

**Università di Roma “Tor Vergata”**  
**Laura magistrale in “Ingegneria per l’ambiente e il territorio”**  
**Corso di Bonifica dei Siti Contaminati**

# **Soil Vapor Extraction**

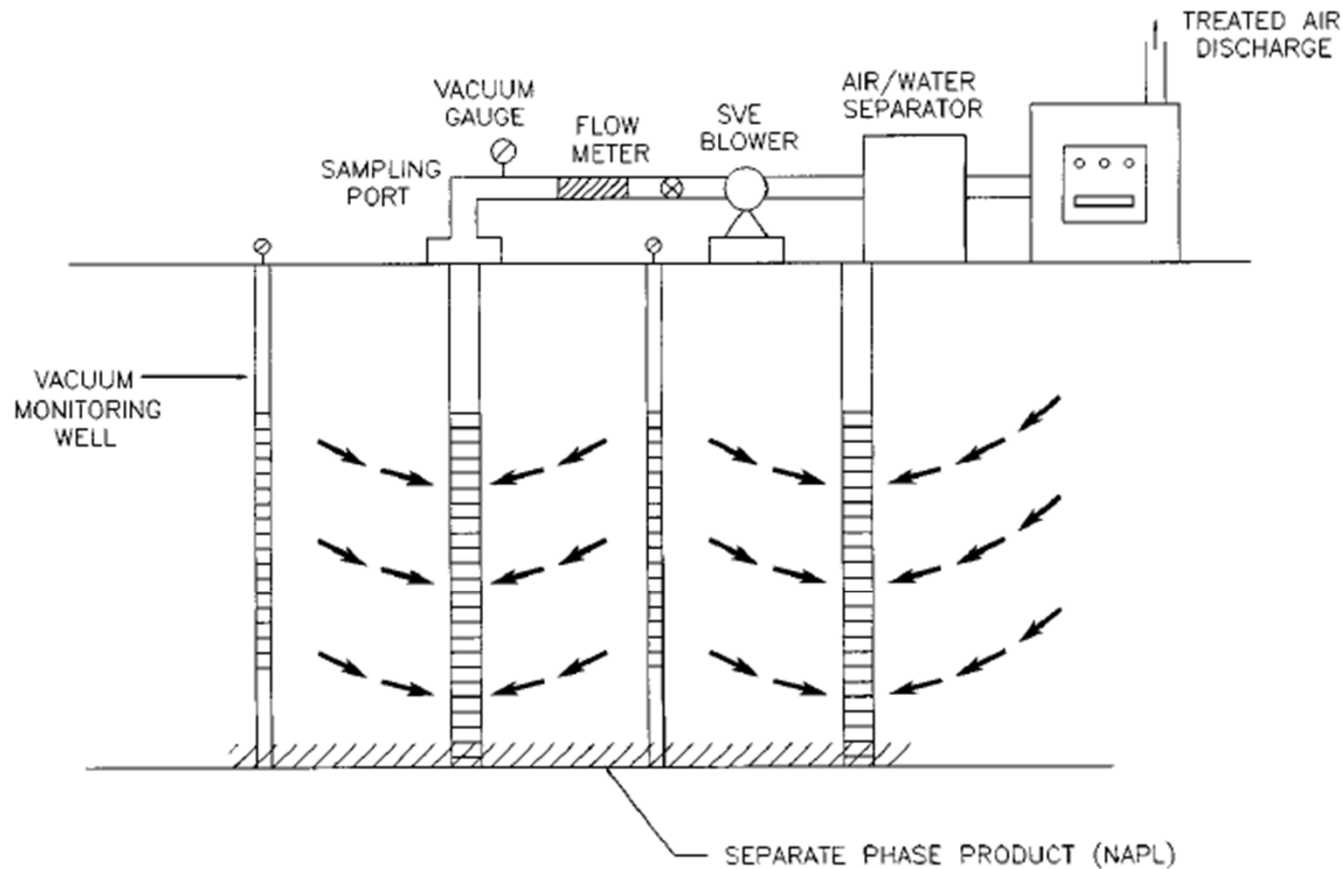
## **SVE**

**Renato Baciocchi**  
**A.A. 2012-2013**

# Introduzione

La Soil Vapor Extraction (SVE) è una tecnologia in-situ per la bonifica di suoli contaminati nella zona insatura.

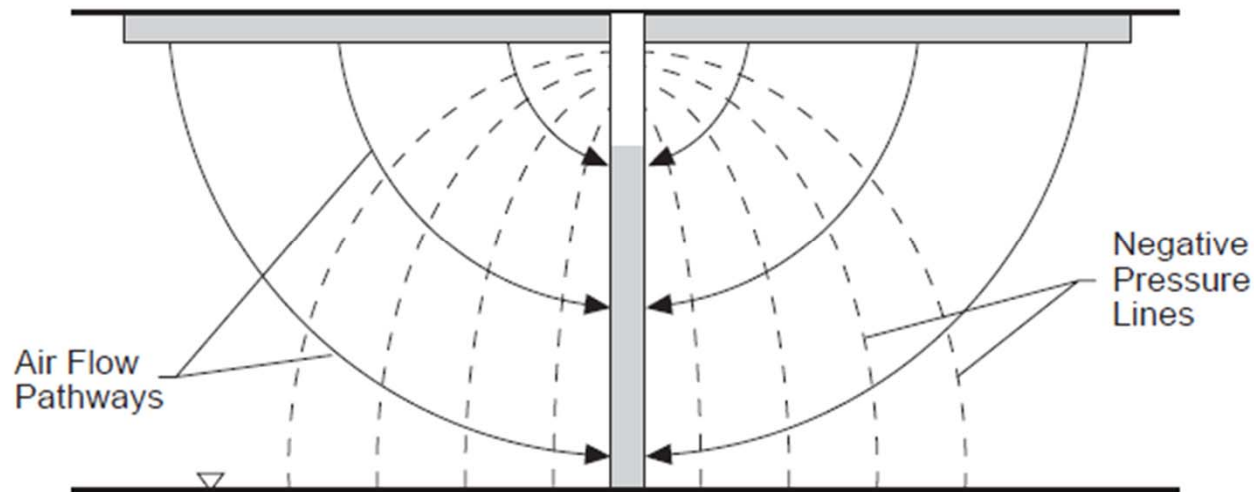
Obiettivo: Trasferimento delle sostanze maggiormente volatili in fase vapore  
Invio di tali sostanze al trattamento



# Principio della tecnologia

Principio: Induzione di un flusso di aria nella zona insatura del terreno mediante pozzi o trincee mediante la generazione di un gradiente di pressione

Può essere utilizzata anche in combinazione con altre tecnologie di bonifica (esempio: Air Sparging)



Andamento delle linee di flusso dell'aria e delle curve iso-pressione (vuoto)

# Fenomeni controllanti

Meccanismi di rimozione dei contaminanti:

- Desorbimento dalla matrice solida -> Fase vapore
- Trasferimento nel flusso di vapore
- Volatilizzazione di prodotto libero (se presente)
- Volatilizzazione dei composti disciolti in fase acquosa

La Soil Vapor Extraction (SVE) è controllata da due processi fondamentali:

- Il flusso di aria indotto nel sottosuolo
- Trasporto di materia dei contaminanti che ne limita la ripartizione in fase vapore

# Contaminanti a cui si applica

Si applica a composti volatili:

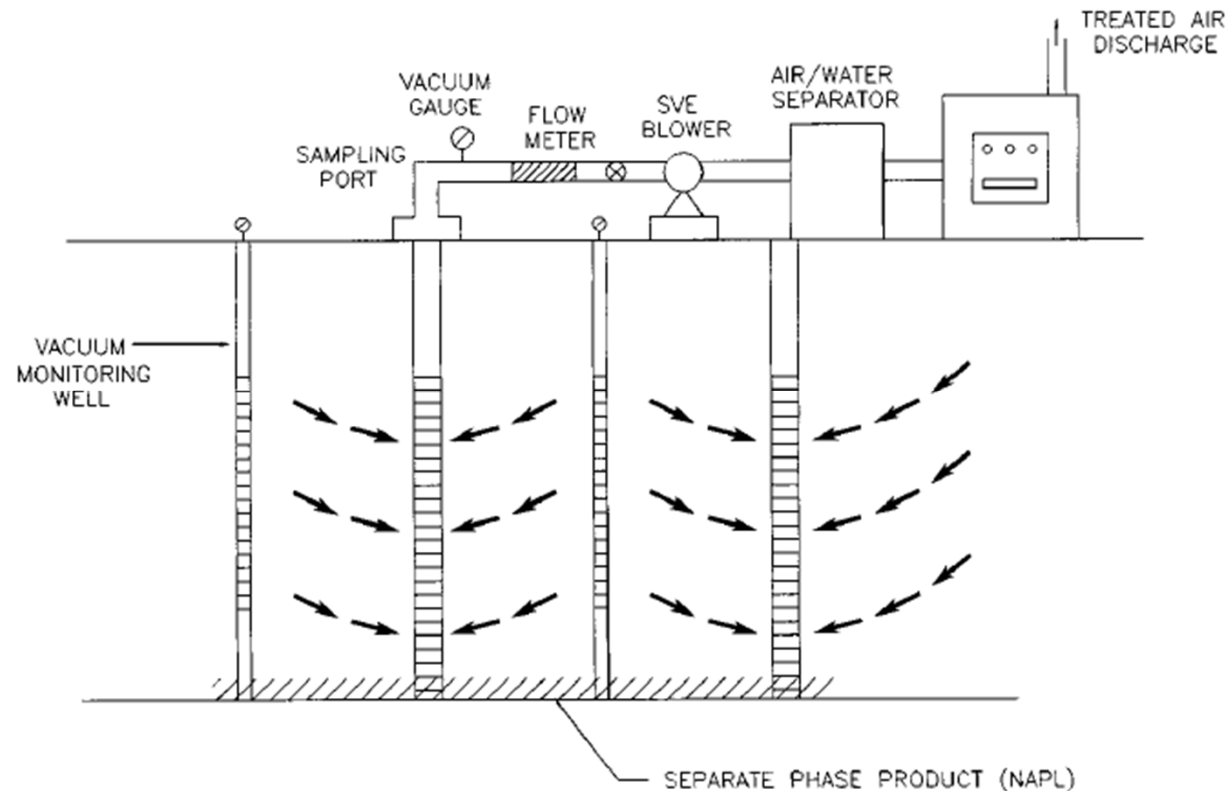
- Composti organici volatili (VOC)
- Composti organici semivolatili (SVOC)

