

La contaminazione da solventi clorurati delle acque sotterranee

Giovanni Pietro Beretta
Dipartimento di Scienze della Terra - Università degli studi di Milano
via Mangiagalli 34 – 20133 Milano
E-mail: giovanni.beretta@unimi.it

<http://projectfoks.eu>

IDROCARBURI CLORURATI

(Composti organoalogenati – Solventi clorurati)

- 1 - Principali tipologie**
- 2 - Proprietà fisico-chimiche**
- 3 - Movimento nelle acque sotterranee**
- 4 - Reazioni chimico-fisiche e biochimiche**
- 5 - Indagini di caratterizzazione ambientale**
- 6 - Bonifica**



PROVINCIA
DI TREVISO



ALCANI



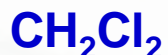
PROVINCIA
DI TREVISO



METANO



CLORURO DI METILE (MONOCLOROMETANO)



CLORURO DI METILENE (DICLOROMETANO)



CLOROFORMIO (TRICLOROMETANO)



TETRACLORURO DI CARBONIO



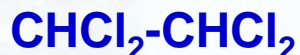
ETANO



1,2-DICLOROETANO



1,1,1-TRICLOROETANO



TETRACLORETANO



PROPANO



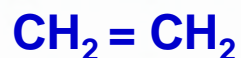
1,2-DICLOROPROPANO



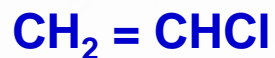
ALCHENI



PROVINCIA
DI TREVISO



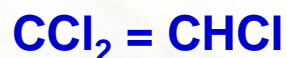
ETILENE



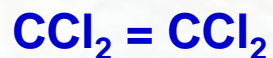
CLORURO DI VINILE



1,2-DICLOROETILENE



TRICLOROETILENE (*TRIELINA*)



TETRACLOROETILENE (*PERCLOROETILENE*)



PROPENE



1,3-DICLOROPROPENE



BUTADIENE



ESACLORO-1:3-BUTADIENE



FOKS
Focus on Key Sources
of Environmental Risks



CENTRAL
EUROPE
COOPERATION FOR SUCCESS



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND

Produzione mondiale di Idrocarburi clorurati (Field & Sierra-Alvarez, 2004)



Composto	Produzione mondiale		Produzione U.S.		Produzione Europea	
	t y ⁻¹	Anno	t y ⁻¹	Anno	t y ⁻¹	Anno
Clorometani						
CM	530,000	1983	390,000	1992	164,000	1998
DCM	515,000	1983	183,200	1994	291,000	1998
CF	325,000	1983	254,000	1994	300,000	1998
CT	575,000	1983	143,000	1991	48,000	1998
Cloroetani						
1,2-DCA	15,868,000	2002	9,328,000	2002		
1,1,1-TCA	600,000	1984	364,800	1990	40,000	1998
1,1,2-TCA	200,000-220,000	1984	170,000	1984		
Cloroeteni						
1,1-DCE	150,000-200,000	1986	104,500	1989	12,000	1998
VC	13,600,000	1985	6,000,000	1992	5,533,000	1998
TCE	390,000	1984	110,000	1984	123,000	1998
PCE	650,000	1993	123,000	1993	122,000	1998
Acido cloroacetico	290,000	1983				
Epicloridrine						
3-Cloropropene	800,000	1997			211,000	1998
Cloro-1,3-butadiene	648,000	1983				
Clorofluorocarburi						
CFC-12	425,000	1987				
CFC-11	382,000	1987				
HCFC-22	243,000	1987				
CFC-113	251,000	1987	78,000	1995		
HCFC 141b	113,000	1995				
HCFC 142b	38,000	1995				

CM=clorometano; DCM=diclorometano; CF=cloroformio; CT=tetracloruro di carbonio; 1,2-DCA=dicloroetano; TCA=tricloroetano; 1,1-DCE=1,1-dicloroetene; VC=vinil cloruro; TCE=tricloroetilene; PCE=perclorocloroetilene; CFC-12=diclorodifluorometano; CFC-11=triclorofluorometano; HCFC-22=clorodifluorometano; CFC-113=1,1,2,2-triclorotrifluoroetano; HCFC 141b=1,1-dicloro,1-fluoroetano; HCFC 142b= 1,1-dicloro-1-fluoroetano



Definizione di NAPL (non aqueous phase liquid)



PROVINCIA
DI TREVISO



Idrocarburi poco miscibili in superficie che si disciolgono nell'acqua in basse aliquote

Possono essere più leggeri (LNAPL) o più densi dell'acqua (DNAPL)

Formano una visibile fase oleosa separata in superficie

Migrazione nel sottosuolo complessa, governata dall'azione di: gravità, densità, forze capillari e litologia

- 1) Caratteristiche del mezzo**
- 2) Caratteristiche delle sostanze**
- 3) Caratteristiche delle sostanze e del mezzo**

PROPRIETÀ CHIMICO FISICHE DEGLI IDROCARBURI CLORURATI

(Banca Dati ISS-SIPELS)



PROVINCIA
DI TREVISO



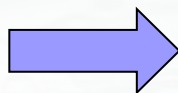
Composto	Solubilità [mg/litro]	Pressione di vapore [mm Hg]	Costante di Henry	Koc/Kd [ml/g]	log Kow
1,1,2,2-Tetracloroetano	2,97E+03	5,95E+00	1,41E-02	7,90E+01	2,39E+00
1,1,2-Tricloroetano	4,42E+03	2,42E+01	3,74E-02	5,01E+01	2,05E+00
1,1-Dicloroetilene	2,25E+03	6,04E+02	1,07E+00	5,89E+01	2,13E+00
1,2,3-Tricloropropano	1,90E+03	3,69E+00	1,55E-02	9,72E+01	2,63E+00
1,2-Dicloroetano	8,52E+03	7,91E+01	4,01E-02	1,74E+01	1,47E+00
1,2-Dicloropropano	2,80E+03	4,97E+01	1,15E-01	4,37E+01	1,97E+00
Clorometano	5,24E+03	4,28E+03	3,95E-01	4,29E+00	9,10E-01
Cloruro di vinile	2,76E+03	2,66E+03	1,11E+00	1,86E+01	1,50E+00
Diclorometano	1,30E+04	4,38E+02	8,98E-02	1,00E+01	1,25E+00
Tetracloroetilene	2,00E+02	1,90E+01	7,54E-01	1,55E+02	2,67E+00
Tricloroetilene	1,10E+03	7,43E+01	4,22E-01	9,43E+01	2,71E+00
Triclorometano	7,92E+03	1,97E+02	1,50E-01	3,98E+01	1,92E+00
Esaclorobutadiene	3,23E+00	2,20E-01	3,34E-01	2,95E+02	4,81E+00
1,1,1-Tricloroetano	1,33E+03	1,24E+02	7,05E-01	1,35E+02	2,48E+00
1,1-Dicloroetano	5,06E+03	2,27E+02	2,30E-01	5,34E+01	1,79E+00
<i>cis</i> -1,2-Dicloroetilene	3,50E+03	2,03E+02	1,67E-01	3,55E+01	1,86E+00
<i>trans</i> -1,2-Dicloroetilene	6,30E+03	3,30E+02	3,85E-01	3,80E+01	2,07E+00
1,2-dicloroetilene	6,30E+03	3,30E+02	3,85E-01	3,80E+01	1,86E+00
1,2-Dibromoetano	4,15E+03	7,80E+01	2,66E-02	4,40E+01	1,22E+00
Bromodiclorometano	6,74E+03	5,00E+01	9,82E-02	5,50E+01	2,10E+00
Dibromoclorometano	1,73E+04	1,50E+01	3,23E-02	3,45E+01	4,30E-01
Tribromometano (bromoformio)	3,10E+03	5,45E+00	2,39E-02	1,26E+02	2,35E+00

1 kg di NAPL può contaminare



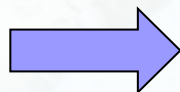
PROVINCIA
DI TREVISO

100.000 L di acque
sotterranee a 10 mg/L di
valore limite



fino a 500 m³ di volume
di acquifero: per un
acquifero dello spessore
di 10 m si ha una
superficie di 50 m²

100.000.000 L di acque
sotterranee a 10 µg/L di
valore limite



fino a 500.000 m³ di
volume di acquifero: per un
acquifero dello spessore di
10 m si ha una superficie di
50.000 m² (5 ha)



Concentrazione soglia di contaminazione (CSC) - acque sotterranee (D.Lgs. 152/06)



PROVINCIA
DI TREVISO

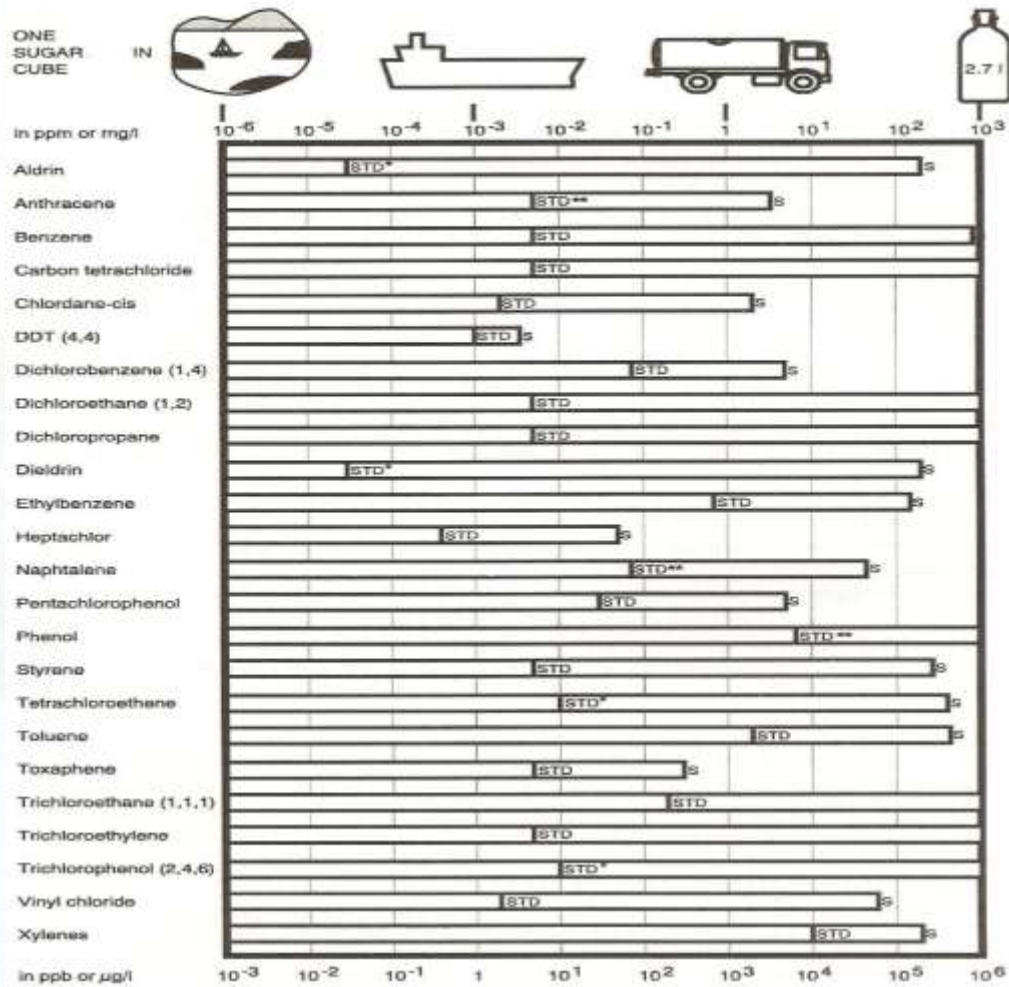
N.	Classe	Sostanza	Valore limite (µg/l)
32	Alifatici clorurati	clorometano	1,5
33	Alifatici clorurati	triclorometano	0,15
34	Alifatici clorurati	cloruro di vinile	0,5
35	Alifatici clorurati	1,2-dicloroetano	3
36	Alifatici clorurati	1,1-dicloroetilene	0,05
37	Alifatici clorurati	tricloroetilene	1,5
38	Alifatici clorurati	tetracloroetilene	1,1
39	Alifatici clorurati	esaclorobutadiene	0,15
40	Alifatici clorurati	sommatoria organoalogenati	10
41	Alifatici clorurati	1,1-dicloroetano	810
42	Alifatici clorurati	1,2-dicloroetilene	60
43	Alifatici clorurati	1,2-dicloropropano	0,15
44	Alifatici clorurati	1,1,2-tricloroetano	0,2
45	Alifatici clorurati	1,2,3-tricloropropano	0,001
46	Alifatici clorurati	1,1,2,2-tetracloroetano	0,05
47	Alifatici alogenati	tribromometano	0,3
48	Alifatici alogenati	1,2-dibromoetano	0,001
49	Alifatici alogenati	dibromoclorometano	0,13
50	Alifatici alogenati	bromodichlorometano	0,17



