



# INTRODUZIONE ALLE BONIFICHE AMBIENTALI

---

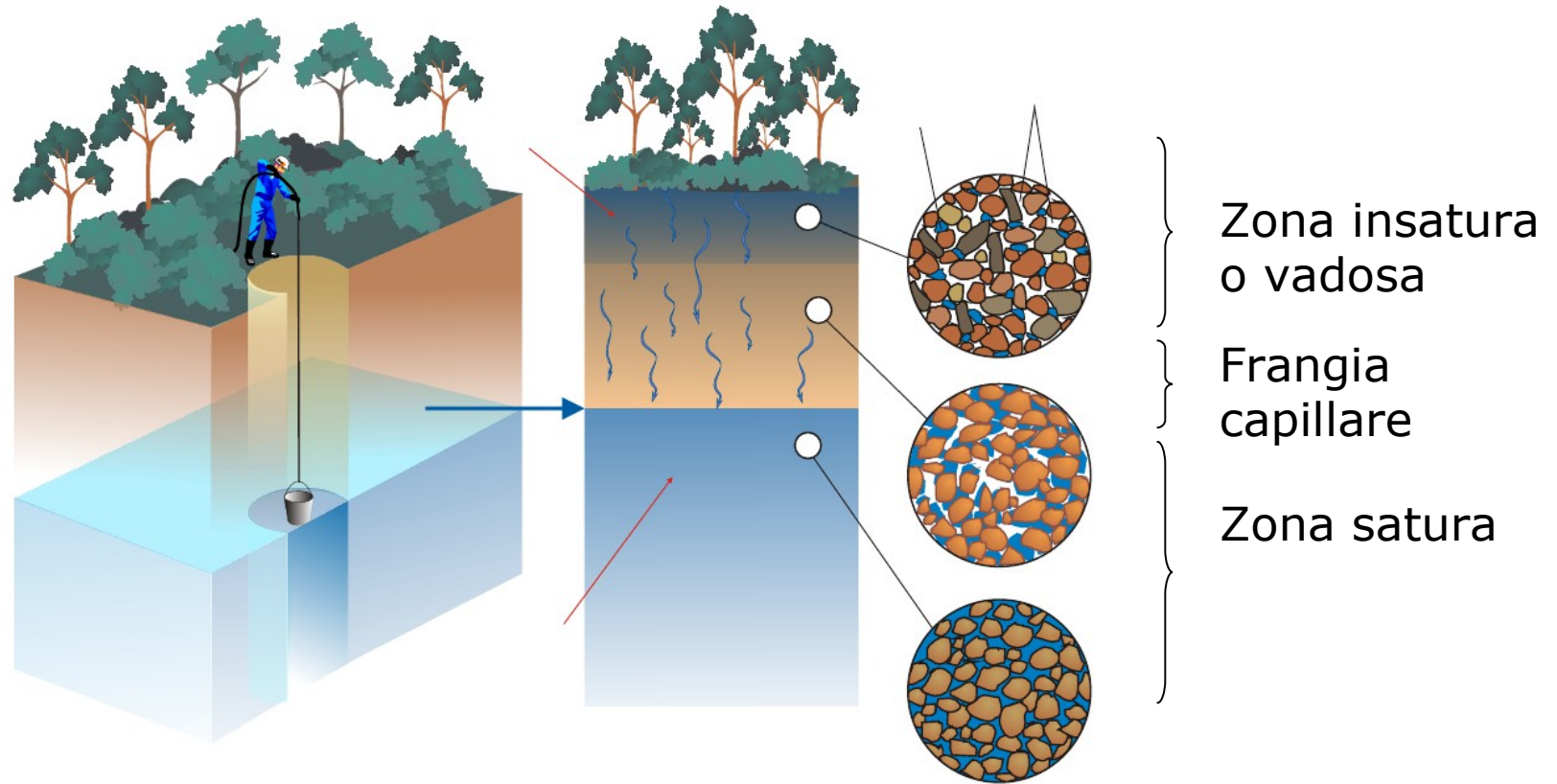
## Tecnologie di bonifica

Ing. Loris Dallago

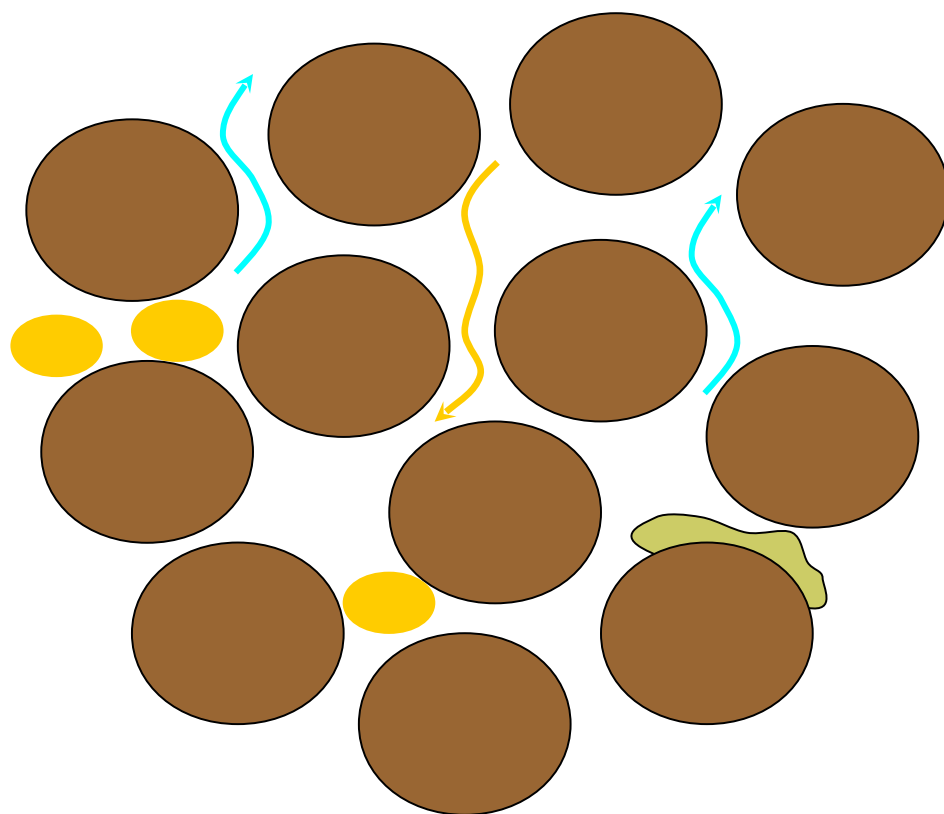
I.S.E.R. srl  
Loc. Acquaviva, 4  
38060 BESENELLO (TN)



# Modello del terreno



# Modello del terreno



Trasporto del  
contaminante in  
fase liquida

Volatilizzazione  
del contaminante  
in fase gassosa

Adsorbimento del  
contaminante sui  
granuli di terreno

Trattenimento  
del contaminante  
fra i granuli di  
terreno

# Mobilità e comportamento del contaminante nel terreno

---

## □ Sono influenzati da:

- processi idrodinamici: condizionano il trasporto dei contaminanti nel flusso degli acquiferi e sono determinati da litologia, permeabilità, gradiente idraulico;
- processi abiotici: influiscono sul trasporto a causa delle interazioni delle sostanze inquinanti con le fasi stazionarie (adsorbimento, scambio ionico) o sulla speciazione (formazione di precipitati, idrolisi, forme volatili);
- processi biotici: provocano la trasformazione o la completa degradazione dei contaminanti organici.

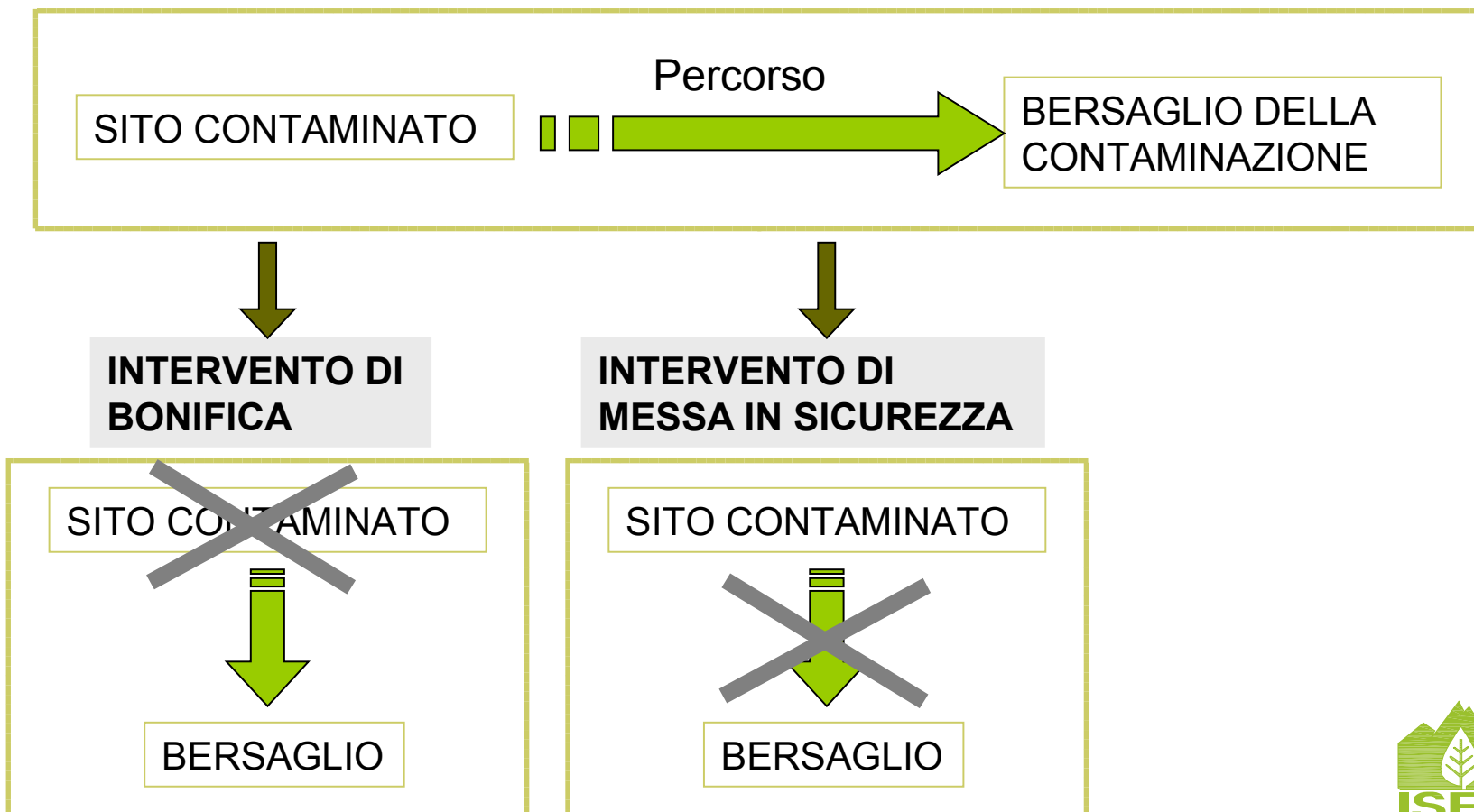
# Caratteristiche di suolo e sottosuolo

---

- elementi di geologia, idrogeologia e parametri fisici del suolo
  - caratteristiche litologiche mineralogiche e geotecniche degli strati geologici
  - assetto stratigrafico e strutturale del sottosuolo
  - caratteristiche della circolazione idrica sotterranea
    - conducibilità idraulica/permeabilità
    - velocità della falda
- caratteristiche chimico-fisiche del suolo
  - area superficiale dei solidi
  - carica elettrica superficiale

# Interventi

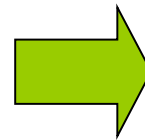
- Distinzione tra Bonifica e Messa in Sicurezza utilizzando il modello Sorgente – Percorso - Bersaglio



# Interventi

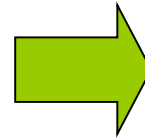
---

□ Tecnologie di bonifica



Eliminare o ridurre la  
concentrazione di  
inquinante nelle matrici  
ambientali

□ Tecnologie di messa  
in sicurezza



Impedire la migrazione  
degli inquinanti dalla  
sorgente ai bersagli

# Interventi di bonifica

---

## □ Classificazione delle tecnologie di bonifica sulla base di:

### ■ Principio di trattamento

- Trattamenti per la distruzione delle molecole dei contaminanti
- Trattamenti di mobilizzazione
- Trattamenti di inertizzazione o contenimento
- Escavazione e smaltimento in sito adeguato

### ■ Movimentazione della matrice contaminata

(class. D Lgs. 152/2006)

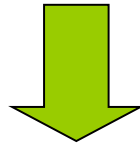
- in situ: se intervengono direttamente sulla matrice contaminata senza asportarla
- ex situ: richiedono l'asportazione della matrice contaminata ed il trattamento in altre aree.
  - on-site: trattamento sull'area interessata
  - off-site: trattamento in impianti all'esterno dell'area interessata



# Interventi di bonifica

---

- Il successo di un intervento di bonifica dipende da:
  - Conoscenza del problema: caratterizzazione del sito e dell'ambiente esterno



MODELLO CONCETTUALE

- Sostenibilità di una bonifica:
  - Sostenibilità ambientale
  - Sostenibilità territoriale
  - Sostenibilità economica
  - Sostenibilità del progetto di bonifica

# Interventi di bonifica

---

## □ Sostenibilità Ambientale

- Riduzione dei rischi di esposizione a livelli ammissibili;
- Riduzione progressiva dei carichi inquinanti residui e contestuale miglioramento della qualità delle matrici ambientali:
- minimizzazione della produzione di rifiuti e dell'estrazione di acqua di falda.