Applicazioni tipiche:

- Aromatici (BTEX), Fenoli, Benzine
- Solventi clorurati (cloroetano, cloroformio, VC, DCM, DCA, DCE, TCA, TCE, TC, PCE)
- Clorobenzeni (poco sostituiti)

# Configurazione

- Pozzi o trincee di estrazione dell'aria
- Apparecchiatura per estrazione aria
- Tubazioni di collegamento pozzi di estrazione
- Sistema di controllo e monitoraggio (P, Vuoto, Concentrazione, T)
- Sistema di disidratazione vapori
- Sistema di trattamento vapori



# Trattamento vapori

Ossidazione catalitica: applicabile se  $C(\text{vap}) < 25\% \text{ LEL}$

Carbone attivo: applicabile se  $C(\text{Vap}) < 25\% \text{ LEL}$

Ossidazione termica: raccomandata se  $C(\text{vap}) < 25\text{-}50\% \text{ LEL}$

Biofiltro: applicabile se  $C(\text{Vap}) < 10\% \text{ LEL}$

LEL= Lower explosivity limit

| Gas                         | LEL  | UEL   |
|-----------------------------|------|-------|
| Acetone                     | 2.6  | 13.0  |
| Acetylene                   | 2.5  | 100.0 |
| Acrylonitrile               | 3.0  | 17    |
| Allene                      | 1.5  | 11.5  |
| Ammonia                     | 15.0 | 28.0  |
| Benzene                     | 1.3  | 7.9   |
| 1,3-Butadiene               | 2.0  | 12.0  |
| Butane                      | 1.8  | 8.4   |
| n-Butanol                   | 1.7  | 12.0  |
| 1-Butene                    | 1.6  | 10.0  |
| Cis-2-Butene                | 1.7  | 9.7   |
| Trans-2-Butene              | 1.7  | 9.7   |
| Butyl Acetate               | 1.4  | 8.0   |
| Carbon Monoxide             | 12.5 | 74.0  |
| Carbonyl Sulfide            | 12.0 | 29.0  |
| Chlorotrifluoroethylene     | 8.4  | 38.7  |
| Cumene                      | 0.9  | 6.5   |
| Cyanogen                    | 6.6  | 32.0  |
| Cyclohexane                 | 1.3  | 7.8   |
| Cyclopropane                | 2.4  | 10.4  |
| Deuterium                   | 4.9  | 75.0  |
| Diborane                    | 0.8  | 88.0  |
| Dichlorosilane              | 4.1  | 98.8  |
| Diethylbenzene              | 0.8  | –     |
| 1,1-Difluoro-1-Chloroethane | 9.0  | 14.8  |
| 1,1-Difluoroethane          | 5.1  | 17.1  |
| 1,1-Difluoroethylene        | 5.5  | 21.3  |
| Dimethylamine               | 2.8  | 14.4  |
| Dimethyl Ether              | 3.4  | 27.0  |
| 2,2-Dimethylpropane         | 1.4  | 7.5   |
| Ethane                      | 3.0  | 12.4  |
| Ethanol                     | 3.3  | 19.0  |
| Ethyl Acetate               | 2.2  | 11.0  |
| Ethyl Benzene               | 1.0  | 6.7   |
| Ethyl Chloride              | 3.8  | 15.4  |
| Ethylene                    | 2.7  | 36.0  |
| Ethylene Oxide              | 3.6  | 100.0 |
| Gasoline                    | 1.2  | 7.1   |

| Gas                 | LEL  | UEL  |
|---------------------|------|------|
| Heptane             | 1.1  | 6.7  |
| Hexane              | 1.2  | 7.4  |
| Hydrogen            | 4.0  | 75.0 |
| Hydrogen Cyanide    | 5.6  | 40.0 |
| Hydrogen Sulfide    | 4.0  | 44.0 |
| Isobutane           | 1.8  | 8.4  |
| Isobutylene         | 1.8  | 9.6  |
| Isopropanol         | 2.2  | –    |
| Methane             | 5.0  | 15.0 |
| Methanol            | 6.7  | 36.0 |
| Methylacetylene     | 1.7  | 11.7 |
| Methyl Bromide      | 10.0 | 15.0 |
| 3-Methyl-1-Butene   | 1.5  | 9.1  |
| Methyl Cellosolve   | 2.5  | 20.0 |
| Methyl Chloride     | 7.0  | 17.4 |
| Methyl Ethyl Ketone | 1.9  | 10.0 |
| Methyl Mercaptan    | 3.9  | 21.8 |
| Methyl Vinyl Ether  | 2.6  | 39.0 |
| Monoethylamine      | 3.5  | 14.0 |
| Monomethylamine     | 4.9  | 20.7 |
| Nickel Carbonyl     | 2.0  | –    |
| Pentane             | 1.4  | 7.8  |
| Picoline            | 1.4  | –    |
| Propane             | 2.1  | 9.5  |
| Propylene           | 2.4  | 11.0 |
| Propylene Oxide     | 2.8  | 37.0 |
| Styrene             | 1.1  | –    |
| Tetrafluoroethylene | 4.0  | 43.0 |
| Tetrahydrofuran     | 2.0  | –    |
| Toluene             | 1.2  | 7.1  |
| Trichloroethylene   | 12.0 | 40.0 |
| Trimethylamine      | 2.0  | 12.0 |
| Turpentine          | 0.7  | –    |
| Vinyl Acetate       | 2.6  | –    |
| Vinyl Bromide       | 9.0  | 14.0 |
| Vinyl Chloride      | 4.0  | 22.0 |
| Vinyl Fluoride      | 2.6  | 21.7 |
| Xylene              | 1.1  | 6.6  |

# Tempi/Efficienza/Efficacia

Tempi di trattamento: alcuni mesi -> 2 anni

Efficienza: fino al 90% per composti molto volatili  
30-40% per composti semivolatili

Efficacia: elevata nella prima fase, con graduale diminuzione nel tempo

Efficacia influenzata da:

- Adsorbimento su frazione organica
- Eterogeneità del suolo
- Contenuto d'acqua nel suolo insaturo (effetto su permeabilità)