Composti organici comunemente rilevati nelle acque sotterranee e valutazione del significato pratico delle concentrazioni misurate (Spitz Moreno, 1996)



PROVINCIA DI TREVISO



Rapporto tra CSC e limiti allo scarico delle acque



PROVINCIA
DI TREVISO

Elementi e Composti	A - All. 5 alla arte terza, Tab. 3 – scarico in acque superficiali (µg/l)	B - All. 5 al Titolo V, Tab. 2 (µg/l)	A/B
Clorometano		1,5	
Triclorometano		0,15	
Cloruro di Vinile		0,5	
1,2-Dicloroetano		3	
1,1-Dicloroetilene		0,05	
1,2-Dicloropropano		0,15	
1,1,2-Tricloroetano		0,2	
Tricloroetilene		1,5	
1,2,3-Tricloropropano		0,001	
1,1,2,2-Tetracloroetano		0,05	
Tetracloroetilene		1,1	
Esaclorobutadiene		0,15	
Sommatoria organoalogenati cancerogeni		10	
Solventi clorurati	1000		100 - 1000000



CARATTERISTICHE DEL MEZZO

- POROSITÀ
- PERMEABILITÀ
- CONTENUTO IDRICO
- GRADO DI SATURAZIONE



PROVINCIA
DI TREVISO



Migrazione dei DNAPL nelle acque sotterranee: permeabilità e conducibilità idraulica



PROVINCIA
DI TREVISO



$$k_w = K \frac{\rho_w g}{\mu_w} \quad k_w = 10^{-4} \text{ m/s (da prova di permeabilità)}$$

k_w = conducibilità idraulica (m/s)

K = permeabilità intrinseca (m²)

ρ_w = densità dell'acqua (kg/m³) (T = 15 °C)

μ_w = viscosità dinamica dell'acqua (Ns/m²) (T = 15 °C)

g = accelerazione di gravità (m/s²)

$$K = k_w \frac{\mu_w}{\rho_w g}$$

$$K = 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \frac{1.15 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{999 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9.806 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} = 1.174 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$$

Migrazione dei DNAPL nelle acque sotterranee: permeabilità e conducibilità idraulica



PROVINCIA
DI TREVISO

$$k_{\text{CHC}} = K \frac{\rho_{\text{CHC}} g}{\mu_{\text{CHC}}}$$

K_{CHC} = conducibilità CHC (m/s)

K = permeabilità intrinseca (m²)

ρ_{CHC} = densità del CHC (kg/m³) (T = 15 °C)

μ_{CHC} = Viscosità dinamica CHC (Ns/m²) (T = 15 °C)

g = accelerazione di gravità (m/s²)

ρ_{CHC} = densità Tricloroetilene 1460 kg/m³ (T = 15 °C)

μ_{CHC} = Viscosità dinamica Tricloroetilene 5.7·10⁻⁴ (Ns/m²) (T = 15 °C)

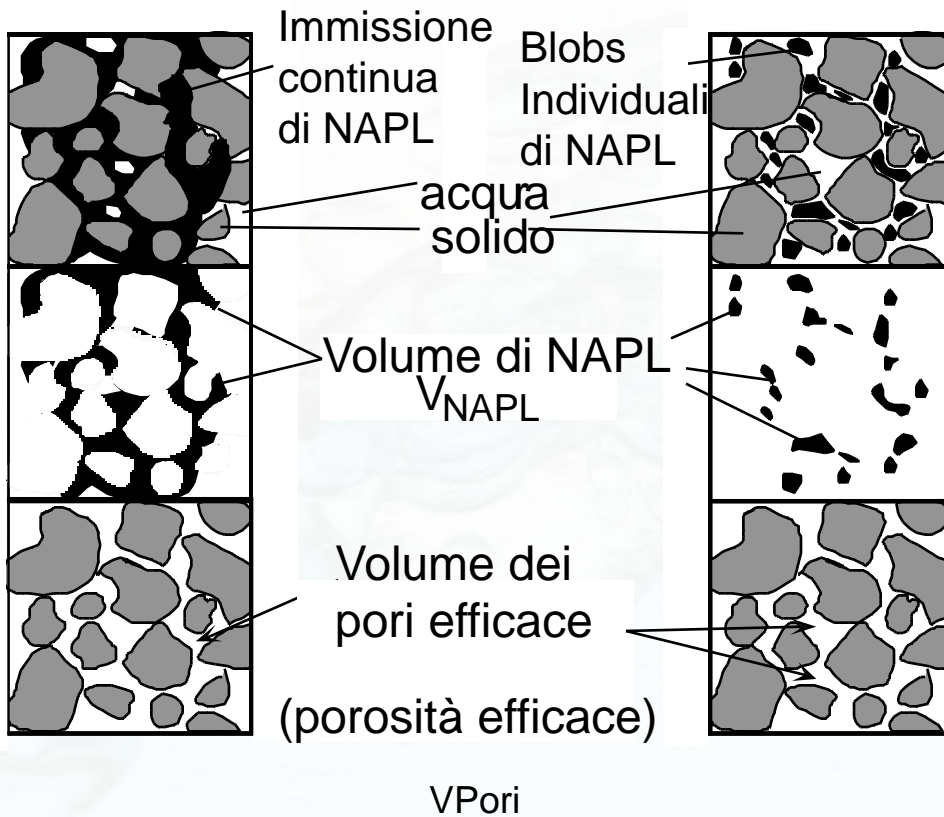
$$K_{\text{CHC}} = 1.174 \cdot 10^{-11} \text{m}^2 \frac{1460 \text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot 9.806 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{5.7 \cdot 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}} = 2.94 \cdot 10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\frac{k_w}{k_{\text{CHC}}} \approx \frac{1}{3}$$

In relazione alla diversa densità e viscosità dinamica, il movimento avvetivo di una fase libera di Tricloroetilene è più veloce (circa 3 volte) di quello dell'acqua



GRADO DI SATURAZIONE



$$S_{NAPL} = \frac{V_{NAPL}}{V_{Pori}}$$

Stimabile in laboratorio:

$$S_o = \frac{\rho_b \cdot NAPL}{\rho_n \cdot n \cdot 10^6}$$

ρ_b = densità del suolo [g/cm³]

ρ_n = densità del NAPL [g/cm³]

n = porosità

NAPL = concentrazione

NAPL [mg_{NAPL}/kg suolo secco]