## □ Sostenibilità Economica

- Piena compatibilità del piano di bonifica con le attività in essere sulle aree e con i programmi di sviluppo:
- Sostenibilità economica degli interventi (definizione contestuale del piano di bonifica con relativi costi e del piano di riqualificazione con i relativi benefici)

# Interventi di bonifica

---

## □ Sostenibilità territoriale

- uso efficiente del territorio che minimizzi l'occupazione di aree agricole e naturali e valorizzi le aree abbandonate o contaminate

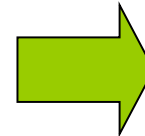
## □ Sostenibilità del progetto

- Disincentivare lo smaltimento a discarica;
- Limitare l'impiego di sistemi di messa in sicurezza permanente
- Evitare di trasformare sistemi di MISE in sistemi definitivi di trattamento dell'acquifero;
- Privilegiare l'impiego di tecnologie in situ;
- Maggiore uso di test dimostrativi a scala industriale;
- Maggiore impiego di tecniche innovative in situ

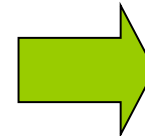
# Interventi di bonifica

---

- Caratterizzazione di un sito al fine di conoscere:
  - Natura, estensione e grado di contaminazione di ogni matrice ambientale
  - Condizioni ambientali, caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del sito e dell'area



individuazione delle tecnologie applicabili



definizione dell'applicabilità al sito in esame delle tecnologie selezionate

# Scelta della tecnologia di bonifica

---

- ❑ Spesso, per un caso di contaminazione, più tecniche di bonifica sono potenzialmente applicabili: è quindi necessario scegliere l'intervento più appropriato.
- ❑ La scelta della tecnologia di risanamento comprende:
  - uno screening delle tecniche potenzialmente applicabili (basato sulla letteratura)
  - uno studio in laboratorio
  - un'applicazione a scala pilota sul sito contaminato
- ❑ La scelta degli interventi di bonifica deve sempre tenere conto:
  - di quali inquinanti sono presenti
  - della fase in cui si trovano gli inquinanti da rimuovere, che può essere:
    - ❑ fase solida (terreno, rocce, sedimenti, fanghi)
    - ❑ Fase liquida (acqua di falda, corpi idrici superficiali, percolato)
    - ❑ fase gassosa (emissioni gassose dal terreno o vapori sprigionati durante i trattamenti)
  - delle caratteristiche geotecniche del terreno, in particolare permeabilità ed eterogeneità

# Scelta della tecnologia di bonifica

---

- Uno strumento molto utile per individuare la tecnica di bonifica più adatta per risanare un caso di contaminazione sono le matrici di screening
  
- Le matrici di screening valutano ogni tecnica di bonifica in base a vari criteri e permettono di definire se, per il caso che si sta analizzando, sia:
  - applicabile
  - potenzialmente applicabile
  - non applicabile

# Scelta della tecnologia di bonifica

---

- ❑ I criteri utilizzati per confrontare le vari tecnologie disponibili sono:
  - stato della tecnologia
  - combinazione con altri trattamenti
  - residui
  - tipo di investimento richiesto
  - disponibilità
  - tipo di contaminanti trattati
  - affidabilità della tecnologia e durabilità nel tempo
  - tempi di bonifica
  - costi di bonifica
  
- ❑ Una di queste matrici è la Remediation Technologies Screening Matrix sviluppata dall'ente americano FRTR

# Tecnologie per la bonifica



## Matrice di screening delle tecnologie di bonifica

[illegible]

[http://www.frtr.gov/matrix2/section3/table3\\_2.pdf](http://www.frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf)

**TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX**

<b>Hitting Codes</b> ● Above Average ○ Average N/A Not Applicable * "Insufficient Data" * Level of effectiveness highly dependent upon specific site conditions and its application	Development Status	Relative Overall Cost & Performance	Availability	Biodegraded VOC's	Biodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Fuels	Inorganics	Refractronics	Capitons		
Treatment Type	O&M	Capital	Reliability & Sustainability	Reference Costs	Time	Biodegraded VOC's	Biodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Fuels	Inorganics	Refractronics	Capitons
Treatment Type	O&M	Capital	Reliability & Sustainability	Reference Costs	Time	Biodegraded VOC's	Biodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Fuels	Inorganics	Refractronics	Capitons
Treatment Type	O&M	Capital	Reliability & Sustainability	Reference Costs	Time	Biodegraded VOC's	Biodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Nonbiodegraded VOC's	Fuels	Inorganics	Refractronics	Capitons
<b>Solid, Sediment, Dredged, and Sludge</b>													
<b>3.1 Site Biological Treatment</b>													
3.1.1 Bioventing	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
3.1.2 Enhanced Bioremediation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.1.3 Phytoremediation	●	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.2 Site Physical-Chemical Treatment</b>													
3.2.1 Chemical Oxidation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.2.2 Electrochemical Separation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.2.3 Flotation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.2.4 Soil Washing	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.2.5 Hot Vapor Extraction	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.2.6 Solidification/Stabilization	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.3 Site Thermal Treatment</b>													
3.3.1 Thermal Treatment	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.4 Site Biological Treatment (assuming excavation)</b>													
3.4.1 Biotreaters	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.4.2 Composting	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.4.3 Landfarming	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.5 Site Physical-Chemical Treatment (assuming excavation)</b>													
3.5.1 Chemical Extraction	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.5.2 Chemical Reduction/Oxidation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.5.3 Dehalogenation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.5.4 Desorption	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.5.5 Soil Washing	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.5.6 Steam Stripping	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.6 Site Thermal Treatment (assuming excavation)</b>													
3.6.1 Hot Air Concentration	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.6.2 Incineration	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.6.3 Open Burn/Pilot Detonation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.6.4 Pyrolysis	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.6.5 Thermal Destruction	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.7 Containment</b>													
3.7.1 Landfill	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.7.2 Landfill Cap/Engineered Barriers	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.8 Other Treatment</b>													
3.8.1 Evaporation Ponds, Off-Gas Control	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>Ground Water, Surface Water, and Leachate</b>													
<b>3.9 Site Biological Treatment</b>													
3.9.1 Enhanced Bioremediation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.9.2 Microbial Fuel Cells	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.9.3 Monitored Natural Attenuation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.9.4 Phytoremediation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.10 Site Physical-Chemical Treatment</b>													
3.10.1 Air Stripping	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.2 Bioventing	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.3 Chemical Oxidation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.4 Soil Washing	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.5 Chemical Reduction/Oxidation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.6 Desorption	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.7 Thermal Treatment	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.8 Vapor Stripping	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.9 Air Stripping	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.10.10 Groundwater Treatment	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.11 Site Biological Treatment</b>													
3.11.1 Bioventing	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.11.2 Enhanced Bioremediation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.12 Site Physical-Chemical Treatment (assuming pumping)</b>													
3.12.1 Air Stripping	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.12.2 Enhanced Bioremediation	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.12.3 Air Stripping	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.12.4 Groundwater Pumping/Sparging	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.12.5 Groundwater Pumping/Sparging & Treat	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.12.6 Air Exchange	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.12.7 Groundwater Pumping/Sparging	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.12.8 Groundwater Pumping/Sparging	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.13 Containment</b>													
3.13.1 Physical Barriers	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.13.2 Deep Well Injection	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.14 Air Emissions/Off-Gas Treatment</b>													
3.14.1 Bioventing	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.2 High Energy Detonation	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.3 Electrochemical Separation	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.4 Flotation	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.5 Oxidation	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.6 Sorption	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.7 Vapor Stripping	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.8 Vapor Stripping	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.9 Vapor Stripping	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.10 Vapor Stripping	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.11 Vapor Stripping	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.14.12 Vapor Stripping	●	N/A	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○

**TABLE 3-1: DEFINITION OF SYMBOLS USED IN THE TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX**

Factors	● Above Average	○ Average	○ Below Average	Other
---------	-----------------	-----------	-----------------	-------



# Matrice di scereening

## TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance					Availability	Nonhalogenated VOC's	Halogenated VOC's	Nonhalogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives	
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time										
Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge																	
3.1 In Situ Biological Treatment																	
4.1 Bioventing	●	●	●	●	●	●	○	●	●	◇	●	○	●	○	◇	○	
4.2 Enhanced Bioremediation	●	●	○	○	○	●	○	●	●	●	●	◇	●	◇	◇	●	
4.3 Phytoremediation	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	◇	○	○	○	○	
3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment																	
4.4 Chemical Oxidation	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	◇	○	○	
4.5 Electrokinetic Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	
4.6 Fracturing	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
4.7 Soil Flushing	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●	○	○	○	●	○	○	
4.8 Soil Vapor Extraction	●	○	○	○	●	●	○	●	●	●	○	○	●	○	○	○	
4.9 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	●	○	

# Matrice di screening

		Composti Inorganici							Composti Organici																	
		Arsenico	Cadmio	Cromo	Piombo	Mercurio	Zinco	Altri metalli e composti inorganici	Idrocarburi Aromatici	Idrocarburi Policiclici Aromatici	Idrocarburi Alifatici clorurati cancerogeni	Idrocarburi Alifatici clorurati non cancer.	Idrocarburi Alifatici alogenati cancer.	Nitrobenzeni	Clorobenzeni	Fenoli non clorurati	Fenoli clorurati	Ammine aromatiche	Fitofarmaci	Diossine e furani	Tempi	Necessità di manutenzione/ monitoraggio a lungo termine	Impatti a breve e lungo termine sulle risorse naturali	Applicabilità e limiti	Casi Studio	
Suolo, sedimenti																										
- trattamento biologico in situ																										
- Bioventing		🔴	🔴	🟡	🔴	🔴	🔴	🔴	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🔴	🟢	🟢	🔴	🟢	🔴	🔴	🟡	🟡	🟢		txt	html
- Bioremediation		🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🔴	🟢	🟢	🟡	🟢	🔴	🔴	🟡	🔴	🟢		txt	html
- Phytoremediation		🟢	🟢	🟡	🟡	🟢	🟢	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🔴	🟢	🟡	🟡	🟢	🔴	🔴	🔴	🔴	🟢		txt	html
- trattamento chimico-fisico in situ																										
- Ossidazione chimica		🔴	🔴	🟡	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🟢	🟢	🟡	🔴	🟡	🔴	🟡	🔴	🟡	🟡	🟡	🟢	🔴	🟡	txt	html
- Ossidazione elettrochimica		🔴	🔴	🟡	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🟢	🟢	🟡	🔴	🟡	🔴	🟡	🔴	🟡	🟡	🟡	🔴	🔴	🟡	txt	html
- Separazione elettrocinetica		🔴	🟢	🟢	🟢	🟢	🔴	🟢	🔴	🔴	🟡	🟡	🟡	🔴	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🔴	🔴	🟡	txt	html
- Soil Flushing		🔴	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🔴	🔴	🟢	🟢	🟢	🔴	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🔴	🔴	🟡	txt	html
- Soil Vapour Extraction		🔴	🟢	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🟢	🟢	🟢	🟢	🔴	🟡	🟡	🟡	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🟡	🟡	txt	html
- Solidificazione/Stabilizzazione		🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🟡	🔴	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟢	🟡	🟡	txt	html

# Tecnologie per la bonifica

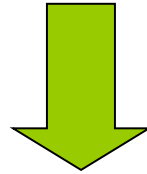
<b>Tecnologia</b>	<b>Stato</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Stato</b>
<b>EX SITU</b>			
Scavo e smaltimento	XXX	Estrazione con solvente	XX
Landfarming	XXX	Soil washing	XX
Biopile	XXX	Desorbimento termico	XX
Compostaggio	XX	Fitorisanamento	XX
Solidificazione/stabilizzazione	XX	Pump and treat (P&T)	XXX
<b>IN SITU</b>			
Barriere fisiche o idrauliche	XXX	Biorisanamento aerobico (es. ORC)	XX
Soil vapor extraction (SVE)	XXX	Declorogenazione riduttiva (RD)	X
Bioventing	XXX	Fratturazione idraulica	X
Air sparging	XXX	Solidificazione/stabilizzazione	XX
Biosparging	XXX	Barriere permeabili reattive (PRB)	XX
In well stripping (GCW)	XX	Metodi elettrochimici (ECRT)	X
Multi-Phase Extraction (MPE)	XXX	Trattamenti termici	X
Soil flushing	XX	Attenuazione naturale	X
Ossidazione chimica	XX	Iniezione di vapore	XX

XXX uso frequente, XX uso meno frequente, X uso dimostrativo o pilota

# Ossidazione chimica in situ

---

- Iniezione di sostanze chimiche ossidanti (perossido di idrogeno, permanganato di potassio, ozono) in presenza o meno di catalizzatori



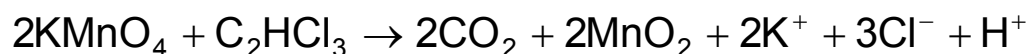
Si ottengono come prodotti finali **acqua e anidride carbonica** oppure composti più semplici, come **intermedi di reazione**

- Composti trattati: solventi aromatici, TCE, TeCA, DCE, VC, MtBE, IPA e prodotti petroliferi

# Ossidazione chimica in situ

## □ Agenti ossidanti:

### ■ Permanganato di potassio



### ■ Perossido di idrogeno (genera radicali liberi). Per ottenere livelli di efficienza in un tempo rapido si utilizzano catalizzatori metallici, il più utilizzato dei quali è il ferro:

#### Reagente di Fenton



### ■ Persolfato: l'azione del persolfato può avvenire attraverso un'ossidazione diretta oppure attraverso la formazione di radicali liberi persolfato



