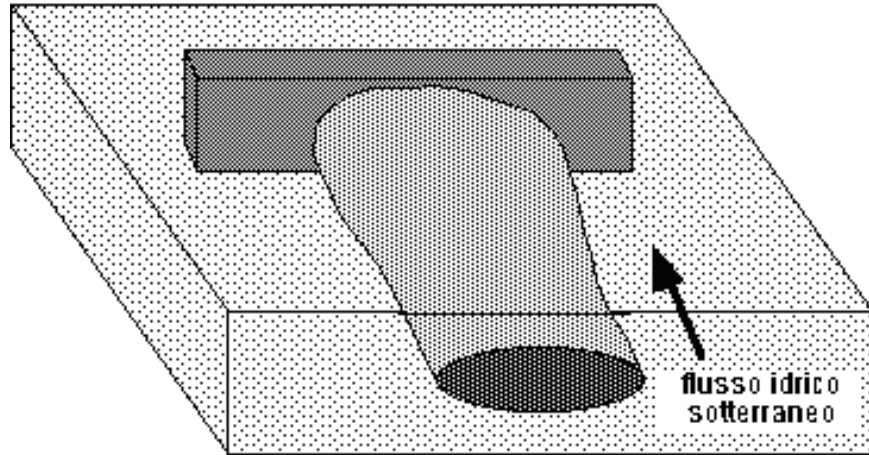
**Passaggio di scala temporale: n·10<sup>1</sup> anni**