REGIME DI FLUSSO

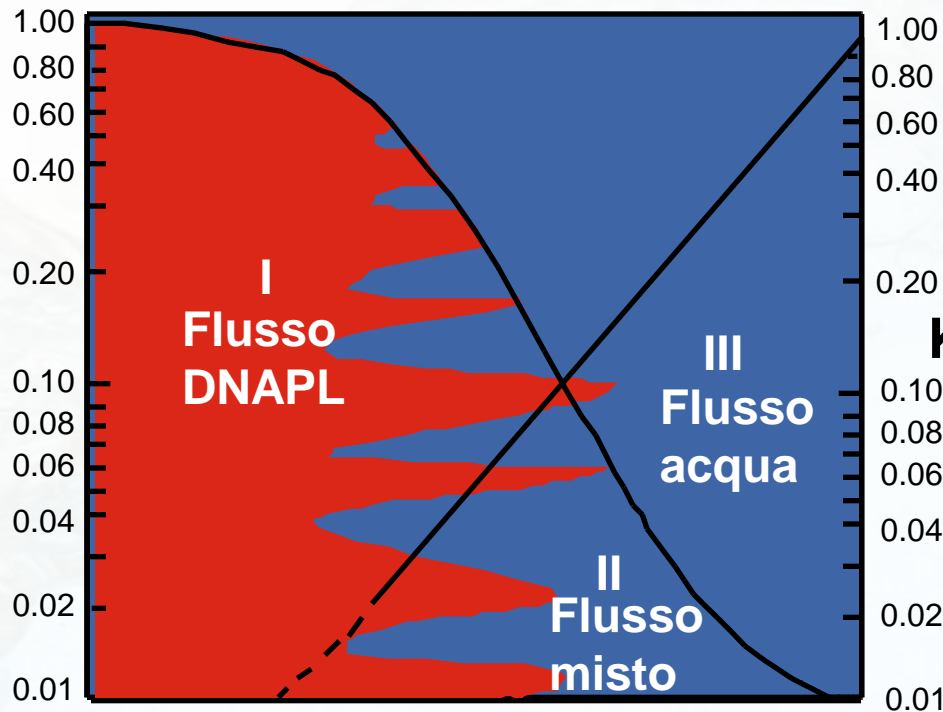


PROVINCIA
DI TREVISO



k/k_{CHC}

k/k_w



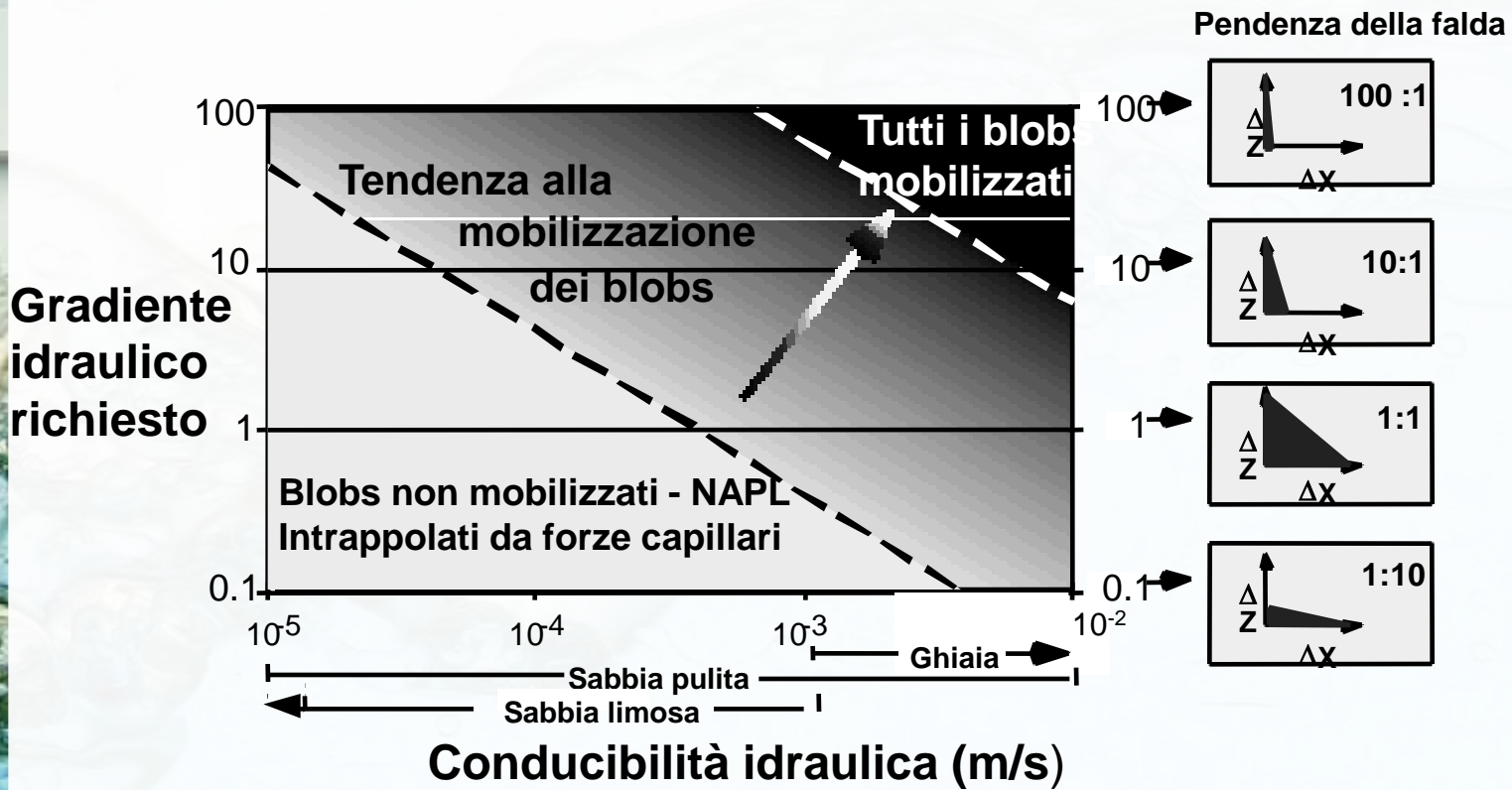
← Aumento saturazione DNAPL
Aumento saturazione acqua →

K_r = permeabilità
relativa

Mobilizzazione idraulica dei NAPL



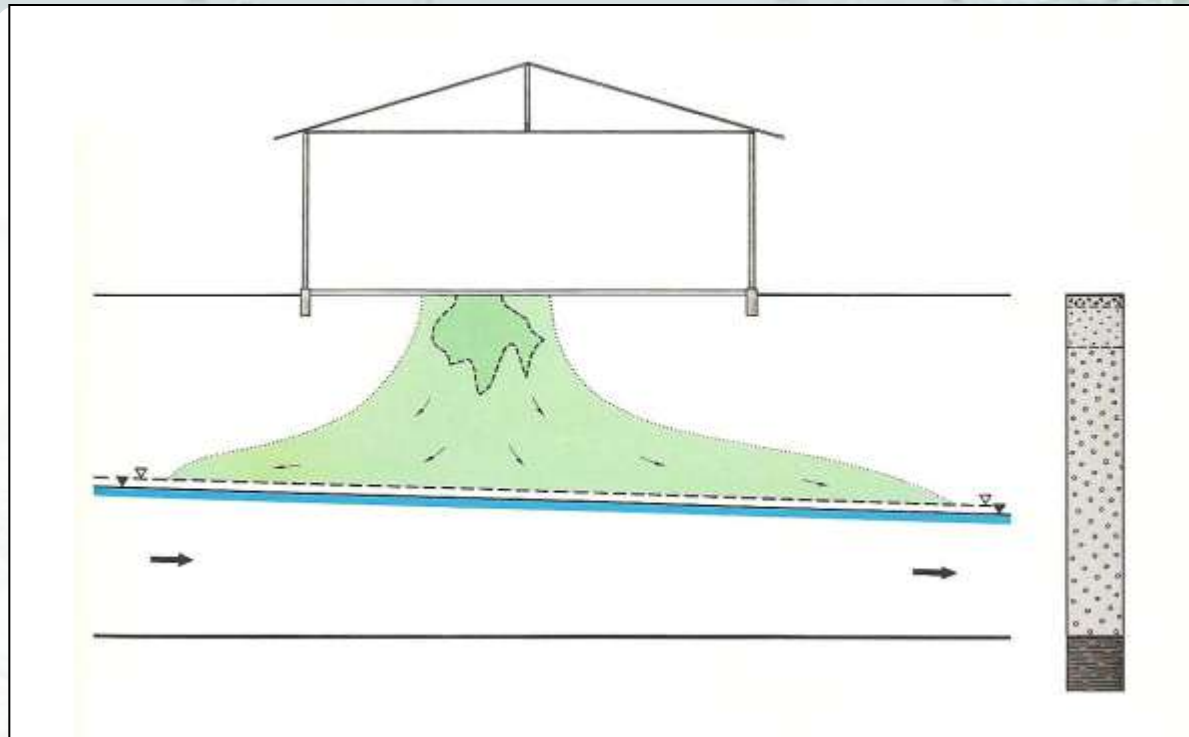
PROVINCIA
DI TREVISO



Sversamento modesto di composti organoalogenati nel mezzo insaturo e incremento della concentrazione nella fase gassosa (al di sopra della frangia capillare)



PROVINCIA
DI TREVISO



Scenario 1



Schwille F., 1988

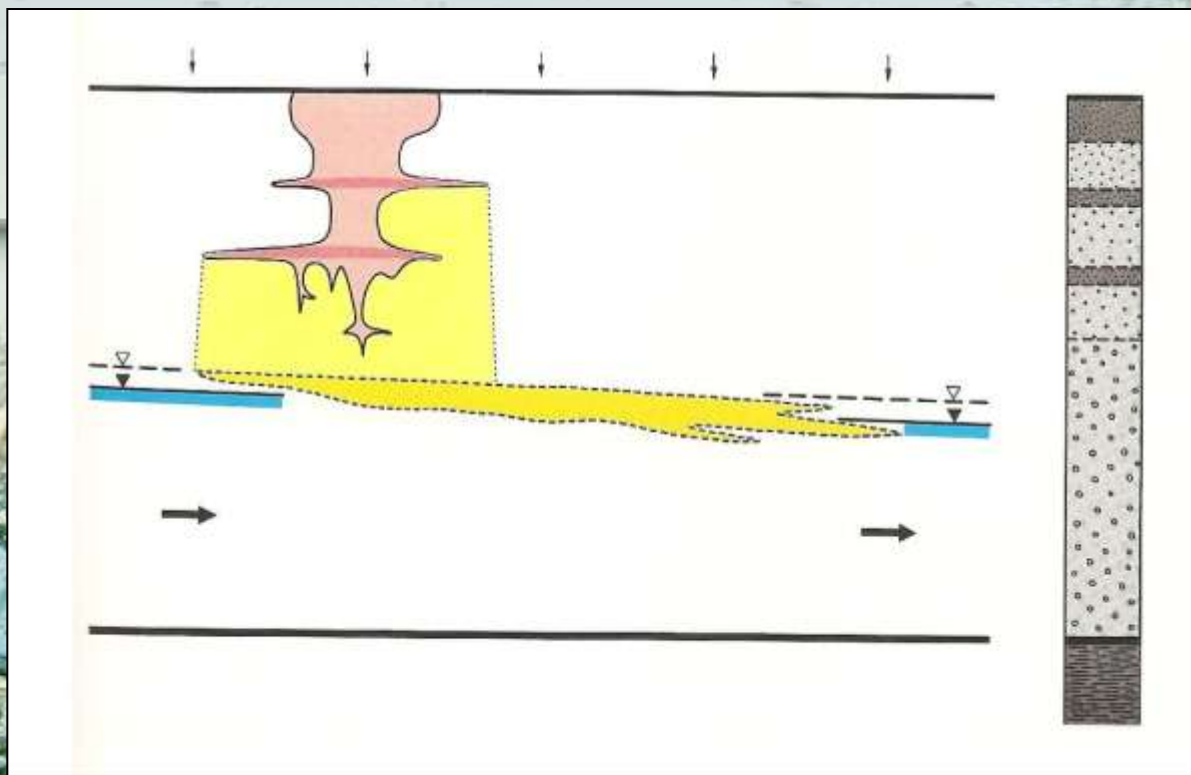
Composti organoalogenati

		saturazione residua in fase fluida (grado di saturazione)
		in fase acquosa
		in fase gassosa

Sversamento consistente di composti organoalogenati nel mezzo insaturo, ma non eccedente la sua capacità di ritenzione



PROVINCIA
DI TREVISO



Scenario 2



Schwille F., 1988

Composti organoalogenati

- saturazione residua in fase fluida (grado di saturazione)
- in fase acquosa
- in fase gassosa

Altezza del DNAPL necessaria per poter penetrare la frangia capillare

Equazione di Hobson (Anderson, 1983)

$$z_{\text{CHC}} = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\Delta\rho \cdot g} \left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_o} \right) = \frac{P_{c(\text{fine})} - P_{c(\text{grossa})}}{\Delta\rho \cdot g}$$

z_{HCH} = altezza del DNAPL per penetrare nella frangia capillare (m)

$\Delta\rho$ = differenza di densità tra DNAPL e acqua (kg/m^3)

σ = tensione interfacciale DNAPL-acqua (N/m)

α = angolo di contatto tra fluido e superficie solida ($^\circ$)

g = accelerazione di gravità (m/s^2)

P_c = Pressione capillare (Pa)

r_t, r_o = raggi di curvatura dell'apertura dei pori e dei meati (m)

L'equazione non è valida per granulometrie fini, quali limi e argille, che si comportano come barriere impermeabili



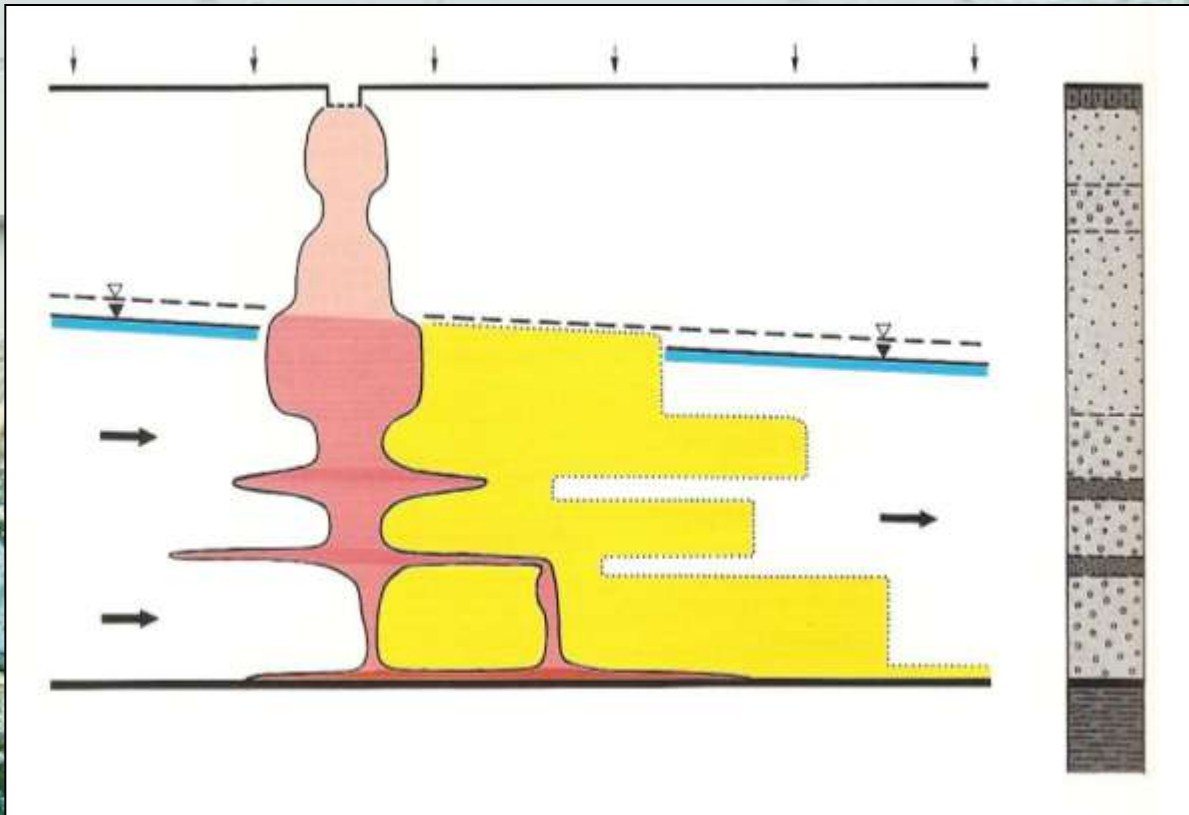
PROVINCIA
DI TREVISO



La massa che si infila di composti organoalogenati eccede la capacità di ritenzione dei mezzi insaturo e saturo e la fase liquida raggiunge il substrato impermeabile dell'acquifero