### ■ ozono: agisce direttamente o generando radicali liberi intermedi

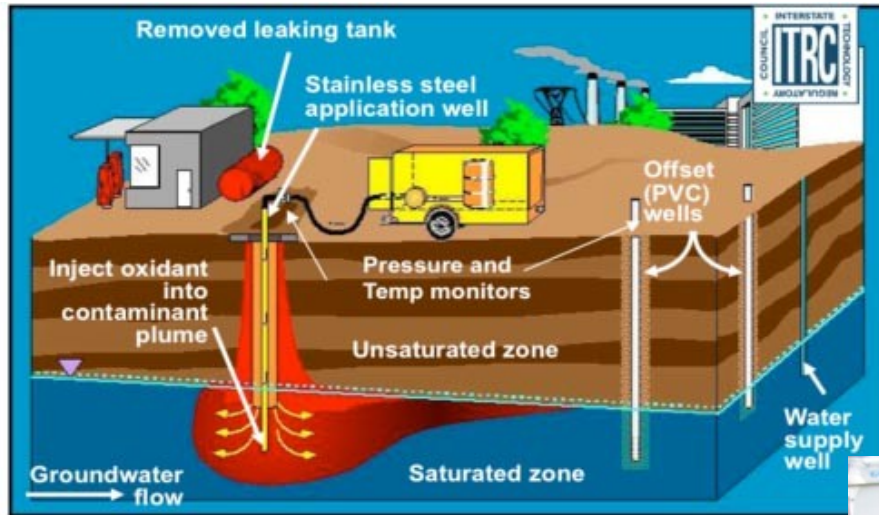
# Ossidazione chimica in situ

---

- Le condizioni che garantiscono il successo del trattamento:
  - Efficacia della reazione di ossidazione
  - Controllo dello svolgimento della reazione
  - Effettiva distribuzione dei reagenti nelle zone contaminate



# Ossidazione chimica in situ



In-Situ Chemical Oxidation (ISCO)





# Ossidazione chimica in situ

---





# Ossidazione chimica in situ

Condizioni di applicabilità al sito	Elementi necessari alla progettazione
<p>Tipologia del contaminante</p> <p>Assenza di eterogeneità stratigrafiche</p> <p>Buona permeabilità</p> <p>Basso contenuto di sostanza organica</p> <p>Basso contenuto di ferro in forma solubile</p> <p>Condizioni di pH adeguate</p> <p>2-4 per la Fenton</p> <p>7-8 per il permanganato</p> <p>pH tipici del suolo per l'ozono</p>	<p>Concentrazione dei contaminanti</p> <p>Contenuto in sostanza organica naturale</p> <p>COD</p> <p>pH del suolo e/o dell'acqua di falda</p> <p>Permeabilità</p> <p>Contenuto di ossigeno disciolto</p> <p>ORP</p>

# Ossidazione chimica in situ

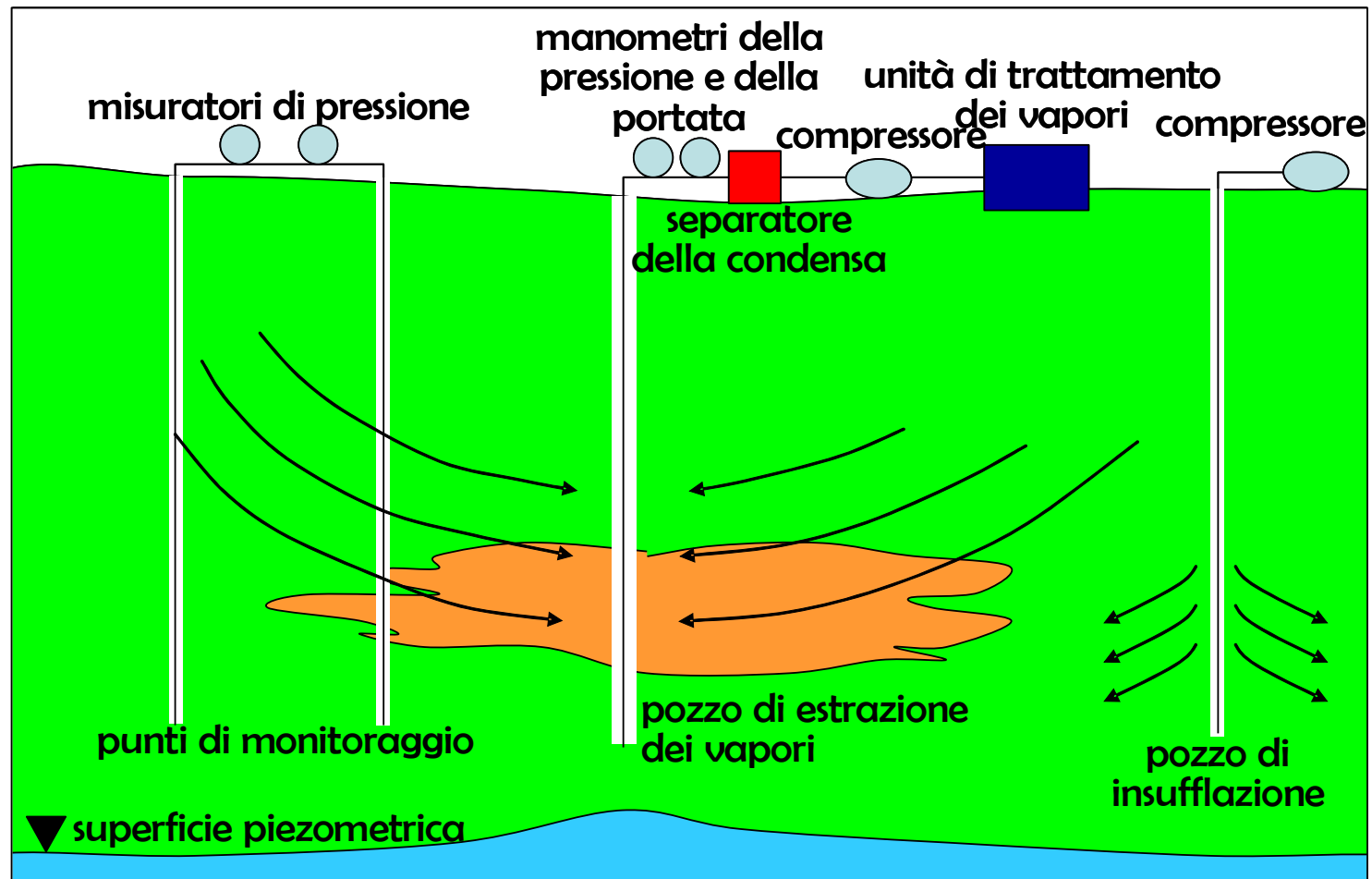
Vantaggi	Svantaggi
<p>Elevata velocità di trattamento</p> <p>Semplicità di applicazione</p> <p>Non necessita di escavazione del terreno contaminato</p> <p>Non produce residui e/o rifiuti</p>	<p>Possibilità di reazioni incontrollate esotermiche con il reagente di Fenton</p> <p>Possibilità di formazione di composti intermedi tossici</p> <p>Un flusso eccessivo dei reagenti immessi può causare la mobilitazione di contaminanti da porzioni dell'acquifero con possibilità di migrazione dei contaminanti al di fuori della zona di trattamento</p> <p>Comporta l'introduzione di reagenti chimici nell'ambiente</p> <p>Può risultare un trattamento costoso se le caratteristiche del sito non sono idonee (elevata percentuale di carbonati o bicarbonato per il Fenton e di materia organica nel suolo e/o nelle acque sotterranee)</p>

# Estrazione di Vapore (Soil Vapor Extraction)

---

- Nella zona insatura viene introdotto un flusso di aria e gli inquinanti a maggiore volatilità si trasferiscono nella fase vapore
- Il flusso di vapore viene estratto e trattato
- Meccanismi che intervengono:
  - Desorbimento dalla matrice solida e trasferimento nella fase gassosa
  - Trasferimento nel flusso di vapore dei componenti volatili già presenti nell'aria dei pori
  - Volatilizzazione da un liquido organico in fase separata
  - Volatilizzazione dei composti disciolti in fase acquosa

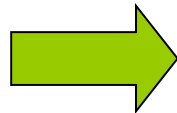
# Estrazione di Vapore (Soil Vapor Extraction)



# Estrazione di Vapore (SVE)

---

- Si ottiene un'ossigenazione



**attivazione di processi  
biologici**

- Applicata a VOC, SVOC, composti alogenati (cloroetano, cloroformio, VC, clorobenzene, diclorometano, dicloroetano, dicloroetilene, diclorobenzene, TCE, tetracloroetano, TeCA, piombotetraetile) e non (BTEX, fenoli, benzina)

# Estrazione di Vapore (SVE)

Condizioni di applicabilità al sito	Elementi necessari alla progettazione
Caratteristiche del sito: Permeabilità all'aria del suolo Permeabilità intrinseca Stratificazione ed omogeneità litologica Profondità del livello di falda Umidità del suolo Percentuale di sostanza organica naturale Caratteristiche dei contaminanti Pressione di vapore Punto di ebollizione Costante di Henry	Concentrazione iniziale dei contaminanti nel suolo e nella fase vapore Volume di suolo da trattare Porosità efficace Presenza di strutture interraste Raggio di influenza di ogni pozzo Depressione da indurre alla testa del pozzo Portata di insufflazione Portata di estrazione Impianto di trattamento dei vapori estratti Limiti da rispettare per lo scarico in atmosfera

# Estrazione di Vapore (SVE)

Vantaggi	Svantaggi
<p>Riduce efficacemente i contaminanti nella zona insatura e, in minor misura, anche il prodotto libero in galleggiamento</p> <p>Brevi tempi di trattamento (da alcuni mesi a un paio di anni)</p> <p>Le attrezzature sono facilmente installabili;</p> <p>Si possono trattare vaste aree senza interrompere le normali attività svolte sul sito e può essere trattato anche il terreno al di sotto di edifici esistenti</p> <p>Sono eliminati i rischi e i costi relativi al trasporto di notevoli quantità di suolo contaminato</p> <p>I costi sono contenuti</p> <p>Può essere utilizzata in associazione ad altre tecnologie di trattamento, come il bioventing e l'air sparging</p>	<p>Difficilmente si raggiungono abbattimenti delle concentrazioni di contaminante superiori al 90%</p> <p>È applicabile solo alla zona insatura del terreno</p> <p>Non è applicabile per il trattamento di terreni contaminati da composti a bassa volatilità</p> <p>È fortemente influenzata dalle caratteristiche del sottosuolo trattato. Zone a bassa permeabilità, ad elevato contenuto organico o ricche di canali preferenziali o fratture possono ridurre sostanzialmente l'efficacia complessiva di estrazione</p> <p>Può richiedere alti costi per il trattamento dell'aria estratta</p>

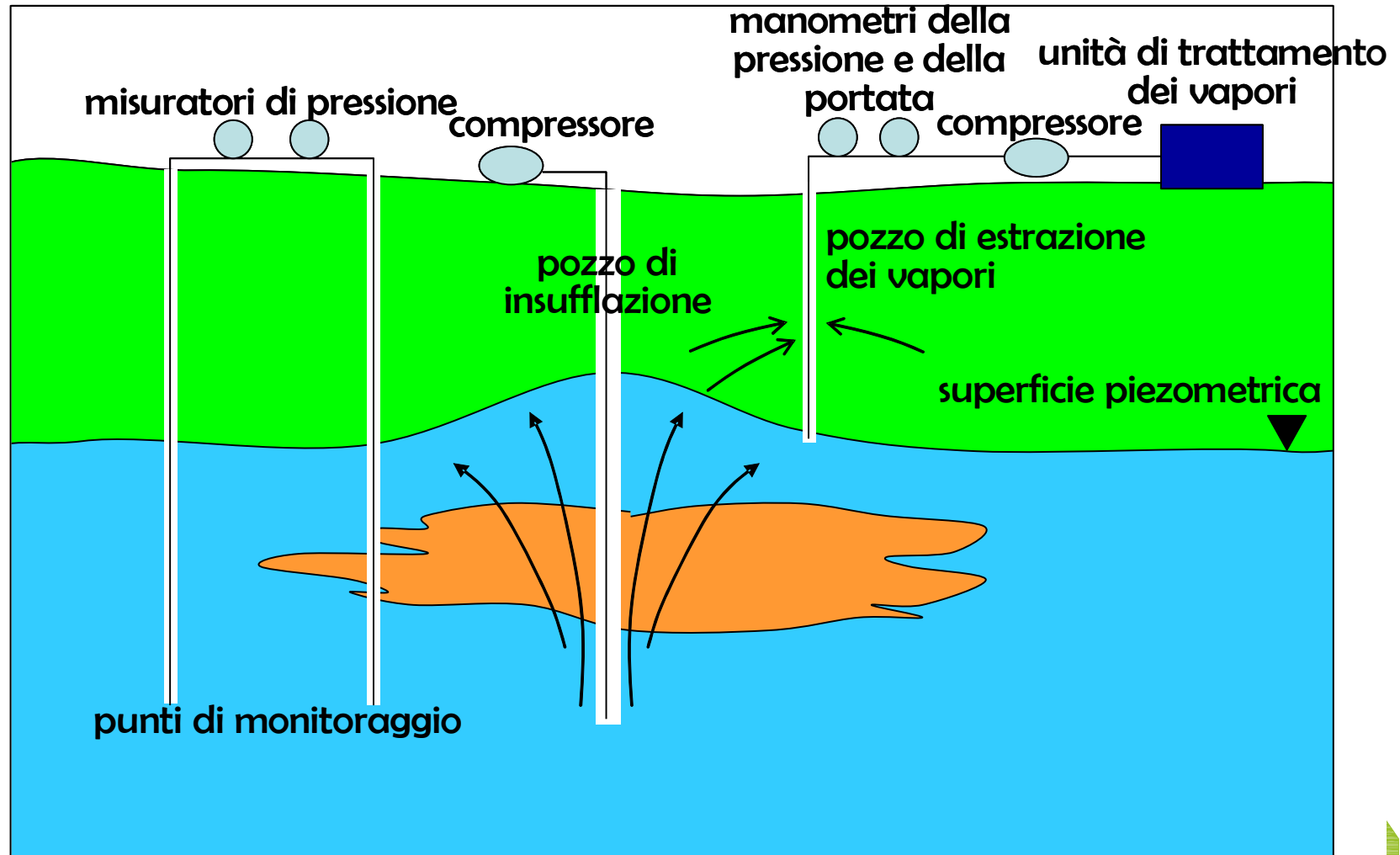
# Air sparging

---

- Iniezione di aria atmosferica in pressione nell'acquifero con passaggio degli inquinanti dalla fase liquida e solida alla fase vapore
- Meccanismi coinvolti:
  - Trasferimento in fase aeriforme per stripping dei VOC disciolti in acqua
  - Volatilizzazione dei contaminanti disciolti in acqua o assorbiti alla matrice solida
  - Volatilizzazione di liquidi organici nell'acquifero o in fase separata



