

Linee metodologiche e tecnologie di bonifica di siti contaminati da solventi clorurati

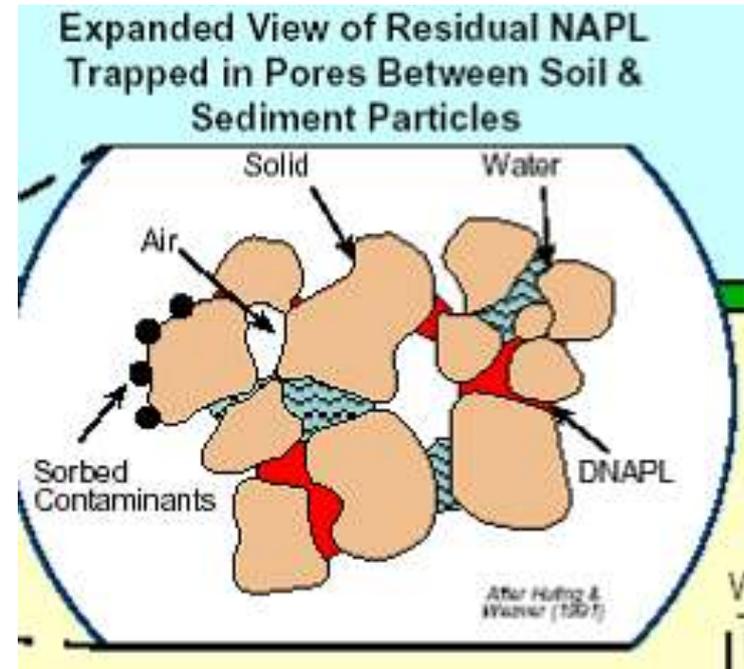
R. Verdini, M. Petrangeli Papini, V.
Facchinelli*, S. Mancini*, M. Majone
Dipartimento di Chimica,
Università di Roma “La Sapienza”

*Stage di Master “Bonifica dei siti contaminati”

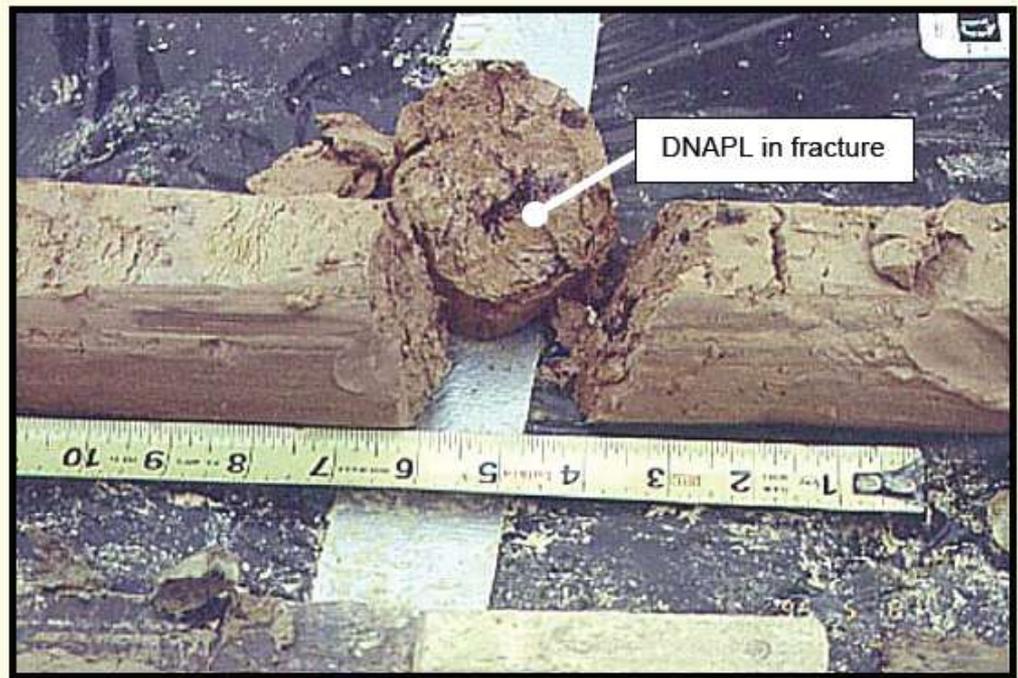
La contaminazione da solventi clorurati

- contaminazione molto diffusa nel territorio nazionale e lombardo;
- elevata tossicità e rischio cancerogeno;
- dimensioni dei pennacchi di contaminazione generalmente elevate (solubili, mobili, poco biodegradabili in condizioni aerobiche, scarsa attenuazione);
- concentrazioni nei pennacchi molto differenziate, da molto elevate (ordine di decine di milligrammi per litro) a molto basse, nell'ordine delle CSC (con possibile origine nell'inquinamento diffuso)

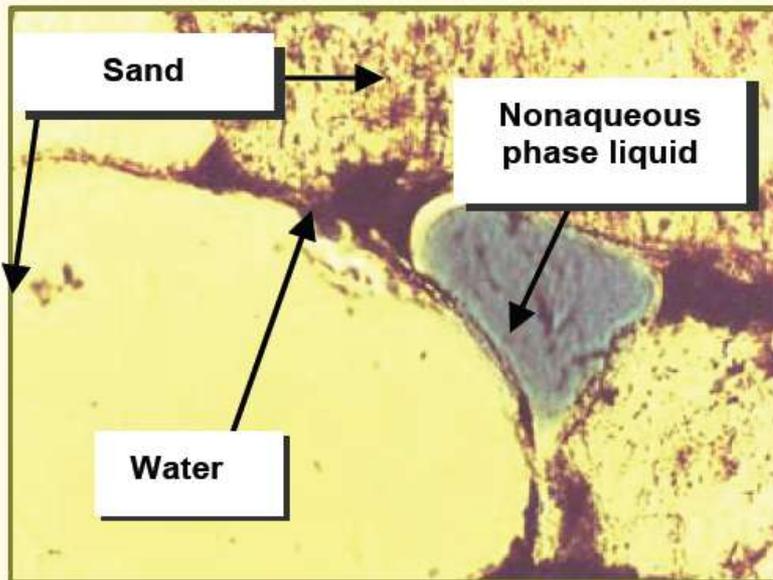
- presenza di sorgenti secondarie attive, anche con presenza di fasi liquide dense non acquose (DNAPL), spesso disperse nel sottosuolo saturo;
- contaminazione molto persistente nel tempo (lenta attenuazione naturale combinata a lenti rilasci)
- misure di sicurezza (tipicamente, barriere idrauliche) da mantenere attive per tempi molto lunghi e indefiniti, spesso con portate elevate.



