

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO**

*Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e Delle Tecnologie  
Ambientali*

**TESI DI LAUREA IN TECNOLOGIE DI RISANAMENTO DEL SUOLO E  
DEL SOTTOSUOLO**

**APPLICAZIONE DI SOIL VAPOR EXTRACTION E  
PUMP & TREAT A UN SITO CONTAMINATO DA  
SOLVENTI CLORURATI**

**CANDIDATO**  
Marchesini Michele  
Matricola n. 0000308400

**RELATORE:**  
Chiar.mo Prof.  
Ing. Nocentini Massimo

Anno Accademico 2008/09

Sessione III

# INDICE

## CAPITOLO 1

### CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

INTRODUZIONE.....	p. 1
1.1 Criticità del sito <i>ex suprema</i> .....	p. 3
1.1.1 Capannone settentrionale magazzino.....	p. 3
1.1.2 Capannone meridionale .....	p. 9
1.2 Contesto morfologico stratigrafico idrogeologico .....	p. 12
1.2.1 Morfologia e stratigrafia .....	p. 12
1.2.2 Acque sotterranee e superficiali.....	p. 20
1.3 Piano delle indagini .....	p. 24
1.3.1 Insaturo, modalità di indagine e campionamento .....	p. 25
1.3.2 Satiro, modalità di esecuzione dei sondaggi .....	p. 31
1.3.3 Stratigrafia della matrice solida satura ed insatura (suolo e AQ1) ...	p. 37
1.3.4 Parametri idrogeologici.....	p. 43
1.3.5 Contaminazione insaturo e sua distribuzione .....	p. 52
1.3.6 Falda freatica modalità di campionamento e contaminazione.....	p. 62
1.4 Modello concettuale.....	p. 69
1.4.1 Modello di contaminazione Insaturo .....	p. 70
1.4.2 Modello di contaminazione Insaturo .....	p. 73
1.4.3 Contaminazione falda, il modello di trasporto.....	p. 78
1.4.4 Ampiezza aree contaminate .....	p. 93

## CAPITOLO 2

### PROGETTAZIONE DELLA BONIFICA

2.1 Contaminazione da alifatici clorurati.....	p. 97
2.2 Contaminazione da idrocarburi.....	p.103
2.3 Obiettivi di bonifica: riassunto dei risultati dell'analisi di rischio.....	p.104
2.4 Trattamento dell'insaturo: soil vapor extraction.....	p.108
2.4.1 Modelli di flusso e trasporto inquinanti.....	p.109
2.4.2 Fattori fisici, chimici e biologici influenti e scelta del trattamento ..	p.110
2.4.3 Test pilota .....	p.112
2.4.4 Interpretazione dei dati di campo.....	p.113
2.4.5 Aspetti progettuali e realizzativi .....	p.116
2.4.6 Dimensionamento dell'impianto di SVE.....	p.120
2.5 Dimensionamento dell'impianto di SVE.....	p.131
2.6 Trattamento della falda: Pump & Treat .....	p.142
2.6.1 Tipologie di opere costitutive del P&T.....	p.143
2.6.2 Strategie di utilizzo .....	p.144
2.6.3 Limitazione all'utilizzo dei pozzi barriera.....	p.145
2.6.4 Criteri dimensionamento di un pozzo-barriera .....	p.148
2.6.5 Efficienza idraulica ed efficacia idrochimica del pozzo .....	p.150
2.6.6 Progettazione dei pozzi.....	p.152
2.6.7 Previsione del tempo di funzionamento dell'impianto .....	p.154
2.6.8 Monitoraggio e verifica delle barriere idrauliche.....	p.155
2.7 Dimensionamento dell'impianto di Pump and Treat P&T .....	p.157
2.7.1 Raggio d'influenza .....	p.158
2.7.2 Portate d'intervento .....	p.159

2.7.3 Configurazione impianto .....	p.161
2.7.4 Trattamento e scarico gas in atmosfera e scarico acqua in fognatura	p.165
2.8 Bonifica idrocarburi .....	p.168
2.8.1 Strategia di bonifica .....	p.169
2.8.2 FASE I1: Rimozione di prodotto in fase libera in falda con Bioslurping.....	p.170
2.8.3 FASE I2: Presenza di contaminazione superiore alle CSR nei terreni insaturi: Scavo e smaltimento .....	p.173
2.8.4 FASE I3: Rimozione di contaminazione disciolta in falda e residuale nel suolo con SVE ed AirSparging (Bioventing).....	p.176
2.8.5 Unità di trattamento Bioslurping/SVE/Airsparging.....	p.179
2.9 Monitoraggio scarichi ed efficienza impianti .....	p.184
2.9.1 Monitoraggio alifatici clorurati.....	p.184
2.9.2 Monitoraggio Idrocarburi.....	p.188

## CAPITOLO 3

### GESTIONE E MONITORAGGIO DEGLI IMPIANTI

3.1 Realizzazione degli impianti di SVE e P&T .....	p.190
3.1.1 Filtri a carbone attivo .....	p.192
3.1.2 Impianti di strippaggio .....	p.197
3.1.3 Tubazioni (piping) .....	p.201
3.1.4 Soffiante.....	p.206
3.1.5 Separatori di condensa e valvola rompi vuoto.....	p.208
3.1.6 Impianto elettrico .....	p.210
3.2 Strategia di bonifica dei clorurati.....	p.213

3.2.1 Piano dei controlli ex-post .....	p.216
3.3 Condizioni e vincoli sull'area contaminata .....	p.219
3.3.1 Caratteristiche edifici nel Lotto 1 (Residenziale e Verde Privato/Pubblico) .....	p.219
3.3.2 Caratteristiche edifici nel Lotto 2 (Commerciale Direzionale).....	p.220
3.3.3 Caratteristiche eventuali edifici nel Lotto 3 (Commerciale Parcheggio) .....	p.220
3.4 Strumenti per il monitoraggio .....	p.222
3.4.1 Fotoionizzatore PID .....	p.223
3.4.2 Manometro digitale di precisione .....	p.227
3.4.3 Freatimetro .....	p.229
3.5 Attività di gestione degli impianti .....	p.230
3.5.1 Impianto di estrazione acque (P&T) .....	p.230
3.5.2 Impianto di estrazione sottovuoto di volatili (SVE) .....	p.232
3.6 Diario della bonifica .....	p.237
3.6.1 Configurazioni impiantistiche della linea 1 .....	p.237
3.6.2 Configurazioni impiantistiche della linea 2 .....	p.241
3.6.3 Configurazioni impiantistiche della linea 3 .....	p.244
3.7 Conclusioni .....	p.247
3.7.1 Bonifica della falda (P&T).....	p.247
3.7.2 Bonifica dell'insaturo (SVE) .....	p.248
 BIBLIOGRAFIA.....	 p.255

## ALLEGATI

TAVOLA 1

TAVOLA 2

TAVOLA 3

# **CAPITOLO 1**

## **CARATTERIZZAZIONE DEL SITO**

### **INTRODUZIONE**

La presente tesi ha come oggetto il lavoro da me svolto presso il sito di bonifica ambientale “EX SUPREMA” come collaboratore dello studio di Geologia Applicata Viel & Associati.

L’area soggetta a contaminazione, situata ad Argelato (provincia di Bologna), è stata dagli anni ‘20 fino al 2003 sede di SUPREMA, azienda produttrice di lavatrici industriali. Al momento del fallimento di questa, lo stabilimento è stato acquistato da GEMA 96 spa, importante società che opera nel settore edilizio.

Nel 2004 il terreno ha subito un cambio di destinazione da industriale a residenziale - commerciale: durante le indagini preliminari per stabilire l’ effettiva edificabilità dell’ area, sia la parte insatura sia la falda sono state scoperte contaminate; i principali agenti inquinanti erano solventi clorurati (e loro derivati) che venivano utilizzati per il lavaggio dei macchinari e in seguito scaricati sia nell’ ambiente esterno sia all’ interno dei capannoni di produzione, con modalità non ben identificata.

A questo punto è stato contattato lo studio Viel & Associati, il quale è stato incaricato delle operazioni di bonifica.

I lavori sono iniziati verso la fine del 2005.

Con il metodo dell’intervista, supportato dal rilevamento diretto, sono state raccolte le informazioni relative al ciclo produttivo ed alle materie prime utilizzate, poi sono state ricercate le zone e le situazioni di possibile pericolosità, relativamente alla componente suolo ed acque sotterranee.

Le testimonianze rinvenute sono piuttosto generiche, tuttavia alcuni capi reparto rammentano che i fusti di solventi erano tra i materiali stoccati temporaneamente nel magazzino.

L'attività dell'azienda, composta di due capannoni (figura 1.1 e tavola 1), consisteva nella produzione di lavatrici industriali e per qualche tempo di sabbiatura e lavorazione lamiere. Un reparto verniciatura ed un reparto collaudo lavatrici erano predisposti nel capannone più settentrionale, un reparto di smerigliatura e forse sabbiatura era organizzato nel capannone meridionale, il magazzino di stoccaggio di una considerevole parte delle materie prime e sostanze utilizzate nella produzione era ricavato in un apposito spazio esterno ai capannoni di lavorazione ed assemblaggio (“magazzino” in figura 1.1).

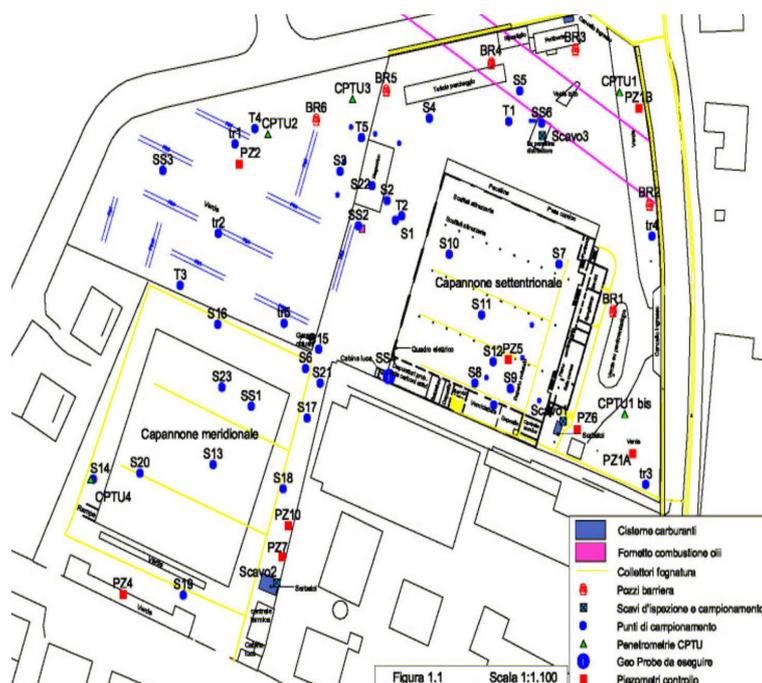


Figura 1.1 – Planimetria dell' area Ex-Suprema: nella pianta sono visibili i due capannoni destinati alla produzione nonché il magazzino di stoccaggio esterno. Sono stati evidenziate anche altre situazioni di interesse quali cisterne, condotte fognarie, punti e scavi di campionamento, ecc.

## 1.1 EX SUPREMA CRITICITA'

### 1.1.1 Capannone settentrionale e magazzino

La foto 1 mostra capannone e piazzale settentrionali di Suprema come appariva all'inizio degli anni Sessanta, si notano i locali della portineria, in prossimità dell'attuale cancello settentrionale, una pompa per il rifornimento del carburante, nel piazzale, oltre all'area del "magazzino", allora costituito essenzialmente da una tettoia contenente fusti e materiali vari.



*Foto 1 – panoramica del capannone e del piazzale settentrionali*

Il punto di rifornimento autovetture è stato tolto già da molti decenni ed il sito risistemato, il magazzino è divenuto un locale chiuso con murature perimetrali.

Le destinazioni d'uso dei locali interni al capannone settentrionale sono state riportate in figura 1.2, da una planimetria risalente a circa 20 anni fa, sia per i locali semi interrati, sia per il vasto spazio delle lavorazioni al piano terreno. Non sono state invece riportate le

localizzazioni relative al “montaggio del quadro elettrico”, “finiture elettriche”, “finiture metalliche”, “stoccaggio macchine collaudate”, perché le localizzazioni di queste lavorazioni potevano variare negli anni ed uno stato di fatto grafico è poco indicativo nel merito. Inoltre queste lavorazioni hanno ben modesta attinenza con i termini del problema da affrontare.

Sono state invece riportate le aree occupate dalle scaffalature di attrezzeria perché certamente più stabili nel tempo ed inoltre parzialmente ancora collocate in posto alla fine del 2005, quando venne effettuato il primo sopralluogo per la caratterizzazione preliminare.

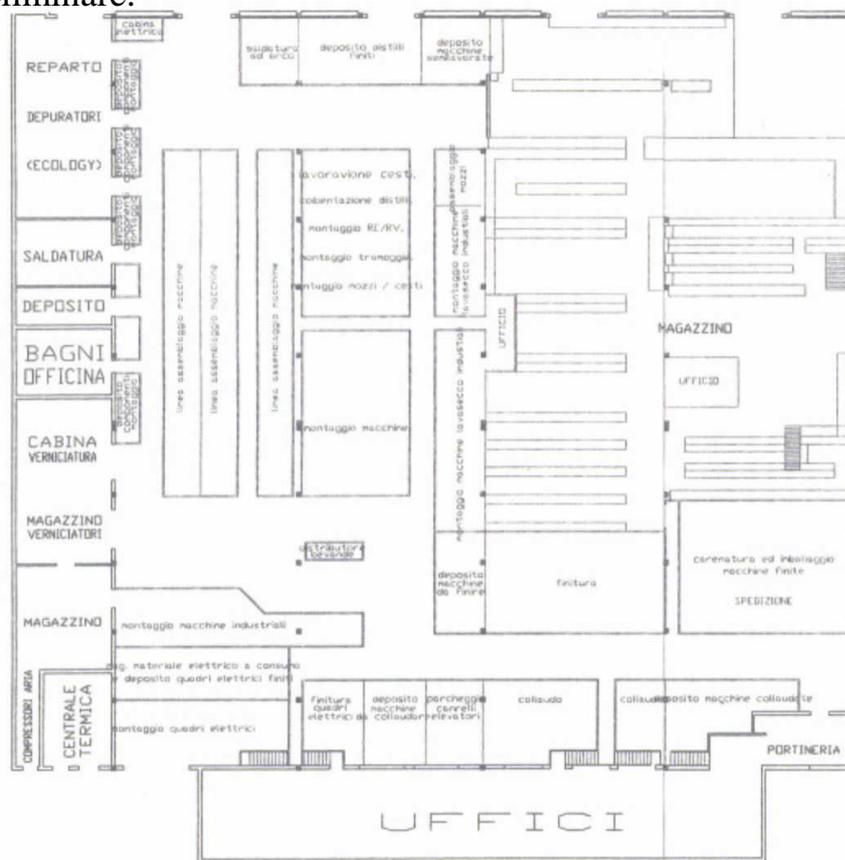


Fig. 1.2 – Planimetria della distribuzione delle lavorazioni del capannone Settentrionale

Il confronto tra la figura 1.2 e gli esiti del sopralluogo consente di verificare che il reparto <collaudo> è stato spostato di qualche decina di metri: dalla parete accanto alle scale che portano ai locali <uffici>, al posto di quella che allora era la linea di <montaggio macchine industriali> ed il reparto <Mag. materiale elettrico a consumo e montaggio quadro elettrico>. Il reparto collaudo delle lavatrici industriali, localizzato in figura 1.1, è ancora ben riconoscibile per la presenza dei servizi necessari al funzionamento delle lavatrici stesse, compreso due serbatoi subaerei e mobili di per cloro, sono disposti alle due estremità del reparto. Tutti i serbatoi di solventi, rinvenuti sono costituiti da silos ermetici subaerei amovibili dotati di vasca di sicurezza in acciaio alla base. Non sono stati rinvenuti serbatoi interrati durante i rilevamenti, con le prospezioni geologiche di sottosuolo, non si sono avute notizie in questo senso neppure dalle interviste ai capi reparto.

Di fronte al reparto <saldatura>, e di fianco alla <saldatura ad arco> erano organizzate tre linee di <assemblaggio macchine>. Il montaggio macchine lavatrici industriali avveniva nella porzione centrale del capannone, ma questa attività non presentava rischi di contaminazione da solventi clorurati, come invece certamente avveniva per il collaudo che ha continuato a permanere in prossimità della parete degli uffici e i locali di verniciatura. La porzione destra della figura comprende l'attrezzatura negli scaffali, ufficio di magazzino, e spedizioni.

Il reparto verniciatura è caratterizzato dalla presenza di una parete attrezzata, ancora visibile, con scorrimento a flusso laminare d'acqua e vasca di contenimento, pompe di ricarica, filtri e riciclo dell'acqua utilizzata. Una piastra rotante di 3 metri di diametro, incassata nel sottosuolo (oggi rimossa per procedere alle verifiche di caratterizzazione), completa il reparto, dotato anche di camerette laterali destinate a spogliatoi, e, pare, a stoccaggio temporaneo di vernici e parti lavorate. Le vernici e relativi solventi raccolti nei

filtri venivano stoccati in apposite vasche subaeree e successivamente avviate allo smaltimento specializzato.

Vicino allo spogliatoio del reparto verniciatura, un piccolo cortile recintato, il cui sottosuolo è quasi interamente occupato da 4 vasche di sedimentazione dei vicini servizi igienici (figura 1.1), veniva forse utilizzato anche per stoccare i piccole quantità di fluidi infiammabili di uso quotidiano. La pavimentazione in cemento del capannone appare ancor oggi in buono stato, le caditoie ed i tombini rilevati indicano la presenza di fognature poste sotto la pavimentazione, con ogni probabilità direttamente contro terra. Le fognature interne al capannone hanno naturalmente drenato e condotto le acque di lavaggio della pavimentazione ed anche gli accidentali sversamenti di fluidi che possono essere avvenuti in particolare nei due reparti collaudo e verniciatura. Nella figura 1.1, fuori testo, sono riportate anche le linee fondamentali relative alla rete di fognatura interna ed esterna al capannone con gli innesti nella rete di collettamento comunale. La dislocazione delle lavorazioni e dell'uso delle superfici ricostruita conferma l'attuale distribuzione della contaminazione, che si concentra infatti attorno alla verniciatura, lungo il lato "uffici" e lungo il ramo di fognatura in uscita verso il collettore comunale. In figura 1.1 sono anche riportati i punti e le situazioni esterne al capannone di particolare criticità attualmente rilevabili, le localizzazioni sono state assunte in coordinate assolute ottenute con semplice GPS palmare <Geko 301>.

Nella parte esterna, lungo il lato orientale del capannone sono stati rinvenuti numerosi tombini, la cui ispezione ha consentito di riconoscere vasche di sedimentazione e di mandata di sistemi di sollevamento dei reflui, vasche di deoleazione. Infatti in corrispondenza della parte di capannone indicata <uffici> in figura 1.2, esiste un vano semi interrato, adibito a cucina e mense, spogliatoi e servizi igienici, la quota in uscita della fognatura di

questi locali è a circa 2 metri dal piano di campagna. La quota di immissione nel collettore comunale è più alta, pertanto i reflui di questa parte dell'edificio venivano sollevati da apposite pompe e avviati a due vasche di raccolta.

Analogamente i reflui delle cucine venivano sollevati ed avviati ad una vasca di deoleazione collegata alla fognatura (figura 1.1).

Inoltre il rilevamento ha messo in luce: una botola per la presa d'acqua dei vigili del fuoco in completo abbandono (vano completamente allagato e di difficilissima utilizzabilità), diversi vani interrati, predisposti per il passaggio di tubazioni e cavi.

Infine, esternamente al locale <centrale termica> di figura 1.2, si sono rinvenute due botole di cisterne di carburante per il riscaldamento. Lo scavo esplorativo, localizzato in figura 1.1, ha dimostrato che si tratta di serbatoi in cemento armato in buono stato di conservazione contenenti ancora qualche residuo di olio, con relative tubazioni, in disuso dal 1997 quando venne introdotto il gas metano, data confermata nelle interviste.

Lungo il lato settentrionale del capannone, di fronte all'ingresso la "pesa" per automezzi presuppone una serie di vani interrati alla profondità di almeno 1,5 metri dal p.c., per ospitare le normali attrezzature di misura.

Nel piazzale tra il cancello d'ingresso e la "pesa" era presente un distributore di carburante per autovetture (ormai da molti anni demolito) il cui serbatoio interrato era localizzato lungo il confine della proprietà tra la strada comunale e la lavanderia a gettoni di foto 1, in cui trovava posto anche la guardiola della portineria (figura 1.1).

Lungo il lato occidentale del capannone è presente la cabina della luce non ispezionabile, cui corrisponde all'interno del capannone un quadro di distribuzione dell'elettricità ricavato nel muro perimetrale dotato di trasformatori a secco.

Al lato del piazzale, verso l'area a prato, è presente il magazzino

costituito da un unico locale alto mediamente 5 metri, ricavato tamponando con mattoni forati un precedente prefabbricato metallico, che sostiene le capriate del tetto in lastre di amianto cemento, oggi opportunamente smaltito. La pavimentazione di cemento armato, dello spessore di circa 20 centimetri, un tempo ricoperto da grandi lastre di ferro. Sono assenti fognature e caditoie che possano raccogliere e convogliare fluidi e liquidi interni al magazzino. Anche lo spazio esterno non è organizzato per raccogliere le acque di precipitazione, il piazzale asfaltato ha pendenza verso il magazzino stesso, e verso l'area verde che lo circonda su tre lati.

Il magazzino conteneva vari materiali. tra cui fusti con probabilità anche di solventi e di vernici come si può supporre osservando la foto 2, ricavata dall'ingrandimento digitale della foto 1. Accanto al magazzino è ancora visibile un forno adibito alla combustione di oli esausti dotato di un alto camino con fiaccola (figura 1.1). Questa attrezzatura, da annoverarsi tra le curiosità di archeologia industriale, è manifestamente in disuso da molti decenni. Il fornello, attualmente demolito, era solidale (faceva corpo unico) a su due piastre di ferro di 5\*4 metri, che consentivano l'accesso ai mezzi su ruote, ma che impedivano anche che sversamenti accidentali di olio potessero giungere direttamente al suolo.



*Foto 2 – Particolare della zona magazz.*

### **1.1.2 Capannone meridionale**

Le destinazioni d'uso dei locali interni al capannone meridionale (ex Max Clean) sono state riportate in figura 1.3, da una planimetria risalente a circa 20 anni fa in cui sono distinte le varie zone di lavorazione meccaniche.

In questo capannone si concentrava essenzialmente l'assemblaggio delle parti meccaniche e metalliche, e parzialmente la smerigliatura e sabbiatura dei metalli, e l'attività amministrativa, disposta in ampi locali su tre piani nella porzione sud del capannone. Solamente negli ultimi anni vi si sono svolte anche attività diverse

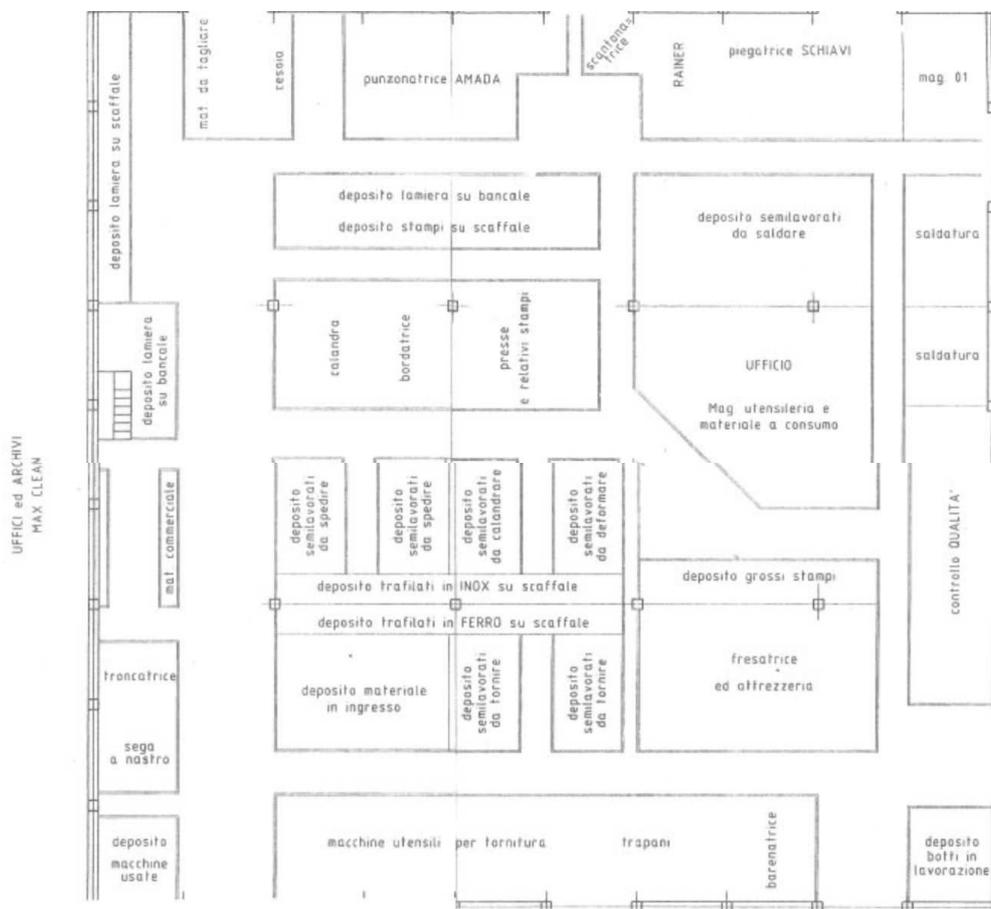


Fig. 1.3 – Destinazioni d'uso degli spazi interni al capannone meridionale

(affitto del capannone a subappaltatori), ma sempre connesse al montaggio di macchine lavatrici industriali, almeno così riportano gli intervistati.

Tutta la porzione più meridionale dell'edificio era adibita all'amministrazione, forse progettazione, ed agli uffici di rappresentanza, come si può verificare ancora oggi. In una parte del lato amministrativo è presente anche un semi interrato, certamente non adibito alle lavorazioni, probabilmente vi trovavano posto gli archivi e, forse, un garage.

In tutto il grande spazio al piano terreno del capannone meridionale, nella planimetria riportata in figura 1.3, sono indicate

le lavorazioni essenzialmente meccaniche, tra queste quelle che potrebbero destare preoccupazioni sono quelle di tornitura e trapani. Anche negli anni più recenti, a detta degli ex capi reparto intervistati le lavorazioni interne al capannone si sono concentrate sui semilavorati.

Solamente per gli ultimi anni si ha notizia di un probabile punto (cabina) di sabbiatura delle lamiere, oggi completamente asportato, di cui restano solo alcune tracce nella pavimentazione. Questo reparto doveva essere localizzato nel medesimo angolo in cui è indicato <deposito botti in lavorazione>, vicino alla verticale in cui è stato raccolto il campione SS1. Le fognature anche per questo capannone appaiono ricavate semplicemente da tubazioni poste sotto la pavimentazione, ed appoggiate contro-terra. La pavimentazione è costituita da una soletta di cemento armato, gettato direttamente contro-terra di spessore di circa 15 centimetri, i pilastri hanno fondazioni a plinti la cui profondità non è stata indagata. I servizi sono collocati in un seminterrato in corrispondenza alle scale interne al capannone che conducono ai locali uffici. Le sostanze esauste venivano conservate all'interno del capannone e smaltite attraverso ditte specializzate che ritiravano 4 – 5 volte ogni anno.

Nella parte esterna al capannone meridionale è presente l'edificio della centrale termica accanto alla cabina elettrica connessa alla cabina del capannone settentrionale con un cavo interrato ad alta tensione (15.000 volt) che scorre in vicinanza del limite di proprietà. Nel piazzale asfaltato si distingue la traccia del passaggio della linea ad alta tensione per il recente rifacimento dell'asfalto e per la presenza di una trincea trasversale scavata appositamente per determinare con certezza il passaggio dei cavi ad alto voltaggio.

In vicinanza alla centrale termica erano interrati due serbatoi in acciaio per il combustibile. Le cisterne erano corrose e contenevano acqua di infiltrazione miste a resti di carburanti.

Tra la centrale termica ed il capannone è localizzata una “pesa” per camion caratterizza l’area esterna prospiciente l’ingresso degli uffici. Alla pesa sono associate le consuete strutture interrato, tra cui una trincea in cemento armato contenente acqua , larga circa 1 metro e profonda circa 2 metri, con solaio portante, di cui non è stato possibile ricostruire esattamente la geometria.

Lo spazio esterno al capannone ed agli edifici citati è quasi interamente impermeabilizzato, solamente alcune aiuole disposte lungo il confine e accanto ai locali degli uffici sono interessate da verde. Le fognature esterne circondano il capannone mantenendosi circa in mezzo ai piazzali con una caditoia ogni circa 20 metri. Lo scarico è diretto verso il collettore di via Fratelli Rosselli.

## **1.2 CONTESTO MORFOLOGICO, STRATIGRAFICO, IDROGEOLOGICO**

### **1.2.1 Morfologia e stratigrafia**

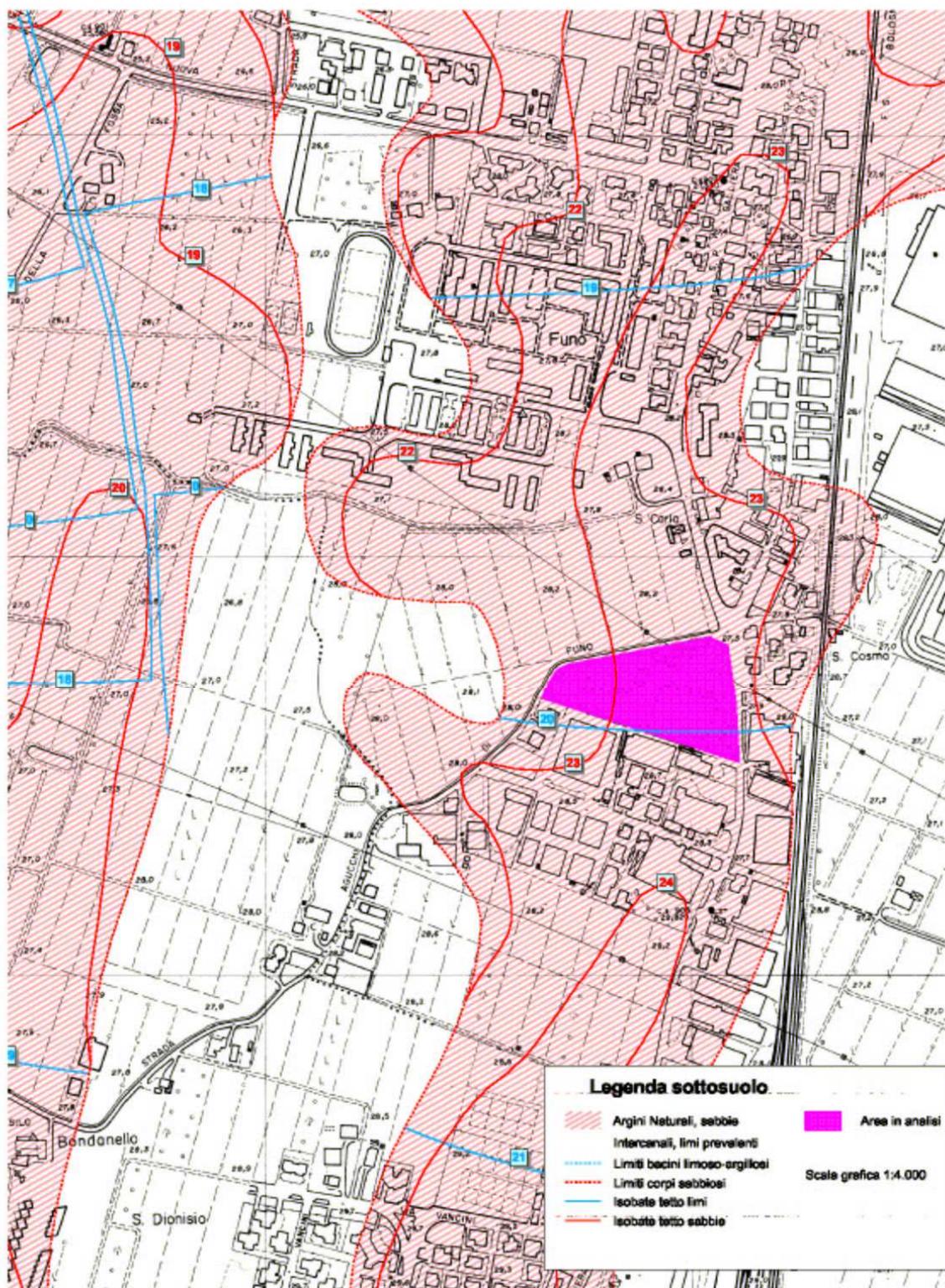
La morfologia è controllata dall’evoluzione degli antichi “Argini Naturali” del F. Reno: l’assetto topografico della pianura, caratterizzato dalla presenza di deboli ondulazioni circa ortogonali all’Appennino, rappresenta il risultato della storia deposizionale, nel nostro caso del F. Reno. In un recente lavoro (Viel et Alii., in Artioli et Alii., 1997) la pianura della provincia di Bologna è scomposta in sistemi e subsistemi morfologici fondati sulla presenza di antichi corsi fluviali le cui tracce sono ancora oggi visibili. I sedimenti ghiaiosi e, anche se in misura minore, quelli sabbiosi tendono a non diminuire di volume nel tempo e con la perdita dell’acqua interstiziale, contrariamente a quanto avviene ai sedimenti limoso argillosi. Per questo motivo le aree in cui la sedimentazione storica è stata in prevalenza fine (argille) formano depressioni topografiche di geometria, per lo più allungata, a volte

vere conche o catini, disposte tra le zone a deposizione granulare (sabbie e ghiaie) che restano topograficamente più rilevate.

Naturalmente le aree di sedimentazione granulare (argini naturali) costituiscono anche le zone di insediamento storico preferenziale (più difese da allagamenti, migliori condizioni di salubrità e maggiore stabilità delle fondazioni). Anche l'insediamento recente tende a seguire le medesime "regole" geografiche, e Fano di Argelato si è sviluppata sul più orientale dei corsi sabbiosi storici del F. Reno.

L'affidabilità delle ricostruzioni paleogeografiche di sottosuolo è proporzionale alla densità ed affidabilità delle stratigrafie di sondaggi, pozzi per acqua, e prove geognostiche effettuate in questi decenni nella pianura bolognese; la Regione Emilia Romagna ha raccolto un inventario delle conoscenze di sottosuolo (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli) utilizzata anche per questo lavoro.

La figura 2.1 costituisce il frutto dell'interpretazione planimetrica delle informazioni di sottosuolo raccolte per un'area assai ampia compresa tra Bologna e Bentivoglio (PRGC dei Comuni della Direttrice Nord). Il metodo d'analisi, già utilizzato per il sottosuolo di Bologna, e di numerosi altri Comuni del Bolognese, consiste nel rappresentare intervalli tridimensionali di sottosuolo comprendenti corpi granulari nella loro geometria. I dati puntuali, ricavati dalle prove geognostiche, sono interpolati ed interpretati utilizzando la modellistica sedimentologica e rapportandola anche alle condizioni idrauliche che devono aver presieduto il trasporto e la deposizione. Tra i punti noti si tracciano le isobate entro confini dimensionali dell'argine naturale estrapolati da zone in cui la densità delle informazioni consente di ottenere misure relativamente precise. Le isolinee permettono di rappresentare la geometria tridimensionale dei corpi geologici, quando sono note informazioni quotate dei limiti di tetto e letto nell'intervallo considerato, in caso contrario le isobate sono omesse.



coincide ovviamente con il letto delle stesse sabbie. In questo modo è possibile, confrontando anche le quote topografiche di superficie, individuare tutte le informazioni geometriche relative all'acquifero. E' intuitivo che questo modo di rappresentare l'interpretazione di sottosuolo fornisce immediatamente anche la direzione in cui si esprime la maggiore trasmissività dell'acquifero, e consente di correggere e migliorare le conoscenze, man mano si ottengono nuovi dati che possono confermare o smentire le geometrie proposte.

Una notevole quantità di informazioni puntuali, spinte a 10 o poco più, metri ha consentito di realizzare la figura 2.1 con una discreta attendibilità fino alla profondità di 10 – 12 metri circa. L'andamento dell'argine naturale appare decisamente nord - sud, le sue dimensioni trasversali si aggirano in genere attorno ai 300 metri, comprendendo non solo l'alveo di bankfull, ma anche l'alveo interessato dalle piene con tempi di ritorno maggiori di 10 anni.

L'ampiezza raffigurata rappresenta anche la porzione di argine naturale prossimale all'alveo a barre in cui sono rappresentati i depositi misti (sabbiosi e limosi) delle piene straordinarie. Per questo motivo sono rappresentati ripetuti segni di "rotta" o tracimazione, con formazione di apofisi laterali che possono far raggiungere i 500 metri di ampiezza apparente al complesso sabbioso - limoso. La potenza massima delle sabbie (dei canali) si mantiene attorno ai 3 metri.

Le geometrie del canale sono caratterizzate da letto per lo più piano e tetto convesso, la forma appare però caratterizzata da pendenze laterali elevate e da un andamento sinuoso del culmine dell'argine naturale. Si tratta di un alveo di bankfull caratterizzato da barre anastomizzate piuttosto allungate e strette, da lanche e canali laterali stoppati, attivi solo in occasione delle piene biennali.

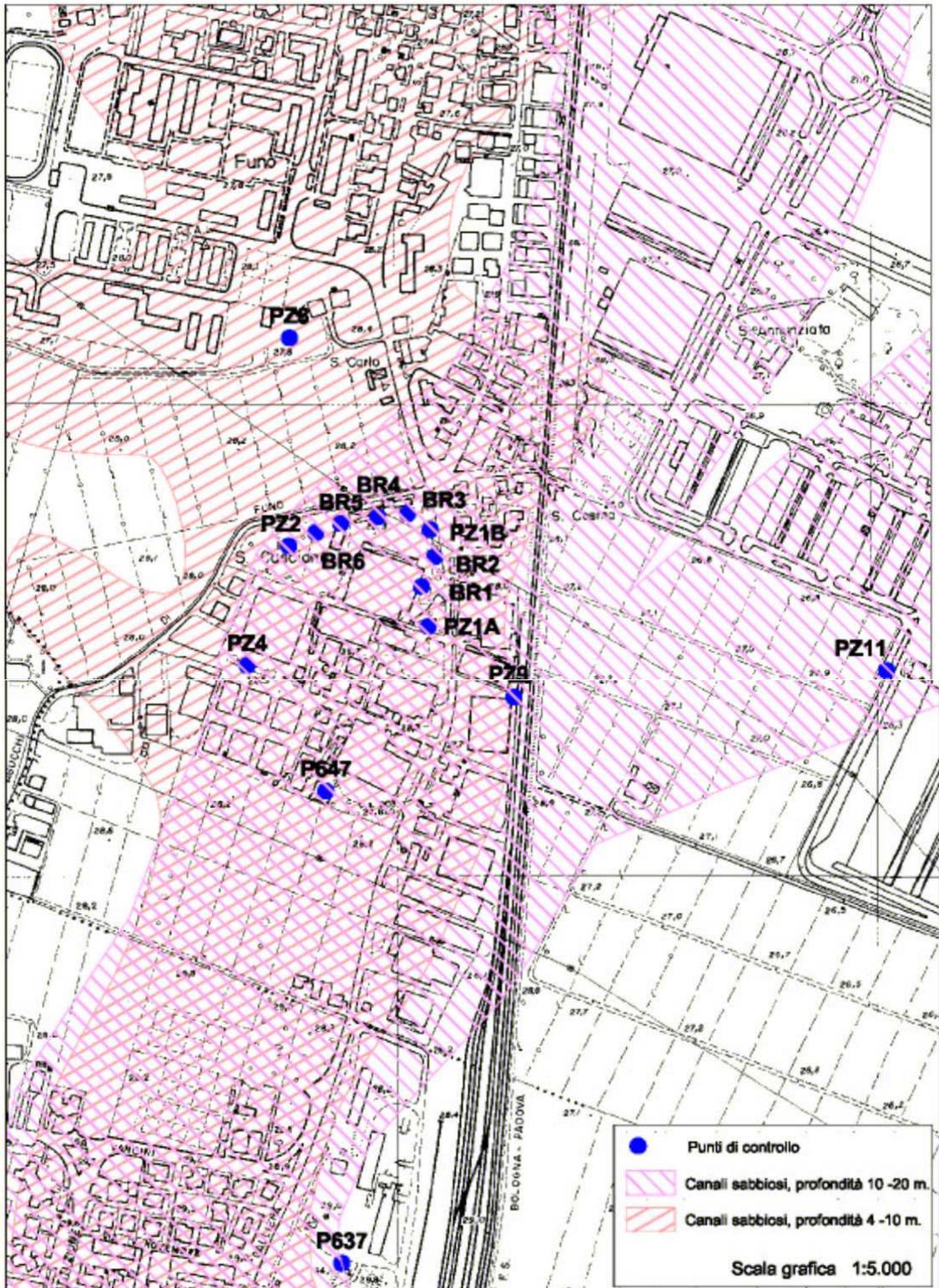
L'area di sedime dell'ex Suprema è interamente contenuta entro il

perimetro dell'argine naturale del paleo-Reno, più precisamente la porzione occidentale del capannone "ex Clean" e dell'area verde è già esterna all'alveo di bankfull. I sondaggi (PZ4 e PZ2) e le prove geognostiche (CPTU4, CPTU2) dimostrano infatti la netta diminuzione delle sabbie corrispondenti a questo complesso di canali (strato D al § 3.3) Il capannone settentrionale invece è pienamente interessato dal complesso di canali e barre sabbiose di questo primo, più superficiale antico alveo di Reno.

La figura 2.2 sintetizza l'esito dell'estrapolazione planimetrica dei dati di sottosuolo noti nell'intervallo di quota sottostante il precedente fino a circa 20 – 22 metri dal piano di campagna. La metodologia di analisi dei dati è la medesima vista in precedenza, in questo caso però i punti di controllo tra cui interpolare le informazioni sono decisamente più scarsi di numero, ed in genere assai meno qualificati per affidabilità: si tratta di vecchie stratigrafie per pozzi, collocate nella figura. La rappresentazione quindi è più schematica.

Considerando, i dati d'archivio e soprattutto gli esiti dei sondaggi effettuati per posizionare i piezometri esterni all'area di ex Suprema, che hanno confermato pienamente le perimetrazioni della figura 2.1, e le conoscenze acquisite con la campagna di caratterizzazione del sito stesso, si è ottenuta la ricostruzione di figura 2.2.

Si tratta di un precedente alveo sabbioso del Reno, in molti aspetti simile a quello descritto precedentemente: canali anastomizzati, barre braided, alveo di bankfull e sedimentazione di perialveo limoso – sabbiosi dovuti alle piene ventennali, fuori della zona perimetrata depositi di over-bank alternati a limi. Per questo alveo nella figura è presente un braccio che si stacca dal ramo principale con direzione nord-est, esso pare interrompersi bruscamente, in realtà si tratta della presenza di sabbie la cui continuità locale verso nord est non è suffragata da informazioni attendibili.



Più a nord non si sono rinvenute tracce di un alveo di importanza tale da poter essere attribuito al Reno, correlabile con lo spezzone indicato in cartografia.

Verso oriente (navile) per entrambi gli alvei si doveva estendere una vasta zona di possibile saltuario allagamento con presenza di piccole zone palustri più persistenti, come pare dimostrino gli spessori di limi più o meno sabbiosi contenenti resti vegetali (canne) ancora in posizione fisiologica rinvenuti in vari sondaggi. Mentre verso occidente, a poca distanza dall'alveo di figura 2.1, un altro paleo – Reno posto circa alle medesime quote e con lo stesso andamento rappresenta forse il corso fluviale storicamente precedente a quello visto qui.

In base ad analisi stratigrafiche realizzate in altre situazioni ben studiabili, è possibile ricostruire che le sequenze normali del Reno hanno in genere spessore di 3 metri, raramente giungono a 4 metri. Considerando che la potenza medio dei corpi sabbiosi più compatti (più strati ma con prevalenza netta delle sabbie), strati “D” ed “F” (vedi § 3.3), si aggira tra i 6 e gli 8 metri circa, si può sostenere che:

- il canale più superficiale (-3,5 -12 metri circa) potente circa 6 metri, è composto da due sequenze sovrapposte ed a luoghi amalgamate, il cui asse di massimo spessore non è coincidente e sovrapposto. Il canale più recente di età probabilmente tardo romana, pare spostato più ad oriente rispetto alle barre sottostanti, almeno in corrispondenza di Suprema;
- il canale più antico (-12 -22 metri circa) potente tra 6 e 8 metri circa, di età post wurmiana (paleolitico sup. - mesolitico?) è composto da almeno due sequenze, forse tre, sovrapposte ed amalgamate tra loro;
- tra i due complessi di episodi sabbiosi citati, il canale del Reno probabilmente si era spostato di qualche centinaio di metri più ad occidente (Bondanello – Luoghetto Galli), ed in

corrispondenza di Suprema giungevano solamente i depositi di overbank delle piene maggiori intercalati a sporadici sedimenti di deposizione per decantazione (strato "E" di § 3.3).

Il quadro paleogeografico tratteggiato è ovviamente rivolto a spiegare i sedimenti granulari (acquiferi) perché essi, in questo tratto di pianura, rappresentano la chiave interpretativa più diretta e verificabile. Tuttavia l'osservazione attenta delle stratigrafie ricavate, anche nella componente di tessitura fine, fornisce elementi interpretativi essenziali per la ricostruzione.

Lo strato "E", ad esempio, è composto da livelli di modestissima continuità laterale (come avviene per tutti i depositi di intercanale), i depositi limoso argillosi vengono infatti spesso tagliati, rimossi da violente correnti di piena per rotta o scavalco d'argine dei vicini canali del Reno. In molti casi l'arrivo di depositi di imponenti crevasse del Reno, testimoniate da strati pluri decimetrici di sabbie, mettono in comunicazione questi sedimenti con i canali sabbiosi relativamente vicini. Per ciò lo strato "E" appare significativo per la ricostruzione geologica, ma non dal punto di vista idrogeologico. La presenza di depositi limosi e anche limoso sabbiosi caratterizzati da alterazione pedogenetica (colorazione, orizzonti decalcificati, concentrazioni di carbonati -calcinelli, caliche-bioturbazione, bioturbazione) fornisce una prova di relativa continuità laterale e nel tempo di complessi di strati (stasi nella sedimentazione granulare locale), che potrebbero svolgere un ruolo di acquitardo tra sequenze canalizzate sovrapposte e intrecciate.

In conclusione la ricostruzione di sottosuolo dimostra come la collocazione dell'ex Suprema sia tale da interessare un imponente sistema di paleoalvei del Reno, in prevalenza sabbiosi, sovrapposti ed in relazione reciproca, fino alla profondità di circa 20 metri dal p.c.

Per fornire un quadro sintetico della stratigrafia di un vasto intorno territoriale desumibile dalle informazioni raccolte qui e d'archivio

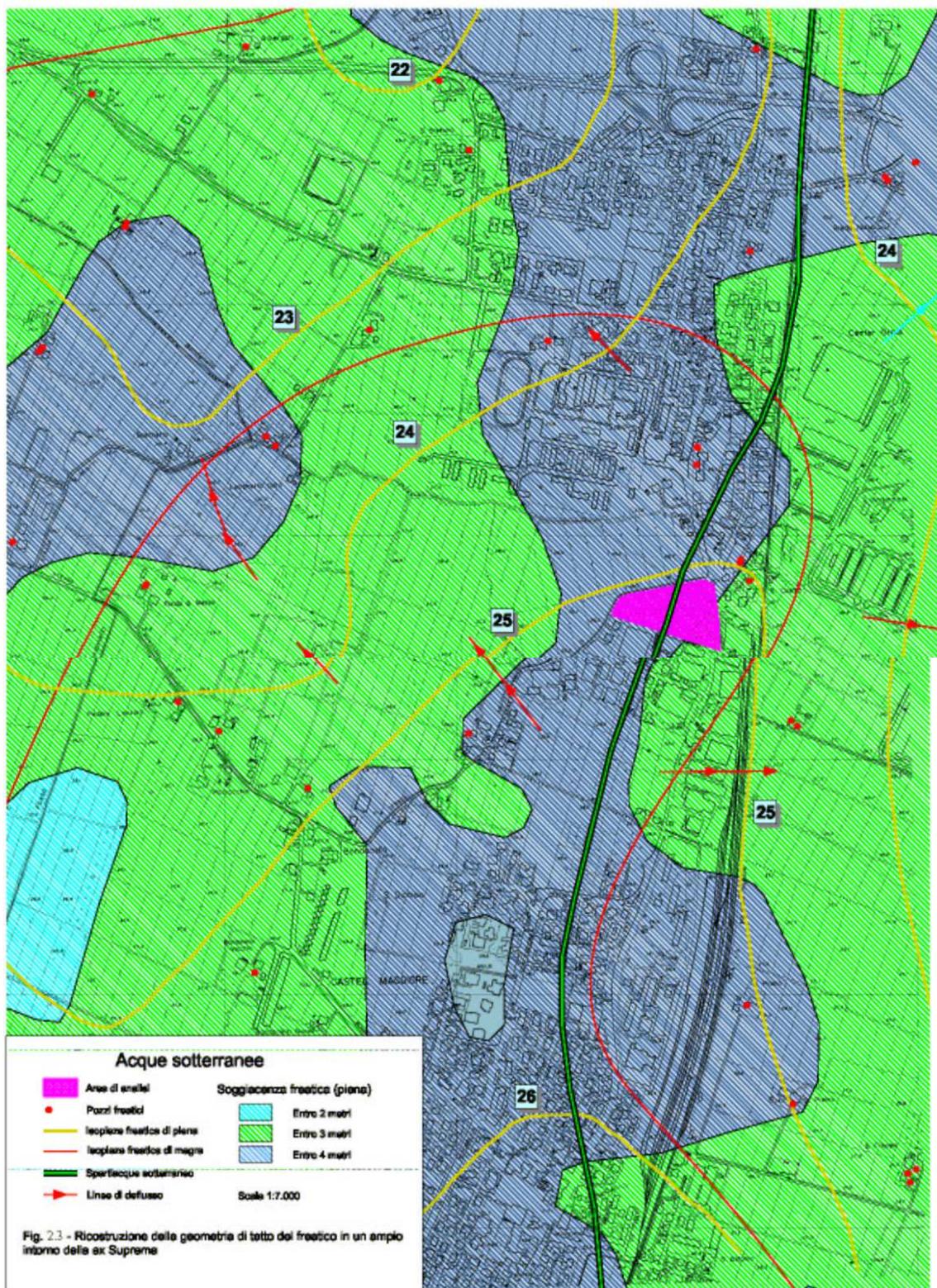
regionale (pozzi P611, P619, P637, P647 e P613), si è ricomposto il seguente schema dell'alternanza tra livelli granulari (sabbie e ghiaie) e fini (limi e argille), secondo un profilo sud – nord, tra Castelmaggiore e Funo di Argelato:

- 1) coltre pedologica sovrastante, costituita da limi sabbiosi e poi sabbie fini, per una potenza di circa 4 metri;
- 2) granulare in prevalenza sabbioso (acquifero) con sporadiche intercalazioni di limi, tra 4 e 22 metri dal p.c., nel testo verrà denominato <AQ1>;
- 3) tessiture fini in prevalenza limose e argillose (acquitardo), in cui comunque possono essere rappresentati sottili livelli sabbiosi, a profondità variabili tra 20 e 35 metri (intervallo potente tra 7 e 13 metri), nel testo sarà indicato <RD1>;
- 4) granulare sabbioso ma anche ghiaioso (acquifero), potente tra 4 e 9 metri, nel testo verrà indicato <AQ2>;
- 5) tessiture fini in prevalenza argilloso limose (acquitardo), potente oltre 20 metri, nel testo verrà indicato <RD2>.