PROVINCIA
DI TREVISO



Scenario 3



Schwille F., 1988

Composti organoalogenati

-  saturazione residua in fase fluida (grado di saturazione)
-  in fase acquosa
-  in fase gassosa

Altezza del DNAPL necessaria per poter penetrare nel mezzo saturo

Equazione di Hobson (Anderson, 1983)

$$z_{\text{CHC}} = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r \cdot \Delta\rho \cdot g}$$

z_{HCH} = altezza del DNAPL per penetrare nella zona satura (m)

$\Delta\rho$ = differenza di densità tra DNAPL e acqua (kg/m^3)

σ = tensione interfacciale DNAPL-acqua (N/m)

α = angolo di contatto tra fluido e superficie solida ($^\circ$)

g = accelerazione di gravità (m/s^2)

r = raggio principale di curvatura dell'interfaccia DNAPL-acqua (m)



PROVINCIA
DI TREVISO



SVERSAMENTO SUPERFICIALE DI TETRACLOREILENE



PROVINCIA
DI TREVISO



al di sopra della frangia
capillare

volume = 36.3 L



al di sotto della frangia
capillare

Schwille F., 1988

CARATTERISTICHE DEL FLUIDO

- DENSITA'
- SOLUBILITA'
- VISCOSITA'
- BAGNABILITA'
- PRESSIONE CAPILLARE
- VOLATILITA'



PROVINCIA
DI TREVISO



SOLUBILITA'



PROVINCIA
DI TREVISO

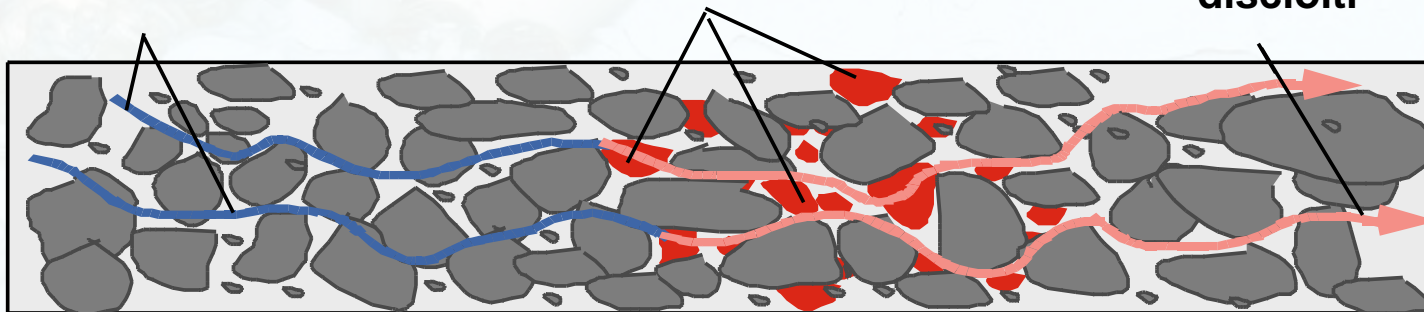
Rappresenta la capacità di una sostanza di sciogliersi in acqua e viene indicata dal rapporto tra la quantità soluto ed il volume del solvente, nel nostro caso rappresentato dall'acqua.

La solubilità è un parametro caratteristico della sostanza che varia al variare delle condizioni di temperatura e di pressione e viene generalmente espresso in mg/l od in moli/l.

Acque sotterranee
che formano un
pennacchio
inquinante di NAPL
disciolti

Acqua pulita

Residui di NAPL solubili

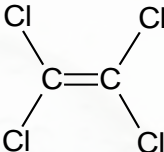
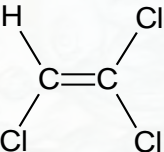
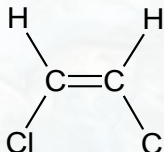
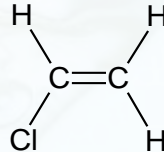


ALCUNE CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE GRUPPO ETILENI



PROVINCIA
DI TREVISO



	Densità (20°C) (g/ml)	Solubilità (25°C) (mg/l)	K _{oc}
 PCE	1.62	140	263
 TCE	1.46	1100	137
 1,2 - DCE	1.21	3500	80
 VC	0.91	2700	2.45

BAGNABILITA'

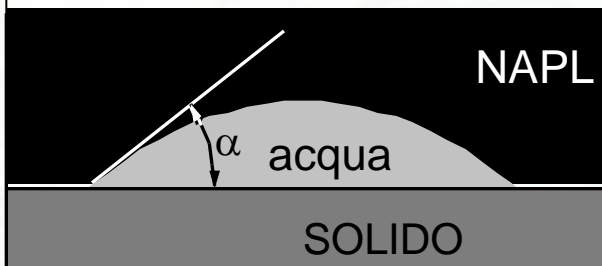


PROVINCIA
DI TREVISO

Fluido test: acqua
Fluido di fondo: NAPL

$$\alpha < 70^\circ$$

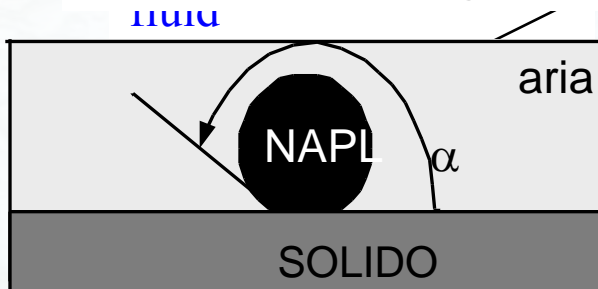
Acqua è il fluido bagnante



Fluido test: NAPL
Fluido di fondo: aria

$$\alpha > 110^\circ$$

NAPL non è fluido bagnante



α = angolo di contatto

Relazioni generali tra aria, acqua e NAPL

Sistema	Fluido bagnante	Fluido non bagnante
aria/acqua	acqua	aria
aria/ NAPL	NAPL	aria
acqua/NAPL	acqua	NAPL
aria/acqua/NAPL	acqua > NAPL > aria	aria



VOLATILITA'

La **pressione di vapore** (Pa) di un composto rappresenta la tendenza dello stesso ad evaporare; essa viene espressa dalla pressione esercitata dalla fase gassosa di una sostanza quando essa è in condizioni di equilibrio.

La **costante di Henry**, comunemente definita come partizione tra l'aria e l'acqua di un determinato composto, è data dal rapporto tra la pressione parziale di un composto in fase gassosa e la sua solubilità e può essere espressa in $\text{atm}\cdot\text{m}^3/\text{moli}$.

Un'ulteriore forma di espressione della costante di Henry considera il **rapporto tra la concentrazione di un composto nella fase vapore e quella in fase acquosa**; essendo entrambe le concentrazioni espresse in moli/L , la costante di Henry diventa **adimensionale**.



PROVINCIA
DI TREVISO



CARATTERIZZAZIONE DELLA VOLATILITA'

VOCs (volatile organic compounds) composti organici che volatilizzano velocemente a temperatura (20 °C) e pressione (1 atm) standard

SVOCs (semivolatile organic compounds) composti organici che volatilizzano in modo relativamente lento a temperatura (20 °C) e pressione (1 atm) standard

- indicatore di volatilità dei composti: pressione di vapore > 0.5 mm Hg;
- indicatore della tendenza di partizione tra l'acqua e il vapore: costante di Henry: > 0.1.

In accordo con la Direttiva 1999/13/EC, un composto organico volatile (**COV**) viene definito “**qualsiasi composto organico che abbia a 293,15 °K (20 °C) una pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in condizioni particolari di uso.**” Per solventi organici una pressione di vapore di 0.01 kPa a 20°C grossomodo corrisponde a un punto di ebollizione o a un punto di ebollizione iniziale di 215-220 °C.



PROVINCIA
DI TREVISO



CARATTERISTICHE DEL FLUIDO E DEL MEZZO

- **SATURAZIONE RESIDUA**
- **ADSORBIMENTO**
- **DEGRADAZIONE**



PROVINCIA
DI TREVISO

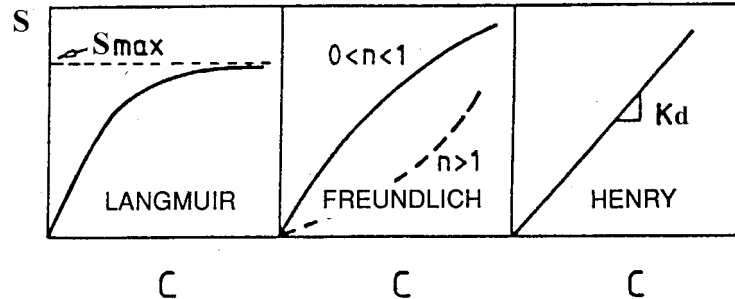


ADSORBIMENTO



PROVINCIA
DI TREVISO

Langmuir
$$S = \frac{a C}{1 + C/C_d}$$



C_d (mg/L) - concentrazione a semisaturazione, a - costante da determinare

Freundlich
$$S = k C^n \quad (n \neq 1)$$

Henry
$$S = k C \quad (n = 1)$$

$K_d = S/C =$ coefficiente di distribuzione (L/kg)



ADSORBIMENTO DI COMPOSTI ORGANICI



PROVINCIA
DI TREVISO

Koc = coefficiente di partizione Carbonio organico/acqua (l/kg)

foc = frazione di carbonio organico del terreno

Kow = coefficiente di partizione n-ottanolo/acqua (indice della lipofilità o della igrofilicità di un composto)

Kd = Koc foc

log Koc = - 0.21 + log Kow (Karickhoff et al., 1979)

fattore di ritardo $R = u_w / u_i$

u_w = velocità effettiva di filtrazione dell'acqua (m/s)

u_i = velocità effettiva di un composto trasportato dall'acqua (m/s)

$$R = 1 + Kd \frac{(1 - n) \rho_s}{n}$$

ρ_s = densità del materiale (kg/m³)
 $\rho_b = (1-n) \rho_s$ = densità apparente (kg/m³)
 n = porosità totale