# BARRIERE PERMEABILI REATTIVE

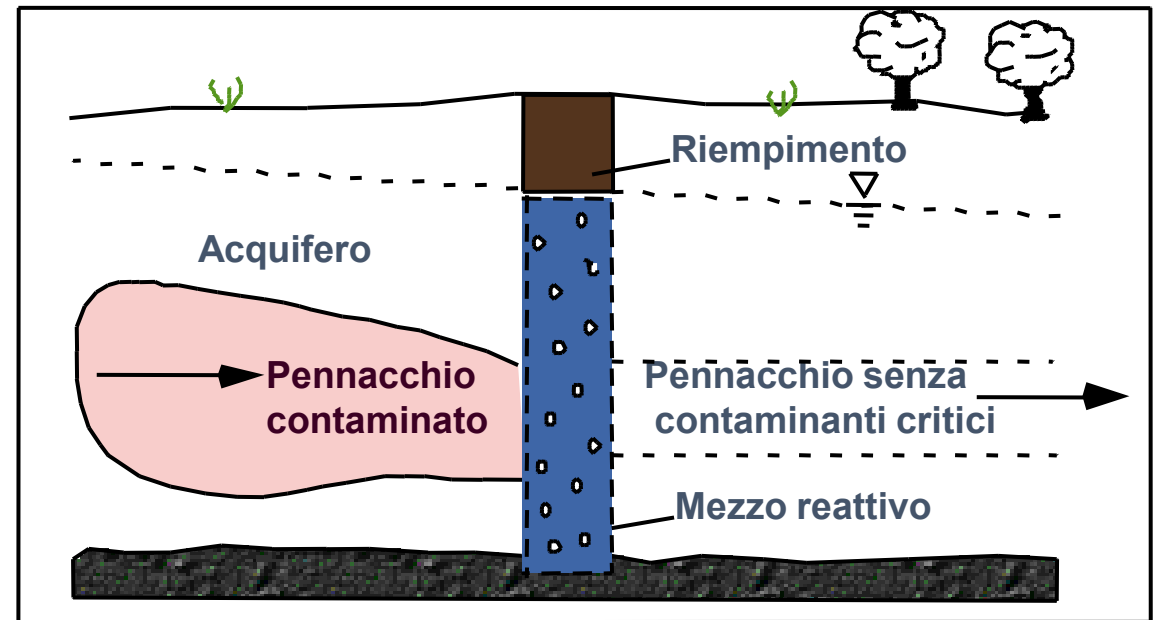
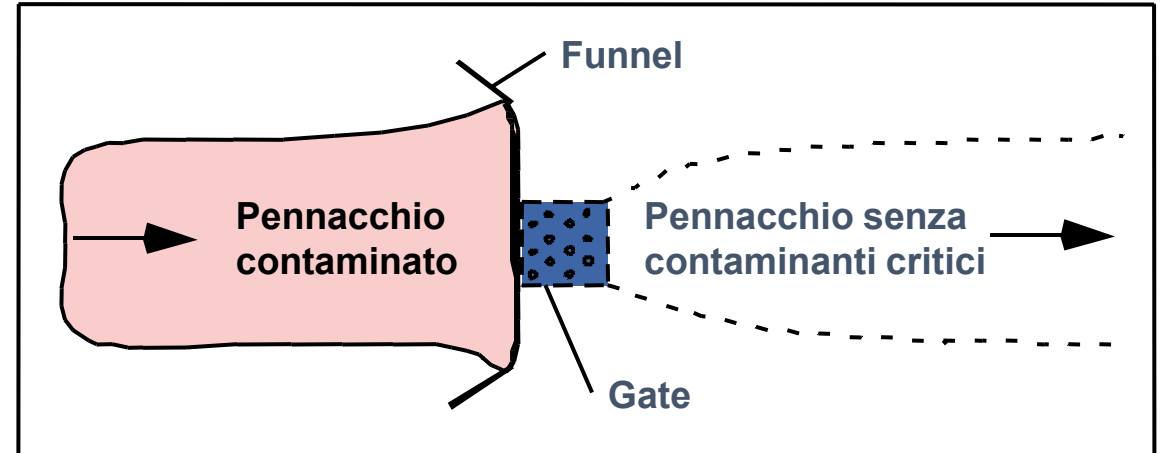
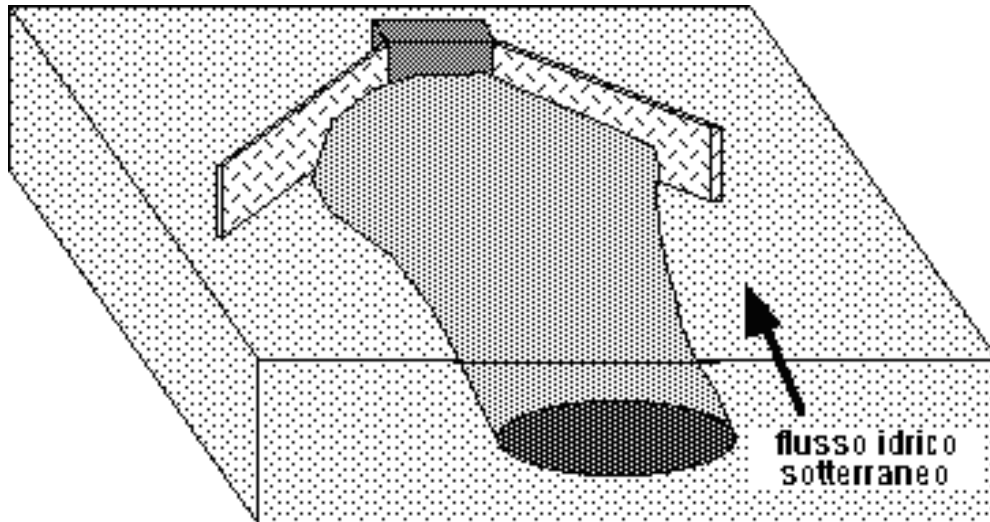


# BARRIERE PERMEABILI REATTIVE

Barriera continua



Barriera "funnel and gate"