# Elementi da valutare per la selezione della SVE

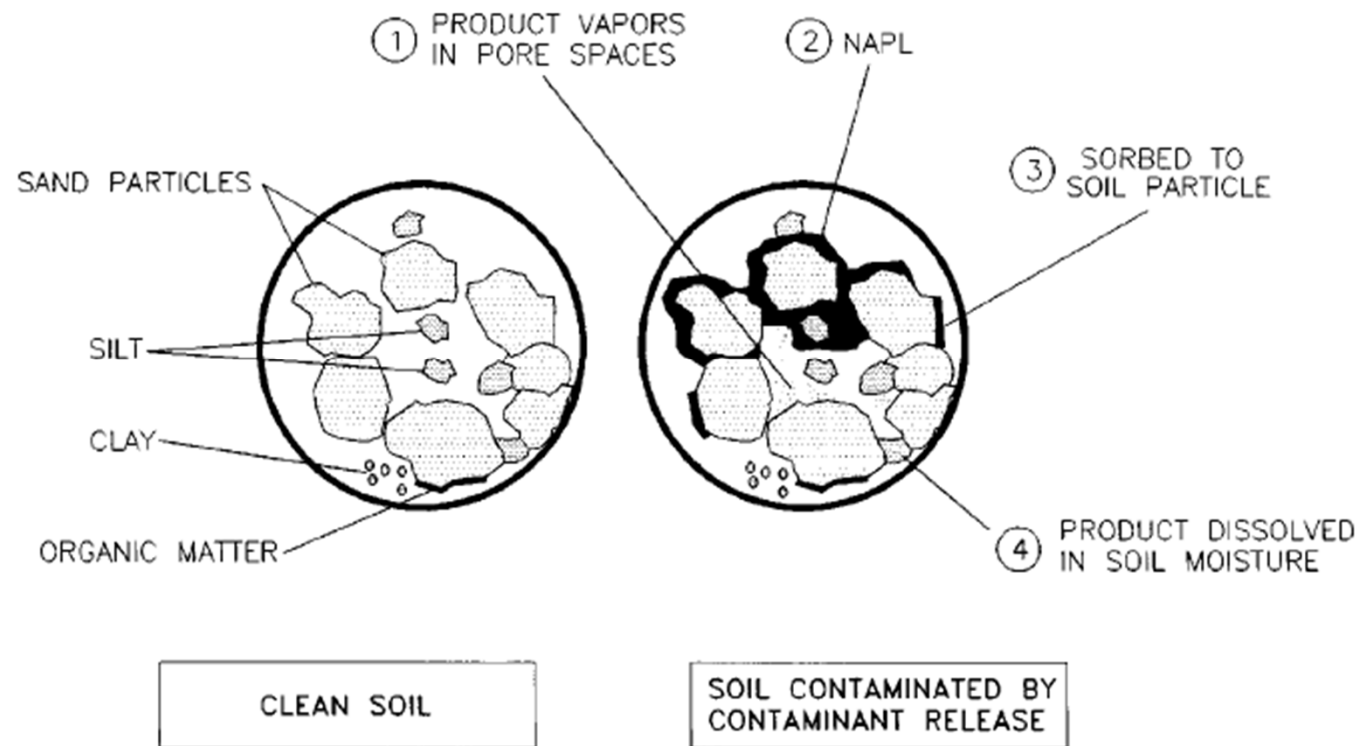
**La SVE è mirata alla rimozione di composti organici (VOC, SVOC) dalla zona insatura:**

- Adsorbiti sulla superficie del terreno
- In fase vapore nella porosità del duolo
- Come prodotto libero (NAPL)
- In soluzione nell'acqua interstiziale

**Fattori determinanti nella applicazione della SVE sono:**

- Le proprietà dei contaminanti: ripartizione tra le fasi
- Le proprietà del suolo: permeabilità, porosità, eterogeneità.

# Ripartizione dei contaminanti

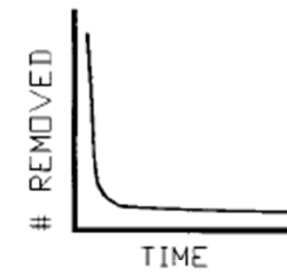
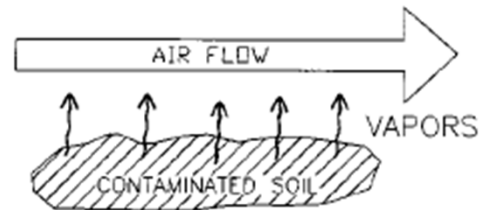


Contaminanti presenti come:

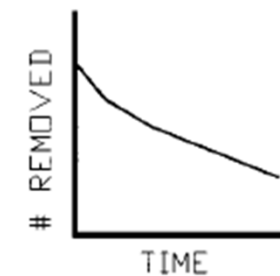
- As an adsorbed film on soil particles and colloids
- As a residual immiscible liquid in the soil pore spaces (NAPL)
- As vapor in soil air present in the pore space
- As dissolved compounds in soil pore water, and groundwater
- In addition, as a floating product above the water table in the case of LNAPLs and as a pooled or sinking liquid in the case of DNAPLs.

# Ripartizione dei contaminanti

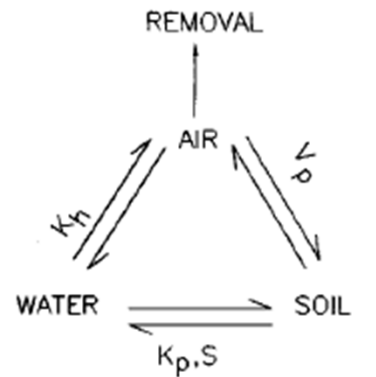
## DIFFUSION CONTROLLED



## FLOW CONTROLLED

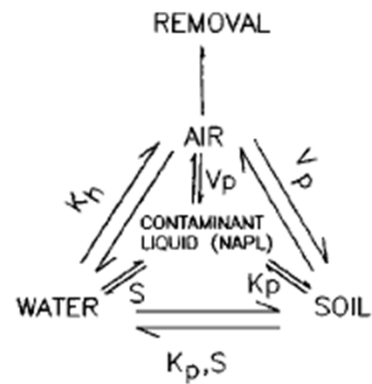


# Ripartizione dei contaminanti



THREE PHASE DIAGRAM

$V_p$  - VAPOR PRESSURE  
 $K_h$  - HENRY'S LAW CONSTANT  
 $K_p$  - PARTITION COEFFICIENT  
 $S$  - SOLUBILITY



FOUR PHASE DIAGRAM

$V_p$  - VAPOR PRESSURE  
 $K_h$  - HENRY'S LAW CONSTANT  
 $K_p$  - PARTITION COEFFICIENT  
 $S$  - SOLUBILITY

# Tensione di vapore

La tensione di vapore di un composto è la pressione parziale di quel composto all'equilibrio con il suo liquido (NAPL). E' quindi una misura dell'equilibrio L-V.

**La SVE è idonea per sostanze con tensione di vapore > 0.5-1.0 mmHg**

Nel caso di una miscela di composti organici, la pressione parziale di un generico i-mo composto all'equilibrio con una miscela liquida sarà:

$$P_i = X_i A_i P_i^o$$

$P_i$  = equilibrium partial pressure of component  $i$  in the organic mixture

$X_i$  = mole fraction of component  $i$  in the organic mixture

$A_i$  = activity coefficient of component  $i$  in the organic mixture as a correction factor for compensating nonideal behavior<sup>6,7</sup>

$P_i^o$  = vapor pressure of component  $i$  as a pure compound.

# Punto di ebollizione

Il punto di ebollizione è legato alla tensione di vapore e determina l'applicabilità o meno della SVE.

**La SVE è idonea per sostanze con punto di ebollizione inferiore a 250-300°C**

| <b>Prodotto</b>  | <b>Intervallo di ebollizione (°C)</b> |
|------------------|---------------------------------------|
| Benzina          | 40-205                                |
| Kerosene         | 175-325                               |
| Gasolio          | 200-338                               |
| Oli combustibili | >275                                  |
| Oli lubrificanti | non volatile                          |

# Solubilità

Rappresenta la massima concentrazione alla quale un soluto può essere disciolto in un solvente. Tipicamente, si fa riferimento all'acqua come solvente.

Dipende dalla temperatura. In genere la solubilità di una data sostanza aumenta all'aumentare della temperatura.

Esistono diverse forme della costante di Henry, in funzione delle unità di misura utilizzate per esprimere le concentrazioni in fase liquida e gassosa.

Nel caso di una miscela all'equilibrio con un NAPL multicomponente , la concentrazione di ciascuna specie in fase liquida sarà data da:

$$C_i = X_i A_i C_i^o \quad (3.15)$$

where  $C_i$  = equilibrium concentration of compound  $i$  in the organic mixture  
 $X_i$  = mole fraction of compound  $i$  in the organic mixture  
 $A_i$  = activity coefficient of compound  $i$  in the organic mixture as a correction factor for compensating nonideal behavior<sup>7</sup>  
 $C_i^o$  = equilibrium solubility of compound  $i$  as a pure compound.

# Costante di Henry

Rappresenta il rapporto tra la concentrazione di una determinata sostanza in fase gassosa e della stessa sostanza in fase acquosa.