- Più densi dell'acqua, i solventi clorurati si spostano verso il basso come fase separata (mobile DNAPL), anche in direzione diversa dal flusso di falda
- Il DNAPL si infiltra e rimane intrappolato (residual DNAPL), anche negli strati a minor permeabilità
- Ciò rende difficile individuare e quantificare il DNAPL



Core from a DNAPL source zone collected below the water table. DNAPL is present in a fracture within a silty clay soil.



Nonaqueous phase liquid and water sharing pore space in sand
(Wilson et al., 1990)

- Il DNAPL agisce come una sorgente persistente e a lento rilascio nella zona satura (**emungendo acqua a 10 volte la CSC, servono 90 metri cubi per rimuovere 1 grammo di PCE**)
- La presenza di DNAPL influenza la strategia di intervento: occorre valutare la necessità di **riduzione della sorgente** oltre che il solo intervento sul pennacchio

Una questione aperta

Interventi sulla sorgente: servono?

Expert panel reports by the U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 2003) and the National Research Council (NRC, 2005) have come to a consensus on two key issues.

- **The good news** is that, given effective execution, current source remediation technologies are capable of depleting a large portion of the chlorinated solvents present in the subsurface, and thereby significantly reducing the total loading of chlorinated solvents to plumes.
- **The bad news** is that, in most instances, enough contaminated mass will remain after treatment (in source zones and/or plumes) to exceed typical regulatory criteria [MCLs] in groundwater for extended periods.

Managers who must make decisions regarding source treatment are therefore confronted with the following:

- On the one hand, source treatment will reduce the ultimate total mass of contaminants in downgradient plumes, and will likely result in **reduced plume extent and/or longevity**. Although there will probably still be contaminants remaining in the source and plume even after source treatment, **the benefits may be significant from an economic or regulatory point of view**.
- On the other hand, no matter what type of treatment is done, there may be an ongoing expectation that **remaining contaminant will be addressed through further investments in source depletion and/or plume management**.
- These ongoing site care requirements can lead to questions about the value of any source treatment, especially since **the cost of source treatment can be substantial**.

Decisions at DNAPL Sites with Consideration of Prediction Uncertainty

- Chlorinated ethenes, ranging from VC to PCE and BTEX.
- Injection of Emulsified Vegetable Oils (EVO) in 10 injection well gallerie
- Source mass could not be estimated reliably from available site data.
- Ninety-nine percent confidence limits for the mass of the five identified DNAPL sources ranged from about 150 to 60,000 kg.

• Confidence limits for dissolved TCE-equivalent concentrations at compliance well indicate that by 2030, there is a high likelihood of meeting the cleanup level.

• Forward simulations indicate a high probability that without source remediation, long-term measures are likely to be required to control off-base plume migration.

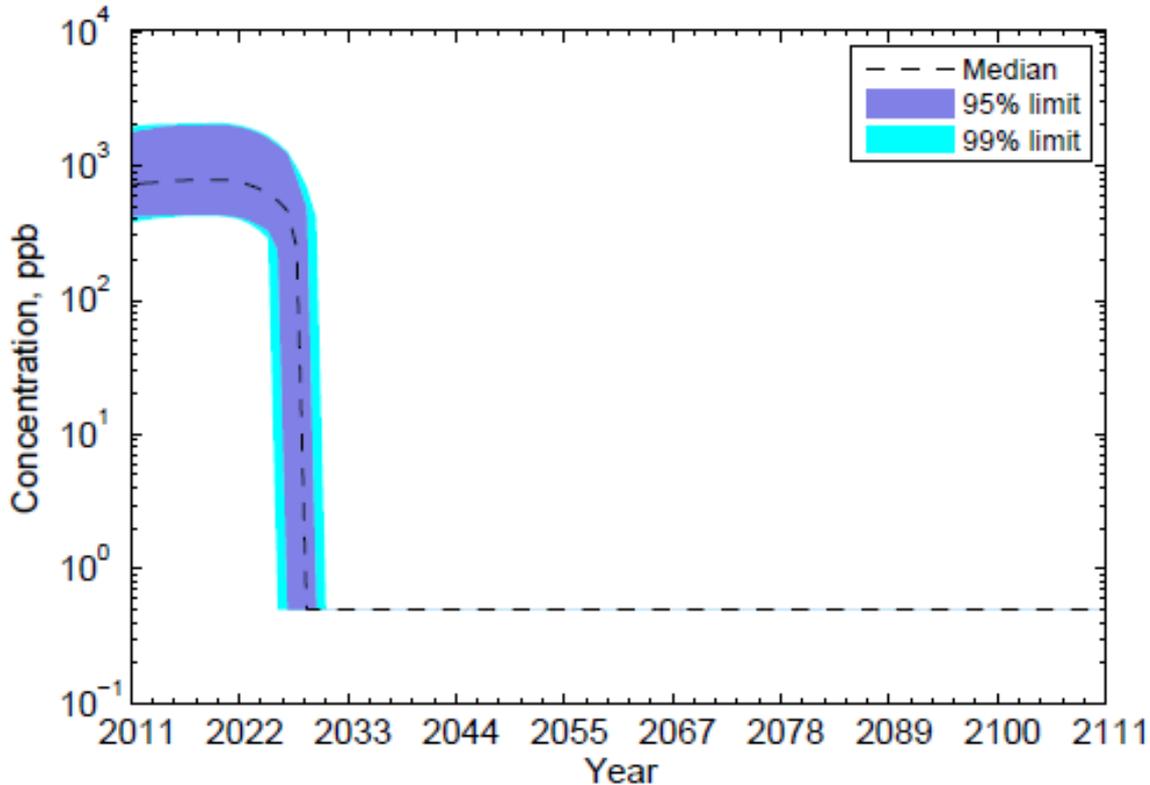


Figure 9-3. TCE-equivalent concentration at a compliance point DM329S.