# Air sparging



# Air sparging

<b>Condizioni di applicabilità al sito</b>	<b>Elementi necessari alla progettazione</b>
Caratteristiche del sottosuolo: Condizioni di porosità e permeabilità all'aria, sia della zona satura che dello spessore insaturo Struttura del suolo e stratificazione Tipo di acquifero Caratteristiche dei contaminanti Pressione di vapore Punto di ebollizione Costante di Henry Solubilità Concentrazione dei contaminanti	Presenza di surnatante Raggio di influenza di ogni pozzo Portata di aria insufflata Pressione di iniezione dell'aria Volume della zona da trattare Profondità di iniezione dell'aria Limiti dei manufatti, impianti ed edifici Limiti di concentrazione per lo scarico in atmosfera Obiettivo di bonifica

# Air sparging

Vantaggi	Svantaggi
<p>Utilizza apparecchiature di semplice installazione</p> <p>Consente il trattamento in situ della falda</p> <p>Non comporta problematiche di trattamento, stoccaggio o scarico di acque sotterranee</p> <p>Apportando ossigeno, promuove i processi di biodegradazione naturale aerobici</p> <p>Consente un'implementazione con minimo disturbo per le operazioni in sito</p> <p>Consente l'utilizzo contemporaneo di altre tecnologie</p> <p>La sua efficacia può aumentare in associazione con altre tecnologie come l'estrazione di vapore dal suolo</p>	<p>Non può essere applicata in terreni con permeabilità inferiore a <math>10^{-3}</math> cm/s</p> <p>Non può essere impiegata, in prima approssimazione, se esiste prodotto in fase libera sulla falda (in tal caso tale prodotto deve essere prima rimosso)</p> <p>Non può essere usata in falde confinate</p> <p>In presenza di stratificazione e forte eterogeneità del sottosuolo saturo può essere inefficace o generare l'allargamento del pennacchio</p> <p>Richiede l'esecuzione di accurate prove pilota per valutare il controllo dei vapori generati e gli effetti della loro migrazione</p> <p>E' necessario considerare le azioni di messa in sicurezza</p>

# Trattamenti biologici

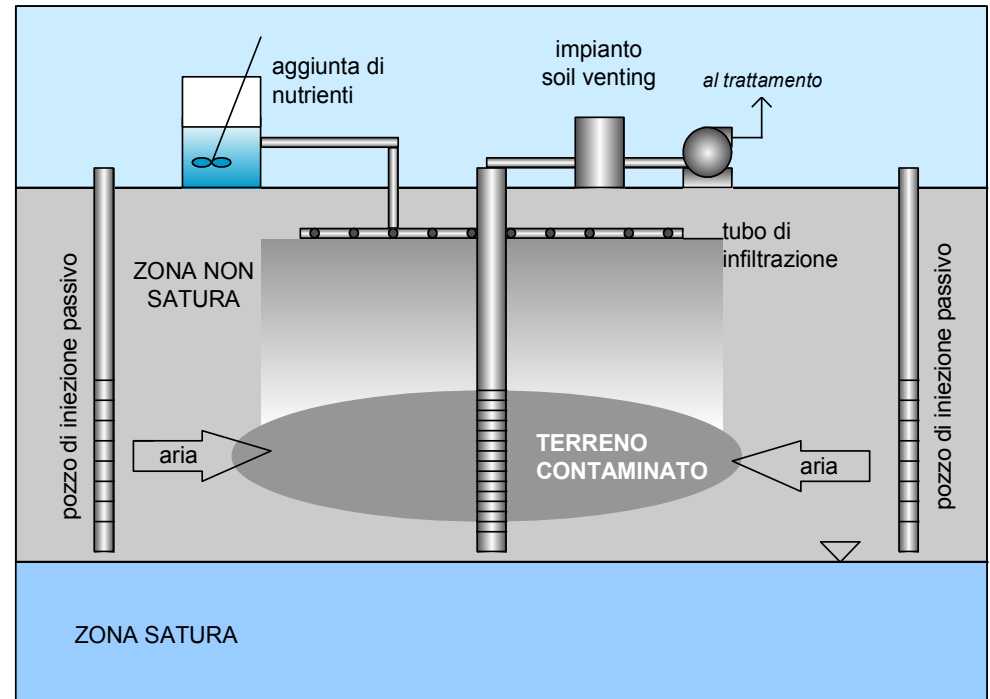
---

- Biorisanamento:
  - applicazione dei trattamenti biologici alla bonifica del suolo, sottosuolo e acque sotterranee inquinati
  - Basato sull'accelerazione o l'attivazione dell'attività microbica mediante controllo della concentrazione di nutrienti (N, P) e l'aggiunta di altri reagenti per ottenere la mineralizzazione del composto organico o la sua trasformazione in composti organici diversi meno nocivi
  - Creazione delle condizioni ambientali ottimali per la biodegradazione

# Trattamenti biologici

□ Affinché i batteri siano in grado di degradare i composti organici, è necessario che il terreno abbia:

- temperatura adeguata
- pH adeguato
- nutrienti
- ossigeno (per avere una degradazione aerobica)
- umidità



# Trattamenti biologici

---

## Classi di percorsi metabolici

- Degradazione metabolica: (sostanze facilmente biodegradabili) si distingue in
  - Anabolica: costruzione di materiale cellulare
  - Catabolica: produzione di energia per i microorganismi
- Degradazione cometabolica: (sostanze organiche recalcitranti o refrattarie) degradazione indiretta ad es. ad opera di un enzima prodotto da organismi impegnati in altre reazioni in cui la degradazione del secondo composto dipende dalla presenza e degradazione del primo

## Classificazione delle reazioni di ossidazione

- Ossidazione aerobica: l'ossigeno funge da accettore di elettroni  $C_6H_6 + 7.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$
- Ossidazione anaerobica: altri composti fungono da accettori di elettroni (nitrati, solfati,  $CO_2$ )  $C_6H_6 + 6H^+ + 6NO_3^- \rightarrow 6CO_2 + 3N_2 + 6H_2O$

## Rimozione di solventi clorurati

- Declorurazione riduttiva anaerobica: sostituzione di un atomo di cloro con un atomo di idrogeno

# Trattamenti biologici

Per stimolare l'attività dei microrganismi è possibile:

- Biostimolazione: aggiunta di nutrienti (N, P), accettori di elettroni (ossigeno), donatori di elettroni (metano, lattato)
- Bioaugmentation: aggiunta di microrganismi esogeni all'ambiente del sito contaminato; tali microrganismi possono essere selezionati da popolazioni già presenti sul sito oppure possono essere ottenuti da varietà isolate in laboratorio da batteri noti per la capacità di degradare specifici composti

CLASSE DI COMPOSTI	FACILITÀ DI BIODEGRADAZIONE
Composti monocromatici (BTEX, alcoli, fenoli, ammine)	Molto facile
Idrocarburi alifatici fino a C15	Molto facile
Idrocarburi alifatici C12-C20	Moderatamente facile
Idrocarburi alifatici > C20	Moderatamente facile
Idrocarburi monoclorurati	Moderatamente facile
Idrocarburi policlorurati	Moderatamente facile
Idrocarburi policromatici (IPA)	Difficile
PCB	Difficile
Pesticidi	Difficile

# Trattamenti biologici

---

La possibilità di applicare un trattamento biologico dipende da:

- Caratteristiche del terreno: struttura, permeabilità, composizione...
- Caratteristiche chimico-fisiche dell'inquinante: struttura chimica, distribuzione dei contaminanti tra le varie fasi, concentrazione, tossicità, solubilità, pressione di vapore, costante di Henry, punto di ebollizione
- Caratteristiche ambientali: nutrienti, ORP, ossigeno, accettori di elettroni, umidità, pH, temperatura

Necessità di effettuare test in scala di laboratorio, che consentono di:

- verificare la presenza di microrganismi autoctoni in grado di degradare i contaminanti di interesse
- definire le migliori condizioni operative con cui progettare l'intervento



# Trattamenti biologici

---

- Trattamenti in situ
  - Iniezione diretta di nutrienti, accettori di elettroni e donatori di elettroni
  - Bioventing/biosparging
  - Ricircolo di acque sotterranee
  - Biobarriera permeabili reattive
- Trattamenti in situ intrinseci: attenuazione naturale
- Trattamenti ex situ
  - Biopile
  - Landfarming
  - Compostaggio
  - Bioreattori in fase solida e semisolida

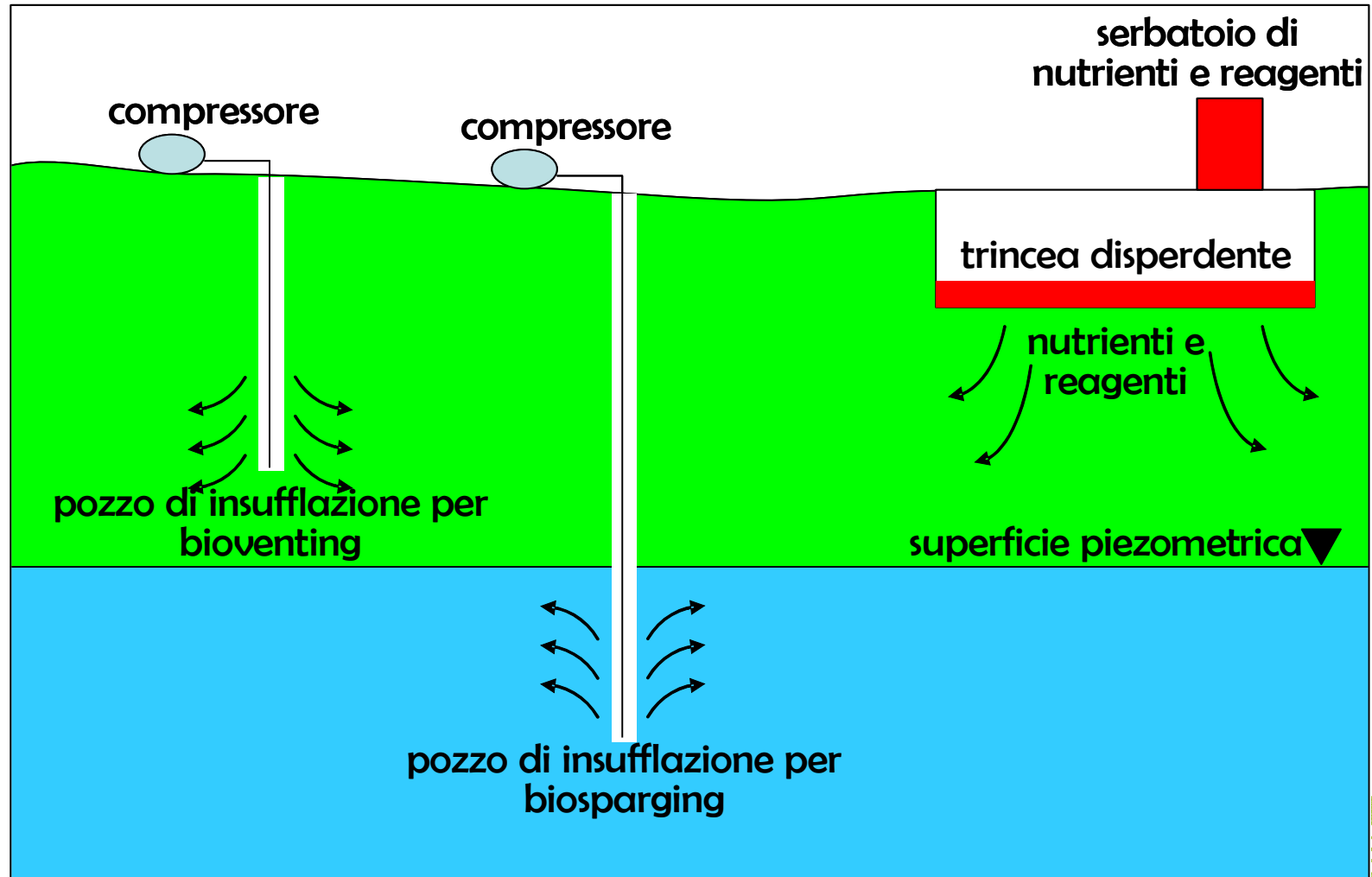
# Bioventilazione

---

- Stimola ed ottimizza i processi spontanei di biodegradazione aerobica, apportando aria e ossigeno ai microrganismi autoctoni nella zona vadosa (biosparging se l'insufflazione avviene nella zona satura)
- Il parametro significativo per l'applicazione del trattamento è la pressione di vapore dell'inquinante:

■ $< 10^{-3}$ atm	➡	Rimossi facilmente per biodegradazione
■ $> 1$ atm	➡	Volatilizzano troppo rapidamente
■ $10^{-3} \div 1$ atm	➡	Rimossi per biodegradazione e volatilizzazione

# Bioventilazione



# Bioventilazione

---

- Applicabile a:
  - Composti petroliferi e idrocarburi (benzina, oli combustibili, oli lubrificanti, gasolio, IPA)
  - Composti organici alogenati (PCB, cloruro di metilene, cloruro di vinile, tricloroetilene)
  - Altri composti organici (fenoli, pentaclorofenoli, chetoni, alcoli)
- Necessità di ottimizzare la fornitura di ossigeno, minimizzando i rischi di volatilizzazione:
  - Aria scambiata ogni 1-2 giorni
  - Basse portate (2-14 m<sup>3</sup>/h)

# Bioventilazione

Condizioni di applicabilità al sito	Elementi necessari alla progettazione
Caratteristiche del sito: permeabilità del suolo e geomorfologia profondità e fluttuazione della falda	Raggio di influenza Pressione alla testata del pozzo Portata di aria Volume di suolo <u>Concentrazione di contaminanti in fase di vapore</u> Concentrazione finale dei contaminanti Limiti da manufatti, impianti, edifici Porosità efficace Portata di estrazione
Caratteristiche dei contaminanti: struttura chimica e biodegradabilità concentrazione e tossicità pressione di vapore punto di ebollizione costante di Henry ripartizione dei contaminanti	
Microflora: presenza sufficiente di microflora donatori di elettroni pH potenziale redox temperatura nutrienti biodisponibilità	