### **1.2.2 Acque sotterranee e superficiali**

Le acque superficiali non costituiscono un elemento di criticità per il contesto esaminato, se si escludono i fossi stradali, comunque convogliati nel collettore comunale delle acque miste: i corsi d'acqua, naturali ed artificiali, sono in posizione distale rispetto al sito in studio.

Per le acque sotterranee, i rilevamenti di carattere territoriale effettuati per il Comune di Argelato, e per la Provincia di Bologna, forniscono una discreta conoscenza dei livelli di “piena” e di “magra” del freatico, controllati da più rilevamenti, di cui l'ultimo effettuato alla fine di settembre 2003, a termine del periodo siccitoso iniziato in giugno. Inoltre è stato effettuato un controllo dei pozzi freatici della zona ampia nel marzo 2007, dopo un periodo siccitoso che si prolungava dall'autunno precedente.



Purtroppo però non esiste una serie storica di rilevamenti stagionali per un territorio sufficientemente esteso attorno al sito in studio.

Il confronto tra i dati di piena e di magra disponibili mostrano una escursione freatica massima, negli ultimi 10 anni, mai superiore a 1,3 metri, mentre i suoi valori medi si aggirano attorno ai 50 - 70 centimetri. In alcuni casi, tra Boschetto e Luoghetto Galli, pare si sia verificato un leggero innalzamento nella stagione di magra, ciò può essere dovuto allo stato non stazionario della falda nei periodi di rilevamento precedenti il settembre 2003 (accentuato prelievo dai pozzi locali). Il campo di moto rilevato nel settembre 2003 è stato assunto come riferimento delle condizioni di piena.

Il campo di moto della freatica, derivato dalla configurazione geometrica del tetto di falda nel momento di piena (2003), è caratterizzato dalla presenza di uno spartiacque sotterraneo, linea quasi permanente negli stati sia di piena, sia di magra. Si tratta di una zona di “alto” piezometrico, in cui il deflusso delle acque sotterranee ha direzione verso est – nordest e verso ovest – nordovest; la figura 2.3 riporta, tra l’altro, il presunto andamento dello spartiacque nel periodo di piena, rilevato più volte negli anni precedenti, che attraversa l’area di Suprema.

Questa geometria della tavola d’acqua è fortemente condizionata dal contesto geologico di sottosuolo e dallo stato della falda (piena o magra). Per l’area dell’ex Suprema, il senso di deflusso sotterraneo nel periodo di morbida appare verso est o est nordest. In questa direzione dal capannone di Suprema è presente solo il modesto nucleo abitato di S. Cosma, in queste case sono presenti due pozzi freatici (indicati in figura 2.3), che potranno far parte dell’insieme dei punti di controllo della falda freatica scelti dallo Studio scrivente.

In questi due pozzi, tra il 12 ed il 14 novembre 2003 è stato effettuato il prelievo di due campioni d’acqua sotterranea alla quota della pompa sommersa, senza alcuna contaminazione dalla

superficie dell'acqua, le analisi fisico chimiche sui campioni d'acqua prelevati hanno determinato i parametri di base contemplati nella legge n.152/99 (alleg. 1, tab. 20) per le acque sotterranee.

Le misure sono state condotte in laboratorio secondo la usuale procedura standard, con strumentazione fotometrica, tranne per i cloruri, determinati per titolazione. Le analisi effettuate sono: temperatura (in °C), pH e conducibilità EC (in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) eseguite con punta strumentata, ammoniaca ( $\text{NH}_3$  in mg/l, con metodo "Nessler"), Solfati ( $\text{SO}_4$  in mg/l, per precipitazione con cloruro di Bario), Nitrati (in mg/l di  $\text{NO}_3$ , con metodo di riduzione del Cadmio, Ferro (in  $\mu\text{g}/\text{l}$ , con metodo metodo TPTZ), Manganese (in  $\mu\text{g}/\text{l}$ , con metodo PAN), tutte eseguite con strumento fotometrico, ed infine i Cloruri ( $\text{Cl}$  in mg/l), misurati con test per titolazione con nitrato mercurico.

Il grado di approssimazione dei fotometri è variabile per ogni elemento, comunque il "range" è sempre ampiamente compatibile con la finalità di conoscenza qualitativa generale che ci si propone.

Oltre ai parametri di legge per la definizione della classe di qualità delle

acque sotterranee si è misurata con fotometro anche la durezza per verificare

l'usabilità di queste acque per scopi industriali.

La tabella 2.1 riporta l'esito ottenuto dalle analisi dei due campioni raccolti

il 12 novembre 2005, nei pozzi di località S. Cosma.

Tabella 2.1

Cam	T°	pH	EC [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Cloruri [mg/l]	$\text{SO}_4$ [mg/l]	$\text{NH}_3$ [mg/l]	Nitrati [mg/l]	Fe [ $\mu\text{g}/\text{l}$ ]	Mn. [ $\mu\text{g}/\text{l}$ ]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
1	17,5	7,89	512	11	31	0,00	3,1	30	41	65,2	11,06
2	17,6	7,74	1532	62	136	0,00	12,8	84	107	fs	>53

Il pozzo di campione 1 era perfettamente normale, utilizzato con una certa assiduità dai proprietari, il pozzo del campione 2, a largo diametro con imboccatura aperta, era invece inutilizzato da tempo ed inoltre erano in corso lavori di ristrutturazione dell'edificio ed il cantiere aveva accumulato, in sua prossimità, detriti e materiali edilizi di ogni genere. A questo fatto può essere imputato l'alto valore di conducibilità ed i "fuori scala" di Ca ed Mg. I valori di riferimento più attendibili appaiono quindi quelli del campione 1, valori tutti interni alla classe 2 della tabella 20 dell'allegato 1 del DL 152/99. D'altro canto la campagna di rilevazione della qualità della falda freatica dei comuni dell'interland bolognese ha fornito per i pozzi limitrofi all'area in esame sempre valori compresi nella classe 2 della citata tabella.

### **1.3 PIANO DELLE INDAGINI**

Nella formulazione del <Piano di Indagine> si è tenuto conto, naturalmente, delle conoscenze accumulate nella fase di caratterizzazione preliminare, che ha riguardato soprattutto i sedimenti insaturi fino alla zona della frangia capillare.

Si sono quindi impostate le analisi necessarie ad ultimare la delimitazione delle zone contaminate nell'insaturo, a caratterizzare le acque sotterranee ed a definire caratteristiche tessiturali, fisiche e parametri idrodinamici dell'acquifero.

Inoltre si sono eseguite le consuete operazioni di bonifica dei serbatoi di carburante rinvenuti presso i due capannoni e in corrispondenza dell'ingresso da via Galliera.

### **1.3.1 Insaturo, modalità di indagine e campionamento**

La caratterizzazione preliminare della componente suolo e sottosuolo insaturo nell'area di ex Suprema è stata eseguita in successive fasi: un primo campionamento eseguito in trincea, un secondo campionamento eseguito su carote estratte da 14 sondaggi tipo "Geoprobe", un terzo campionamento, eseguito sempre su carote ottenute con il medesimo metodo, per 10 nuovi punti di controllo, un quarto campionamento, successivo alla conferenza dei servizi del 24/01/2007, con altri quattro sondaggi tipo "Geoprobe" e cinque prelievi con carotiere in trincee ottenute dallo scavatore. In totale si sono caratterizzati i terreni insaturi in 10 trincee e 28 sondaggi (65 campioni considerando anche l'estensione verticale del controllo effettuato), la localizzazione dei campionamenti è riportata in figura 3.1 e in tavola 1.

Con la campagna di caratterizzazione preliminare si sono aperte 5 trincee, profonde non oltre 2 metri, con piccolo scavatore nella zona verde e nei piazzali posti a nord dei capannoni, finalizzati al campionamento diretto, e due scavi in corrispondenza delle cisterne e serbatoi per controllarne lo "stato" e l'eventuale presenza di perdite.

Il campionamento è stato effettuato prelevando circa 300 grammi di sedimento con una spatola di legno "a perdere", immediatamente dopo l'esecuzione dello scavo, oltre 10 cm sotto la superficie laterale della trincea.

Il campione è stato immediatamente inserito in un barattolo di vetro a chiusura ermetica e conservato in ghiaccia portatile, per non perdere completamente l'eventuale presenza di volatili (VOC). La profondità di prelievo dei campioni è stata regolata sulla tessitura del sedimento, si sono scelti i limi argillosi dello strato A, oppure, ove mancava (area verde), dello strato B. Si sono raccolti i sedimenti in un intervallo verticale di circa 60 cm, immediatamente



sotto il contatto con lo strato R, con l'intento di intercettare le sostanze eventualmente percolate dalla superficie, o dalla rete di collettamento interna.

Solo in un caso si è campionato anche il materiale di riporto più superficiale (trincea 2, campione 2) per verificare la possibile diffusione orizzontale immediatamente sopra lo strato limoso meno permeabile.

Il rinvenimento di contaminazione da composti organici volatili (VOC) (cfr. tab. 3.1) ha costretto ad un approfondimento d'indagine, che si è eseguito nei giorni seguenti. Nel prelievo dei campioni si sono però seguite le modalità dettate dall'allegato 2 al D.M. 471/99, che tra l'altro impone un carotaggio con <..metodi di penetrazione a secco senza fluido di perforazione, usando un carotiere di diametro idoneo a prelevare campioni indisturbati ed evitando fenomeni di surriscaldamento>.

Pertanto si è proceduto con:

- (a) sondaggi a percussione (direct – push, tipo Geoprobe) per ridurre al minimo il surriscaldamento dell'attrezzo di scavo (molto alto nei sondaggi a rotazione quando devono essere eseguiti senza l'impiego di fluidi di perforazione) che allontanerebbe o ridurrebbe le concentrazioni dei volatili;
- (b) impiego di fustella di plastica trasparente che consente l'ispezione visiva dell'intera carota prelevata, pur minimizzando i contatti con l'atmosfera anche per la chiusura alle due estremità con appositi tappi;
- (c) impiego di sub-campionatore costituito da una siringa opportunamente preparata per contenere un'aliquota di sedimento prelevandola direttamente dalla carota di sondaggio. Una volta visionata l'intera carota e stabilito l'intervallo litologico di campionamento, si taglia la fustella di plastica e si inserisce la siringa nella posizione voluta, prelevando un'aliquota leggermente maggiore di 6 cm<sup>3</sup>;

(d) inserimento dell'aliquota di sedimento prelevato con il sub campionatore (c) direttamente in "vial" preventivamente preparato con metanolo;

(e) a carota aperta, prelievo anche di circa 250 g di sedimento attorno al punto di prelievo con sub-campionatore, in contenitore di vetro a chiusura ermetica;

(f) tutti i campioni raccolti sono stati collocati in cella refrigerata portatile, e successivamente in frigorifero fino all'avvio al laboratorio. Questi campioni sono stati utilizzati per analizzare elementi sia volatili, sia metallici;

(g) a carota aperta, prelievo anche di alcuni campioni di sedimento in sacchetti di plastica, per effettuare analisi di laboratorio (granulometria, composizione, limiti Atterberg).

Il criterio con cui si è proceduto all'ubicazione dei punti di campionamento è combinato tra il "campionamento stratificato (stratified sampling, EPA 2000)", ed il "soggettivo basato sul modello concettuale preliminare (judgemental sampling, EPA 2000)". Entrambe derivati dagli esiti del campionamento casuale semplice (simple random sampling, EPA 2000) effettuato nella prima fase, dallo studio di inquadramento e le conoscenze di contesto raccolte dalla letteratura locale.

Si è infatti scelto di localizzare i punti di campionamento in funzione sia degli esiti della prima fase di caratterizzazione, sia della localizzazione delle lavorazioni più critiche (Collaudo e verniciatura), sia delle zone di possibile stoccaggio dei materiali utili per le lavorazioni (magazzino), figure 1.2 e 1.3.

In ogni punto di campionamento si sono prelevati i sedimenti verticalmente in funzione delle tessiture, attorno al primo metro (strato A, limoso e limoso argilloso), tra 1 e 2,30 metri (strato B), ed oltre i 2,30 metri di profondità, (strato C, limoso sabbioso, o sabbioso). Solo in alcuni casi si sono prelevati campioni nella frangia capillare (strato D), vedi figure in appendice che riportano

la stratigrafia di dettaglio del sito.

Infine, si è deciso di completare la caratterizzazione dell'insaturo prelevando, con le medesime modalità indicate sopra (punti "a" – "f"), 9 nuovi punti di prelievo. Di questi, 8 campioni distribuiti entro l'area del capannone meridionale, precedentemente indagata con una bassa densità di punti di controllo, 1 nuovo sondaggio all'interno del "magazzino". Sui nuovi campioni prelevati con la numerazione progressiva da S15 ad S23 ed il consueto suffisso "A, B, C" relativo allo strato di prelievo, sono localizzati sempre in figura 3.1 ed in tavola 1. Per questi campioni la ricerca dei contaminanti si è concentrata solamente sugli alifatici clorurati cancerogeni.

La sigla SS1, che contraddistingue l'ultimo punto di controllo interno al capannone meridionale, indica un prelievo eseguito sempre con modalità "geoprobe", ma con punta chiusa e inserimento del carotiere solo al momento del prelievo.

A seguito della richiesta di nuove informazioni avanzata nella conferenza dei servizi del 24/01/2007 è stata programmata una nuova campagna di campionamento con diverse finalità.

Per la caratterizzazione della contaminazione da solventi clorurati nell'area verde, verificare l'eventuale dispersione di olii nel terreno in corrispondenza del "fornetto di combustione" (vedi § 1), e del punto di distribuzione carburanti per autovetture (vedi § 1, e foto 1) si sono eseguiti altri 3 sondaggi geoprobe con punta apribile alla quota voluta. Questi punti di campionamento sono indicati in figura 3.1 e tavola 1 rispettivamente con la sigla SS2, SS3, SS6. Il prelievo dei campioni è avvenuto con le medesime modalità indicate sopra ai punti da "b" ad "f". Su questi campioni si sono ricercati gli alifatici clorurati cancerogeni e no, idrocarburi <C12, idrocarburi >C12 .

Per completare la caratterizzazione dell'insaturo e definire il limite di contaminazione in particolare verso ovest si sono prelevati

campioni di terreno insaturo ad una profondità di 2,30 metri (strato C) con campionatore tipo geoprobe (diametro 5 cm, altezza 45 cm, dotato di fustella trasparente in materiale atossico al suo interno), infisso a pressione dal fondo di trincee ottenute con scavatore. La procedura di prelievo del campione dalla fustella trasparente è la medesima vista sopra dal punto “c” al punto “f”. I luoghi di prelievo sono riportati in figura 3.1 e tavola 1 con la sigla Tr. In questi campioni si sono ricercati gli alifatici clorurati cancerogeni. Per rilevare l’eventuale risalita di COV clorurati dalla falda nell’insaturo sovrastante ad est del maggiore focolaio di contaminazione riscontrato, in via Galliera durante lo scavo del piezometro PZ9 (localizzato in figura 3.1), è stato raccolto un campione di insaturo a -3,20 m dal p.c. (strato C), cioè vicino alla posizione di massima profondità utile sopra la frangia capillare (saturazione <70%) nella stagione di piena del freatico (al momento del campionamento la tavola d’acqua era posta sotto i -3,90 metri dal p.c.). Il campione è stato prelevato con la medesima attrezzatura standard direct – push Geoprobe, e le medesime modalità citate sopra, per verificare l’eventuale presenza di alifatici clorurati cancerogeni.

Per i 4 serbatoi di carburante per riscaldamento dei capannoni si sono prelevati tre campioni di insaturo alla profondità di circa 3 metri, su questi campioni si è richiesta BTEX, analisi degli idrocarburi C<12 e C>12 con speciazione, utilizzando TPHCWG (Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group). I punti di campionamento sono localizzati in tavola 1 con le sigle “*cisterna est*”, “*cisterna ovest b*” e “*cisterna ovest c*”.

Il campione *cisterna est* (capannone settentrionale) è stato raccolto al fondo scavo una volta estratte le due cisterne di cemento già svuotate e bonificate. I due serbatoi, anche se vetusti, erano intatti e non c’erano state fughe di carburante, escludendo qualche sversamento avvenuto con probabilità durante le operazioni di

riempimento dei serbatoi stessi. Le modeste quantità di terreni sporchi di carburante ormai solido, rinvenuti durante lo scavo per l'estrazione delle cisterne, sono stati stoccati sul piazzale asfaltato su un telo in PVC assieme a mattoni e cemento del tombino sporchi di olio, e ricoperti con lo stesso telo, in attesa di essere smaltiti.

I due campioni “*cisterna ovest b*” e “*cisterna ovest c*” sono stati raccolti rispettivamente nel sondaggio PZ10 alla profondità di 2,50 metri, e nelle sabbie di fondo delle cisterne a circa 3,10 metri, (fig. 1.1 e tav. 1) nei serbatoi del capannone meridionale. Queste cisterne in metallo, erano state sistemate in una grande fossa profonda poco più di 3 metri, sul cui fondo era stata realizzata una platea in cls, probabilmente la stessa struttura a cui fa capo l'attrezzatura della vicinissima “*pesa*” per camion. Lo scavo originario, una volta realizzate le strutture portanti e le opere necessarie, è stato colmato con sabbietta fine e chiuso da sottofondo ed asfaltatura così da essere percorribile anche da mezzi pesanti. All'atto della dismissione dell'attività produttiva (circa 6 anni fa) i serbatoi sono stati svuotati del carburante residuo (forse non completamente), ma non bonificati. Quando si è proceduto con le operazioni di bonifica per l'estrazione, sul fondo dei serbatoi è risultata presente una discreta quantità di acqua e carburante (circa 40 centimetri). Durante lo scavo per estrarre i serbatoi la sabbietta è risultata inquinata, ed i serbatoi corrosi ed in più punti forati.

I terreni di riporto estratti (circa 9 mc di sabbietta) sono stati accumulati a parte e campionati direttamente separando la parte proveniente dalla superficie (meno inquinata) da quella profonda (più contaminata). I campioni raccolti hanno dimostrato che la sabbia fine estratta, è smaltibile solo con mezzi speciali.

### **1.3.2 Saturo, modalità di esecuzione dei sondaggi**

Per la conoscenza delle caratteristiche del sottosuolo saturo si sono eseguite 5 penetrometrie statiche con punta elettrica strumentata

per il rilevamento delle pressioni interstiziali (CPTU), e 5 sondaggi a carotaggio continuo. La localizzazione delle terebrazioni è riportata in figura 3.2, in appendice i diagrammi relativi alle CPTU, la sintesi grafica della stratigrafia rilevata dalle carote di sondaggio e la posizione dei campioni raccolti per le analisi granulometriche e della sostanza organica, rinvenuta nei sedimenti attraversati.

La profondità di esecuzione delle indagini ha tenuto conto della distribuzione stratigrafica regionale degli acquiferi e degli acquitardi, come risulta dalla ricostruzione paleogeografia (§ 1), e dal contesto geologico riportato nel § 2. In particolare le CPTU ed i sondaggi hanno attraversato interamente AQ1 porzione insatura e satura, e confermato la costante presenza di sedimenti a tessitura fine RD1 tra circa 20 e 23,9 metri dal piano campagna. Il sondaggio PZ4, proprio perché localizzato nella posizione in cui si aveva certezza di assenza d'inquinamento della matrice insatura, è stato utilizzato anche per scopi esplorativi spingendolo fino a 26,4 metri di profondità cioè ben dentro l'acquitardo RD1.

In tutti gli altri sondaggi la profondità massima di scavo si è mantenuta attorno ai 20 - 22 metri, cioè fino al rinvenimento dell'acquitardo RD1.

Nei fori di sondaggio sono stati inseriti 4 piezometri disposti come in figura 3.2, in modo cioè da avere due piezometri a monte e due a valle nel senso di deflusso della falda. Si è ritenuto indispensabile approntare una barriera idrogeologica che sarà utile soprattutto nelle fasi di bonifica, sulla base dei risultati delle prove CPTU, della stratigrafia emersa dai sondaggi dei 4 piezometri e delle analisi granulometriche. Per questo motivo due piezometri sono stati realizzati per fungere anche da pozzi della barriera, ed inoltre si sono scavati altri 6 pozzi localizzati in figura 3.2.

Nell'eseguire i sondaggi per piezometri si è avuto cura di iniziare con quelli disposti nell'area certamente non contaminata, e cioè secondo il seguente ordine temporale: PZ4, PZ2, PZ1A, PZ1B.

L'ordine esecutivo dei pozzi ha minore rilevanza poiché l'eventuale trascinarsi in profondità di sedimenti contaminati sarebbe superato in breve tempo con il funzionamento del pozzo stesso.

Nell'esecuzione di tutti gli scavi (piezometri e pozzi) si è avuta cura di:

a) al fine di evitare che la contaminazione dei sedimenti insaturi venisse portata in profondità dalla strumentazione di perforazione, in tutti i sondaggi si è eseguito un preforo, profondo fino alla frangia capillare (mediamente 3,50 metri dal p.c.), di diametro tale da consentire le manovre del tubo carotiere e del relativo rivestimento (foto 3). Le pareti del preforo sono sostenute da specifica tubazione in materiale atossico; per evitare la contaminazione tra un sondaggio e l'altro, dovuta all'attrezzatura, i tubi di rivestimento, le aste, il carotiere e le corone sono state sempre accuratamente lavate con idropulitrice alla fine di ogni terebrazione;

b) per evitare che grassi ed olii minerali potessero contaminare i fori di sondaggio, nell'esecuzione dei soli piezometri (PZ1A, PZ1B, PZ2, PZ4) le filettature dei tubi di rivestimento sono state lubrificate con olii vegetali certamente biodegradabili; d) si è vietato l'impiego di bentonite o polimeri in tutti i fori di sondaggio (sia dei piezometri, sia dei pozzi) per evitare contaminazioni dell'acquifero, e la diminuzione di conducibilità, anche temporanea. Per gli avanzamenti dei tubi di rivestimento, si è impiegata solamente acqua tratta direttamente dall'acquedotto, evitando l'impiego di botti e cisterne di dubbia pulizia;

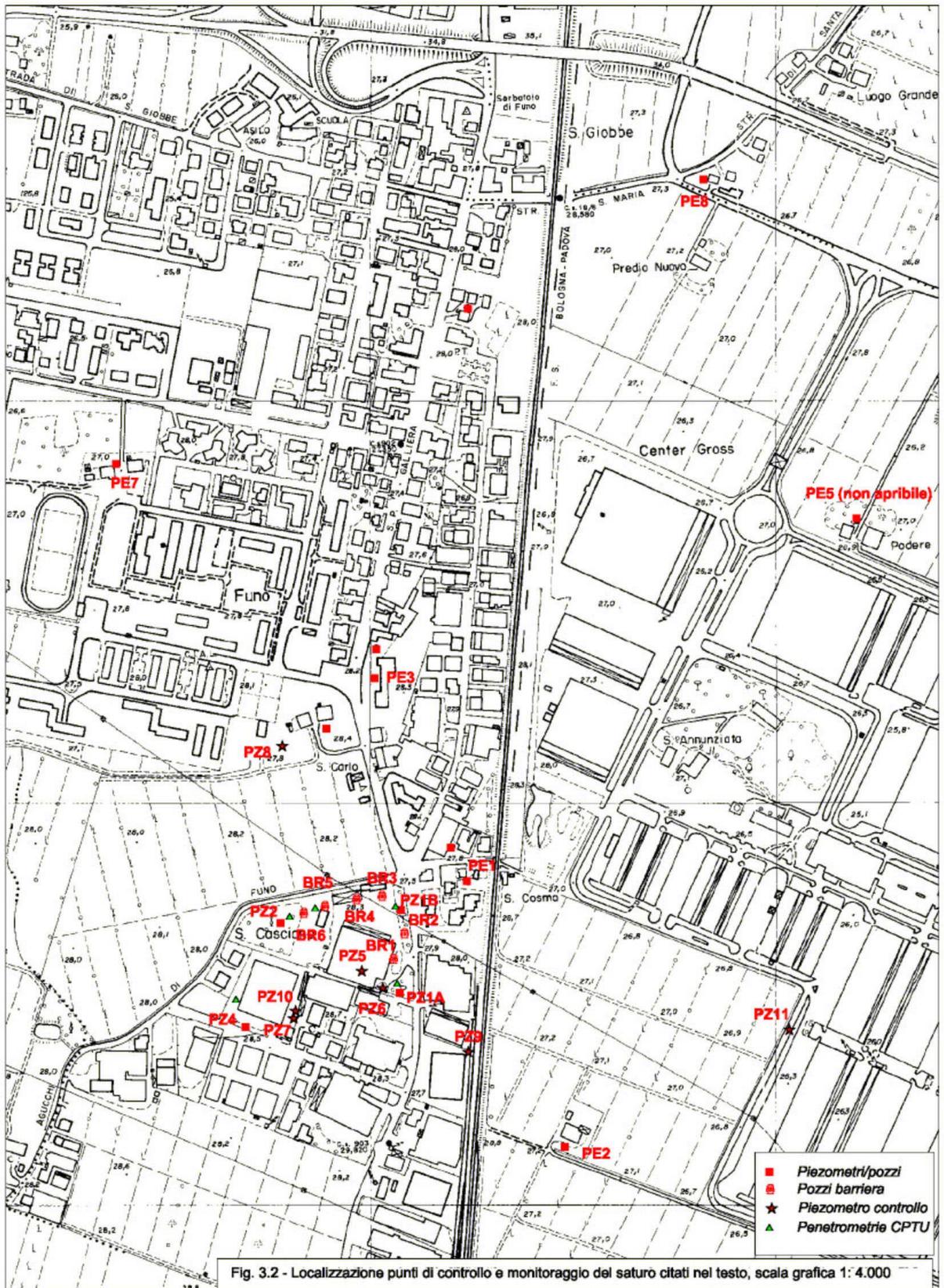
c) tutte le carote dei sondaggi a carotaggio continuo sono state divise in due porzioni circa eguali, e conservate in distinte casse catalogatrici, una metà è stata utilizzata per studio e per prelevare i campioni, l'altra metà è conservata integra per archivio.

I piezometri ed i pozzi della barriera idrogeologica sono stati realizzati con particolare attenzione, si è avuto cura che:

- a) i tubi impiegati fossero sempre di materiali atossici;
- b) al fondo venisse ricavata una tasca per la raccolta dei sedimenti penetrati dal drenaggio e dal filtro, o comunque di manovra per i campionamenti, contubazione cieca alta 1,5 o 2 metri, secondo i casi;
- c) i filtri fossero adeguati alla tessitura dei sedimenti attraversati, in genere si è utilizzato filtro 0,5 mm. Il piezometro PZ2 è stato realizzato impermeabilizzando il foro (tubo cieco, e cementazione con bentonite) tra le quote -10 e -12,50 metri dal p.c.;
- d) lo spazio tra tubo e parete del foro fosse di circa 2 cm, anche per i pozzi di 6", i dreni sono stati realizzati con granino siliceo da 1,5 – 3 mm depolverizzato e selezionato;
- e) i centratori dei tubi piezometrici, sono stati realizzati in cantiere con materiale atossico;
- f) la bentonite utilizzata per le impermeabilizzazioni e cementazioni è la LAVIOSTOP8 prodotta dalla Laviosa S.p.a, che è costituita da montmorillonite al 99%, quarzo 1%, e feldspati in tracce.

Durante l'esecuzione dei sondaggi per i piezometri sono state fatte alcune prove di permeabilità in foro, utilizzando acqua dell'acquedotto, al fine di ottenere informazioni relative alla conducibilità, in particolare negli intervalli a tessitura fine e nell'acquitrardo RD1, informazioni per altro non ottenibili altrimenti in situ, cioè nell'ammasso roccioso in posto. A seguito della richiesta di nuove informazioni avanzata nella conferenza dei servizi del 24/01/2007 sono stati programmati alcuni piezometri da realizzare nell'area esterna a Suprema, finalizzati a verificare la stratigrafia e la geometria del plume formato dalla contaminazione da solventi clorurati, ed altri interni con vari obiettivi di controllo.

La figura 3.3 riporta la localizzazione dei pozzi freatici (profond



circa 10 metri), di uso domestico non potabile noti ed ancora utilizzati, e dei nuovi piezometri (profondi oltre 20 metri) esterni al sito contaminato. Per questi ultimi si è, naturalmente, presupposto che l'insaturo non fosse contaminato.



La realizzazione del piezometro PZ8, di 2 pollici di diametro, ha seguito la medesima procedura vista sopra, con l'esclusione dell'inserimento del tubo a largo diametro a sostegno del preforo. I piezometri PZ9 e PZ11 sono stati invece realizzati con metodo geoprobe direct – push, inserendo direttamente nel foro di prova i

tubi piezometrici da 2 pollici, prima di togliere i rivestimenti.

I piezometri interni al sito inquinato, inseriti fino al tetto del freatico per il controllo della contaminazione da olii (PZ6, PZ7 e PZ10); oppure fino a 10 – 12 metri, per campionamento dell'acqua sotterranea al contatto con lo strato "E" (PZ5), sono stati realizzati: PZ6 e PZ10 con metodo geoprobe direct – push ed inserimento diretto del tubo piezometrico fessurato; PZ5 e PZ7 con perforazione di diametro 101 mm a carotaggio continuo, inserimento del tubo piezometrico fessurato e drenaggio.

### **1.3.3 Stratigrafia della matrice solida satura ed insatura (suolo e AQ1)**

L'insieme delle indagini geognostiche interne ed esterne al sito in studio, hanno consentito di ricostruire la stratigrafia del sottosuolo e la paleogeografia. Le tavole in appendice riportano graficamente l'interpretazione stratigrafica di dettaglio dei primi 4 metri di sottosuolo, gli esiti dell'analisi di 8 sondaggi, con prelievo di carote in continuo, spinti ad oltre 20 metri di profondità e delle penetrometrie CPTU.

La scansione stratigrafico tessiturale e la ricostruzione paleogeografica ha motivato la presenza di una netta divisione delle tessiture sabbiose tra la porzione orientale dell'area di sedime di Suprema (PZ1A, PZ1B), e la porzione occidentale (PZ2 e PZ4).

Nel testo la successione stratigrafica è schematicamente richiamata con le seguenti lettere maiuscole:

**Strato R** = riporto di materiali di demolizione edilizia e terre;

- spessore variabile 0,0 ÷ 1,1 m;
- materiali edili relativamente poco macinati;
- costituisce un rilevato formato forse per eliminare inconvenienti legati ai vicini canali di scolo, risalita falde ecc., l'area del piazzale e capannoni è più alta rispetto all'area verde di circa 40 centimetri.

**Strato A** = limi e argille verde cupo e scure, a volte con scheletro sabbioso verso il basso, possono essere rappresentate sabbie e sporadici ciottoli;

- spessore 0 ÷ 1,30 m;
- tessitura piuttosto argillosa, o argilloso limosa, scarsa umidità, omogeneo, presenza di tracce di impianti radicali, sostanze carboniose a volte mal decomposte, ambiente anche anossico, in alternativa cenni di pedogenesi;
- contatto di letto in genere graduale, a volte contatto erosivo (sabbie).

**Strato B** = Limi a volte sabbiosi, fino a sabbie fini limose grigie, a volte variegate;

- spessore 0,5 ÷ 2,2 m;
- tessitura limosa e limoso sabbiosa, in subordine sabbie fini limose, gradazione normale spesso presente, spesso si nota un discreto grado di pedogenesi che rende leggermente variegati i limi, l'alterazione pedogenetica può condurre alla formazione di una componente argillosa;
- contatto di letto dovuto alla stratificazione a volte incerta.

**Strato C** = sabbie fini più o meno limose, grigie, insature;

- spessore 0,8 ÷ 1,5 m, la sua profondità dal piano campagna è circa 3,60 m, a quote maggiori il grado di umidità, nei periodi di piena del freatico, diviene superiore a 80%;
- tessitura prevalente sabbie fini e, più raramente medio fini, alternate a livelli e strati di limi anche sabbiosi, a volte pedogenizzati;
- contatto di letto non reale perché dovuto esclusivamente alla presenza della frangia capillare, in realtà la litologia prosegue nello strato D, lo strato C individua quindi solamente sabbie insature, più o meno limose.

**Strato D** = sabbie prevalenti, da fini a grossolane, sature, acquifero freatico;

- spessore variabile, secondo la posizione, compreso tra 0 e 7 metri. Potenza minore ad est del capannone settentrionale, fino alla sua scomparsa immediatamente prima dei binari della ferrovia. Anche ad ovest del capannone settentrionale l'unità sabbiosa tende a chiudersi, circa in corrispondenza di PZ4 e PZ2. Come già sottolineato più volte si tratta infatti del corpo sabbioso di un alveo a canali intrecciati.

- Tessitura prevalente sabbiosa, da fine a media, sono presenti anche sabbie grossolane nella porzione più bassa dell'insieme di 2 sequenze che formano lo spessore più francamente canalizzato. Le sabbie sono passanti a limi sabbiosi e più raramente limi, in strati di 0,4 ÷ 0,6 m, ad oriente anche banchi di oltre 1,5 metri. Le sequenze sono positive, a gradazione normale, verso la parte alta si alternano livelli limosi di spessore da centimetrico a decimetrico, dotati di probabile continuità laterale decametrica, che, verso occidente divengono intervalli limosi di potenza superiore al metro. Livelli con forte addensamento di materiali vegetali in vario stato di conservazione, sono distribuiti a volte nella porzione grossolana, più frequentemente nei sedimenti limosi. Il materiale organico è stato rinvenuto con maggiore frequenza nei sedimenti della porzione occidentale dell'area, ad oriente però si sono rinvenuti maggiori spessori e frammenti di lignite di oltre 3 cm anche entro le sabbie grossolane;

- contatto di letto, quando visibile nelle carote, è erosivo e in un caso contrassegnato dalla presenza di frammenti di mattoni, apparentemente di età tardo romana o alto medioevale (PZ1B a 9,50 metri di profondità).

**Strato E** = limi prevalenti, con argille più o meno limose, sabbie presenti ma nettamente subordinate.

- spessore variabile, secondo la posizione, compreso tra 3 e 7 metri, le potenze maggiori si hanno verso nord;

- Tessitura prevalente limosa in subordine limoso – sabbiosa,

o limoso – argillosa, sono presenti livelli di sabbie fini, la stratificazione è medio sottile, sono presenti frequenti intervalli ricchi di sostanza organica di origine vegetale, in particolare nel lato ovest (PZ2, PZ4). Nel PZ1A, in corrispondenza dell'intervallo -12, -14 m dal p.c., la stratigrafia consente di riconoscere lo strato E per la presenza di una stratificazione più sottile (ma le tessiture sono qui granulari) e di uno strato sabbioso (50 cm) a gradazione inversa. I numerosi campioni persi della stratigrafia del sondaggio PZ1A indicano certamente presenza di sedimenti granulari sciolti continui, in genere infatti essi si sfilano dal tubo carotiere durante l'estrazione, contrariamente ai depositi a tessitura fine che restano imprigionati per coesione alle pareti. Persino l'impiego del "cestello" non ha consentito un buon recupero per il PZ1A. Il sondaggio PZ9 comprova la ricostruzione fatta: lo "strato E" è qui compreso tra -13,40 e -14,70, quindi ridotto come spessore, spostato come quota e con componente fine;

- Contatto di tetto determinato da sequenze negative di modesta potenza, contatto di letto graduale. L'intervallo E costituisce depositi di intercanale dotati di scarsa continuità laterale sia per la componente granulare sia per quella più fine, come dimostra la modesta correlabilità tra i vari punti di controllo sia per le quote, sia per le tessiture (cfr. PZ1A con PZ9, con PZ1B e con PZ8 o PZ2);

**Strato F** = sabbie prevalenti da medio fini a grossolane, sature, acquifero parzialmente confinato (fig. 3.3);

- spessore compreso tra 2 e 8 metri, la geometria è quella dei canali intrecciati, o dei canali rettilinei a barre laterali. Si tratta di depositi canalizzati con direzione della corrente, ricostruita solo con l'analisi territoriale, da sud verso nord. Quindi come per lo strato D si hanno diminuzioni degli spessori lateralmente (verso est e verso ovest) alla disposizione del canale (fig. 2.2). Anche la tessitura dei sedimenti risente delle condizioni di deposito.

All'interno dell'area di Suprema solamente a sud ovest la potenza diminuisce drasticamente fino a 3 metri, in corrispondenza si ha anche una netta diminuzione delle tessiture. Gli spessori si mantengono relativamente regolari nella porzione centrale e occidentale del sito contaminato;

- tessitura sabbiosa, variabile nell'area centrale e orientale sabbie da medie a grossolane con passate di ciottoletti, matrice in quantità modesta, nell'area occidentale sabbie da medio fini a fini a volte con abbondante matrice limosa, a sud ovest (PZ4) sabbie fini limose. In tutta l'area occidentale (limite della zona d'alveo) sono frequenti i livelli ricchi di sostanza organica in vario stato di conservazione;

- Contatto di tetto graduale, di letto per lo più erosivo, nel PZ4 riscontrate sequenze negative di modesta potenza.

**Strato G** = argille limose ed in subordine limi più o meno argillosi, possono essere rappresentati episodi di sabbie fini a volte con contatti gradualmente al letto (piccoli lobi), si tratta dell'acquitrando RD1, sempre presente a sud e a nord di Suprema per un'ampiezza di oltre 3 chilometri, ma distribuito certamente su una più ampia superficie.

- spessore non indagato localmente per timore di compromettere la sua funzione di protezione dell'acquifero sottostante, la sua variazione è compresa tra 7 e 12 metri, secondo una sezione sud – nord lunga circa 3 km con al centro l'area di Suprema. Lo spessore riscontrato in PZ4 (tra circa - 21 e -26 metri) non è completo, le arenarie di letto sono con probabilità uno strato poco potente intercalato nei limi ed argille;

- tessitura per lo più argillosa con strati limoso-argillosi, sporadici episodi sabbiosi di potenza modesta;

- Contatto di tetto netto ed erosivo o graduale, episodi con sabbie fini sequenze negative di modesta potenza riscontrate nel modesto spessore indagato con PZ4.

**Strato H** = sabbie fini con base strato sabbie medie. Si tratta di un unico strato parzialmente indagato a fondo sondaggio (PZ4) tra -25,80 e -26,30 metri di profondità. Con ogni probabilità si tratta di una intercalazione sabbiosa interna alle argille più o meno limose di RD1.

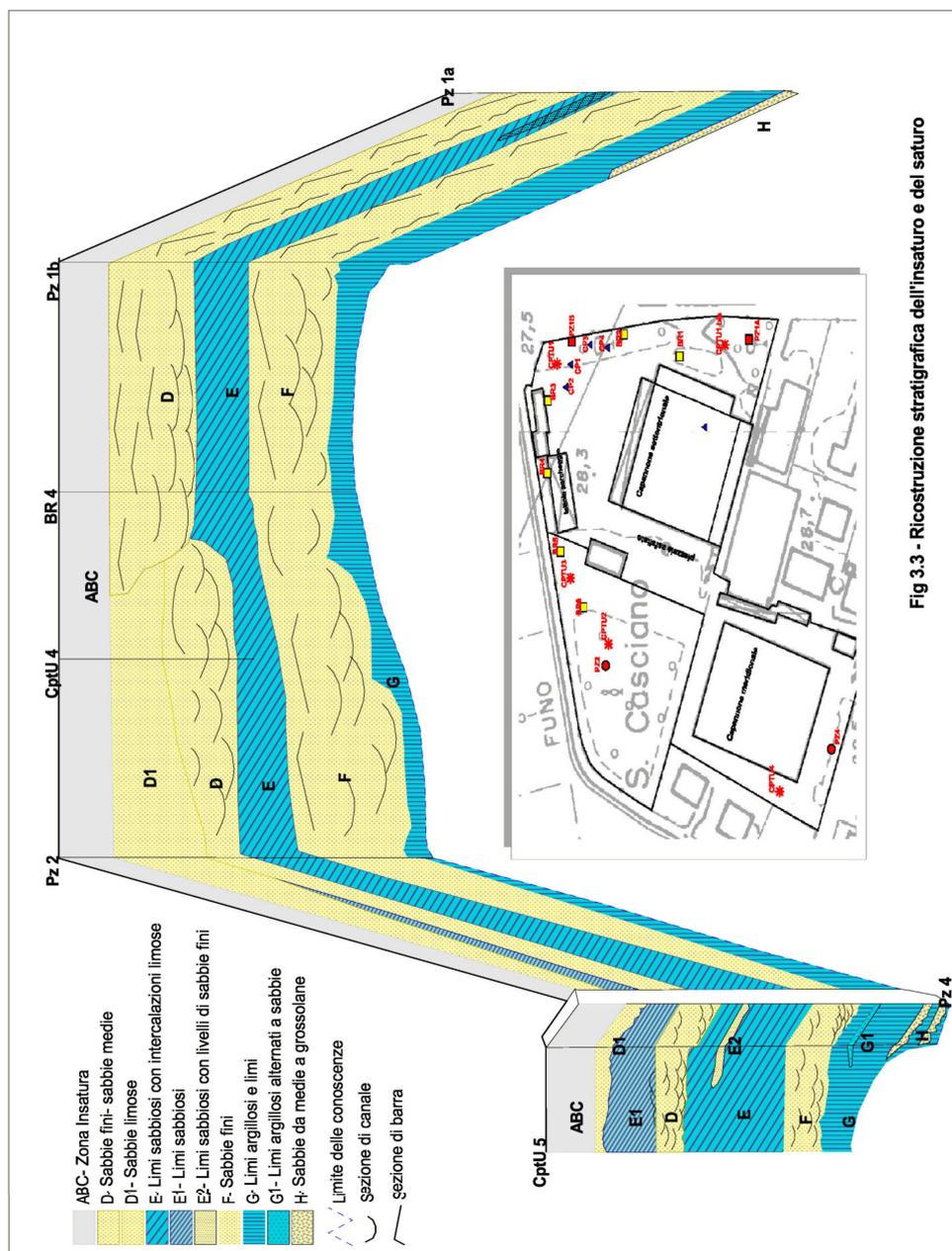


Fig 3.3 - Ricostruzione stratigrafica dell'insatura e del saturo

### **1.3.4 Parametri idrogeologici**

La falda freatica presenta un marcato dosso piezometrico in corrispondenza di Suprema (fig. 2.3), il senso di deflusso può variare tra la stagione di piena e la stagione di magra, almeno così risulta dall'analisi regionale condotta in ampio intorno di Funo e Castel Maggiore. Il rilevamento delle quote freatiche eseguito nel febbraio 2007 sui pozzi di un ampio intorno del sito in studio ha confermato il campo di moto, pur con quote relative assai più basse (fig. 2.4).

L'analisi locale dei 10 punti di controllo presenti (6 piezometri e 6 pozzi della barriera idrogeologica) consente di asserire che il deflusso interno al sito nella stagione di magra è verso est o est nordest per il lato di via Galliera, e circa verso nord per il lato di via Agucchi, con cadenti molto modeste. Nella stagione di piena per il lato Galliera il deflusso è verso nord-nordest.

La conoscenza dei parametri dell'acquifero è fondamentale per la comprensione della distribuzione della contaminazione in falda, e delle possibili variazioni del campo di moto locale quando sottoposto alle sollecitazioni impartite nelle varie fasi di bonifica, anche per la matrice solida insatura.

A questo scopo le 5 penetrometri e esplorative effettuate prima dei sondaggi sono state realizzate con punta elettrica strumentata per la misura della pressione interstiziale. Si sono, così, ottenute informazioni di ottima qualità sulla distribuzione verticale delle tessiture, e negli intervalli in cui la punta è stata arrestata per il tempo necessario a dissipare le sovrappressioni indotte nel sedimento dalla penetrazione stessa, si sono ottenute le misure per la stima della conducibilità idraulica orizzontale ( $k_0$ ). In appendice sono riportati i diagrammi semilogaritmici di dissipazione, la classificazione litologica ed i dati di calcolo.

Queste modalità di stima di  $k_0$  sono comunque riferite ad intervalli litologici di pochi centimetri ed avvengono in condizioni di intenso

disturbo del sedimento prodotto dal passaggio della punta e dallo spostamento dei granuli: la presenza anche solo di una debole componente limosa nella sabbia provoca la formazione di una leggera ma continua pellicola alla parete di contatto, che impermeabilizza i meati e può falsare l'esito della prova.

Nel corso dei sondaggi PZ2 e PZ1B sono state eseguite prove di permeabilità in foro tipo Lefranc sia a carico costante, sia a carico variabile.

Le prove sono state realizzate in particolare per stimare la conducibilità degli strati E e G, intervalli limosi e limoso argillosi, non altrimenti conoscibili. A causa delle diverse condizioni di svolgimento delle prove (con o senza corpo filtrante; presenza assenza di operatore) sono state utilizzate le seguenti equazioni che forniscono la conducibilità:

$$k_0 = \frac{\ln\left(2 \frac{l}{d}\right) \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)}{2\pi * tl} \quad [1]$$

$$k_0 = \frac{Q}{2Chr} \quad [2]$$

Q = portata immessa (portata costante)

h1 e h2 = altezza dei livelli d'acqua ai tempi iniziale e di misura

t = tempo di misura

C = coefficiente di forma,

r = raggio del foro di prova o del corpo filtrante

l = altezza corpo filtrante; d = diametro base del corpo filtrante (oppure diametro tubo)

**Sondaggio PZ2**, si sono eseguite una prova a carico costante, ed una a carico variabile; prima prova eseguita nello strato E tra -9,10 e -9,60 metri dal p.c;

diametro tubo 103 mm, diametro tasca 113 mm; altezza rivestimento dal p.c. 110 cm; quota acqua -250 cm; tempo prova 40 minuti; portata media per il mantenimento del carico costante 6,41 E-4 l/s.

Con la [2] si ottiene  $k_0 = 6,06 \text{ E-5 cm/s}$ .

Seconda prova eseguita nello strato G tra -21,10 e -21,60 metri dal p.c; diametro tasca 113 mm; altezza rivestimento dal p.c. 70 cm; tempo di prova 7.200 secondi;  $h_1 = 420 \text{ cm}$ ,  $h_2 = 403 \text{ cm}$  Con la [1] si ottiene  $k_0 = 3,96 \text{ E-8 cm/s}$ .

**Sondaggio PZ1B**, si sono eseguite due prove a carico variabile.

Prima prova eseguita nello strato E alla quota -10,50 metri dal p.c; diametro 128 mm; altezza dal p.c. 550 mm; tempo di prova 50.400 secondi;  $h_1 = 438 \text{ cm}$ ,  $h_2 = 329 \text{ cm}$ .

Con la [1] si ottiene  $2,85 \text{ E-7 cm/s}$ .

Seconda prova eseguita nello strato G alla quota -20,9 -21,30 dal p.c; diametro 128 mm, altezza rivestimento dal p.c. 200 mm, tempo di prova 63.000 secondi e 73.200 secondi;  $h_1 = 403 \text{ cm}$ ,  $h_2 = 284 \text{ cm}$ ,  $h_3 = 282 \text{ cm}$  con la [1] si ottiene  $k = 4,05 \text{ E-8 cm/s}$  e  $k = 3,48 \text{ E-8 cm/s}$ .

Lo strato G presenta conducibilità molto modesta dell'ordine di grandezza di  $5 \text{ E}10\text{-8 cm/s}$ . Lo strato E interposto tra i due strati granulari D ed F presenta conducibilità molto variabile verticalmente ma con probabilità dell'ordine di  $2 \text{ E}10\text{-5 cm/s}$ .

Gli strati porosi, sedi della falda freatica locale appaiono decisamente confinati al letto (strato G con  $k = 3 * 10\text{-8 cm/s}$ ), e relativamente separati al loro interno dalla presenza di uno strato a bassissima permeabilità (strato E) di potenza variabile e

probabilmente non continuo lateralmente. E' stata eseguita anche una prova di pompaggio finalizzata a definire parametri degli acquiferi attraversati e verificare le condizioni di interferenza sulla geometria della falda provocate dal sollevamento di acqua con le portate di progetto per le operazioni di bonifica del sito.

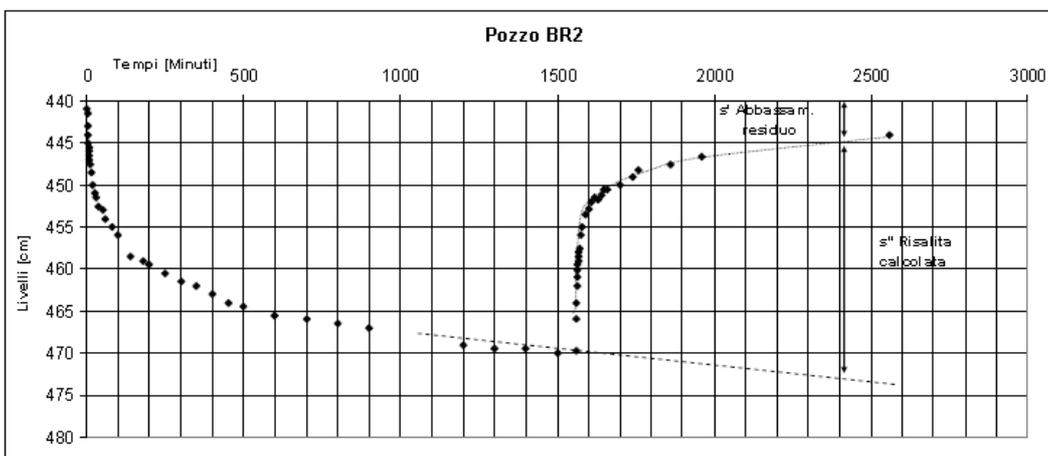
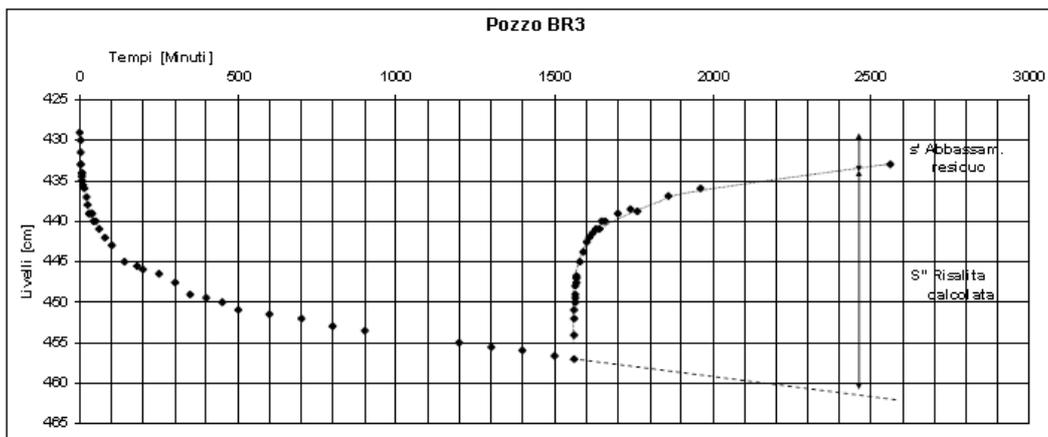
Il campo di prova è stato organizzato attorno al piezometro / pozzo PZ1B (punto di pompaggio) utilizzando i pozzi BR2 e BR3 come punti di controllo principale sull'intera colonna drenata, inoltre 4 piezometri da 1" ¼ (CP1, Cp2, Cp3, Cp4) disposti in direzione dei due punti di controllo scavati a 11 metri di profondità, cioè fin dentro lo strato E, per controllare l'influenza del pompaggio sullo strato D e verificarne i rapporti con lo strato F.

La prova di lunga durata è stata effettuata imponendo una portata costante di 5,4 l/s pari a 19,44 m<sup>3</sup>/ora per circa 30 ore consecutive. Durante il tempo della prova sono stati misurati i livelli del pozzo di pompaggio, dei 6 punti di controllo in parte con trasduttori di pressione, ed in parte manualmente, secondo una scala dei tempi logaritmica prestabilita.

