

**WORKSHOP "Interventi di salvaguardia ambientale"**

# **Sostenibilità delle bonifiche ambientali: un caso applicativo di Desorbimento Termico**

*ing. Michel Benedettini, geol. Stefano Micheli*



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Roma, 23 novembre 2017

---

## la tecnologia 1/4

Il **Desorbimento Termico (DT)** è una tecnologia di bonifica in situ che attraverso l'**aumento di temperatura** del suolo promuove la **volatilizzazione** di contaminanti volatili e semivolatili e consente la loro captazione mediante sistemi di estrazione tradizionali.

Il riscaldamento del suolo avviene mediante gradienti di temperatura creati da tubi riscaldanti infissi nel terreno, verticalmente o orizzontalmente, favorendo l'estrazione di composti che a temperatura ambiente risultano difficilmente volatilizzabili; i vapori estratti vengono trattati *on-site* con idonei sistemi di trattamento.

Il riscaldamento del terreno provoca, oltre alla volatilizzazione, anche fenomeni ossidativi e degradativi in situ.

## la tecnologia 2/4

Le **sorgenti di energia** utilizzate per il riscaldamento del terreno possono essere di diverso tipo:

- ***resistenze elettriche;***
- ***radiofrequenze elettromagnetiche;***
- ***iniezione di aria calda o vapore.***

L'energia applicata riscalda il terreno, l'acqua e i contaminanti presenti mediante processi di conduzione e convezione termica, in maniera piuttosto uniforme. All'aumentare della temperatura dei tubi riscaldanti (fino a circa 550-650 °C) il calore si diffonde nel sottosuolo mediante gradienti di temperatura crescenti.

## la tecnologia 3/4

Il fronte di calore si propaga in tutta la zona da trattare man mano che si ha la vaporizzazione dell'acqua e dei contaminanti contenuti nel terreno.

Il trasporto dei contaminanti volatilizzati verso i pozzi di estrazione viene migliorato dall'aumento della permeabilità del sottosuolo, risultante dalla vaporizzazione dell'acqua presente con conseguente essiccamento e restringimento del terreno.

In tal modo la tecnologia risulta efficace anche in presenza di materiali fini (limo e argilla), che per le loro caratteristiche naturali presentano permeabilità ridotta.

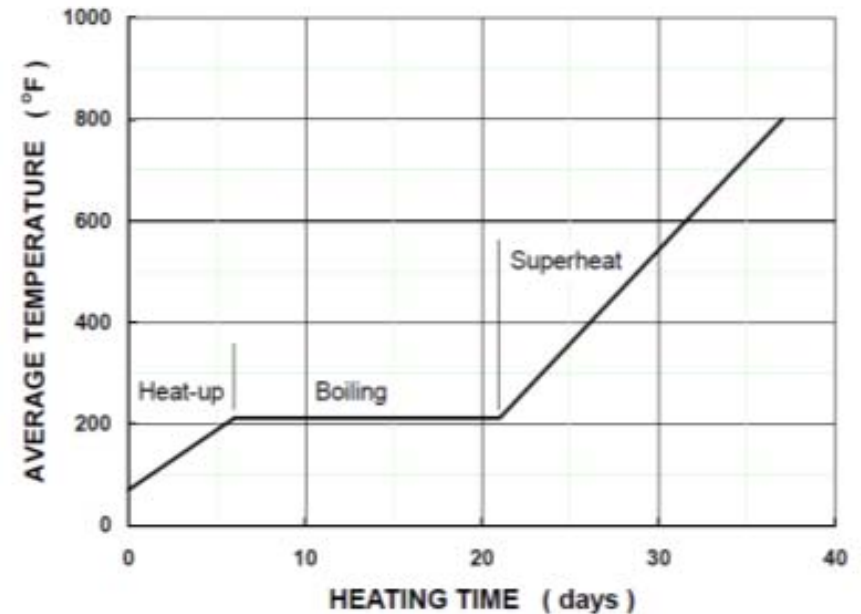


Figure 6 Theoretical Temperature Rise in Soil

## *la tecnologia 4/4*

L'area d'intervento deve essere **ben isolata in superficie** al fine di:

- minimizzare le perdite di calore dalla superficie;
- ottimizzare l'estrazione dei contaminanti mediante i sistemi di recupero;
- garantire che tutti i vapori liberati vengano catturati;
- proteggere la zona di trattamento dall'infiltrazione delle acque meteoriche.