Esistono diverse forme della costante di Henry, in funzione delle unità di misura utilizzate per esprimere le concentrazioni in fase liquida e gassosa.

$$K_H = \frac{C_v}{C_l}$$

where  $K_H$  = Henry's law constant

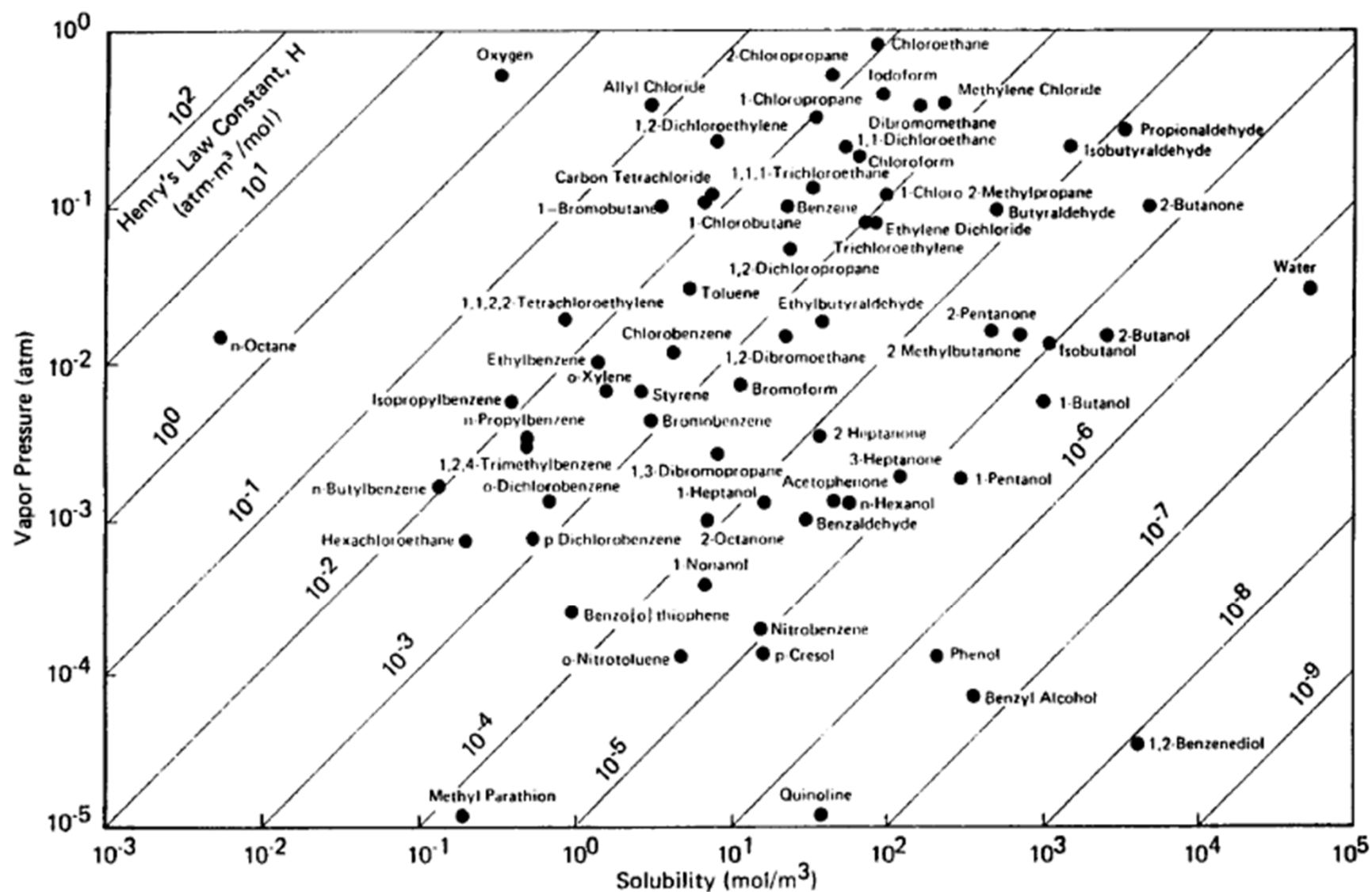
$C_v$  = concentration in vapor phase at the water–vapor interface

$C_l$  = concentration in liquid at the water–vapor interface.

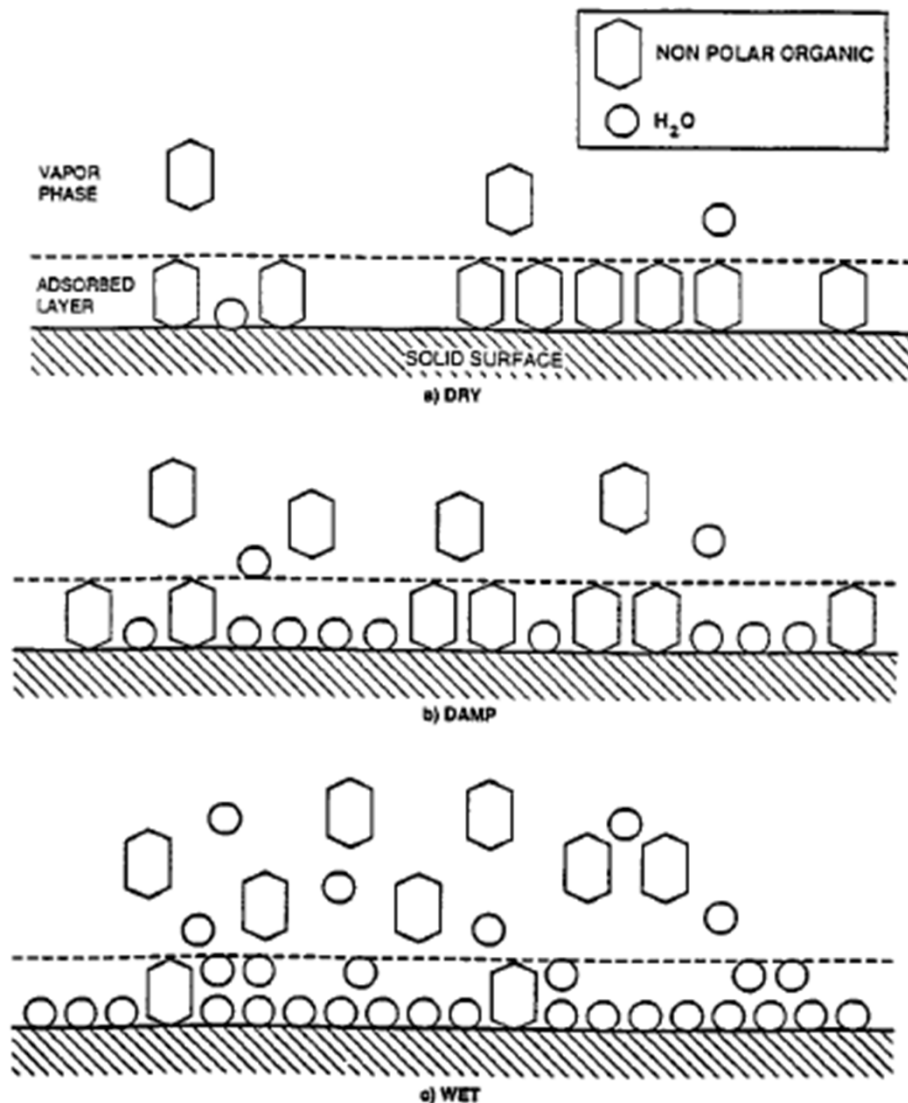
**La SVE è idonea per sostanze con costante di Henry  $> 0,001 \text{ atm m}^3/\text{mol}$**



# Solubilità



# Adsorbimento



L'adsorbimento è regolato dal coefficiente di ripartizione  $K_d$

Per i composti organici il  $K_d$  è funzione di  $K_{oc}$  e  $f_{oc}$

A sinistra, l'effetto del contenuto d'acqua nel suolo sull'adsorbimento di composti organici idrofobici

La SVE può ridurre l'umidità del suolo e quindi favorire l'adsorbimento dei composti organici sul suolo.

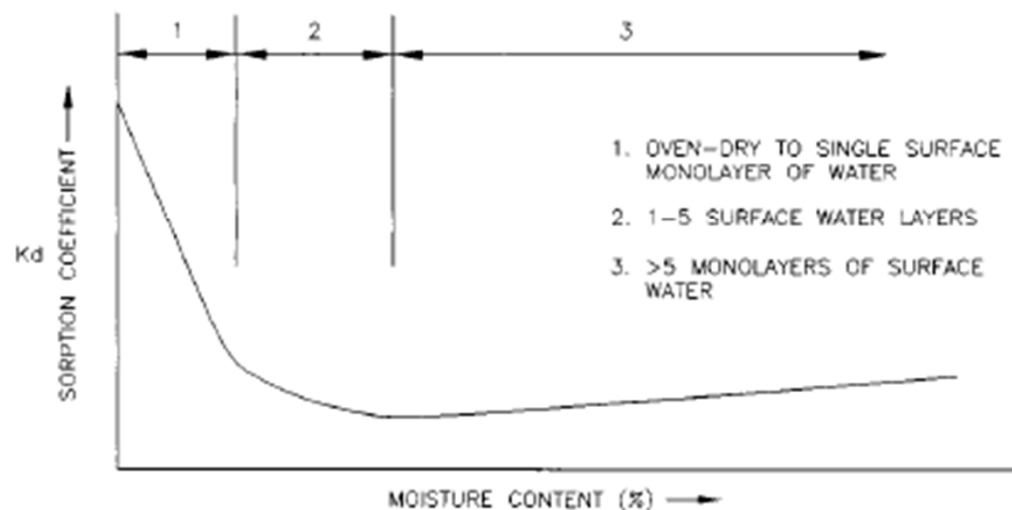
# Proprietà del suolo

## Porosità

Il flusso di aria avviene attraverso la porosità del suolo. Ne consegue che una maggiore porosità favorisce il flusso d'aria attraverso il suolo.

## Contenuto d'acqua

La presenza d'acqua nei pori è un ostacolo fisico al passaggio dell'aria. Al contrario, la minore umidità determina un maggiore adsorbimento di alcuni inquinanti sul suolo.