La portata sollevata è stata misurata in continuo da un apparato ad induzione magnetica. Terminata la prova di pompaggio, arrestata la pompa, si sono misurati i livelli di risalita della falda.

I diagrammi di figura 3.4 riportano in via grafica l'insieme dei dati misurati per gli abbassamenti ( $s'$ ) e la successiva risalita ( $s''$ ), per i due pozzi della barriera idrogeologica di sicurezza, utilizzati in questa fase come punti di controllo BR2 e BR3.

Nella figura è indicata anche la retta che estrapola l'andamento dell'abbassamento nei tempi successivi all'arresto della pompa, su questa informazione estrapolata si fonda la misura della risalita calcolata utilizzata poi nel calcolo dei parametri idrodinamici.



*Figura 3.4 – Diagrammi abbassamenti risalita relativi ai due punti di controllo della prova di pompaggio a portata costante pari a 5,4 l/, nella figura è indicato l’abbassamento residuo e la risalita calcolata.*

Per la determinazione dei parametri idrodinamici sono stati utilizzati due diversi metodi di calcolo, validi per falde artesiane, ma, se gli abbassamenti restano inferiori al 25% dello spessore dell’acquifero, applicabili anche alle falde libere.

La trasmissività (T) si può ricavare dalla relazione di Jacob :

$$T = \frac{0,183Q}{c}$$

Ove “c” è la pendenza del tratto rettilineo della curva abbassamenti/log(t) durante un intero ciclo logaritmico.

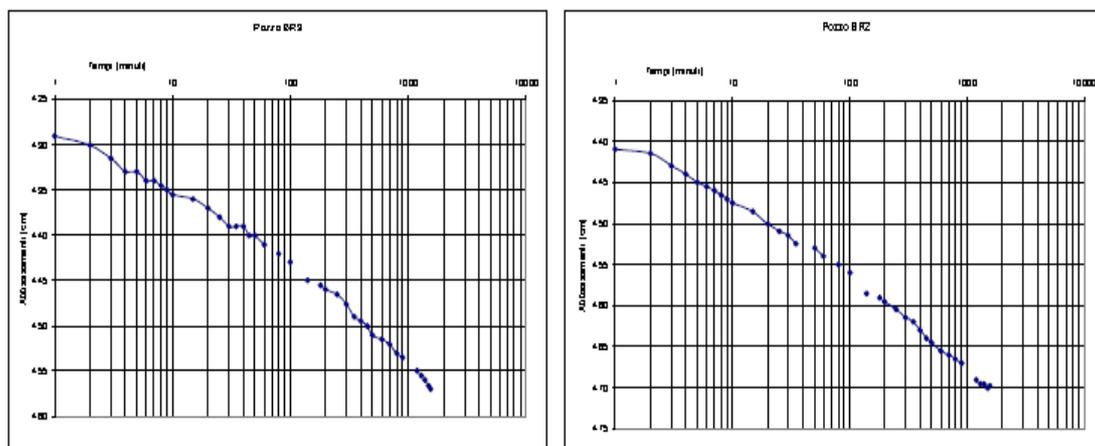


Fig. 3.5 - Diagrammi semilogaritmici del ciclo di abbassamento

I valori di “c” misurati in diversi tratti delle curve di figura 3.5, relative ai due pozzi di controllo, che interessano l’intera colonna (strati D, E, F), hanno fornito risultati:

Punto controllo	c	T [m <sup>2</sup> /s]
BR2	0,085	1,1*10 <sup>-2</sup>
BR2	0,11	9*10 <sup>-3</sup>
BR3	0,07	1,4*10 <sup>-2</sup>
BR3	0,12	9,8*10 <sup>-3</sup>

Valori analoghi si ottengono se si utilizza la classica relazione di Cooper- Jacob per falde freatiche  $T = 0,183/ \Delta(\text{abbassamenti}/Q)$ , ove l’abbassamento specifico (abbassamento/Q) viene considerato come differenza per ciclo logaritmico.

I valori dei parametri idrodinamici si possono ottenere anche costruendo il diagramma logaritmico tempi / abbassamenti di figura 3.6, e sovrapponendolo alla curva di Theis facendo slittare i diagrammi uno sull’altro, ad assi paralleli. La scelta di un qualsiasi punto ricavato nel tratto di sovrapposizione consente di ottenere i

valori di “u”,  $W(u)$ , dalla curva di Theis, ed abbassamento, e tempo dai dati della prova stessa.

Applicando la relazione  $T = [Q/4\pi(\text{abbassamento})] W(u)$  di ottiene la trasmissività. L’immagazzinamento “s” è funzione della trasmissività e della distanza dal pozzo di emungimento, ma in questa sede il parametro non ha rilevanza.

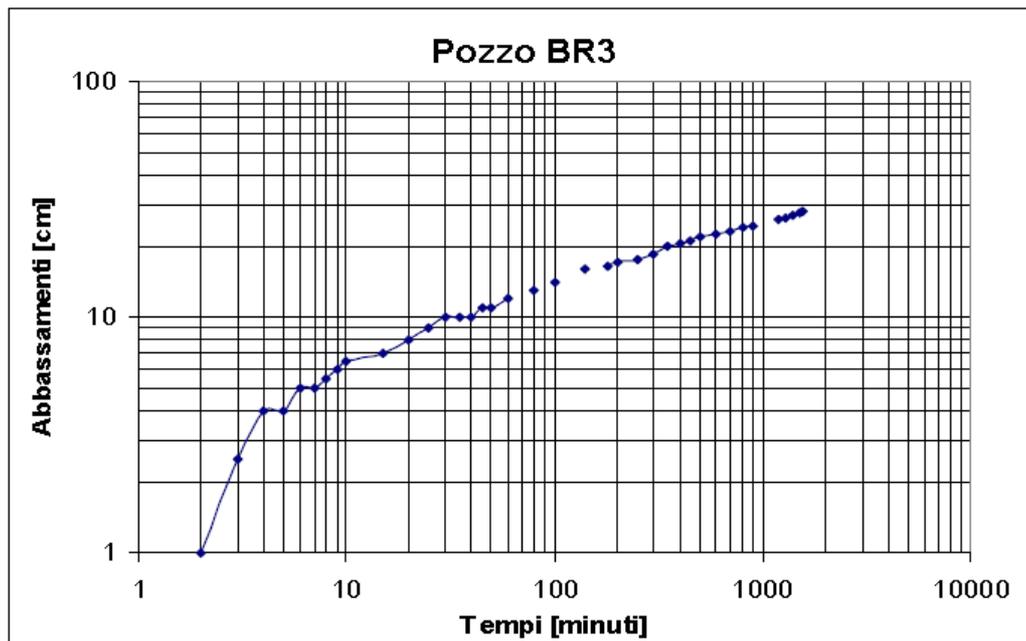


Fig. 3.6 – Diagramma logaritmico tempi/abbassamenti del pozzo BR3

Per il pozzo BR3 si è ottenuto

$$W(u) = 7,7 \quad u = 4402,76$$

$$Q = 19,44 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0054 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$T = 1,27 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Per il pozzo BR2

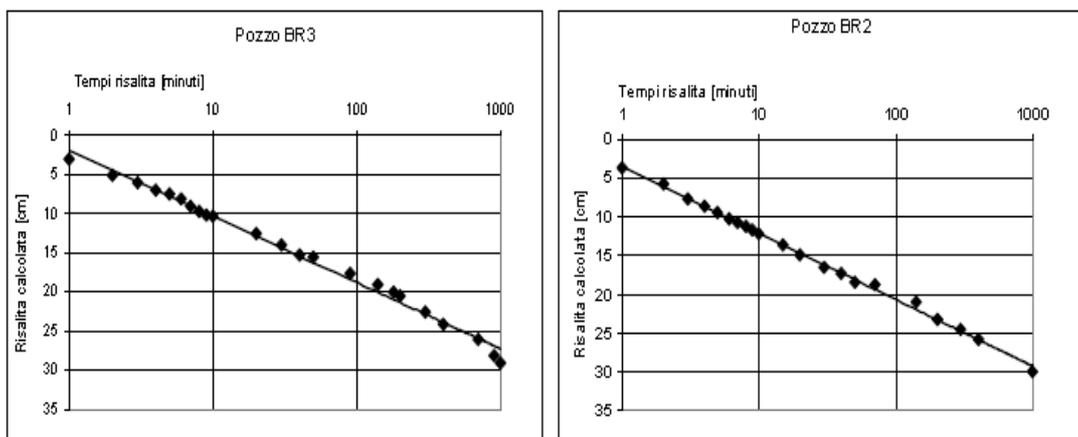
$$W(u) = 5,82 \quad u = 517,95$$

$$Q = 19,44 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0054 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$T = 1,08 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Il controllo dei parametri idrogeologici calcolati è stato fatto utilizzando i dati di risalita, si riportano i dati di risalita calcolata (figura 3.4) in un diagramma semilogaritmico risalita/ log tempi, interpolando i dati con una retta di regressione semplice, figura 3.7, e si misurano i differenziali di risalita per ciclo logaritmico utilizzando poi le equazioni di Jacob si possono ottenere la trasmissività e l'immagazzinamento della colonna verticale indagata.

Nel nostro caso possono essere calcolate tre equivalenti valori dei parametri ricercati per ogni punto di misura.



*Fig. 3.7 – Diagrammi risalita /log tempi per l'applicazione delle equazioni di Jacob.*

I risultati ottenuti per la trasmissività dei due punti di controllo (BR2 e BR3) sono risultati mediamente intorno a  $9E-3$ , e  $2E-2$   $m^2/sec$ .

I piezometri CP1, CP2, CPp3, CP4, prossimi al pozzo di sollevamento, se analizzati separatamente, hanno fornito esiti della trasmissività media equivalenti ( $T = 8 \cdot 10^{-3} m^2/s$ ). Si può concludere che la trasmissività dell'acquifero ha valore medio compreso tra  $7 \cdot 10^{-3} m^2/s$  e  $2 \cdot 10^{-2} m^2/s$ , noi assumeremo  $9 \cdot 10^{-3} m^2/s$ ; la conducibilità orizzontale media calcolata è di  $6 \cdot 10^{-4} m/s$ .

I dati di abbassamento in particolare, ma anche quelli di risalita, misurati nei piezometri della serie CP, non sono in accordo con quelli ottenuti dai pozzi posti a 30 metri di distanza. I due piezometri più prossimi al pozzo di emungimento CP1 e CP3 (10 metri) hanno avuto un comportamento assai particolare: all'inizio della prova (primi 15 minuti circa) si sono registrati abbassamenti nulli o molto modesti, o addirittura alcuni innalzamenti (CP1).

Nel tempo della prova gli abbassamenti complessivi sono stati molto minori rispetto alle geometrie attese, in relazione agli abbassamenti ottenuti nei pozzi posti a 30 metri di distanza. L'analisi abbassamenti/distanza, e la ricostruzione della geometria dinamica del cono di depressione, non riportate qui per brevità, mostrano un'evidente incongruenza. Ciò è dovuto:

- in parte alla vicinanza di CP1 (1,5 metri) e anche di CP3 (3 metri) al collettore sotterraneo in cui scorreva l'acqua di scarico della prova, immessa in un tombino distante circa 20 metri, che con probabilità ha perdite che hanno rifornito il piezometro stesso. Ciò spiegherebbe le risalite nei primi 15 minuti di prova, altrimenti incomprensibili;

- in parte al ruolo giocato dallo strato E, la cui permeabilità orizzontale si è dimostrata relativamente modesta in una consistente parte del suo spessore (prove CPTU). Una permeabilità verticale minore di mezzo ordine di grandezza, rispetto a quella dello strato F, appare sufficiente ad ottenere un ritardo negli abbassamenti.

La quota di pescaggio della pompa sommersa è stata imposta in corrispondenza dei livelli sabbiosi che si presumono più trasmissivi dello strato F (14,5 metri dalla bocca pozzo), quindi il richiamo operato sullo strato E è stato soprattutto orizzontale. La prova di pompaggio ha confermato che lo strato E, attraversato in tutti i sondaggi, benché contenga anche strati sabbiosi, svolge comunque

un ruolo di compartimentazione locale dei due acquiferi maggiormente trasmissivi, separandoli idraulicamente. Lo strato E non determina una condizione di confinamento generale dell'acquifero F, ma certamente nell'area di svolgimento della prova ha dimostrato di svolgere un deciso ruolo di compartimentazione locale. Si ricorda tuttavia che appena ci si allontana dalla specifica zona della prova di portata anche solo di un centinaio di metri, ad esempio già all'altezza del BR1 e del PZ1A, lo strato E ha spessore assai modesto, tessitura ben più marcatamente sabbiosa, e il suo ruolo di compartimentazione è fortemente ridimensionato.

I depositi limosi e limoso sabbiosi poco potenti ed interposti tra due cospicue sequenze canalizzate, raramente sono dotati della continuità laterale che è invece indispensabile per garantire un ragionevole isolamento tra due acquiferi sabbiosi sovrapposti. L'analisi sedimentaria testimonia di un prolungato periodo di presenza del canale Reno (strato F), di una sua breve divagazione, forse poche centinaia di metri ad ovest (strato E), e di un suo successivo ritorno lungo un asse spostato un poco più ad ovest rispetto al precedente (strato D). Con probabilità si tratta di uno spostamento dell'alveo di bank-full (piena ordinaria, fino alla decennale) entro l'alveo di piena eccezionale, controllato da argini naturali esterni assai distanti tra loro.

### **1.3.5 Contaminazione insaturo e sua distribuzione**

La scelta delle sostanze da ricercare, si è orientata, oltre che sugli oli combustibili, la cui presenza è stata rilevata a vista durante il rilevamento, sulle sostanze potenzialmente presenti nel sito in base alle attività svolte (cfr. § 1), in particolare la verniciatura di parti metalliche ed il collaudo delle lavatrici industriali, e sulla presenza di cabine di trasformazione elettriche.

Nella seconda fase della caratterizzazione preliminare si è ritenuto indispensabile verificare numerose sostanze potenzialmente presenti per attività produttive di questo tipo (Laura Romele, Paola Butelli, 2005), introducendo alcuni altri metalli, l'intera serie degli alifatici clorurati, ed organici aromatici.

I risultati delle analisi fisico-chimiche dei campioni di sedimenti prelevati in tempi e con modalità differenti sono riportati nelle tabelle 3.1 e 3.2, relative rispettivamente:

- ai terreni prelevati in trincea senza particolare attenzione alla conservazione di eventuali elementi volatili;
- ai terreni prelevati con sondaggi tipo "geoprobe" e campionamento specifico per conservazione dei volatili;
- ai terreni prelevati con campionatore ad infissione, per la conservazione dei volatili, dal fondo di trincea.

In tabella 3.1 non è riportato il campione relativo allo scavo 1, in questo caso l'olio era visibile direttamente nella sabbia di riempimento e all'imboccatura della cisterna, e pertanto si è ritenuto inutile prelevare il terreno per l'analisi.

Nello scavo 2 il campione è stato raccolto nelle sabbie di drenaggio interposte tra il serbatoio ed il sedimento laterale, vicino all'imboccatura della cisterna.

I certificati delle analisi riprodotti in appendice, e depositati in originale presso la sede di <Gema '96>, riportano anche i metodi utilizzati per le misure [Normativa: DLgs 152/06 All 5 Tab 1 (ex D.M. 471/1999, Tabella 1 All. 1)], ed i limiti di rilevabilità e di legge.

		Camp. 1	Camp. 2	Camp. 3	Camp. 4	Camp. 5	Camp. 6	Camp. 7
		Trincea 1	Trincea 2	Trincea 2	Trincea 3	Trincea 4	Trincea 5	Scavo 2
		Strato A	Strato R	Strato A	Strato A	Strato A	Strato A	Strato A
Parametro	UM							
<b>COMPOSTI INORGANICI</b>								
Cromo totale	mg/Kg s.s.	30,9	n.d.	17,5	35,8	31,7	35,8	n.d.
Mercurio	mg/Kg s.s.	0,0681	n.d.	0,0667	0,048	0,0518	0,0781	n.d.
Piombo	mg/Kg s.s.	9	n.d.	16,6	8,2	9,5	10,9	n.d.
<b>ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI</b>								
Tetracloroetilene (PCE)	mg/Kg s.s.	<b>0,808</b>	n.d.	<b>1,23</b>	0,029	< 0,005	<b>8,51</b>	n.d.
<b>FENOLI CLORURATI</b>								
2-Clorofenolo	mg/Kg s.s.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	n.d.
2,4-Diclorofenolo	mg/Kg s.s.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	n.d.
2,4,6-Triclorofenolo	mg/Kg s.s.	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	n.d.
Pentaclorofenolo	mg/Kg s.s.	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	n.d.
<b>FENOLI NON CLORURATI</b>								
Metilfenolo (o-,m-,p-)	mg/Kg s.s.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	n.d.
Fenolo	mg/Kg s.s.	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	n.d.
<b>ALTRE SOSTANZE</b>								
Oli minerali I.R.	mg/Kg s.s.	1,8	10,5	2,4	1,1	2	4,7	<b>2.294</b>

*Tabella 3.1 – Esiti ottenuti dai campioni di sedimenti raccolti in trincea ricavata con scavatore meccanico, per la conservazione dei VOC si sono utilizzati barattoli in vetro ermetici e conservazione in frigorifero portatile. I Certificati d'analisi sono riprodotti in appendice.*

La contaminazione da PCE rilevata dai campioni prelevati in trincea, è risultata in tre campioni su sei, le concentrazioni sono comprese entro il limite concesso per i siti industriali (20 mg/kg s.s.), ma sono superiori a quelle richieste per le destinazioni urbanistiche residenziali o a verde pubblico (0,5 mg/kg s.s.).

La tabella 3.2, sintetizza gli esiti chimici ottenuti dai campioni prelevati con campionatori per infissione o a pressione con le modalità indicate nel § 3.1, nella tabella sono riportati gli esiti di tutte le analisi di campioni prelevati con sub campionatore e metanolo, per i campioni da S1 a S14 si è richiesto un ampio spettro di ricerca.

Una volta appurata l'inesistenza di altri contaminanti, si è limitata la ricerca ai soli alifatici clorurati cancerogeni, per i ultimi campioni prelevati tra la fine di ottobre ed i primi giorni di novembre 2006 (campioni da S15 a S23 ed SS1).

I campioni prelevati in contraddittorio con ARPA (campioni da SS2 a SS6) sono state ricercati oltre ai consueti Alifatici cancerogeni, anche gli alifatici non cancerogeni e gli idrocarburi pesanti e leggeri.

Infine nei campioni raccolti per rispondere alle richieste formulate dalla conferenza dei servizi del 24/12/2007 sono stati analizzati: gli alifatici cancerogeni per i campioni con sigla da Tr1 a Tr5 e per il campione esterno "galliera PZ9"; mentre per i campioni con sigla "cisterna est", "cisterna ovest b" e "cisterna ovest c" si è richiesta BTEX e la speciazione degli idrocarburi C>12 e C<12.

La tabella 3.2 mostra il quadro della contaminazione del sito analizzato: sono fuori limite esclusivamente alcuni termini della serie degli alifatici clorurati, il tetracloroetilene (PCE) ed il tricloroetilene (TCE).

Sono invece assenti i termini della serie di degradazione del TCE come il dicloroetilene e soprattutto il cloruro di vinile (CVM), che risultano sempre sotto la soglia di rilevabilità.

La distribuzione verticale delle concentrazioni, come si vede in tabella, non ha fornito risultati univoci e chiari, la contaminazione quando è presente si è distribuita entro tutti gli "strati" indagati senza variazioni di concentrazione regolari, superando anche i limi argillosi, meno permeabili dello strato più superficiale.

Solo per il campione S5 le concentrazioni risultano inferiori alla rilevabilità in superficie e di poco superiori a 1 mg/kg nello strato più profondo.

In conclusione i focolai di contaminazione riscontrati nell'insaturo sono tre:

- a) il più rilevante per estensione e tenore è quello interno al capannone settentrionale, localizzato in corrispondenza della zona collaudo e verniciatura, nel testo denominato FC1;
- b) la zona magazzino mostra una contaminazione relativamente diffusa in particolare all'esterno, la porzione interna, dotata di una pavimentazione in cemento con lastre di ferro, appare assai meno compromessa, nel testo denominato FC2;
- c) il passaggio tra i due capannoni è sede di una contaminazione solamente locale, modesta per estensione e tenore, nel testo denominato FC3.

L'area a verde, lontana dal magazzino e l'area del secondo capannone sono libere da inquinamento della matrice solida insatura, come si poteva supporre dal tipo di lavorazione che si svolgeva e come hanno dimostrato i numerosi campioni prelevati sia all'interno del capannone, sia all'esterno.

Denominazione Parametro	Campione																	Limite residenz	Limite industria
	S1 A	S1 B	S1 C	S2 A	S2 C	S3 A	S3 B	S3 C	S4 A	S4 C	S5 A	S5 C	S6 A	S6 C	S7 A				
COMPOSTI INORGANICI																			
Arsenico	U. M.																		
	mg/kg s.s.				3,9					3,9								20	
Cadmio	mg/kg s.s.				0,017					0,078								15	
Cromo totale	mg/kg s.s.				56					54,4								150	
Cromo esavalente	mg/kg s.s.				< 0,2					< 0,2								2	
Nichel	mg/kg s.s.				41,2					40,9								120	
Piombo	mg/kg s.s.				12,5					12,2								100	
Rame	mg/kg s.s.				53,3					36,5								600	
COMPOSTI ORGANICI AROMATICI																			
Benzene	mg/kg s.s.	< 0,005			< 0,005	< 0,005				< 0,005	< 0,005							2	
Etilbenzene (A)	mg/kg s.s.	< 0,005			< 0,005	< 0,005				< 0,005	< 0,005							50	
Stirene (B)	mg/kg s.s.	< 0,005			< 0,005	< 0,005				< 0,005	< 0,005							50	
Toluene (C)	mg/kg s.s.	< 0,005			< 0,005	< 0,005				< 0,005	< 0,005							50	
Xilene (D)	mg/kg s.s.	< 0,005			< 0,005	< 0,005				< 0,005	< 0,005							50	
Sommatoria organici aromatici (A,B,C,D)	mg/kg s.s.	< 0,005			< 0,005	< 0,005				< 0,005	< 0,005							100	
ALFATICI CLORURATI CANCEROGENI																			
Clorometano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,1	5
Diclorometano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,1	5
Triclorometano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,1	5
Cloruro di vinile	mg/kg s.s.	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001				< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,01	0,1
1,2-Dicloroetano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,2	5
1,1-Dicloroetilene	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,1	1
1,2-Dicloropropano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,3	5
1,1,2-Tricloroetano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,5	15
Tricloroetilene	mg/kg s.s.	<b>3,5</b>	<b>3,35</b>	<b>19,1</b>	<b>20,4</b>	<b>12,8</b>	<b>1,9</b>	<b>1,56</b>	<b>7,43</b>	<b>7,43</b>	<b>0,124</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>18,4</b>	<b>12,7</b>	<b>1,71</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>10</b>
1,2,3-Tricloropropano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,1	1
1,1,2,2-Tetracloroetano	mg/kg s.s.	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005				< 0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,5	10
Tetracloroetilene (PCE)	mg/kg s.s.	<b>5,54</b>	<b>17,6</b>	<b>20,8</b>	<b>132</b>	<b>139</b>	<b>13</b>	<b>129</b>	<b>34,7</b>	<b>0,425</b>	<b>0,005</b>	<b>1,63</b>	<b>75,4</b>	<b>162</b>	<b>139</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>20</b>
FENOLI CLORURATI																			
2-Clorofenolo	mg/kg s.s.	< 0,01			< 0,01	< 0,01				< 0,01	< 0,01							0,5	25
2,4-Diclorofenolo	mg/kg s.s.	< 0,01			< 0,01	< 0,01				< 0,01	< 0,01							0,5	50
2,4,6-Triclorofenolo	mg/kg s.s.	< 0,001			< 0,001	< 0,001				< 0,001	< 0,001							0,01	5
Pentaclorofenolo	mg/kg s.s.	< 0,001			< 0,001	< 0,001				< 0,001	< 0,001							0,01	5
ALTRE SOSTANZE																			
Policlorobifenili	mg/kg s.s.	< 0,0001			< 0,0001	< 0,0001				< 0,0001	< 0,0001								

Tabella 3.2 – Risultati analisi chimiche sui campioni di sedimenti e di VOC prelevati secondo le modalità indicate nel testo/ tabella segue

Denominazione		Campione S7C	Campione S8A	Campione S8C	Campione S9A	Campione S9C	Campione S10A	Campione S10C	Campione S11C	Campione S12A	Campione S12B	Campione S12C	Campione S12D	Campione S13A	Campione S13C	Campione S14A	Campione S14C	Limite residenz	Limite Industria
Parametro		U. M.																	
COMPOSTI INORGANICI																			
	Arsenico	mg/Kg s.s.	3,9	3,1	--	3,1	--	3,6	3,5	--	--	3,7	3,5	--	3,5	--	3,3	20	50
	Cadmio	mg/Kg s.s.	0,05	0,016	--	0,013	--	0,024	0,035	--	--	0,048	0,042	--	0,05	--	0,031	2	15
	Cromo totale	mg/Kg s.s.	48,3	53,8	--	52,9	--	50,9	49,2	--	--	54,6	64,1	--	50,9	--	44,2	150	800
	Cromo esavalente	mg/Kg s.s.	<0,2	<0,2	--	<0,2	--	<0,2	<0,2	--	--	<0,2	<0,2	--	<0,2	--	<0,2	2	15
	Nichel	mg/Kg s.s.	37,8	40,7	--	40,2	--	35,2	35,8	--	--	40,9	44,7	--	38,4	--	33,5	120	600
	Piombo	mg/Kg s.s.	10,5	8,7	--	8,8	--	7,5	7,3	--	--	8,1	9,3	--	7,3	--	6	100	1000
	Rame	mg/Kg s.s.	26,9	29,7	--	29,5	--	26,1	26,6	--	--	30,5	31,9	--	24,2	--	24,3	120	600
COMPOSTI ORGANICI AROMATICI																			
	Benzene	mg/Kg s.s.	--	<0,005	--	<0,005	--	--	--	--	--	--	<0,005	--	--	--	--	0,1	2
	Etilbenzene (A)	mg/Kg s.s.	--	<0,005	--	<0,005	--	--	--	--	--	--	<0,005	--	--	--	--	0,5	50
	Stirene (B)	mg/Kg s.s.	--	<0,005	--	<0,005	--	--	--	--	--	--	<0,005	--	--	--	--	0,5	50
	Toluene (C)	mg/Kg s.s.	--	<0,005	--	<0,005	--	--	--	--	--	--	<0,005	--	--	--	--	0,5	50
	Xilene (D)	mg/Kg s.s.	--	<0,005	--	<0,005	--	--	--	--	--	--	<0,005	--	--	--	--	0,5	50
	Sommatoria organici aromatici (A,B,C,D)	mg/Kg s.s.	--	<0,005	--	<0,005	--	--	--	--	--	--	<0,005	--	--	--	--	1	100
ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI																			
	Clorometano	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,1	5
	Diclorometano	mg/Kg s.s.	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,1	5
	Triclorometano	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,1	5
	Cloruro di vinile	mg/Kg s.s.	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,1
	1,2-Dicloroetano	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,2	5
	1,1-Dicloroetilene	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,1	1
	1,2-Dicloropropano	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,3	5
	1,1,2-Tricloroetano	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,5	15
	Tricloroetilene	mg/Kg s.s.	0,894	0,005	<0,005	<b>7,2</b>	<b>2,75</b>	<b>1,07</b>	<b>9,72</b>	<b>2,65</b>	<b>3,85</b>	<b>3,52</b>	<b>3,52</b>	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	1	10
	1,2,3-Tricloropropano	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,1	1
	1,1,2,2-Tetracloroetano	mg/Kg s.s.	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,5	10
	Tetracloroetilene (PGE)	mg/Kg s.s.	<b>14,4</b>	<b>12,7</b>	<b>15</b>	<b>657</b>	<b>2,69</b>	<b>4,25</b>	<b>3</b>	<b>60,4</b>	<b>31,9</b>	<b>40</b>	<b>49</b>	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,5	20
FENOLI CLORURATI																			
	2-Clorofenolo	mg/Kg s.s.	--	<0,01	--	<0,01	--	--	--	--	--	--	<0,01	--	--	--	--	0,5	25
	2,4-Diclorofenolo	mg/Kg s.s.	--	<0,01	--	<0,01	--	--	--	--	--	--	<0,01	--	--	--	--	0,5	50
	2,4,6-Triclorofenolo	mg/Kg s.s.	--	<0,001	--	<0,001	--	--	--	--	--	--	<0,001	--	--	--	--	0,01	5
	Pentaclorofenolo	mg/Kg s.s.	--	<0,001	--	<0,001	--	--	--	--	--	--	<0,001	--	--	--	--	0,01	5
ALTRE SOSTANZE																			
	Policlorobifenili	mg/Kg s.s.	--	<0,0001	--	<0,0001	--	--	--	--	--	--	<0,0001	--	--	--	--	--	--

Tabella 3.2 – (segue) Risultati analisi chimiche sui campioni di sedimenti e di VOC prelevati secondo le modalità indicate nel testo







### **1.3.6 Falda freatica modalità di campionamento e contaminazione**

Dopo la loro esecuzione i piezometri sono stati spurgati dei sedimenti accumulati sul fondo durante le lunghe e complesse lavorazioni che precedono l'inserimento del dreno tra il terreno ed il tubo piezometrico. Lo spurgo è avvenuto immettendo aria compressa dalla tasca di fondo con pressioni dapprima modeste poi crescenti, fino ad ottenere uscita d'acqua limpida (circa 30 minuti). Successivamente, lo spurgo è proseguito ancora con aria compressa, impartendo picchi di pressione (circa 15 minuti), così da provocare l'assestamento completo del drenaggio (calo medio di oltre 80 cm).

Il rabbocco del drenaggio, l'impermeabilizzazione e cementazione in superficie sono stati eseguiti senza compromettere lo spurgo, per la presenza del preforo già rivestito. Trascorsi tre giorni si è proceduto allo spurgo di durata con pompa sommersa (circa 10 ore), sollevando portate attorno ai 40 litri/minuto.

Nei piezometri così preparati, tre giorni dopo l'ultima pulizia si sono campionate le acque con due diverse modalità:

a) a basso flusso (portata massima di 1 litro ogni 10 minuti, minima 1 litro ogni 40 minuti) ottenuto con pompa peristaltica (il fluido entra in contatto solamente con la tubazione, mai con parti della pompa), tubazione atossica per alimenti di diametro esterno di 6 mm, interno di 3 mm. La pompa, dotata di una prevalenza massima di 8 metri, ha la caratteristica di funzionare "a vuoto", quindi può sollevare fluidi senza alcuna perdita di volatili durante il percorso, dopo il totale riempimento della tubazione. La quota di prelievo è stata di 2,5 metri sotto il livello statico registrato all'inizio del campionamento stesso, cioè a circa 6 metri dal p.c. L'acqua una volta giunta alla pompa, dopo un congruo deflusso, è stata immessa in apposita cella di flusso chiusa, a sovrappieno, dotata di valvola per il prelievo in "vial". I campioni sono stati

prelevati solamente dopo un congruo intervallo di tempo in cui l'intero sistema era a pieno regime: tutte le sue parti devono essere prive di aria. Per ogni piezometro sono state sostituite le tubazioni e si sono lavate accuratamente con acqua distillata le parti non sostituibili (cella di flusso, massa di immersione del tubo di prelievo);

b) Con bailer di livello si sono prelevati nei piezometri ipoteticamente inquinati PZ1A bis e PZ1B bis due campioni alla quota di 14 metri dal p.c, cioè circa 10 metri sotto il livello statico. Tra un campionamento e l'altro, il bailer è stato accuratamente pulito con acqua distillata, il cavo di sollevamento sostituito. In questo caso il prelievo del campione avviene all'aria (durante la fase di sollevamento nel piezometro il campionatore è aperto, così come nel momento in cui si preleva l'aliquota d'acqua con il vial, pertanto può essersi verificata una modesta perdita di VOC.

I campioni appena prelevati sono stati conservati in cella refrigerata portatile, poi in frigorifero, il giorno seguente sono stati avviati in cella refrigerata al laboratorio. Le analisi sui campioni prelevati in ottobre 2006, nei 4 piezometri destinati a questo scopo (PZ1A, PZ1B, PZ2, PZ4), sono state effettuate secondo la normativa vigente, i risultati ottenuti sono riportati in tabella 3.3 assieme ai limiti di rilevabilità e quelli imposti dal DL n. 152/06. Nel riquadro relativo al primo campionamento, quelli indicati con la sigla semplice sono stati raccolti con pompa low-flow 2 metri sotto il livello statico, mentre i campioni con sigla "bis" sono prelevati con bailer di livello circa 14 metri sotto il p.c. Questi esiti sono in accordo con il modello concettuale preliminare che era stato proposto sulla base delle conoscenze generali, ormai consolidate in molteplici lavori idrogeologici di scala comunale e sovracomunale. I piezometri ad ovest sono privi di contaminazione, quelli ad est risultano contaminati, in particolare il PZ1A, prossimo all'area di collaudo, ed alla fognatura che scarica nella rete

comunale il percolato del capannone in cui si sono rinvenuti i tenori più alti di tetracloro nel suolo.

Il piezometro PZ1A è stato realizzato in posizione prossima al confine meridionale del capannone contaminato, per verificare sia l'estensione laterale dell'inquinamento, sia indirettamente il deflusso della falda, gli esiti ottenuti comprovano che la direzione locale del campo di moto del freatico, almeno in fase di magra, è decisamente verso est.

I pozzi freatici del quadrante nord – est sono stati ripetutamente utilizzati per verificare le quote piezometriche della falda e l'eventuale presenza di solventi clorurati. In particolare una campagna di campionamento mirata a controllare la qualità delle acque presenti nei pozzi domestici (non ad uso potabile) è stata eseguita tra dicembre e gennaio 2007. Tutti i campioni sono stati prelevati con bailer di livello al fondo pozzo (comunque mai posti a quote superiori a 10 metri dal p.c.).

Nel gennaio 2007, si è fatto un campionamento interno ed esterno all'area di Suprema, la figura 3.2 riporta la localizzazione dei pozzi, nel secondo riquadro della tabella 3.3 sono riportati gli esiti delle analisi certificate. In precedenza, dicembre 2006, era stato eseguito un campionamento sui bersagli (pozzi freatici) più vicini a Suprema PE1a, PE2, la prossimità con il periodo di festività ha consigliato di consegnare questi due campioni ad un laboratorio locale (Alfarec spa), i risultati ottenuti, non certificati, sono riportati nella tabella 3.4

I risultati ottenuti con il campionamento di dicembre forniscono un modesto superamento dei limiti di legge (D. Lgs n° 152/2006) per il pozzo PE2. Nel campionamento di gennaio, effettuato con le medesime modalità (bailer di livello) tutti i pozzi freatici esterni all'area di Suprema sono risultati entro i limiti di legge per i solventi clorurati. I punti di controllo interni piezometri (PZ1A,

PZ1b, PZ2) e pozzi della barriera (BR1, 2, 3, 4) dimostrano la contaminazione della falda, sia pure con intensità diversa, soprattutto per il PZ1A in cui i tenori registrati sono molto più modesti, di quelli ottenuti negli altri prelievi.

Per i piezometri interni all'area di Suprema un'ulteriore campagna di campionamento è stata effettuata in contraddittorio con ARPA per i piezometri PZ4, PZ2, PZ1A, PZ1B, dopo aver proceduto al preventivo spurgo. Il giorno 14/03/2007 il prelievo è avvenuto con pompa sommersa, al fondo dei piezometri (20 metri), cioè fuori delle possibilità di prelievo del bailer di livello, il cui opercolo non si apre a quote superiori a 15 metri circa.

Nella stessa data, si sono spurgati e campionati, con le medesime modalità (pompa sommersa), anche i pozzi della barriera idrogeologica BR1 e BR3.

Tutti gli esiti delle analisi chimiche sono ordinati nel terzo riquadro della tabella 3.3.

Al fine di evitare, per quanto possibile, la perdita di volatili dovuta alla “girante” che inevitabilmente provoca turbolenze e moti vorticosi, si è utilizzata una pompa GRUNDFOS modello MP1 con regolatore di flusso.

Questa pompa consente di ottenere anche valori molto modesti (fino a 0,3 l/min), anche se non proprio a basso flusso. Naturalmente l'avvio della pompa, il riempimento del tubo di cacciata, la prima fase di prelievo ed il tempo di regolazione dell'attrezzatura, avviene a portate basse ma significative (10 l/minuto) per molti minuti.

Sempre con pompa sommersa Grundfos MP1, il 29 maggio 2007 sono stati effettuati i prelievi di campioni a fondo (20 metri) nei piezometri interni ed esterni alla Suprema PZ2, PZ8, PZ9, PZ11. Nel piezometro PZ5 profondo solamente 12 metri, sono stati prelevati con bailer di livello due campioni PZ5a al fondo piezometro, e PZ5b a circa 10 metri dalla pavimentazione del

capannone. Gli esiti chimici ottenuti sono esposti nell'ultimo riquadro della tabella 3.3.

I piezometri di nuova realizzazione esterni all'area di sedime di Suprema non dimostrano la presenza di contaminazione, la loro localizzazione risente delle possibilità dei vincoli imposti dalle proprietà private. Ad esempio il vasto campo ad est della ferrovia, che costituiva l'obiettivo dichiarato di esecuzione di un punto di controllo, non è stato concesso dalla proprietà.

Analogo risultato per il capannone immediatamente ad est di Suprema, si è così dovuto ripiegare per il posizionamento del PZ9, sul capannone accanto, che è ancora nella zona di influenza della contaminazione, ma in una sua parte periferica.

Il piezometro PZ11 è distale rispetto ai focolai FC1 e FC3, anche se centrale rispetto la possibile plume di contaminazione, il piezometro PZ8 è circa centrale rispetto la possibile plume proveniente dai focolai del magazzino (FC2) e dell'area tra i due capannoni (FC3) nelle fasi di piena della falda, cioè quando la sua direzione di deflusso è verso nord.

Il quadro generale della contaminazione non è sostanzialmente modificato rispetto agli esiti delle prime analisi. I focolai di contaminazione dell'insaturo restano confermati come sorgente dell'inquinamento del freatico dalla distribuzione dei tenori riscontrati, almeno nella prolungatissima magra della falda perdurante dal 2006.

Campioni acqua prelevati il 20/ott/2006, analizzati 02/nov/2006																	
Denominazione	Parametro	U. M.	PZ1a	PZ1a bis	PZ1b	PZ1b bis	PZ2	PZ4	PE1	PE2	PE3	PE4a	PE4b	PE7	PE8	LR	DLgs 152/06 Art.5 Tab.2
COMPOSTI ORGANICI AROMATICI																	
Benzene	µg/L	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1								0,1	1
Etilbenzene	µg/L	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1								1	50
Stirene	µg/L	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1								1	25
Toluene	µg/L	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1								1	15
p-Xilene	µg/L	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1								1	10
ALIFATICI CLORURATI																	
Clorometano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1								0,1	1,5
Triclorometano	µg/L	2,27	1,54	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01								0,01	0,15
Cloro di vinile	µg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05								0,05	0,5
1,2-Dicloroetano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1								0,1	3
1,1-Dicloroetilene	µg/L	0,23	0,55	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005								0,005	0,05
1,2-Dicloropropano	µg/L	0,88	0,35	1,27	0,73	< 0,01	< 0,01	< 0,01								0,01	0,15
1,1,2-Tricloroetano	µg/L	0,18	0,16	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02								0,02	0,2
Tricloroetilene	µg/L	1,37	2,12	7,3	10,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1								0,1	1,5
1,2,3-Tricloropropano	µg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001								0,0001	0,001
1,1,2,2-Tetracloroetano	µg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005								0,005	0,05
Tetracloroetene	µg/L	2086	31,31	166	147	< 0,1	< 0,1	< 0,1								0,1	1,1
Esaclorobutadiene	µg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01								0,01	0,15
Somma aloria organoclorogenati	µg/L	2216	3346	175	138	< 0,1	< 0,1	< 0,1								0,1	10

Campioni acqua prelevati il 16/gen/2007, analizzati 26/gen/2007																		
Denominazione	Parametro	U. M.	PZ1a	PZ1b	PZ2	BR1	BR2	BR3	BR4	PE1	PE2	PE3	PE4a	PE4b	PE7	PE8	LR	DLgs 152/06 Art.5 Tab.2
ALIFATICI CLORURATI																		
Clorometano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	1,5
Triclorometano	µg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,15
Cloro di vinile	µg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05	0,5
1,2-Dicloroetano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	3
1,1-Dicloroetilene	µg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,1	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,005	0,05
1,2-Dicloropropano	µg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,25	< 0	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,15
1,1,2-Tricloroetano	µg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	0,2
Tricloroetilene	µg/L	8,3	0,4	< 0,1	4,8	0,3	0,4	0,4	1,6	< 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	1,5
1,2,3-Tricloropropano	µg/L	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0001	0,001
1,1,2,2-Tetracloroetano	µg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,1	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,005	0,05
Tetracloroetene	µg/L	1,22	4,3	0,4	73,7	2,8	0,5	0,5	1,4	0	0,4	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	1,1
Esaclorobutadiene	µg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,15
Somma aloria organoclorogenati	µg/L	1,23	4,7	0,4	28,5	3,1	0,9	0,9	4,3	0	0,4	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	1,1

Campioni acqua prelevati il 14/mar/2007, analizzati 20/mar/2007																	
Denominazione	Parametro	U. M.	PZ1a	PZ1b	PZ2	BR1	BR2	BR3	BR4	BR5	BR6	BR7	BR8	BR9	BR10	LR	DLgs 152/06 Art.5 Tab.2
ALIFATICI CLORURATI																	
Clorometano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,1	1,5
Triclorometano	µg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,01	0,15
Cloro di vinile	µg/L	< 0,05	< 0,05	3,26	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	3,06	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,05	0,5
1,2-Dicloroetano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,1	3
1,1-Dicloroetilene	µg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	2,11	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,005	0,05
1,2-Dicloropropano	µg/L	< 0,01	< 0,01	0,15	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,43	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,01	0,15
1,1,2-Tricloroetano	µg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,02	0,2
Tricloroetilene	µg/L	1,23	33,1	2,1	43,7	< 0,1	< 0,1	< 0,1	33,7	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,1	1,5

Denominazione	µg/L	PZ1a	PZ1b	PZ2	PZ4	BR1	BR2	BR3	BI	BR5	BR6	DLgs 47/06 ANS Tab2
1,2,3-tricloroetano	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	-	-	-	0,0001
1,1,2,2-tetracloroetano	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	-	-	-	0,005
Tetracloroetilene	µg/L 2108	< 0,01	230	< 0,1	< 0,1	335	< 0,1	69,8	-	-	-	1,1
Esaclorobifenilene	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	-	0,1
Sommatomia organoclorurati	< 0,01	228	263	7,5	< 0,1	409	< 0,1	109	-	-	-	0,1
ALTRE SOSTANZE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
Idrocarburi leggeri (C < 12)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	-	-	-	1

**Campioni acqua prelevati il 29/mag/2007, analizzati 13/giu/2007**

Denominazione	U. M.	PZ	PZ5a	PZ5b	PZ6	PZ7	PZ8	PZ9	PZ	PZ11	DLgs 47/06 ANS Tab2	
COMPOSTI ORGANICI AROMATICI											LR	
Benzene	µg/L	-	-	-	< 0,1	< 0,1	-	-	0	-	0,1	
Etilbenzene	µg/L	-	-	-	< 1	4817	-	-	<	-	50	
Toluene	µg/L	-	-	-	< 1	243	-	-	<	-	15	
p-Xilene	µg/L	-	-	-	< 1	489	-	-	<	-	10	
ALTRE SOSTANZE												
Idrocarburi leggeri (C < 12)	µg/L	-	-	-	< 1	3388814	-	-	11	-	1	
Idrocarburi alifatici C6-C8	µg/L	-	-	-	< 1	313489	-	-	<	-	1	
Idrocarburi alifatici C8-C10	µg/L	-	-	-	< 1	1064391	-	-	<	-	1	
Idrocarburi alifatici C10-C12	µg/L	-	-	-	< 1	1723631	-	-	<	-	1	
Idrocarburi aromatici C8-C10	µg/L	-	-	-	< 1	247021	-	-	11	-	1	
Idrocarburi aromatici C10-C12	µg/L	-	-	-	< 1	18839	-	-	<	-	1	
Idrocarburi pesanti (C > 12)	µg/L	-	-	-	48	4877333	-	-	108	-	1	
Idrocarburi alifatici C12-C16	µg/L	-	-	-	8	1651043	-	-	36	-	1	
Idrocarburi alifatici C16-C18	µg/L	-	-	-	15	1059338	-	-	25	-	1	
Idrocarburi alifatici C18-C35	µg/L	-	-	-	25	1366552	-	-	47	-	1	
Idrocarburi aromatici C12-C16	µg/L	-	-	-	< 1	< 1	-	-	<	-	1	
Idrocarburi aromatici C16-C21	µg/L	-	-	-	< 1	< 1	-	-	<	-	1	
Idrocarburi aromatici C21-C35	µg/L	-	-	-	< 1	< 1	-	-	<	-	1	
ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI												
Clorometano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	0,1	1,5
Diclorometano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	0,1	-
Triclorometano	µg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	0,01	0,15
Cloruro di vinile	µg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	-	-	< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	0,05	0,5
1,2-Dicloroetano	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	0,1	3
1,1-Dicloroetilene	µg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	-	-	< 0,005	< 0,005	-	< 0,005	0,005	0,05
1,2-Dicloropropano	µg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	0,01	0,15
Tricloroetilene	µg/L	< 0,1	< 0,1	0,2	-	-	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	0,1	1,5
1,1,2,2-Tetracloroetano	µg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	-	-	< 0,005	< 0,005	-	< 0,005	0,005	0,05
Tetracloroetilene	µg/L	< 0,1	2,8	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	0,1	1,1

Tabella 3.3 – Analisi chimiche dei campioni d'acqua prelevati con le modalità e gli scopi riportati nel testo.

#### **1.4 MODELLO CONCETTUALE**

In base alle conoscenze acquisite dal contesto locale, dalla letteratura, ed ai dati ricavati direttamente al sito è possibile ricostruire il modello concettuale su cui fondare la discussione sulle modalità di bonifica del sito.

L'ex suprema è collocata sopra il percorso di almeno due paleoalvei del fiume Reno accostati e parzialmente sovrapposti tra loro, come dimostra l'analisi stratigrafica. La porzione centrale e orientale dell'area di progetto presenta la sovrapposizione dei due alvei sabbiosi nella loro massima potenza verticale, nella porzione più orientale, invece, il corpo sabbioso più profondo si sfrangia fino quasi a chiudersi, mentre quello più superficiale diminuisce molto il suo spessore. Le tessiture seguono il medesimo schema distributivo.

La falda freatica ha soggiacenza di circa 3,5 metri, nei periodi di magra è giunta a 4,20 metri, la presenza di pozzi limitrofi non influisce significativamente sulla tavola d'acqua freatica. Certamente invece la falda sottostante (confinata e saliente) risente pesantemente dei prelievi agricoli ed industriali cui è sottoposta, il suo livello dinamico, misurato in alcuni pozzi limitrofi (filtri disposti tra circa 30 e circa 50 metri di profondità), è diminuito tra il 2006 ed il 2007 di oltre 1 metro.

Il campo di moto del freatico, desunto dal contesto regionale e dalla presenza di numerosi punti di controllo interni all'area di progetto, mostra linee di deflusso rivolte da est verso ovest. È possibile che durante le fasi di piena si presenti una variazione di direzione del deflusso profondo con andamento da est-sudest verso ovest-nordovest. Nella realizzazione della barriera di messa in sicurezza idrogeologica (8 pozzi) si è tenuto conto di entrambe le possibilità.

#### **1.4.1 Distribuzione delle concentrazioni degli alifatici clorurati**

Prima di ricostruire le possibili distribuzioni delle concentrazioni del contaminante e di indicare le modalità di decontaminazione attuabili, è necessario riassumere le caratteristiche fisico chimiche delle sostanze in questione. la tabella 3 riporta una sintesi dei parametri più significativi di questa classe di composti.

1) La densità elevata di PCE e TCE fa sì che quando la fase libera (DNAPL: Dense Non-Aqueous Phase Liquid) entra in una falda tende a sprofondare nell'acquifero saturo fino a raggiungere il primo acquitrando presente o lo stesso letto impermeabile. Il moto di deflusso della falda si combina con il movimento gravitativo del DNAPL, la componente risultante sarà una delle principali variabili che controllano l'estensione della plume di contaminazione della fase libera, che tenderà a disporsi in forma di "macchie" appiattite in corrispondenza delle porzioni meno permeabili dell'acquifero. I solventi clorurati "non-bagnanti" per entrare in falda devono avere un carico idraulico elevato, altrimenti non superano la tensione di interfaccia della frangia capillare. Nel nostro caso (limi sabbiosi) la soglia di "spiazzamento" dell'acqua richiede gradienti idraulici di PCE o TCE superiori a 2. Ciò significa che la contaminazione della falda è avvenuta per l'accumulo nell'insaturo di quantità consistenti di trielina.

2) I medi valori del Kow (coefficiente di ripartizione) provano la discreta mobilità della fase libera dei solventi nell'acquifero. L'estensione e distribuzione sotterranea delle zone a forte concentrazione di PCE e TCE saranno quindi funzione, tanto della velocità di deflusso della falda e delle proprietà dell'acquifero (variazioni di porosità e permeabilità, presenza di sostanza organica, acclività acquitrando di letto), quanto delle caratteristiche dei solventi clorurati (densità, viscosità). Il problema di determinare posizione e distribuzione spaziale delle "macchie" di DNAPL, è

impossibile anche per la modellistica numerica più raffinata, anche perché complicato da due combinazioni di caratteristiche acquifero

- PCE, che agiscono in modo antitetico:

- nell'acquifero, la conducibilità idraulica della fase libera del PCE può essere 2 o 3 volte superiore a quella dell'acqua, a causa dell'alta densità e bassa viscosità dinamica (0,88 cPoise a 20°);

- nell'acquifero, la presenza anche modesta di sostanza organica (0,02% di carbonio organico) provoca adsorbimento (e quindi ritardo nella mobilità) del percloro e della trielina.

3) La solubilità in acqua a 25° del PCE è 7 volte inferiore a quella del TCE, entrambi comunque hanno solubilità ancor più bassa, se si considera che la falda ha temperature decisamente più basse. Tuttavia la solubilità è di molti ordini di grandezza superiore ai limiti imposti, per l'acqua di falda, dal DM 471/99 (PCE = 1,1 µg/l; TCE = 1,5 µg/l). La forma e dispersione delle concentrazioni nel pennacchio di contaminazione dipenderanno dai parametri idrogeologici ed idrodispersivi dell'acquifero. La saturazione della soluzione non si raggiungerà per la continua filtrazione della falda, e quindi la concentrazione, già ad una distanza di poche centinaia di metri dal focolaio, sarà modesta data la bassa solubilità. Tuttavia la lunga permanenza in fase DNAPL, può formare un pennacchio molto allungato nel senso di deflusso.

4) La grandezza della tensione di vapore misura la volatilizzazione spontanea dall'acqua di falda, ma considerata assieme alla costante di Henry indica un'alta propensione alla migrazione nella fase gassosa, aiutata anche dalla bassa solubilità. Si avrà così la formazione di ampie "bolle" di vapore attorno alle zone di contaminazione nell'insaturo, e, per la falda, in corrispondenza delle zone più interne del pennacchio di inquinamento. Una volta raggiunta la saturazione nella fase gassosa dell'insaturo, nel nostro caso caratterizzato da coperture innaturali quasi impermeabili (pavimentazioni), il vapore di TCE e PCE

occupa stabilmente la porosità del suolo e sottosuolo e agevola il veloce trasferimento della fase liquida libera verso la falda, e la formazione di gradiente idraulico dei solventi all'altezza della frangia capillare.