## *applicabilità*

Diversi studi di laboratorio e applicazioni in campo hanno dimostrato l'**efficacia** del Desorbimento Termico per il trattamento di una **molteplice varietà di contaminanti**:

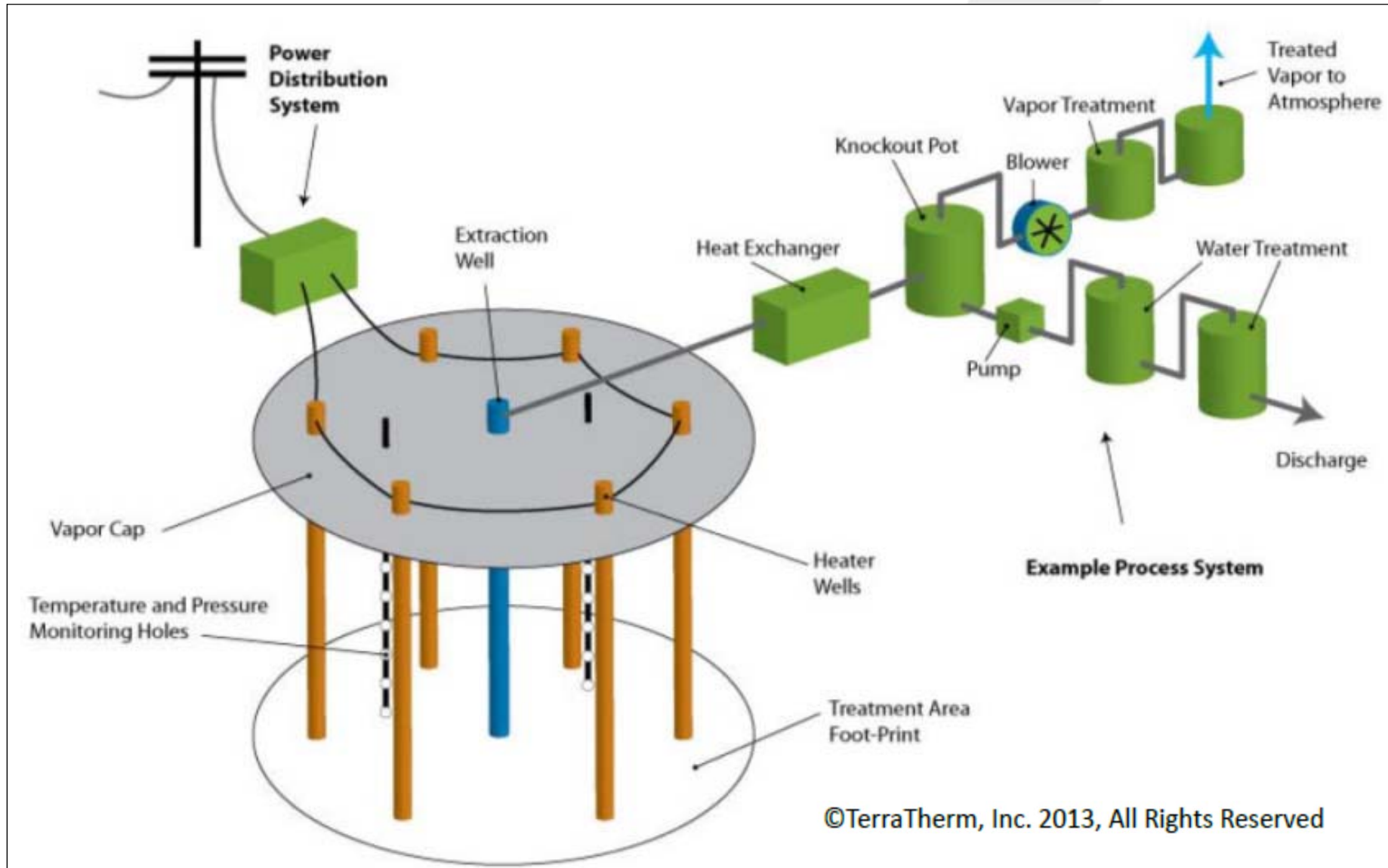
- Idrocarburi leggeri e pesanti;
- IPA;
- Solventi Clorurati;
- Policlorobifenili (PCB);
- Pesticidi.

Tali composti possono essere rimossi con efficienze molto elevate (prossime al 100%) in quanto l'intera zona di trattamento può essere riscaldata fino a temperature elevate per diversi giorni.

## *disegno sperimentale 1/2*

- Petroltecnica ha sviluppato la tecnologia utilizzando resistenze elettriche posizionate nell'area da trattare, alloggiare all'interno di apposite tubazioni in acciaio infisse nel terreno soggetto alla bonifica.
- Lo sviluppo della tecnologia ha portato alla definizione di un campo prova sperimentale in un'area dismessa, adibita in passato allo stoccaggio e commercializzazione di prodotti petroliferi.
- Su tale area è stato attivo per alcuni anni un sistema di bonifica tradizionale di tipo SVE/Bv, che ha portato alla rimozione di buona parte della contaminazione; le eccedenze residue rispetto agli obiettivi di bonifica (CSC residenziali) sono state trattate con il DT.