DECADIMENTO O DEGRADAZIONE



PROVINCIA
DI TREVISO

$$\frac{\delta C}{\delta t} = -\lambda C^n$$

λ = costante di decadimento

Reazione di primo ordine (n=1)

$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

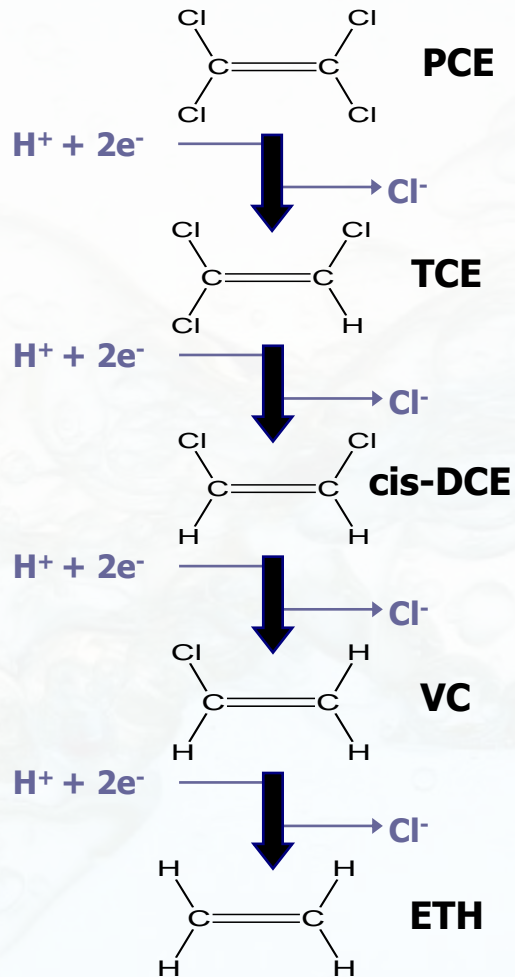
essendo C_0 la concentrazione iniziale (mg/L) e C la concentrazione al tempo t

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 0.693/T_{1/2}$$

con $T_{1/2}$ = tempo di dimezzamento di composti radioattivi o di degradazione di contaminanti



DECLORAZIONE RIDUTTIVA COMPLETA



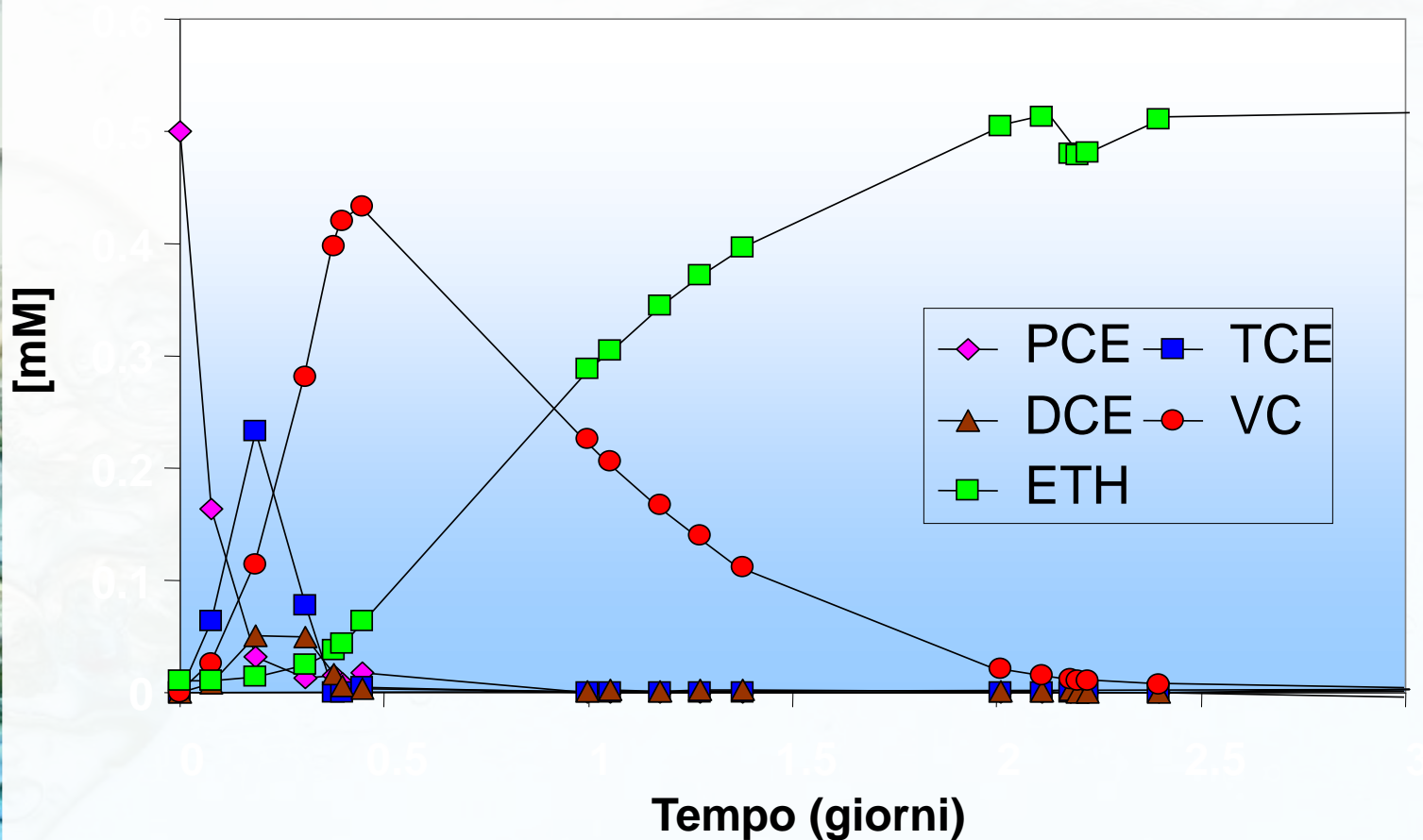
- Coinvolge una serie di riduzioni a stadi
- In ogni stadio un atomo di Cloro è sostituito con un Idrogeno
- Ogni stadio è una riduzione: è necessario fornire un donatore di elettroni per sostenere il processo (H_2 , metanolo, etanolo...)
- VC e DCE sono spesso i prodotti finali dell'incompleta declorazione del PCE
- Il VC è più tossico del PCE di partenza



PERCORSO DI DECLORAZIONE RIDUTTIVA COMPLETA DEL PCE (PCE→ETH)



PROVINCIA
DI TREVISO



BATTERI CHE OPERANO LA DECLORAZIONE RIDUTTIVA C DEGLI ETILENI (MAJOR, D., E. ET AL., 2003)



PROVINCIA
DI TREVISO

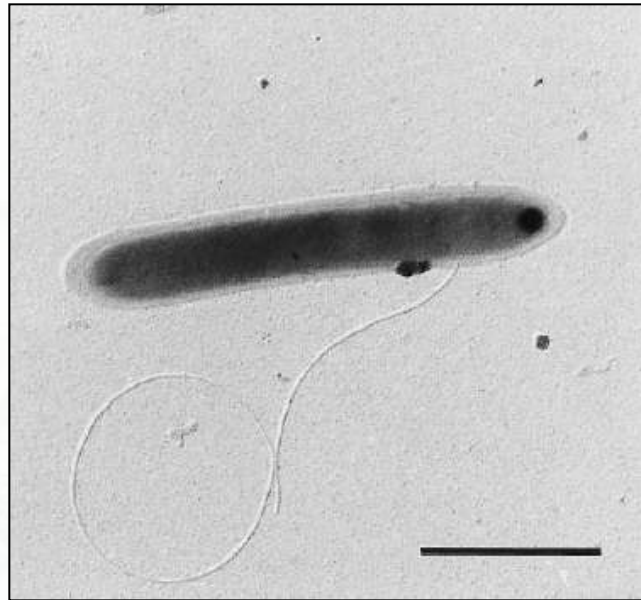


Isolate or Culture	Closest Phylogenetic Affiliation	Dechlorination Steps Performed	Reference
<i>Dehalobacter restrictus</i> <i>Dehalospirillum multivorans</i> , renamed <i>Sulfospirillum</i> <i>Desulfitobacterium</i> strain PCE1	Low G+C Gram positive bacteria Proteobacteria, ϵ subdivision <i>Desulfitobacterium</i> a Gram positive bacterium	PCE to <i>cis</i> -DCE PCE to <i>cis</i> -DCE PCE to TCE	Holliger et al., 1993 Scholz-Muramatsu et al., 1995 Gerritse et al., 1996
<i>Desulfuromonas chloroethenica</i>	<i>Geobacter</i>	PCE to <i>cis</i> -DCE	Krumholz et al., 1996
strain MS-1	<i>Enterobacteriaceae</i>	PCE to <i>cis</i> -DCE	Sharma and McCarty 1996
strain TEA	Gram positive bacteria Low G+C	PCE to <i>cis</i> -DCE	Wild et al., 1996
<i>Desulfitobacterium</i> sp. strain PCE-S	<i>Desulfitobacterium</i> a Gram positive bacterium	PCE to <i>cis</i> -DCE	Miller et al., 1997
<i>Dehalococcoides ethenogenes</i> strain 195	Green, nonsulfur bacteria	PCE to ethylene	Maymó-Gatell et al., 1997
<i>Desulfitobacterium frappieri</i> TCE1	<i>Desulfitobacterium</i> a Gram positive bacterium	PCE to <i>cis</i> -DCE	Gerritse et al., 1999
<i>Clostridium bifermentans</i> strain DPH-1	<i>Clostridium</i>	PCE to <i>cis</i> -DCE	Chang et al., 2000
<i>Dehalococcoides</i> sp. strain CBDB1	<i>Dehalococcoides ethenogenes</i>	PCE to <i>trans</i> -DCE	Adrian et al., 2000
<i>Desulfitobacterium</i> sp. strain Y51	<i>Desulfitobacterium</i> a Gram positive bacterium	PCE to <i>cis</i> -DCE	Suyama et al., 2002
<i>Desulfitobacterium</i> <i>metallireducens</i>	<i>Desulfitobacterium</i> a Gram positive bacterium	PCE to <i>cis</i> -DCE	Finneran et al., 2003
<i>Desulfuromonas michiganensis</i>	<i>Geobacter</i>	PCE to <i>cis</i> -DCE	Sung et al., 2003
<i>Dehalococcoides</i> sp. strain BAV1	<i>Dehalococcoides etheneogenes</i>	<i>cis</i> -DCE to ethylene	He et al., 2003a,b

BATTERI CHE OPERANO DEALOGENAZIONE

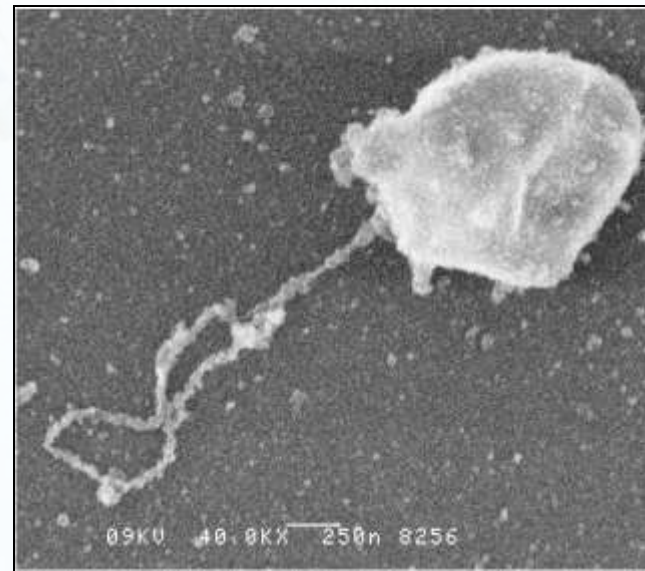


PROVINCIA
DI TREVISO



Dehalobacter restrictus

Dehalococcoides ethenogenes



CARATTERIZZAZIONE DI SUOLO E SOTTOSUOLO - VOC

- misura del gas interstiziale (soil gas survey) applicando il metodo attivo (in prevalenza) o il metodo passivo;
- misura in situ con strumentazione di campo (es. FID,PID);
- prelievo di campioni di suolo in fustella o con sonde specifiche (es. Geoprobe);
- utilizzo di apparecchiature specifiche derivate dalle tecniche di perforazione direct push (es. MIP);
- - uso di microcarotieri sul campione prelevato (ASTM D4547-91 e EPA 5035-96)