5) La presenza di condizioni aerobiche consente la completa mineralizzazione degli inquinanti, in particolare di quelli con minore grado di clorurazione, ovvero la loro trasformazione in CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e ione cloruro. Invece la presenza di condizioni anaerobiche si può produrre la progressiva dechlorazione della molecola di partenza fino ad arrivare, in teoria, all'idrocarburo non clorurato di partenza (metano, etano, etilene, ecc.), in questi casi però la dechlorazione riduttiva può produrre la formazione di solventi basso clorurati anche molto tossici come ad esempio il cloruro di vinile. La permanenza per tempi particolarmente lunghi nell'insaturo arido sotto la pavimentazione del capannone o sotto il piazzale (quindi in condizioni relativamente aerobiche) non dovrebbe aver preconstituito le premesse per la formazione dei composti più tossici della serie, la permanenza invece in falda può aver determinato la formazione anche dei composti bassoclorurati.

La trasposizione delle informazioni di concentrazione misurate nei sedimenti in un modello matematico per la verifica delle distribuzioni, ha fornito gli esiti riportati nella figura 4.2 (strati A e C) per il PCE, e nella figura 4.3 (strati A e C) per il TCE.

Per lo strato A si è tenuto conto della pendenza naturale che si presume abbiano i limi argillosi sottostanti il piazzale ed il riporto, e della presenza di fognature dentro e fuori il capannone contaminato (figura 4.1). Queste ultime si ritiene siano state il veicolo principale della contaminazione nel capannone settentrionale, in particolare il collettore che collega la rete interna al capannone settentrionale con la fognatura comunale è quello che ha dimostrato i più alti tenori di contaminazione.

#### **1.4.2 Modello di contaminazione Insaturo**

Il modello di contaminazione dell'insaturo è rappresentato da tre classiche zone di percolazione verticale, i cui contorni sono identificabili nelle figure 4.2 e 4.3. In queste figure il valore delle isocone a minore concentrazione è stato scelto di 10 mg/kg s.s. per PCE, e di 1 mg/kg s.s. per TCE, le aree non interessate dalle isolinee non devono, quindi, essere considerate prive di contaminazione, ma con livelli di contaminazione più bassi del limite assunto per tracciare le isolinee. Nel calcolo dell'estensione dei volumi da bonificare infatti si sono conteggiate tutte le aree, anche esterne al capannone fino alla linea che correla i punti di controllo che hanno mostrato tenori inferiori al limite richiesto per le aree di verde pubblico (Tab. 1, colonna A, D.M. 152/06).

I focolai di inquinamento individuati nel sito sono tre:

- FC1: zona collaudo e verniciatura, e relativi rami di fognature interne e di scarico esterne all'area di progetto;
- FC2: zona magazzino;
- FC3: zona di passaggio tra i capannoni settentrionale e meridionale.

L'analisi delle concentrazioni negli strati A, B, C, non fornisce chiavi di lettura particolari, che consentano di supporre che la contaminazione si sia arrestata, entro l'insaturo, su un livello particolarmente impermeabile. Gli esiti ottenuti portano a concludere che la distribuzione del PCE e del TCE nei sedimenti ha seguito la regola generale della percolazione verticale per gravità, con le variazioni di estensione laterali che riproducono la diversa porosità ed umidità naturale dei vari strati di sedimento.

La diffusione in superficie dei solventi pare controllata più dalla disposizione delle fognature presenti dentro e fuori del capannone, piuttosto che da parametri naturali. Inoltre l'impermeabilizzazione superficiale determinata dalla presenza dei piazzali asfaltati ha

impedito l'evaporazione in atmosfera ed ha incrementato la diffusione nei sedimenti dei volatili.

Nell'elaborare il modello di contaminazione dell'insaturo si sono pertanto considerate le condizioni artificiali di drenaggio e di impermeabilizzazione, piuttosto che i parametri fisici dei sedimenti.

La figura 4.1 propone la disposizione della superficie impermeabile artificiale dell'area di progetto, le fognature che drenano le acque meteoriche e/o gli eventuali sversamenti accidentali di sostanze idroinquinanti si fossero verificati nella storia produttiva di Suprema.

La contaminazione nell'insaturo si distribuisce nella porzione settentrionale ed orientale dell'area di progetto.

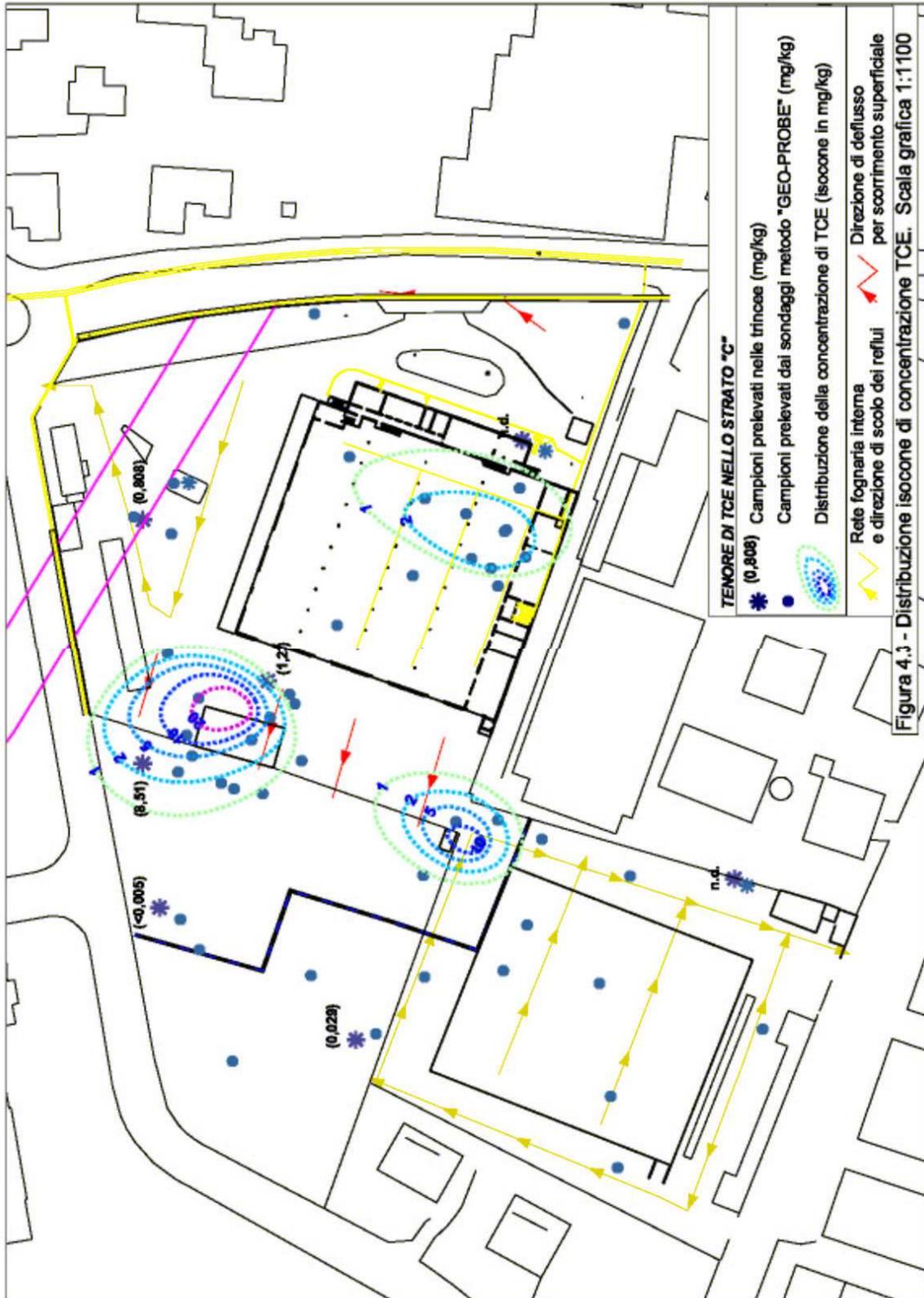
Assumendo i valori di inquinamento (D.M. 152/2006) più restrittivi (verde pubblico) l'intera superficie del capannone settentrionale, del relativo piazzale e del magazzino risulta contaminata.

Il limite dell'area in cui l'insaturo è contaminato fuori del piazzale, verso occidente, e verso meridione, riscontrato con i campioni prelevati, è riportato nelle figure 4.2 e 4.3.

Assumendo invece i valori di legge (D.M. 152/2006) meno severi (commerciale ed industriale), più consoni all'area settentrionale in cui si propone la realizzazione di un edificio a destinazione commerciale, le delimitazioni per i due contaminanti riscontrati: TCE e PCE, risultano quelle delle corrispondenti isocone di figura 4.2 e 4.3. Solamente per il capannone meridionale restano validi solamente i valori più restrittivi, comunque assunti.







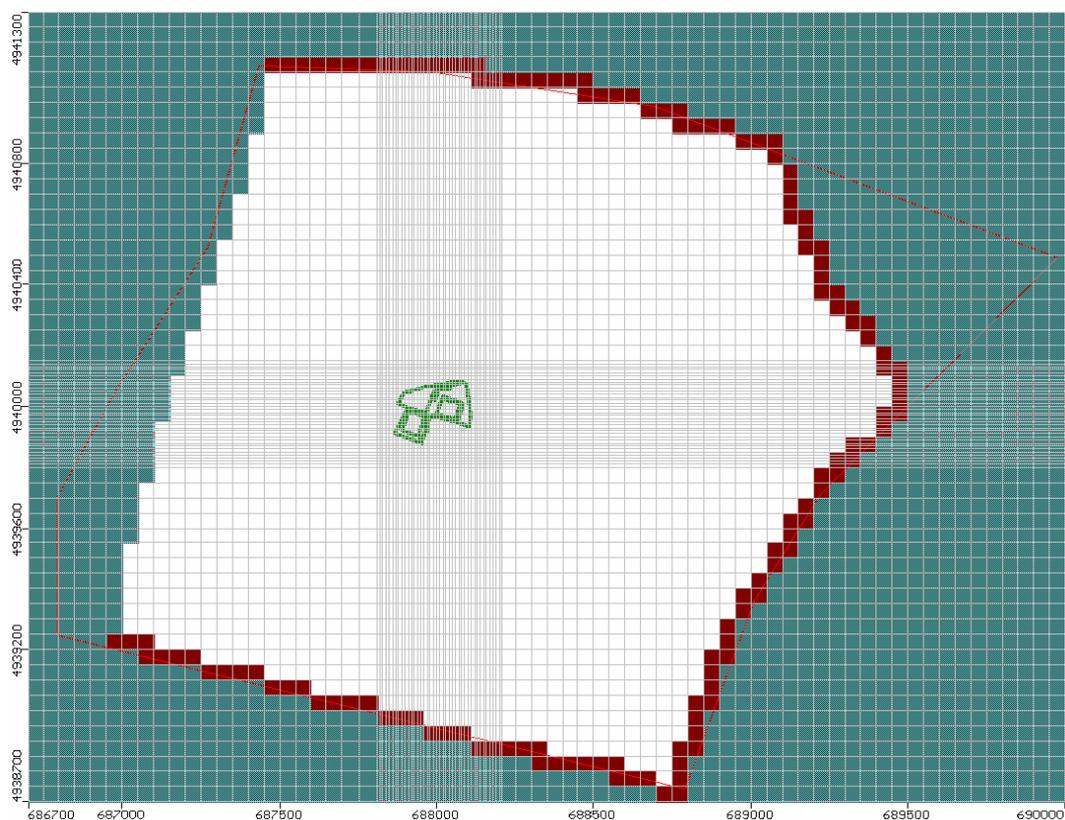
### **1.4.3 Contaminazione falda, il modello di trasporto**

Per studiare la contaminazione della falda si è elaborato un apposito modello idrogeologico di simulazione ricorrendo a “MODFLOW” del Servizio Geologico degli USA, che rappresenta il modulo centrale del programma di calcolo alle differenze finite. Le interfacce utilizzate sono due: “Visual modflow 3.1” della Waterloo idrogeologic (Canada), e <Groundwater Vistas 3> di McDonald M.G., Harbaugh A.W. In entrambe i programmi si sono associati i moduli che consentono di stimare il trasporto della contaminazione in falda.

Per la concettualizzazione del sistema fisico che si vuole rappresentare è necessario considerare una superficie assai più grande di quella per cui verranno effettuate le simulazioni. Infatti sarebbe necessario estendersi fino a comprendere “limiti idrogeologici” oggettivi del Sistema, nel nostro caso si è considerata un’area di circa 4,5 km<sup>2</sup> con l’area di studio al suo centro.

Le condizioni al contorno sono state imposte al limite est lungo il corso del Canale Navile (drenaggio), verso nord (oltre la trasversale di pianura) seguendo le linee equipotenziali, verso sud al limite sono state imposte condizioni ricavate dal campo di moto del freatico.

In figura 4.5 sono riportati i limiti imposti al sistema e la griglia di discretizzazione utilizzata (66 colonne e 60 righe): ogni cella quadrata (50x50 metri) contiene ed uniforma i dati idrogeologici che gli vengono attribuiti cella per cella o per poligoni. Si nota immediatamente che le celle sono state costruite con due diverse densità: l’area più nota e di maggiore interesse (Suprema ed il suo immediato intorno) ha un grande dettaglio (celle di 10x10 metri), l’area esterna fino ai limiti del modello ha invece un grado di dettaglio minore. Questa scelta corrisponde anche al diverso grado di conoscenze in nostro possesso.



*Fig. 4.5 – Area di modellizzazione. Reticolo di discretizzazione, in rosso la linea di imposizione delle condizioni idrogeologiche al contorno*

La zona considerata attorno a Suprema è tanto ampia da poter ritenere pressoché nulle le influenze delle condizioni al contorno imposte per delimitare l'ambito di simulazione.

Per ottenere una simulazione aderente al contesto idrogeologico locale, si sono schematizzati nel modello tre strati, uno corrispondente agli strati litologici da A a D, uno corrispondente allo strato E (dotato di conducibilità orizzontale e verticale molto variabile), ed infine uno corrispondente allo strato F.

Nel modello si sono riportati anche i limiti fisici laterali dei corpi più marcatamente sabbiosi, in forma di ambiti di espansione dei paleoalvei, con le variazioni di conducibilità, come rappresentato

nelle figure 4.7 e 4.8.

Il modello è stato tarato considerando un regime di flusso stazionario poiché, in assenza di informazioni certe relative alle variazioni stagionali dei livelli, in particolare quelle degli anni in cui è avvenuta la contaminazione, il regime stazionario medio permette di ricostruire, in linea teorica, l'andamento atteso del flusso sotterraneo.

Quindi si è considerata la sintesi dei rilevamenti freaticometrici più recenti, eseguiti nell'area vasta, come l'andamento di flusso medio della falda freatica, e lo si è utilizzato come "condizione iniziale" del campo di moto implementato in regime stazionario.

Siccome poi la geometria del campo di moto presenta alcune variazioni sostanziali tra magra e piena, ed in particolare considerando che da circa un anno si permane in condizioni di magra, si sono apportate le opportune modificazioni al modello prefigurando due diverse configurazioni geometriche delle piezometriche.

Per l'attribuzione dei parametri idrogeologici e strutturali ad ogni maglia del modello, e per ognuno dei tre strati ricostruiti, si è dapprima tentato di implementare i dati relativi ai punti di controllo (piezometri, pozzi) di cui sono noti sia la stratigrafia, sia le quote piezometriche, ed anche la conducibilità misurata.

Ma le informazioni disponibili formavano una maglia troppo rarefatta ed irregolare per poter essere utilizzate nella composizione del modello. Si sono quindi impostate prima grandi zone fondate sulla ricostruzione di sottosuolo (spessori acquiferi) e sulle geometrie delle isolinee (stima della trasmissività), poi si sono attribuiti valori medi tra le conducibilità note, per le zone in cui esistono informazioni misurate, oppure valori ricavati indirettamente per tutte le altre zone.

Successivamente si sono attribuite conducibilità alle maglie del modello, fino a raggiungere la migliore convergenza possibile tra le

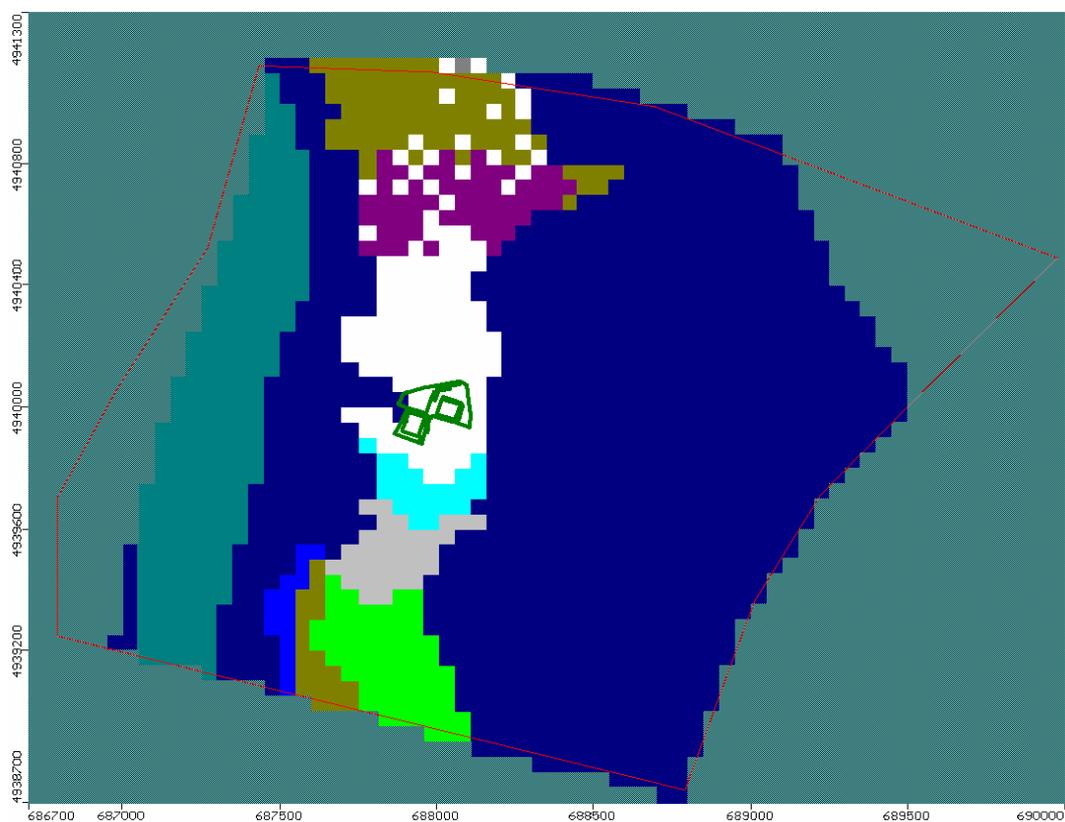
isolinee scelte per rappresentare le “condizioni iniziali” (rilevate direttamente), e quelle prodotte dal modello.

Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Active	Distribution Array
1	0.0002	0.0002	2E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	8E-5	8E-5	8E-6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	9E-6	9E-6	9E-7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	0.00025	0.00025	2.5E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	0.005	0.005	0.0005	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	0.0002	0.0002	2E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	0.0001	0.0001	1E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	0.0006	0.0006	6E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	1E-6	1E-6	1E-5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	5E-5	5E-5	5E-6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	0.0009	0.0009	9E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	0.0004	0.0004	4E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	1E-9	1E-9	1E-10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 4.6 – Legenda dei colori utilizzati per rappresentare i diversi valori di conducibilità assegnati nel modello idrogeologico (1° strato). Le  $k$  orizzontali ( $k_x$ ,  $k_y$ ) hanno il medesimo valore come dimostrato dalla geometria della depressione prodotta durante la prova di pompaggio che ha fornito una geometria quasi circolare.

Nelle figure 4.7 e 4.8 è riportata la zonizzazione del modello con i valori di conducibilità attribuiti agli strati D ed F, secondo le geometrie dei due alvei sovrapposti del Reno (§ 2), la zona esterna agli alvei veri e propri è stata trattata con valori medi di conducibilità desunti da prove (per lo più tipo Le Franc) effettuate durante i sondaggi.

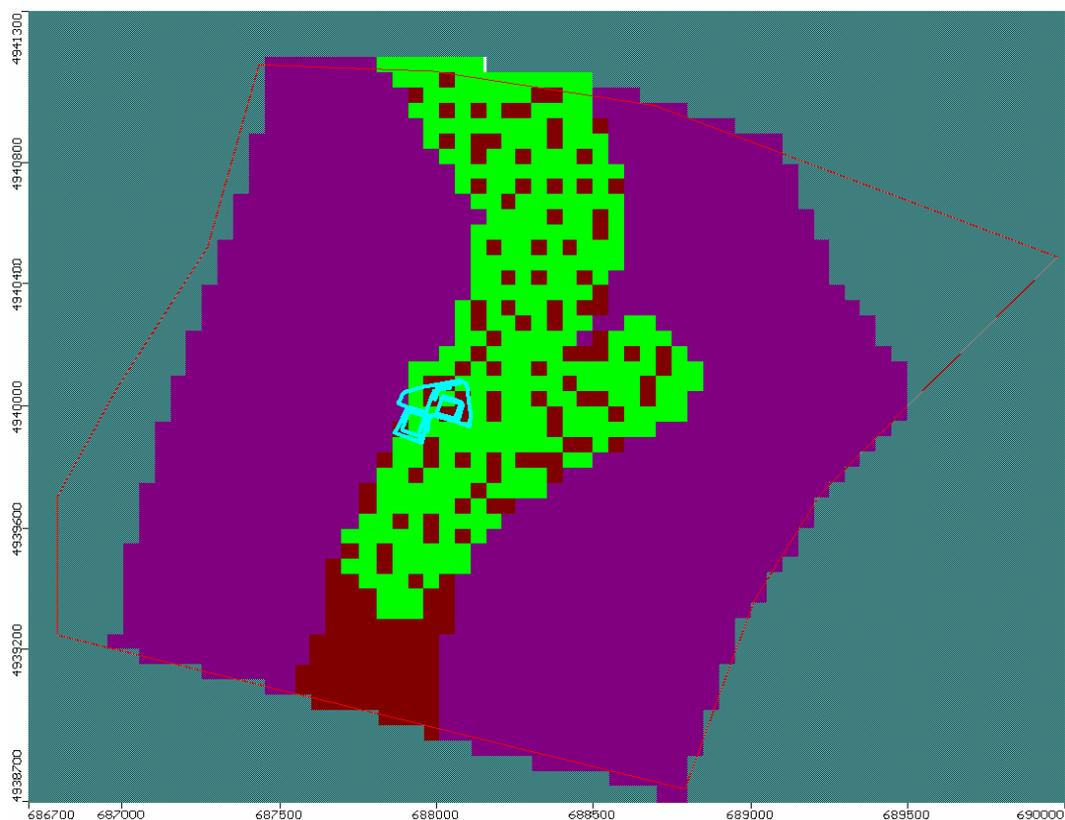
L’acquifero più profondo ha conducibilità maggiore, come risulta sia dalle prove in sito sia dalla prova di pompaggio, le variazioni di  $k$  in direzione nord per entrambe gli acquiferi sono congruenti con gli aumenti in matrice fine riscontrati nelle sabbie, la fitta alternanza dei valori (celle con maggiore e minore  $k$ ) rappresenta la



*Fig. 4.7 - Ricostruzione delle proprietà (conducibilità) del campo di moto nell'acquifero più superficiale (strato D).*

variabilità geografica dei corpi sabbiosi (barre) dispersi nei sedimenti dotati di maggiore quantità di matrice fine.

I due acquiferi, come già ripetutamente scritto, non sono compartimentati, lo strato E ha una permeabilità verticale comunque sensibile (drenanza), ed inoltre esistono zone in cui i due episodi sabbiosi sovrapposti vengono a contatto (fughe). Nel modello allo strato E sono stati attribuiti valori di conducibilità variabili tra valori inferiori di mezzo ordine di grandezza a quelli dell'acquifero superiore, per le zone di fuga accertate (PZ1A, BR1) e le loro parti correlate; e valori inferiori di un ordine di grandezza per le zone di drenanza in cui è presente un intervallo meno permeabile di spessore superiore al metro.



*Fig. 4.8 – Ricostruzione delle proprietà (conducibilità) dell’acquifero più profondo (strato F).*

La costruzione del modello ha risentito di semplificazioni legate tanto alle incertezze conoscitive per un’area così ampia, quanto alle difficoltà di simulazione del passaggio di una linea spartiacque nella sua parte centrale.

Le condizioni di convergenza con il campo di moto sono state raggiunte lavorando in parte sugli spessori degli acquiferi, ed in parte sulle conducibilità, sempre rispettando i dati ottenuti dalle prove e dalle misure dirette.

Il diverso comportamento nelle condizioni di “piena” e di “magra” del freatico sono state raggiunte di fatto realizzando due modelli relativi ai due diversi stati stazionari della falda.

In questo modello idrogeologico sono state introdotte le condizioni

di trasporto per i contaminanti clorurati, mentre le possibilità di decadimento del PCE, TCE, VC (vinile) non sono state impostate, a causa delle consuete difficoltà di conoscenza diffusa dei parametri che controllano i processi autodepurativi e di complessazione che avvengono nella matrice solida del sedimento, tra questi ad esempio l'adsorbimento.

La simulazione del trasporto in falda è stato così eseguito in condizioni fortemente cautelative, cioè presupponendo che non abbiano alcuna influenza i fenomeni autodepurativi.

In questo senso non si sono utilizzate neppure le misure relative alla sostanza organica, rinvenuta in tutti i sondaggi, perché in realtà i punti di conoscenza sono troppo rarefatti e le correlazioni troppo incerte, per poter essere ragionevolmente utilizzate.

Così l'unica variabile nel tempo è quella relativa al decadimento dei solventi, mentre per le equazioni di trasporto, oltre alle variabili idrodinamiche già utilizzate nel modello, si sono inseriti i seguenti parametri:

- dispersività (dispersività longitudinale: in genere 50 – 200; trasversale / longitudinale: 0,25 ; verticale / longitudinale);
- zona di alimentazione della contaminazione alla falda: l'intera porzione di insaturo inquinato, comprendente tutti e tre i focolai;
- entità della contaminazione: alle celle dell'area di alimentazione sono stati attribuiti tenori differenziati di PCE secondo i risultati ottenuti dalla campagna di caratterizzazione dell'insaturo, fino ad ottenere risultati prossimi a quelli delle analisi delle acque;
- tempo di contaminazione: 30 giorni consecutivi a flusso costante;
- step di simulazione dei tempi di decadimento, massimo 365 giorni.

Un ulteriore limite della simulazione è costituito dal fatto che nella

realtà la contaminazione è avvenuta con modalità pulsanti (focolaio principale, FC1), o sporadiche (focolaio magazzino, FC2) nell'arco di almeno tre decenni, oppure solo negli anni (o mesi?) immediatamente precedenti la dismissione (focolaio FC3), e si è interrotta alla cessazione delle attività (circa sei anni fa).

Una simulazione delle diverse condizioni originarie non è pensabile sia per le imprecisioni relative alle date ed alle modalità di contaminazione, sia per la carenza di informazioni sullo stato di fatto idrogeologico all'epoca.

Il modello di trasporto è stato quindi realizzato (e non poteva essere altrimenti) per le condizioni attuali: la contaminazione della falda è dovuta allo stillicidio, attraverso la frangia capillare, dei solventi clorurati accumulati nell'insaturo e provenienti dai focolai riscontrati.

Nell'ultimo anno non si sono mai riscontrate condizioni di piena del freatico, solamente alla fine del mese di maggio si è verificato un leggero incremento (poco più di 10 cm) nelle freatimetrie, rispetto al mese precedente. Le condizioni di piena sono state quindi simulate in base al campo di moto rilevato negli anni precedenti in un ampio intorno dell'area di progetto. Le condizioni di magra, invece, sono state impostate sullo stato di fatto interno a Suprema, e su quello rilevato nei pozzi freatici esterni.

Le simulazioni effettuate si sono fondate sulle condizioni sia di piena, sia di magra, ovviamente con apporti dallo stillicidio dall'insaturo di entità differente. Resta implicito che l'apporto alla falda sarà maggiore in condizioni di risalita del freatico e di filtrazione dalla superficie, e che le variazioni locali del campo di moto inducono diverse caratteristiche del trasporto dei contaminanti. Il grado di convergenza raggiunto con le misure ottenute ai punti di controllo è modesto, soprattutto nelle condizioni di magra, ma bisogna tenere presente che i tenori misurati nei pozzi e nei piezometri sono anch'essi molto variabili,

in particolare quando le cadenti idrauliche sono così modeste e le velocità prossime allo zero.

La figura 4.9 riassume una prima serie di simulazioni effettuate considerando una immissione in falda di contaminanti provenienti dall'insaturo con modalità areali, differenziando però i tenori secondo le risultanze della lunga campagna di caratterizzazione dell'insaturo.

Alle celle del modello corrispondenti ai tre focolai si è imposto di immettere maggiori quantità di PCE (FC1 = 0,5 g/l; FC2 = 0,2 g/l; FC3 = 0,1 mg/l) rispetto alla superficie interposta tra i focolai (0,05 g/l). Si è ricercata la configurazione equiparabile a quella dei campioni di gennaio 2007, la più prossima è quella riportata nei due riquadri in alto della figura 4.9. La plume dopo un anno di tempo (in condizioni di magra) si è spostata pochissimo, la dispersività ha agito ampliando la superficie interessata verso nord e verso est, il grado di diluizione è modesto. Certo la convergenza è molto parziale: i tenori ottenuti dal modello sono più elevati di quelli riscontrati: BR1 74 µg/l rilevato, 140 µg/l modello; BR2 2,8 µg/l rilevato, 80 µg/l modello; PZ1B 4,3 µg/l rilevato, 40 µg/l modello; BR3 0,5 µg/l rilevato, maggiore di 20 µg/l modello; BR4 1,4 µg/l rilevato, maggiore di 20 µg/l modello; solo PZ1A mostra un valore coerente con il modello circa 120 µg/l.

Una parziale convergenza con i dati ottenuti dai campioni di ottobre 2006 e marzo 2007, all'interno dell'area di Suprema si è ottenuta solamente imponendo alle celle del modello, per 30 giorni consecutivi, tenori di PCE di 30 g/l nel solo focolaio FC1: Si è supposto cioè che una pioggia insufficiente a provocare la risalita del freatico o infiltrazione dall'alto generalizzata, abbia invece concentrato acqua allo scarico fognario (focolaio FC1). In questo caso, rappresentato nei due riquadri in basso della figura 4.9, a un anno dalla contaminazione, si hanno valori attorno ai 2000 µg/l, ma per ottenere questo risultato tutti gli altri pozzi presentano valori

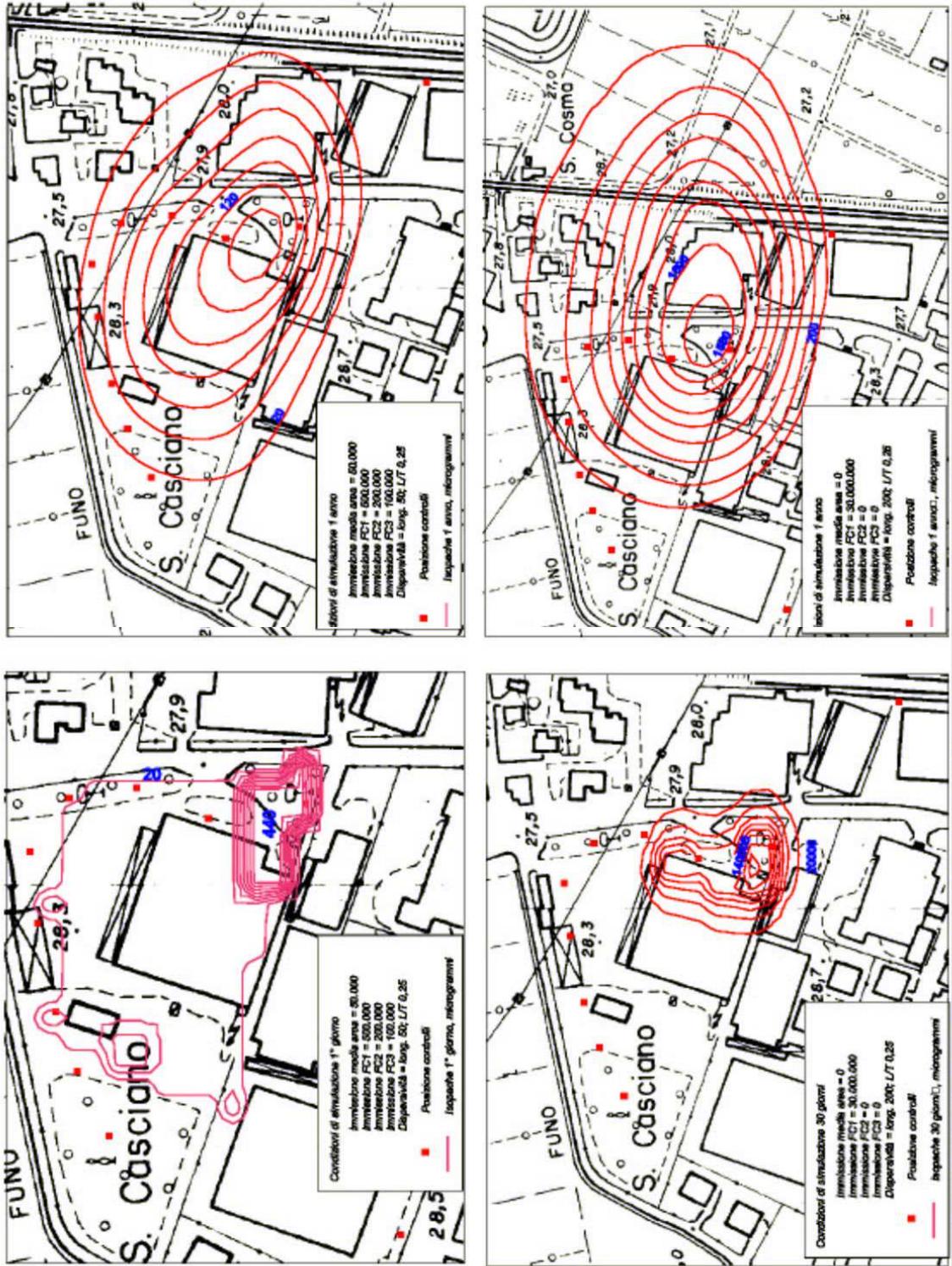


Fig. 4.9 - Esiti del modello di trasporto, per condizioni di inagria del freatico. Nei due riquadri superiori si è imposta una emissione alta e concentrata in PCT. Nei due riquadri inferiori si è imposta emissione differenziata dell'intera area, nei due riquadri inferiori si è imposta una emissione alta e concentrata in PCT.

decisamente minori rispetto a quelli teorici del modello: BR1 365 µg/l, 1.600 µg/l modello; PZ1B 230 µg/l, 600 modello; BR3 70 µg/l, circa 400 modello. Anche in questo scenario sono rispettati gli andamenti, ma non i valori in quanto tali.

Anche esternamente all'area di sedime di Suprema si sono avuti riscontri solo di tendenza: il PZ9, ed il PE1 (figura 3.2) hanno fornito tenori nulli, oppure appena tracce, a fronte di valori di poco inferiori a 200 µg indicati dal modello. D'altro lato, il modello non può schematizzare una serie di situazioni estreme: 6 anni di assenza di immissioni, ben oltre un anno di siccità e quindi magra della falda, in questo senso i risultati ottenuti appaiono ragionevolmente convergenti.

Si conclude che, in condizioni di magra della falda, la plume ha uno sviluppo molto modesto e spostamenti verso est e verso nord modesti; le immissioni, in occasione delle sporadiche occasioni di relativo innalzamento della falda o di filtrazione dalla superficie, soprattutto in corrispondenza del ramo di fognatura che collega il capannone settentrionale con il collettore comunale, sono dell'ordine di 30 g, mentre in regime di magra spinta non superano i 0,5 g. La simulazione del trasporto in condizioni di piena è stata realizzata, come già scritto, impostando il modello sui dati rilevati negli anni precedenti nei pozzi freatici di un amplissimo intorno del sito in esame.

La figura 4.10 riassume il miglior esito ottenuto da molteplici tentativi fatti per ottenere la migliore convergenza con i dati chimici di tabella 3.3. Le condizioni di piena del freatico sono caratterizzate da cadenti piezometriche maggiori e quindi anche da velocità più elevate.

In questo caso le condizioni di immissione del contaminante sono state predisposte, sempre per 30 giorni consecutivi, ma ovviamente solo sull'intera superficie contaminata, con tenori differenziati secondo i focolai (indicati nelle legende dei riquadri), a un anno la

plume che ne deriva è diretta verso nord, più ampia e lunga della precedente.

Nella figura 4.10 sono riportate le condizioni di sviluppo della contaminazione a 1 giorno, a 30 giorni ed infine a 1 anno di tempo. Si può presumere che le condizioni di piena siano quelle in cui il freatico si innalza (ovviamente su tutta l'area) e assorbe direttamente dai sedimenti contaminati il PCE in quantità rilevanti. La configurazione a 30 giorni è quella in cui si sono ricercate le convergenze per l'area interna a Suprema (per quanto possibile, poiché mancano i dati relativi ad una certa e conclamata situazione di piena). Mentre la configurazione a 1 anno è quella considerata per verificare l'estensione dell'area potenzialmente inquinata esternamente a Suprema.

Il riquadro basso a sinistra (30 giorni) della figura 4.10, riporta tenori compatibili con quelli rilevati in PZ1A ed in BR1, mentre per BR2, PZ1B, BR4 e PZ2 i valori del modello sono assai più elevati di quelli rilevati.

Lo sviluppo di 1 anno del plume (riquadro grande) mostra uno spostamento considerevole della zona a maggior contaminazione; la dispersività longitudinale, impostata con 200, è cautelativa.

I piezometri esterni (fig.3.2) più prossimi PZ8 (collocato vicino alla biblioteca comunale) e PZ9 (in destra di via Galliera, ma arretrato rispetto al limite del plume) hanno fornito risultati nulli (tab. 3.3), mentre i pozzi freatici PE1 e PE3 hanno dato la presenza di tracce di PCE, sia pure entro i limiti di legge, confermando lo sviluppo del plume in condizioni di piena.

In conclusione, per ottenere distribuzioni geografiche paragonabili a quelle risultate dal campionamento delle acque, occorre che l'immissione di PCE in condizioni di piena della falda sia 4 volte superiore ( $200.000 \mu\text{g}$ ), rispetto a quella imposta per le condizioni di magra ( $50.000 \mu\text{g}$ ) nelle celle generiche, e doppia o più che doppia per le celle dei focolai (FC1, FC2, FC3).



Fig. 4.10 - Risultati del modello di trasporto per le condizioni più causticative (piena del freati a 1 giorno, 30 giorni, e dopo un anno dall'iniezione).

I risultati ottenuti mostrano, ad un anno dall'avvenuta contaminazione, un'ampia area investita dal PCE, verso nord lungo via Galliera.

La verifica del TCE e VC per la configurazione di piena è riportata nella figura 4.11. Come si vede la geometria complessiva della plume si mantiene pressoché inalterata, variano solo i tenori del vinile che sono di un ordine di grandezza più bassi.

Il confronto con i risultati delle analisi dei campioni d'acqua prelevati entro l'area Suprema mostrano una certa coerenza solo con il BR3 3,06 µg/l (tabella 3.3), a fronte dei circa 2 µg/l ottenuti dal modello, mentre per PZ1A, PZ1B, BR1 il modello attribuisce valori di vinile che non risultano all'analisi dei campioni.

Il PZ2, che è sempre risultato nullo, alla verifica del 14 marzo (tabella 3.3) ha mostrato presenza di 2 microgrammi di tri e tetracloro, e per la prima volta 3 µg/l di cloruro di vinile.

Questo è 6 volte superiore al tenore calcolato del modello (0,5 µg/l).

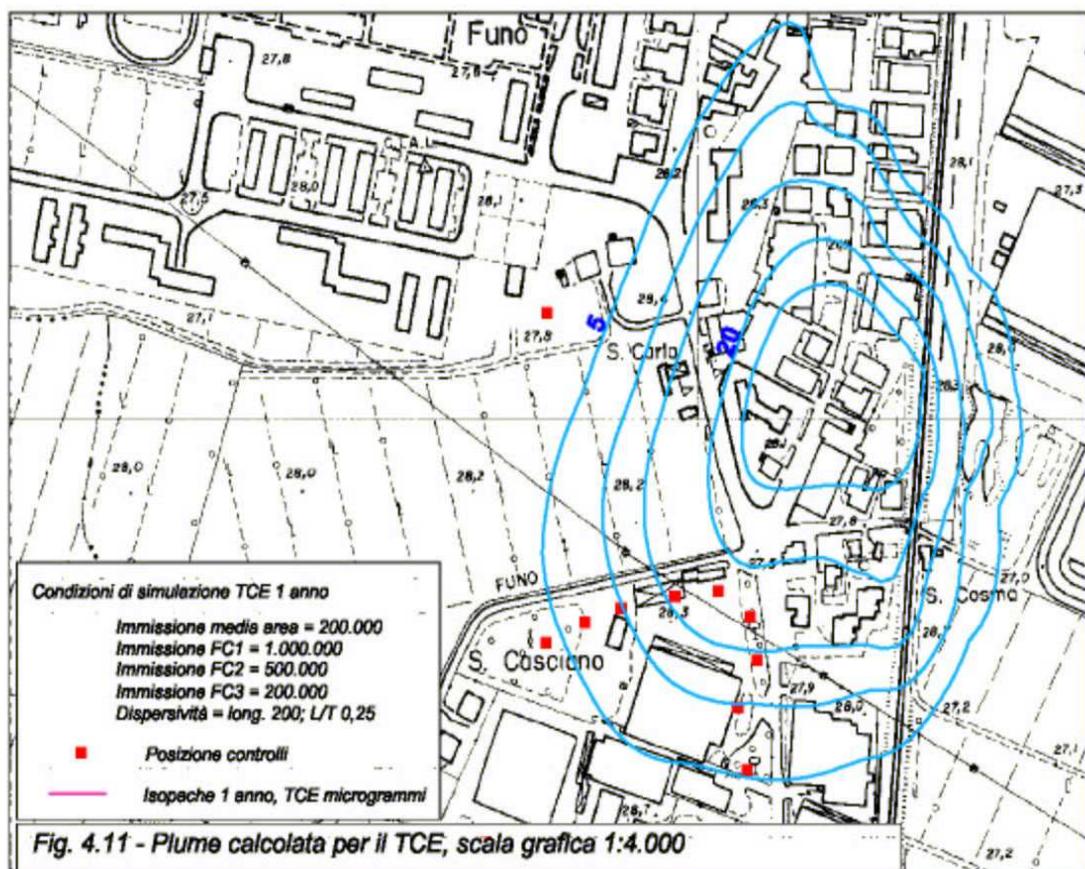
Nella ricerca della convergenza del modello con i risultati delle analisi chimiche delle acque, oltre alle citate semplificazioni dovute a carenze informative fisiche ed idrodinamiche, bisogna pensare al fatto che i risultati delle analisi su campioni assunti dal medesimo piezometro a distanza di qualche giorno forniscono risultati spesso considerevolmente diversi.

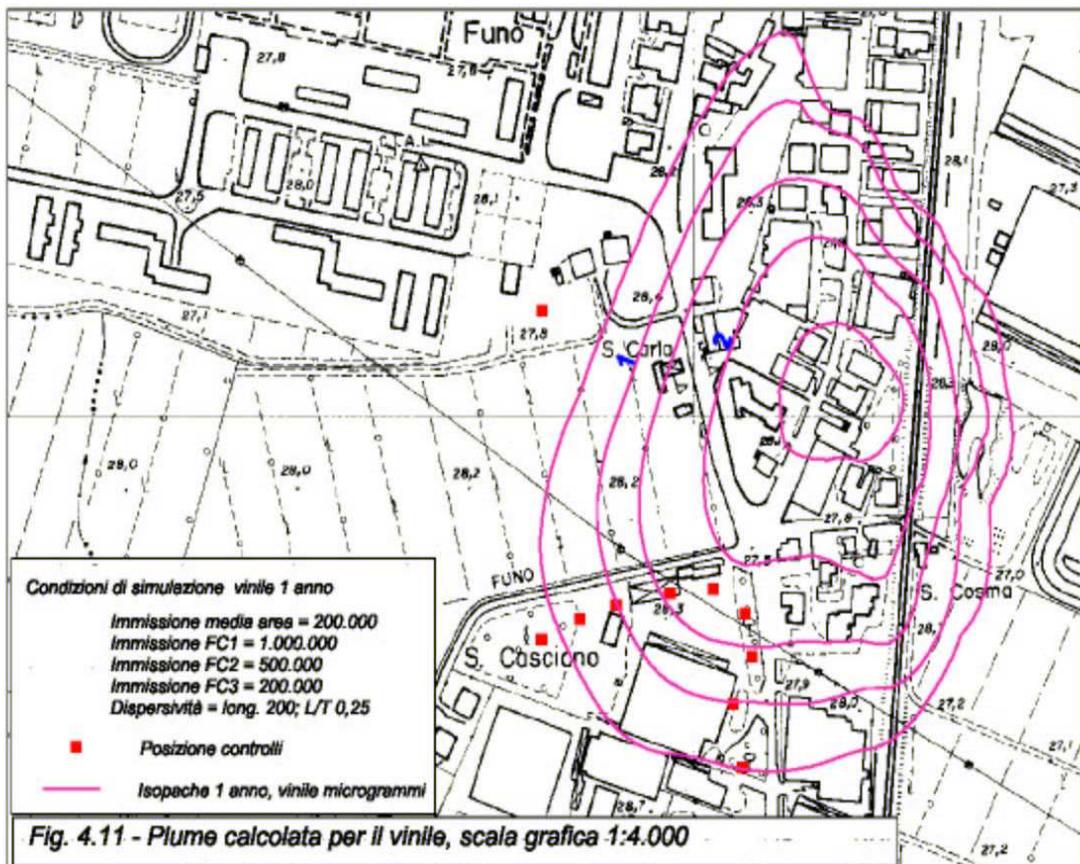
In tutti i casi il grado di convergenza ottenuto appare sufficiente, almeno per l'interno dell'area, e dimostra la validità dei limiti di contaminazione assunti.

Tutti i piezometri esterni all'area di ex Suprema (PZ8, PZ9, PZ11) hanno mostrato assenza di contaminazione da solventi clorurati, solamente la campagna di campionamento nei pozzi freatici lungo via Galliera ha fornito tracce della presenza di PCE.

La verifica dell'attuale stato di contaminazione della falda richiede la realizzazione di un ulteriore piezometro collocato nella frazione

di S. Cosma, interessata dalla plume in tutte le condizioni di falda. Il nuovo piezometro avrà importanza fondamentale, oltre che per verificare la plume ricavata dal modello di trasporto, soprattutto per controllare i tenori di contaminazione in uscita dall'area di studio durante le operazioni di bonifica. Queste infatti sollevando artificialmente la quota piezometrica con l'immissione di aria direttamente in falda (air sparging), oppure con la depressurizzazione dell'insaturo (SVE), determina condizioni locali che simulano la piena del freatico.





#### 1.4.4 Ampiezza aree contaminate

L'ampiezza dell'area contaminata da solventi clorurati per l'insaturo, come risulta dagli esiti dei campioni SS3, tr1, tr2, tr5, S16, T2, S23, SS1, è contenuta verso ovest e verso sud entro la linea riportata in figura 4.12.

L'ampiezza dell'area interna a ex Suprema, in cui la falda risente della contaminazione da solventi clorurati ha in sostanza la medesima delimitazione, vista per l'insaturo, verso ovest e verso sud come dimostrano sia gli esiti dei campioni raccolti in PZ4 ed in PZ2, sia le direzioni di deflusso del freatico, sia il fatto che la falda contaminata libera vapori che, in presenza di piazzali impermeabili, si arrestano inevitabilmente entro l'insaturo contaminandolo, e

quindi questo diviene un discreto tracciante.

L'ampiezza dell'area esterna a ex Suprema, in cui si presume che la falda sia contaminata, nelle condizioni peggiori (stato di piena del freatico), è delimitata dal plume di figura 4.10 terzo riquadro, e dal plume ristagnate (condizioni di magra prolungata del freatico) rappresentato nel secondo riquadro di fig. 4.9. In conclusione (fig. 4.12) l'area di contaminazione esterna comprende parte di Funo, lungo via Galliera, con limite verso ovest dalla congiungente biblioteca comunale (PZ8 privo di contaminazione) PZ2; verso sud dal PZ9 (privo di contaminazione); verso est da una ristretta fascia territoriale oltre la ferrovia fino al confine con la porzione più occidentale del Center Gross.

La localizzazione del nuovo piezometro di S. Cosma, verificata l'impossibilità di realizzarlo entro le proprietà confinanti, richiederà la rottura di una porzione di sede stradale asfaltata per le necessaria verifica delle infrastrutture a rete sotterranee. La realizzazione avverrà prima dell'attivazione della bonifica.

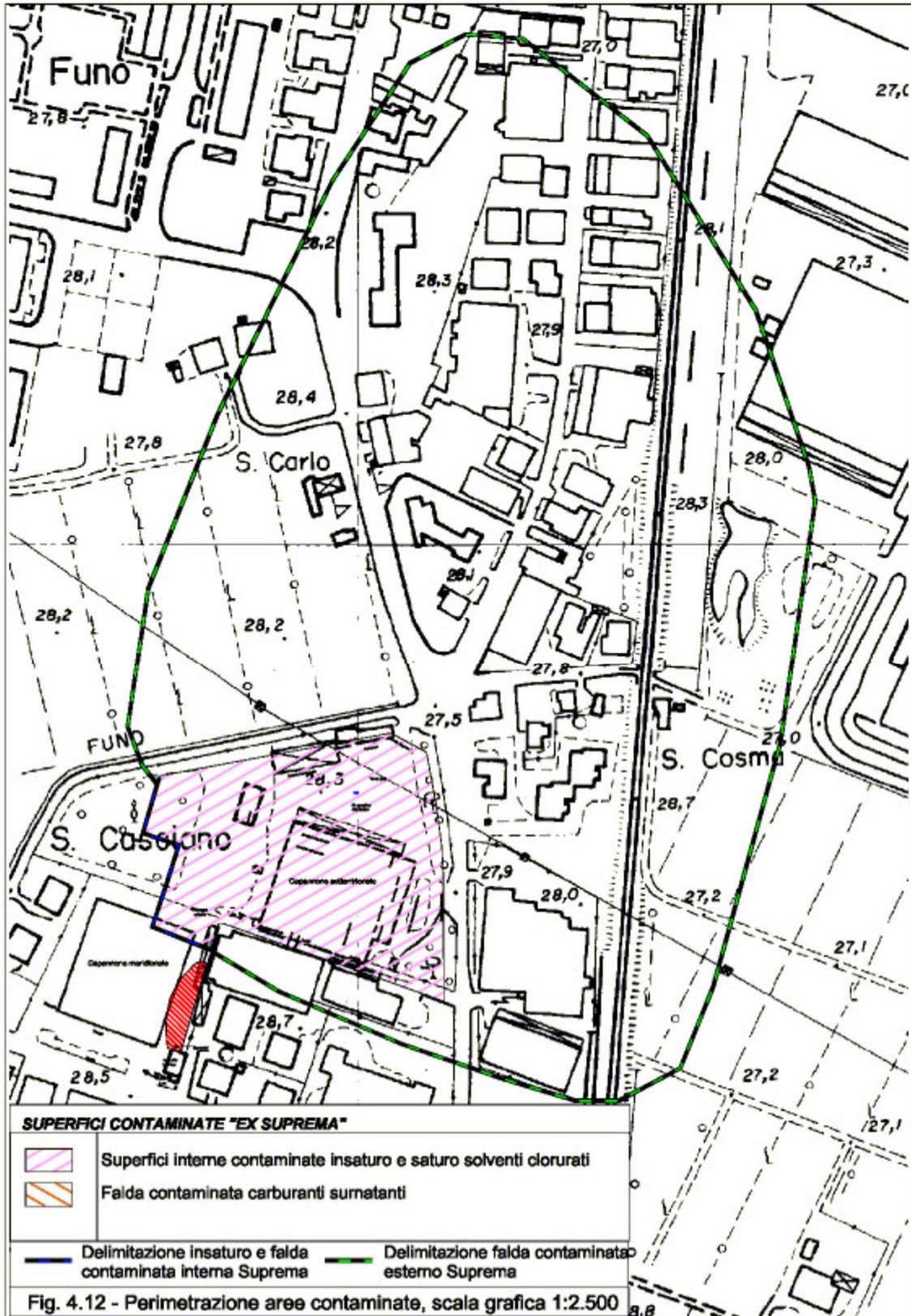
Entro il sito, oltre l'ampia area interessata dall'inquinamento da solventi clorurati, si è verificata la rottura dei serbatoi di carburante per riscaldamento del capannone meridionale. I serbatoi, che erano stati a suo tempo svuotati ma, evidentemente, non bonificati, sono rimasti almeno 6 anni alla corrosione, e dai fori nel fondo è circolata acqua durante le precipitazioni meteoriche. Durante le fasi di piena della freatica la zona capillare probabilmente entrava a contatto con queste acque facendole lentamente defluire dalle cisterne.