## disegno sperimentale 2/2



## *caratteristiche ambientali dell'area 1/4*

### **ubicazione**

Contesto urbano fortemente antropizzato, caratterizzato dalla presenza di attività commerciali, terziarie ed unità abitative.

### **sottosuolo**

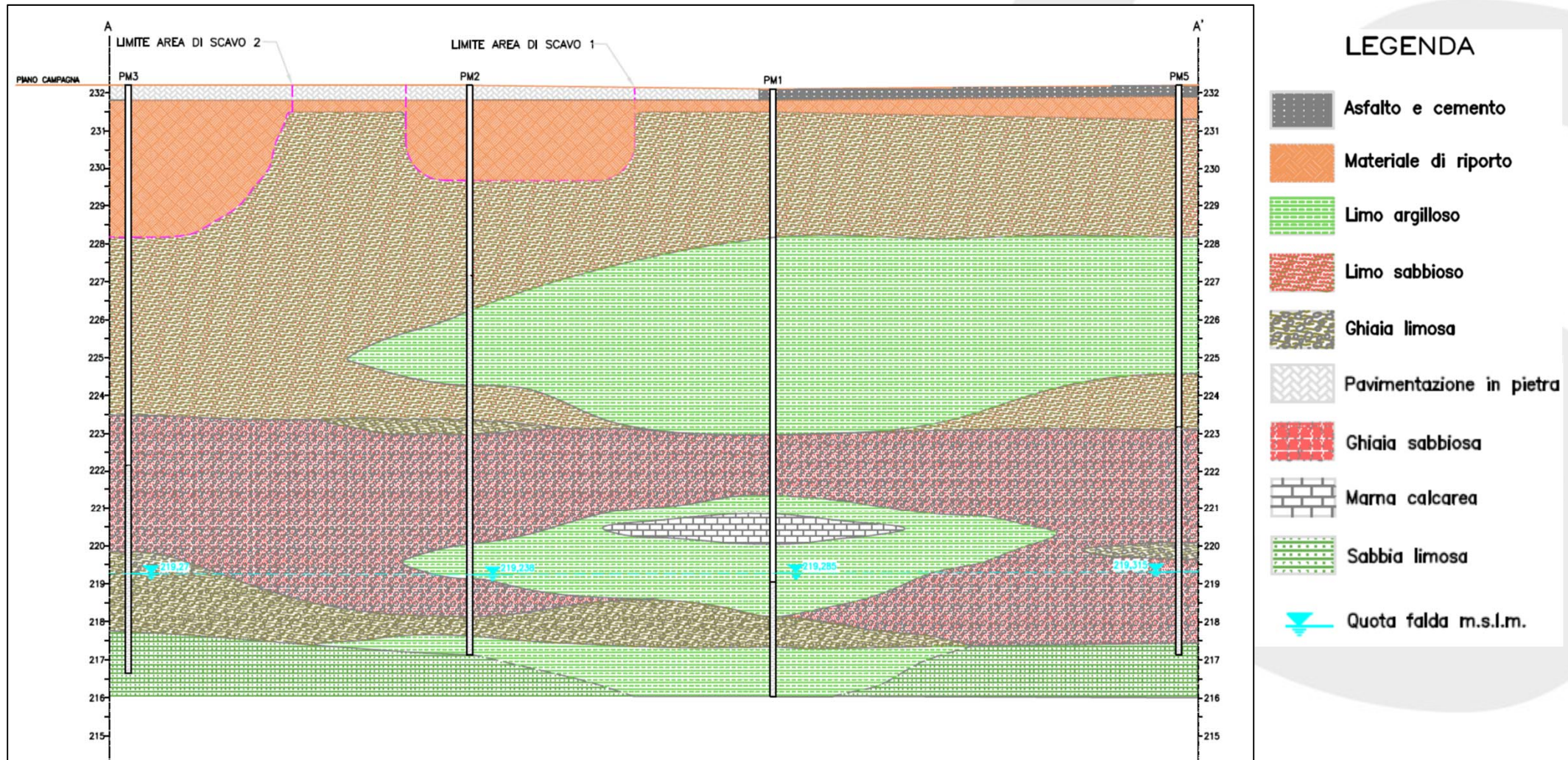
E' presente la seguente successione stratigrafica:

- 0,0 – 9,0 m da pc: terreni fini (limi ed argille);
- 9,0 – 16,0 m da pc: ghiaie in matrice sabbiosa.