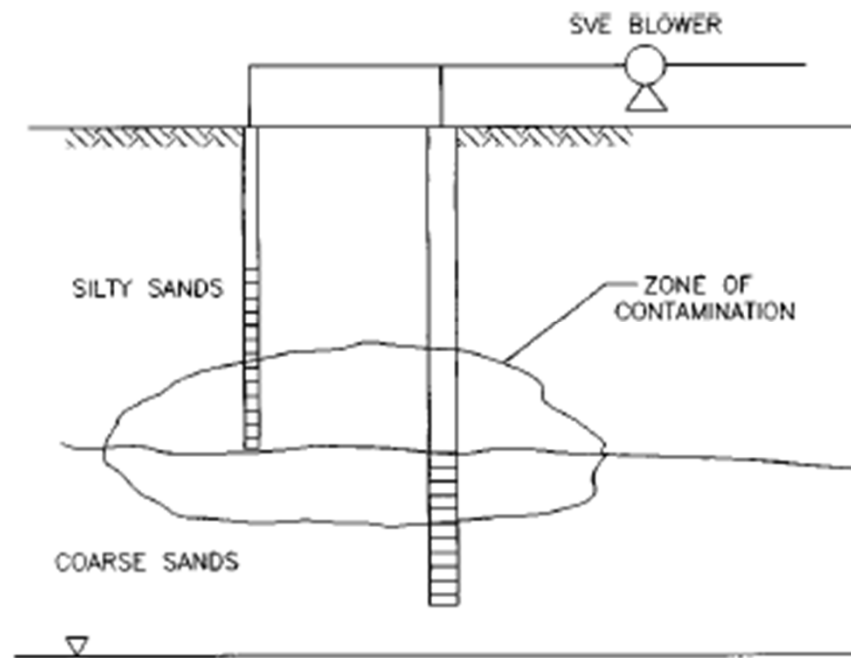


# Proprietà del suolo

## Eterogeneità

La presenza di zone caratterizzate da diversa tessitura può determinare disomogeneità nei flussi di aria e quindi influenzare la progettazione.

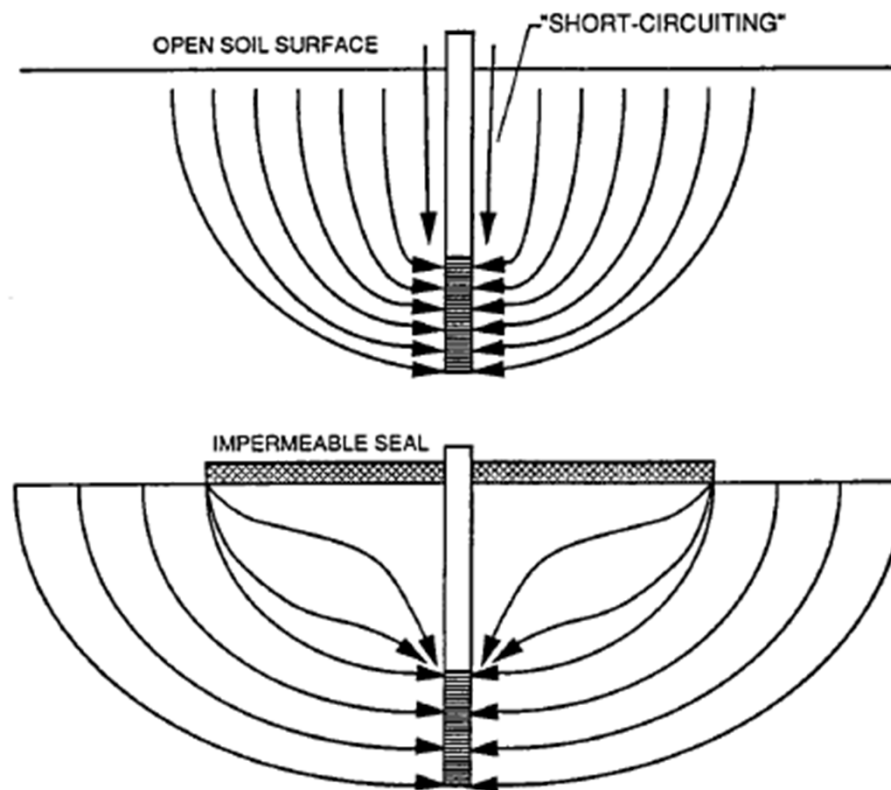
Ad esempio, in figura, si riporta la configurazione nel caso di due strati geologici a diversa permeabilità:



# Proprietà del suolo

## Cortocircuiti

Per evitare flussi preferenziali di aria in prossimità del pozzo di aspirazione, si può adottare un sistema di impermeabilizzazione (asfalto, cemento, telo impermeabile).



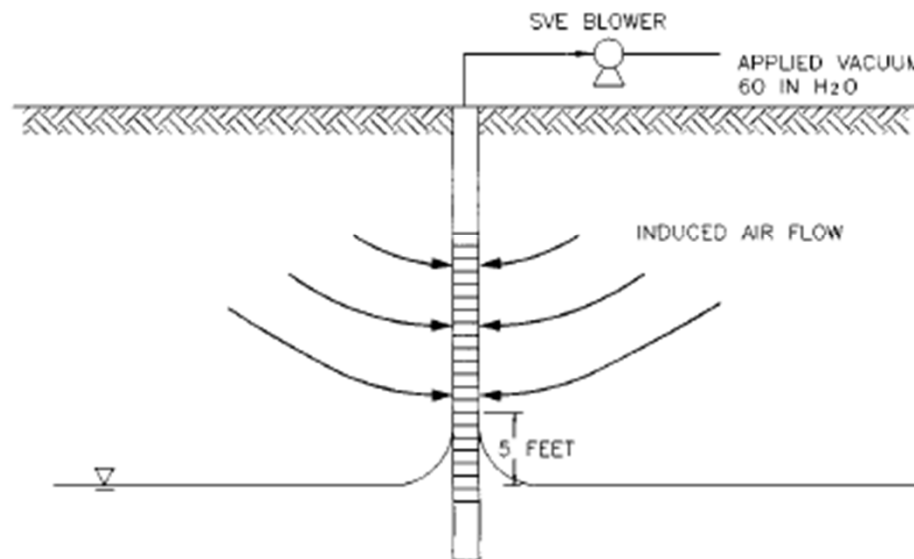
# Proprietà del suolo

## Livello della tavola d'acqua

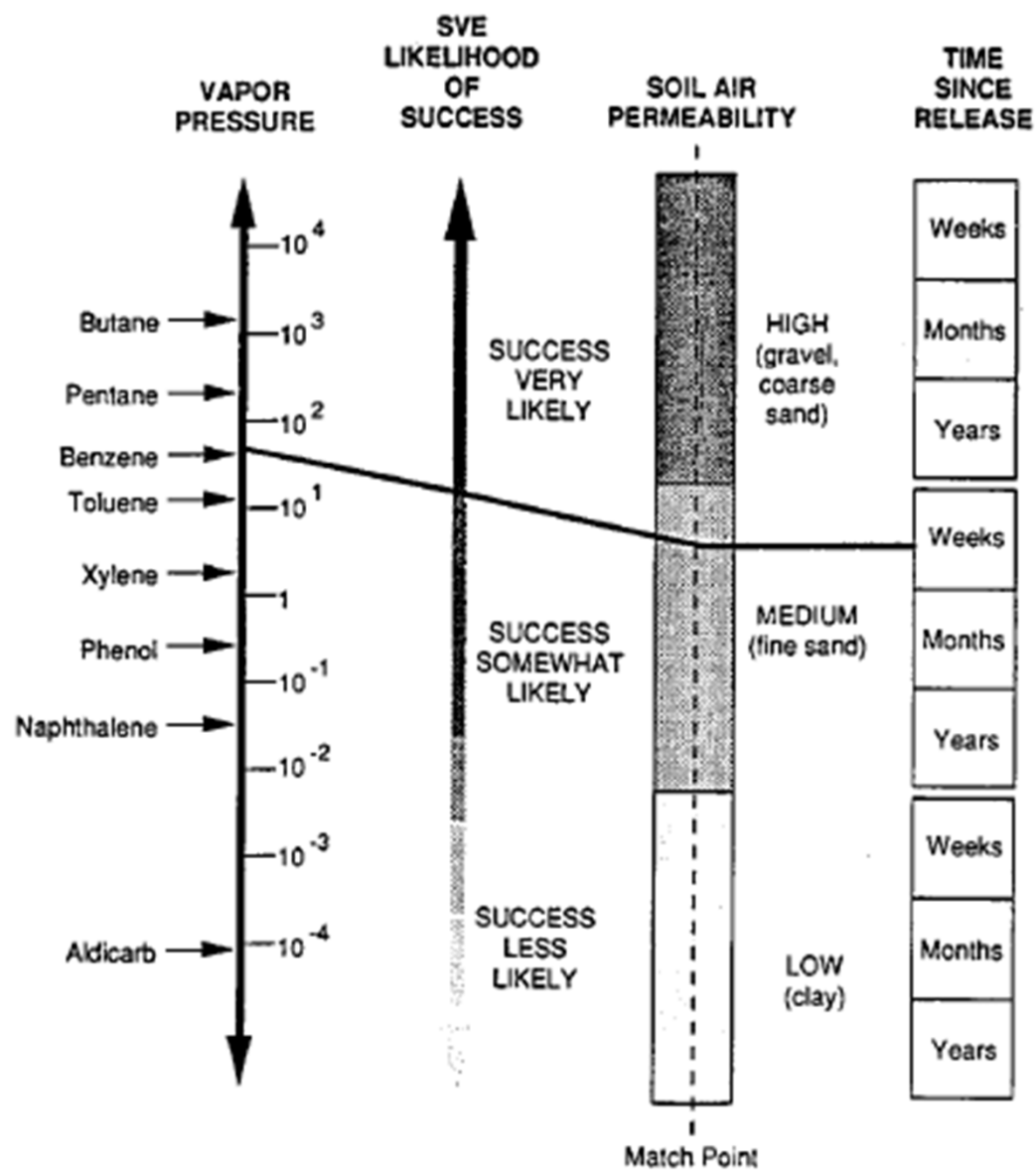
Se la SVE penetrasse la tavola d'acqua, la depressione indotta al pozzo dalla SVE indurrebbe una risalita del livello piezometrico dell'acqua di falda.