All'atto dell'estrazione dei serbatoi essi contenevano circa 30 centimetri di acqua fortemente inquinata di idrocarburi e le sabbie di riempimento laterale della fossa di scavo erano imbevute di acque ed idrocarburi. Raccolta e smaltita correttamente l'acqua inquinata, stoccate le sabbie inquinate e campionate per definirne tipo e tenori di contaminazione, si è dovuto riempire con parte delle

sabbie estratte, ma non inquinate, lo scavo per evitare possibili lesioni alla recinzione della proprietà la cui fondazione era rimasta scoperta.

Si è poi proceduto a realizzare due piezometri PZ7 e PZ10 (tavola 1) in successione verso nord ed a campionarne la porzione surnatante con semplice bailer. Sulle acque si è richiesta; come già per i campioni di terre, BTEX, analisi degli idrocarburi C<12 e C>12 con speciazione, utilizzando TPHCWG (Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group).

Gli esiti, riportati in tabella 3.3, mostrano la veloce cadente dei tenori di contaminazione che documentano la delimitazione verso nord della plume degli idrocarburi riportata in figura 4.12. La presenza di strutture portanti (pesa, canali in cemento di servizio alla stessa, fondazioni del capannone, fondazioni della recinzione) dovrebbero aver limitato l'estensione della contaminazione.



## **CAPITOLO 2**

### **PROGETTAZIONE DELLA BONIFICA**

#### **2.1 CONTAMINAZIONE DA ALIFATICI CLORURATI**

La caratterizzazione ha evidenziato la presenza di solventi clorurati nel suolo e nella falda diffusi sostanzialmente in tre focolai principali, denominati rispettivamente:

- FC1, corrispondente al capannone di Suprema, in particolare alla zona di collaudo e verniciatura in cui si sono riscontrate le maggiori concentrazioni nel suolo. I campioni prelevati indicano una diffusione della contaminazione relativamente ampia, ma con concentrazioni in rapida diminuzione a partire dai collettori fognari disposti sotto la pavimentazione in cemento armato. La stessa fognatura conduce all'esterno, lungo il confine meridionale del sito, fino al tombino di ingresso nel collettore comunale. Le alte concentrazioni di alifatici riscontrati nella falda nel piezometro PZ1A scavato in prossimità della fognatura e del citato tombino documentano l'avvenuta contaminazione;

- FC2, corrispondente al magazzino di stoccaggio dei materiali per le lavorazioni industriali. L'analisi effettuata dimostra che la contaminazione dei suoli è distribuita all'esterno del magazzino sia sul lato ovest, entro l'area a prato, sia sul lato est, sull'ampio piazzale che separa il magazzino dal capannone Suprema, sia verso nord, ove tende a sfumare. La contaminazione si suppone sia avvenuta per accidentale rottura di qualche fusto di solventi durante le operazioni di spostamento dal magazzino verso il capannone, oppure all'interno dell'area del capannone negli anni in cui il

magazzino era costituito praticamente da una sola tettoia. La falda è contaminata verso nord come dimostrano le concentrazioni riscontrate nei pozzi frontali al focolaio stesso;

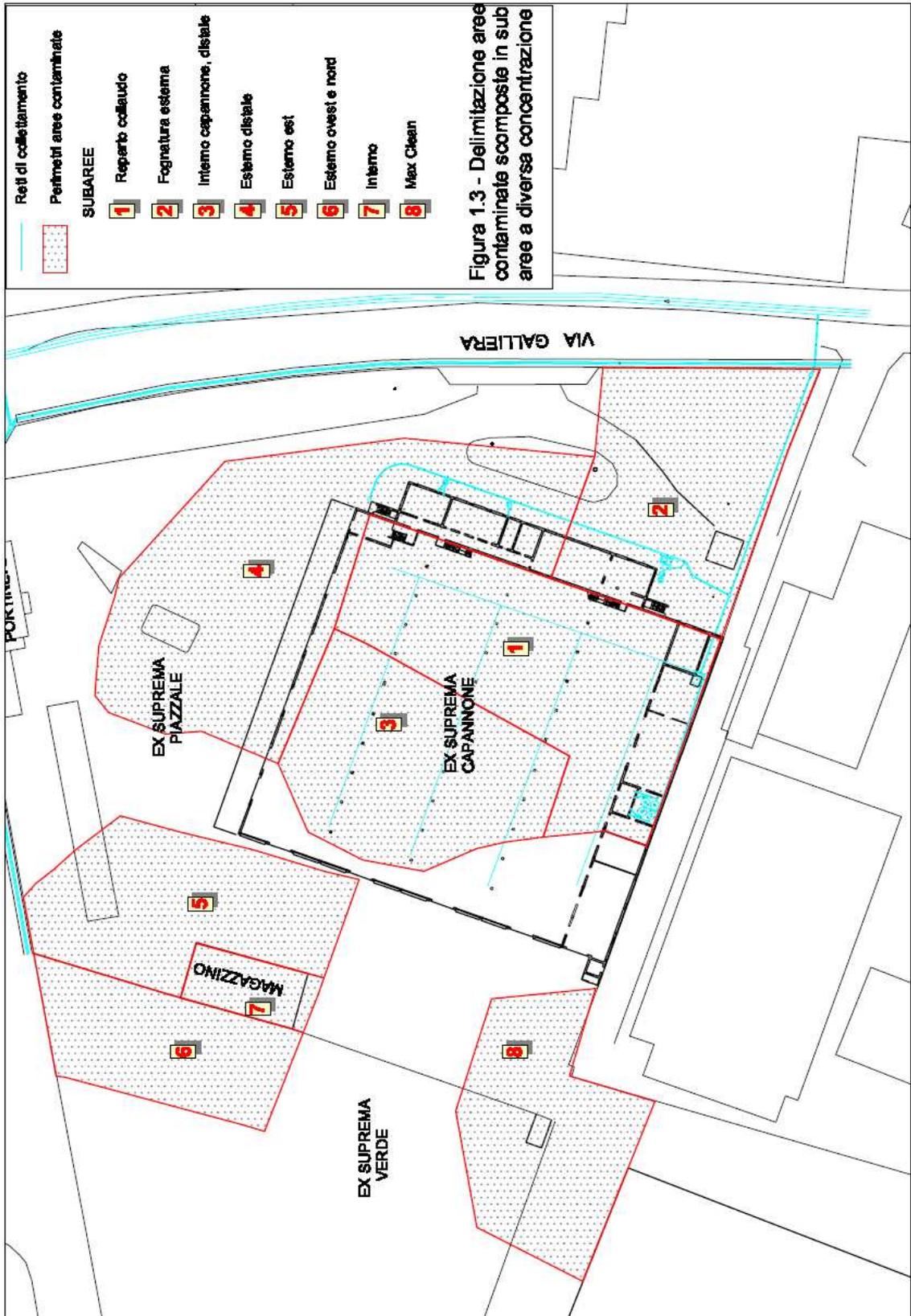
- FC3, corrispondente all'area immediatamente esterna al capannone della Max Clean verso nord. La contaminazione del suolo deve essere avvenuta nel periodo in cui Suprema aveva dimesso l'attività, ed il capannone della Max Clean era stato affittato per una produzione marginale di lavatrici. Il collaudo delle ultime macchine avveniva all'esterno, sotto una tettoia disposta nel piazzale immediatamente a nord del capannone stesso.

L'evoluzione paleo-geografica desunta dalla stratigrafia dimostra che la disposizione dei corpi sedimentari ha andamento circa da sud verso nord, le correlazioni e le estrapolazioni tra situazioni sedimentarie assimilabili ha quindi maggiore validità in questa direzione, più che in quella est – ovest.

In effetti i margini dei canali sabbiosi del Reno sono stati rinvenuti poco ad est della via Galliera (piezometro PZ9) e poco ad ovest dell'allineamento tra i piezometri PZ4 – PZ2, come dimostrano le stratigrafie stesse delle verticali di controllo.

Nella distribuzione delle tessiture risulta pertanto una discreta correlabilità tra FC2 ed FC3, mentre FC1 presenta caratteristiche tessiturali leggermente diverse.

Di questi tre focolai si sono ricostruite le possibili isocone per l'insaturo, attorno a queste si sono perimetrate superfici cautelative di dispersione delle concentrazioni, la disposizione a diversa profondità dei campioni prelevati ed analizzati e la ricostruzione delle geometrie dei corpi porosi sotterranei, hanno consentito di stimare le superfici contaminate (figura 1.3), i presumibili volumi di insaturo interessato dalla contaminazione, e di indicare le concentrazioni massime e minime riscontrate.



La tabella 2.1 riporta le dimensioni stimate.

Focolai	Sub aree	Superficie	Volume	Concentrazioni [g/kg]	
		[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	massime	minime
FC1	Collaudo - verniciatura	1769	7070	0,67	0,003
	Interno capannone, distale	1279	5116	0,04	0,001
	Fognatura esterno	1379	5510	0,14	0,015
	Esterno distale	2324	9300	0,01	0,001
FC2	Esterno ovest e nord	781	3220	0,135	0,007
	Esterno est	1117	4470	0,16	0,009
	Distale e interna	218	870	0,015	0,001
FC3		1060	4200	0,18	0,001

*Tab. 2.1 – Insaturo stima superfici e volumi contaminati e delle concentrazioni*

Le stime presentate sono certamente approssimate, ma sono state realizzate secondo criteri cautelativi, ancora più cautelative saranno le superfici interessate dalla bonifica. La valutazione delle concentrazioni medie presenti nei sedimenti insaturi è molto difficile da ricavare, sulla scorta delle sole informazioni puntuali dei campioni assunti, anche in considerazione delle forti variazioni riscontrate, non solo tra i punti di controllo, ma anche lungo la medesima verticale di campionamento.

Le concentrazioni verificate nei campioni di sedimento insaturo in un solo caso superano 0,5 g/kg, mentre in genere i valori massimi non superano 0,2 g/kg. Queste concentrazioni devono essere assai prossime a quelle reali per la discreta qualità della campionatura, eseguita con l'impiego di attrezzatura geoprobe a percussione, subcampionatore ed inserimento dell'aliquota di terreno nei "vial" preventivamente preparati con metanolo, e quindi con modesta perdita di VOC.

La valutazione è poi stata fondata su medie ponderali delle verticali note per le situazioni in cui si sono analizzati più campioni. I valori

di concentrazione riscontrati sono modesti rispetto a quella soglia possibile nel sedimento insaturo: in genere sedimenti sabbiosi permeabili possono "legare a se" (adsorbimento) composti organici fino a 3-5 l/m<sup>3</sup>, oppure 30 - 50 l/m<sup>3</sup> nei sedimenti limoso argillosi, poco porosi. In termini di concentrazione significa tenori dell'ordine di circa 2,5 g/kg nelle sabbie, e di 25 g/kg nei limi argillosi.

Solamente quando viene superata la saturazione residua del sedimento (capacità di ritenzione), il contaminante (densità superiore all'acqua) può cominciare a spostarsi in prevalenza lateralmente, altrimenti il suo spostamento, entro l'insaturo, è in sostanza verticale. Questo ultimo processo è tanto più accentuato dal modesto contenuto d'acqua dell'insaturo, dovuto alle coperture impermeabili, che incrementa il potenziale matriciale del sedimento.

In questa prospettiva, il fatto che le concentrazioni rinvenute siano sempre molto inferiori alla soglia di ritenzione, può far ragionevolmente reputare che lo spostamento della contaminazione nell'insaturo sia avvenuta verticalmente rispetto alle zone di probabile sversamento saltuario e ripetuto (fognatura), o saltuario accidentale (rottura di fusti).

La dispersione orizzontale riscontrata, indicata in tabella 1 con il termine "distale", può corrispondere a dispersioni di vapori rimasti imprigionati tra livelli meno permeabili del sedimento, o comunque sotto la copertura dei piazzali e delle pavimentazioni impermeabili. Giunti al mezzo saturo i solventi clorurati si muovono più lentamente perché alla frangia capillare devono possedere un carico idraulico superiore alla tensione di interfaccia, ed entro lo scheletro solido saturo perché devono spostare l'acqua per sostituirla mentre scende.

Il modello di trasporto, con le simulazioni di contaminazione effettuate, discute le possibili quantità originarie di alifatici

clorurati immesse e la possibile evoluzione e diffusione della contaminazione entro e fuori l'area del sito Ex Suprema. La convergenza, tra i risultati forniti dal modello di trasporto e l'esito delle analisi delle acque rilevate nei pozzi e nei piezometri, è stata modesta a causa sia dei molti anni trascorsi dalla dismissione dell'attività produttiva, sia a causa dell'impossibilità di ricostruire le condizioni reali di accadimento della contaminazione nel modello. Ad esempio è probabile che l'immissione nel suolo dei solventi sia avvenuta in quantità e

tempi tra loro anche molto diversi: lentamente e per molti decenni in FC1, sporadicamente ma con quantità concentrate in FC2, solo recentemente (fino a 6 anni

fa) in FC3, e con modalità differenti nei vari focolai.

Infine, nel modello di trasporto non sono stati introdotti parametri relativi ai processi autodepurativi e di complessazione che avvengono nella matrice solida del sedimento (ad esempio adsorbimento alla sostanza organica ben presente nei depositi sedimentari).

In tutti i casi, le massime concentrazioni rinvenute di PCE (3,1 mg/l), e di TCE (0,23 mg/l) sono comunque molto lontane dai tenori limite della solubilità in acqua, rispettivamente 150 mg/l e 3,1 mg/l, ciò dimostrerebbe che nel saturo, almeno in un raggio di circa 15 metri dai punti di controllo, non è presente contaminazione concentrata in fase libera.

L'area di dispersione della contaminazione nella falda risultante dal modello di trasporto (plume), comunque riferita al primo anno successivo alla simulata immissione nel saturo di alifatici clorurati in quantità variabili tra un massimo di 30 grammi ed un minimo di 0,5 grammi da ogni cella (10\*10 metri) e su aree relativamente estese, deve essere intesa come ampiezza dell'area di possibile primitiva contaminazione, e come zona su cui effettuare i controlli. Queste aree vengono assunte come riferimento della distribuzione

delle concentrazioni in falda.

I piezometri realizzati esternamente al sito contaminato, nella direzione di deflusso, indicano assenza di contaminazione, o concentrazioni di poco superiori al limite (2 µg/l), anche a poche decine di metri dal limite di proprietà del sito ex Suprema.

## **2.2 CONTAMINAZIONE DA IDROCARBURI**

Dopo lo svuotamento dei residui di fondo e la bonifica sono stati estratti due serbatoi di olio combustibile interrati in corrispondenza del locale caldaie del capannone Max Clean, immediatamente a sud del focolaio FC3.

I due serbatoi, dimessi ormai da molti anni, erano forati e parte degli idrocarburi ancora contenuti nel fondo erano fuoriusciti già prima della rimozione. La caratterizzazione ha messo in luce l'estensione verso nord di una contaminazione di estensione complessiva inferiore a 30 metri, che interessa la sabbietta di riempimento della trincea di alloggiamento delle cisterne ampia almeno 6 metri, e successivamente i sedimenti in posto per una lunghezza verso nord di circa 18 metri.

La trincea di alloggiamento delle cisterne era organizzata con fondo a platea di c.a., posto a 3,20 metri di profondità dal p.c., l'ampiezza della struttura non è stata controllata, ma è molto probabile sia continua anche sotto la pesa e giunga fino al perimetro esterno del capannone. Il riporto che manteneva in assetto le cisterne (sabbietta) estratte è stato suddiviso in due diversi cumuli, la sabbietta più superficiale, non contaminata, è stata rimessa nella buca dopo l'estrazione delle cisterne al fine di contrastare lo scalzamento del muro di recinzione della proprietà; la sabbietta contaminata, circa 14 m<sup>3</sup>, è stata invece stoccata dentro

al capannone stesso.

La contaminazione è pervenuta al tetto della falda dopo aver interessato la platea di fondazione, e dal freatico si è distribuita verso nord come surnatante per circa 18 metri dal bordo della fossa di scavo, verso est il pozzo freatico della proprietà confinante, posizionato circa 20 metri dal confine, non presenta tracce di idrocarburi; ad ovest le strutture profonde della pesa e del capannone Max Clean impediscono il rilevamento diretto. La modesta entità della contaminazione, e della sua estensione depone a favore della tesi di una modesta ampiezza dell'area interessata.

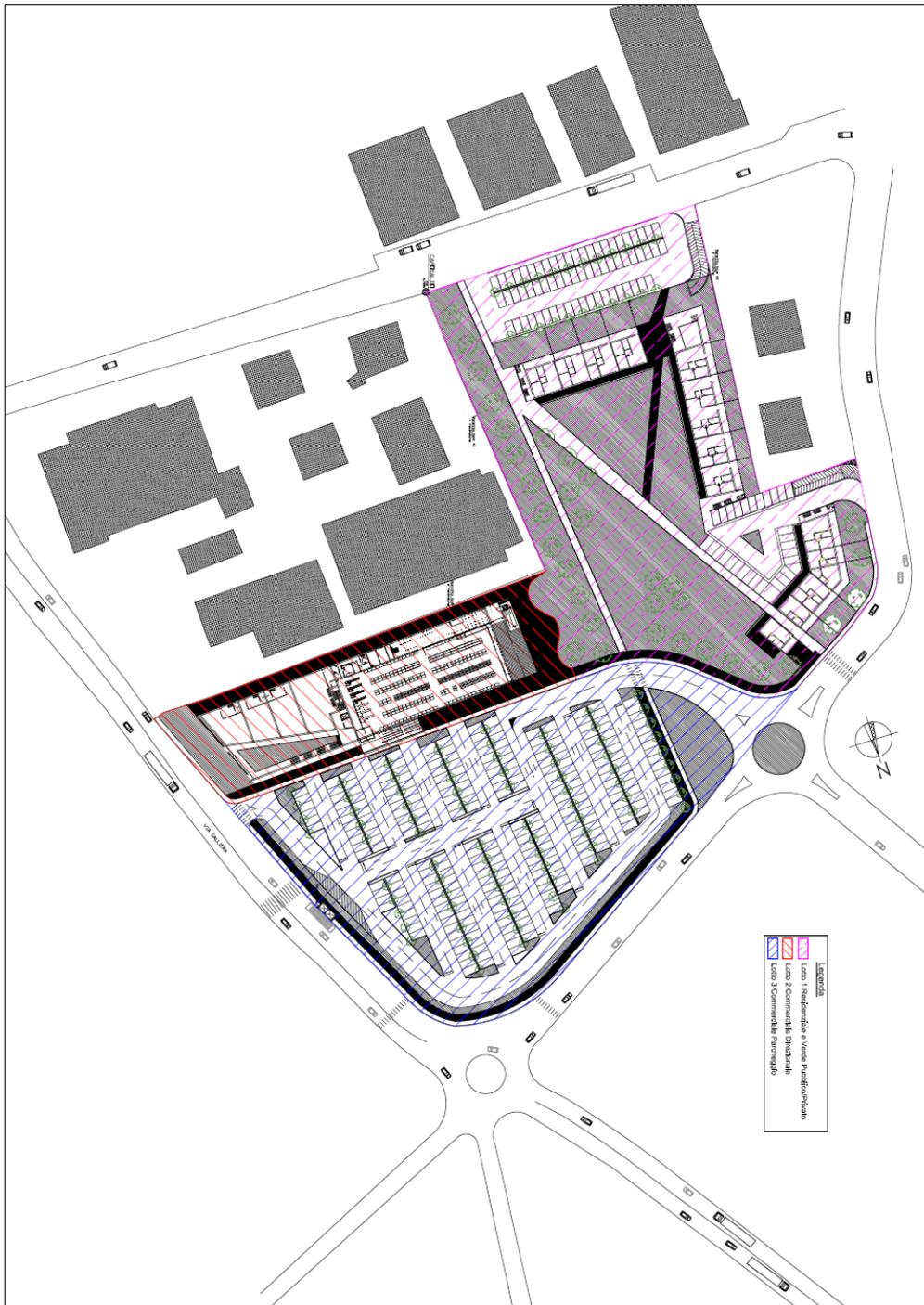
		Superficie	Volume	Parametro	Concentrazioni [mg/kg]	
Focolai	Sub aree	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]		massime	minime
FC4	Area sud	140	100	Xileni	<0.1	0.7
				C>12	1.4	2320
				C<12	<0.1	40.7

*Tab. 2.2 - Insaturo stima delle concentrazioni medie*

### **2.3 OBIETTIVI DI BONIFICA: RIASSUNTO DEI RISULTATI DELL'ANALISI DI RISCHIO**

L'Analisi di Rischio eseguita sul sito Area Ex-Suprema prende in considerazione 3 lotti individuati sull'area come da riqualificazione edilizia prevista, figura 2.1:

- Lotto Residenziale
- Lotto Commerciale/Direzionale
- Lotto Commerciale/Parcheggio



*Figura 2.2 – Ripartizione dell'area Ex-Suprema in lotti come da riqualificazione edilizia prevista*

Come da caratterizzazione di sito, nei lotti sono presenti, in diversi tenori, sostanze inquinanti nelle matrici suolo superficiale, suolo profondo e acqua di falda.

Nei documenti relativi all'Analisi di Rischio elaborata da NIER Ingegneria Spa sono state determinate le CSR (Concentrazioni Soglia Residuali) per i diversi inquinanti nelle diverse matrici, per i n.3 lotti individuati. Di seguito nelle tabelle 2.3, 2.4 e 2.5 si riassumono le CSR, obiettivi di bonifica per l'Area Ex-Suprema.

<b>Lotto Residenziale</b>	<b>PCE (mg/kg s.s.)</b>	<b>TCE (mg/kg s.s.)</b>
Suolo superficiale	1,9	2,0
Suolo profondo	0,72	1,0
<b>Lotto Commerciale/Direzionale</b>	<b>PCE (mg/kg s.s.)</b>	<b>TCE (mg/kg s.s.)</b>
Suolo superficiale	2,8	1,0
Suolo profondo	0,68	0,93
<b>Lotto Commerciale/Parcheggio</b>	<b>PCE (mg/kg s.s.)</b>	<b>TCE (mg/kg s.s.)</b>
Suolo superficiale	2,8	1,0
Suolo profondo	0,60	0,86

*Tabella 2.3 - Riassunto CSR Solventi Clorurati nel suolo Area Ex-Suprema*

<b>Lotto Residenziale</b>	<b>C &lt;12 (mg/kg s.s.)</b>	<b>C &gt; 12 (mg/kg s.s.)</b>	<b>Xileni (mg/kg s.s.)</b>
Suolo superficiale (non inquinato)	/	/	/
Suolo profondo	3,77E+01	2,15E+03	6,35E-01

*Tabella 2.4 - Riassunto CSR Idrocarburi nel suolo Area Ex-Suprema*

Lotto Residenziale	Tricloro metano (µg/l)	1,1 Dicloroetilene (µg/l)	1,2 Dicloroetilene (µg/l)	1,2 Dicloropropano (µg/l)	PCE (µg/l)	TCE (µg/l)	Cloruro Vinile (µg/l)
Acqua di falda	970	73	2,0E+05	2,0E+03	1,1E+03	6,1E+03	330
Lotto Commerciale/ Direzionale	Tricloro metano (µg/l)	1,1 Dicloroetilene (µg/l)	1,2 Dicloroetilene (µg/l)	1,2 Dicloropropano (µg/l)	PCE (µg/l)	TCE (µg/l)	Cloruro Vinile (µg/l)
Acqua di falda	130	9,6	4,7E+04	260	150	840	46
Lotto Commerciale/ Parcheggio	Tricloro metano (µg/l)	1,1 Dicloroetilene (µg/l)	1,2 Dicloroetilene (µg/l)	1,2 Dicloropropano (µg/l)	PCE (µg/l)	TCE (µg/l)	Cloruro Vinile (µg/l)
Acqua di falda	3,5E+03	320	1,2E+06	6,5E+03	4,9E+03	2,5E+04	1500

*Tabella 2.5 - Riassunto CSR Solventi Clorurati Acque di Area Ex-Suprema*

Per quel che riguarda le acque di falda, nonostante che per i lotti interni all'Area Ex-Suprema siano state individuate delle concentrazioni residuali CSR (concentrazioni degli inquinanti in falda che non generano rischio per le destinazioni d'uso), sul confine occorre comunque raggiungere valori residuali uguali o inferiori alle CSC.

## 2.4 TRATTAMENTO DELL'INSATURO: SOIL VAPOR EXTRACTION

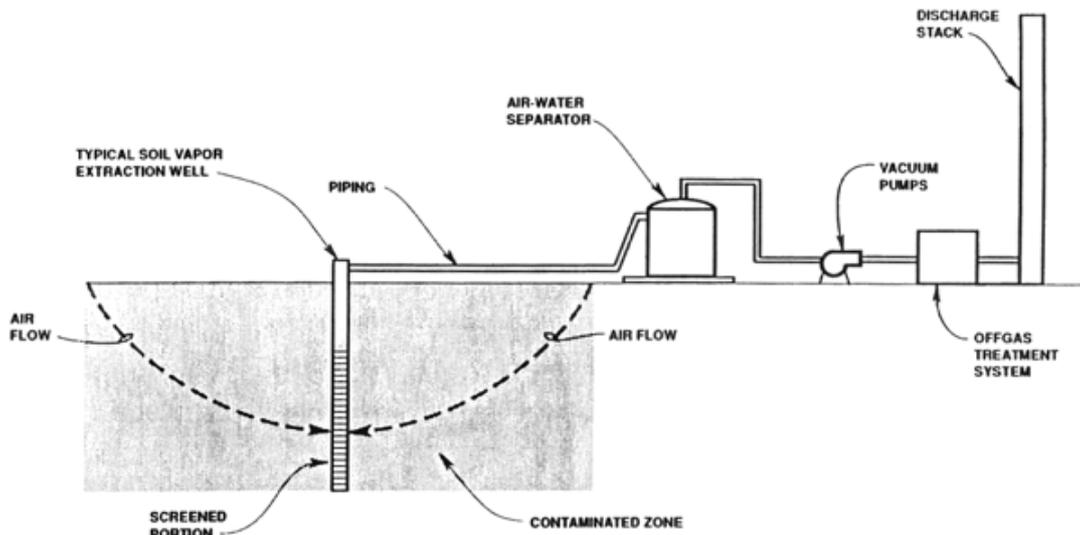


Figura 2.3 – Schema di un impianto di SVE

*Soil Vapor Extraction* (SVE) e *Bioventing* (BV) sono tecnologie di trattamento in situ per inquinanti organici, basate entrambe sulla ventilazione della porzione insatura del sottosuolo. La ventilazione viene operata mediante pozzi finestrati nella zona insatura, ai quali viene applicata una differenza di pressione; tale operazione induce nel sottosuolo una perturbazione nel campo di pressione, che costituisce la forza motrice dei gas nel sottosuolo. La ventilazione della zona insatura, induce fenomeni di trasporto dei contaminanti per meccanismi di diffusione e dispersione; questi operano su inquinanti volatilizzati dalla fase solida e liquida del terreno, da eventuale prodotto libero nonché su quelli già presenti come vapori nel gas interstiziale. Il flusso d'acqua nel sottosuolo produce altresì un ricambio degli stessi gas interstiziali, che vengono progressivamente sostituiti da aria ambiente, promuovendo meccanismi di biodegradazione aerobica.

### 2.4.1 Modelli di flusso e trasporto inquinanti

#### *Equazione di flusso per gas nel sottosuolo insaturo*

L'equazione del flusso gassoso in un mezzo poroso insaturo si può ricavare dalla combinazione della legge di Darcy per fluidi comprimibili e la legge dei gas ideali; assumendo costante il peso molecolare del gas ( $\omega_g$ ) e che la temperatura non vari nel tempo, l'equazione del flusso gassoso è (Baehr et al.):

$$\frac{\partial}{\partial t}(P\theta_g) + P\nabla q + T\nabla\left(\frac{P}{T}\right)q$$

Dove  $t$  (s) è il tempo,  $P$  (Pa) è la pressione del gas,  $\theta_g$  (-) è la porosità del terreno occupata dal gas e  $q$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) è la velocità darciana del gas.

Si tratta di una equazione differenziale alle derivate parziali non lineare, a causa della dipendenza della densità, della viscosità dei gas e della permeabilità del terreno dalla pressione. Soluzioni analitiche a questo problema sono possibili solo introducendo ipotesi semplificative.

#### *Trasporto di contaminanti in fase gassosa*

Il problema del trasporto di inquinanti gassoso nella porzione insatura del sottosuolo è ampiamente documentato in letteratura: i modelli esistenti applicabili a sistemi SVE si diversificano per finalità e processi considerati, alcuni accoppiano soluzioni analitiche o numeriche dell'equazione di trasporto con soluzioni per flusso gassoso, altri contemplano processi di flusso multi-fase, ecc.; tutti quanti sono caratterizzati da innumerevoli parametri in input richiesti, la cui determinazione è assai onerosa in termini di tempo e denaro nonché assai incerta. Pertanto nella maggior parte delle situazioni la modellazione degli interventi di SVE è limitata alla definizione del flusso d'aria nel sottosuolo.

### 2.4.2 Fattori fisici, chimici e biologici influenti e scelta del trattamento

Oltre alla configurazione fisica del sistema (impermeabilizzazione, profondità e fenestrazione dei pozzi) e parametri di esercizio (portata dei gas), sono i fattori fisici e chimici che regolano il trasporto degli inquinanti nel sottosuolo. In particolare oltre a pressione e temperatura atmosferica, alcuni di essi concernono esclusivamente il terreno (porosità, permeabilità, ecc), altri il singolo inquinante (peso molecolare, pressione di vapore, ecc), altri la composizione della miscela contaminante, ecc.

#### *Permeabilità del terreno al gas*

La permeabilità intrinseca ( $k_i$ ) di una matrice porosa è una caratteristica propria del mezzo, indice della capacità di quest'ultimo di lasciarsi attraversare da un generico fluido; essa dipende dalla dimensione e dalla forma delle porosità. Le unità di misura di  $k_i$  sono quelle di una superficie ( $m^2$ ). Nella zona insatura le porosità sono occupate parzialmente da gas e da acqua. Pertanto, la permeabilità del terreno al gas  $k_g$  (m) è una funzione sia di  $k_i$  che dell'umidità del terreno:

$$k_g = k_i k_{rg}$$

dove  $k_{rg}$  (-) è la permeabilità relativa del terreno al gas.

La permeabilità al gas può essere stimata tramite questa relazione una volta che siano state determinate  $k_i$  (da relazioni di laboratorio) e  $k_{rg}$  (con relazioni analitiche).

Il valore ottenuto potrebbe tuttavia non riflettere in pieno la permeabilità al gas dell'intera porzione di sottosuolo coinvolta dal trattamento, a causa della non rappresentatività del campione analizzato; perciò la stima di  $k_g$  viene generalmente ottenuta mediante prove pilota.

### *Volatilità dei contaminanti*

La pressione di vapore  $P_v$  di una sostanza chimica è la pressione esercitata dal vapore della sostanza in equilibrio con la sua fase pura condensata. Tanto più è elevato il valore di  $P_v$ , quanto più in condizioni di equilibrio sarà la massa di sostanza chimica presente in fase vapore. Poiché i meccanismi di rimozione fisica di inquinante durante un processo di ventilazione del terreno sono legati al contenuto di inquinante in fase aeriforme, questa proprietà svolge un ruolo fondamentale nell'evoluzione del processo. È pratica comune considerare preliminarmente suscettibili di interventi SVE quei composti caratterizzati da  $P_v > 70$  Pa.

### *Scelta della tecnologia*

L'importanza dei fattori richiamati è tale da poter discriminare sull'applicabilità della tecnologia. Le caratteristiche della matrice solida sono il fattore più importante; diverse indicazioni di massima esistono relativamente al limite minimo di permeabilità che consentirebbe l'applicazione di interventi di ventilazione dei terreni. Un dato di permeabilità ai gas che si ritiene significativo è  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> corrispondente a sabbie fini limose: per terreni di questo tipo, se altre tecnologie non sono applicabili, devono essere svolte prove pilota di campo per verificarne l'efficacia.

Se i contaminanti sono dotati di ridotta volatilità, si può ipotizzare un trattamento con BV nel caso che siano biodegradabili in aerobiosi.

L'utilizzo di SVE e BV sequenziali può essere di interesse nei siti in cui si abbia, per esempio, un'alta concentrazione di composti volatili biodegradabili aerobicamente, per i quali si richieda un abbattimento iniziale consistente

### 2.4.3 Test pilota

Data la varietà di parametri che influenzano i meccanismi alla base di SVE e BV, la progettazione dei sistemi di trattamento a piena scala si basa in linea generale sui risultati di differenti prove pilota. Per tecnologie in situ che si realizzano entro un sistema naturale difficilmente ricostruibile in laboratorio (terreno) è indispensabile una definizione sito-specifica dei principali parametri progettuali.

L'impianto pilota tipicamente comprende uno o più pozzi posizionati nella zona contaminata, con fenestrazione limitata allo spessore coinvolto dalla contaminazione, nonché punti fissi di monitoraggio, collocati a differenti distanze e direzioni rispetto al pozzo di prova. Questi ultimi sono dotati di sonde per la misurazione della pressione e sistema di prelievo dei gas interstiziali per l'analisi di inquinanti, ossigeno e biossido di carbonio.

Le prove pilota hanno come obiettivo base la valutazione di:

- Concentrazioni nel gas estratto e flussi di massa attesi, da cui discendono le caratteristiche di funzionalità del sistema di trattamento;
- Permeabilità del terreno al gas e raggio di influenza dei pozzi, da cui risulta il dimensionamento degli impianti;
- Velocità di biodegradazione aerobica, nel caso di inquinanti soggetti a tale tipo di rimozione.

#### *Test di portata a gradini (stepped-rate test)*

Viene condotto come prova iniziale per selezionare la depressione da applicare alla testa-pozzo nelle successive prove. A intervalli di tempo costanti (lungi tanto da poter registrare valori stabili dei parametri di interesse) induco valori crescenti di depressione al pozzo (gradini di 500-1000 Pa) e misuro le corrispondenti portate di gas estratte. Per evitare il superamento della soglia inferiore di infiammabilità, il sistema viene attivato operando una diluizione

del gas estratto con aria ambiente, progressivamente ridotta all'aumentare della depressione applicata. La durata è in genere di qualche ora.

*Test a portata costante (constant-rate test)*

Consente di valutare il tempo necessario al raggiungimento di condizioni stazionarie nel sottosuolo, la concentrazione di inquinanti nel gas estratto, nonché permeabilità al gas del sottosuolo e il raggio di influenza del pozzo nelle differenti condizioni operative. Consiste nell'estrarre/insufflare una portata di gas costante dal pozzo pilota e misurare la depressione/pressione indotta nel tempo nei vari punti di monitoraggio del sottosuolo. Può durare anche diversi giorni.

#### **2.4.4 Interpretazione dei dati di campo**

I dati di distribuzione spazio-temporale della depressione nel sottosuolo, acquisiti sia in condizioni transitorie che stazionarie, possono essere interpretati mediante l'uso delle opportune relazioni analitiche. Le soluzioni valide in regime stazionario forniscono stime più accurate della permeabilità al gas rispetto alle relazioni in transitorio, in particolare quando alla testa-pozzo sono applicate pressioni/depressioni maggiori di  $2 \cdot 10^5$  Pa e non è presente uno strato impermeabile sulla superficie del terreno. Le soluzioni relative a condizioni transitorie vengono generalmente utilizzate per terreni a granulometria fine, nei quali il raggiungimento di condizioni stazionarie può richiedere tempi lunghi.

*Stima della permeabilità del terreno al gas*

- Regime di flusso transitorio

Per una configurazione costituita da un pozzo finestrato per l'intera porzione insatura isotropa di sottosuolo compresa tra due strati impermeabili sufficientemente estesi, si può utilizzare

l'approssimazione di Cooper-Jacob valida per piccole distanze radiali  $r$  o valori elevati di  $t$ :

$$P(r,t) - P_{atm} = \frac{Q_v \mu_g}{4\pi b k_g} \left[ -0,5772 - \ln \frac{r^2 \theta_g \mu_g}{4k_g P_{atm}} + \ln t \right] \quad (1)$$

Nel piano  $(P(r,t) - P_{atm}, \ln t)$  questa è approssimata da una retta di pendenza  $c'$ , dalla quale si può ricavare la permeabilità al gas:

$$k_g = (Q_v \mu_g) / (4\pi b c')$$

Dove  $Q_v$  è la portata volumetrica di aria estratta dal pozzo (m<sup>3</sup> s), è la viscosità dinamica del gas (kg m<sup>-1</sup> s) e  $b$  lo spessore della zona insatura (m).

- Regime di flusso stazionario

Per una configurazione costituita da un pozzo finestrato per l'intera porzione insatura isotropa di sottosuolo compresa tra due strati impermeabili sufficientemente estesi, si può utilizzare la relazione:

$$P^2 - P_{atm}^2 = \frac{Q_v P^* \mu_g}{\pi b k_g} \ln \frac{R_p}{r} \quad (2)$$

In questo caso  $P(r)^2 - P_{atm}^2$  è una funzione lineare di  $\ln r$ ; la pendenza  $c''$  della curva è legata alla permeabilità al gas dalla relazione:

$$k_g = (Q_v P^* \mu_g) / (\pi b c'')$$

Con  $P^*$  pressione nel pozzo (Pa).

*Stima del raggio di influenza*

I dati ottenuti con il test a portata costante possono essere

interpretati attraverso modelli per la stima del raggio di influenza del pozzo. Si può distinguere tra “raggio di influenza di pressione”, e “raggio efficace”.

Il *raggio di influenza di pressione* ( $R_p$ ) si riferisce alla massima distanza da un pozzo estrazione a cui è possibile indurre una variazione di pressione rispetto alla condizione atmosferica.  $R_p$  è influenzato da parametri quali la portata, la profondità dei pozzi e lo spessore filtrante, la permeabilità dello strato superficiale e l'anisotropia del terreno. In generale, aumenta all'aumentare della portata estratta, della profondità dei pozzi e dell'anisotropia del terreno e al decrescere della permeabilità dello strato superficiale e del grado di saturazione del terreno.

L'uso di  $R_p$  per il dimensionamento dell'impianto non assicura che certe porzioni di sottosuolo siano coinvolte dai meccanismi di volatilizzazione degli inquinanti, guidati dal gradiente di pressione indotto. Si può quindi definire un “raggio efficace” ( $R_e$ ) come distanza alla quale le variazioni di pressione generate dal funzionamento del pozzo siano tali da strappare gli inquinanti e ridurre la contaminazione a un livello accettabile in tempi adeguati; generalmente  $R_e$  è minore di  $R_p$ . Esso dipende dalle proprietà chimico-fisiche del contaminante ed è soggetto a variazioni temporali legate all'evoluzione della bonifica, pertanto risulta di limitata utilità nel dimensionamento iniziale del sistema.

Relativamente alla stima di  $R_p$ , le relazioni generalmente utilizzate nel caso di mezzi isotropi, valide per distanze  $r$  dal pozzo sufficientemente elevate, sono derivazioni della equazione (1):

$$P'(r) = P(r) - P_{atm} = c_1 \ln r + c_2$$

Misurando  $P'(r)$  a varie distanze dal pozzo, si può ottenere il raggio di influenza di pressione  $R_p$  del pozzo per una fissata  $Q_v$ .

Resta comunque da evidenziare che, qualora i casi in esame non

corrispondessero adeguatamente alle condizioni assunte per la deduzione delle relazioni (1) e (2), nota  $k_p$  si possono utilizzare le equazioni del campo di pressioni determinando  $R_p$  come distanza dal pozzo alla quale la pressione assoluta  $P$  (Pa) assume un valore fissato a priori e ritenuto accettabile per l'efficacia del trattamento.

#### **2.4.5 Aspetti progettuali e realizzativi**

In molti casi, gli aspetti teorici e pratici descritti precedentemente, pur sostanziali per la riuscita dell'intervento, vengono trascurati o trattati solo superficialmente.

Si è quindi ritenuto utile proporre una disamina di alcuni aspetti fondamentali per la riuscita di interventi di SVE:

- Definizione in campo dei principali parametri di progetto
- Definizione delle portate di intervento e la configurazione dei pozzi
- Valutazione delle prestazioni e chiusura degli interventi.

#### *Permeabilità dei terreni al gas*

Come anticipato, il principale parametro progettuale relativo al sottosuolo è la permeabilità del terreno al gas, determinabile in sito con prove pilota. Tali prove vengono realizzate utilizzando pozzi di estrazione e punti fissi di monitoraggio, in corrispondenza dei quali sono misurate le variazioni di pressione negative indotte nel sottosuolo. Il sistema utilizzato è costituito generalmente da una soffiante, un condensatore e un sistema di trattamento dei gas in uscita con filtri a carbone attivo, da tubazioni di collegamento, teste-pozzo attrezzate per i campionamenti e le misurazioni necessarie, con le relative strumentazioni. È pertanto pratica diffusa l'esecuzione di prove specifiche di aspirazione che, grazie all'utilizzo di punti di monitoraggio posti a profondità e distanze diversificate, forniscono dati diretti sulla porzione di sottosuolo interessata dal flusso d'aria.

Il calcolo della permeabilità al gas,  $k_g$  viene effettuato con la seguente formula (USEPA, 95):

$$k_g = \frac{Q_v \mu_g \ln(r_w/R_p)}{H \pi P^* \left[ 1 - (P_{am}/P^*)^2 \right]}$$

Con  $r_w$  raggio del pozzo,  $H$  lunghezza del tratto filtrante e  $P^*$  pressione misurata nel pozzo.

#### *Definizioni delle portate di intervento e configurazione dei pozzi*

In generale una portata adeguata agli scopi della SVE è quella che determina il ricambio del gas presente nei pori della zona contaminata 1-3 volte al giorno. Tale portata potrà essere ottenuta installando uno o più pozzi di aspirazione in funzione delle caratteristiche della contaminazione e dei terreni.

Per quanto riguarda l'aspetto del numero totale dei ricambi d'aria necessario e sufficiente al raggiungimento degli obiettivi di bonifica, alcuni esperti consigliano un numero variabile tra 200 e 400, altri arrivano addirittura a indicare un numero compreso tra 2000 e 5000. Queste valutazioni sono tuttavia solamente indicative e dovrebbero essere utilizzate in fase di dimensionamento preliminare del sistema di SVE.

Un approccio più scientifico per l'analisi del sistema SVE implica l'analisi della velocità del flusso e dei tempi di migrazione, normalmente tramite specifici programmi di calcolo.

La progettazione del sistema di estrazione dovrebbe procedere attraverso un *well configuration loop*, il cui il primo passo consiste nell'analisi di un apparato costituito da un singolo pozzo. Se ciò non soddisfa determinati criteri di accettabilità (compatibilità tra portata e sistema di trattamento *off-gas*, adeguatezza della potenza della soffiante ecc.) è necessario procedere all'esame di un sistema con due pozzi, ripetendo l'analisi fino a trovare la configurazione

più soddisfacente.

Per quanto riguarda la realizzazione dei pozzi di ventilazione e dei punti di monitoraggio, particolare attenzione deve essere posta agli intervalli filtranti: i pozzi SVE/BV dovrebbero essere resi filtranti in corrispondenza della porzione di terreno contaminata, anche se talora può essere lecito filtrare tutta la zona del sottosuolo.

Le caratteristiche costruttive dei pozzi e dei punti di monitoraggio, in termini di diametri e materiali, sono ovviamente legate alle caratteristiche specifiche dei siti.

#### *Valutazione delle prestazioni e chiusura degli interventi*

Durante un trattamento con SVE/BV, la valutazione delle prestazioni del sistema di risanamento viene condotta mediante:

- Misurazione della portata di gas e della pressione di ogni pozzo di estrazione;
- Misurazione delle pressioni nei pozzi di monitoraggio e analisi dei gas interstiziali prelevati a diverse profondità;
- Misurazione della pressione barometrica;
- Pluviometria;
- Temperatura del terreno e atmosferica;
- Profondità della falda, per eventuali variazioni del livello piezometrico;
- Composizione del gas estratto, per stimare la frazione di contaminanti rimossi nel tempo e regolare i parametri della sezione di trattamento dei vapori;
- Composizione del gas trattato, previo scarico in atmosfera.

I dati di concentrazione riscontrati nel gas estratto e trattato e nei gas interstiziali vengono generalmente riportati a valori in condizioni di temperatura e pressione standard. La frequenza del campionamento è generalmente più elevata all'avvio del processo e viene ridotta quando il sistema è stato ottimizzato (solitamente da settimanale a mensile).

Le concentrazioni di inquinanti nei gas possono essere determinate con strumenti da campo, quali FID, PID e fiale con indicatore colorimetrico. Alcuni campioni d'aria possono essere analizzati in laboratorio, a condizione che vengano campionati in apposite sacche, canister o carboni attivi. Con misure GC-FID e GC-PID è possibile ottenere informazioni sia sulla velocità di rimozione dei composti organici volatili totali che dei singoli inquinanti; sebbene i PID rispondano meglio a idrocarburi aromatici e composti alogenati, i FID forniscono buone risposte per tutti gli idrocarburi. Un problema non trascurabile è la decisione di chiusura dell'intervento sulla base di un monitoraggio condotto sulla fase aeriforme, contro obiettivi di risanamento espressi come concentrazioni di inquinanti nel terreno. Possibili criteri per intraprendere tale decisione sono:

1. bilancio di massa tra inquinanti inizialmente presenti sul sito e inquinanti rimossi;
2. concentrazione e composizione dei gas estratti;
3. concentrazione e composizione di inquinanti nei gas interstiziali;
4. concentrazione residua degli inquinanti nel terreno.

Il prelievo del terreno è generalmente costoso e distruttivo; quindi è opportuno effettuare la determinazione degli inquinanti in tale matrice quando c'è una ragionevole confidenza di aver raggiunto gli obiettivi di qualità. Il campionamento per la chiusura dell'intervento può quindi essere condotto in fasi successive, ciascuna attivata solo quando è stato raggiunto un prefissato obiettivo nella fase precedente.

Un approccio utilizzato è quello di procedere con il trattamento fino al raggiungimento di certe concentrazioni di inquinanti nei gas interstiziali, fissati sulla base di una correlazione tra tale quantità e la concentrazione nel terreno. Raggiunto questo obiettivo il sistema può essere spento per qualche giorno tempo dopo il quale si

determina la composizione e la concentrazione di inquinanti nel gas interstiziale, che potrebbero essere aumentate per fenomeni di rebound; se le concentrazioni riscontrate rispettano limiti prefissati, si esegue il campionamento del terreno, le cui concentrazioni possono essere direttamente confrontate con i limiti di qualità. Un metodo alternativo per SVE consiste nell'applicare un'estrazione pulsata alternando fasi di funzionamento a fermi di impianto che consentano il ripristino di condizioni di equilibrio. Non appena il sistema viene acceso, si procede alla determinazione degli inquinanti nel flusso d'aria estratta e si confrontano le concentrazioni riscontrate con quelle dei cicli precedenti. La chiusura dell'intervento può essere presa in considerazione quando la concentrazione degli inquinanti nel gas estratto non varia significativamente tra un ciclo e il successivo e si avvicina a valori trascurabili.

Entrambi questi approcci, comunque, non sono conclusivi sulle concentrazioni di inquinante raggiunte sul terreno. Generalmente gli impianti restano quindi installati sul sito per qualche tempo dopo la chiusura dell'intervento, nell'eventualità che campionamenti successivi per confermare il raggiungimento dei limiti di qualità, mettano in discussione il risultato ottenuto e l'impianto debba essere riattivato.

#### **2.4.6 Dimensionamento dell'impianto di SVE**

L'estrazione sottovuoto è un metodo per rimuovere i volatili (VOC) divenuto ormai una procedura standard applicata in tutti i paesi industrializzati. Il metodo è concettualmente semplice, si tratta di determinare una depressurizzazione dei gas contenuti nei meati dello scheletro solido del sedimento. L'analisi del moto tra i meati comunicanti della roccia porosa, si basa sulla legge di Darcy, almeno nell'ambito del moto laminare. I parametri che influenzano

il movimento dei contaminanti in fase gassosa sono: concentrazione dei contaminanti, tessitura e contenuto d'acqua nel sedimento, temperatura, costante di Henry, adsorbimento ad eventuale sostanza organica presente nel sedimento.

Le principali di queste informazioni sono di letteratura, altre sono state raccolte per ogni focolaio o estrapolate per situazioni simili, le temperature sono quelle pressoché costanti del sottosuolo, desumibili dalla temperatura della falda.

### ***Schema dell'impianto***

L'impianto, sintetizzato graficamente nella tavola 1, anche con alcuni particolari tecnici, è costituito da apparati sotterranei porosi (camini di aspirazione) completamente impermeabilizzati ai gas in superficie, collegati da linee di tubazioni che recapitano a pompe di aspirazione con depressioni costanti.

I gas aspirati vengono avviati ai filtri a carboni attivi per la depurazione e successivamente all'atmosfera.

Al fine di dimensionare sia la distanza tra i camini di estrazione, sia le caratteristiche delle soffianti, sia i filtri a carboni attivi, in modo da ottimizzare gli esiti dell'intervento, sono state eseguite alcune prove di SVE a gradini di portata nei focolai FC1 (capannone Suprema) e FC2 (magazzino).

Prima dell'esecuzione dei test pilota si è misurata all'interno dei pozzetti l'eventuale presenza di VOC totali con strumentazione portatile PID (fotoionizzatore), la concentrazione di O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e di Metano con GA45 (infrarosso per biogas), le condizioni di svolgimento delle prove e la loro descrizione sono riportate nell'apposita appendice, mentre i risultati sono ripresi ed elaborati nel testo seguente.

Le prove pilota a gradini sono state eseguite adottando le attrezzature ed imponendo le condizioni riportate nella tabella 2.6.

Focolaio	Caratteristiche soffiante	Depres. [mbar]	Q [m <sup>3</sup> /h]
Capannone 1°	200 mbar – 180 m <sup>3</sup> /h	195	25
Capannone 2°	200 mbar – 180 m <sup>3</sup> /h	185	50
Capannone 3°	300 mbar – 250 m <sup>3</sup> /h	300	60
Magazzino 1°	200 mbar – 180 m <sup>3</sup> /h	116	30
Magazzino 2°	300 mbar – 250 m <sup>3</sup> /h	300	60

*Tabella 2.6 - Caratteristiche di esecuzione dei test*

Per tutte le prove eseguite i gas estratti prima di essere immessi in atmosfera, sono stati trattati con apposito filtro a carboni attivi.