# Bioventilazione

---

Vantaggi	Svantaggi
<p>Non richiede escavazione del terreno È semplice da realizzare, non richiedendo apparecchiature particolarmente specializzate Crea un disturbo minimo al sito Può essere applicata anche in presenza di edifici Può essere abbinata ad altre tecnologie, quali soil vapor extraction e air sparging</p>	<p>Potrebbe non essere applicabile a terreni con concentrazioni elevate di inquinanti Non è applicabile in terreni a bassa permeabilità Può portare alla formazione di intermedi di reazione sconosciuti o non biodegradabili</p>

# Biobarriera reattiva (barriere biologiche)

---

- Una biobarriera è costituita da una zona di trattamento formata nel sottosuolo mediante aggiunta di microrganismi, di nutrienti e/o di reattivi, che favoriscono lo sviluppo in situ dei batteri in grado di degradare i composti organici
- Il riempimento è costituito da materiale a superficie specifica tale da consentire l'adesione della biomassa

# Biobarriere reattive

---

- ❑ È stata applicata per idrocarburi di origine petrolifera (BTEX) e solventi aromatici, MtBE, TBA; in condizioni riducenti si può applicare anche per la dechlorurazione riduttiva di PCE, TCE, DCE
- ❑ L'efficienza dipende da:
  - Capacità di adattamento dei microrganismi
  - Omogeneità di distribuzione dell'ossigeno e degli altri reattivi
  - Capacità del sistema di intercettare il pennacchio
  - Concentrazione iniziale dei contaminanti e condizioni ambientali



# Fitorisanamento

---

- Sfrutta la capacità delle piante di rimuovere, immobilizzare o trasformare composti inorganici ed organici
- Le specie vegetali possono essere selezionate per la loro capacità di:
  - Estrarre dal suolo e accumulare metalli pesanti nei tessuti
  - Modificare le caratteristiche del suolo o dei metalli riducendo la mobilità degli inquinanti
  - Estrarre dal suolo e decomporre chimicamente selezionati composti
  - Creare nel terreno un ambiente favorevole alla degradazione dei contaminanti con processi biochimici naturali

# Fitorisanamento

---

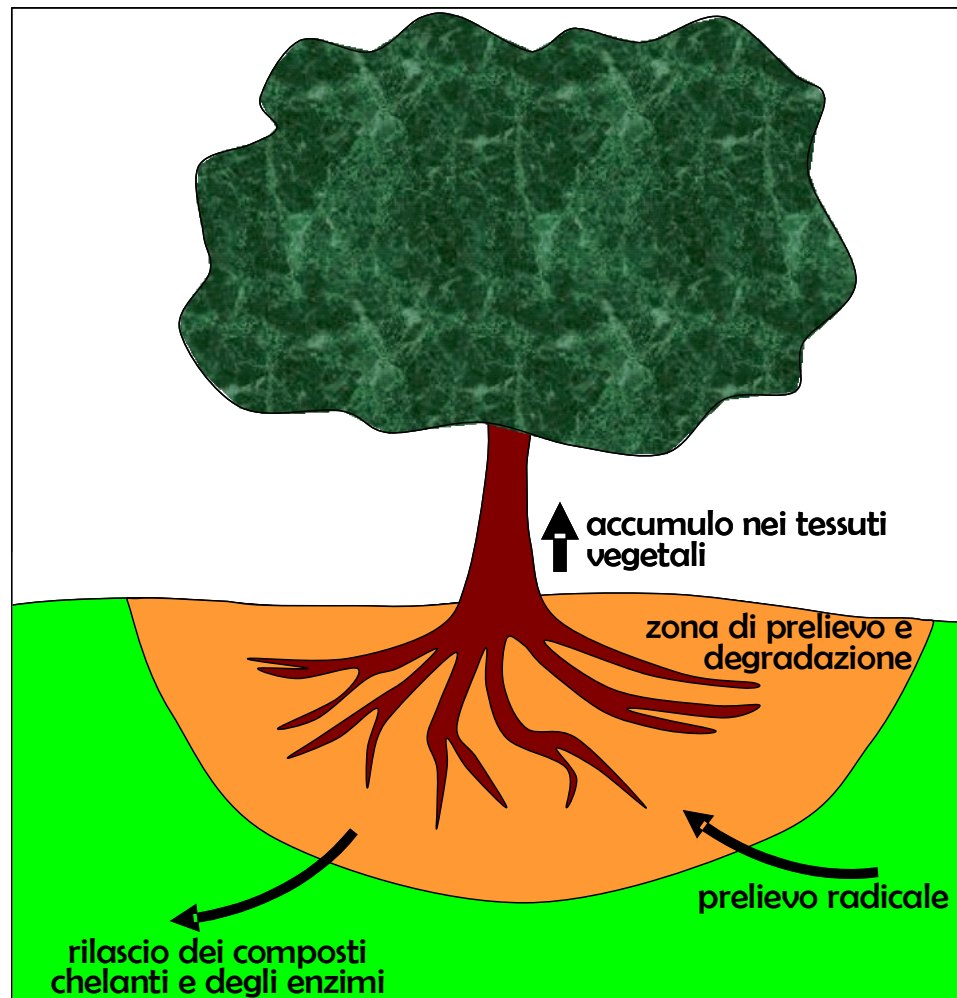
- La rimozione dei contaminanti organici avviene per:
  - Prelievo diretto, trasformazione e accumulo dei metaboliti nei tessuti delle piante
  - Modifica delle proprietà chimico-fisiche del suolo e rilascio radicale di fattori enzimatici che stimolano l'attività dei microrganismi autoctoni

# Fitorisanamento

---

- La rimozione dei contaminanti inorganici (metalli pesanti) avviene per:
  - Stabilizzazione: immobilizzazione dei metalli pesanti mediante legami chimici con sostanze prodotte dalle radici, al fine di rallentarne o inibirne la migrazione verticale verso la falda
  - Estrazione (o accumulo): accumulo nei tessuti vegetali (soprattutto nelle parti aeree) di alte concentrazioni. Al termine del trattamento la biomassa vegetale deve essere raccolta e smaltita

# Fitorisanamento



# Fitorisanamento

<b>Condizioni di applicabilità al sito</b>	<b>Elementi necessari alla progettazione</b>
<p>Metalli pesanti: Forme solubili e disponibilità Profondità della contaminazione Concentrazione dei metalli assorbiti alle fasi solide Tossicità</p> <p>Contaminanti organici: Concentrazione delle forme assorbite alle fasi solide e <math>K_{ow}</math> Tossicità Profondità della contaminazione</p>	<p>Scelta e selezione della specie vegetale Velocità di prelievo dei contaminanti Produttività vegetale Disposizione della specie vegetale Densità della specie vegetale Sistema d irrigazione Sistema agronomico Sistema di monitoraggio Tasso di traspirazione</p>

# Fitorisanamento

Vantaggi	Svantaggi
<p>Migliora e lascia inalterata l'attività biologica ed ecologica del suolo e delle piante rispetto ai trattamenti chimici.</p> <p>Non vi è impatto ambientale, la rimozione dei contaminanti avviene attraverso meccanismi naturali.</p> <p>Risparmio in termini di costi, energia e materiali.</p> <p>costi minori rispetto a trattamenti chimici di rimozione dei metalli.</p>	<p>Lunghi tempi di risanamento.</p> <p>È applicabile solo alla contaminazione superficiale.</p> <p>I dati di letteratura sono scarsi in applicazioni in scala reale.</p> <p>Il trattamento dei metalli necessita di post-trattamento o smaltimento della biomassa vegetale.</p> <p>I meccanismi chimico-fisici e biologici che regolano i processi non sono conosciuti pienamente.</p> <p>Infestazioni di parassiti possono distruggere le colture vegetali e bloccare il processo.</p>

# Estrazione Multi Fase

---

- ❑ Tecnica particolarmente vantaggiosa per la rimozione dei contaminanti anche nel caso di prodotto in fase libera (NAPL).
- ❑ E' applicabile sia alla zona insatura che satura del sottosuolo
- ❑ Risulta efficace anche in terreni a permeabilità medio-bassa
- ❑ Il sistema necessita di uno o più pozzi simili a quelli utilizzati per la SVE o AS e che in questo caso interessano sia la zona insatura che quella satura
- ❑ I pozzi vengono sollecitati con pompe da vuoto in grado di creare un forte gradiente che interessa sia le fasi di vapore che quelle liquide nell'intorno dei pozzi stessi. L'efficienza del sistema è direttamente proporzionale alla pressione negativa applicata e alla progettazione della rete di estrazione

# Estrazione Multi Fase

---

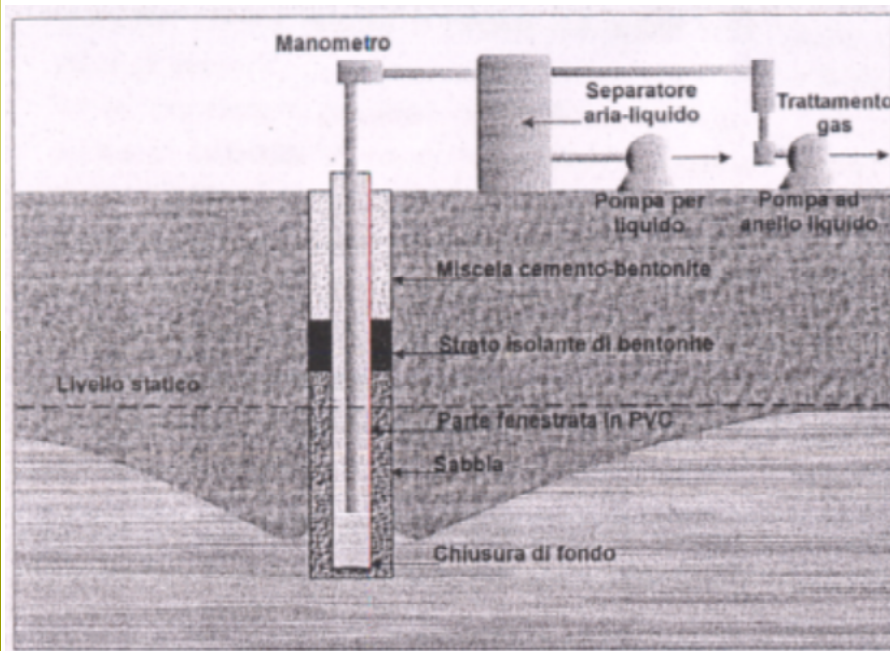
- ❑ L'estrazione multi fase estrae dal sottosuolo un fluido multi fase (aria - acqua- prodotto libero) che viene separato e trattato on site
- ❑ E' una categorie di tecnologie per terreni con permeabilità medio bassa: (  $10^{-3}$  cm/s ÷  $10^{-5}$  cm/s )
- ❑ Indicata per VOC e LNAPL



# Estrazione Multi Fase

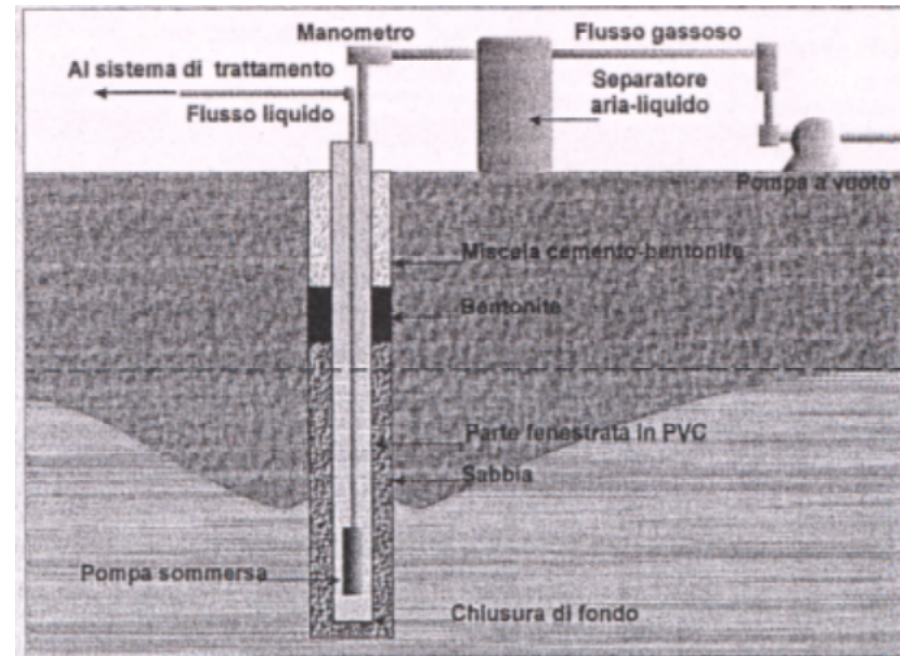
## TPE - Two-Phase Extraction

# Un' unica tubazione estrae vapore, acqua o NAPL

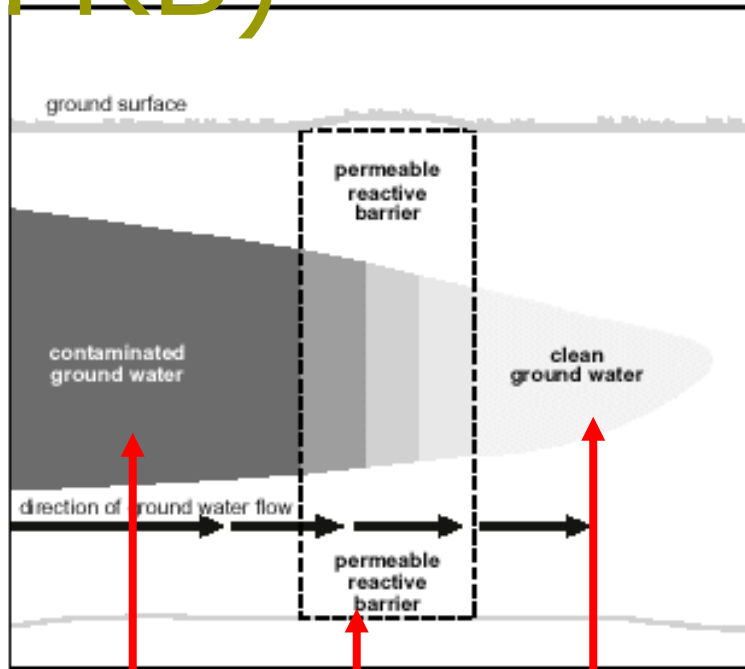


## DPE - Dual-Phase Extraction

L'estrazione avviene attraverso condotte separate



# Barriere permeabili reattive (PRB)



Il nome è esplicativo delle modalità di funzionamento:

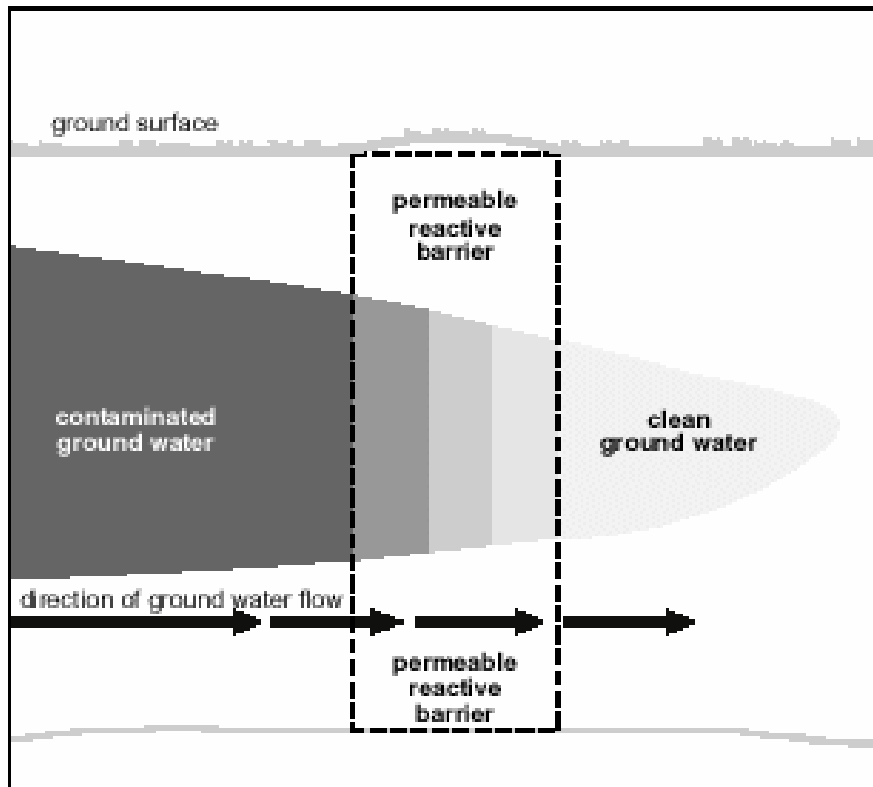
**BARRIERA** indica un ostacolo fisico alla diffusione degli inquinanti.

**PERMEABILE** indica la proprietà di lasciarsi attraversare dal plume.

**REATTIVA** indica la capacità, propria del materiale di riempimento, di reagire con i contaminanti

# Barriere permeabili reattive (PRB)

- Zona di trattamento, costituita da materiale reattivo, installata nel sottosuolo in modo da intercettare il pennacchio contaminato



# Barriere permeabili reattive (PRB)

---

- È un sistema relativamente semplice da un punto di vista concettuale e realizzativo
- E' un sistema passivo (gli inquinanti vengono trasportati verso la zona reattiva solo per effetto del gradiente idraulico) che non richiede energia per il suo funzionamento



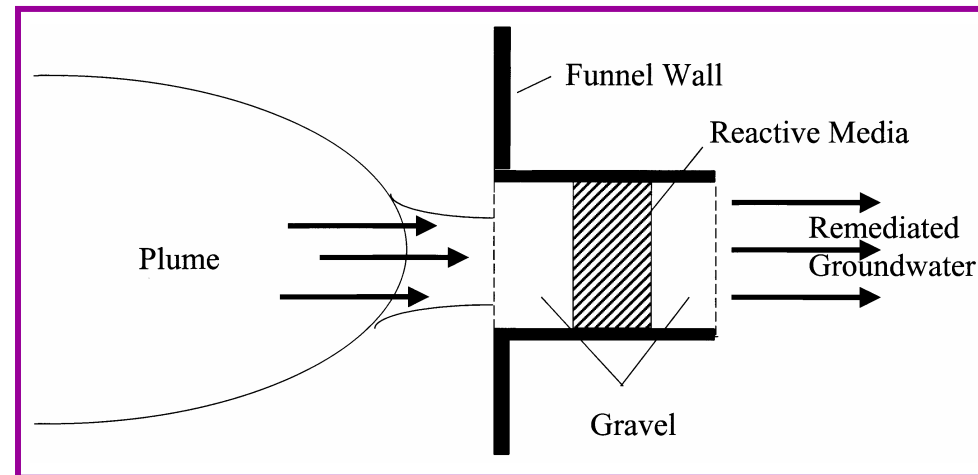
**Si riducono i costi e le operazioni**

- Conducibilità idraulica del materiale reattivo maggiore o uguale a quella dell'acquifero

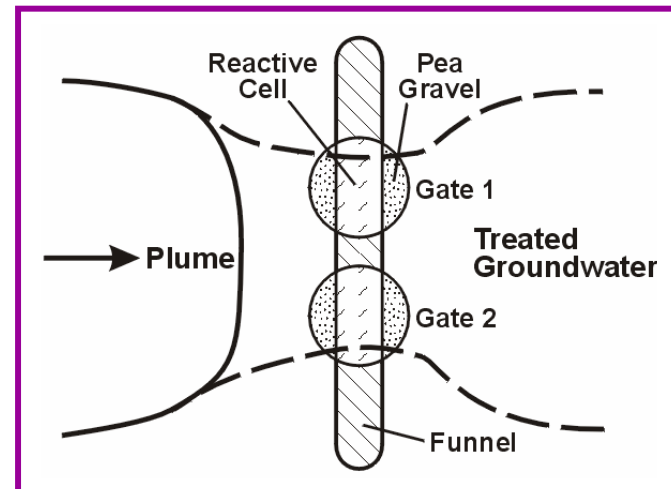
# Barriere permeabili reattive (PRB)

## □ Configurazioni realizzative:

### ■ Barriera continua

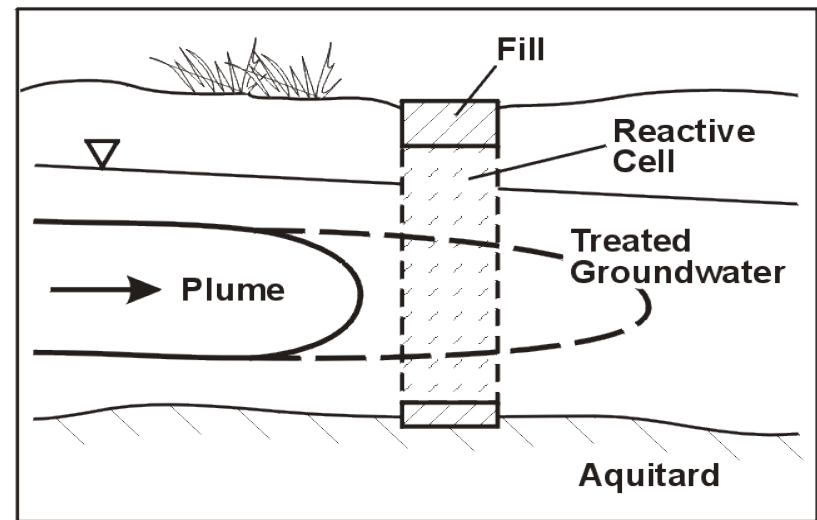
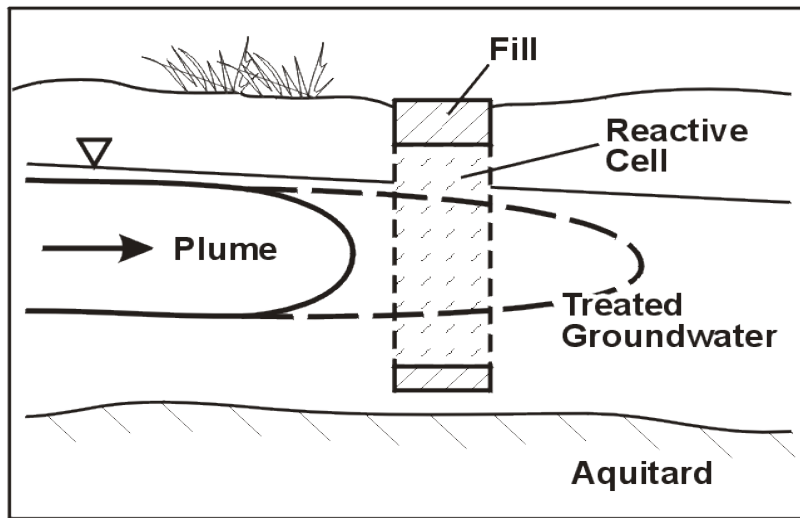


### ■ Sistema funnel&gate (imbuto e apertura)



# Barriere permeabili reattive (PRB)

- Tipologie realizzative:
  - Barriera sospesa
  - Barriera immorsata nel substrato impermeabile



# Barriere permeabili reattive (PRB)

---

- Dimensionamento della barriera:
  - dimensione in direzione trasversale al flusso ( $L$ ): determinata dall'estensione trasversale della contaminazione
  - spessore ( $s$ ) in direzione del flusso: prodotto tra il tempo di residenza necessario al trattamento ( $q_H$ ) e la velocità ( $v$ ) delle acque sotterranee
  - Altezza ( $h$ ) in direzione verticale dettato dalla caratteristiche idrogeologiche (idealmente pari alla distanza tra il piano campagna e il substrato impermeabile, per evitare fenomeni di underflow)

# Barriere permeabili reattive (PRB)

---

- Le tecnologie di installazione devono:
  - Non alterare le dimensioni della barriera
  - Evitare l'estrazione delle acque contaminate
  - Contenere la produzione di materiale di risulta
  - Assicurare fasi esecutive semplici e rapide
- Le tecnologie di installazione sono:
  - Convenzionali: prevedono lo scavo di trincee
  - Innovative: non richiedono lo scavo, consentono di raggiungere profondità maggiori, evitando inoltre i rischi per i lavoratori



# Barriere permeabili reattive (PRB)

- Tecnologie di installazione convenzionali:
  - Escavatore a braccio rovescio
  - Benna mordente
  - Cassoni
  - Mandrino
  - Escavatore a braccio continuo



BATTELLE

(a)



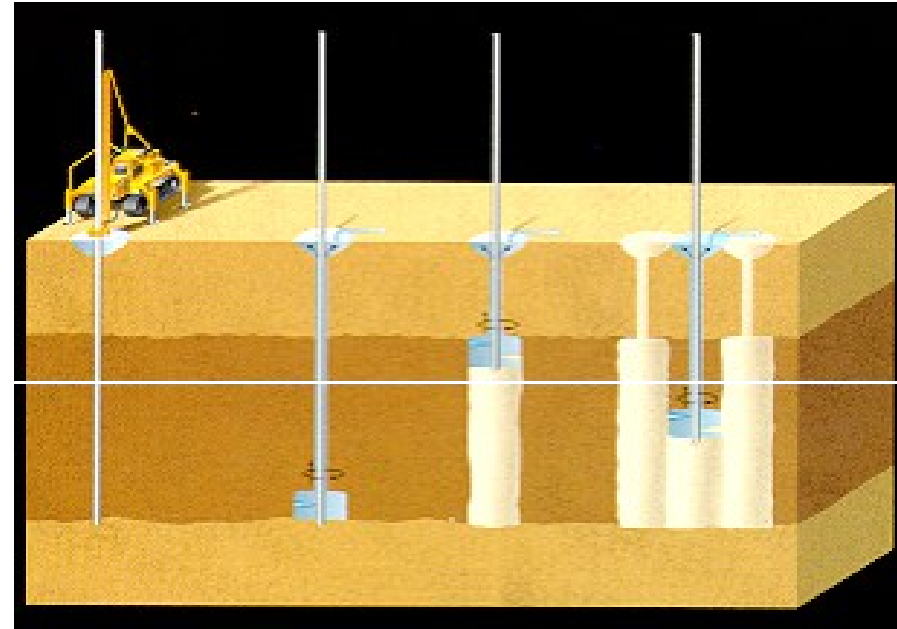
C ENVIRONMENTAL

(b)

# Barriere permeabili reattive (PRB)

---

- ❑ Tecnologie di installazione innovative
  - Jetting
  - Hydraulic fracturing
  - Deep soil mixing



# Barriere permeabili reattive (PRB)

---

- I controlli sono:
  - In fase di esercizio per verificare:
    - Assenza di by-pass e aggiramento della barriera
    - Rispetto dei parametri progettuali (tempo di residenza e zona di cattura idraulica)
    - Efficienza di trattamento
    - Longevità della barriera
  - Post operam per valutare:
    - Intercettazione e trattamento del plume
    - Conformità tra le indicazioni di progetto e la realizzazione
    - Longevità della barriera

# Barriere permeabili reattive (PRB)

---

- Requisiti del materiale reattivo:
  - Non deve rivelarsi una fonte di contaminazione, originando reazioni chimiche indesiderate e prodotti intermedi pericolosi
  - Deve essere stabile nel tempo
  - Deve essere reperibile a costi bassi
  - Deve essere costituito da particelle di dimensioni uniformi
  - Deve garantire sicurezza per i lavoratori
  - La conducibilità idraulica deve essere maggiore di quella dell'acquifero

# Barriere permeabili reattive (PRB)

□ Principali materiali reattivi utilizzati:

- Metalli zero-valenti, come il  $\text{Fe}^0$  (ZVI)