Una depressione di 0.2 atm indurrebbe una risalita di circa 2m.

In certe condizioni, ciò potrebbe “allagare” una parte dei pozzi di SVE, riducendone l'efficacia. SVE consigliata per tavola d'acqua di circa 3m, sconsigliata per tavola d'acqua a circa 1m .



# Criteri di applicabilità



# Progettazione della SVE

La progettazione consiste nella definizione di:

a) Parametri operativi del sistema

Portata di estrazione dell'aria

Grado di vuoto al pozzo di estrazione

Raggio di influenza

b) Definizione dei componenti del sistema

Numero dei pozzi di estrazione e loro posizione

Costruzione dei pozzi

Ventilatore di estrazione

Separatore acqua-aria

Piping

Strumentazione

Unità di trattamento dei vapori



# Flusso d'aria nel sottosuolo

Il flusso d'aria può essere calcolato a partire dal seguente bilancio di materia:

$$\phi_a \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = -\nabla \rho_a \cdot V$$

$\phi_a$  = air-filled porosity in soil

$\rho_a$  = the density of soil air

$V$  = velocity vector of airflow.

$$V = \frac{K_a}{\mu_a} \cdot \nabla p$$

$K_a$  = the air permeability tensor

$\mu_a$  = viscosity of air.

$$\rho_a = \frac{p \cdot (MW)}{RT}$$

$$\phi_a \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{p(MW)}{RT} \right\} = \nabla \cdot \left\{ \frac{\rho_a K_a}{\mu_a} \cdot \nabla p \right\}.$$

# Stima della permeabilità all'aria

Come evidente dalle equazioni descritte, il flusso di aria generato è direttamente proporzionale alla permeabilità all'aria.

La stima della permeabilità all'aria è quindi un fattore importantissimo per la corretta valutazione della applicabilità della SVE e per la progettazione.

Esistono diversi metodi di stima; tra questi, analizzeremo:

- Metodi indiretti (stima a partire dalle proprietà del suolo);
- Test di abbassamento della pressione (Pressure drawdown tests)

# Definizione di permeabilità all'aria

Legge di Darcy:  $q = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$

Dove  $K_x = K^* \frac{\rho_w d^2}{\mu}$

d= densità del mezzo

$\mu$  = viscosità del mezzo

D = diametro del grano di sabbia

$$q = - \frac{K^* \rho_w d^2}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{DARCY}$$

Da confrontare con:

$$q = - \frac{N \rho_w g R^2}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{HAGEN-POISEUILLE (flusso laminare attraverso passaggi di piccolo diametro)}$$

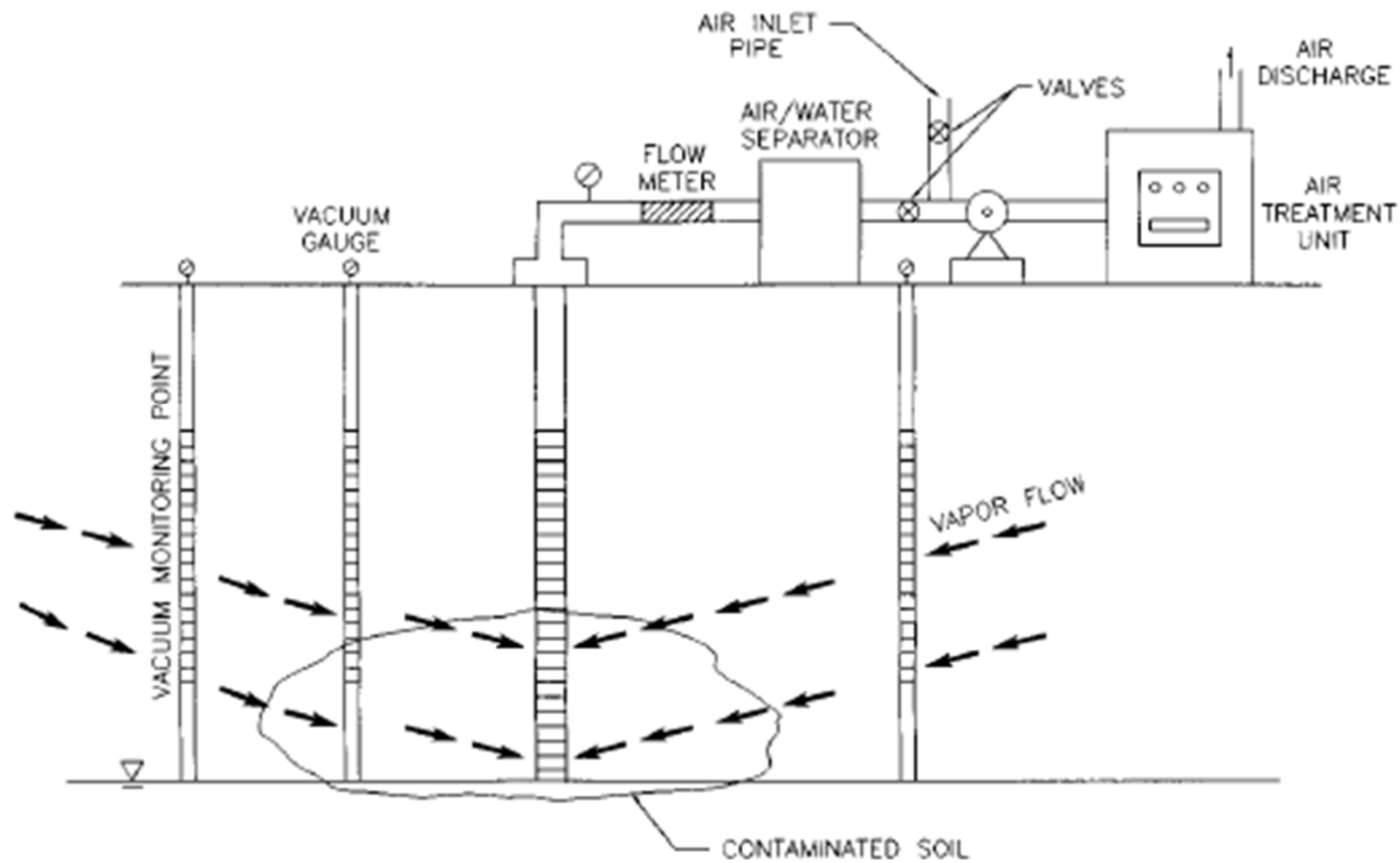
N= fattore di forma relativo alla geometria del passaggio

R= diametro del passaggio

$$K = - \frac{N \rho_w g d^2}{\mu} = - \frac{k \rho_w g}{\mu} \quad \text{dove } k = Nd^2 \text{ è la PERMEABILITA' INTRINSECA (L}^2\text{)}$$