Fase 2: Ricognizione delle tecnologie di bonifica

Sito	Tecnologia di bonifica/messa in sicurezza	Azione	Scala
Avigliana (TO)	barriera permeabile reattiva (PRB) con ferro zerovalente (ZVI) - configurazione a trincea	Pennacchio	Piena
Pianoro (BO)	PRB con ZVI - configurazione a Funnel and Gate	Pennacchio	Piena
Cento (FE)	PRB con ZVI - Funnel and Gate, In Situ Chemical Reduction + Bioaugmentation	Pennacchio Sorgente	Piena
Provincia Bologna	PRB con ZVI e polimero biodegradabile (PHB)	Pennacchio	Piena
Cesano Maderno (MB)	Soil Vapour Extraction (SVE)	Sorgente	Piena
Pieve di Cento (BO)	Estrazione con vapore + resistenze elettriche + ISCO	Sorgente	Pilota
Provincia Milano	ISCO con O ₃ e H ₂ O ₂	Sorgente	Pilota
Emilia Romagna	GroundWater Circulation Well (GCW) con ZVI e PHB	Sorgente	Prototipo
Cassinetta di Biandronno (VA)	AS/SVE + biorisanamento anaerobico + MISP mediante capping	Pennacchio Sorgente	Pilota + progetto
Discarica	barriera biologica aerobica e anaerobica	Sorgente Pennacchio	Pilota + progetto
Rho (MI)	Biorisanamento anaerobico elettricamente assistito (Progetto SUSBIOREM)	Sorgente	Micro- pilota

Fase 2 - Barriere Permeabili Reattive (PRB) con ferro zerovalente (ZVI)

Sito	Avigliana (TO)	Pianoro (BO)	Cento (FE)	Provincia Bologna
Falda	Sogg. -2 m p.c. Spessore 10÷12 m Cond. Idr. 10^{-4} m/s.	Sogg. -2,5÷3,5 m Spessore 1.5÷2.5 m Cond. Idr. 10^{-4} m/s.	Sogg. -1,5÷2,5 m Cond. Idr. 10^{-6} ÷ 10^{-5} m/s.	Spessore 8÷10 m Cond. Idr. 10^{-6} ÷ 10^{-5} m/s.
Contaminanti (conc. Totale)	TCE-cDCE (130 µg/L)	PCE (1 mg/L)	1,1,2 TCA, 1,2DCP, 1,1DCE e VC (300 µg/L)	TCE PCE DCE VC (2 mg/L)
Caratteristiche principali	Trincea , lunghezza 120 m spessore 60 cm profondità 14 m	Funnel and Gate funnel 165m, gate 1: 45m; gate 2: pozzo	Funnel and Gate funnel 107 m 3 gates 3x3, spessore 1 m profondità 4 m	Funnel and Gate Funnel 180 m Gate 35x6 Spessore 0,8 m
Test preliminari	test in colonna	test in colonna	test in colonna	test in colonna
Durata	in attività dal 2004	in attività dal 2012	in attività dal 2013	in realizzazione
Concentrazioni e residua	Minimo CSR <30 ug/L Ottenuto < 1 ug/L			
Costi	1.4 M€ ad oggi, 1.8 euro/m ³ ad oggi		realizzazione 300 K€	
Ulteriori trattamenti	Capping area a monte	Sorgente con ISCR (ZVI+substrato organico) mediante direct push	Sorgente con ISCR + bioaugmentation	PRB con ZVI + PHB Zona reattiva estesa a valle per lento rilascio carbonio organico

Barriere Permeabili Reattive (PRB) con ferro zerovalente (ZVI)

Dalla discussione, evidenziati i seguenti punti:

- ✓ Progettazione sufficientemente standardizzata. Necessario studio accurato della idrodinamica della falda nelle diverse opzioni della PRB (trincea, F&G) accoppiato con determinazione sperimentale della reattività (in colonna, scala di laboratorio).
- ✓ Ampio campo di applicazioni per velocità della falda (fino ad 1 m/d) e profondità (fino a 15 metri, più difficile a profondità maggiori).
- ✓ Possibile innalzamento a valle della barriera del Ferro oltre i limiti di legge.
- ✓ In caso di ZVI accoppiato a substrati organici, possibile un ulteriore innalzamento dei rilasci di ferro nonché di manganese e carbonio organico disciolto.
 - Preferibile utilizzo non al confine di proprietà; così da estendere la zona reattiva (biologica) a valle pur rimanendo nell'area di proprietà (punto di conformità al suo confine). Accurato monitoraggio a valle
- ✓ Costo molto competitivo se efficacia garantita per lungo periodo.
- ✓ In ogni caso, monitoraggio sempre fondamentale, anche per possibile decadimento delle prestazioni (passivazione, flussi preferenziali).