### ***Raggio d'influenza e permeabilità al gas dei sedimenti***

Il raggio d'influenza di pressione (**R<sub>p</sub>**) di un pozzo in aspirazione, cioè la massima distanza teorica a cui si risente una minima variazione di pressione, estrapolato dall'esito delle prove di pompaggio a gradini di portata è superiore a 50 metri nel focolaio FC1 (capannone Suprema), e di circa 60 m nel focolaio FC2 (magazzino).

Questo dato è rilevante per la caratterizzazione dei sedimenti in cui si svolge la prova, in questo senso appare significativo che l'insaturo della zona magazzino abbia valori di **R<sub>p</sub>** maggiori di quelli ottenuti nel capannone, a parità di portata aspirata (60 m<sup>3</sup>/h). Ciò indica una distribuzione delle sabbie nell'insaturo non perfettamente omogenea: l'alveo superficiale più sabbioso è spostato ad ovest rispetto alla via Galliera.

Ai fini progettuali è però rilevante stimare la distanza alla quale le variazioni di pressione indotte dal pozzo di aspirazione hanno dimensioni tali da riuscire a "strappare", dai meati del sedimento, i vapori contaminanti: raggio efficace (**R<sub>e</sub>**). I diagrammi semi logaritmici "distanza / depressione" riprodotti in appendice consentono la facile valutazione del **R<sub>e</sub>** per i diversi regimi di

depressione. Considerando la porosità efficace media e la sua variazione verticale in funzione

delle tessiture del sedimento insaturo investito dalla contaminazione si può valutare che la depressurizzazione minima media di strippaggio sia di 0,35 mbar. A questi valori nelle sabbie fini anche se leggermente limose i meati comunicanti tra loro vengono coinvolti nel processo di aspirazione.

L'osservazione dei diagrammi dimostra che il raggio d'influenza efficace non si modifica in modo significativo, sia all'incremento di portata, sia variando l'entità della depressione minima ricercata, ad esempio portandola da 0,35 ad 0,70 mbar. Per il focolaio FC1, in effetti Re relativo a 0,35 mbar varia tra 24 e 29 metri, ed Re relativo a 0,70 mbar varia tra 19 e 24 metri. Considerando che tessiture più fini (limi sabbiosi o sabbie limose) richiedono in genere depressioni di almeno 0,70 mbar, per risentire dell'azione di aspirazione lungo la superficie di interfaccia con gli strati più sabbiosi, la misura di Re da considerare per avere un'azione generale sull'intera colonna tessiturale non può superare i 20 metri. Per il focolaio FC2, il Re relativo a 0,35 mbar varia tra 34 e 37 metri, ed il Re relativo a 0,70 mbar varia tra 28 e 32 metri. Il valore di Re da assumere a riferimento può essere di 28 m, considerando anche che può verificarsi, per parte di questo focolaio, una certa "impedenza" dovuta all'infiltrazione in profondità di umidità.

La valutazione del Re è legata alle condizioni fisiche locali ed anche ai tempi e alla strategia di bonifica che si ritiene di adottare per i suoli. Nel nostro caso, caratterizzato da una prevalenza delle componenti sabbiose e soprattutto dalla modesta umidità presente nei sedimenti per la quasi totale copertura superficiale impermeabile (piazzali asfaltati e costruzioni), è molto probabile che i livelli a tessitura fine possano essere depressurizzati dagli strati sabbiosi sopra e sottostanti, più con tempi di applicazione della SVE prolungati, piuttosto che con forti depressurizzazioni.

Al contrario i tempi di bonifica dei suoli sabbiosi devono essere relativamente rapidi per consentire l'attivazione di successive operazioni di bonifica che possono portare ad incrementi della depressurizzazione applicata all'insaturo che possono sollevare il livello piezometrico locale.

L'osservazione dei diagrammi della prova di aspirazione (allegato 2) effettuata nei due maggiori focolai di contaminazione (FC1 e FC2) consentono di misurare i massimi raggi di influenza per la depressione indotta di 0,35 mbar, corrispondente ai livelli sabbiosi. I dati inseriti nella consueta relazione di Johnson et Al, 1991 (USEPA, 1995) permettono di calcolare la permeabilità al gas ( $k_a$ ) dei sedimenti.

$$k_a = \frac{Q\mu_a \ln(r_w / R)}{HHP_w [1 - (P_a / P_w)^2]} \quad cm^2 = \frac{[cm^3 s^{-1}][g/cm * s]}{[cm][g/cm * s^2] \{ [g/cm * s^2][g/cm * s^2] \}}$$

$Q$  (portata di aspirazione)

$H$  (spessore filtrante del camino di aspirazione)

$\mu_a$  (viscosità aria a 18°)

$P_w$  (pressione al pozzo)

$P_{atm}$  (pressione atmosferica)

$R$  (raggio influenza)

$r_w$  (raggio del camino)

Considerando che nel focolaio FC1 abbiamo  $Re$  minimo ( $Q$  25 m<sup>3</sup>/h, 0,35 mbar) = 24 m ed una  $P_w$  = -195 mbar ;  $Re$  massimo ( $Q$  60 m<sup>3</sup>/h, 0,35 mbar) = 27 m; e nel focolaio FC2 abbiamo  $Re$  minimo ( $Q$  30 m<sup>3</sup>/h, 0,35 mbar) = 33 m;  $Re$  massimo ( $Q$  60 m<sup>3</sup>/h, 0,35 mbar) = 37 m con una  $P_w$  = -234 mbar , i valori di permeabilità massima e minima divengono:

$$\frac{16670 * 1,8 * 10^{-4} * \ln(2,5 / 3700)}{250 * 3,14 * 7,79 * 10^5 \left[ 1 - \left( 1,013 * 10^6 / 7,79 * 10^5 \right)^2 \right]} = 5,16 * 10^{-8} \text{ cm}^2$$

$$\frac{6950 * 1,8 * 10^{-4} * \ln(2,5 / 2700)}{250 * 3,14 * 7,79 * 10^5 \left[ 1 - \left( 1,013 * 10^6 / 8,18 * 10^5 \right)^2 \right]} = 2,54 * 10^{-8} \text{ cm}^2$$

I valori calcolati sono pienamente compatibili tra loro per ordine di grandezza e sono in accordo con gli intervalli per litologie sabbioso fini più o meno limose riportati nella letteratura scientifica, in cui si è dimostrata capacità di strippaggio di solventi clorurati. Le caratteristiche geologiche del focolaio FC3 sono simili a quelle del focolaio del magazzino (FC2), appare quindi ragionevole attribuire la medesima permeabilità di circa 5 darcy anche al focolaio del capannone Max Clean. Si può pertanto concludere che la permeabilità al gas media cautelativa per i sedimenti insaturi del sito Ex Suprema può essere assunta in 2,5 darcy, valore di poco più basso rispetto a quello medio calcolato per l'acquifero e riportato nella tabella 2.7.

Parametro	Intervallo misurato	Esiti ottenuti	
k massima letto acquifero (PZ2)	Tra -21,10 e -21,60	k= 3,96*10E-8 cm/s	0,00396 darcy
k <sub>0</sub> medio acquifero (PZ1B)	Tra -4 e circa -20	k <sub>0</sub> = 6*10E-4 m/s	6 darcy
k <sub>0</sub> massima (BR3)		k <sub>0</sub> = 7,5*10E-3 m/s	75 darcy
k <sub>0</sub> minima (PZ2)	Tra 9,10 e 9,60	k <sub>0</sub> = 6,06*10E-7 m/s	0,06 darcy
T media (PZ1B)		T = 9,5*10E-3 m <sup>2</sup> /s	
Velocità media interna sito (spartiacque)		30÷50 m/anno	
Velocità media falda (nord-est)		54÷82 m/anno	

*Tabella 2.7 - Parametri idrodinamici essenziali dell'acquifero*

### Portate d'intervento

Durante l'esecuzione delle prove pilota di SVE sono stati misurati all'ingresso del filtro a carboni attivi i VOC totali ad intervalli temporali regolari, con rilevatore a fotoionizzazione (PID). Inoltre all'inizio di ogni gradino, dopo i primi 10 minuti di aspirazione, ed al termine di ogni gradino, dopo 60 minuti, sono stati prelevati campioni di gas con l'apposita "fiala a carboni attivi". Le tabelle 2.8 e 2.9 riportano i valori misurati nelle prove dei due focolai, che hanno superato il limite di rilevabilità.

	Q [m <sup>3</sup> /h]	Tempi di misura o campionamento SV9							
		0'	5'	10'	15'	20'	30'	45'	60'
VOC (ppm)	30	15,3	162	nr	141	nr	250	140	204
Tricloroetilene (mg/m <sup>3</sup> )	30	nr	nr	49,1	nr	nr	nr	nr	39,1
Tetracloroetil. (mg/m <sup>3</sup> )	30	nr	nr	1197	nr	nr	nr	nr	1036
Tasso estrazione (kg/gg)	30	nr	nr	<b>0,9</b>	nr	nr	nr	nr	<b>0,77</b>
VOC (ppm)	60	nr	140	301	nr	269	nr	93,4	118
Tricloroetilene (mg/m <sup>3</sup> )	60	nr	nr	40,5	nr	nr	nr	nr	34,4
Tetracloroetil. (mg/m <sup>3</sup> )	60	nr	nr	1110	nr	nr	nr	nr	947
Tasso estrazione (kg/gg)	60	nr	nr	<b>1,66</b>	nr	nr	nr	nr	<b>1,41</b>

Tabella 2.8 - Focolaio FC2 (magazzino)

	Q [m <sup>3</sup> /h]	Tempi di misura o campionamento SV1							
		0'	5'	10'	15'	20'	30'	40'	60'
VOC (ppm)	25	0,00	789	nr	793	nr	581	nr	1074
Tricloroetilene (mg/m <sup>3</sup> )	25	nr	nr	45,1	nr	nr	nr	nr	68,9
Tetracloroetil. (mg/m <sup>3</sup> )	25	nr	nr	1908	nr	nr	nr	nr	2677
Altri VOC	25	nr	nr	<0,1	nr	nr	nr	nr	2,02
Tasso estrazione (kg/gg)	25	nr	nr	<b>1,17</b>	nr	nr	nr	nr	<b>1,63</b>
VOC (ppm)	50	nr	316		nr	550	nr	423	345
Tricloroetilene (mg/m <sup>3</sup> )	50	nr	nr	71,3	nr	nr	nr	nr	40,8
Tetracloroetil. (mg/m <sup>3</sup> )	50	nr	nr	2559	nr	nr	nr	nr	1695
Altri VOC	50	nr	nr	1,92	nr	nr	nr	nr	<1
Tasso estrazione (kg/gg)	50	nr	nr	<b>3,16</b>	nr	nr	nr	nr	<b>2,08</b>
VOC (ppm)	60	nr	1032		951	--	--	--	--
Tricloroetilene (mg/m <sup>3</sup> )	60	nr	nr	33,1	nr	--	--	--	--
Tetracloroetil. (mg/m <sup>3</sup> )	60	nr	nr	1992	nr	--	--	--	--
Altri VOC	60	nr	nr	<0,1	nr	--	--	--	--
Tasso estrazione (kg/gg)	60	nr	nr	<b>2,92</b>	nr	--	--	--	--

Tabella 2.9 - Focolaio FC1 (capannone)

Nel test relativo al focolaio FC1 non è stato raccolto il campione finale (60' per 60 m<sup>3</sup>/h) a causa dell'eccessivo sollevamento della falda e del conseguente surriscaldamento della soffiante che ha costretto ad interrompere la prova, indicando per altro il limite di applicazione delle depressioni alla situazione idrogeologica e stratigrafica che caratterizza l'intervento.

Per il focolaio FC1 il risultato conferma quanto già visto con l'analisi del raggio d'influenza: l'aumento di portata non conduce ad un corrispondente incremento di efficacia nello strippaggio, la diminuzione nel tempo del tasso di estrazione con Q=50 m<sup>3</sup>/h, è con ogni probabilità dovuta all'incremento di Re che, raggiungendo zone non o poco contaminate, ha diluito la concentrazione presente. Analoga considerazione per la breve aspirazione con Q=60 m<sup>3</sup>/h. Una portata pari a 25 ÷ 30 m<sup>3</sup>/h per ogni pozzo, con una depressione pari 200 ÷ 240 mbar, appare come la soluzione più congrua per ottenere un buon strippaggio. Al termine del primo gradino di portata nel capannone si è verificato che a queste portate il sollevamento della falda nei piezometri vicini era contenuto in qualche decimetro, mentre quello indotto nel camino di estrazione era di poco superiore al metro.

Per il focolaio FC2 (magazzino) il risultato indica invece un incremento considerevole del tasso d'estrazione: al raddoppio della portata si ottiene il raddoppio dell'estrazione. Il sollevamento della falda in corrispondenza dei camini di aspirazione più profondi con depressioni dell'ordine di 300 mbar supera i 2,5 metri, nel campo di prova non si è verificata l'invasione dell'acqua nell'intero camino perché la stratigrafia locale vede la presenza di limi in quota che non consentono l'agevole risalita della falda nel breve periodo di esecuzione della prova stessa.

La risalita della falda, anche se molto localizzata alla zona sottoposta a depressione, ovviamente costituisce un problema, non solo per le attrezzature ma soprattutto perché la falda viene portata

a contatto con sedimenti molto contaminati.

La portata e la depressione applicata devono pertanto essere contenuti anche in funzione di questa considerazione, sapendo che la falda ha una escursione naturale non superiore al metro, non è consigliabile provocare un sollevamento piezometrico maggiore, almeno nel primo periodo di bonifica quando i gas interstiziali sono ancora ricchi di solventi clorurati. Si ritiene pertanto che in questo focolaio la depressione e la portata ottimale applicabile ad ogni camino non debba superare in una prima fase rispettivamente i 240 mbar, e i 30 m<sup>3</sup>/h, e solo successivamente possa essere spinta a 300 mbar e 50 m<sup>3</sup>/h. La possibilità di ottenere un abbassamento del livello statico di oltre 0,5 m azionando il pozzo BR5 può migliorare le condizioni di aspirazione dei gas mantenendo la falda a quote accettabili.

Le medesime considerazioni possono essere fatte per il focolaio FC3, che presenta caratteristiche simili sia geologiche, sia per quanto riguarda le concentrazioni nei suoli.

L'estrazione sottovuoto di aria dai sedimenti determina il ricambio dei gas interstiziali presenti nel sottosuolo, il numero di ricambi che l'efficienza dell'impianto di SVE riesce a realizzare nel tempo, costituisce la principale funzione da cui dipende lo sviluppo della bonifica e la sua riuscita. Una valutazione del volume di gas presuppone la conoscenza della porosità efficace (n) dei sedimenti, proprietà funzione della forma, dimensione e soprattutto disposizione dei granuli negli strati, in ultima analisi della tessitura e della storia deposizionale.

Nel nostro caso, ipotizzando:

- 1) che la distribuzione dei campioni di sedimento analizzati corrisponda affettivamente alle concentrazioni massime e minime presenti nei corpi sedimentari (lenti e letti a porosità differenziata) distribuiti alle diverse quote, e ricordando le caratteristiche fisico-chimiche dei solventi clorurati, che impongono una direzione di

filtrazione del soluto (fase liquida) con prevalenza decisamente verticale più che orizzontale (potenziale di suzione elevato per l'aridità dei sedimenti), ed una dissipazione orizzontale prevalente della fase volatile;

2) che le stime medie di porosità ottenute dai campioni analizzati e le potenze medie siano rappresentative dell'ammasso roccioso insaturo: sabbie meno limose (64%) con porosità efficace pari a 0,21; limi più o meno sabbiosi (30%) con porosità efficace media pari a 0,14, limi argillosi (6%); si ottiene che ogni 1000 m<sup>3</sup> di sedimento insaturo si avrebbe in media un volume di gas interstiziale pari a circa 180 m<sup>3</sup>. La tabella 2.10 sintetizza i dati relativi ai volumi di ogni focolaio ed i *tassi di ricambio* dei gas interstiziali relativi a varie ipotesi progettuali di portate compressive di aspirazione, già depurate delle perdite di carico medie stimate.

Focolai	Sup. [m <sup>2</sup> ]	Vol. [m <sup>3</sup> ]	V.gas [m <sup>3</sup> ]	Tassi di ricambio / giorno			
				Q = 650 m <sup>3</sup> /h	Q = 400 m <sup>3</sup> /h	Q = 300 m <sup>3</sup> /h	Q = 200 m <sup>3</sup> /h
FC1	6700	27000	4850	3	1,7	1	--
FC2	2120	8460	1500	--	6	4	2,8
FC3	1060	4200	760	--	13	9	6

*Tabella 2.10 - tassi di ricambio gas interstiziale*

Le stime riportate nella tabella aiutano ad effettuare la scelta dell'impianto più vantaggioso in termini di rapporto costi/benefici, comunque l'attrezzatura scelta deve tenere presente:

- la possibilità di differenziare il *tasso di ricambio* del gas interstiziale secondo le necessità nei diversi focolai,
- una relativa elasticità dell'intervento nelle scelte di portata da applicare ad ogni pozzo, nelle diverse fasi della bonifica,
- la perdita di carico conseguente alla lunghezza delle linee (piping), ai separatori di condensa, ai filtri a carboni attivi,
- i costi di noleggio della soffiante e del consumo di potenza.

### *Focolaio FC1*

Stimando le concentrazioni riscontrate nei suoli (vedi tabella 1.2), quelle estratte (attorno ai 3.000 mg/m<sup>3</sup>), sia pure in veloce diminuzione di concentrazione dopo le prime settimane di attività, saranno necessari almeno un migliaio di ricambi del gas interstiziale, anche nel caso in cui le manovre eseguite alle teste pozzo siano tanto equilibrate da consentire l'arrivo della depressurizzazione alla periferia del focolaio già dopo i primi 100 ricambi.

Risulta chiaro che l'estensione del FC1, per usare una soffiante sola, richiederebbe linee troppo lunghe, con perdite di carico tali da ridurre molto l'efficacia dell'intervento nei pozzi più distali. Per disporre di maggiore elasticità di intervento e finalizzare le portate all'andamento della bonifica appare opportuno disporre di due impianti separati: uno relativo alla parte di focolaio nord ed interno al capannone,

l'altro per la parte di focolaio sul lato est, esterno al capannone. Per i due impianti le caratteristiche di aspirazione sui camini saranno simili: portata al camino di aspirazione di almeno 30 m<sup>3</sup>/h a 200 ÷ 240 mbar; mentre la portata effettiva di aspirazione complessiva dovrà essere superiore a 650 m<sup>3</sup>/h, se si vuole completare la bonifica dell'insaturo in un anno.

### *Focolai FC2 ed FC3*

Le concentrazioni rinvenute nei suoli per i due focolai sono equiparabili (vedi tabella 1.2) ed i tenori ottenuti con il test pilota in FC2 si aggirano sui 1200 mg/m<sup>3</sup>, si stima però che, a regime, si potranno raggiungere i 2000 mg/m<sup>3</sup>. In circa 8 mesi si dovrebbe superare la soglia dei 1000 ricambi. Tuttavia alla modesta estensione areale dei focolai si associa la presenza di livelli limosi tra i 3,5 ed i 4,5 metri che possono essere sede di significative concentrazioni locali di contaminazione. In questa prospettiva è

opportuno prevedere un maggiore numero di ricambi di gas interstiziale rispetto al FC1, e soprattutto la possibilità di applicare maggiori depressioni.

Nella prima fase dell'aspirazione la depressione verrà mantenuta entro i 200 millibar per evitare l'eccessiva risalita della falda entro il sedimento a luoghi ancora molto ricco di contaminante. Le manovre alle teste pozzo per eventuali incrementi di depressione (fino a 280 mbar, che determinano il sollevamento della falda) e di portata fino a 50 m<sup>3</sup>/h potranno essere attuate solamente quando le concentrazioni estratte saranno diminuite, e quindi quando i volumi di gas interstiziale presenti nelle sabbie saranno stati cambiati almeno qualche centinaio di volte.

## **2.5 DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO DI SVE**

L'impianto, sintetizzato graficamente nella tavola 1, anche con alcuni particolari tecnici, è costituito da apparati sotterranei porosi (camini di aspirazione), completamente impermeabilizzati ai gas in superficie, collegati da linee di tubazioni (piping) che recapitano a pompe di aspirazione con depressioni costanti. I gas aspirati vengono avviati ai filtri a carboni attivi per la depurazione e successivamente all'atmosfera.

I camini di estrazione sono di due tipi secondo le zone di sedimento entro cui si vuole concentrare l'aspirazione:

- pozzetti verticali quando si vuole intervenire sui sedimenti più profondi profittando in particolare della presenza di strati e livelli sabbiosi;
- trincee quando si vuole aspirare i sedimenti naturali e di riporto immediatamente sottostanti le pavimentazioni in asfalto o cemento.

Le due configurazioni sono complementari, infatti la realizzazione dei pozzetti non consente di attuare la depressurizzazione dei

terreni presenti nel primo metro se non in modo parziale ed indiretto.

I camini verticali hanno le seguenti caratteristiche (tav. 1):

- scavati fino al livello statico della falda in condizioni di magra, poco più di 4 metri dal p.c.,
- foro nel sedimento di 10 cm di diametro,
- tubo in PVC atossico PN10, tra le profondità -4 e -1 fenestrato (slot di 0,25 mm), tra -1 e p.c. cieco, sporgente con filettatura gas,
- drenaggio costituito da ghiaietto calibrato 1,5 ÷ 2,5 mm, depolverizzato,
- tappo di bentonite e cementazione tra -1 e p.c.

I camini di aspirazione per trincee avranno le seguenti caratteristiche (di tav. 1):

- trincee scavate fino alla profondità di 110 cm dal piano di calpestio, di lunghezza dimensionata sulle possibilità locali, ma in genere di 10 metri, larghezza dello scasso 30 ÷ 40 cm,
- impermeabilizzazione fondo scavo,
- inserimento ghiaietto 3 ÷ 4 mm depolverizzato,
- posizionamento tubazione PVC atossico PN10 interamente fenestrato (slot 0,25 mm) a circa 80 cm dal p.c, raccordo a "T" e uscita verticale tubo in PVC atossico PN10 cieco lungo 1 metro circa, uscita con filettatura gas,
- copertura con ghiaietto e, sopra questo, ricopertura con terreno di scavo fino al p.c,
- impermeabilizzazione in superficie da realizzare secondo i casi con cemento, con bitume, con tessuto non tessuto impermeabile.

Tutti i camini di ventilazione del sottosuolo saranno forniti di una "testa" di raccordo che, oltre a consentire una stabile connessione con l'insieme dell'impianto, deve essere dotata di una saracinesca di regolazione dell'aspirazione, e la possibilità di far affluire aria

dall'esterno (aria falsa), uscite con attacco rapido tipo gas per monitoraggio depressione, o per controllo di falda, eventuale assunzione campioni di gas (ovviamente ad impianto fermo).

Per la bonifica dei terreni insaturi è indispensabile disporre di pompe dotate di una discreta portata di aspirazione e di una capacità di depressione differenziata secondo le caratteristiche dei focolai di contaminazione e le necessità progettuali ricordate sopra. Date le permeabilità medie riscontrate nell'intero sito, e verificate con le prove

pilota, certamente le soffianti a canale laterale sono quelle a maggiore efficienza, in queste condizioni di permeabilità infatti queste pompe sono le più impiegate e diffuse, le caratteristiche nominali richieste per ogni pompa, e riportate di seguito, sono sempre riferite a frequenze di tensione di 50 Hz.

*Focolaio FCI (capannone Suprema).*

Due distinti impianti di aspirazione uno per la porzione interna e settentrionale al capannone, l'altro per la porzione esterna orientale, come riportato nella tavola 1. 1° impianto, aspiratore a canale laterale monostadio, raffreddato ad aria (tavola 1, riquadro "Soffiante a canale laterale") caratteristiche:

- motore 4,0 kW; 400V;
- portata massima 500 m<sup>3</sup>/h ;
- depressione 200 ÷ 240 mbar;
- valvola sicurezza vuoto (tavola 1, riquadro "Valvola rompivuoto");
- manometro pressione;
- filtro polveri;
- quadro elettrico di comando con protezione motore.
- 

L'impianto è inoltre costituito da:

- piping da 2" in HPDE portante alla soffiante, lungo 75 metri;

- piping da 2" in tubo flessibile corrugato di raccordo con i singoli camini nel complesso lungo 140 metri, con raccordi di lunghezza massima di 40 m (tavola 1, riquadro dello schema d'impianto);
- separatori di condensa a difesa della soffiante, distribuiti lungo la linea (tavola 1, riquadro dello schema d'impianto), ognuno dotato di misuratore del contenuto d'acqua, di rubinetto per il suo svuotamento ed inoltre di manometro per il controllo della depressione interna, l'acqua eventualmente presente viene raccolta e avviata alla colonna di strippaggio. Il loro numero e la disposizione saranno funzione degli esiti ottenuti nei primi giorni di attività, oppure a seguito delle variazioni di portata e depressione imposte al sistema. In tavola 1 è proposta una prima configurazione teorica che, per questa linea ne impone 4;
- 7 camini di aspirazione verticali, profondi fino alla quota della falda in condizioni di magra, poco più di 4 metri dal p.c. (tavola 1 riquadro "Particolari aspirazione") ;
- 4 trincee di aspirazione profonde almeno 1 metro, lunghe mediamente 10 metri, contenenti un tubo di aspirazione del diametro di 2" (tavola 1 riquadro "Particolari aspirazione");
- 2 filtri a carboni attivi da 2 m<sup>3</sup>/cd collocati in serie (tavola 1 riquadro "Filtro carboni attivi");
- piping di cacciata dei gas depurati in HPDE da 4" lungo 75 metri, e 3 metri HDPE 6", fino al camino di emissione;
- camino di scarico dei gas depurati nell'atmosfera con uscita dotata di innesto rapido tipo gas, per il monitoraggio e campionamento.

2° impianto, aspiratore a canale laterale monostadio, raffreddato ad aria (tavola 1, riquadro "Soffiante a canale laterale") caratteristiche:

- motore 3,0 kW; 400V;
- portata massima 300 m<sup>3</sup>/h ;

- depressione 200 ÷ 240 mbar;
- valvola sicurezza vuoto (tavola 1, riquadro “Valvola rompivuoto”);
- manometro pressione;
- filtro polveri;
- quadro elettrico di comando con protezione motore.

L’impianto è inoltre costituito da:

- piping da 2” in HPDE portante alla soffiante, lungo 40 metri;
- piping da 2” in tubo flessibile corrugato di raccordo con i singoli camini nel complesso lungo 80 metri, con raccordi di lunghezza massima di 53 m (tavola 1, riquadro dello schema d’impianto);
- separatori di condensa a difesa della soffiante, distribuiti lungo la linea (tavola 1, riquadro dello schema d’impianto), ognuno dotato di misuratore del contenuto d’acqua, di rubinetto per il suo svuotamento ed inoltre di manometro per il controllo della depressione interna, l’acqua eventualmente presente viene raccolta e avviata alla colonna di strippaggio. Il loro numero e la disposizione saranno funzione degli esiti ottenuti nei primi giorni di attività, oppure a seguito delle variazioni di portata e depressione imposte al sistema, in tavola 1 è proposta una prima configurazione teorica che, per questa linea ne impone 2;
- 3 camini di aspirazione verticali, profondi fino alla quota della falda in condizioni di magra, poco più di 4 metri dal p.c. (tavola 1 riquadro “Particolari aspirazione”);
- 5 trincee di aspirazione profonde almeno 1 metro, lunghe mediamente 10 metri, contenenti un tubo di aspirazione del diametro di 2” (tavola 1 riquadro “Particolari aspirazione”);
- 1 filtro a carboni attivi da 2 m<sup>3</sup> (tavola 1 riquadro “Filtro carboni attivi”);
- piping di cacciata dei gas depurati in HPDE da 4” condiviso

con la precedente soffiante;

- camino di scarico dei gas depurati nell'atmosfera con uscita dotata di innesto rapido tipo gas, per il monitoraggio e campionamento.

*Focolaio FC2 (Magazzino) e FC3 (Max Clean).*

I due focolai sono serviti da un solo aspiratore a canale laterale monostadio, raffreddato ad aria (tavola 1, riquadro "Soffiante a canale laterale") di buona potenza, caratteristiche:

- motore 5,5 kW; 400V;
- portata massima 500 m<sup>3</sup>/h ;
- depressione 300 mbar;
- valvola sicurezza vuoto (tavola 1, riquadro "Valvola rompivuoto");
- manometro pressione;
- filtro polveri;
- quadro elettrico di comando con protezione motore.
- 

L'impianto è inoltre costituito da:

- piping da 2" in HPDE portante alla soffiante, lungo 131 metri;
- piping da 2" in tubo flessibile corrugato di raccordo con i singoli camini nel complesso lungo 120 metri, con raccordi di lunghezza massima di 21 m (tavola 1, riquadro dello schema d'impianto);
- separatori di condensa a difesa della soffiante, distribuiti lungo la linea (tavola 1, riquadro dello schema d'impianto), ognuno dotato di misuratore del contenuto d'acqua, di rubinetto per il suo svuotamento ed inoltre di manometro per il controllo della depressione interna, l'acqua eventualmente presente viene raccolta e avviata alla colonna di stripping. Il loro numero e la disposizione saranno funzione degli esiti ottenuti nei primi giorni

di attività, oppure a seguito delle variazioni di portata e depressione imposte al sistema, in tavola 1 è proposta una prima configurazione teorica che, per questa linea ne impone 6;

- 7 camini di aspirazione verticali, profondi fino alla quota della falda in condizioni di magra, poco più di 4 metri dal p.c. (tavola 1 riquadro “Particolari aspirazione”);
- 8 trincee di aspirazione profonde almeno 1 metro, lunghe mediamente 10 metri, contenenti un tubo di aspirazione del diametro di 2” (tavola 1 riquadro “Particolari aspirazione”);
- 2 filtri a carboni attivi da 2 m<sup>3</sup>/cd collocati in serie (tavola 1 riquadro “Filtro carboni attivi”);
- piping di cacciata dei gas depurati in HPDE da 4” lungo 4 metri, e 3 metri HPDE 6”, fino al camino di emissione;
- camino di scarico dei gas depurati nell’atmosfera con due uscite di cui una dotata di innesto rapido tipo gas, per il monitoraggio e campionamento.

#### *Trattamento dei gas di scarico*

Per il trattamento del gas aspirato con l'impianto di SVE, viste le concentrazioni in gioco non particolarmente elevate, si è scelto il metodo più sperimentato ed economico: adsorbimento su carboni attivi (CA). L'efficienza del trattamento è influenzata da diversi fattori come l'umidità e temperatura del gas in ingresso, tempo di contatto (o velocità di filtrazione) oltre, ovviamente, alle concentrazioni ed alla granulometria carboni.

I gas estratti dal sottosuolo alla temperatura media di 288 ÷ 290° K lungo il percorso nel piping fino alla soffiante, e da questa fino al filtro a carboni attivi aumentano la loro temperatura, in relazione alle condizioni generali di trasferimento.

Per i focolai FC2 ed FC3 quasi tutto il piping è esterno e nei mesi estivi si può stimare un incremento di temperatura dei gas fino a 313° K, l'intervallo di temperatura di lavoro dei filtri a carboni

attivi resterebbe così compreso tra 288 e 313° K. Le isoterme fornite dal produttore dei carboni attivi granulari (GAC) che verranno utilizzati, allegate in calce alla domanda di scarico in atmosfera, sono ricavate per 293,15° K, cioè un valore assai prossimo alla media matematica tra le stime della temperatura minima e massima dei gas in ingresso da depurare.

Il calcolo della capacità di caricamento in peso del carbone si ricava dalle isoterme di adsorbimento, relative alla qualità di CA utilizzato, per ogni contaminante presente nel flusso da depurare, ed alla temperatura di lavoro.

Questi dati sono riportati in due colonne (capacità teorica e reale di adsorbimento) delle tabelle di calcolo che seguono. La tendenza all'adsorbimento è elevata per i composti alifatici (tetracloroetilene, dicloroetilene, tricloroetilene), solo per il cloruro di vinile si hanno valori insufficienti, ma la presenza di questo clorurato non è mai stata rilevata in nessun campione di sedimenti analizzati.

Le concentrazioni risultanti da una valutazione complessiva degli esiti delle analisi di caratterizzazione e dei test di SVE effettuati, consente di stimare le concentrazioni che potrebbero giungere alle singole soffianti durante il primo mese di attività.

Le tabelle 2.11, 2.12, 2.13, riportano il calcolo per la stima del dimensionamento dei filtri a carboni attivi necessari per ogni soffiante di progetto. Nella stima delle concentrazioni si sono assunti sempre i valori attesi per la prima fase di aspirazione.

Per garantire un dimensionamento sicuro dei filtri ed un risultato depurante accettabile, anche nei primi giorni di aspirazione.

Al focolaio FC1 si sono considerate concentrazioni totali massime di 425 g/h all'uscita della soffiante con portata di 500 m<sup>3</sup>/h, derivanti da una distribuzione cautelativa iniziale dei tenori nei gas interstiziali ricavata dalle informazioni disponibili, come riportate in tabella 2.11.

Camini		tenori stimati [g/die]		riferimento stima		
2 camini rep. verniciatura e collaudo		2*3000		SV1 (test pilota)		
2 camini lungo collettore capannone		2*1000		campioni suoli		
3 camini distali, 1 interno e 2 esterni		3*400		campioni suoli		
2 trincee reparto collaudo		2*400		SV1		
2 trincee collettore capannone		2*200		campioni suoli		
Sostanze principali presenti	% in peso	mg/h	Gas al trattamento mg/m <sup>3</sup>	Capacità teorica adsorbimento %	Capacità reale adsorbimento %	Consumo carboni attivi kg/h
1) tetracloroetilene	94	399500	799,0	18,0	10,8	3,70
2) tricloroetilene	5	21250	42,5	3,5	2,1	1,01
3) 1,2 dicloroetilene	1	4250	8,5	4,0	2,4	0,18
4) altri solventi clorurati	<0,1					
Totale						4,89

Peso 4 m <sup>3</sup> carboni attivi (kg)	2400
Durata carboni attivi (secondi)	7,36E+04
Durata carboni giorni (ore)	491
Durata carboni attivi (giorni)	20

Capacità reale=capacità teorica x 0,6

**Tabella 2.11 - FC1, soffiante  $Q=500 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $200 \div 240 \text{ mBar}$ ,  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  al camino**

Sempre nel focolaio FC1 ma per il reparto verniciatura e per il lato esterno est si sono calcolate concentrazioni totali massime di 160 g/h all'uscita della soffiante con portata di  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ , derivanti da una distribuzione cautelativa iniziale dei tenori nei gas interstiziali ricavata dalle informazioni disponibili, come riportate in tabella 2.12.

Camini		tenori stimati [g/die]		riferimento stima		
1 camino prossimo al PZ1A		1*1000		estrapolazione		
2 camini distali esterni		2*500		estrapolazione		
1 trincea reparto verniciatura		1*1000		campioni suoli		
4 trincee collettore esterno		4*200		campioni suoli		
Sostanze principali presenti	% in peso	mg/h	Gas al trattamento mg/m <sup>3</sup>	Capacità teorica adsorbimento %	Capacità reale adsorbimento %	Consumo carboni attivi kg/h
1) tetracloroetilene	94	149460	498,2	18,0	10,8	1,38
2) tricloroetilene	5	7950	26,5	3,5	2,1	0,38
4) 1,2 dicloroetilene	1	1590	5,3	4,0	2,4	0,07
6) altri solventi clorurati	<0,1					
Totale						1,83

Peso 2 m <sup>3</sup> carboni attivi (kg)	1160
Durata carboni attivi (s)	2,28E+06
Durata carboni attivi (ore)	634
Durata carboni giorni (gg)	26

Capacità reale=capacità teorica x 0,6

**Tabella 2.12 - FC1, soffiante  $Q=300 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $200 \div 240 \text{ mbar}$ ,  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  al camino**

Per i focolai FC2 ed FC3 si sono calcolate concentrazioni totali massime di 400 g/h all'uscita della soffiante con portata di 500 m<sup>3</sup>/h, derivanti da una distribuzione cautelativa iniziale dei tenori nei gas interstiziali, ricavata dalle informazioni disponibili, come riportate in tabella 2.13.

Camini		tenori stimati [g/die]		riferimento stima		
3 camini prossimi al focolaio		3*1500		SV9, SV7 (test pilota)		
2 camini		2*500		campioni suoli		
2 camini		2*400		campioni suoli		
3 trincee prossimali FC		3*700		campioni suoli		
5 trincee distali		5*250		campioni suoli		
Sostanze presenti	% in peso	mg/h	Gas al trattamento mg/m <sup>3</sup>	Capacità teorica adsorbimento %	Capacità reale adsorbimento %	Consumo carboni attivi kg/h
1) tetracloroetilene	94	376000	752,0	18,0	10,8	3,48
2) tricloroetilene	5	20000	40,0	3,5	2,1	0,95
4) 1,2 dicloroetilene	1	4000	8,0	4,0	2,4	0,17
6) altri solventi clorurati	<0,1					
Totale						4,60

Peso 4 m <sup>3</sup> carboni attivi (kg)	2400
Durata carboni attivi (s)	1,88E+08
Durata carboni attivi (ore)	522
Durata carboni giorni (gg)	22

$$\text{Capacità reale} = \text{capacità teorica} \times 0,6$$

*Tabella 2.13 - FC2 e FC3, soffiante Q=500 m<sup>3</sup>/h e 300 mbar, 30 m<sup>3</sup>/h al camino*

In conclusione il progetto deve prevedere l'imposizione di 2 filtri a carboni attivi da 2 m<sup>3</sup> l'uno (cioè circa 2400 kg), disposti in serie, all'uscita da ognuna delle due soffianti dotate di 500 m<sup>3</sup>/h, e di due filtri a carboni attivi da 1 m<sup>3</sup> l'uno (1160 kg), sempre disposti in serie, all'uscita dalla soffiante da 300 m<sup>3</sup>/h. I filtri avranno le seguenti caratteristiche:

- diametro 120 cm
- letto unico di altezza utile rispettivamente di 0,88 m (1 m<sup>3</sup>) e 1,78 m (2 m<sup>3</sup>),

- peso CA rispettivamente 1160 kg (2 m<sup>3</sup>), 2360 kg (4 m<sup>3</sup>),
- tempi di contatto gas/GAC nei due filtri in serie rispettivamente superiori a 6 ed a 11 secondi,
- presa controllo e campionamento COV in ingresso filtro,
- presa controllo e campionamento COV in uscita dai filtri;
- ingresso e uscita da 4",
- apertura per il ricambio dei CA.

Lo scarico in atmosfera avverrà attraverso un camino di cacciata disposto lungo il lato ovest, alto circa 12 metri (1 metro in più rispetto l'altezza del capannone), saranno disponibili le prese per in campionamento e le misure di controllo delle concentrazioni in uscita.

La durata dei CA, come si vede nelle tabelle di calcolo presentate, è strettamente correlata alle concentrazioni dei solventi clorurati estratti dal sottosuolo. La situazione illustrata nelle tabelle 2.11, 2.12, 2.13 è rappresentativa delle prime settimane di SVE, la curva teorica di andamento delle concentrazioni all'ingresso alle soffianti vede un dimezzamento dei tenori già dopo un centinaio di ricambi del gas interstiziale nei sedimenti, un secondo dimezzamento dopo circa 300 ricambi. Anche la durata dei CA seguirà un analogo andamento: ad esempio in FC1 dopo la prima sostituzione la durata dei CA si raddoppierà (40 gg), la terza sostituzione avverrà dopo 60-80 giorni, con probabilità la quarta sostituzione dopo oltre 120 giorni, e così via.

Le emissioni in atmosfera medie sul periodo di bonifica saranno contenute in: tetracloro 10 mg/m<sup>3</sup>, tricloroetilene 10 mg/m<sup>3</sup>, 20 mg/m<sup>3</sup> altri solventi clorurati. Si prevede l'impiego di circa 24.000 kg di GAC rigenerabili per raggiungere gli obiettivi di bonifica dell'insaturo.

## 2.6 TRATTAMENTO DELLA FALDA: PUMP & TREAT

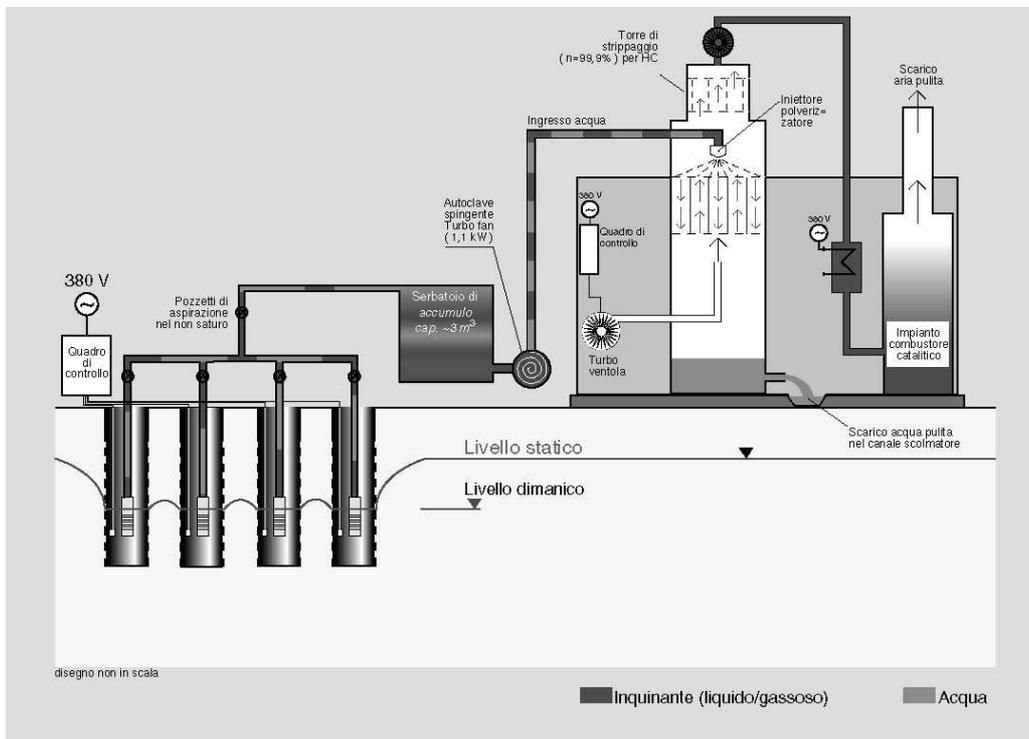


Figura 2.4 - Schema di un impianto di P&T

Il più antico sistema di intervento sulle acque sotterranee contaminate, è costituito dalla creazione di una barriera idraulica mediante trincee, pozzi o dreni, Pump&Treat. Questo sistema è finalizzato all'interruzione dello spostamento a valle del pennacchio inquinante e al prelievo delle sostanze contaminanti dal sottosuolo, le quali sono da sottoporre a trattamento prima dello scarico.

Non esiste una vera e propria distinzione tra la funzione di barriera idraulica e quella di disinquinamento, ma possiamo osservare che:

- Se il sistema è posto ai limiti dell'area contaminata e se i contaminanti sono poco solubili, prevale l'effetto di barriera;
- Se il sistema è posto all'interno dell'area contaminata e se i contaminanti sono solubili, prevale l'effetto di risanamento.

### 2.6.1 Tipologie di opere costitutive del P&T

La creazione di una barriera idraulica può avvenire in diverse fasi di intervento che vanno dalla messa in sicurezza di emergenza alla bonifica. Le opere che vengono costruite sono generalmente della seguente tipologia:

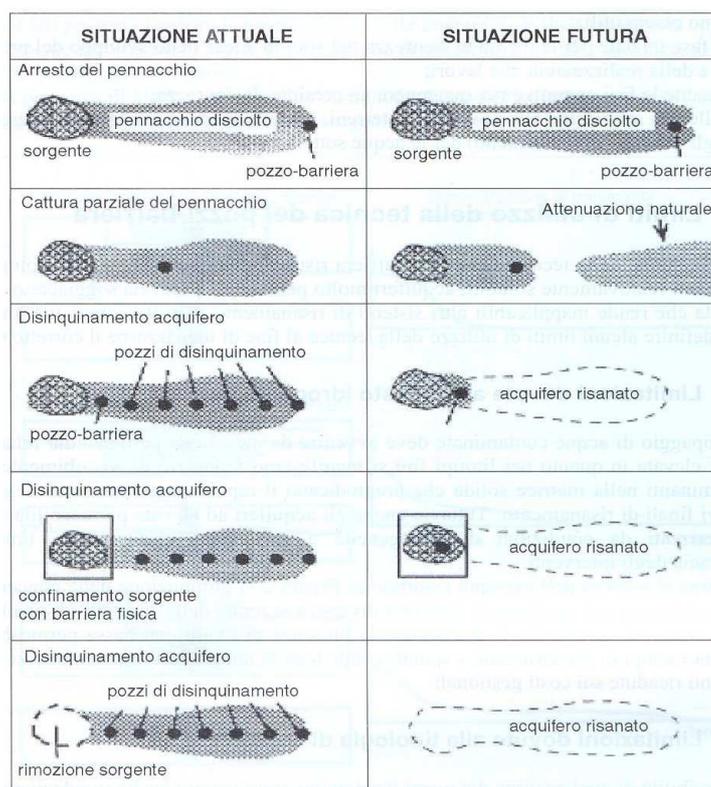
- *Trincea*: viene realizzata in caso di bassa soggiacenza della falda e della profondità della base dell'acquifero. Può anche intercettare solo la prima parte della falda laddove si abbia esigenza di intercettare una fase separata di LNAPL; in questo caso viene abbinata alla messa in opera, sul lato a valle del flusso idrico sotterraneo, a una barriera impermeabile (per esempio costituita da un telo di HDPE). Il flusso può essere indirizzato verso la trincea, dalla produzione di una depressione piezometrica provocata da un pozzo che presenta tratti finestrati più in profondità rispetto alla trincea. Deve ovviamente essere presente un sistema di sollevamento delle acque se non si ha un loro naturale deflusso verso un serbatoio di accumulo, dove le acque vengono stoccate prima del trattamento.

- *Dreno sotterraneo*: viene realizzato in situazioni geologiche, geomorfologiche idrogeologiche particolari, nonché in presenza di insediamenti e infrastrutture che impediscono la realizzazione di altri sistemi di drenaggio delle acque sotterranee a costi sostenibili;

- *Pozzo*: caratterizzato da una serie di vantaggi che ne condizionano positivamente l'utilizzo quali il limitato spazio disponibile per la struttura, la possibilità di modulare la portata prelevata dal sottosuolo (compatibilmente con la portata di falda e delle predite di carico nel pozzo), l'influenza su larga parte dell'intervento (raggio di azione della captazione), l'applicabilità in mezzi a porosità interstiziale e la notevole profondità di intervento. Queste opere possono essere utilizzate singolarmente o abbinata ad altri sistemi di intervento delle acque sotterranee, finalizzati alla creazione di una barriera alla propagazione dei contaminanti.

## 2.6.2 Strategie di utilizzo

In Italia il Pump&Treat viene prevalentemente applicato per il contenimento della contaminazione piuttosto che per il risanamento. La diffusione di questa tecnologia è dovuta alla relativa facilità di progettazione, applicando semplici principi dell'idraulica del sottosuolo. Il sistema di intervento mediante pozzi consiste nel creare una depressione piezometrica in grado di catturare i flussi idrici inquinanti; tale depressione può avere il duplice effetto di deviare le linee di flusso e di determinare un abbassamento del livello di falda in modo che le acque sotterranee non interessino più il terreno contaminato. Perciò affinché l'intervento sia efficace è necessario che la depressione coinvolga tutta l'area inquinata.



*Figura 2.5 – Tipologie di pozzi-barriera. In figura sono indicate le situazioni pre e post trattamento*

Le possibili configurazioni sono le seguenti:

- *Pozzo-barriera*: per l'arresto integrale della propagazione verso valle del plume, in presenza di potenziali bersagli;
- *Pozzo-barriera parziale*: per l'interruzione completa dei flussi inquinanti entro una certa distanza dalla sorgente di contaminazione, oltre il quale il risanamento è affidato a meccanismi di attenuazione naturale;
- *Pozzo-barriera di aggotamento*: per l'integrazione tra barriera fisica e idraulica in modo da mantenere un gradiente idraulico negativo che garantisca condizioni di maggior sicurezza;
- *Pozzo di risanamento*: per l'estrazione e il trattamento di acque contaminate e il successivo riutilizzo o scarico in fognatura/acque superficiali.

All'interno di una procedura di bonifica i pozzi barriera possono essere utilizzati:

- In fase iniziale per la messa in sicurezza del sito, in attesa dello sviluppo del progetto e della realizzazione dei lavori;
- Durante le fasi operative per mantenere un presidio di sicurezza;
- Nelle fasi successive alla bonifica, qualora non siano ancora stati raggiunti gli obiettivi di risanamento per le acque sotterranee.

### **2.6.3 Limitazione all'utilizzo dei pozzi barriera**

L'applicazione di questa tecnica risulta ottimale in presenza di composti inquinanti relativamente solubili, aquiferi molto permeabili e elevata soggiacenza della falda che rende inapplicabili altri sistemi di risanamento. Risulta quindi importante definirne i limiti all'utilizzo al fine di indirizzarne in corretto utilizzo.

#### *Limitazioni dovute al contesto idrogeologico*

Il pompaggio delle acque deve avvenire da mezzi con permeabilità

relativamente elevata in quanto per litotipi fini si manifestano fenomeni di adsorbimento dei contaminanti nella matrice solida che pregiudicano il rapido raggiungimento degli obiettivi finali. Tuttavia anche gli acquiferi ad elevata permeabilità sono caratterizzati da anisotropie ed eterogeneità che possono limitare fortemente l'efficacia dell'intervento.

La diminuzione delle concentrazioni nel tempo può avvenire in modalità diverse a seconda della struttura idrogeologica presente nel sottosuolo. In particolare la presenza di livelli con bassa permeabilità rallenta i tempi di trasferimento e quindi condiziona la durata dell'intervento nonché i costi.

#### *Limitazioni dovute alla tipologia di contaminanti*

Le possibilità di applicazione possono variare in relazione alle caratteristiche di mobilità dei contaminanti e alle condizioni del sottosuolo; per esempio nel caso di composti poco miscibili (come LNAPL e DNAPL) l'applicazione di questa tipologia di intervento è possibile solo per terreni omogenei. Variazioni delle condizioni chimico-fisiche nell'acquifero possono determinare l'insorgere di fenomeni di contaminazione inattesi:

- Variazioni di pH e Eh possono determinare una diversa mobilità delle sostanze;
- L'insorgere di fenomeni di trasporto dei contaminanti per adesione a particelle colloidali possono favorire la propagazione della contaminazione con velocità apparentemente incompatibili con le caratteristiche di adsorbimento delle sostanze, descritte dal coefficiente di ritardo;
- La presenza di alcune sostanze può aumentare la mobilità di altre specie in prossimità della sorgente inquinante.

#### *Limitazioni dovute alle condizioni di flusso e di trasporto degli inquinanti*

Il pompaggio operato dai pozzi determina la cattura delle acque contaminate e il conseguente risanamento della falda, previa rimozione o bonifica della sorgente di contaminazione.