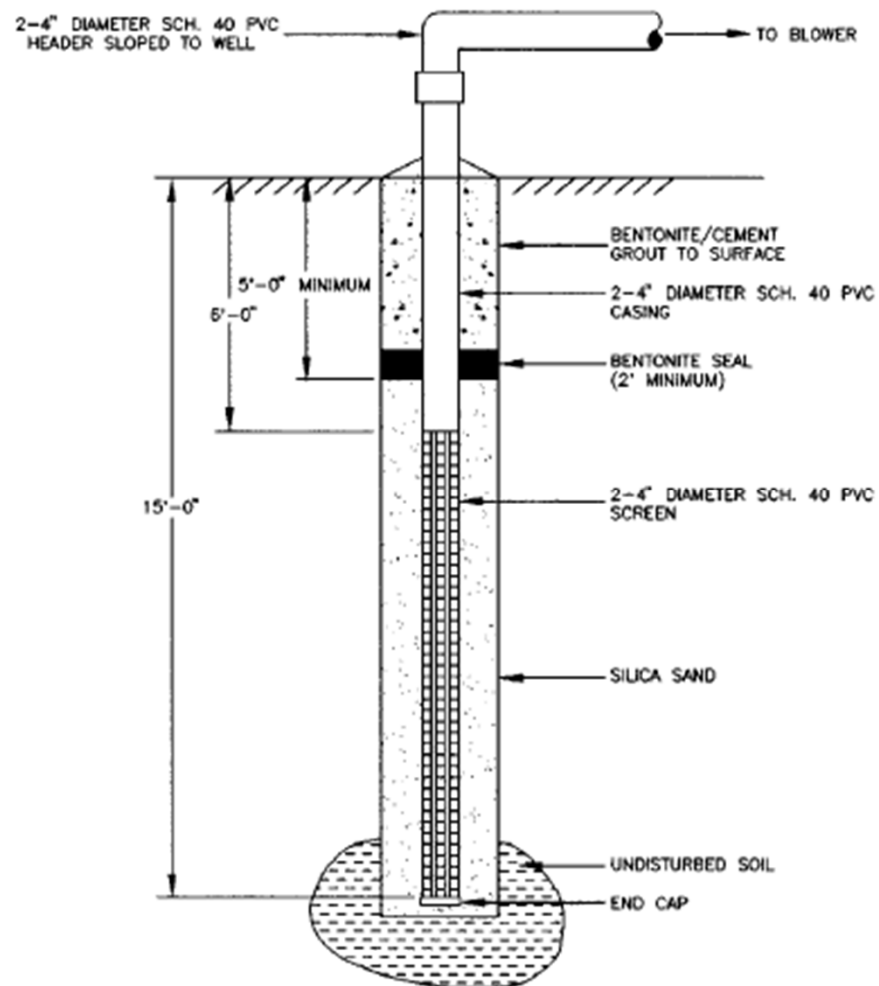
# Test pilota

Il test pilota dovrà prevedere almeno un pozzo di estrazione ed almeno tre punti di monitoraggio, nei quali misurare il vuoto raggiunto.



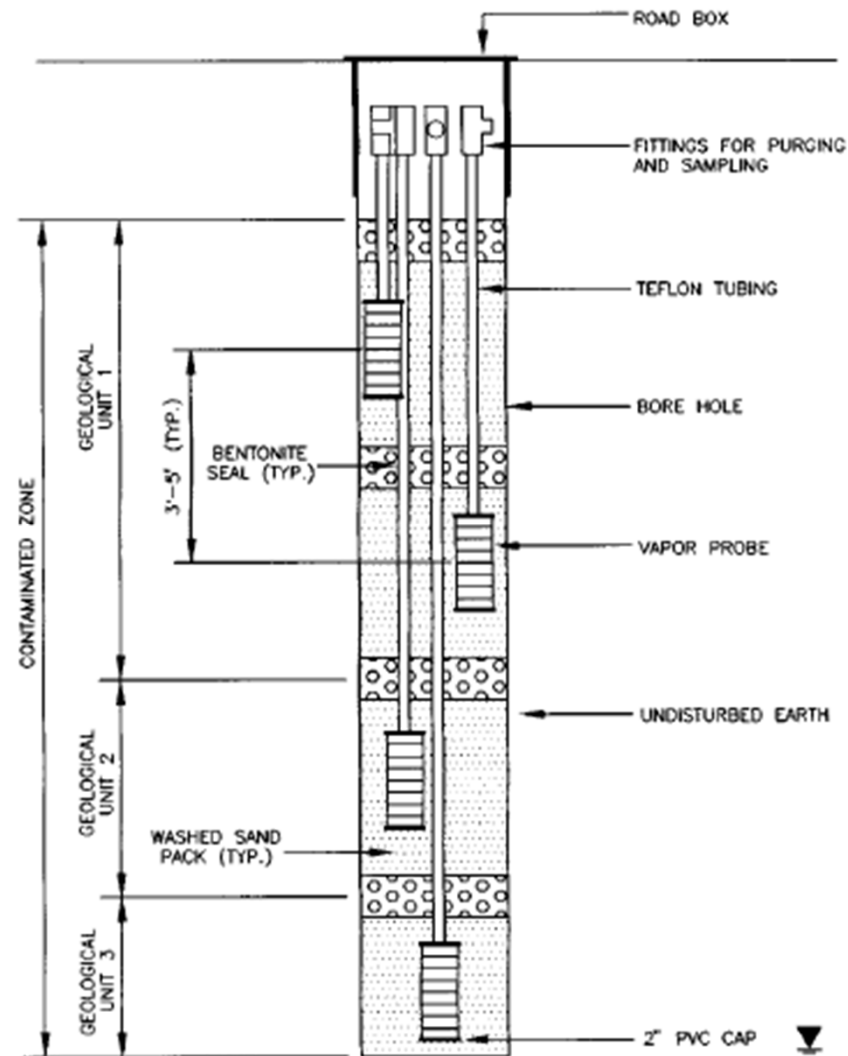
# Test pilota

Il test pilota dovrà prevedere almeno un **pozzo di estrazione**.



# Test pilota

Il test pilota dovrà prevedere almeno tre punti di **monitoraggio**, eventualmente multilivello in caso di eterogeneità del sito



# Test pilota

## **Conduzione del test**

Si avvia il ventilatore di estrazione, regolando la portata di estrazione agendo sulla valvola di regolazione normalmente prevista sul condotto di aspirazione.

Per ogni posizione della valvola (corrispondente ad una determinata portata di estrazione), si attendono circa 30 minuti per stabilizzare il sistema e si misurano:

- Grado di vuoto al pozzo di estrazione;
- Grado di vuoto indotto ai punti di monitoraggio;
- Portata di aria estratta;
- Composizione del gas estratto

Si ripetono le misure per diversi gradi di apertura della valvola.

# Criteri di progettazione

## Approccio del raggio di influenza

Si basa sulle misure raccolte durante il test pilota. In assenza di una banca dati basata su casi già conclusi, è il metodo più affidabile per la progettazione di un intervento full-scale.

Il raggio di influenza è definito come la distanza dal pozzo di estrazione per la quale vi è vuoto sufficiente per indurre flusso d'aria

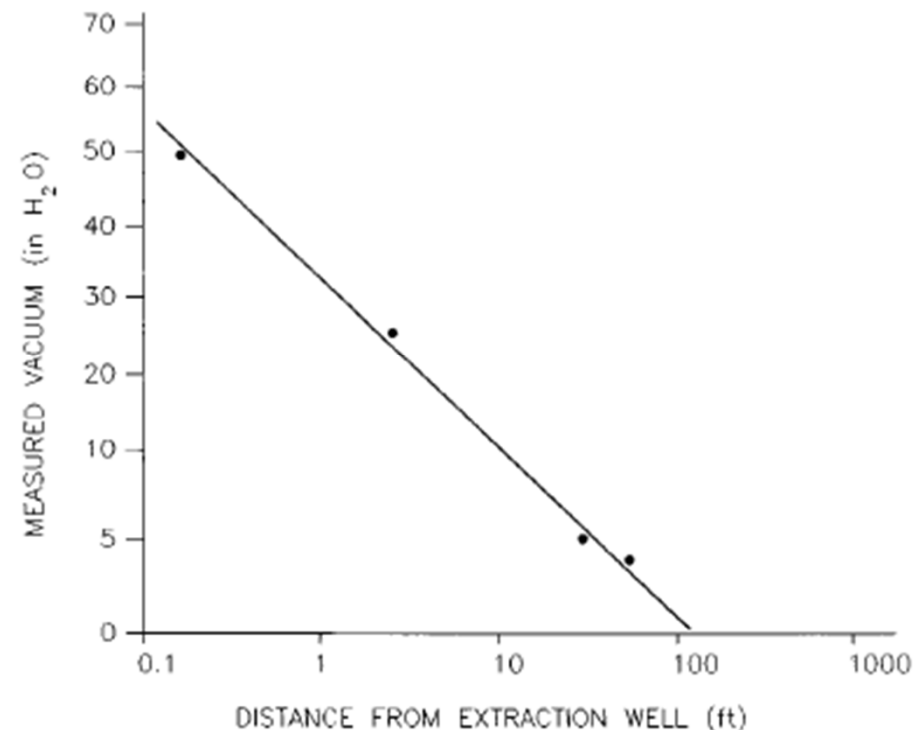
### Valori di cut-off:

0.1 o 1.0 in H<sub>2</sub>O

10% del vuoto indotto al pozzo di estrazione

### R influenza tipici

|                   |         |
|-------------------|---------|
| Sabbia grossolana | 30 m    |
| Sabbia fine       | 20/30 m |
| Limo              | 7-13 m  |
| Argilla           | < 7 m   |





# Stima della permeabilità intrinseca

## Da test pilota

Si basa sulle misure raccolte durante il test pilota.