Riduzione  
abiotica

- Matrici organiche



Riduzione biotica

- Materiali calcarei



Precipitazione chimica

- Zeoliti e resine



Adsorbimento e scambio  
ionico

- Matrici adsorbenti

# Barriere permeabili reattive (PRB)

---

Condizioni di applicabilità al sito	Elementi necessari alla progettazione
Scavabilità del terreno Natura e tipologia della contaminazione Estensione, profondità, direzione e velocità di flusso del pennacchio contaminato Presenza, profondità e caratteristiche dello strato a bassa permeabilità Possibilità di smaltimento del terreno di risulta della operazioni di scavo e dei materiali reattivi esausti	Scelta della configurazione Scelta del mezzo reattivo e caratteristiche di efficienza nel tempo Modellazione del flusso sotterraneo senza e con l'elemento permeabile Permeabilità e spessore della zona reattiva: tempo di residenza Profondità di installazione Immorsamento della barriera in un substrato a bassa permeabilità

# Barriere permeabili reattive (PRB)

Vantaggi	Svantaggi
<p>Consente di trattare le acque sotterranee contaminate in situ</p> <p>Si tratta di un sistema di trattamento passivo, che non richiede energia per convogliare le acque contaminate attraverso la zona di trattamento, come avviene per i sistemi di pump and treat: il flusso contaminato si muove attraverso la zona reattiva, richiamato dalla maggiore permeabilità.</p> <p>Si tratta di una tecnologia di implementazione relativamente semplice in quanto sono molto diffuse le metodologie realizzative e i processi chimici alla base delle reazioni di precipitazione, ossidazione, riduzione e adsorbimento sono definiti.</p> <p>È applicabile ad un ampio spettro di contaminanti selezionando opportunamente il mezzo reattivo.</p>	<p>La formazione di precipitati, legata alle reazioni tra contaminante e mezzo reattivo, potrebbe compromettere l'efficacia a lungo termine del sistema. Occorre controllare l'eventuale formazione di sottoprodotti di degradazione tossici.</p> <p>Per le barriere in carbone attivo granulare occorre provvedere allo smaltimento del materiale reattivo esausto.</p> <p>I costi del materiale reattivo possono essere abbastanza elevati, soprattutto nel caso di impiego di ferro granulare. La continuità e quindi l'efficienza della barriera devono essere costantemente monitorate attraverso il controllo della qualità delle acque sotterranee a valle dell'opera stessa.</p>



# Decontaminazione elettrocinetica

---

- ▣ Applicazione di una corrente elettrica ad un terreno contaminato caratterizzato da alta porosità, ma bassa permeabilità all'acqua e all'aria.
- ▣ Si applica una corrente continua mediante due elettrodi (quello positivo realizzato in grafite con diametro di 8-10 cm; quello negativo costruito in filo di rame) infissi nel terreno; tale corrente causa la mobilizzazione degli ioni e delle particelle di acqua verso gli elettrodi.

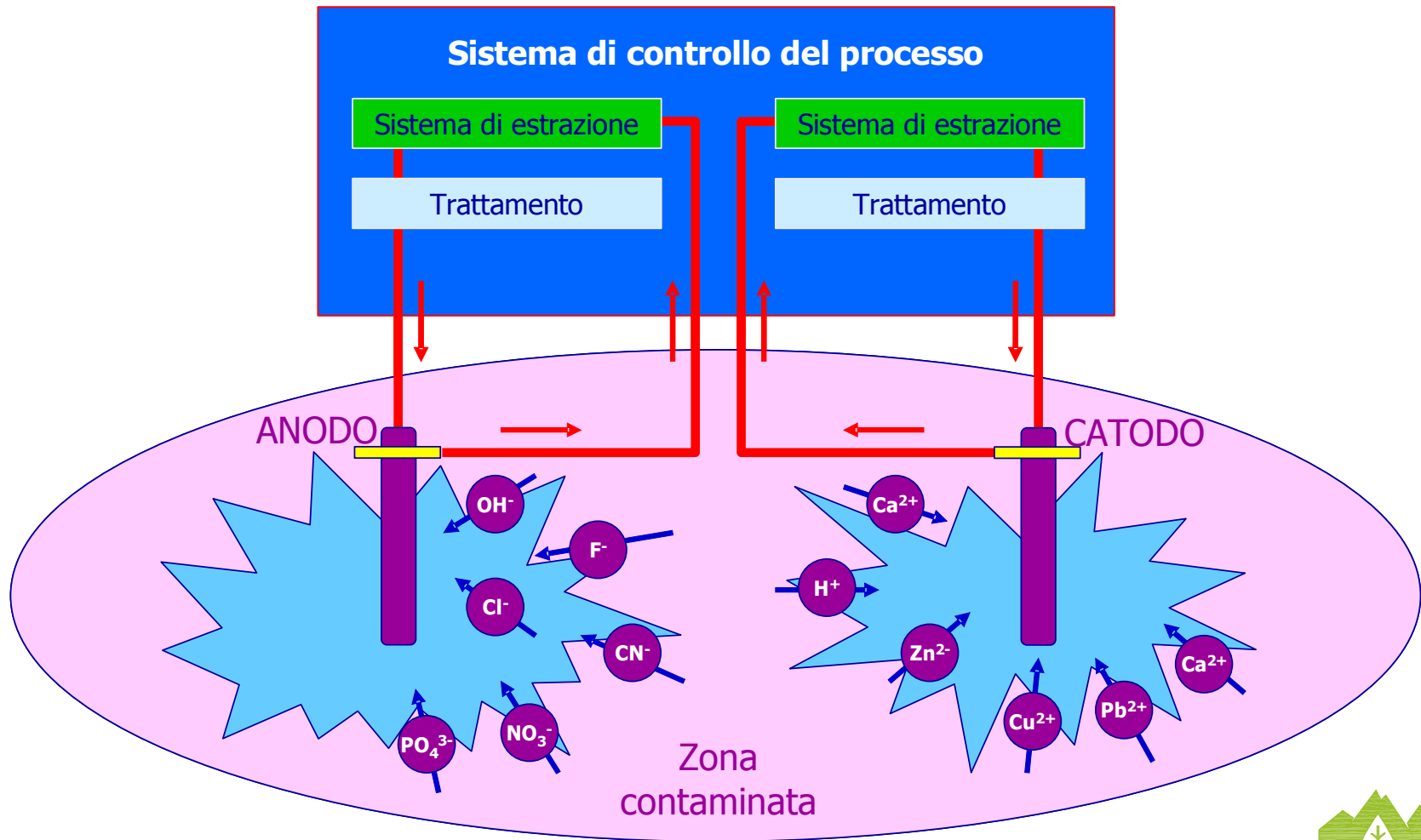


# Decontaminazione elettrocinetica

---

- Meccanismi attraverso cui avviene la migrazione:
  - **Elettromigrazione** sotto gradiente elettrico o **elettroforesi**: movimento di ioni o particelle;
  - **Elettrosmosi**: movimento di un fluido contenente ioni.
- Il movimento dipende dalla carica (polarità ed entità) e dalla concentrazione del contaminante;
- Per le specie non ioniche la movimentazione dipende solo dal flusso elettro-osmotico.

# Decontaminazione elettrocinetica



# Decontaminazione elettrocinetica

---

- La corrente elettrica crea inoltre:
  - Fronte acido all'anodo;
  - Fronte basico al catodo.
- La generazione del fronte acido è fondamentale:
  1. gli ioni  $H^+$  si sostituiscono agli ioni adsorbiti alle particelle di suolo, liberandoli in soluzione e rendendoli disponibili alla migrazione
  2. le condizioni di pH basso nel fronte acido favoriscono la solubilizzazione di metalli ed ossidi metallici, facilitandone la raccolta al catodo

# Decontaminazione elettrocinetica

---

- Potenzialmente applicata con successo per l'estrazione dal terreno di metalli pesanti, non metalli (arsenico), anioni (nitrati e solfati), cianuri, alcune tipologie di contaminanti organici (acido acetico, fenoli, BTEX, DNAPL, benzine, gasolio, kerosene, oli lubrificanti, idrocarburi alogenati, composti organici non alogenati, composti policiclici aromatici), radionuclidi ed esplosivi;
- Range di concentrazioni trattabili: da pochi ppm a decine di migliaia.

# Trattamenti termici

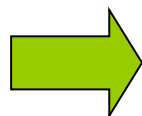
---

- ❑ Desorbimento termico: si ha vaporizzazione/pirolisi dei composti volatili con  $T = 90 \div 650^{\circ}\text{C}$
- ❑ Termodistruzione: ossidazione termica convenzionale, con  $T = 850 \div 1600^{\circ}\text{C}$  (per temperature superiori a  $2000^{\circ}\text{C}$  si parla vetrificazione a caldo)
- ❑ Entrambi i processi sono completati da una fase di recupero e/o concentrazione degli inquinanti o dalla loro definitiva distruzione

# Trattamenti termici

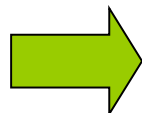
- Il suolo si comporta in modo diverso in funzione della temperatura:

- $T < 460^{\circ}\text{C}$



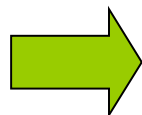
Parziale deterioramento in seguito alla mineralizzazione della frazione organica. Non è pregiudicato il riutilizzo agronomico

- $T = 500 \div 900^{\circ}\text{C}$



Danni irreversibili alla struttura minerale ed alle caratteristiche chimiche e nutrizionali. Non è idoneo all'uso agronomico, ma può essere utilizzato come materiale da riporto o riempimento

- $T > 900^{\circ}\text{C}$



Si ottiene un prodotto vetrificato, che perde le caratteristiche iniziali. Può essere utilizzato come sottofondo stradale e in edilizia

# Trattamenti termici

Condizioni di applicabilità al sito	Elementi necessari alla progettazione
<p>Presenza di sostanze organiche o contaminanti inorganici</p> <p>Poco indicato per suoli contaminati da sole sostanze inorganiche</p> <p>Ridotte concentrazioni dei composti organici del fosforo (qualche mg/kg)</p> <p>Modeste concentrazioni di metalli alcalini (centinaia di mg/kg)</p>	<p>Caratterizzazione dei terreni: granulometria, analisi elementare, umidità e perdita al fuoco per ciascuna delle classi granulometriche</p> <p>Caratterizzazione ed analisi merceologica di eventuali rifiuti presenti nei suoli contaminati</p> <p>Determinazione del potere calorifico dei suoli contaminati e dell'eventuale rifiuto in essi presente</p> <p>Eventuali prove di laboratorio o su scala pilota finalizzata alla individuazione delle condizioni operative ottimali e alla determinazione dell'entità degli inquinanti rilasciati in fase gassosa</p>

# Trattamenti termici

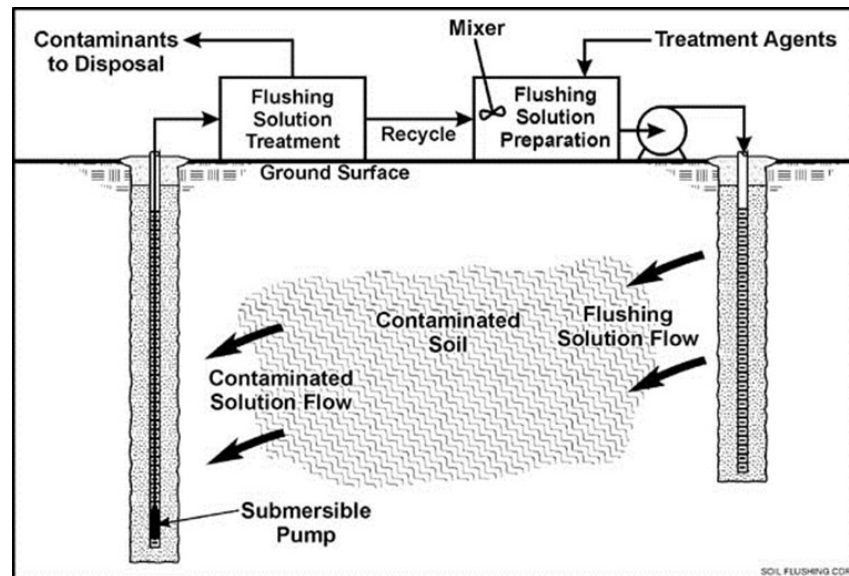
---

Vantaggi	Svantaggi
<p>Efficace ed efficiente per la rimozione e distruzione dei contaminanti organici</p> <p>Tecnologie consolidate ed affidabili</p> <p>Idoneo al trattamento anche di considerevoli quantitativi giornalieri (da 15 a 300 m<sup>3</sup>/d)</p> <p>Costi di trattamento ridotti se confrontati con altre tecnologie (0.15-0.4 €/kg)</p>	<p>Poco idoneo per la rimozione di inquinanti inorganici, con conseguente ricorso ad eventuali ulteriori operazioni di trattamento</p> <p>Produzione di residui di processo (solidi e liquidi) anche pericolosi, da avviare a successivi trattamenti e/o smaltimento finale</p> <p>Emissione di inquinanti in atmosfera, seppure a valori di concentrazione limitati e controllati</p> <p>Problemi di gestione del consenso per l'installazione di nuovi impianti fissi e di impianti mobili che possono significativamente influire sui tempi di intervento</p> <p>Elevata competenza e professionalità del personale tecnico-operativo impiegato nella gestione dell'impianto</p>



# Soil flushing

- ❑ Misura di messa in sicurezza permanente.
- ❑ Tecnica in-situ applicabile a terreni saturi ed insaturi
- ❑ Solubilizzazione, o estrazione per via chimica del contaminante tramite soluzioni acquose direttamente iniettate nel sottosuolo.
- ❑ Applicabile a :VOCs, composti organici clorurati, idrocarburi, pesticidi, metalli (es. As, Pb)