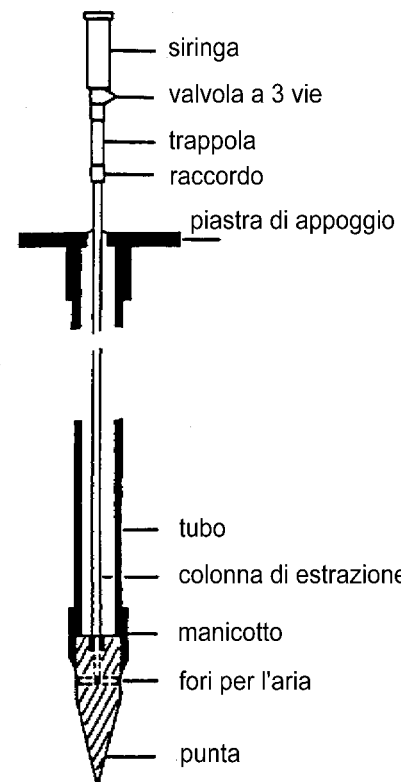
PROVINCIA
DI TREVISO



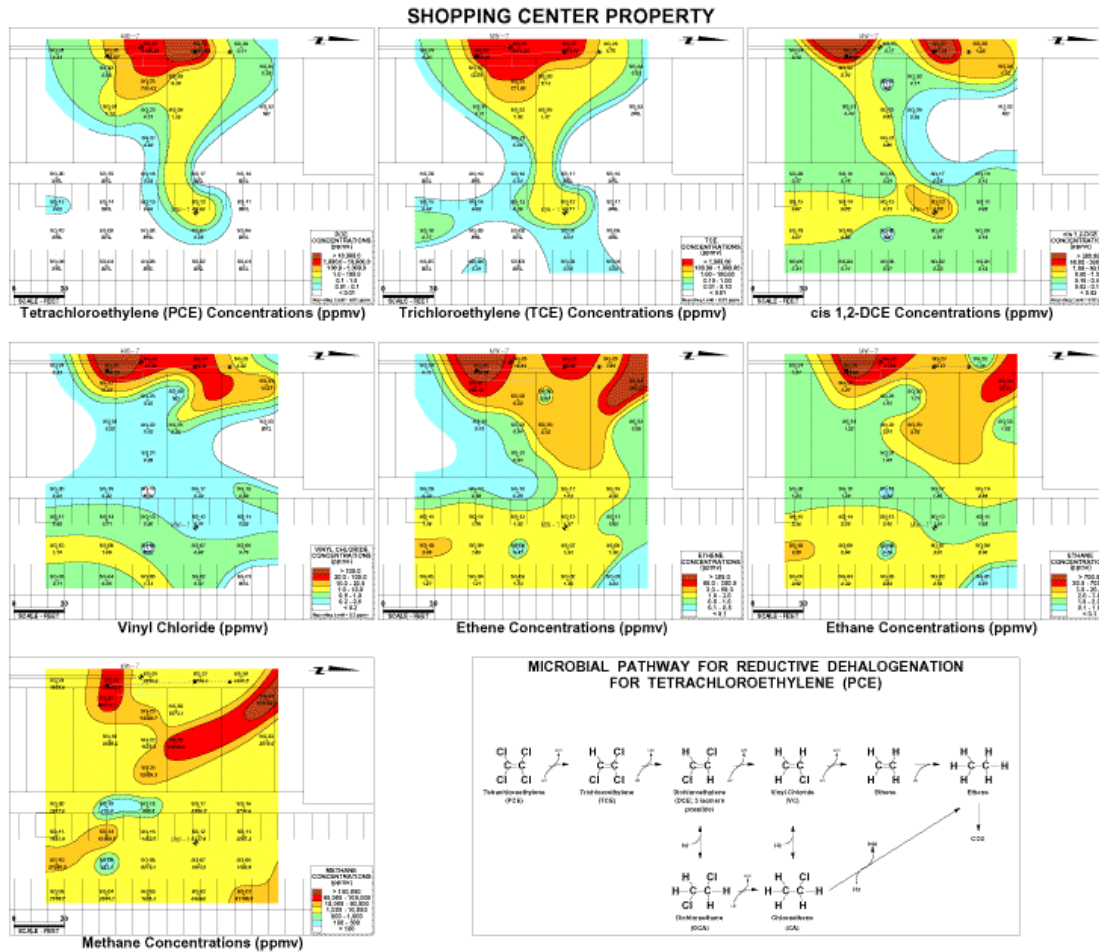
METODI ATTIVI: SOIL GAS SURVEY ATTIVO



PROVINCIA
DI TREVISO



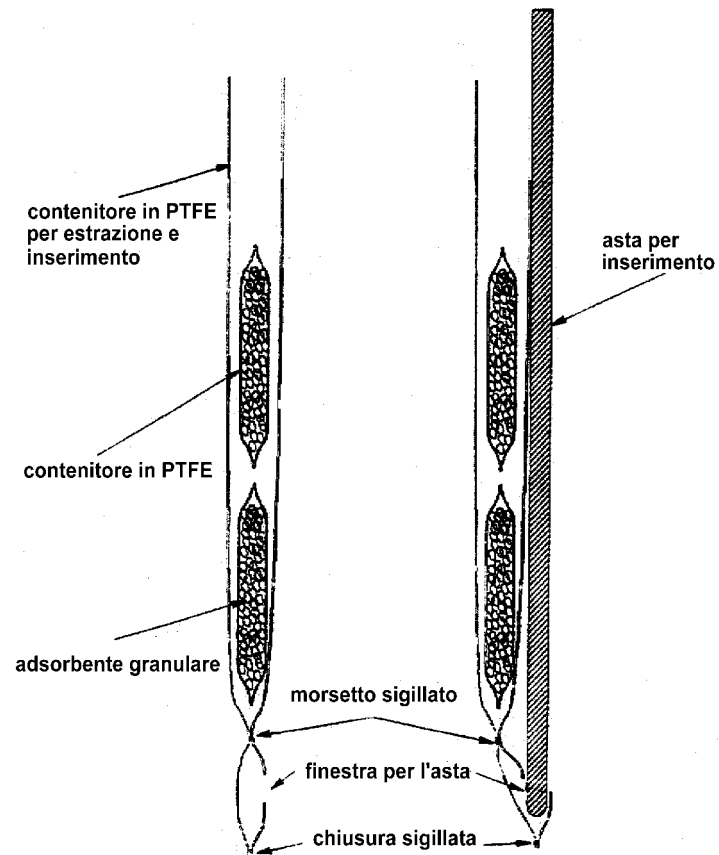
DISTRIBUZIONE COMPOSTI CLORURATI NEL MEZZO INSATURO



METODI PASSIVI: SISTEMA GORE-SORBER[®]



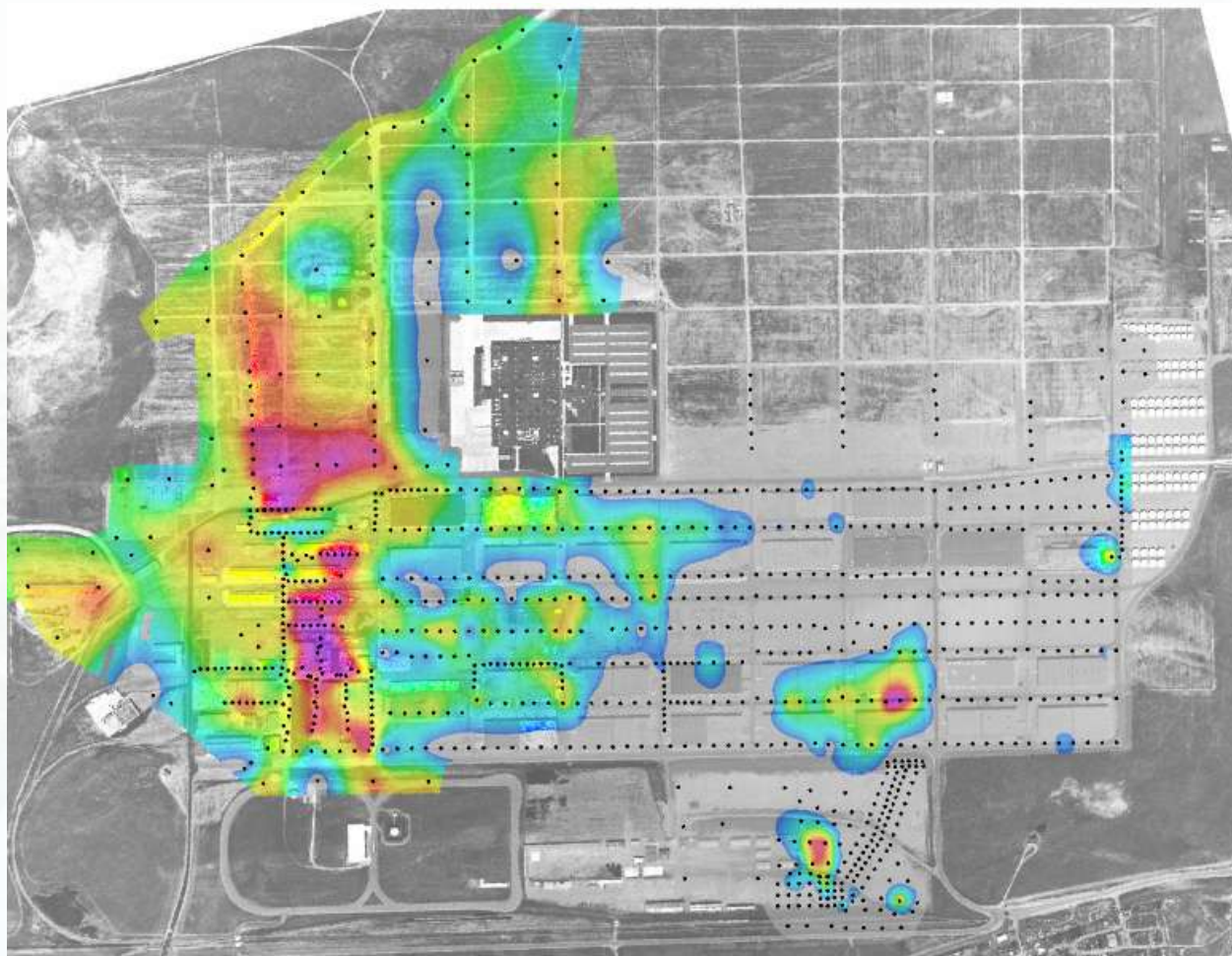
PROVINCIA
DI TREVISO



CARATTERIZZAZIONE PRESENZA DI CLORURO DI VINILE



PROVINCIA
DI TREVISO



FOKS
Focus on Key Sources
of Environmental Risks



CENTRAL
EUROPE
COOPERATION FOR SUSTAINABLE
DEVELOPMENT



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND

MISURE CON STRUMENTI IN CAMPO



PROVINCIA
DI TREVISO



FOKS
Focus on Key Sources
of Environmental Risks



CENTRAL
EUROPE
COOPERAZIONE PER IL SUD-EST



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND



FID
(Flame Ionization Detector)