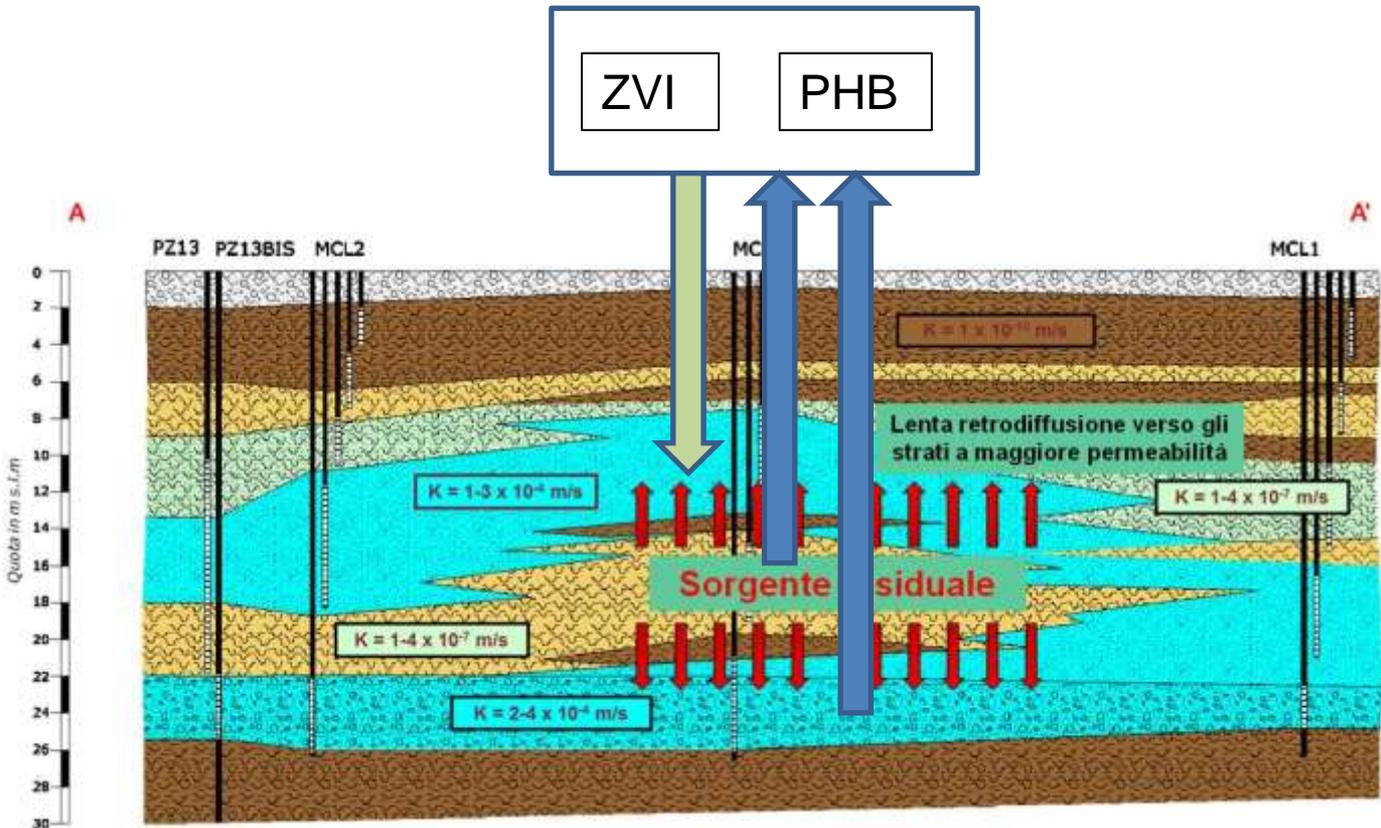
Trattamenti fisici e chimici

	Cesano Maderno	Pieve di Cento	Farmaceutica Milano
Estensione Area	1200000 m ²	2500 m ²	2500 m ²
Contaminanti e concentrazione	TCE e TeCA (inizialmente fino 11000 ppm)	Vari CHC 150-450mg/L	Vari CHC > 100 mg/L, BTEX 15-50mg/L, TPH 5-10 mg/L
Presenza DNAPL	Non rilevata	Probabile	Si (tecnica MISP)
Messa in sicurezza	MISE con barriera idraulica	Confinamento	MISE con barriera idraulica
Tecnologia di bonifica	SVE	SEE	ISCO (con O ₃ e H ₂ O ₂)
Caratteristiche principali	Estrazione sotto vuoto su 5 pozzi (fino a 55 m)	Estrazione con vapore, poi con resistenze elettriche	40 pozzi iniezione superficiale e profondi
Test preliminari	soil gas survey e pozzo pilota	Pilota 10x20	test in laboratorio
Realizzazione	Piena scala	Pilota 2500 m ² , 15.000 m ³	Piena scala dal 2012
Durata	in attività dal 1997	4 mesi	1 anno
Rimozione	10-5 kg/d, circa 50 tonnellate dal 1997	Fino a 20-30 kg/d 1 ton totale	>90% nell'orizzonte profondo e >60% in quello superficiale
Concentrazione residua	Inferiore a 100 µg/L	200 µg/L	No raggiungimento CSC
Costi	Realizzazione 200.000 € Gestione 17.000 €/anno Circa 16 €/Kg clorurati	600000€	150000 €/anno di gestione
Ulteriori trattamenti		ISCO con persolfato	Necessaria barriera idraulica

Trattamenti biologici

	metalmeccanica	metalmeccanica	discarica
Contaminanti e concentrazione	TCE, cDCE, VC, 1,1DCA (decine di mg/L)	CHC 33 mg/L (con prevalenza di PCE, TCE, 1,2 DCE, DCA e VC)	Settore anaerobico: CHC 100 mg/L Settore aerobico: CHC (34.5 mg/L), più BTEX e
Presenza DNAPL	Probabile	Non rilevata	Non rilevata
Messa in sicurezza	in MISE con barriera idraulica	MISE con barriera idraulica	MISE con barriera idraulica
Tecnologia di bonifica	di Ground Water Circulation Well (GCW) con ZVI e PHB	MISP con capping, AS/SVE e dechlorazione riduttiva (DR)	barriera biologica aerobica e anaerobica
Caratteristiche principali	Estrazione forzata da zona poco permeabile, ZVI per trattamento e PHB per rilascio carbonio in falda	Scala pilota su 300m ² DR con substrato Percol (2 pozzi iniezioni e 6 estrazioni, 1 ton)	Test di campo DR anaerobica con Percol, iniezione continua e ricircolo; In zona aerobica iniezione di aria e nutrienti
Stato di realizzazione	di Prototipo full scale	Esecutivo full scale approvato Iniezione continua e ricircolo in aree permeabili (circa 30 tonn). Iniezioni singole in aree poco permeabili (2.5 tonn)	Progetto full scale (dic 2014)
Durata	6 mesi, in corso	2 anni	1 anno
Criticità		Aumento concentrazione Fe e Mn, lenta riduzione di 1,2 DCE e VC	Prestazioni inferiori per 1,1 DCA e 1,1,2, TCA
Costi		Pilota DR circa 150 K€ 1 M€ per bonifica (DR: 400 K€)	Circa 1,2 M€ per barriera anaerobica e aerobica

Esempio da sistema combinato GCW/ZVI/PHB (Sapienza, EDF Fenice e IEG)



- Situazione idrogeologica complessa
- Prototipo in piena scala
- GCW (circolazione indotta tra zone bassa e alta permeabilità)
- Trattamento acqua emunta con ZVI accoppiato con PHB
- Reiniezione continua del carbonio organico rilasciato da PHB

Impianto MISE

(due barriere idrauliche, 50 pozzi)

Concentrazione media solventi $\approx 0.7 \text{ mg L}^{-1}$
Portata emunta complessiva $\approx 55 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Massa contaminanti trattata = 0.9 Kg d^{-1}

Prototipo

(1 pompa, da zona bassa permeabilità)

Concentrazione media solventi $\approx 30 \text{ mg L}^{-1}$
Portata emunta pompa profonda $\approx 0,35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Massa contaminanti trattata = 0.25 Kg d^{-1}

Indicazioni dai casi di intervento su sorgente

- l'adozione di tecniche *in situ* in aree "sorgente" può rimuovere quantità contaminante significative e confrontabili con P&T, ma con interventi molto più localizzati nello spazio e nel tempo.
- gli effetti sono tipicamente riscontrabili anche sulle concentrazioni in fase disciolta; tuttavia è difficile prevedere accuratamente andamento temporale e conseguimento obiettivi finali.
- si osserva spesso un incremento iniziale della mobilitazione dei contaminanti e di altri parametri connessi (quali ferro e manganese).
- gli interventi avvengono tipicamente in presenza di MISE a valle. Ciò conferisce un grado di sicurezza addizionale ma può essere un elemento limitante per alcune tecnologie.
- in ogni caso, è necessaria una approfondita comprensione delle caratteristiche del sito; disponibilità di metodiche avanzate di caratterizzazione (soil gas survey profili di concentrazione, stime in massa e dei flussi relativi) e di sistemi di valutazione e screening preliminare.

Fase 4 - Proposte operative

Valutazione preliminare della distribuzione dei solventi clorurati Modello a 14 compartimenti

- Vengono distinte zone "sorgente" e zone "pennacchio".
- In entrambe le zone, possono esserci un orizzonte trasmissivo con flusso di acque sotterranee (in cui il contaminante si muove principalmente con flusso advettivo) e un orizzonte a bassa permeabilità (in cui il contaminante si sposta principalmente per diffusione molecolare).
- In ciascun orizzonte, il contaminante può trovarsi ripartito in 4 fasi (disciolto in fase acquosa, adsorbito sul suolo, in fase gassosa e in fase liquida non acquosa (DNAPL). Quest'ultimo può essere presente solo nella zona sorgente).