In presenza di composti poco solubili le concentrazioni misurate nei pozzi seguono l'andamento rappresentato in figura 2.6, dove è possibile osservare due comportamenti caratteristici:

- Il raggiungimento di una concentrazione limite risanabile (asintoto), che non solo determina un funzionamento del sistema molto prolungato nel tempo ma talora non consente il raggiungimento degli standard di qualità delle acque sotterranee;

- Dopo l'interruzione del pompaggio, si può avere un effetto di rebound delle concentrazioni determinato da un nuovo massiccio arrivo di inquinante. Tale effetto può essere causato da:

1. miscibilità diversa di famiglie di composti, come nel caso di LNAPL e DNAPL;
2. diverso rilascio in fase acquosa dei contaminanti in relazione alla velocità del flusso idrico;
3. presenza di fenomeni di precipitazione-dissoluzione;
4. inversione del fenomeno della diffusione (da corpi poco permeabili a quelli permeabili) durante la rimozione veloce di acque durante il pompaggio;
5. variazioni di velocità delle acque sotterranee in presenza di eterogeneità e anisotropia dell'acquifero;
6. variazioni della velocità delle acque sotterranee all'interno della zona di cattura del pozzo in pompaggi (più basse vicino allo spartiacque e più alte al centro del cono di depressione).

I parametri più importanti per la decrescita asintotica e il rimbalzo sono l'aliquota di trasferimento della massa e il tempo di adsorbimento.

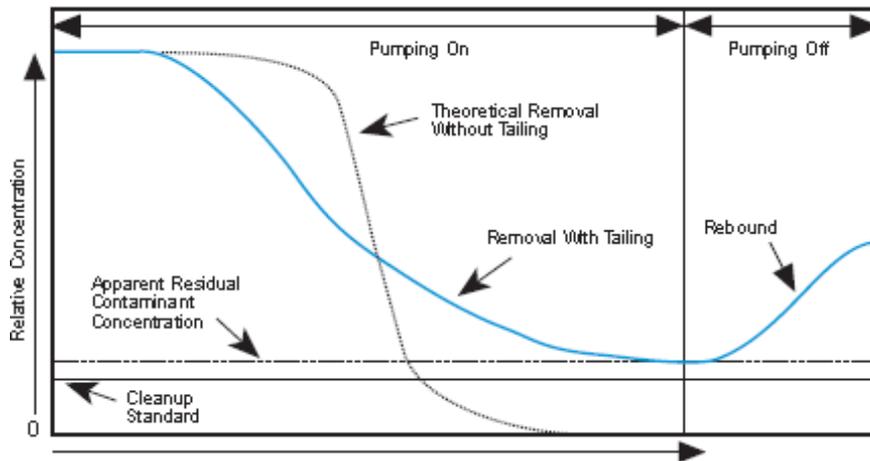


Figura 2.6 – Valori di concentrazioni in funzione della durata di pompaggi.; l'andamento mostra i fenomeni di tailing a rebound.

#### 2.6.4 Criteri dimensionamento di un pozzo-barriera

L'afflusso di acque sotterranee a un pozzo in pompaggio avviene all'interno di una zona delimitata da uno spartiacque sotterraneo espresso dalla relazione:

$$y = \pm \frac{Q}{2bv} - \frac{Q}{2\pi bv} \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

Che per  $y > 0$  diventa:

$$x = \frac{y}{\tan \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{2bv}{Q} \right) y \right] \pi \right\}}$$

E per valori di  $y < 0$ :

$$x = \frac{y}{\tan \left\{ \left[ -1 - \left( \frac{2bv}{Q} \right) y \right] \pi \right\}}$$

L'influenza del prelievo da un pozzo si trasmette anche a valle del pozzo, secondo il flusso idrico sotterraneo, fino a un punto detto di "stagnazione" che può essere espresso in forma semplice mediante le relazioni:

$$x_s = -\frac{Q}{2\pi b v} - \frac{Q}{2\pi T i}$$

$$y_s = 0$$

dove  $Q$  ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ),  $T$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $i$ ,  $b$  (m) e  $v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) rappresentano rispettivamente la portata del pozzo, la trasmissività dell'acquifero, il gradiente idraulico, lo spessore dell'acquifero e la velocità di filtrazione o darciana.

La larghezza  $F$  (m) è denominata fronte di alimentazione (per  $x$  che tende a infinito) ed è data dall'espressione:

$$F = 2\pi x_s = \frac{Q}{bv} = \frac{Q}{Ti}$$

Mentre la larghezza  $E$  (m) del cono di influenza per  $x = 0$  è data da:

$$E = \pi x_s = \frac{Q}{2bv} = \frac{Q}{2Ti}$$

Ed è quindi la metà di  $F$ .

Nell'ipotesi di acquifero omogeneo e isotropo, è possibile dimensionare la portata  $Q$  del pozzo di risanamento attribuendo a  $F$  o a  $E$  il valore della larghezza massima del fronte inquinante  $L$ , misurata perpendicolarmente a una linea di flusso e ricavare il valore della portata da assegnare al pozzo.

La larghezza massima del fronte inquinante,  $L$ , corrisponde alla larghezza massima dell'area contaminata oppure all'intera larghezza del pennacchio.

La scelta del parametro geometrico di riferimento dipende dalla posizione del pozzo rispetto all'area contaminata o dell'insediamento dal quale avviene l'emissione di inquinanti; se

l'opera di captazione è vicina all'area contaminata, nel dimensionamento è preferibile scegliere  $E$ , altrimenti  $F$ .

Nel caso non fosse sufficiente un solo pozzo, il dimensionamento viene effettuato con metodi grafici o con software basati su metodi analitici.

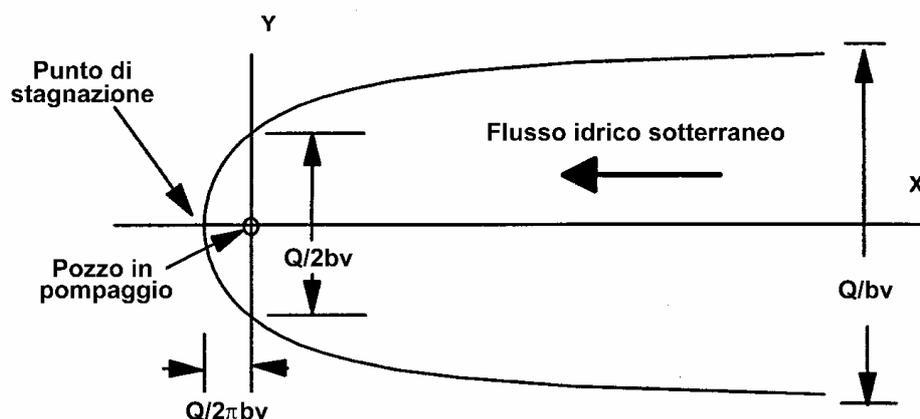


Figura 2.7 – Dimensionamento grafico di un pozzo di emungimento in un impianto Pump & Treat

### 2.6.5 Efficienza idraulica ed efficacia idrochimica del pozzo

Per l'ottimizzazione delle portate di un pozzo devono essere rispettati alcuni criteri di dimensionamento.

Si può definire efficienza idraulica  $E_i$  del sistema di disinquinamento:

$$E_i = L/F$$

Essendo  $L$  (m) il valore delle larghezza massima del fronte inquinante misurata perpendicolarmente a una linea di flusso. Il sistema è ben dimensionato quando  $E_i < 1$  ( $L < F$ ).

Se il sistema è sottodimensionato ( $E_i > 1$ ) si ha una cattura parziale del pennacchio di contaminazione, mentre se il sistema risulta sovradimensionato ( $E_i \ll 1$ ) si ha un prelievo di acque non contaminate, con conseguente aumento dei tempi e quindi costi di

intervento, oltre a un impoverimento eccessivo della risorsa idrica sotterranea. Tuttavia nelle fasi preliminari di intervento, il sistema può essere sovradimensionato a scopo cautelativo (messa in sicurezza di emergenza).

Qualora, in corso d'opera, i piezometri di controllo verificassero una situazione differente da quella prevista, può essere modificato il fronte di richiamo con una opportuna variazione della portata prelevata.

Per la progettazione dei pozzi barriera è possibile applicare anche modelli più complessi che tengono conto anche della dispersione di inquinanti e dell'eterogeneità dell'acquifero. Essi tuttavia necessitano di dati utili alla ricostruzione del sistema fisico, come valori significativi delle dispersività e un sufficiente numero di valori di conducibilità idraulica (per poter descrivere l'eterogeneità dell'acquifero).

L'efficacia idrochimica  $E_{id}$  è definita dal rapporto tra la massa di inquinante rimossa in un dato intervallo di tempo e il volume d'acqua estratto nello stesso tempo secondo l'espressione (Kinzelbach, 1986):

$$E_{id} = \eta / C_m$$

Dove:

$$\eta = \int_0^t C_p(t)Q(t)dt / \int_0^t Q(t)dt$$

$C_m$  e  $C_p$  ( $\text{mg l}^{-1}$ ) rappresentano rispettivamente la concentrazione rilevata al tempo  $t=0$  (prima dell' inizio del pomeriggio) e la concentrazione dell'inquinante nel pozzo. Il parametro  $\eta$  definisce la concentrazione media di inquinante nell'acqua di falda estratta durante il tempo  $t$  (s).

Per confrontare l'efficacia di diverse alternative di intervento, è possibile valutare l'efficacia idrochimica relativa  $E_{id}$ , valutando al

tempo  $t_p$  la percentuale di inquinante rimossa rispetto alla massa iniziale complessiva  $M_0$ .

### 2.6.6 Progettazione dei pozzi

Il dimensionamento dei pozzi può essere eseguito in diversi modi e con diverso grado di approssimazione secondo fattori tecnico-economici che legano la qualità dei dati esistenti alla disponibilità economica per affrontare il problema.

In generale per il dimensionamento di uno o più pozzi sono necessarie una serie di informazioni di carattere idrogeologico e idrochimico; i dati richiesti sono illustrati in tabella 2.14 e il loro grado di definizione dipende dalla situazione locale.

<b>Obiettivo</b>	<b>Dati</b>	<b>Fonti</b>
Fattibilità dell'approccio del pompaggio con pozzi	Conducibilità idraulica dell'acquifero	Prove di pompaggio, slug test
Necessità di intervento e valutazione della sua applicabilità ed efficacia	Tipo, concentrazione e estensione della contaminazione	Campionamento di acque sotterranee e terreni
Mobilità dell'inquinante	Densità, solubilità $K_{ow}$ , frazione di carbonio organico	Dati di letteratura, misure di laboratorio
Modello idrogeologico	Tipologia di litotipi nel mezzo insaturo e saturo	Carte geologiche e idrogeologiche, stratigrafie, ecc
Progettazione sistema di estrazione acque	Soggiacenza della falda	Carte idrogeologiche, misure piezometriche
Ubicazione e spaziatura dei pozzi	Direzione del flusso idrico sotterraneo	Carte idrogeologiche, misure piezometriche

Ubicazione pozzi e tratti fenestrati	Escursione stagionale livello falda	Misure nel tempo del livello piezometrico
Distribuzione verticale della contaminazione	Caratteristiche NAPL saturazione residua nel saturo e nell' insaturo	Dati di letteratura, misure di laboratorio
Effetti sulle acque superficiali	Interazione acque superficiali-sotterranee	Misure sui corsi d' acqua e falde
Bilancio idrico	Analisi rapporto ricarica-drenaggio-recapito	Studi regionali, misure in sito

*Tabella 2.14 – Dati necessari al dimensionamento di un pozzo-barriera*

Particolare rilevanza assume la ricostruzione del modello idrogeologico e la determinazione dei parametri idrogeologici, che possono essere ottenuti per esempio da prove di pompaggio.

I metodi da utilizzare per le interpretazioni delle prove a portata costante (Boulton, Neuman, ecc) sono applicabili nel caso di falda libera e semiconfinata in assenza di particolari condizioni (quali la presenza di limiti impermeabili o di ricarica).

Il dimensionamento del sistema di Pump&Treat è molto sensibile al valore assegnato ai parametri idrogeologici, la cui inesatta definizione comporta un errato dimensionamento delle opere o della portata da prelevare.

Interpretando i dati delle prove di pompaggio con i metodi citati si osserva che in un primo tratto la curva di abbassamento-tempo ha una pendenza maggiore: in questa parte della prova, che caratterizza i tempi iniziali, si possono verificare perdite di carico; quindi, interpretando solo questo tratto, si ottengono valori errati della trasmissività che comportano un dimensionamento della portata rispetto alla larghezza dell'area contaminata a sfavore della

sicurezza.

Il secondo tratto è caratterizzato da una pendenza molto minore che si può manifestare per diverse ragioni:

- in acquiferi semiconfinati, la stabilizzazione degli abbassamenti si manifesta in seguito al passaggio di acque attraverso gli acquitardi degli acquiferi limitrofi;
- nell'acquifero libero si verifica una pseudo-stabilizzazione dei livelli in seguito al fenomeno del drenaggio ritardato che comporta un prolungamento della prova fino alla ripresa degli abbassamenti;
- in acquiferi limitati, è la presenza di un limite di ricarica a provocare la stabilizzazione dei livelli.

L'utilizzo di metodi poco appropriati di interpretazione delle prove (per esempio il metodo approssimato di Cooper-Jacob) determina una sovrastima della trasmissività e conseguentemente della portata.

Il dimensionamento di un pozzo può essere effettuato anche mediante procedure grafiche (Bear o Javandel) che consente una stima preliminare delle portate in gioco e del numero di pozzi necessari a creare l'effetto barriera. Per barriere costituite di più pozzi disposti in modo irregolare con portate di pompaggio differenti si deve implementare un modello di flusso che simuli l'effetto dei prelievi sulla morfologia della falda (MODFLOW, WHAEM, ecc).

### **2.6.7 Previsione del tempo di funzionamento dell'impianto**

Una volta rimossa la sorgente di contaminazione, per portare a termine la bonifica è necessario realizzare una sostituzione delle acque contaminate con altre provenienti dall'esterno. Per stimare il tempo di funzionamento del pozzo si può adottare in prima approssimazione la seguente procedura.

Il volume dei pori  $V_p$  relativo al pennacchio contaminato è definito

dalla relazione:

$$V_p = \int nCdA$$

Dove  $n$  è la porosità efficace dell'acquifero,  $A$  ( $m^2$ ) è la superficie occupata dal pennacchio e  $C$  (m) il suo spessore.

In situazioni relativamente semplici è possibile introdurre un'approssimazione:

$$V_p = nCA$$

In cui  $C$  è lo spessore medio del pennacchio.

Sulla base dell'applicazione di modelli numerici è stato stimato che per produrre un risanamento dell'acquifero partendo dalla concentrazione iniziale  $C_0$  ( $mg\ l^{-1}$ ) fino alla concentrazione  $C_f$  ( $mg\ l^{-1}$ ), in genere corrispondente alle concentrazioni limite fissate dalle normative vigenti, è necessaria la sostituzione del seguente numero dei pori  $NV_p$ :

$$NV_p = -R \ln(C_f / C_0)$$

Dove  $R$  è il fattore di ritardo e ipotizzando reazioni di adsorbimento lineari, reversibili e istantanee.

Una volta stimato il volume dei pori nell'area contaminata, si può ottenere il tempo di funzionamento dell'impianto in funzione della portata del pozzo.

### **2.6.8 Monitoraggio e verifica delle barriere idrauliche**

Un sistema di pozzi con conseguente prelievo di acque contaminate deve disporre di idonei sistemi di monitoraggio che consentano di verificare l'efficienza e l'efficacia dell'opera.

Il sistema di monitoraggio si compone di:

- **Piezometri:** queste perforazioni opportunamente completate sono dedicate alla rilevazione dei livelli piezometrici e conseguentemente del gradiente idraulico. I piezometri consentono quindi di valutare l'effettiva estensione della depressione piezometrica provocata dai pozzi e quindi di fornire indicazioni circa l'efficienza idraulica del sistema predisposto.

- **Pozzi di monitoraggio:** i *pozzi di monte* sono finalizzati alla conoscenza delle caratteristiche idrochimiche delle acque in arrivo alla zona di intervento. La loro localizzazione deve essere al di fuori di possibili interferenze con eventuali fonti di contaminazione locali poste all'esterno.

I *pozzi di monitoraggio del pennacchio* sono utili per valutare l'estensione dell'area contaminata e la sua progressiva riduzione; possono essere localizzati all'interno del pennacchio o alla sua periferia. Dal monitoraggio di questi punti possono essere ricavate importanti considerazioni circa le modalità di gestione del sistema.

I *pozzi a valle* servono a verificare l'efficacia della barriera idraulica; quindi in essi si dovrebbe registrare una tendenza alla decrescita dei livelli di concentrazioni nel caso in cui la sorgente sia stata rimossa.

Per il controllo di una barriera, come detto in precedenza, si utilizzano i criteri di efficienza idraulica e efficacia idrochimica.

Per la valutazione dell'*efficienza idraulica* è possibile seguire metodi sperimentali, come la verifica dell'esistenza della depressione piezometrica e dell'interferenza tra i pozzi attraverso misure nella rete di monitoraggio, e metodi teorici (implementazione di modelli di flusso e trasporto).

Per la verifica dell'*efficacia idrochimica* si effettuano rilievi delle concentrazioni di inquinante nei pozzi a monte, nei pozzi barriera e nei pozzi a valle.

Per la stima dei *volumi di contaminanti rimossi* è possibile eseguire un bilancio di massa verificando la differenza tra la massa di

inquinanti presenti, stimata in fase di caratterizzazioni, e quella rimossa.

L'attività di una barriera idraulica può essere prolungata oltre la durata della bonifica della sorgente in ragione dell'eventuale presenza di sorgenti occulte, della contaminazione residua in sito e della diversa affinità che hanno le sostanze inquinanti rispetto all'acqua e quindi alla differente mobilità della fase disciolta.

La riuscita della bonifica può essere verificata solo mediante prelievi di acque dai pozzi di monitoraggio.

## **2.7 DIMENSIONAMENTO DELLIMPIANTO DI PUMP AND TREAT P&T**

Il test pilota di "air sparging" ha fornito esiti negativi per la sua fattibilità, anzi ha evidenziato nell'intervallo di saturo compreso tra -13 m e -4 m dal piano di terreno la liquefacibilità delle sabbie sottoposte a pressioni cicliche attorno al bar. Quest'ultima considerazione naturalmente inibisce ogni possibilità di applicare questo consolidato metodo di strippaggio della falda per l'estrema vicinanza di costruzioni dotate di fondazioni a plinti (FC1, FC3) che potrebbero avere cedimenti differenziati significativi.

La scelta di procedere con il metodo di aumentare la velocità di falda, inducendo una depressione nella tavola d'acqua con il pompaggio diretto, rappresenta l'unico metodo di bonifica "fisica" in situ applicabile alla falda direttamente sotto i focolai di contaminazione. L'efficacia di questo metodo deve però essere testata nel tempo: occorrerà verificare l'entità del rimbalzo delle concentrazioni residue dopo un'applicazione del pompaggio d'acqua della durata di almeno 90 giorni.

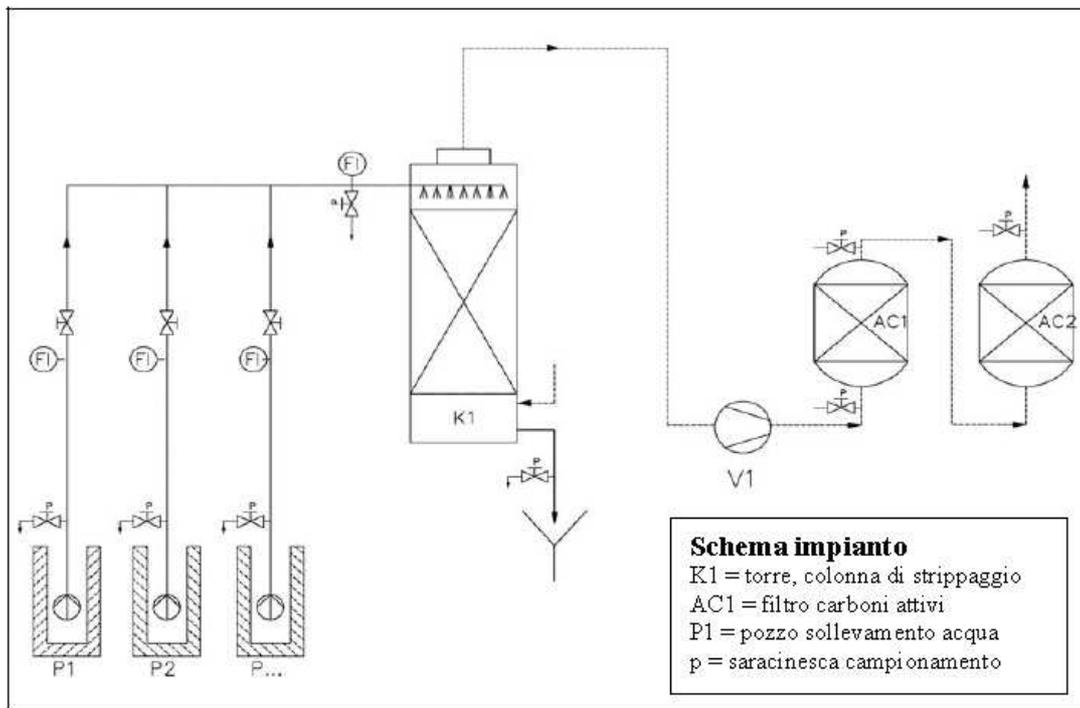


Figura 2.8 – Schema impiantistico del P&T

Nella figura 2.8 è rappresentato graficamente uno schema d'insieme dell'impianto che sarà costituito dai pozzi di sollevamento relativi ai 3 focolai, la colonna di strippaggio, lo scarico dell'acqua depurata nella rete di fognatura, i filtri a carboni attivi per la depurazione dei gas strippati, il camino di cacciata dei gas depurati in atmosfera. Nella tavola 2, oltre ad un più dettagliato schema dell'impianto, sono presentate le posizioni dei pozzi barriera già realizzati, e la posizione dei pozzi da realizzare, finalizzati alla bonifica della falda, in particolare nel focolaio FC3.

### 2.7.1 Raggio d'influenza

I parametri idraulici medi dell'acquifero misurati e calcolati sono riportati in tabella 2.7, la prova di pompaggio a portata costante di 5,4 l/s, eseguita sul piezometro PZ1B per verificare la geometria del cono di depressione, (relazione di caratterizzazione) ha

consentito di verificare un raggio d'influenza superiore a 60 metri, ed una geometria del cono di depressione piuttosto regolare (condizioni quasi isotrope dell'acquifero). In tabella 2.15 sono riportati i dati, per ognuno dei punti di controllo, al tempo zero e dopo 26 ore di prelievo, al momento della prima stabilizzazione dei livelli nei piezometri più vicini all'emungimento.

Tempo [min]	Portata [m <sup>3</sup> /h]	sud <---- Quote falda da bocca pozzo [cm] ----> ovest									
		PZ1A	BR1	BR2	CP	PZ1B	BR3	BR4	BR5	BR6	PZ2
<b>Distanza da PZ1B [m]</b>		<b>102</b>	<b>62</b>	<b>30</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>29</b>	<b>54</b>	<b>91</b>	<b>114</b>	<b>144</b>
0'	0	-414	-431	-439	-402	-424	-427	-423,5	-436,5	-403	-366
1560'	19,4	-423,5	-445	-470	-455	-617	-457	-439	nr	-409,5	-370
	<b><math>\Delta</math> [cm]</b>	<b>-9,5</b>	<b>-14</b>	<b>-31</b>	<b>-53</b>	<b>-183</b>	<b>-30</b>	<b>-15,5</b>	<b>---</b>	<b>-6,5</b>	<b>-4</b>

Tabella 2.15 - Livelli piezometrici dinamici nel campo di prova a zero e ventisei ore di pompaggio

### 2.7.2 Portate d'intervento

Il raggio d'influenza efficace, al fine di costituire una barriera idrogeologica, richiede di verificare il comportamento della falda quando si raggiungono condizioni di regime permanente, in presenza di portate di emungimento applicate a più pozzi, ma molto minori rispetto a quella della prova di pompaggio. La larghezza del cono di depressione di un pozzo è funzione diretta della portata (Q), ed inversa della trasmissività (T) e del gradiente (i), secondo la relazione:

$$Q/2Ti \quad [m^3s^{-1}/m^2s^{-1}=m]$$

Nel nostro caso la portata necessaria per ottenere un cono di depressione che abbia un raggio di 15 o di 23 metri è pari a rispettivamente 0,8 l/s o a 1 l/s. L'adozione di una portata di 1 l/s per ogni pozzo, nel contesto della barriera già realizzata, costituisce

una garanzia di contenimento idrogeologico poichè gli effetti calcolati per il pozzo singolo si sovrappongono e si sommano. Si è verificato con una prova di sole 20 ore che portate di emungimento di 1 l/s contemporanee su due pozzi confinanti (PZ1B e BR3) pur non avendo raggiunto il regime stazionario, provocano abbassamenti significativi tra i punti di emungimento.

Il raggio d'influenza efficace, al fine di disinquinamento della falda, ha invece dimensioni più prossime a quelle verificate con la prova di pompaggio, l'alta trasmissività dell'acquifero consente di influire su volumi di acquifero anche molto grandi, per prolungati tempi di emungimento. L'efficacia del trattamento comunque dipende oltre che dal ricambio dell'acqua interstiziale, anche dalla sua velocità, e questa è funzione del gradiente provocato dall'emungimento. Nelle nostre condizioni i gradienti saranno comunque modesti.

La necessità di contenere le portate di emungimento nei limiti imposti allo scarico in fognatura (4 l/s) costringerà ad utilizzazioni dei pozzi relativi ai tre focolai non sempre contemporanee e parziali, tuttavia tali da garantire la possibilità di un'efficace azione locale.

In tavola 2 sono riconoscibili i pozzi esistenti che verranno utilizzati nelle operazioni di bonifica dei focolai FC1 e FC2, e quelli di progetto, anche per il focolaio FC3.

Nel focolaio FC1 verranno utilizzati il piezometro PZ1A che drena la porzione di sottosuolo sottostante il ramo di fognatura che dal reparto collaudo e verniciatura conduce al collettore comunale; a volte il pozzo BR1 che drena parte del piazzale esterno e parte del ramo di fognatura del reparto collaudo interna al capannone. Verrà poi realizzato un nuovo pozzo PB1 all'interno del capannone per completare il prelievo sotto l'area che si presume più contaminata. L'azione più costante si concentrerà sui pozzi PZ1A e PB1, con portate di almeno 1 l/s ognuno, il PB1 oppure

il PZ1A, potrà giungere a portate da 1,3 l/s.

Nel focolaio FC2 verranno utilizzati i pozzi BR5 che drena il lato nord del magazzino, a volte il BR6 che drena il lato ovest dello stesso. Portate da 1 l/s costanti saranno prelevate dal BR5. Per il focolaio FC3 verrà realizzato il pozzo PB2 capace di drenare l'intera area del focolaio con portate costanti di 1 l/s, oppure anche di 1,3 l/s, nei casi di maggiore depressurizzazione dei sedimenti con SVE.

L'accensione dei pozzi e le portate delle pompe saranno coordinate in modo da non superare le quantità concesse allo scarico in fognatura, ed in relazione alle operazioni di SVE nei diversi focolai di contaminazione.

### **2.7.3 Configurazione impianto**

I pozzi filtranti un intervallo compreso tra i -4 ed i -20 metri dal piano campagna saranno organizzati con elettropompe sommerse dotate delle seguenti caratteristiche:

- motore 0,75 kW; 400V; 2,1 A;
- portata massima 6 m<sup>3</sup>/h ;
- prevalenza massima 58 m;
- quadro elettrico di comando con protezione motore, e sensori di livello IP54;
- capannina o sensore pluviometrico per disattivazione pompaggio;
- piping portante in HPDE da 3" esterno (fuori terra), connessioni con i pozzi con tubazioni flessibili da 1"1/4.

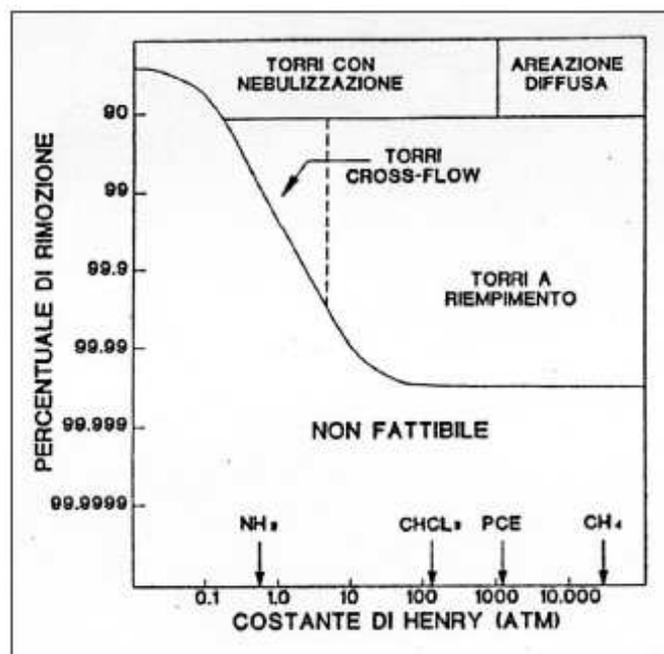
Le pompe saranno dunque tutte autonome, l'attività dell'impianto di sollevamento relativo alla bonifica ed alla barriera idrogeologica sarà regolata da apposita capannina pluviometrica dotata di sensore che interrompe l'alimentazione elettrica alle elettropompe in caso di pioggia. Le pompe saranno posizionate a quote variabili tra 9 e 16 metri secondo le necessità stratigrafiche locali, tubazioni di

mandata in HPDE (alta densità) da 1"1/4 con valvola di non ritorno in corrispondenza della raccorderia, dopo la testa pozzo.

Le cacciate delle pompe saranno connesse ad un ramo di collettamento realizzato con tubazioni da 3" in HPDE posizionate fuori terra, in prossimità del perimetro esterno di Suprema. Anche gli scarichi saranno posizionati fuori terra fino all'immissione nel tombino indicato in tavola 2 di progetto.

La torre di strippaggio riduce la concentrazione delle sostanze volatili presenti nell'acqua di processo, in particolare nel nostro caso, caratterizzato da portate medie e

da presumibili rilevanti variazioni nelle concentrazioni di contaminanti, è molto indicata la torre a riempimento. Nel diagramma, tratto da Williams e Gordon (1986), vengono correlate le percentuali di riduzione del contaminante con la costante Henry di varie sostanze, per diverse soluzioni di trattamento. Come si vede il PCE può essere trattato con percentuali di rimozione molto elevate nella torre di strippaggio a riempimento.



Nell'impianto l'acqua da trattare viene pompata nella porzione superiore della torre, dove viene spruzzata e nebulizzata da appositi ugelli, verso il basso, mentre dalla base della colonna di stripping viene veicolato un flusso forzato d'aria verso l'alto (schema impiantistico di tavola 2).

Nella torre è inserito un "riempimento", nel nostro caso costituito da piccoli corpi ovoidali cavi, l'acqua in discesa gravitativa è costretta ad attraversare questa zona che occupa gran parte della colonna, si ottiene così un forte incremento della superficie e del tempo di contatto aria/acqua. Qui avviene il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa dell'inquinante. La ripartizione tra fase liquida e gassosa di una soluzione è governata dalla legge di Henry per cui la frazione molare ad esempio del precloro in soluzione, è proporzionale alla frazione molare in fase gassosa, il continuo rinnovo dell'atmosfera nel corpo di riempimento, mentre transita l'acqua in moto laminare, consente appunto di "strippare" la fase gassosa man mano si forma.

Le dimensioni ed il volume del riempimento nella colonna devono dunque essere proporzionali alla portata dell'affluente e dell'aria. Per i solventi clorurati, caratterizzati da valori relativamente elevati della costante di Henry, lo "stripper" costituisce il metodo di depurazione più collaudato e applicato di questi ultimi decenni. L'acqua privata dei solventi clorurati che trasportava esce dalla base della torre e viene avviata allo scarico nella rete di collettamento comunale.

Il dimensionamento dell'impianto di depurazione dell'acqua è funzione della portata e delle concentrazioni di ingresso e delle concentrazioni volute in uscita. Nel nostro caso si è scelta una torre capace di trattare portate d'acqua oltre 5,5 l/s, cioè per portate molto più alte rispetto a quelle permesse dalle limitazioni imposte. Ciò consentirà di ottenere rendimenti del 98% di depurazione per ingressi fino a 4 l/s, limite quantitativo allo scarico posto dai

gestori della rete di fognatura e dell'impianto di depurazione. Nella fase di attivazione per la bonifica, le concentrazioni medie in arrivo alla torre avranno valori medi (somma organoalogenati) comunque inferiori a 1,8 mg/l (facendo la media su soli due pozzi che rappresentano la configurazione di minima diluizione). Ciò significa che le acque

scaricate in fognatura avranno tenori di contaminazione non superiori a 0,1 mg/l, circa 10 volte minori di quelli consentiti dalla legge per le acque di superficie.

Dati di progetto:

- torre di strippaggio ad uno stadio;
- portata massima acqua in ingresso 20 m<sup>3</sup>/h;
- alimentazione diretta dalle pompe dell'impianto di sollevamento;
- presa campionamento acqua in ingresso;
- scarico acqua con pompa di rilancio;
- conta-litri e presa campionamento acque in uscita;
- ventilatore (blower) portata massima 1000 m<sup>3</sup>/ora;
- essiccatore gas (umidità minore del 50%);
- quadro elettrico di controllo IP54;

L'impianto di trattamento sarà posizionato lungo il fronte est del capannone di Suprema, come indicato nella tavola 2, sarà dotato di fondazione a platea costituita da una soletta in cemento armato con rete elettrosaldata di 2\*2 metri di lato, appoggiata sul piazzale già dotato di circa 30 centimetri di sottofondo. Il sovraccarico massimo della torre in funzione (cioè contenente acqua di processo) è inferiore a 5 tonnellate, che viene quindi distribuito uniformemente in termini di 0,125 kg/cmq, pressione di esercizio ampiamente assorbita dalle caratteristiche del piazzale e dei sedimenti sottostanti. Questi ultimi infatti avrebbero una capacità portante superiore a 100 kPa (1 kg/cmq) già nel primo metro, come si desume dalla prova penetrometrica con punta elettrica strumentata

(CPTU), eseguita in prossimità di PZ1B, allegata al testo della relazione di caratterizzazione.

#### **2.7.4 Trattamento e scarico gas in atmosfera e scarico acqua in fognatura**

L'aria a circolazione forzata della torre di strippaggio esce carica dei gas strippati, e viene convogliata al sistema di depurazione. Anche per la depurazione del gas si è scelto il metodo più consueto e sperimentato: adsorbimento su carboni attivi (CA). L'efficienza del trattamento è influenzata da diversi fattori come l'umidità e temperatura del gas in ingresso, oltre alle concentrazioni contaminanti, granulometria carboni, tempo di contatto.

Il calcolo della capacità di caricamento in peso del carbone si effettua con le isoterme di adsorbimento relative alla qualità di GAC utilizzato per ogni contaminante presente nel flusso d'aria secca, ed alla temperatura di lavoro.

Le isoterme fornite dal produttore dei carboni attivi che verranno utilizzati, sono allegate in calce alla domanda di scarico in atmosfera sono ricavate per 293,15° K a fronte di una temperatura di lavoro dei filtri a carboni, compresa tra 288 e 313°k. La tendenza all'adsorbimento è elevata per i composti alifatici (tetracloroetilene, dicloroetilene, tricloroetilene), solo per il cloruro di vinile si hanno valori modesti.

Imponendo due filtri, collocati in serie, per un totale di 1160 kg di carboni attivi si avrà una buona resa depurante, sia per le temperature del gas in ingresso (l'acqua di falda ha temperatura attorno ai 15°C), sia per i tempi di contatto gas-GAC (maggiori di 6 secondi), sia per le modeste concentrazioni in gas contaminanti all'origine (si veda scheda RG52, allegata alla domanda di scarico in atmosfera).

In considerazione delle portate d'acqua sollevate con la massima concentrazione possibile, mediamente 7 m<sup>3</sup>/h (su due pozzi),

calcolando concentrazioni massime costanti di 1,8 mg/l di clorurati ( ad esempio PZ1A + BR1 oppure BR5 + BR6), ed un flusso d'aria forzata, mediamente 750 m<sup>3</sup>/h, ai filtri a carboni attivi si avrebbero tenori massimi in ingresso di circa 16,8 mg/m<sup>3</sup>, con tempi di attraversamento dei due filtri superiori a 6 secondi, si avrebbe una composizione dello scarico prevedibile attorno a 11 mg/m<sup>3</sup>, [tetracloroetilene = 6,4; dicloroetilene = 0,5; tricloroetilene = 1; dicloropropano = 2,1; vinile = 0,5).

In presenza di arrivo di picchi massimi di contaminazione fino a 5 mg/l, caso che ha possibilità di verificarsi solo se nei 2 pozzi di nuova realizzazione (PB1, PB2) si rinvenissero concentrazioni doppie rispetto a quelle massime rilevate ad oggi, e si prelevasse solamente dai questi due pozzi, si avrebbe un carico inquinante in ingresso di 35 g/h. Anche in questo caso allo scarico si avrebbe un tenore accettabile della somma dei contaminanti pari a 28 mg/m<sup>3</sup>, la tabella 2.16 riporta la stima del consumo dei carboni per queste ultime condizioni estreme.

Sostanze presenti	% in peso	mg/h	Gas al trattamento [mg/m <sup>3</sup> ]	Capacità teorica adsorbimento %	Capacità reale adsorbimento %	Consumo carboni attivi [kg/h]
1) tetracloroetilene	67	23450	27,1	18,0	10,8	0,22
2) tricloroetilene	11,4	3990	4,6	3,5	2,1	0,19
3) dicloropropano	13,6	4760	5,5	4,0	2,4	0,20
4) dicloroetilene	4,13	1445,5	1,7	0,9	0,54	0,27
5) cloruro di vinile	3,5	1225	1,4	0,0	0	
6) altri solventi clorurati	<0,5					
Totale						0,87

Peso carboni attivi [kg]	1160
Durata carboni attivi [h]	1329
Durata carboni attivi [s]	4,78E+06

Capacità reale=capacità teorica x 0,6

*Tabella 2.16 – Filtri CA del gas strippato dall'acqua sollevata nei focolai di contaminazione.*

Dati di progetto:

- n. 2 filtri a carboni attivi a 1 m<sup>3</sup> l'uno disposti in serie,

ognuno alto 150 cm, diametro 120 cm, unico letto (vedi scheda RG52);

- presa controllo e campionamento COV atmosfera in ingresso filtro,
- presa controllo e campionamento COV atmosfera in uscita dai filtri;
- camino di scarico in atmosfera da 6" ed alto 12 metri;
- possibilità di aggiungere altre sezioni di filtri a carboni attivi in serie, in caso di superamento del tenore di VOC al camino di scarico.

I 2 filtri a carboni attivi saranno sistemati in serie, come da progetto (vedi tavola allegata), accanto alla torre di strippaggio, si prevede un consumo di CA pari a 6.000 kg circa. Il camino di scarico in atmosfera sarà ancorato alla torre stessa e alla muratura del capannone e sarà alto 12 metri, 1 metro in più rispetto l'altezza massima raggiunta dal tetto del capannone stesso, e molti metri in più rispetto a tutti gli edifici presenti in un intorno di 50 metri dal punto di emissione (tavola 2).

Il punto di scarico in fognatura indicato nella tavola 2, e nella figura allegata alla domanda, è costituito da un tombino 40x40, posto all'angolo sud est del limite di proprietà, in cui confluiscono le acque miste dello stabilimento di Suprema (nere, pluviali, interno capannone ed in piccola parte di dilavamento del piazzale), ormai dismesso da oltre 8 anni.

Da questo tombino si diparte una tubazione (DN300) che confluisce nel collettore comunale di via Galliera, indicato come un CM 1.200, quindi ampiamente capace di ricevere le modeste portate di progetto.

Per il sollevamento, il trasporto, la depurazione e lo scarico in fognatura delle acque freatiche, non viene coinvolta la rete di fognatura interna a Suprema, né quella delle acque di dilavamento dei piazzali esterni. Verrà utilizzato solamente il brevissimo tratto

di fognatura esistente (appena 4 metri, entro la proprietà) che connette la rete dello stabilimento al collettore fognario di via Galliera (CM 1.200).

## **2.8 BONIFICA IDROCARBURI**

Il risanamento dei terreni contaminati da HC è stata affrontata sia nella fase progettuale sia attuativa da Nier

L'area inquinata da idrocarburi presenta contaminazione nel suolo nella zona della ex-cisterna e possibilmente anche in porzioni di suolo limitrofe alla ex-cisterna.

In corrispondenza di un piezometro adiacente alla ex-cisterna è stato rilevata la presenza di prodotto in fase libera nelle acque di falda, le quali presentano anche una fase idrocarburica disciolta.

Il progetto di bonifica di questa area prevede un approccio integrato fra scavo e tecnologie in-situ per i terreni e per le acque di falda.

Lo scavo è stato dimensionato sulla base delle evidenze analitiche sulla distribuzione della contaminazione nel suolo nell'intorno della ex-cisterna e sulla presenza di strutture interrato in cemento che dovranno essere demolite precedentemente o in fase di scavo per poter definire nel dettaglio la diffusione locale della contaminazione.

Le tecnologie in-situ sono dimensionate sulle base dei dati sito-specifici ottenuti da prove realizzate in cantiere, ed applicate in modo conservativo (considerando raggi di influenza inferiori a quelli realmente misurati).

Le tecnologie in-situ vengono utilizzate sia per migliorare la bonifica dei terreni insaturi (zona vadosa) sia e soprattutto per la bonifica dell'acqua di falda.

La rimozione del prodotto in fase libera risulta prioritaria rispetto a

alle altre attività di bonifica che possono essere applicate solo dopo la completa rimozione degli idrocarburi in sospensione. Di seguito una descrizione della strategia di bonifica da applicare per l'area contaminata da idrocarburi.

### **2.8.1 Strategia di bonifica**

Il sito in oggetto è caratterizzato da una matrice limo-sabbiosa con la tendenza ad aumentare nella fase più grossolana, e conseguente aumento della permeabilità, con la profondità. Alla profondità di circa 4/4,2m è generalmente presente uno strato a ridotta permeabilità.

In questo tipo di suoli la porosità risulta compatibile per l'applicazione di tecniche di bioslurping per il recupero del prodotto in fase libera nell'acqua di falda e la applicazione del soil vapour extraction per il risanamento degli idrocarburi leggeri e volatili accoppiata ad iniezioni di aria in falda (air sparging). Si propone quindi di procedere con una bonifica ad approccio integrato per il risanamento del sito in oggetto, come di seguito:

- FASE I1: Applicazione della tecnica di Bioslurping per il recupero del prodotto in fase libera presente nell'acqua di falda (LNAPL) per un periodo di circa n.4 mesi.
- FASE I2: Scavo e smaltimento dei terreni contaminati da idrocarburi con eventuali demolizioni o installazione di strutture di supporto delle strutture adiacenti all'area di scavo. Durata dell'intervento prevista di circa 3 settimane.
- FASE I3: Applicazione della tecnica di air sparging con iniezione di aria in falda per facilitare la rimozione degli idrocarburi volatili e contemporanea applicazione della tecnica di SVE per il recupero delle sostanze volatili provenienti sia dalla zona insatura che da quella satura per un periodo di 12 mesi.

## **2.8.2 FASE I1: Rimozione di prodotto in fase libera in falda con Bioslurping**

### *Pozzi di Estrazione Biosplurping*

I pozzi di estrazione per il Bioslurping dovranno essere localizzati all'interno dell'area inquinata da idrocarburi in falda individuata nell'area residenziale durante la fase caratterizzazione.

La costruzione dei pozzi di estrazione è particolarmente delicata e potrebbe avere effetti significativi sull'efficienza del sistema nel recupero di LNAPL rispetto ai quantitativi di acqua e gas aspirati.

Il sistema slurper genera una pressione negativa all'interno del pozzo la quale viene equamente distribuita dalla testa del pozzetto fino all'interfaccia con il prodotto libero e l'aria interstiziale. Il vuoto creato nel pozzetto genera una depressione d'aspirazione nella zona perforata del piezometro; la maggior parte della pressione è persa nella zona vadosa, ma parte di essa è utilizzata per aspirare prodotto in fase libera e acqua all'interno del pozzetto stesso. Un design efficiente del pozzo di estrazione (e della testa pozzo) deve minimizzare le perdite di energia di aspirazione nella zona vadosa e massimizzare l'ammontare di prodotto in fase libera verso il pozzo stesso.

Il pozzetto adibito allo slurping deve presentare una sezione con superficie perforata che interessa sia la zona vadosa sia la superficie di falda. Il design del pozzetto dovrebbe inoltre permettere di aggiustare l'altezza della zona perforata per avere sempre corrispondenza della stessa con l'interfaccia zona vadosa/superficie di falda.

In totale verranno installati n.8 pozzetti di Biosplurping verticali. In figura 2.9a vengono illustrate le specifiche dei pozzi verticali di estrazione (Bioslurping Well) ed

in figura 2.9b viene indicata la loro posizione in pianta.

Ogni Bioslurping Well verrà installato in un foro dal diametro di

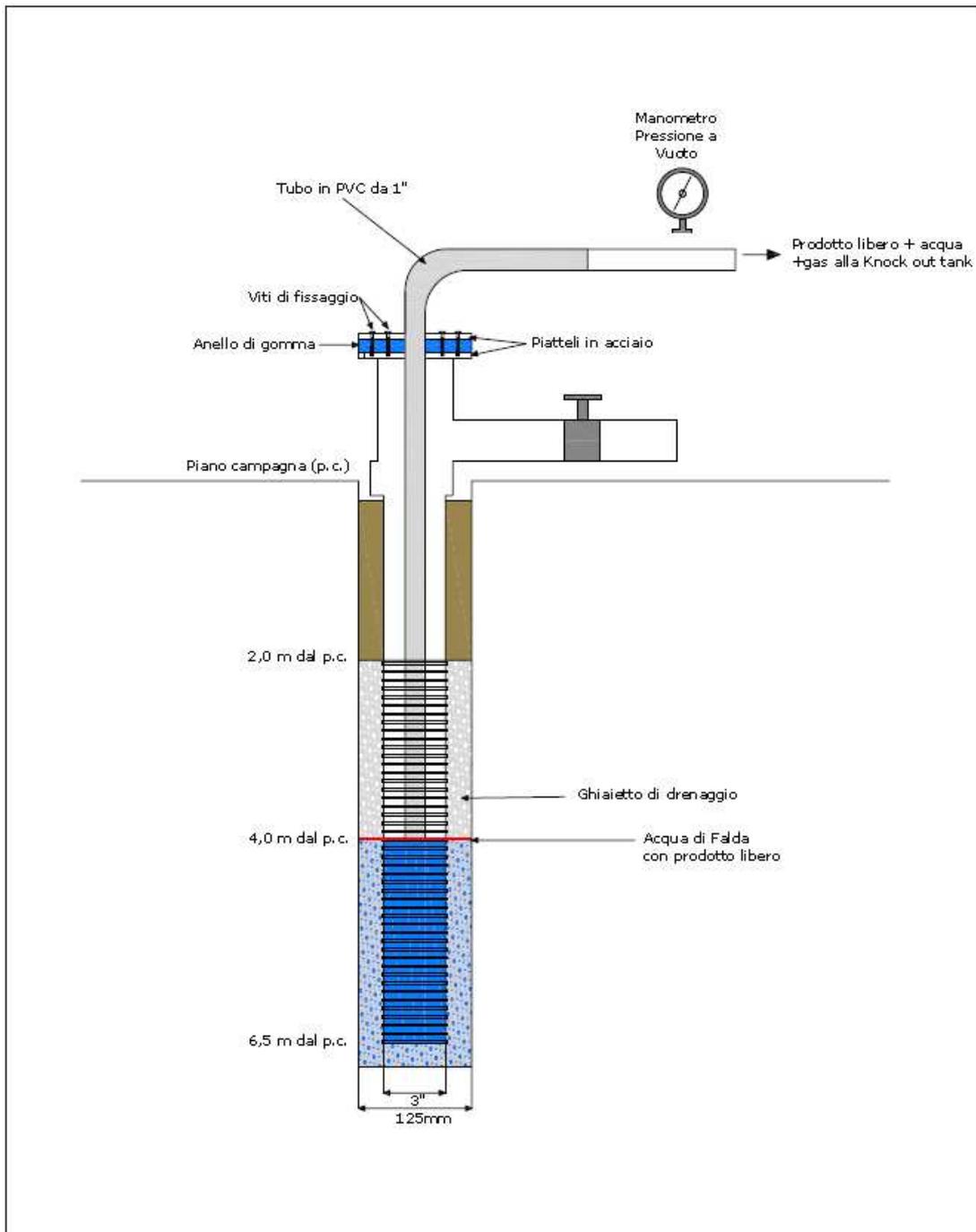
125mm e sarà costituito da un pozzo dal diametro 3" fessurato per una lunghezza di 4,5 metri (da 2m a 6,5m dal p.c.) per permettere l'aspirazione di gas e acqua di falda.

L'intercapedine fra il pozzo e la parete del foro verrà riempita con ghiaietto siliceo drenante lavato da 2-4mm, posato dalla profondità di 1m da p.c. fino a fondo foro, mentre il primo metro verrà riempito con miscela cemento-bentonite (impermeabile) fino a piano campagna.

All'interno del pozzo da 3" verrà installato un tubo di estrazione in PVC da 1" di diametro. Tale tubo di estrazione interno al pozzo non è fessurato ed è collegato attraverso piping e valvole di regolazione ad una pompa a vuoto a valle del sistema. All'estremità superiore del pozzo di estrazione verrà installata una testa pozzo: ogni testa pozzo (o in collegamento in serie con la testa pozzo) sarà dotata di valvola di regolazione manuale del flusso di aria. A loro volta le teste pozzo sono collegate a tubi flessibili da 2" che convogliano i soil-gas e liquidi estratti verso l'impianto di trattamento delle acque e dei soil-gas.

La lunghezza del tubo in PVC da 1" di diametro posizionato all'interno del pozzo da 3" è regolabile permettendone l'installazione a profondità diverse a seconda della variabilità del livello di acqua di falda e delle diverse miscele di aria/acqua che si vogliono estrarre. Questo design portato all'estremo consente di poter aspirare selettivamente acqua di falda e non gas diventando un pump&treat, e viceversa aspirando selettivamente gas e non acqua di falda diventando uno SVE.

I fattori principali che determinano il design del sistema Bioslurping dipendono dalle caratteristiche idrauliche dell'acquifero e dalla macro-porosità del suolo i quali determinano la velocità, i volumi ed il raggio di influenza di aspirazione di acqua e gas.



*Figura 2.9a - Illustrazione schematica dell'installazione del pozzo di estrazione (Bioslurping Well) Posizionamento e numero pozzi di estrazione per bioslurping*

Il posizionamento dei pozzi è indicato è indicato in figura 2.12a.

#### *Unità di trattamento*

I fluidi estratti dai pozzi di bioslurping (prodotto in fase libera, acqua di falda e soil-gas) vengono trasferiti all'unità di trattamento ed ai sistemi di abbattimento degli inquinanti in acqua e gas. L'unità di trattamento include attrezzature per applicare tutte le tecniche di bonifica previste in situ (Bioslurping, Soil Vapour Extraction, Air Sparging/Bioventing).

### **2.8.3 FASE I2: Presenza di contaminazione superiore alle CSR nei terreni insaturi: Scavo e smaltimento.**

Successivamente alla rimozione di prodotto libero in falda (FASE I1), si potranno effettuare i lavori di scavo e rimozione dei terreni contaminati nella zona insatura. Lo scavo del materiale contaminato interessa approssimativamente l'area individuata in figura 2.9b.



*Figura 2.9b - Area indicativamente interessata dallo scavo di materiali contaminati presso Ex-Suprema*

Considerando i materiali ad oggi già rimossi e stoccati all'interno del capannone (scavo di circa 6m<sup>3</sup> di terreno effettuato per la rimozione della cisterna) e considerando probabile la presenza di contaminazione nell'intorno o al di sotto delle strutture in cemento interrato presenti nell'area, si calcola che per eliminare i terreni con concentrazioni residuali di idrocarburi superiori alle CSR occorra scavare e rimuovere circa ulteriori 50-70m<sup>3</sup> di terreno.