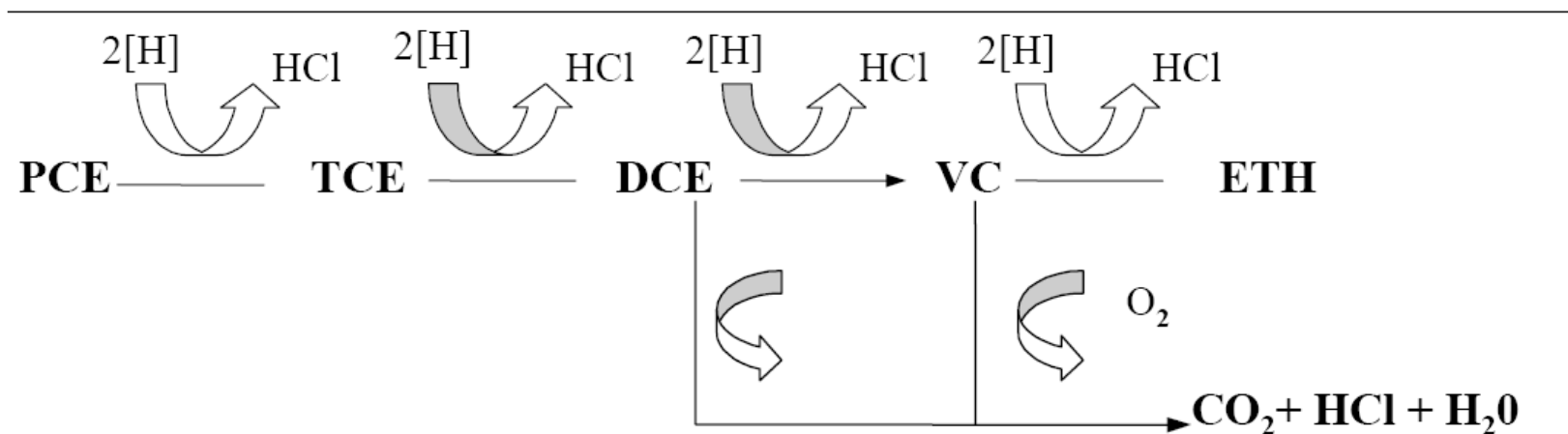
# MECCANISMI DI BIODEGRADAZIONE DI COMPOSTI CLORURATI

## Ossidazione

- Degradazione rara in condizioni aerobiche (solo cometabolica) per l'elevato grado di clorurazione di PCE e TCE
- Degradazione più significativa per composti meno clorurati quali DCE e VC (anche metabolica)
- Anche per VC possibile ossidazione anaerobica in relazione alle condizioni ambientali

## Riduzione

- Richiede un donatore di elettroni (fonte di Carbonio e/o Idrogeno)
- Processo metabolico o cometabolico dipendente dai microrganismi coinvolti e possibile incompletezza delle reazioni che causano un accumulo di DCE o VC





Connelly Iron  
(USA)



Iron sponge  
(Germania)



Cast Iron  
(Europa)

## FERRO ZEROVALENTE



## PROGETTAZIONE DELLA BARRIERA REATTIVA

$$b_{PRB} = \frac{u}{\beta} \ln \left( \frac{C_o}{C} \right)$$

Allo stato stazionario:

$b_{PRB}$  = spessore della barriera (m)

$u$  = velocità effettiva di filtrazione (m/s)

$C_o$  = concentrazione entrante (mg/l)