	Zona Sorgente		Pennacchio	
Fase/Zona	Bassa Permeabilità	Trasmissiva	Trasmissiva	Bassa Permeabilità
Vapore				
DNAPL				
Acquosa				
Adsorbita				

Sale T & Newell C.
A Guide for
Selecting Remedies
for Subsurface
Releases of
Chlorinated
Solvents,
Environmental
Security Technology
Certification
Program (ESTCP),
2011

Evoluzione della distribuzione dei solventi clorurati in funzione della situazione geologica e del tempo

Il modello a 14 compartimenti viene articolato in base a:

Scenario idrogeologico:

Il modello originale definisce 5 scenari tipici e descrive la distribuzione dei compartimenti per ciascuno scenario

Età della contaminazione

Il modello considera sversamenti in fase iniziale, intermedia o tardiva e descrive la distribuzione tipica dei contaminanti in funzione della fase per ciascuno scenario.



Ricostruzione del profilo della contaminazione

In base alla caratterizzazione idrogeologica e idrochimica del sito, vengono individuate zona sorgente e pennacchio e si ricostruisce la probabile distribuzione del contaminante tenendo conto di scenario ed età della contaminazione.

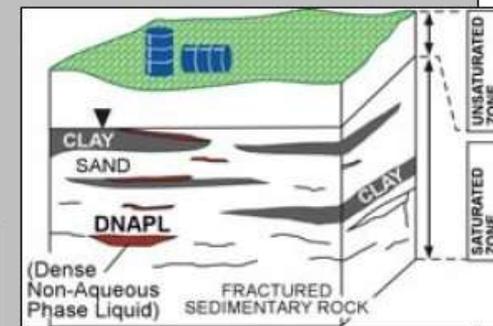
Tipicamente il dato di input idrochimico è limitato alle concentrazioni in fase disciolta nella sole zone trasmissive

Concentrazione in fase acquosa equivalente	
0	– Nessun impatto
1	– 1-9 $\mu\text{g}/\text{L}$ in acqua
2	– 10-99 $\mu\text{g}/\text{L}$ in acqua
3	– 100-999 $\mu\text{g}/\text{L}$ in acqua
4	– > 1000 $\mu\text{g}/\text{L}$ in acqua

Esempio di ricostruzione del profilo della contaminazione

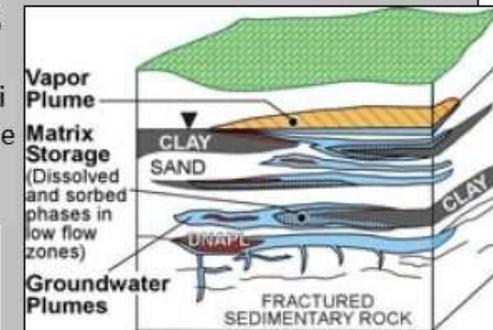
- Fase iniziale: la maggior parte della contaminazione è presente come DNAPL. Il plume inizia a formarsi. Contaminazione assente in zone a bassa permeabilità.

Fase \ Zone	Sorgente		Pennacchio	
	bassa	alta	alta	bassa
Gassosa	0	2	1	0
Separata	0	4		
Acquosa	0	2	1	0
Adsorbita	0	2	1	0



- Fase centrale: Parte del DNAPL (e.e. 50%) si è trasferito in fase vapore, disciolta o assorbita. Possono essere presenti estesi plumes in fase vapore e/o in falda e anche contaminanti in zone a basse permeabilità.

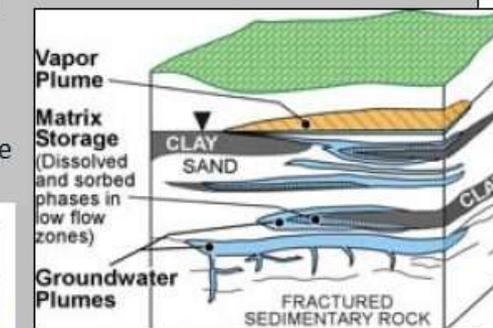
Fase \ Zone	Sorgente		Pennacchio	
	bassa	alta	alta	bassa
Gassosa	1	2	2	2
Separata	2	3		
Acquosa	2	3	3	2
Adsorbita	2	3	3	2



Esempio: Scenario di Tipo III

- Fase tarda Il DNAPL è assente. I pennacchi nelle zone trasmissive possono essere alimentati da desorbimento e/o retrodiffusione da zone a bassa permeabilità localizzate nella zona sorgente e nel plume.

Fase \ Zone	Sorgente		Pennacchio	
	bassa	alta	alta	bassa
Gassosa	3	2	1	2
Separata	1	1		
Acquosa	3	2	2	3
Adsorbita	3	2	2	3

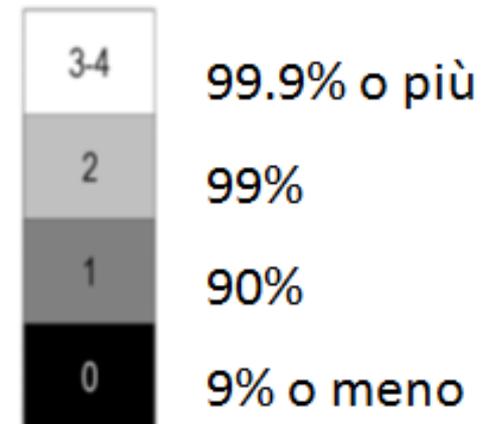


Applicazione per lo screening delle tecnologie

La Decision Guide considera 10 tecnologie di diverse caratteristiche applicative. In base alle informazioni fornite dell'applicazione del modello, viene fornita un'indicazione sulla tipica efficacia di abbattimento di ciascuna tecnologia per ciascun compartimento del modello conto di scenario ed età della contaminazione

- Pump and Treat
- Scavo
- Soil Vapor Extraction (SVE)
- Degradazione in situ:
 - Termico
 - Ossidazione chimica (ISCO)
 - Riduzione biologica
 - Riduzione chimica (ISCR)
- Contenimento:
 - Idraulico
 - Barriera Fisica
 - Barriera permeabile reattiva (PRB)

Per ogni comparto del modello, è suggerito un **Ordine di Grandezza (OoM)** dell'abbattimento atteso in termine di riduzione della concentrazione dei contaminanti.