### **falda idrica**

Falda di tipo freatico con una soggiacenza media di circa 13,5 m dal p.c. ed escursione stagionale media pari a  $\pm 1$  m.

## caratteristiche ambientali dell'area 2/4



## *caratteristiche ambientali dell'area 3/4*

### contaminazione

- Contaminazione adsorbita al terreno insaturo all'interno del sito estesa per circa 30 m<sup>2</sup>.
- Contaminazione nei terreni insaturi distribuita verticalmente da circa 2,5 m a circa 13,5 m da p.c., per uno spessore complessivo pari a 11,0 m, rappresentata prevalentemente da C>12.
- Acque di falda non contaminate.

## caratteristiche ambientali dell'area 4/4

Campione	Idroc. totali C<12	Idroc. totali C>12	Benzene	Toluene	Etilbenzene	Xileni	MtBE (*)	Piombo
	mg/kg							
S1 prof. 1,50 - 1,70 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	13,2
S1 prof. 2,50 - 2,70 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	20,3
S1 prof. 3,00 - 3,20 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	13,4
<i>S1 prof. 3,00 - 3,20 m ARPA</i>	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 5
S1 prof. 5,00 - 5,20 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	17,7
S1 prof. 7,00 - 7,70 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	20,0
S1 prof. 10,0 - 10,20 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	14,9
S1 prof. 12,30 - 12,50 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	11,5
<i>S1 prof. 12,30 - 12,50 m ARPA</i>	< 1	<b>269</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	10
S2 prof. 2,50 - 2,70 m	3	<b>1.715</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	17,1
<i>S2 prof. 2,50 - 2,70 m ARPA</i>	< 1	7,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	10
S2 prof. 3,00 - 3,20 m	< 1	24	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	16,0
S2 prof. 5,00 - 5,20 m	< 1	<b>292</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	13,1
<i>S2 prof. 5,00 - 5,20 m ARPA</i>	< 1	<b>171</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	10
S2 prof. 7,00 - 7,20 m	9	<b>370</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	16,8
S2 prof. 7,50 - 7,70 m	<b>14</b>	<b>702</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	17,7
S2 prof. 10,00 - 10,20 m	< 1	<b>1.442</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	10,0
S2 prof. 12,30 - 12,50 m	2	<b>2.055</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	9,1
<i>S2 prof. 12,30 - 12,50 m ARPA</i>	< 1	<b>865</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 5
<b>D.Lgs. 152/06 ALLEGATO 5, TAB.1, COLONNA A</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>n.n</b>	<b>100</b>

n.n.: parametro non normato

## *dimensionamento dell'intervento di bonifica 1/3*

Il dimensionamento del sistema di *Desorbimento Termico in Situ*, è stato definito sulla base dei numerosi case histories presenti in letteratura a livello internazionale, delle informazioni sito specifiche raccolte durante la fase di caratterizzazione e sulle pregresse esperienze dirette della scrivente in termini di applicazioni di tale tecnologia.

In considerazione dello spessore da trattare (circa 11,0 m) e delle caratteristiche tecnico-costruttive delle resistenze elettriche impiegate (lunghezza massima pari a 5,5 m), la bonifica mediante DT è stata progettata suddividendo l'orizzonte d'interesse in **due livelli**:

- il primo strato compreso tra 2,5 m e 8,0 m da p.c.;
- il secondo strato compreso tra 8,0 m e 13,5 m da p.c.

## *dimensionamento dell'intervento di bonifica 2/3*

Il sistema nella configurazione di progetto ha previsto di utilizzare per ogni livello **cinque tubi riscaldanti**, aventi ciascuno un raggio d'influenza (**ROI**) definito in maniera cautelativa pari a circa **1,5 m**.

I tubi riscaldanti sono costituiti da **tubazioni cieche in acciaio** del diametro di circa **6"**, al cui interno sono posizionate le resistenze elettriche, installati tramite perforazioni a distruzione di nucleo alle profondità previste per ogni fase della bonifica.

Per la verifica della diffusione del calore nella zona soggetta a trattamento sono state utilizzate n.12 termocoppie di controllo delle temperature (n.6 per il livello superficiale e n.6 per il livello profondo), alloggiato all'interno di **tubazioni cieche in acciaio** del diametro di circa **1"**.