$P' = B \ln T + A$  (Andamento della pressione al punto di misura)

$$A = \frac{Q}{4\pi m \left(\frac{k}{\mu}\right)}$$

$$B = \frac{Q}{4\pi m \left(\frac{k}{\mu}\right)} \left[ -0.5772 - \ln \left( \frac{r^2 n_g \mu}{4k P_a} \right) \right]$$

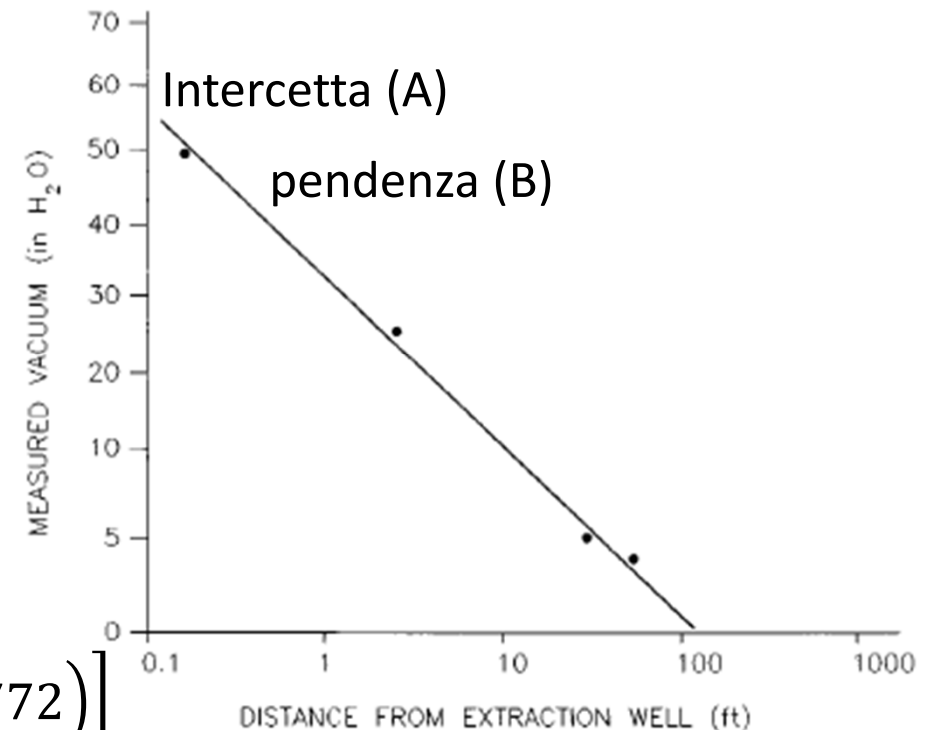
Q= portata di gas estratta

R = distanza dal pozzo di estrazione

$n_g$  = porosità occupata dall'aria

m = spessore dell'unità geologica

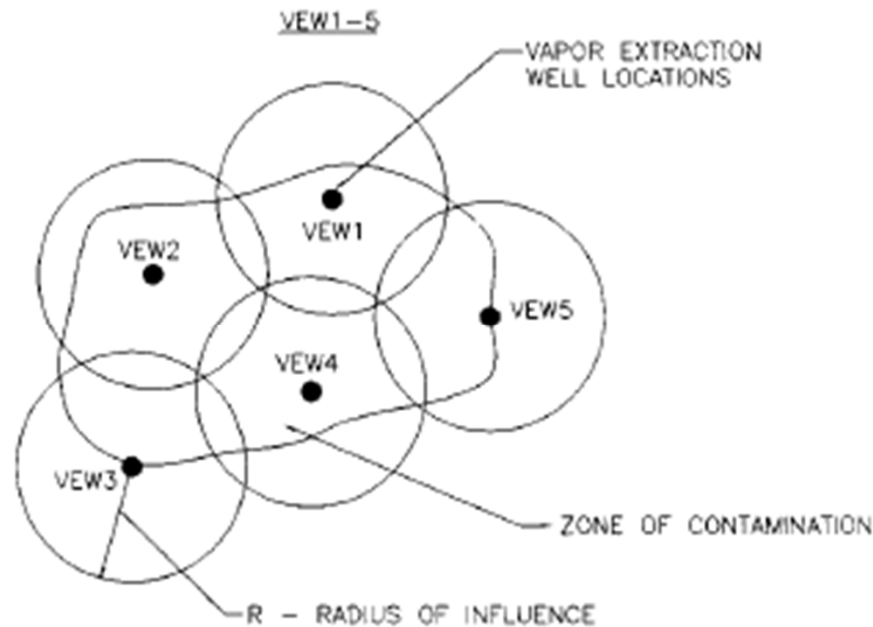
$$k = \left[ \left( \frac{r^2 n_g \mu}{4k P_a} \right) \left( \frac{r^2 n_g \mu}{4k P_a} \right) \exp \left( \frac{B}{A} + 0.5772 \right) \right]$$



# Criteri di progettazione

## Approccio del raggio di influenza

Una volta definito il raggio di influenza, si procede a tracciare una serie di cerchi di raggio pari a quello di influenza, prevedendo una parziale sovrapposizione, onde evitare zone non sufficientemente trattate.



# Criteri di progettazione

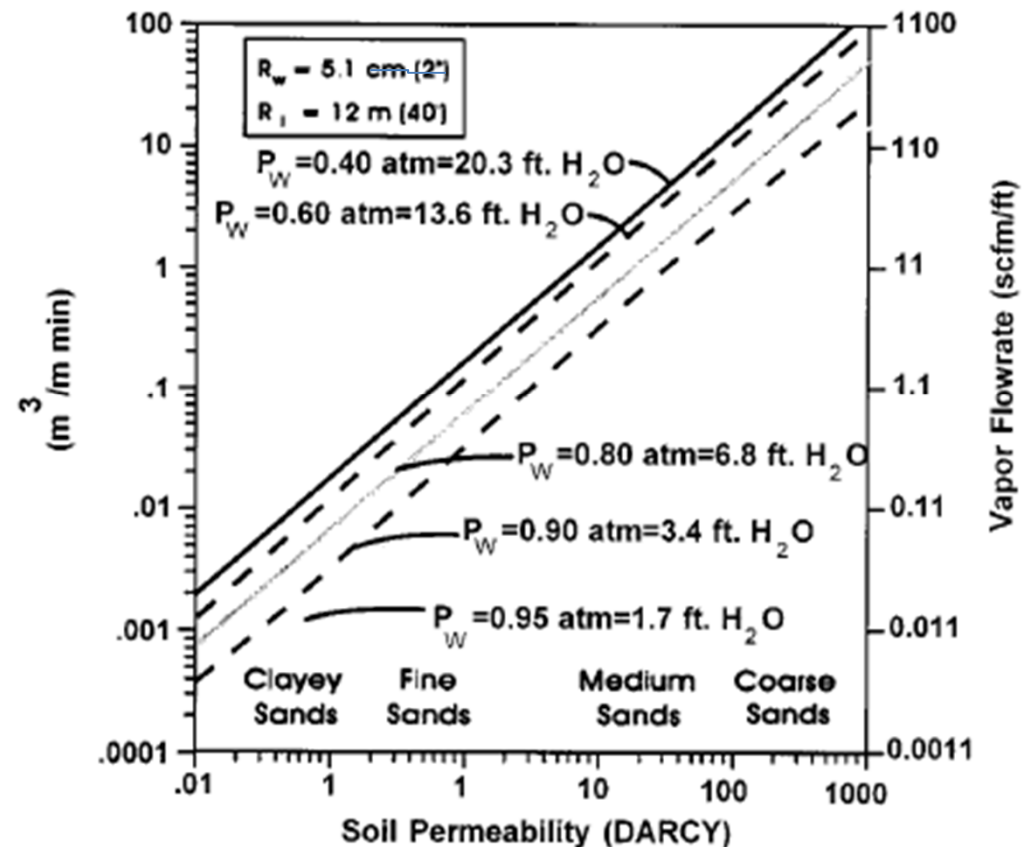
## Approccio del raggio di influenza

Una volta definita la profondità della fenestratura (in genere pari alla profondità della contaminazione) e noto il raggio di influenza, è possibile stabilire le portate di estrazione dell'aria.

$$\frac{Q}{H} = \pi \frac{k}{\mu} P_w \frac{(1 - (\frac{P_{atm}}{P_w})^2)}{\ln(\frac{R_w}{R_i})}$$

H= lunghezza fenestratura (m)  
 k = permeabilità all'aria (cm<sup>2</sup>)  
 P<sub>w</sub> = pressione pozzo (g/cm/s<sup>2</sup>)  
 P<sub>atm</sub> = pressione atm (g/cm/s<sup>2</sup>)  
 R<sub>w</sub>= raggio pozzo SVE (cm)  
 R<sub>i</sub>: raggio di influenza (cm)  
 Q= portata aria pozzo (cm<sup>3</sup>/s)

Ordinata nomogramma:  $\frac{Q}{H} \left( \frac{P_w}{P_{atm}} \right)$



# Valori tipici di progettazione

## **Portata di estrazione**

Da studi pilota ed applicazioni: 17-170 m<sup>3</sup>/h

## **Depressione testa pozzo**

Da studi pilota ed applicazioni: valori tipici 0.4-0.9 atm