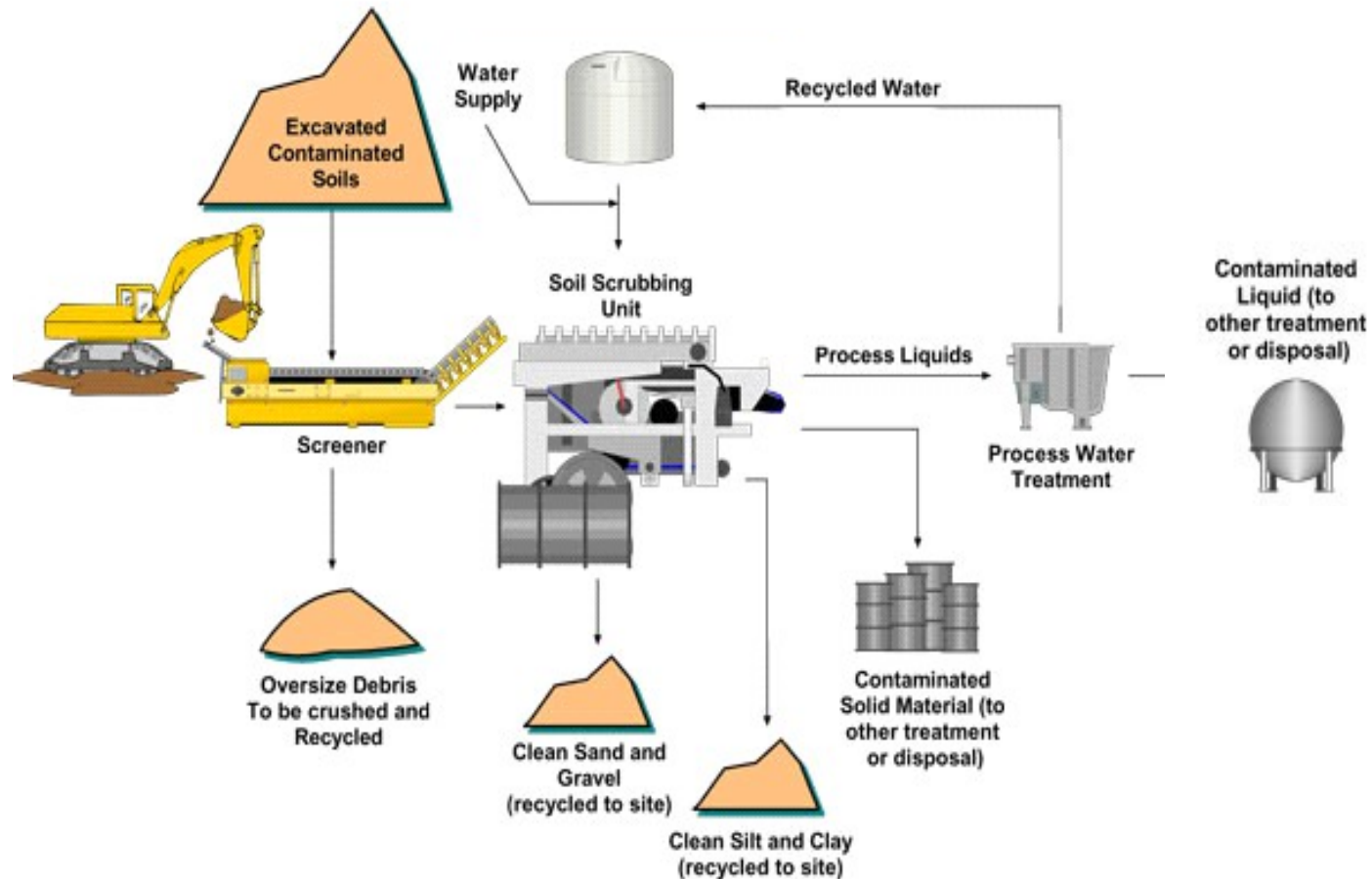


# Soil washing

---

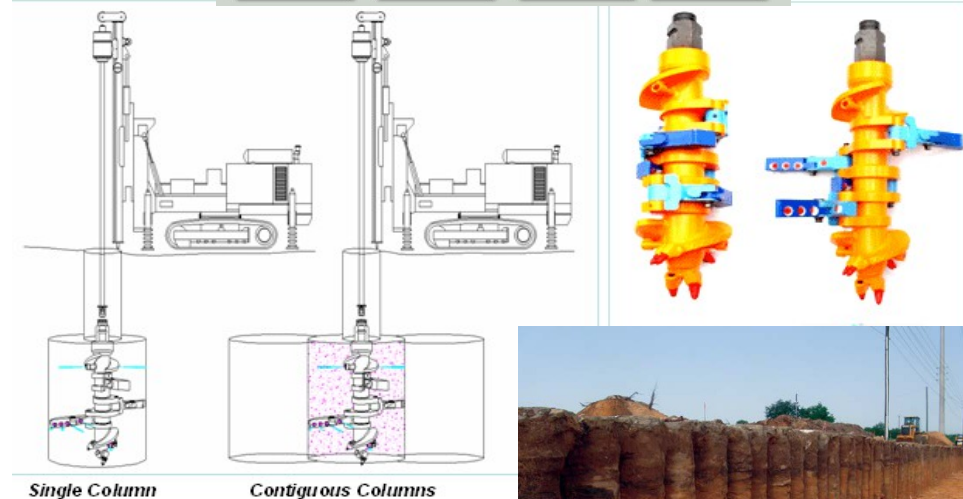
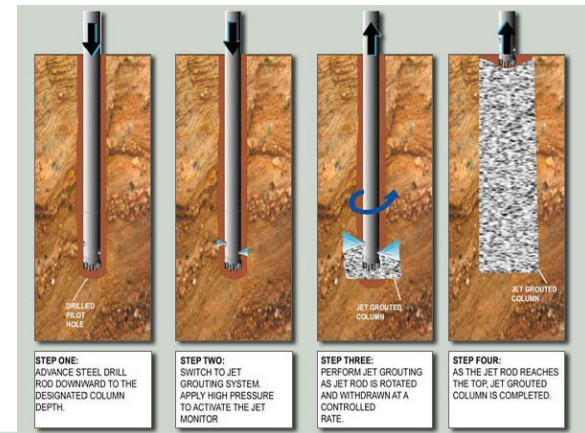
- ▣ Tecnica ex-situ o on site applicabile a terreni insaturi e saturi
- ▣ Lavaggio del suolo tramite acqua pura o additivata. Separazione per via fisico chimica della frazione fine del terreno al quale è adsorbita la maggior parte della contaminazione. Gli additivi consentono la bonifica della frazione fine.
- ▣ Applicabile a :VOCs, composti organici clorurati, idrocarburi, metalli (es. As, Cr VI, Pb)

# Soil washing



# MISE con barriere verticali

- ❑ Isolare le fonti primarie della contaminazione mediante setti a bassa permeabilità
- ❑ Controllare e limitare il movimento delle acque sotterranee
- ❑ Possono essere:
  - Ad infissione
  - Ad escavazione
  - Realizzate mediante jet-grouting
  - Ad iniezione (rock-grouting)
  - A miscelazione in situ (soil mixing)



# MISE con solidificazione/stabilizzazione (S/S)

---

- ❑ È volta all'immobilizzazione degli inquinanti, modificando la cinetica e la modalità di cessione
- ❑ Obiettivi:
  - Ridurre la superficie del materiale esposta al contatto con acque di percolazione o meteoriche
  - Ridurre la permeabilità del materiale
  - Ridurre la solubilità dei contaminanti
  - Promuovere la formazione di legami chimici tra i contaminanti e i reagenti utilizzati per il trattamento



Formazione di una struttura cristallina, vetrosa o polimerica che ingloba le particelle di suolo contaminato

# MISE con solidificazione/stabilizzazione (S/S)

---

- ❑ Solidificazione: conferisce al materiale caratteristiche di stabilità dal punto di vista fisico e dimensionale
- ❑ Stabilizzazione: trasformazione dei contaminanti in una forma più stabile dal punto di vista chimico
- ❑ Per conseguire tali obiettivi si utilizzano:
  - Leganti inorganici: cemento, calce, argilla, pozzolana
  - Leganti organici: asfalto, bitume, resine termoplastiche e termoindurenti


# MISE con solidificazione/stabilizzazione (S/S)

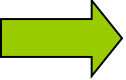
---

<b>Condizioni di applicabilità al sito</b>	<b>Elementi necessari alla progettazione</b>
<p>Caratteristiche del sito Permeabilità e geomorfologia Distribuzione granulometrica Presenza di strati compatti Indici di plasticità Profondità della contaminazione Caratteristiche degli acquiferi Caratteristiche dei contaminanti Struttura chimica Concentrazione Pressione di vapore Punto di ebollizione Costante di Henry Compresenza di diversi contaminanti Presenza di specie interferenti</p>	<p>Volume di terreno da trattare Profondità degli strati contaminati Estensione superficiale della contaminazione Quantitativo di reagenti e di additivi</p>

# Pump & Treat (P&T)

---

- L'acqua viene emunta, trattata ed eventualmente reimpressa nel sottosuolo
- Può essere inteso come:
  - Misura di sicurezza 

Barriera idraulica in caso di contaminazione della matrice solida
  - Trattamento delle acque sotterranee 

Se accoppiata ad un sistema di trattamento chimico o biologico
- Non agisce sulla sorgente di contaminazione



# Pump & Treat (P&T)

---

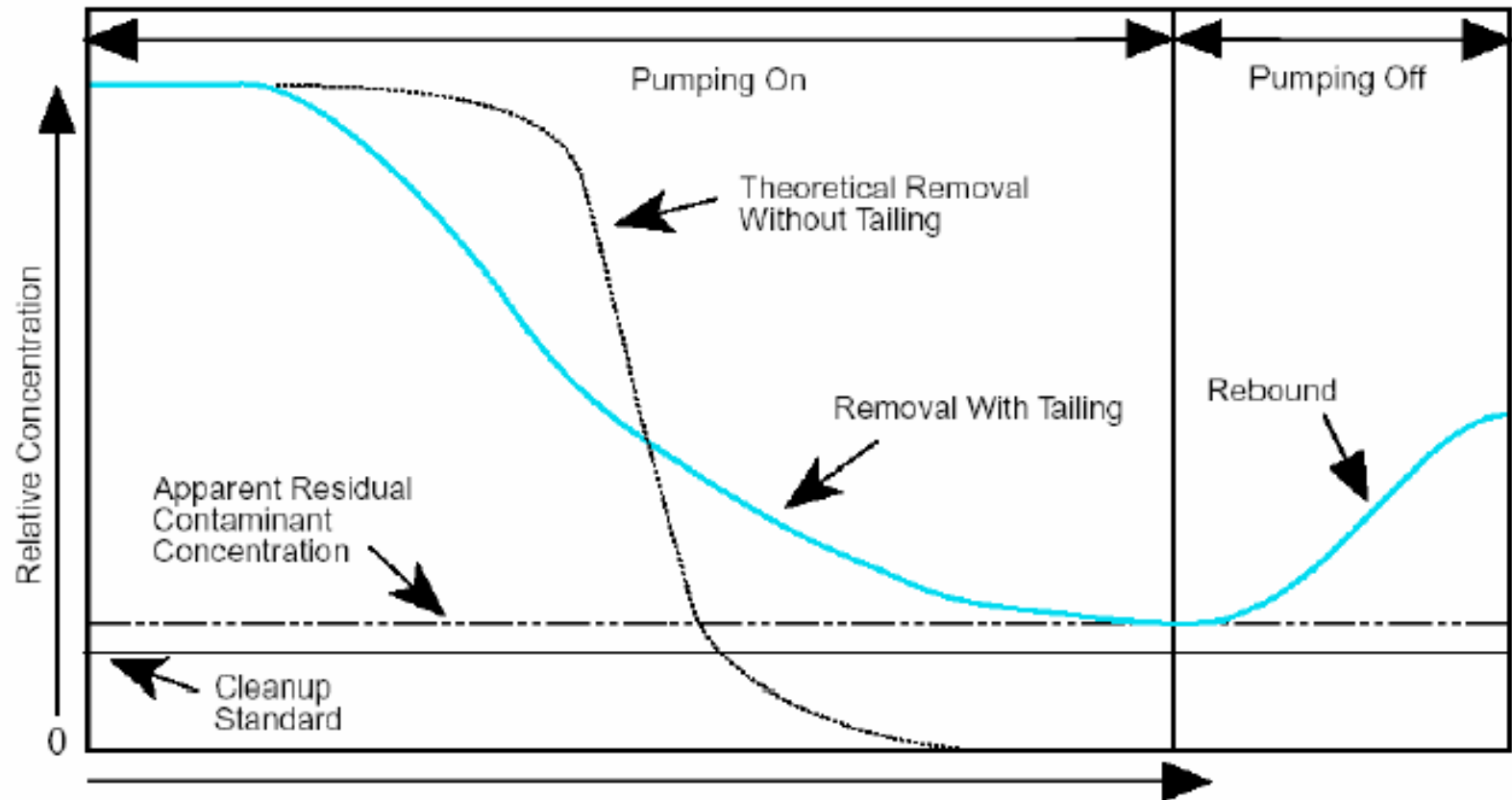
- L'intervento può risultare inefficace a causa di:
  - Tailing: la velocità di diminuzione delle concentrazioni si riduce nel tempo, a causa degli equilibri di adsorbimento-desorbimento



I tempi di trattamento si allungano

- Rebound: a seguito dell'interruzione dell'estrazione dell'acqua si osserva, alla ripresa delle operazioni, un aumento della concentrazione dell'inquinante in soluzione

# Pump & Treat (P&T)



# Pump & Treat (P&T)

---

Vantaggi	Svantaggi
<p>La relativa semplicità di esecuzione e la facilità di progettazione di un sistema di pozzi-barriera possono garantire la realizzazione di un intervento di messa in sicurezza a breve termine.</p> <p>Durante le attività di bonifica condotte con altre tecniche si possono realizzare barriere di pozzi per controllare le attività svolte sul sito di intervento.</p>	<p>Questa tecnica non riduce la concentrazione della sorgente quando questa è costituita da sottosuolo inquinato.</p> <p>Gli svantaggi principali riscontrabili sono relativi agli effetti di tailing (con aumento dei tempi di funzionamento richiesti) e rebound (con un aumento della concentrazione all'interruzione della fase di pompaggio).</p> <p>Il raggiungimento degli obiettivi di bonifica può richiedere anni.</p>