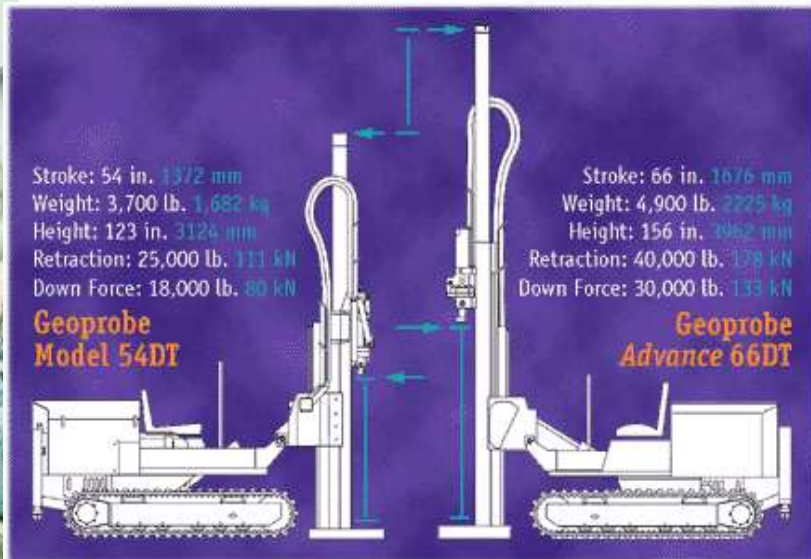
PID
(Photo Ionization Detector)



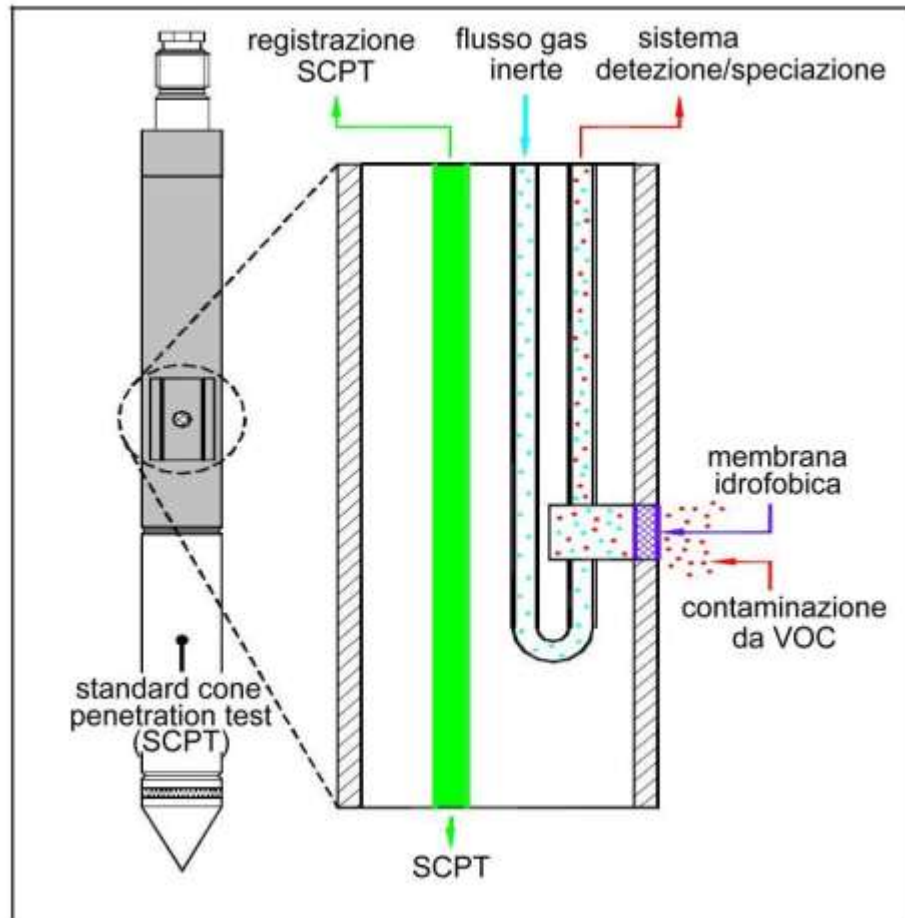
SONDE DIRECT PUSH



PROVINCIA
DI TREVISO



MEMBRANE INTERFACE PROBE (MIP)



gas cromatografo GC-grade detector ad esempio PID: per BTEX;

ionizzatori a fiamma (FID): idrocarburi petroliferi (alcani a catena lineare o ramificata);

- cattura di elettroni (ECD) e conducibilità elettrolitica (DELCD): composti clorurati.

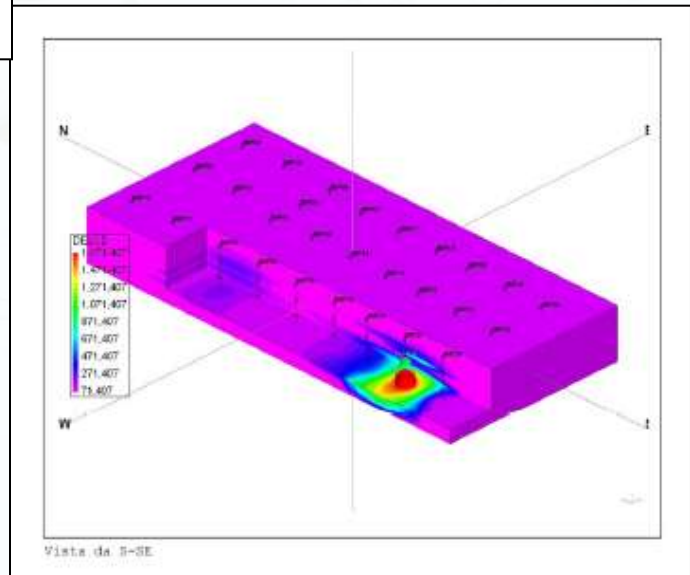
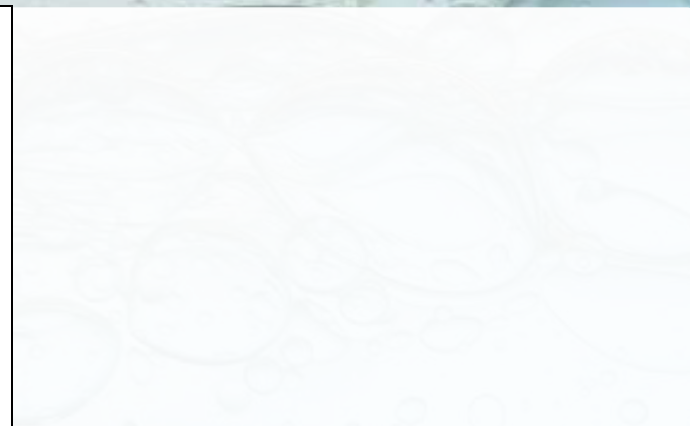
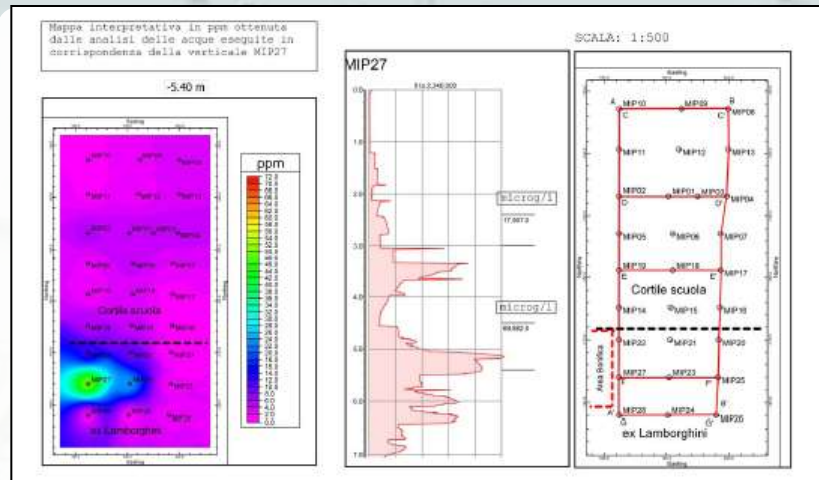
80-125 °C



REGISTRAZIONI CON MIP (FASE LIBERA)



PROVINCIA
DI TREVISO



Focus on Key Sources
of Environmental Risks



CENTRAL
EUROPE
COOPERATION FOR SUSTAINABLE
DEVELOPMENT



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND

MICROCAROTIERI (ASTM D4547-91 E EPA 5035-96)