Applicazione per lo screening delle tecnologie

P & T	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	0	0	0	0
DNAPL	0	0	0	0
Acquosa	0	2	1	0
Adsorb	0	1	1	0

Conten. Idraul. Barriera Fisica PRB	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	0	0	0	0
DNAPL	0	0		
Acquosa	0	0	1-2	0
Adsorb	0	0	1-2	0

Scavo	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	3-4	3-4	0	0
DNAPL	3-4	3-4		
Acquosa	3-4	3-4	1-2	0
Adsorb	3-4	3-4	1-2	0

Risc. vadosa	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	3-4	3-4	1	0
DNAPL	3-4	3-4		
Acquosa	3-4	3-4	1	0
Adsorb	3-4	3-4	1-2	0

Risc. saturo	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	2-3	2-3	0	0
DNAPL	2-3	2-3		
Acquosa	2-3	2-3	1-2	0
Adsorb	2-3	2-3	1-2	0

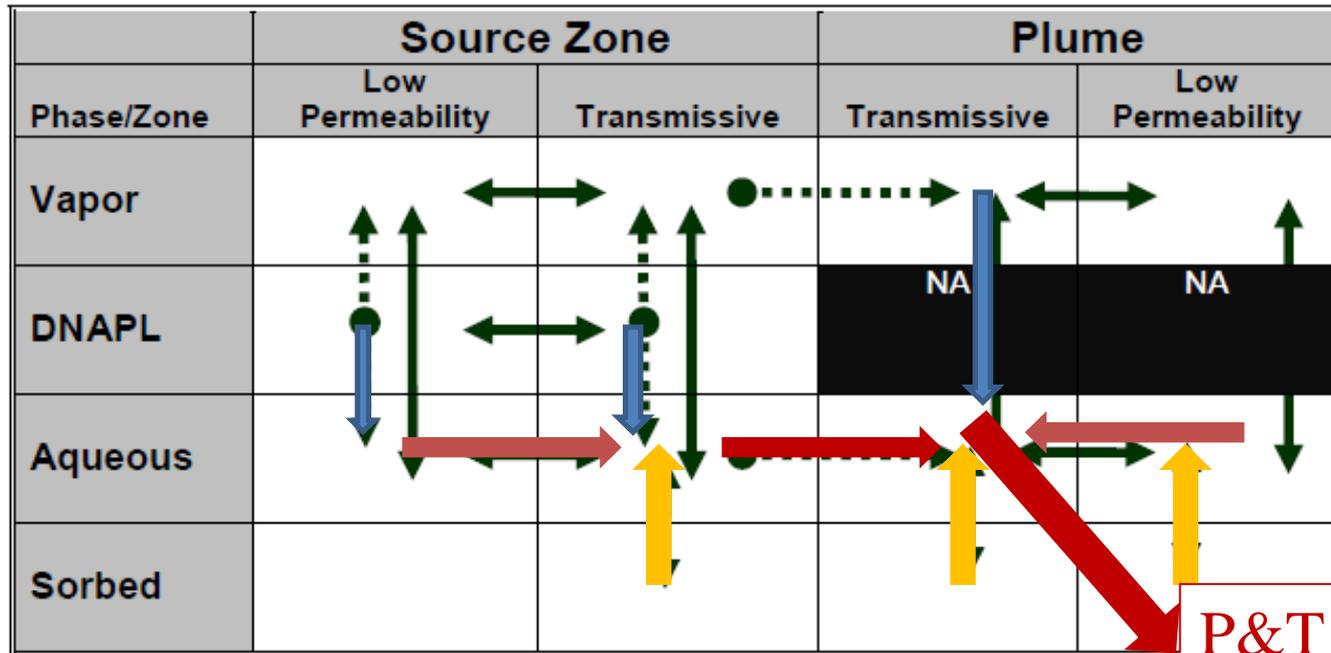
ISCR	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	2-4	2-4	0	0
DNAPL	2-4	2-4		
Acquosa	2-4	2-4	1-2	0
Adsorb	2-4	2-4	1-2	0

ISCO	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	0	0	0	0
DNAPL	0	0-1		
Acquosa	1	2	2	1
Adsorb	1	2	2	1

biorem	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	0	0	0	0
DNAPL	0	0-1		
Acquosa	0-1	2	2	0-1
Adsorb	0-1	1	1	0-1

SVE	Zona Sorgente		Pennacchio	
	Basso k	Alto k	Alto k	Basso k
vapore	0-1	2-3	2-3	0
DNAPL	0-1	2		
Acquosa	0-1	2	2	0-1
Adsorb	0-1	2	2	0-1

Table 1 – 14 subsurface compartments potentially containing chlorinated solvents. Arrows show mass potential transfer links between compartments. Dashed arrows indicate irreversible fluxes.



NA – As per the definition of source zones in NRC (2006), DNAPLs are only present in sources zones and consequently are absent in plumes.

**P&T
plume**

“Given that almost all releases are now 30, 40 or even 50 years old, many sites have progressed to middle or late stages where contaminants are present in **low permeability zones**, both in the source and in the plume.

The key concerns with contaminants in low permeability zones are their potential to sustain plumes for extended periods of time and their constraining effects on the benefits of technologies that solely address contaminants in transmissive zones. Flushing out the plume (i.e., pump-and-treat) is a slow, inefficient process when there are contaminants in the low-permeability compartment.”

Per ciascuna tipologia di intervento, l'efficacia dipende:

- dalla situazione geologica
- dalla distribuzione della massa nei comparti
- che è anche funzione dell'anzianità della contaminazione (early, middle, late)

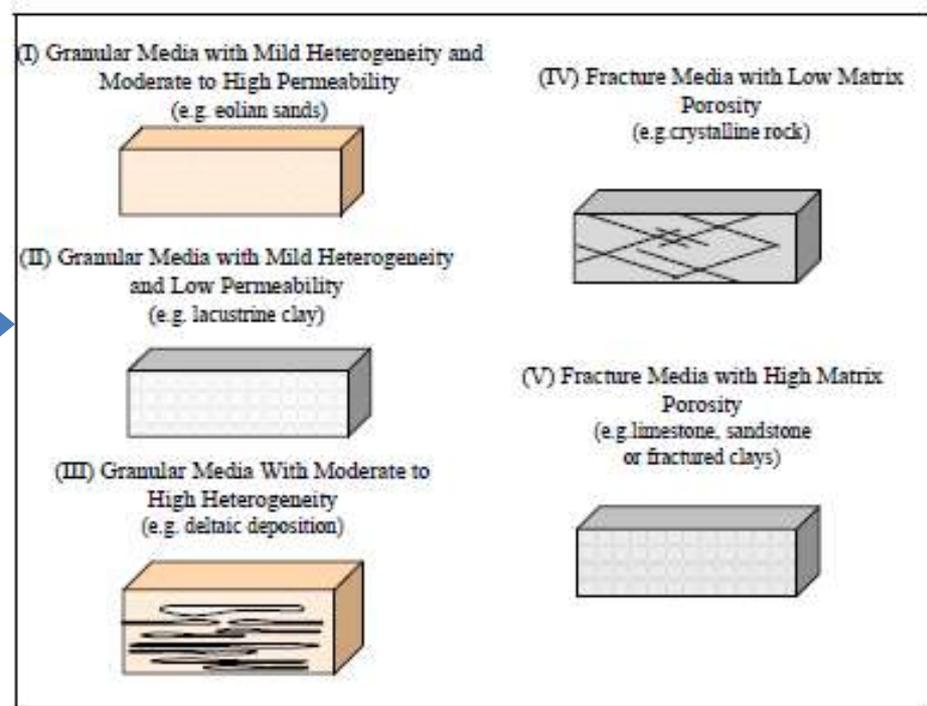


Figure 5 – Geologic Type Settings (NRC 2005)