## *dimensionamento dell'intervento di bonifica 3/3*

Il sistema di bonifica è stato completato mediante:

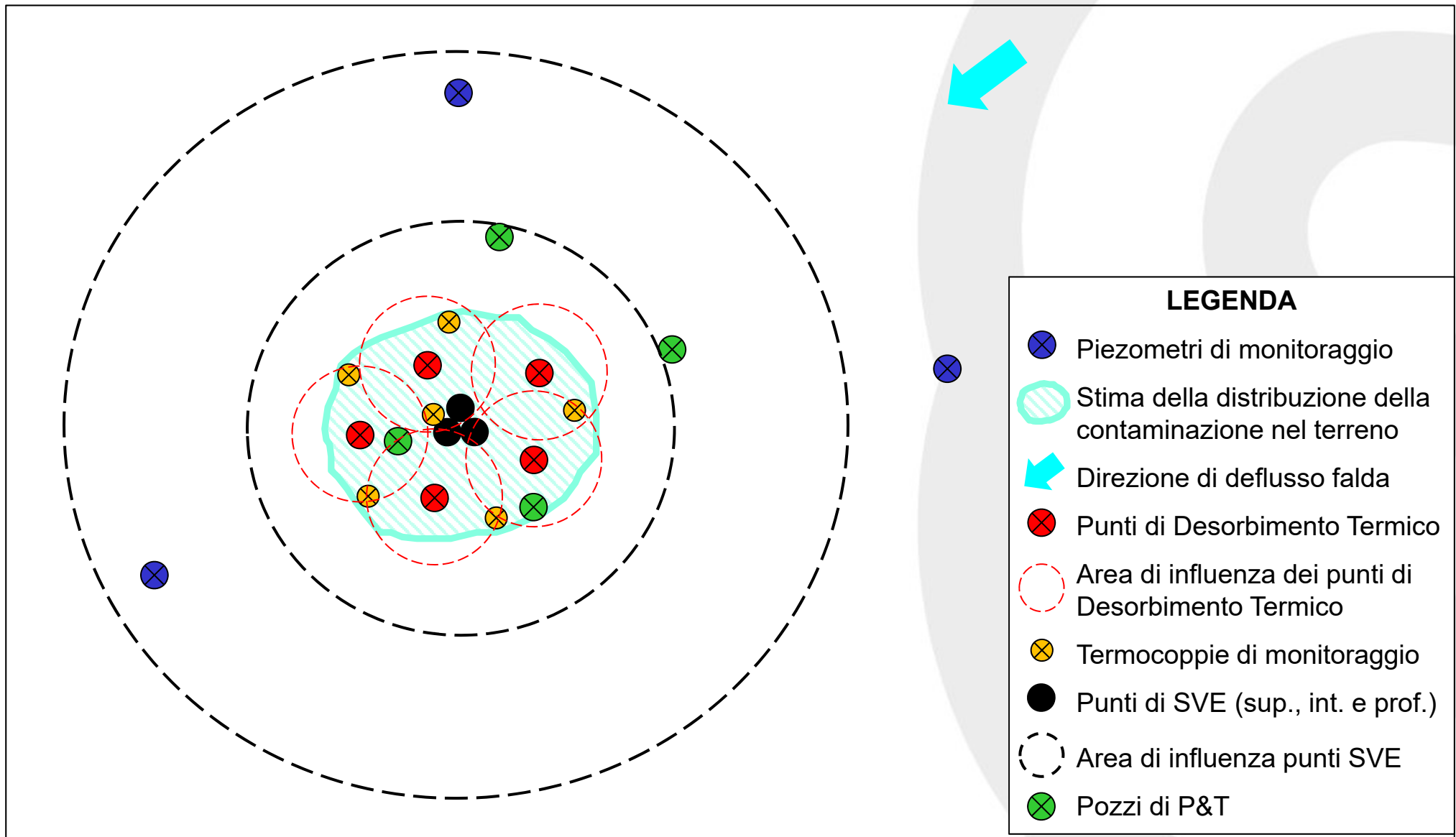
- la posa di **3 punti di estrazione vapori** (SVE), fessurati a differenti quote da p.c. per permettere un'efficiente cattura dei vapori volatilizzati nei vari strati oggetto di trattamento. I vapori estratti sono stati inviati ad un tradizionale sistema di trattamento a carboni attivi in modo da garantire il rispetto dei limiti di emissione previsti dalla normativa vigente;
- l'installazione di **4 pozzi di emungimento** (P&T) che hanno garantito il mantenimento del livello di falda al di sotto di 15,0 m da p.c., in modo che eventuali innalzamenti non pregiudicassero il regolare funzionamento del sistema di DT. Le acque estratte sono state scaricate in idoneo corpo recettore previo trattamento mediante un tradizionale sistema a carboni attivi.