PROVINCIA
DI TREVISO



FOKS
Focus on Key Sources
of Environmental Risks



CENTRAL
EUROPE
COOPERATION FOR SUCCESS



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND

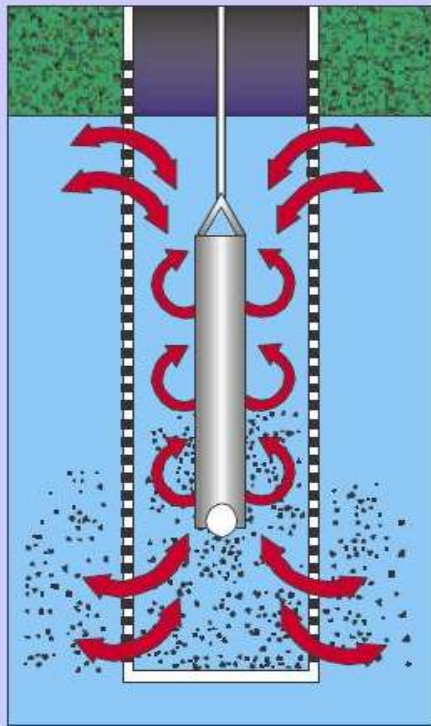


CARATTERIZZAZIONE ACQUE SOTTERRANEE



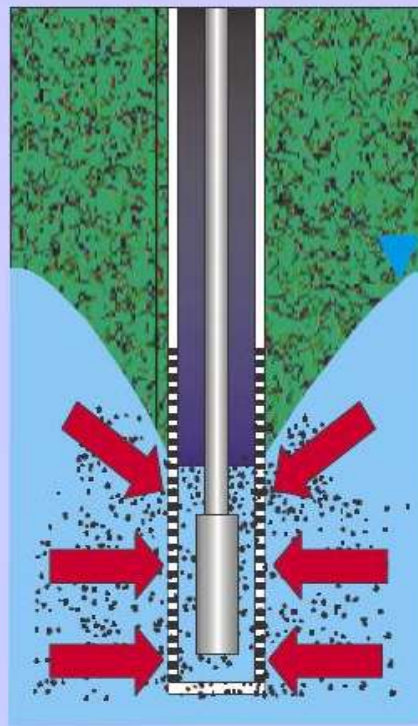
PROVINCIA
DI TREVISO

BAILER



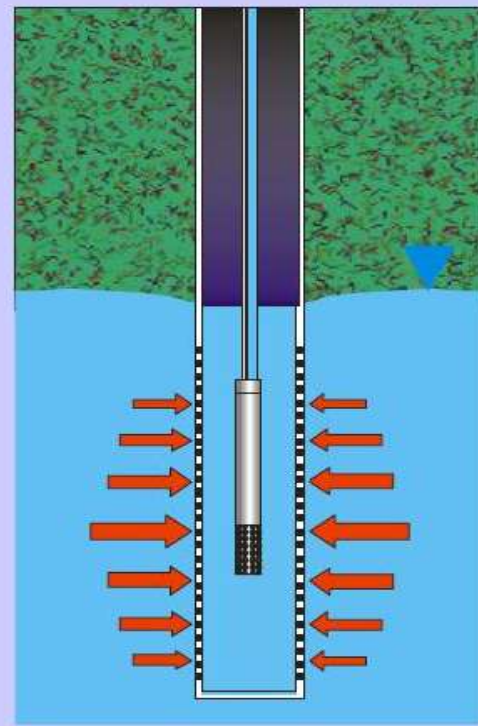
aumento torbidità
aerazione campione

POMPE DI ALTA PORTATA



dispersione suolo e
contaminanti

POMPE LOW FLOW



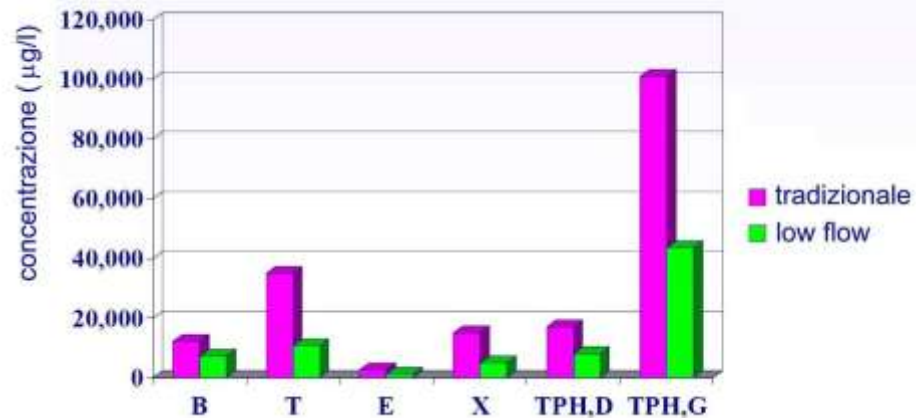
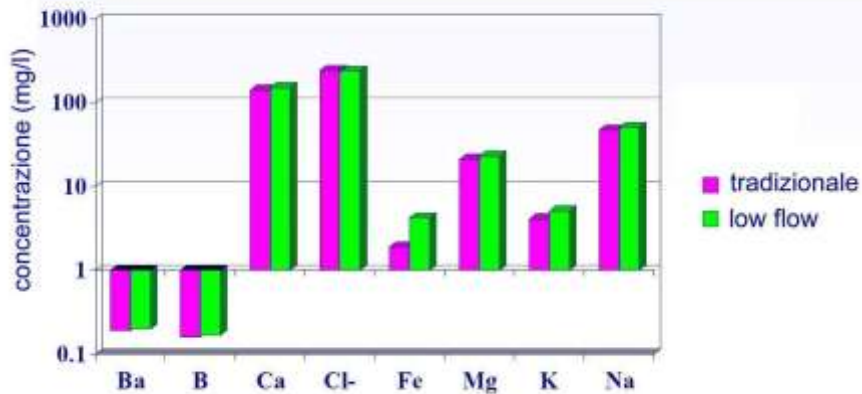
controllo torbidità e
zona da campionare



CAMPIONAMENTO TRADIZIONALE E LOW FLOW



PROVINCIA
DI TREVISO



STRATIFICAZIONE DELLA CONTAMINAZIONE



PROVINCIA
DI TREVISO

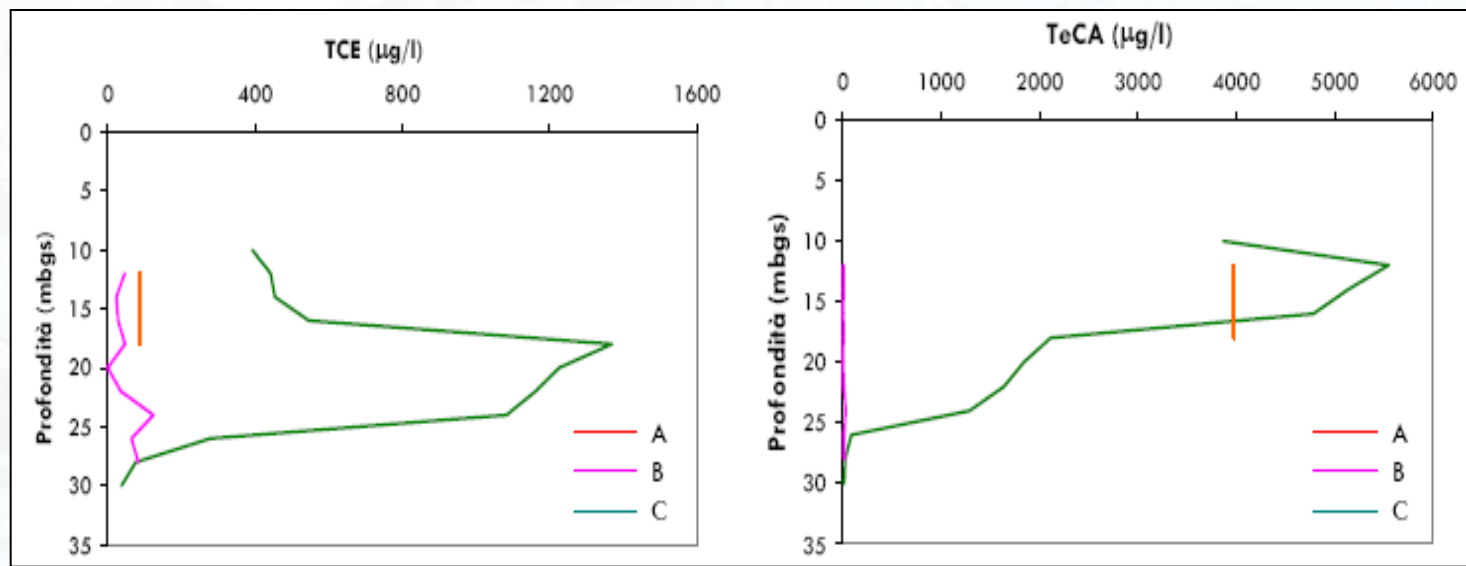


EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND

A) Integrato sulla verticale

B) Stratificato sulla verticale con sistema MLPS

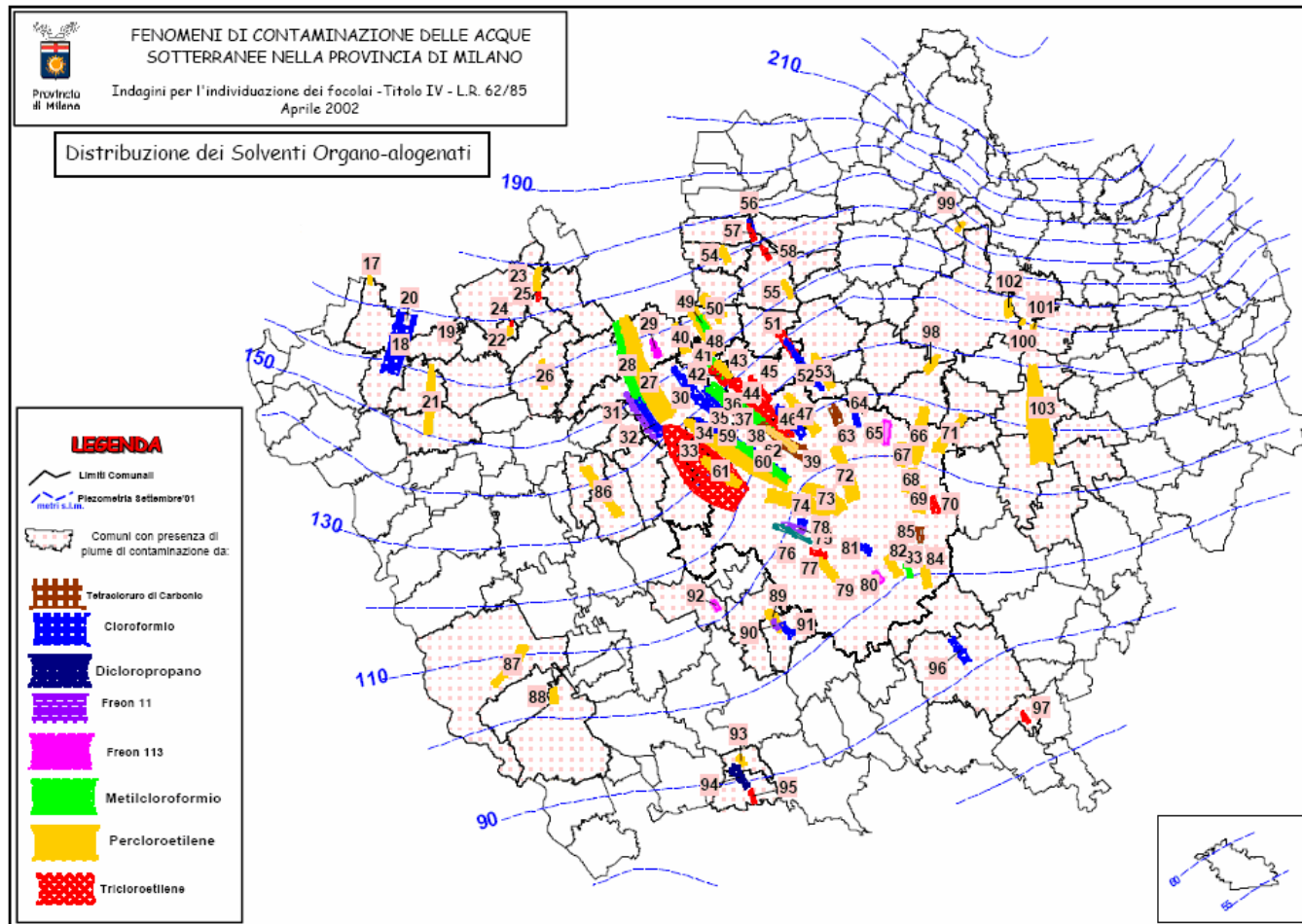
C) Stratificato sulla verticale con sistema GeoProbe®



FENOMENI DI CONTAMINAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE CHE GRAVANO SU CENTRO URBANO: MILANO



PROVINCIA
DI TREVISO



ASPETTI PRELIMINARI ALLE AZIONI DI BONIFICA DEI DNAPL



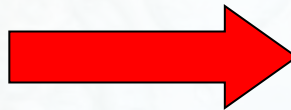
PROVINCIA
DI TREVISO

Una rimozione completa della massa non è possibile

Valutazione beneficio indotto da una rimozione parziale (riduzione della massa)

Ridefinizione degli obiettivi di bonifica

Analisi costi/benefici



Grado atteso di riduzione della massa

Impatto della riduzione di massa sul flusso di massa

Impatto della riduzione del flusso di massa sul rischio sanitario-ambientale



EFFICIENZA DEGLI INTERVENTI DI BONIFICA IN SITU



PROVINCIA
DI TREVISO

Tecnologia di bonifica/messa in sicurezza	Efficienza (% rimozione inquinanti)
Air sparging	60-70
Barriere permeabili reattive	90-99
Iniezione di vapore	75-95
Monitoraggio attenuazione naturale	60-70
Pump and treat	90-95
Dealogenazione riduttiva	?
Ossidazione chimica	70-90
Soil venting	80-85