- P&T at source
- middle stage
- Type III

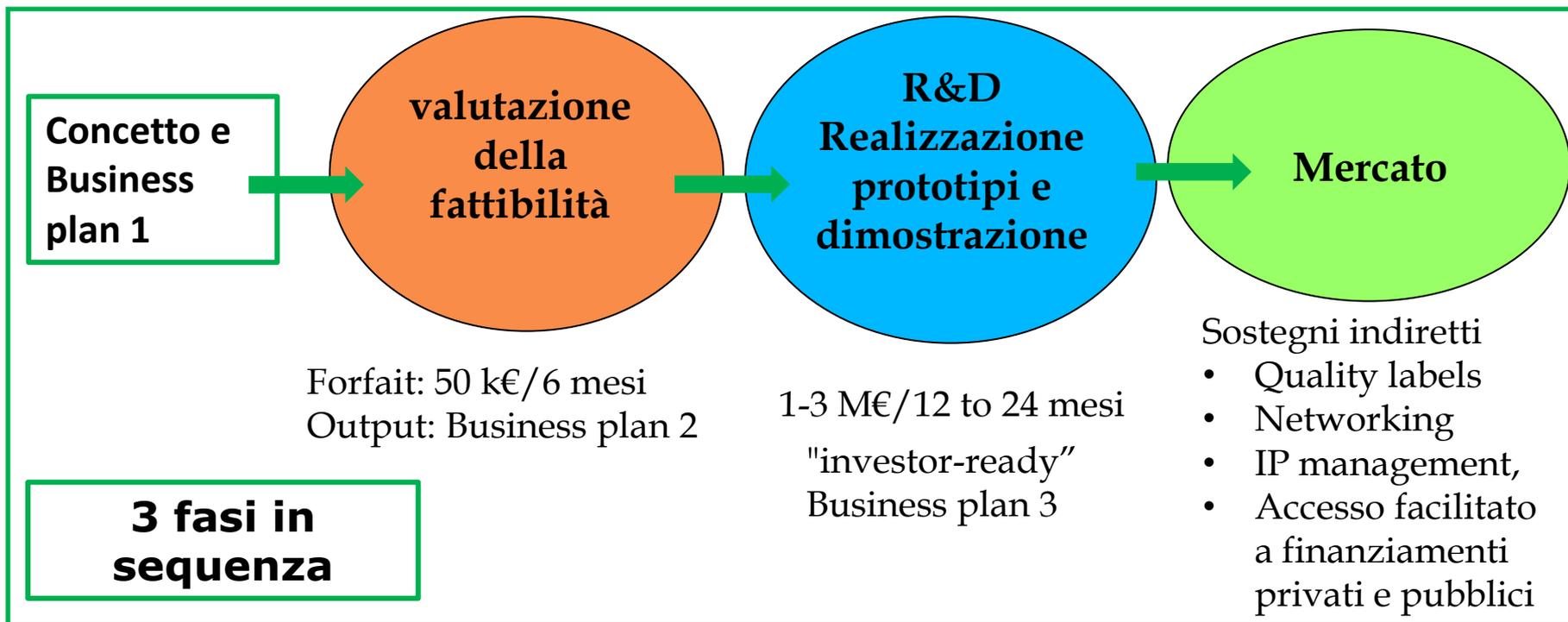
Zone/ Phases	Source Zone						Plume					
	Low Permeability			Transmissive			Transmissive			Low Permeability		
	Before	Tech	After	Before	Tech	After	Before	Tech	After	Before	Tech	After
Vapor	2	0	2	3	0	3	2	0	2	2	0	2
DNAPL	2	0	2	4	0	4						
Aqueous	2	0	2	4	2	2	3	1	2	2	0	2
Sorbed	2	0	2	4	1	3	3	1	2	2	0	2

Figure 22 - Anticipated outcome from source zone pump and treat in a middle stage Type 3 setting. Boxes in the "Tech" columns show estimated performance of remedial action based on number of OoMs of concentration reduction. "After" values equal "Before" values minus "Tech" values.

Fase 5 Proposte operative per la promozione di tecnologie innovative e sostenibili

- RICERCA: accesso a programmi di finanziamento alla ricerca ed innovazione nell'ambito della Comunità Europea, per progetti che vedano la partecipazione di imprese e che prevedano casi di studio di interesse dell'Amministrazione pubblica nel territorio lombardo .
- SPERIMENTAZIONE: supporto a progetti di sperimentazione per applicazione di tecnologie innovative su "siti orfani", con partecipazione dell'Amministrazione pubblica ai costi della sperimentazione. Bandi aperti a soggetti pubblici e private, per attività sperimentali su siti di interesse regionale, con cofinanziamento a carico dei proponenti. Molto importante la definizione di criteri di valutazione delle proposte sulla base della sostenibilità ambientale ed economica
- APPLICAZIONE: incentivazione all'impiego di tecnologie innovative sostenibili mediante un'appropriata definizione dei criteri di selezione delle proposte nelle procedure amministrative di aggiudicazione degli appalti.

INNOVAZIONE - supporto alle PMI (SME boosting)



- Indirizzata a tutti i tipi di PMI che propongono innovazione, qualsiasi tematica
- Riservata alle sole PMI
- Tipicamente progetti presentati da una singola PMI
- Nessun obbligo di percorrere tutte le fasi se i risultati non sono soddisfacenti

Nel caso di sviluppo di tecnologie innovative di bonifica:

- Disponibilità del sito contaminato
- Disponibilità preliminare dell'Amministrazione pubblica

Fase 5: Proposte per avvio di attività sperimentali

- Scelta di un sito campione di caratteristiche adeguate (scenario idrogeologico, dimensioni, caratterizzazione disponibile, sorgente/pennacchio, MISE, rilevanza ecc.)
- Applicazione del modello 14 compartimenti sulla base dei dati disponibili

Fase	Zone		Sorgente		Pennacchio 1 (vicino sorgente)		Pennacchio 2 (a valle del lago)	
	Bassa	Alta	Alta	Bassa	Alta	Bassa		
Permeabilità	Bassa	Alta	Alta	Bassa	Alta	Bassa		
Gassosa		2	4		1			
Separata	4							
Acquosa	4	4	4		2			
Adsorbita	4	4	4		1			

- Screening delle tecnologie
 - P&T (MISE attualmente attiva)
 - scavo (su sorgente)
 - SVE (su sorgente e/o pennacchio).
 - Biorisanamento in situ (su sorgente)
 - PRB (su pennacchio).
- Individuazione degli approfondimenti di caratterizzazione necessari
- Definizione di un "bando" tipo per progetti di sperimentazione di tecnologie innovative.
- Definizione dei criteri di valutazione dei progetti.