## *configurazione impianto 1/2*

L'impianto è composto dalle seguenti attrezzature principali:

- Desorbimento Termico in situ:
  - n.10 tubi riscaldanti in acciaio e relative resistenze elettriche;
  - n.12 termocoppie per il monitoraggio delle temperature;
- SVE:
  - n.3 punti di estrazione vapori in acciaio;
  - n.1 sistema di estrazione (*blower*) con trappola di condensa;
  - n.1 sistema di trattamento a carboni attivi;
- P&T:
  - n.4 pozzi in acciaio e relative pompe di emungimento;
  - n.1 sistema di trattamento a carboni attivi;
- quadri elettrici certificati di comando e controllo;
- isolamento termico di superficie (*capping*).

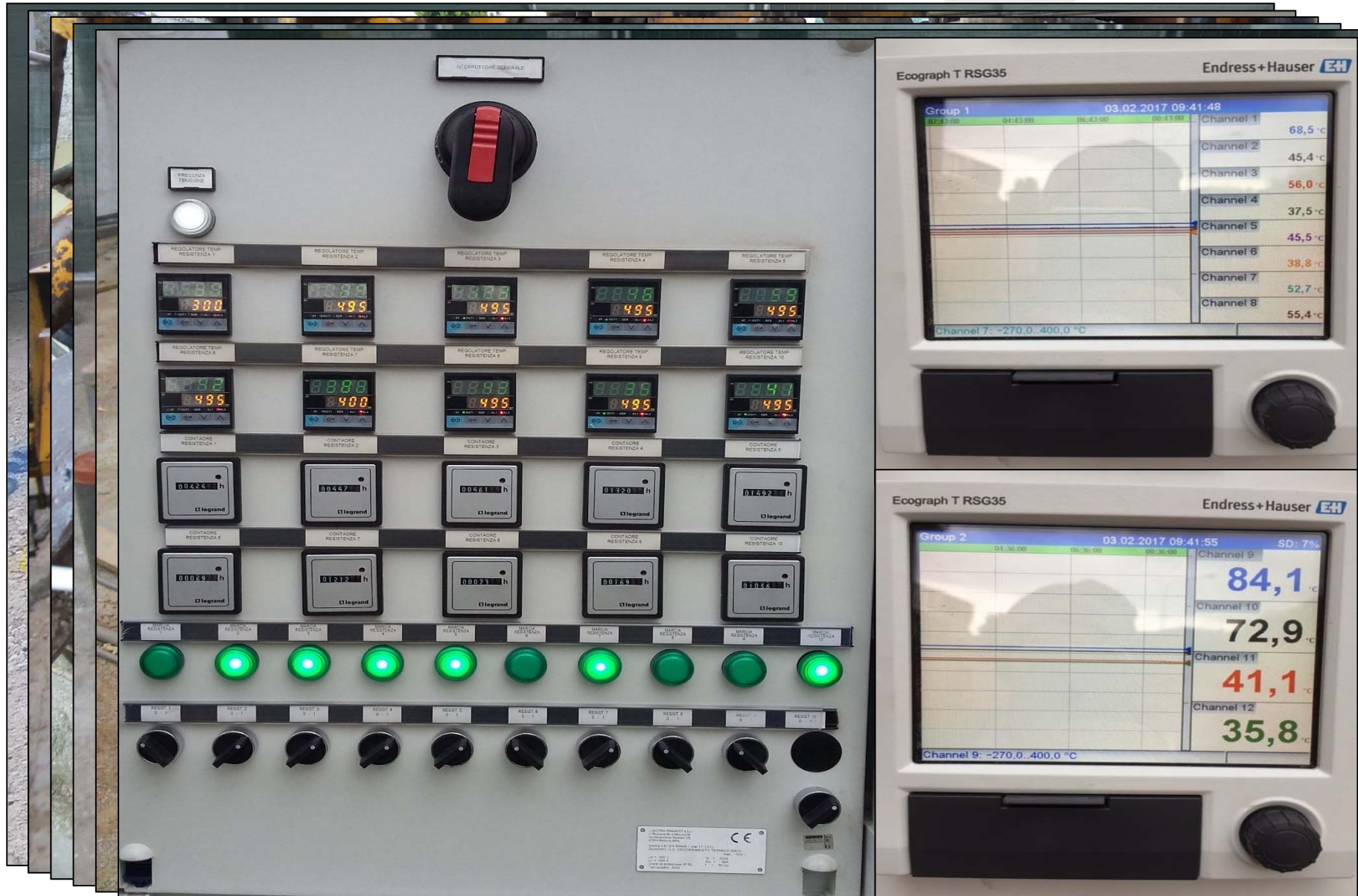
## configurazione impianto 2/2



## *successione temporale delle attività*

- **installazione** sistemi di Desorbimento Termico, SVE e P&T (durata 1,5 mesi).
- **prove tecniche** di avviamento e taratura dei sistemi (15 gg).
- **avvio** dei sistemi in condizioni operative.
- **conduzione** della bonifica ed esecuzione monitoraggi periodici (4 mesi).
- **spegnimento** degli impianti.
- **collaudo** degli interventi di bonifica in contraddittorio con le PP.AA. (dopo 30 gg dallo spegnimento).
- **disinstallazione** dei sistemi e ripristino delle aree.