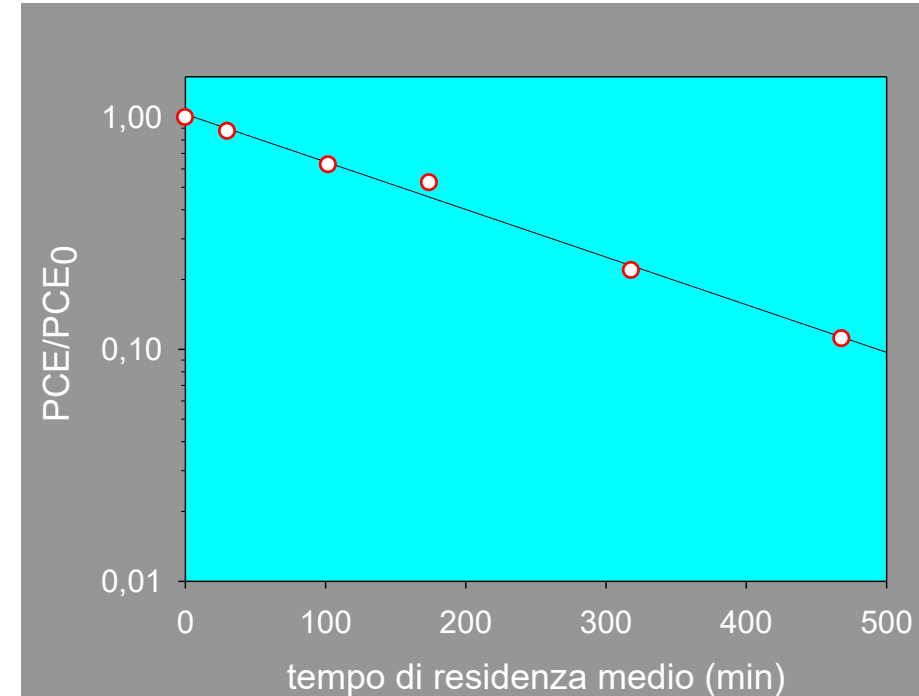
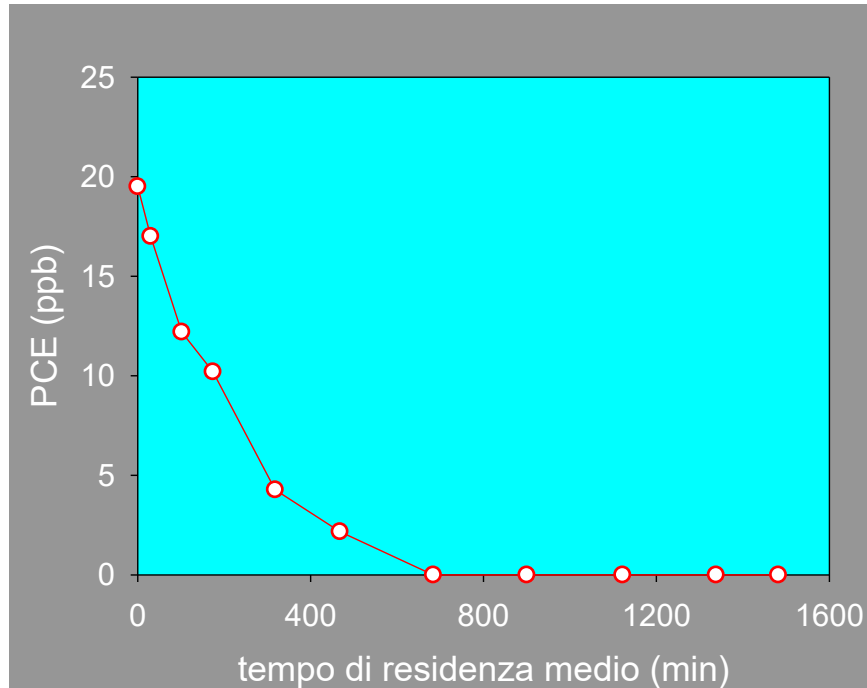
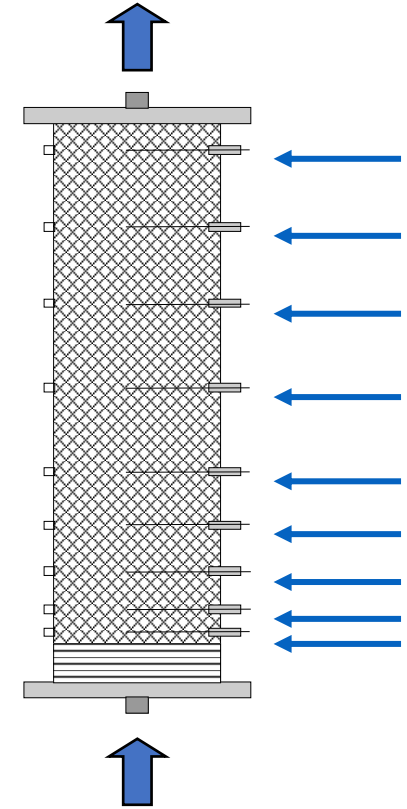
$C$  = concentrazione uscente attesa (mg/l)

$\beta$  = **costante di degradazione (1/s)**



# INTERPRETAZIONE DEGLI ESPERIMENTI IN COLONNA

In prima approssimazione si usa un modello cinetico del primo ordine per determinare il tempo di dimezzamento  $t_{1/2}$



$$C = C_0 e^{-\beta t} \quad \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\beta t \quad t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\beta} = \frac{0.693}{\beta}$$