Criteri di valutazione dei progetti di sperimentazione

- Individuazione degli elementi di base per definizione degli obiettivi di bonifica
- Sostenibilità ambientale ed economica dell'intervento proposto
- Valutazione per confronto con Pump and Treat (P&T)

Individuazione degli elementi di base (anche con misure ed analisi di campo e di laboratorio)

- massa di contaminati presenti nell'area di interesse dell'intervento;
- flusso di massa di contaminanti attraverso un transetto di riferimento in condizioni naturali
- potenziali impatti su ricettori a valle.

Confronto tra la tecnologia proposta e il P&T

- massa di contaminante rimossa nell'unità di tempo, se possibile in funzione del tempo dall'inizio dell'intervento e massa residua nel sito;
- consumi energetici e di materiali per unità di massa di contaminante rimosso, se possibile in funzione del tempo;
- produzione di rifiuti, se possibile in funzione del tempo;
- costo per unità di massa di contaminante rimosso, in funzione del tempo, ovvero includendo sia i costi di investimento che di gestione

- Tempi e costi della sperimentazione pilota

Conclusioni (I)

- IN PRESENZA MISE (barriera idraulica)
 - ✓ se possibile, intervenire in modo selettivo sulle sorgenti o zone ad elevata contaminazione; tuttavia, necessaria valutazione caso per caso e chiara definizione degli obiettivi che si intendono conseguire.
 - ✓ La scelta può essere indirizzata su tecnologie che non richiedono necessariamente la disattivazione della MISE o almeno che non lo richiedono nella fase delle verifiche di campo su scala ridotta o almeno che lo richiedono per un periodo sufficientemente breve.

- IN ASSENZA MISE
 - ✓ l'adozione di tecniche di bonifica (in situ) non dovrebbe essere vincolata alla preventiva realizzazione di tali barriere, in particolare quando ciò può diminuire l'efficacia delle tecniche proposte.
 - ✓ Per valutare se la MISE sia comunque necessaria per evitare l'allargamento della contaminazione, mettere a punto degli specifici criteri di comparazione
 - diminuzione del flusso di massa del contaminante invece che efficienza idraulica
 - effetto su interazione tra pennacchi e corpi idrici connessi (sotterranei o superficiali)
 - effetto su usi dell'acqua e rischi igienico-sanitari
 - costi di gestione pluridecennale nella valutazione comparativa
 - monitoraggi adeguatamente finalizzati e progettati

Contesto

- Acquifero significativo o meno
- Interazione con acquifero significativo
- Interazione con corpo idrico superficiale
- Usi attivi e diretti dell'acqua contaminata
- Area di inquinamento diffuso (baseline)
- In generale, tutela dello stato di qualità

Contaminazione

- Scenario idrogeologico
 - Età della contaminazione
 - Concentrazione solventi
 - Presenza DNAPL (linee di evidenza)
- Rappresentazione nel modello a 14 compartimenti

Risorse

- Risorse a breve termine
- Risorse a lungo termine
- Valutare valore economico di recupero dell'area
- Possibilità di incrementare le risorse (es. accordi di programma per investimenti)

MISE attiva?

Si

No

MISE necessaria?

pennacchio in espansione?
impatti in corso o a breve?

Si

No

Scelta tecnologie bonifica

Vedi criteri confronto per MISE con P&T

- Maggior effetto per compartimenti critici
- Affidabilità e robustezza
- Necessità verifica preliminare alla scala pilota
- Possibili effetti secondari (anche transienti)
- Compatibilità con MISE (se già attiva)
- Compatibilità con usi presenti e futuri dell'area
- Eventuale impostazione come MISO

Valutare sempre i costi di gestione

Obiettivi conseguibili

Bonifica o MISO

Possibili alternative al P&T

Altri sistemi di MISE da valutare

- Altre tipologie di sbarramento (a monte o reattivo, PRB)
- Interventi diretti sulla sorgente (contrazione del pennacchio)
- Misure di controllo istituzionale (eliminazione impatti)
- Misure compensative (sostituzione risorsa impattata)

Criteri di valutazione P&T

- Necessità o meno di realizzazione impianti di depurazione ad hoc (TAF)
- Tempo di esercizio con e senza rimozione sorgente
- Possibilità di recupero in usi attivi e in sostituzione risorse più pregiate

Altri criteri di confronto

- Massa contaminante intercettata e rimossa
- Effetto atteso a valle (contenimento vs contrazione pennacchio)
- Compatibilità con tutela quantitativa della risorsa
- Compatibilità con tutela dello stato di qualità

Inserire costi di gestione nella valutazione comparativa

Interventi su sorgente utili?

- Accelerare rimozione
- Diminuire tempo di esercizio
- Accelerare restituzione della risorse

Si

No

Si

No

MISE = bonifica
Monitoraggio
Controllo degli usi a monte

In questo schema, il termine MISE si riferisce a sistemi di sbarramento idraulico dell'acqua sotterranea
Non sono inclusi gli aspetti di rischio igienico sanitario da esposizione indiretta per i fruitori del sito

Conclusioni (II)

- ✓ In ogni caso, inquadrare la bonifica delle acque sotterranee (parte IV, D.Lgs 152/2006) nell'ambito della tutela delle acque interne (parte III), utilizzandone strumenti di programmazione e gestione, anche nel contesto dell'uso ottimale delle risorse idriche.
 - distinzione tra corpi idrici significativi e non,
 - l'individuazione dello stato di baseline e dei trend temporali,
 - il censimento degli usi effettivi e gli obiettivi di tutela da conseguire,
 - l'utilizzo di misure di controllo istituzionale (quale la limitazione degli accessi o degli utilizzi)
 - Eventuali misure compensative.
- ✓ In tale coordinamento tra bonifica (parte IV) e tutela (parte III) vi sono, a normativa vigente, ampi elementi di flessibilità che possono consentire l'articolazione ottimale degli interventi su singoli pennacchi, garantendo sia la tutela ambientale delle acque che l'accettabilità dei rischi igienico-sanitari.

Grazie dell'attenzione

mauro.majone@uniroma1.it