## installazione degli impianti



## *avvio degli impianti*

A seguito all'ultimazione dei lavori di installazione, sono state effettuate le prove tecniche di avviamento del sistema, per la definizione e taratura delle condizioni operative ottimali.

Prima di tutto si è avviato il sistema di **P&T** al fine di deprimere la soggiacenza di falda e desaturare la parte di terreno profondo fino alla profondità di 15,0-16,0 m da piano campagna.

Successivamente è stato avviato il sistema di **SVE** al fine di creare le condizioni per il recupero dei vapori generati dal riscaldamento del terreno.

Infine si è proceduto all'attivazione delle **resistenze** riscaldanti: tale fase è avvenuta per step successivi, attivando gradualmente dapprima le resistenze del livello profondo e successivamente le resistenze del livello superficiale. Il *set point* delle resistenze è stato impostato mediante incrementi progressivi delle temperature.

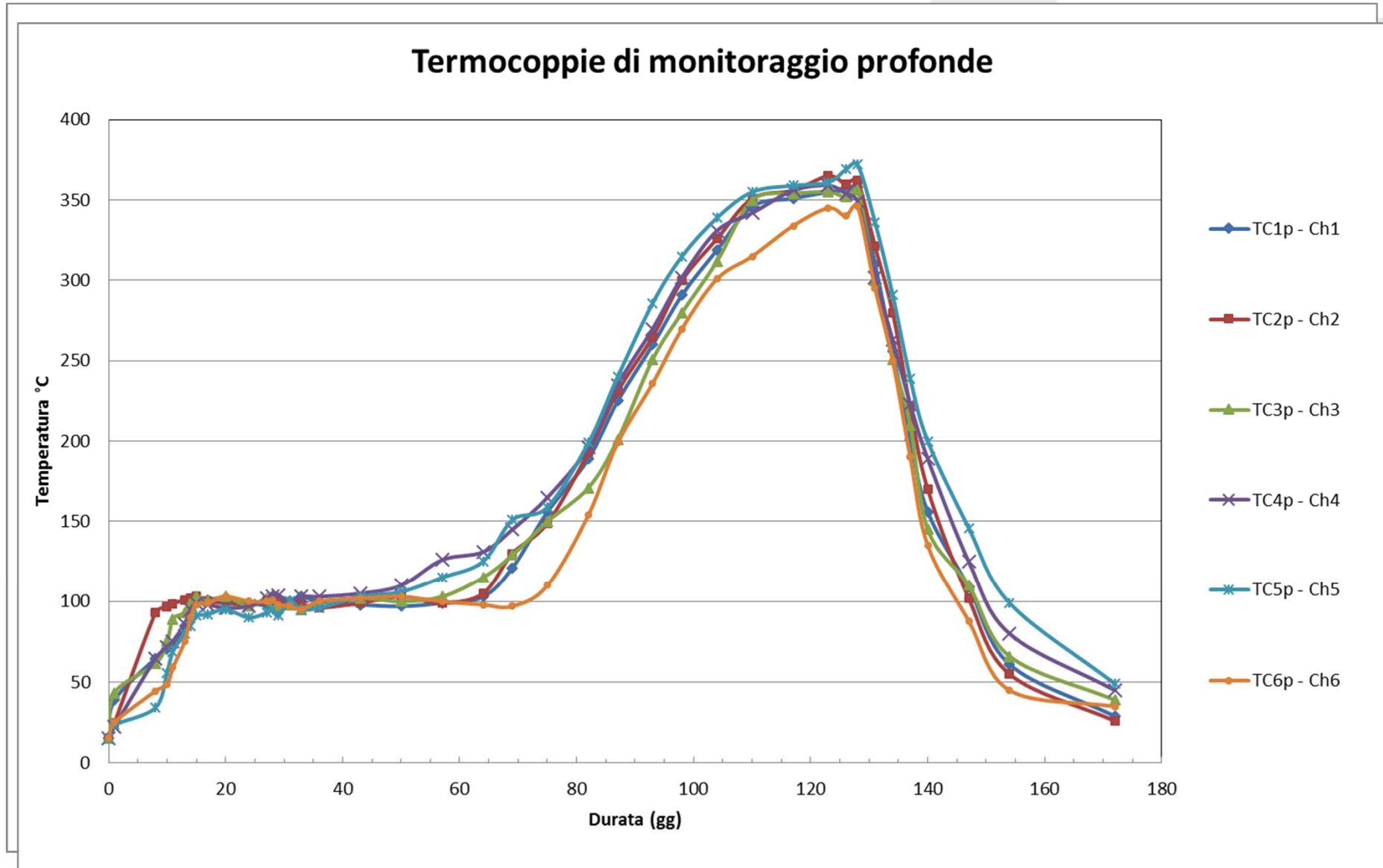
## ***monitoraggio degli interventi di bonifica 1/2***

Al fine di verificare il trend di risanamento ambientale, le operazioni di manutenzione e di monitoraggio hanno compreso le seguenti attività:

- verifica del corretto **funzionamento** degli impianti e manutenzione ordinaria;
- rilievo delle **temperature** di *set point* delle resistenze e delle termocoppie;
- rilievo delle **depressioni** e delle percentuali di **O<sub>2</sub>**, **CO<sub>2</sub>** e **VOC** sui punti di SVE;
- rilievo dei VOC e prelievo campioni in e out dal sistema di trattamento vapori;
- prelievo di campioni di acqua in e out dal sistema di trattamento acque;
- rilievo piezometrico e prelievo di campioni di acqua in corrispondenza di tutti i piezometri installati;
- rilievo delle **portate** di vapori ed acque estratti dal sottosuolo, trattati e scaricati;
- quantità di **contaminanti rimossi** nei flussi di acqua/aria estratti.



## monitoraggio degli interventi di bonifica 2/2



## *verifica del raggiungimento degli obiettivi di bonifica 1/2*

A seguito del raggiungimento della temperatura di progetto (350°C) necessaria alla volatilizzazione dei contaminanti in tutte le termocoppie di monitoraggio, del mantenimento per un adeguato periodo di tale temperatura e della verifica dell'assenza di VOC estratti dal sistema di SVE, si è proceduto allo spegnimento progressivo degli impianti.

Lo spegnimento è avvenuto dopo circa 4 mesi dall'avvio dei sistemi.

Successivamente, a seguito di verifiche dell'assenza di fenomeni di rebound nel flusso di vapori estratti, si è proceduto all'esecuzione di n.2 sondaggi di collaudo in contraddittorio con le PP.AA. competenti, per la verifica dell'efficacia del sistema e del raggiungimento degli obiettivi di bonifica.

## verifica del raggiungimento degli obiettivi di bonifica 2/2

Campione	Idroc. totali C<12	Idroc. totali C>12	Benzene	Toluene	Etilbenzene	Xileni	Piombo
	mg/kg						
SC1 prof. 1,5 - 2,0 m	< 1	26	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	13,7
SC1 prof. 1,5 - 2,0 m ARPA	<1	46	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	18
SC1 prof. 3,0 - 3,5 m	< 1	38	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	16,0
SC1 prof. 3,0 - 3,5 m ARPA	<1	41	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	13
SC1 prof. 5,0 - 5,5 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	14,0
SC1 prof. 5,0 - 5,5 m ARPA	<1	<5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	11
SC1 prof. 7,0 - 7,5 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	11,8
SC1 prof. 7,0 - 7,5 m ARPA	<1	<5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	12
SC1 prof. 10,0 - 10,5 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	3,3
SC1 prof. 10,0 - 10,5 m ARPA	<1	<5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<5
SC1 prof. 12,0 - 12,5 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,7
SC1 prof. 12,0 - 12,5 m ARPA	<1	<5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<5
SC2 prof. 1,5 - 2,0 m	< 1	27	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	14,4
SC2 prof. 1,5 - 2,0 m ARPA	<1	32	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	15
SC2 prof. 3,0 - 3,5 m	< 1	43	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	10,7
SC2 prof. 3,0 - 3,5 m ARPA	<1	7,9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	11
SC2 prof. 5,0 - 5,5 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	10,8
SC2 prof. 5,0 - 5,5 m ARPA	<1	6,4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	11
SC2 prof. 7,0 - 7,5 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	9,0
SC2 prof. 7,0 - 7,5 m ARPA	<1	<5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	9,3
SC2 prof. 10,0 - 10,5 m	< 1	< 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	2,0
SC2 prof. 10,0 - 10,5 m ARPA	<1	7,7	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<5
SC2 prof. 12,0 - 12,5 m	< 1	20	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	4,0
SC2 prof. 12,0 - 12,5 m ARPA	<1	13	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<5
<b>D.Lgs. 152/06 ALLEGATO 5, TAB.1, COLONNA A</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>100</b>

***grazie per l'attenzione***

***[www.petroltecnica.it](http://www.petroltecnica.it)***