Come da caratterizzazione, i suoli presenti attorno alla ex-cisterna di gasolio (ora rimossa) presentano superamenti della CSR per gli idrocarburi al di sotto di una profondità di circa 2,5 metri dal piano campagna. Lo scavo dei terreni contaminati perciò verrà effettuato con:

- Rimozione dei primi 2,5 metri dal piano campagna (denominati "volumi tecnici") e stoccaggio separato. Due campioni composti rappresentativi dei volumi tecnici verranno raccolti e spediti a laboratorio certificato. Nel caso le concentrazioni siano confermate essere inferiori alle CSR per i terreni, i volumi tecnici verranno riutilizzati nel punto originario di scavo. Medesimo approccio verrà applicato per le strutture in cemento eventualmente rilevate durante gli scavi. Per quel che riguarda le tubazioni presenti nella zona degli scavi, queste verranno rimosse e recuperate ove possibile o smaltite presso impianto autorizzato.
- Rimozione dei terreni contaminati dalla profondità di circa 2,5m p.c. fino a fine contaminazione (approssimativamente a 3,5/4m da p.c.) mediante scavo. I materiali contaminati verranno stoccati separatamente dai "volumi tecnici" e smaltiti presso impianto autorizzato. Due campioni composti rappresentativi dei materiali verranno raccolti e spediti a laboratorio certificato per la classificazione del rifiuto prima dello smaltimento presso struttura autorizzata. L'area di scavo verrà riempita con i materiali inerti o terreni dei volumi tecnici di scavo (qualora le analisi di laboratorio lo permetteranno) e con altri materiali inerti o terreni puliti

provenienti dall'area interna ex-Suprema.

Come detto verranno scavati i terreni al di sotto dei 2,5 metri dal piano campagna in un'area e volume la cui esatta estensione (a causa della presenza di strutture interrato) verrà determinata in modo preciso durante l'esecuzione dei lavori. In campo si utilizzerà un rilevatore foto ionizzatore da campo (PID) che consentirà di meglio individuare le aree contaminate.

L'ex-cisterna interrata (ora rimossa) era collocata sopra ad una platea in cemento alla profondità di circa 3,0/3,2m da p.c.. Tale platea non è stata rimossa. E' ipotizzabile che parte della contaminazione sia ancora presente sotto tale platea.

Durante la fase di scavo sarà pertanto necessario rimuovere la platea in cemento, verificare lo stato dei terreni sottostanti, scavare e smaltire il terreno eventualmente contaminato presente sotto tale struttura.

Adiacente all'area dove era posizionata la cisterna, esattamente tra lo scavo della cisterna ed il magazzino, è tuttora presente una pesa interrata. E' possibile che esista una continuità strutturale fra la platea e la pesa e quindi una possibile presenza di contaminazione anche sotto la pesa. Lo scavo per la bonifica deve prevedere anche la rimozione della pesa con ispezione e verifica dello stato di contaminazione dei terreni

sottostanti i quali, se contaminati al di sopra delle CSR, dovranno essere rimossi e smaltiti.

Preliminarmente alla fase di bonifica I2, prima di intervenire sulle strutture sotterranee presenti nell'area della pesa, a causa della loro profondità sarà necessario valutare la tipologia di fondazioni e strutture interrato di sostegno degli edifici e muri presenti nell'area. Occorrerà quindi verificare l'eventuale necessità di sostenere e/o demolire parte del muro del magazzino adiacente alla pesa per evitare crolli della struttura stessa durante le operazioni di scavo. In maniera analoga sarà necessario valutare la stabilità del muro di

confine adiacente all'area di scavo (di cui non si conosce la struttura sub-aerea) e prevedere se necessario un sostegno con micropali o palancole a protezione sia del muro che degli operatori. I volumi di scavo sono stati perciò stimati sulla base delle informazioni a disposizione al momento della stesura del progetto di bonifica ed è ipotizzabile che sarà necessario valutare modifiche e/o integrazioni al progetto in fase di attuazione. In particolare la presenza di sottostrutture solo parzialmente conosciute richiederà flessibilità di intervento verso ciò che verrà eventualmente portato alla luce durante i lavori.

In particolare sarà necessario predisporre un sistema di by-pass per il sistema fognario e raccolta acque piovane presente nell'area in quanto un malfunzionamento di tale sistema potrebbe provocare allagamenti.

Al termine dello scavo, verranno raccolti campioni composti di validazione su tutti i lati perimetrali e sul fondo della scavo per un totale di n.5 campioni composti (in contraddittorio con gli Enti di Controllo) per verificare che le concentrazioni residue siano uguali o inferiori alle CSR calcolate con l'analisi di rischio

#### *Aree di stoccaggio temporaneo dei terreni scavati*

Le aree di stoccaggio temporaneo dei terreni scavati verranno predisposte con teli in HDPE all'interno del capannone adiacente all'area di scavo (al riparo dagli eventi atmosferici).

Le aree di stoccaggio saranno delimitate da un cordolo su cui verrà risvoltato il telo in HDPE. I cumuli di stoccaggio temporaneo di terreni verranno, coperti con telo in HDPE in modo da evitare sollevamento di polveri internamente al capannone.

#### **2.8.4 FASE I3: Rimozione di contaminazione disciolta in falda e residuale nel suolo con SVE ed AirSparging (Bioventing).**

Successivamente alla rimozione di prodotto libero in falda (FASE

I1) ed alla rimozione di terreni insaturi contaminati oltre le CSR (Fase I2), si passerà alla fase di bonifica delle acque di falda e della fase idrocarburica in essa disciolta (FASE I3).

Per ottenere la bonifica delle acque di falda verrà iniettata aria sottofalda (airsparging) ad una profondità di circa 6/6,4 m da p.c. con parallela rimozione della fase volatile strippata e conseguente ventilazione del terreno attraverso l'applicazione del vuoto spinto (SVE/bioventing).

#### *Soil Vapour Extraction – pozzetti di estrazione*

I medesimi pozzetti utilizzati per il bioslurping (FASE I1) verranno riutilizzati e convertiti in pozzetti per il Soil Vapour Extraction (SVE). A tal scopo il tubo di estrazione da 1” verrà sollevato rispetto alla profondità della falda per minimizzare l'estrazione di acqua e massimizzare l'estrazione di gas.

I n.5 pozzetti di estrazione convertiti allo SVE svolgeranno ruolo fondamentale nel controllo ed estrazione dei gas e composti volatili la cui formazione verrà favorita dall'air sparging sotto falda.

#### *Air sparging/Bioventing - pozzetti di iniezione*

I n.8 pozzi di iniezione di aria sotto falda (air-sparging wells) sono localizzati all'interno dell'area individuata come inquinata durante la caratterizzazione.

L'aria in pressione viene iniettata nel plume di contaminazione in falda in modo da causare un gorgogliamento d'aria che penetra orizzontalmente e verticalmente nella falda e nel terreno provocando lo strippaggio dei composti organici presenti nell'acqua e la volatilizzazione di quelli presenti negli interstizi del terreno. A tale scopo il pozzetto di iniezione deve essere installato in modo che l'iniezione avvenga al di sotto della superficie della falda favorendo il gorgogliamento. In modo indiretto l'insufflazione di aria in falda e nel terreno favorisce anche reazioni di biodegradazione ossidativa degli idrocarburi.

Il Air Sparging Well è costituito da un foro dal diametro 3" all'interno del quale è installato un tubo in PVC da 1" di diametro per la iniezione di aria attraverso diffusori microporosi.

Il pozzetto adibito all'air sparging deve presentare una sezione con superficie perforata alla profondità di circa 6 a 6,4 m da p.c. Il foro viene riempito con ghiaietto siliceo drenante lavato da 2-4mm in corrispondenza del diffusore d'aria (da 6 a 6,5m da p.c.) mentre il resto viene riempito con miscela cemento/bentonite da 5.8 m fino a piano campagna. In figura 2.10 vengono illustrate le specifiche del pozzo di iniezione (Air Sparging Well).

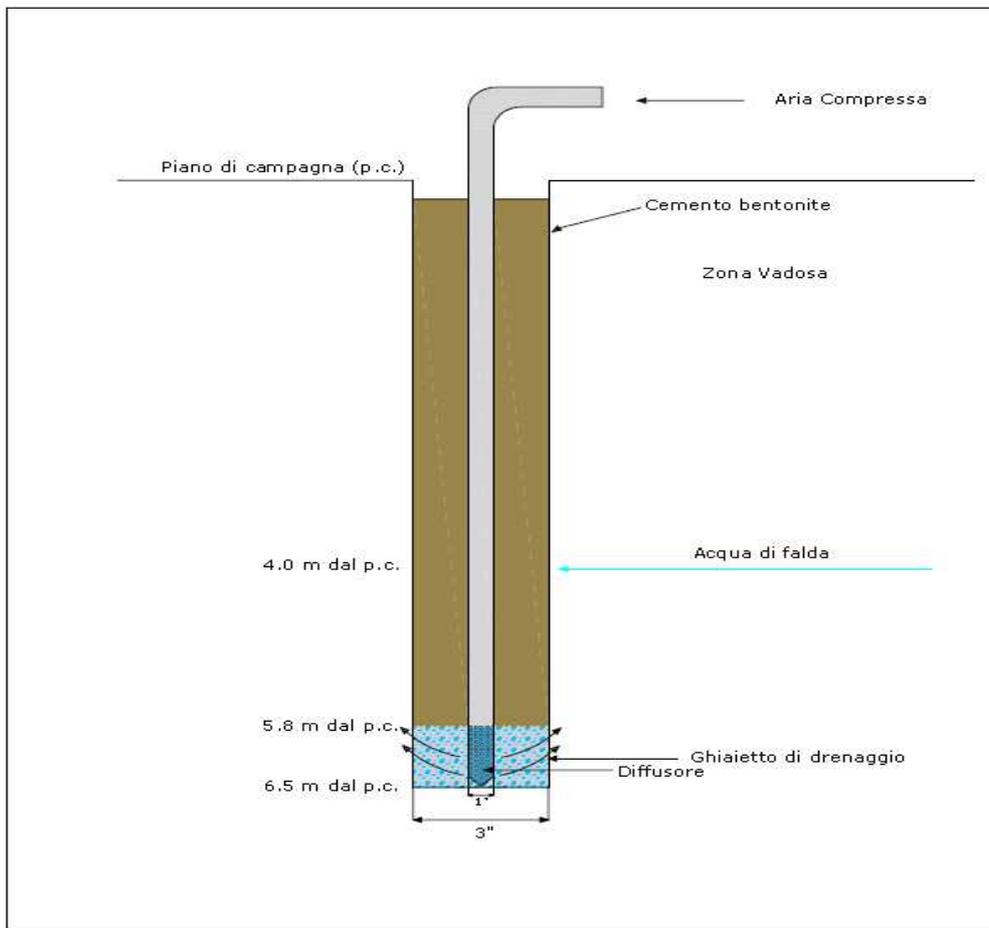


Figura 2.10 - Illustrazione schematica dell'installazione del pozzo di estrazione (Air Sparging Well).

L'iniezione di aria sotto falda e la ventilazione del terreno ottenuta con lo SVE genera una ossigenazione del terreno ed acqua di falda che solitamente promuove anche attività batterica di debridazione degli idrocarburi (bioventing). L'attività di degradazione batterica si genera quando vengono rimossi i fattori limitanti a tale attività, pertanto il grado di attività batterica che verrà incentivato grazie all'aumentato ossigeno disponibile, sarà dipendente anche da condizioni sito specifiche quali pH, potenziale Redox e presenza di sostanza organica e nutrienti nel terreno.

### **2.8.5 Unità di trattamento Bioslurping/SVE/Airsparging**

L'unità di trattamento proposta include attrezzature per applicare tecniche di Bioslurping, Soil Vapor Extraction, Air Sparging (Bioventing).

Principalmente l'unità presenta un sistema di aspirazione con pompa ad alto vuoto con capacità di poter operare con miscele miste aria/acqua e quindi di richiamare in superficie liquidi e sostanze gassose attraverso i pozzetti di estrazione. Gli altri elementi principali dell'unità di trattamento sono:

- Pompa ad alto vuoto
- Separatore aria-liquidi (Knock-out tank) con pompa di trasferimento
- Separatore acqua/prodotto libero (oil/water separator)
- Filtro a carboni attivi granulari per le acque prima dello scarico in fognatura
- Filtro a carboni attivi granulari per i gas prima dello scarico in atmosfera
- Compressore per air-sparing/bioventing
- Pannello di controllo con PLC

La movimentazione di fluidi all'interno del sistema avviene sia per gravità sia utilizzando pompe ad alimentazione elettrica.

Il sistema centrale, ad eccezione dei filtri a carboni attivi, sarà

contenuto all'interno di un container per impedire l'accesso al personale non autorizzato.

In figura 2.11 un diagramma di flusso del sistema di trattamento.

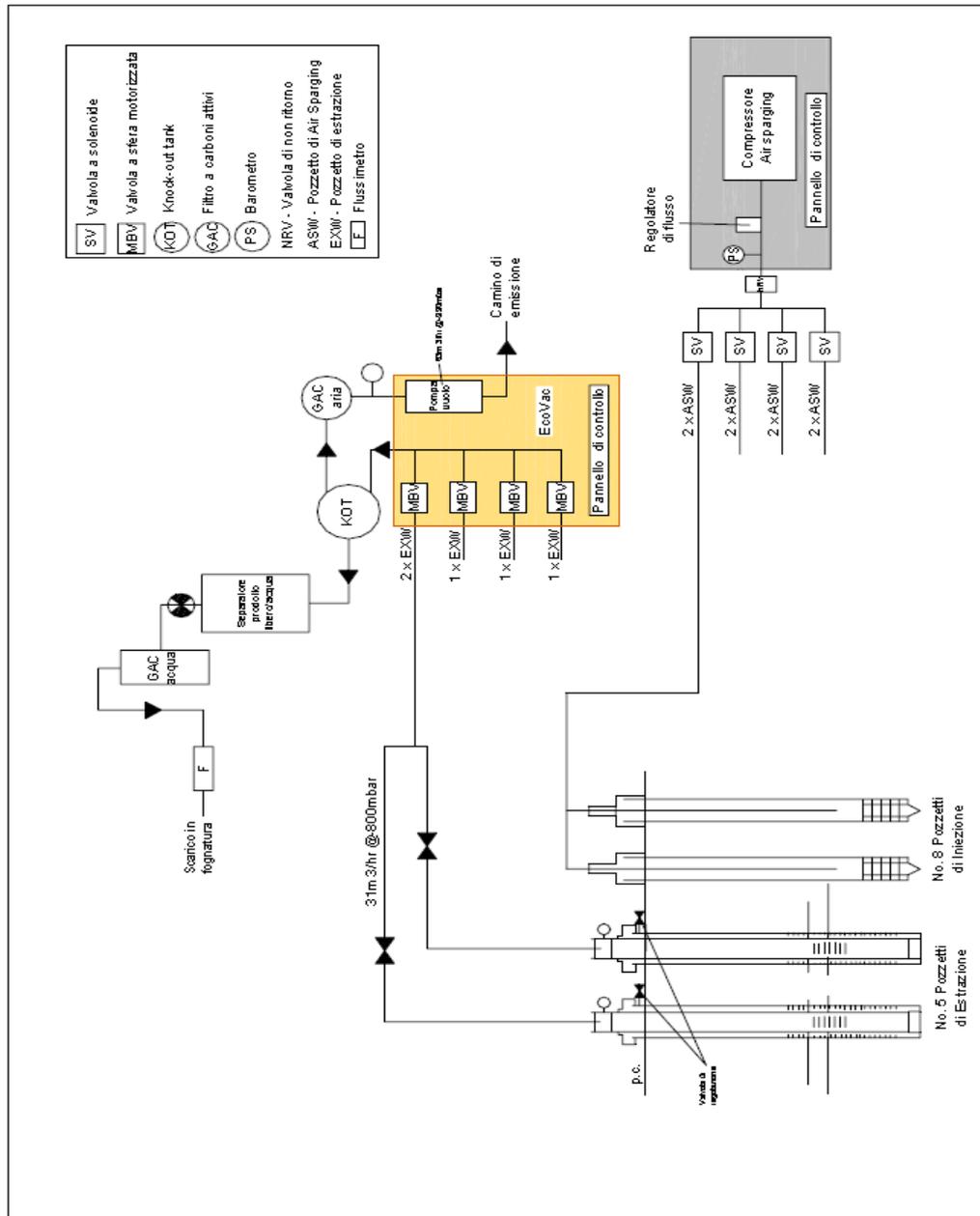


Figura 2.11 - Diagramma del sistema di bonifica integrato. Sistema di aspirazione

La creazione del vuoto all'interno dei n.5 pozzetti di estrazione viene eseguita con n.1 pompa ad alto vuoto in grado di estrarre 63 m<sup>3</sup>/ora ad una pressione nominale superiore ai 900 mbar.

#### *Sistema di separazione, trattamento e scarico*

Grazie alla pressione negativa esercitata dalla pompa ad alto vuoto, il prodotto in uscita dal pozzetto di estrazione entra in un separatore aria-fluidi (knock-out tank) dal volume di 0,5 m<sup>3</sup>, in cui vengono separati i liquidi dall'aria e successivamente trasferiti tramite pompa o per gravità in un separatore acqua/prodotto libero. Il separatore acqua/prodotto libero ha un volume di 0,6m<sup>3</sup> e può gestire efficientemente un flusso massimo di circa 1,5m<sup>3</sup>/ora di liquidi.

Il prodotto in fase libera recuperato viene stoccato in cisterna sigillata e smaltito presso impianto autorizzato, mentre l'acqua in uscita dal separatore viene smaltita in pubblica fognatura dopo essere trattata con filtro a carboni attivi (water-GAC) da 350 kg di materiale filtrante. Gli scarichi in fognatura verranno controllati con cadenza mensile.

Qualora lo scarico non risulti conforme o vicino alla soglia di accettabilità occorrerà sostituire i carboni attivi nei filtri e smaltire i carboni esausti presso impianto autorizzato.

I gas estratti dal terreno, a valle della knock-out tank, passano, sotto la spinta delle pompe, nel filtro a carbone attivo (Gas-GAC) e vengono scaricati all'esterno del sistema in atmosfera. Gli scarichi in atmosfera verranno controllati sia con PID che con fialette al carbone con cadenza mensile. Qualora l'emissione non risulti conforme

o vicino alla soglia di accettabilità occorrerà sostituire i carboni attivi nei filtri e smaltire i carboni esausti presso impianto autorizzato.

### *Sistema di iniezione*

La pressione necessaria per l'air sparging/bioventing all'interno delle n.8 linee di iniezione verrà generata utilizzando un compressore. Il compressore previsto genera 65 m<sup>3</sup>/ora di aria compressa totale alla pressione di 1,5 bar. Ogni pozzetto di iniezione è dotato di valvola manuale per ottimizzare il flusso d'aria.

### *Posizionamento pozzetti e flessibilità del sistema*

Sulla base delle informazioni geologiche e litostratigrafiche del sito in questione, si prevedono raggi di influenza nell'insaturo di circa 15-20 m nei materiali più porosi.

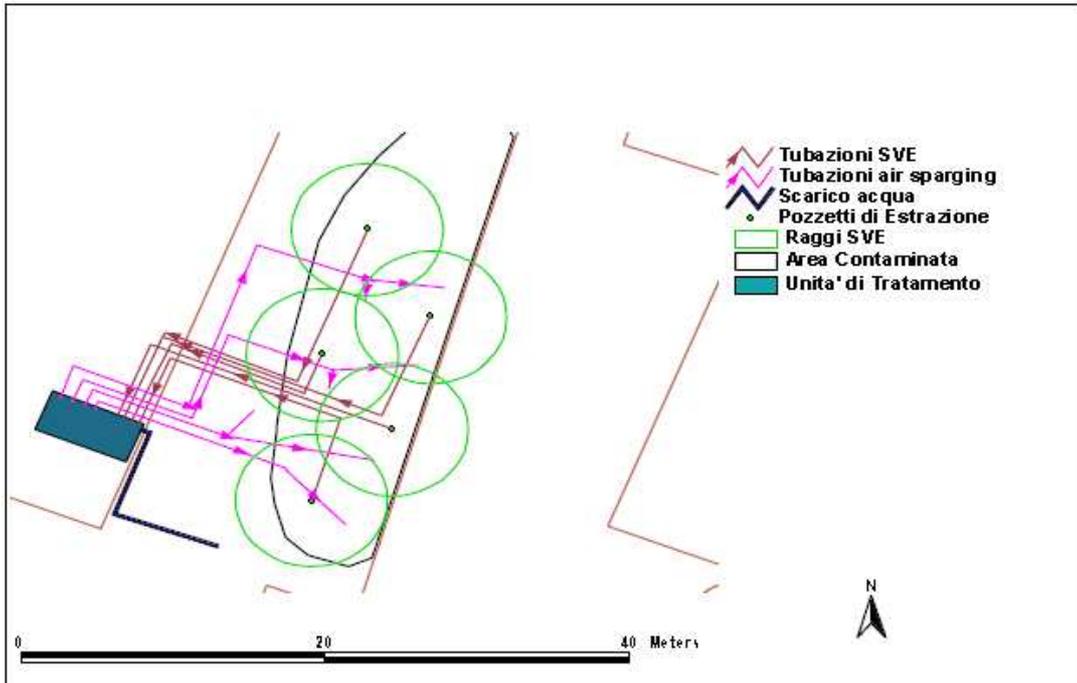
A causa della presenza di materiali fini e di sabbie limose intorno ai 4m da p.c. si prevedono n.5 pozzetti di estrazione (bioslurping/SVE) dal raggio ipotetico di influenza ROI di 5m e n.8 pozzetti di iniezione di aria (air sparging/bioventing) con un raggio di influenza ROI di 4m.

Le n.5 tubazioni collegate ai pozzetti di estrazione in entrata all'unità di trattamento sono dotate di valvole motorizzate governate dal pannello di controllo in modo da controllare il flusso di aspirazione ed operare le linee in modo indipendente.

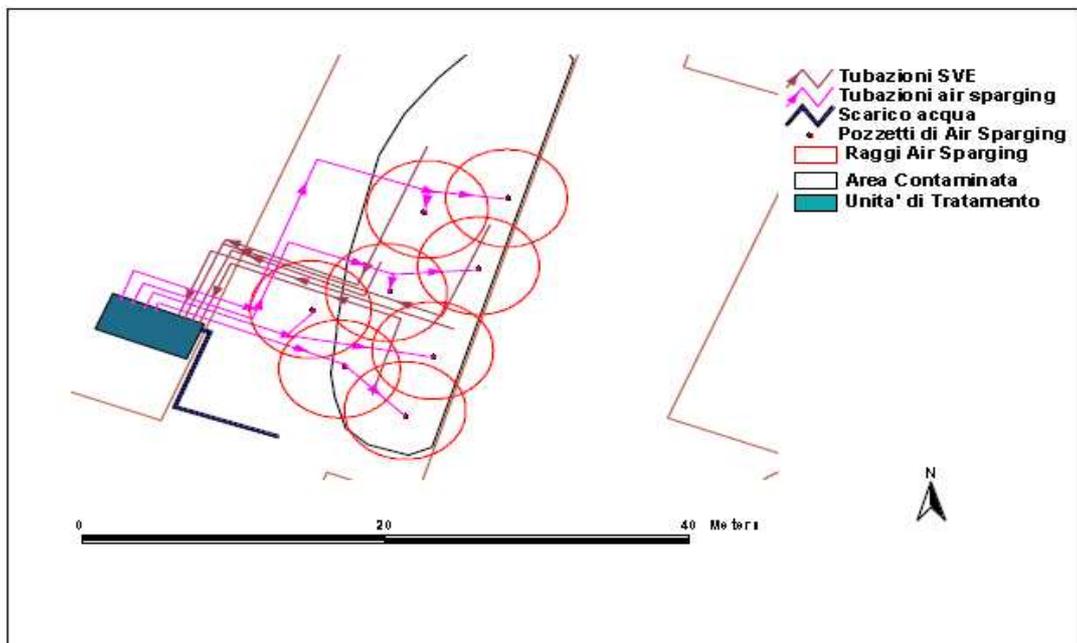
Le valvole motorizzate garantiscono una maggiore flessibilità del sistema in quanto rendono possibile aspirare fluidi e vapori da specifiche zone del sito, in specifici intervalli di tempo (normalmente l'aspirazione di inquinanti idrocarburici risulta più efficiente se alternata e non continua).

Il flusso di aria in uscita dall'unità nelle n.8 tubazioni dei pozzetti di iniezione è regolato da valvole a solenoide a loro volta governate dal pannello di controllo.

Il posizionamento dei pozzetti in estrazione ed iniezione è proposto in figura 2.12a e figura 2.12b.



*Figura 2.12a - Posizionamento dei pozzetti di estrazione, raggi di influenza, unità di trattamento e piping*



*Figura 2.12b - Posizionamento dei pozzetti di airsparging, raggi di influenza, unità di trattamento e piping*

### *Pannello di controllo*

L'unità di trattamento è dotata di un pannello di controllo a sistema PLC (Programmable Logic Controller) con possibilità di collegamento remoto (telemetria) che governa le attrezzature in modo automatico con segnali analogici da 4-20 mA. Il pannello di controllo garantisce massima flessibilità per poter operare selettivamente su particolari aree, sia in aspirazione che in iniezione, a determinati intervalli di tempo.

Attraverso la telemetria è possibile:

- Modificare il settaggio del software del pannello di controllo in remoto in tempo reale;
- Scaricare i dati registrati dalla PLC via internet;
- Inviare una messaggio di allerta via SMS;
- Inviare un impulso alla PLC per attivare una valvola motorizzata per passare all'utilizzo di un filtro di emergenza se necessario.

## **2.9 MONITORAGGIO SCARICHI ED EFFICIENZA IMPIANTI**

### **2.9.1 Monitoraggio alifatici clorurati (Studio Viel & Sangiorgi)**

Per ogni impianto sarà redatto un "giornale dell'impianto" con le pagine preventivamente numerate e firmate dal progettista e da ARPA che riporterà, nelle date di esecuzione, gli esiti dei monitoraggi, e le misure di attivazione, fermata, e modificazione di assetto intraprese sull'impianto stesso. Una copia del "giornale" sarà depositata e disponibile nella ex-portineria del capannone Suprema.

### *Impianto aspirazione insaturo (SVE)*

Al fine di rendere più duttile e diversificare l'intervento di bonifica si è scelto di utilizzare tre soffianti con tre impianti distinti, ognuno

però recapita al medesimo camino di scarico dei gas depurati. I monitoraggi citati sono effettuati distintamente per ogni impianto all'ingresso ed all'uscita dai filtri a CA, e alla base del camino di scarico.

I gas di scarico dell'impianto di SVE verranno monitorati:

- a) monitoraggio VOC totali, PCE e TCE con PID (Photo Ionisation Detection), dotato di apposita lampada per clorurati, tutti i giorni all'ingresso ed uscita dei filtri a CA di ogni soffiante attiva, nel periodo di regolazione dell'impianto ed ogni volta che si modifica la configurazione dei camini di aspirazione fino a stabilizzazione avvenuta (in genere 2 giorni con misure ripetute), poi ogni tre giorni ad impianto stabilizzato, per controllare anche l'efficienza del GAC. I valori misurati verranno trascritti nel giornale ad avvenuta stabilizzazione;
- b) ai fermi dei singoli camini di aspirazione, o periodicamente dell'intero impianto, verrà monitorato anche O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> nei singoli camini di aspirazione;
- c) prelievi su fiala a CA e successiva analisi di laboratorio al camino di cacciata, con cadenza minima di 15 giorni. Se ritenuto necessario dalle agenzie di controllo, potranno anche essere assunti campioni di gas in sacca ermetica per le relative analisi in contraddittorio;
- d) con fialetta a CA e successiva analisi di laboratorio all'ingresso ed all'uscita dei filtri di ogni soffiante con cadenza minima di 30 giorni. Per le verifiche dell'impianto e manutenzione della sua efficienza nelle diverse configurazioni:
- e) controllo portate, misura depressioni provocate lungo la linea in corrispondenza dei separatori di condensa, e, nella fase di regolazione dell'impianto, direttamente alle teste dei camini di aspirazione. La regolazione delle portate e delle depressioni è naturalmente parte fondamentale dell'attività di bonifica, questi dati di monitoraggio verranno trascritti sul "giornale dell'impianto" per

le variazioni di configurazione, solamente ad avvenuta stabilizzazione dei valori;

f) il livello piezometrico verrà controllato con freatimetro direttamente al camino di aspirazione, e/o ai piezometri di piccolo diametro ove presenti;

g) l'eventuale svuotamento dell'acqua contenuta nei separatori di condensa verrà trascritto sul "giornale" contestualmente alle misure assunte per evitare le venute d'acqua;

h) per la manutenzione delle soffianti, separatori di condensa, valvole, piping, il controllo sarà mensile ed effettuato dalla società proprietaria dell'impianto, in assenza di complicazioni.

i) i ricambi dei GAC nei filtri e la loro rigenerazione verrà affidata alla società COMELT di Milano che si occuperà anche del trasporto. La data di ogni ricambio dei CA verrà registrata sul "giornale" e verrà, ovviamente, conservata la relativa documentazione.

Il monitoraggio dell'andamento della bonifica nei suoli verrà effettuata in almeno due verticali di campionamento (almeno tre campioni ogni verticale, a quote diverse) per ogni focolaio.

Le verticali verranno scelte: una in vicinanza di punti di campionamento già noti in cui si siano avuti esiti analitici con concentrazioni elevate; ed una in posizione distale rispetto al presunto centro del focolaio.

Il calendario dei controlli dalla data di inizio della SVE, non può essere rigidamente prefissato, una proposta preliminare è: dopo 70÷90 giorni, dopo 180 giorni, dopo 340 giorni, a questa data si prevede di aver raggiunto gli obiettivi di bonifica. Variazioni nelle scadenze di campionamento e nel numero delle verticali di controllo, dipenderanno dall'andamento dei dati di bonifica.

### *Impianto sollevamento acque di falda*

Le acque di scarico verranno monitorate:

- a) direttamente per le quantità scaricate, con un apposito misuratore di portata collocato allo scarico della torre di strippaggio;
- b) direttamente per la qualità, prelevando un campione all'ingresso ed uno all'uscita del trattamento di strippaggio ogni 15 giorni, per l'analisi chimica;
- c) indirettamente tramite le misure effettuate sui gas di scarico della colonna di strippaggio con PID (Photo Ionisation Detection), dotato di apposita lampada per clorurati, tutti i giorni nel periodo di regolazione dell'impianto ed ogni tre giorni normalmente;
- d) monitoraggio ogni 15 gg dell'ossigeno disciolto in falda almeno su due quote nei pozzi utilizzati ed in un pozzo di controllo per ogni focolaio.

I gas di scarico provenienti dalla torre di strippaggio verranno monitorati:

- e) monitoraggio VOC totali, PCE, TCE, Dicloroetilene, CVM, con PID (Photo Ionisation Detection), dotato di apposita lampada per clorurati, tutti i giorni nel periodo di regolazione dell'impianto ed ogni volta che si modifica la configurazione dei pozzi di pompaggio (in genere non più di un giorno con misure ripetute), ogni tre giorni normalmente. La verifica verrà effettuata a monte ed a valle dei filtri a carboni attivi per controllare contestualmente l'efficienza del GAC;
- f) ogni 15 giorni verrà monitorato lo scarico in atmosfera (all'uscita dai filtri o alla base del camino di cacciata) con prelievo su fiala a CA e successiva analisi in laboratorio certificato, potranno anche essere assunti campioni di gas in sacca ermetica per le relative analisi in contraddittorio.

Le verifiche di efficienza dell'impianto verranno effettuate:

- g) per la torre di strippaggio (corpo di riempimento, blower,

uggelli, scarico, ecc.), per le pompe, capanna meteo, valvole di non ritorno, piping, eccetera, mensilmente dalla società proprietaria dell'impianto, in assenza di complicazioni.

h) i ricambi dei GAC nei filtri e la loro rigenerazione verrà affidata alla società COMELT di Milano che si occuperà anche del trasporto. La data di ogni ricambio dei CA verrà registrata sul "giornale" e verrà, ovviamente, conservata la relativa documentazione.

Il monitoraggio delle concentrazioni di solventi in falda verrà effettuato direttamente con prelievo di campioni d'acqua alla quota di circa 18 ÷ 19 metri dal p.c., nei pozzi e piezometri esterni ed interni al sito contaminato ogni due mesi.

### **2.9.2 Monitoraggio Idrocarburi**

I vari processi di trattamento verranno monitorati come di seguito:

#### *Monitoraggio unità di bioslurping/SVE*

a) Valori di vuoto: Un barometro misurerà i valori di vuoto prodotti dalla pompa vuoto per la aspirazione.

b) Valori di pressione: Un barometro misurerà i valori di pressione prodotti dal compressore per la iniezione.

c) Vapori di idrocarburi: Tramite l'utilizzo di PID (Photo Ionisation Detector) verranno misurate le concentrazioni di idrocarburi in entrata ed in uscita dall'impianto di Bioslurping/SVE e nei pozzetti di monitoraggio.

d) Qualità delle acque di scarico: verrà predisposto un punto di campionamento delle acque a valle dei filtri a carboni attivi per verificarne la conformità prima dello scarico in fognatura.

e) Volumetrie di fluidi scaricati in fognatura: Un misuratore di flusso misurerà i metri cubi di acqua scaricata in fognatura.

#### *Monitoraggio piezometri*

f) Idrocarburi in fase di prodotto libero in falda: Tramite

utilizzo di sonda “interface probe” per determinare la presenza ed eventuale spessore dallo strato di prodotto libero sulla falda.

g) Idrocarburi disciolti in falda: Tramite campionamento dell’acqua di falda con bailer monouso a seguito di spurgo della falda nei pozzetti di estrazione. Le analisi sui campioni di acqua verranno spediti a laboratorio certificato.

h) Qualità acqua di falda: tramite utilizzo di sonda multiparametrica sull’acqua di falda dai pozzetti di estrazione ed iniezione per determinare ossigeno disciolto, pH, conducibilità, potenziale redox.

i) Vapori di idrocarburi: Tramite l’utilizzo di PID (Photo Ionisation Detector) verranno effettuate misurazioni sulle concentrazioni di idrocarburi nei piezometri.

j) Anidride Carbonica ed Ossigeno/test di respirazione: Nei piezometri verranno misurate le concentrazioni di gas ambientali, quali ossigeno, anidride carbonica, metano ed altri con l’utilizzo di un Landfill-Gas Analyser da cantiere e verranno periodicamente effettuati test di respirazione per verificare la eventuale attivazioni di reazioni di degradazione microbica.

k) “Charcoal tubes” (fialette al carbone): alcuni piezometri verranno scelti e sottoposti e periodici campionamenti con “Charcoal tubes” (fialette al carbone). Le fialette verranno poi mandate a laboratorio competente per analisi spciata degli idrocarburi (BTEX, C<12, C>12 e Carbon Banding). In modo analogo verranno effettuati n.2 monitoraggi periodici (a cadenza mensile) a monte e a valle dei filtri a carboni attivi con prelievo vapori tramite fialette al carbone per verificare l’efficienza di abbattimento dei carboni e la conformità coi limiti di emissione.

## **CAPITOLO 3**

### **GESTIONE E MONITORAGGIO DEGLI IMPIANTI**

#### **3.1 REALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI DI SVE E P&T**

I lavori di costruzione delle opere di risanamento dell'insaturo (SVE) e dell'acquifero (P&T) sono iniziati nel settembre 2008.

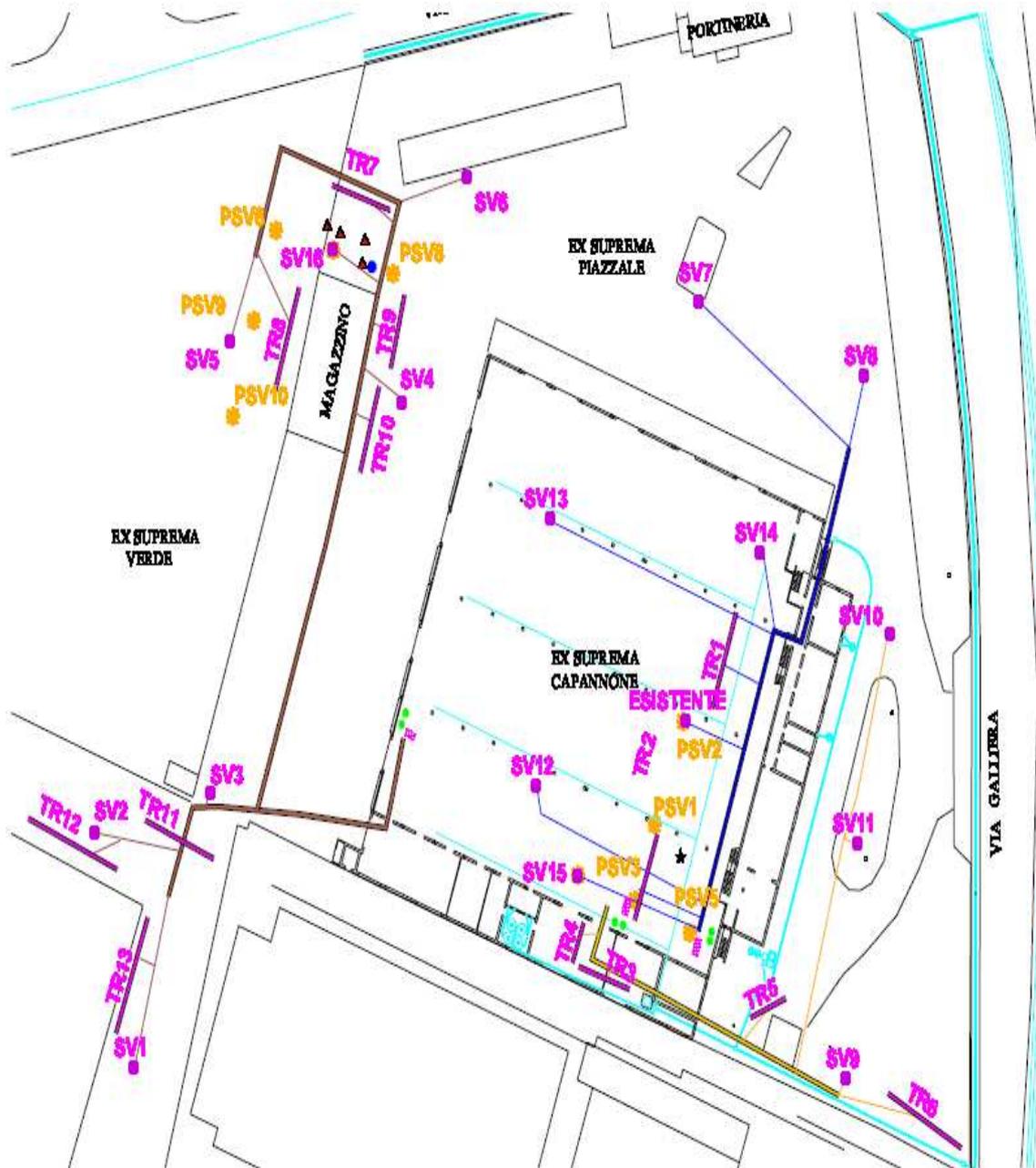
La realizzazione degli impianti di bonifica è stata effettuata da Arcadis Set S.r.l., importante azienda che opera nel settore ambientale.

L'intervento, molto complesso data l'estensione e lo stato dello stabilimento, ha previsto la costruzione di numerosi apparati sotterranei porosi (camini di aspirazione), tubazioni di collegamento (piping) per un totale di 760 m, pozzi filtranti, una torre di stripping e, naturalmente, l'impianto elettrico per la gestione delle attività di trattamento.

I pozzi di estrazione recapitano a pompe di aspirazione con depressioni costanti; lungo le tubazioni sono sistemati separatori di condensa per dividere l'umidità dai vapori estratti; i gas aspirati e quelli in uscita dalla torre vengono avviati ai filtri a carboni attivi per la depurazione.

Per lo scarico delle acque trattate in fognatura è prevista una pompa che si attiva automaticamente grazie a un sensore, quando il livello nella torre sale sopra a una certa quota.

Lo schema di layout dell'impianto è sintetizzato graficamente nella figura seguente.



*Schema di layout dell'impianto di Soil Vapor Extraction*

### 3.1.1 Filtri a carbone attivo



*Figura 3.1 – Filtri a carbone attivo. Nella foto sono visibili anche le valvole che consentono il monitoraggio (una all’entrata e una tra i 2 filtri).*

Sono i sistemi di adsorbimento più diffusi; sfruttano le notevoli proprietà dei carboni attivi, materiali di origine vegetale o minerale caratterizzati da una porosità estremamente elevata. I numerosissimi pori microscopici si sviluppano in profondità diminuendo man mano la loro sezione e forniscono uno sviluppo superficiale anche di 1700 metri quadrati per grammo di materiale. I carboni attivi sono costituiti per la gran parte da atomi di carbonio e si presentano sempre di color nero sia che si trovino in polvere, in granuli o in forme sagomate.

Le loro capacità adsorbenti sono particolarmente indicate per l’abbattimento dei composti organici con un peso molecolare che varia da 50 a circa 200. In genere i composti che presentano un peso molecolare minore non vengono adsorbiti sufficientemente a

causa delle piccole dimensioni; al contrario i composti organici che presentano alti pesi molecolari vengono adsorbiti così fortemente che risulta poi estremamente difficile rimuoverli durante la fase di rigenerazione.

L'ammontare di materiale che può essere adsorbito dal carbone attivo viene chiamato retentività o capacità di adsorbimento ed è espresso in peso percentuale o in Kg di contaminante organico adsorbito per 100 Kg di carbone utilizzato; in genere nelle applicazioni operative per ogni 100 Kg di carbone attivo possono essere adsorbiti da 10 a 30 Kg di contaminante.

La capacità di trattenere i contaminanti organici è influenzata da un gran numero di parametri fra i quali la temperatura, la pressione, il tipo e la concentrazione degli inquinanti, il loro peso molecolare e la presenza o meno di umidità e di particolato nel flusso da trattare. Fattori che condizionano l'adsorbimento sono anche l'area totale di materiale adsorbente impiegato, la dimensione e la forma dei pori, l'eventuale attività chimica, il tempo di contatto fra adsorbente e sostanza da adsorbire.

A temperature più basse la ritenzione dei contaminanti organici è maggiore. A causa di questo motivo, gli adsorbitori al carbonio attivo operano di solito a temperature inferiori ai 50°C.

Anche l'umidità presente nel flusso d'aria può condizionare la ritenzione. L'acqua viene adsorbita all'interno del carbonio e compete con i contaminanti organici per i siti di adsorbimento. Allo stesso modo, maggiore è la presenza del particolato nel flusso d'aria da trattare tanto più diminuisce l'adsorbimento; per questo motivo il particolato deve essere rimosso con opportuni filtri o sistemi di abbattimento.

Nelle varie applicazioni si possono distinguere essenzialmente due tipi di sistemi basati sul carbone attivo: quelli che rigenerano sul sito e quelli che non lo fanno.

Se non è prevista la rigenerazione della sostanza adsorbente, allora

si utilizzano i cosiddetti impianti a perdere. Questi sistemi sono costituiti da unità di forme estremamente diverse: possono essere cilindri, cassoni sovrapposti, cassette, pannelli, ecc. Solitamente vengono utilizzati per depurare flussi a bassa concentrazione di inquinanti, solitamente sotto i 100 ppm. Una volta che hanno raggiunto una saturazione tale che il flusso d'aria trattato presenta una concentrazione di inquinanti quasi superiore a quella stabilita per legge, vengono sostituiti ed inviati allo smaltimento o alla riattivazione all'esterno dell'impianto dove vengono utilizzati. I sistemi a rigenerazione prevedono invece la riattivazione del carbone attivo direttamente sul luogo di utilizzo. La rigenerazione consiste nel deadsorbimento degli inquinanti che può avvenire essenzialmente in quattro modi diversi: facendo passare attraverso il letto di carbonio un gas inerte, scaldando il letto, utilizzando un flusso di vapor d'acqua che vada a sostituire le sostanze adsorbite oppure sfruttando una diminuzione della pressione dell'aria.

In genere se si deve trattare un flusso d'aria con un'elevata concentrazione di inquinanti si utilizza un sistema con due o più letti fissi. Quando il letto che si sta utilizzando sta per raggiungere la saturazione, allora si devia il flusso d'aria e lo si fa passare attraverso un nuovo letto. Il letto carico di contaminanti viene quindi sottoposto a rigenerazione e predisposto per un nuovo utilizzo nel momento in cui dovrà a sua volta sostituire un letto quasi saturo.

Nel caso in cui si debba trattare un flusso a bassa concentrazione di inquinanti è anche possibile utilizzare un sistema a rigenerazione che sfrutta un cilindro cavo di carbone attivo in rotazione. Mentre il 75-90% del cilindro è in adsorbimento, la porzione rimanente viene desorbita tramite un ridotto flusso di gas a temperatura relativamente alta. Questo dispositivo viene anche detto rotoconcentratore ed è impiegato solitamente con le zeoliti sintetiche piuttosto che con il carbone attivo.

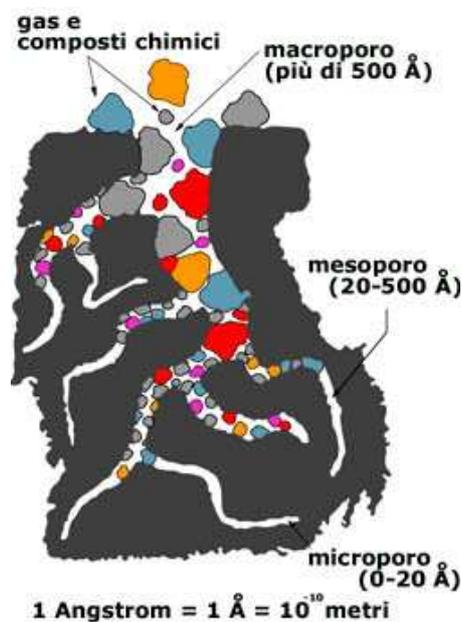


Figura 3.2 – a. Differenti tipi di carboni attivi (sopra).  
 b. processo fisico-chimico di adsorbimento (a destra).

I filtri utilizzati nell'impianto sono da 1 mc l'uno, collocati a valle della torre di strippaggio e delle tre soffianti; per ogni uscita sono sistemati 2 filtri, per un totale di 1160 kg di carboni attivi, quantità con la quale è garantita una buona resa depurante, sia per le temperature del gas in ingresso (l'acqua di falda ha temperatura attorno a 288°K), sia per i tempi di contatto gas-GAC (maggiori di 6 secondi), sia per le modeste concentrazioni in gas contaminanti all'origine.

Dati di progetto:

- n. 2 filtri a carboni attivi disposti in serie, ognuno alto 150 cm,
- diametro 120 cm, unico letto (vedi scheda RG52);
- presa controllo e campionamento COV atmosfera in ingresso filtro,
- presa controllo e campionamento COV atmosfera in uscita dai filtri;
- camino di scarico in atmosfera da 6" ed alto 12 metri;

- possibilità di aggiungere altre sezioni di filtri a carboni attivi in serie, in caso di superamento del tenore di VOC al camino di scarico.

I 2 filtri a carboni attivi saranno sistemati in serie, come da progetto accanto alla torre di strippaggio, il camino di scarico in atmosfera sarà ancorato alla torre stessa e alla muratura del capannone e sarà alto 12 metri, 1 metro in più rispetto l'altezza massima raggiunta dal tetto del capannone stesso, e molti metri in più rispetto a tutti gli edifici presenti in un intorno di 50 metri dal punto di emissione come si vede dalla figura in allegato.

Il punto di scarico in atmosfera sarà collocato accanto alla torre di strippaggio, lungo il fronte orientale del capannone di Suprema. Il camino sarà ancorato al capannone e lo supererà in altezza di un metro, cioè sarà di 12 metri.

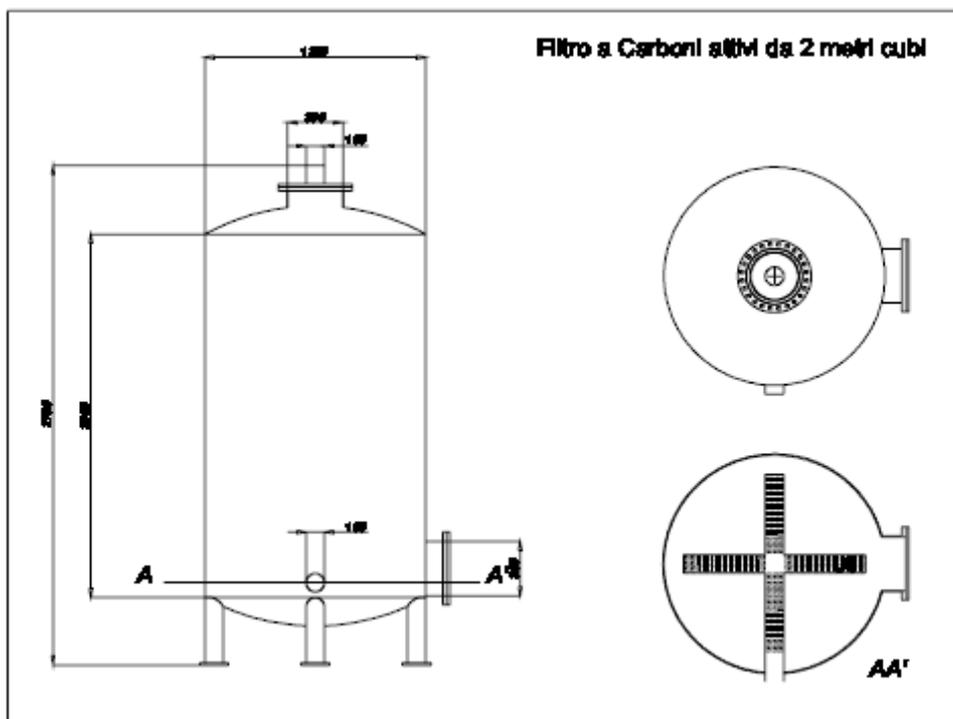


Figura 3.3 – disegno di progetto del filtro a carboni attivi.

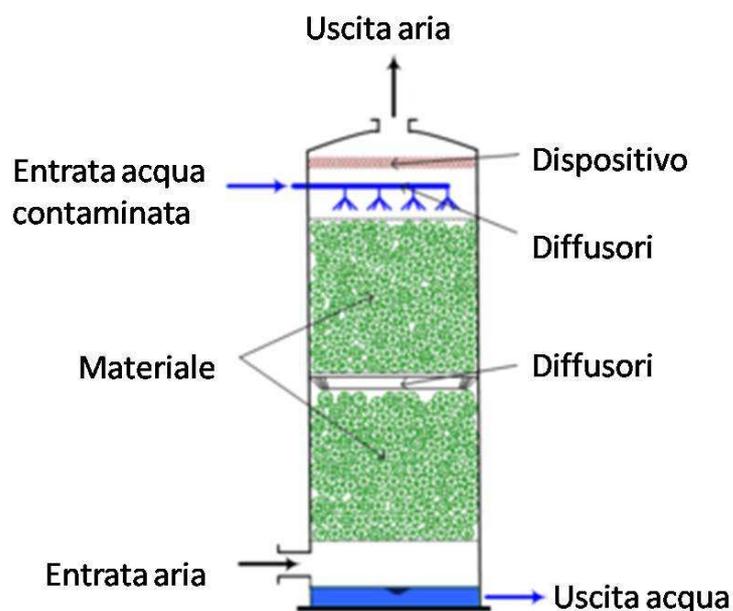
### 3.1.2 Impianti di strippaggio



*Figura 3.4 – Impianto di strippaggio. A sinistra si trova la torre con il suo quadro elettrico; in basso al centro la pompa di cacciata da cui partono le tubazioni di scarico in fognatura; a destra i filtri a carbone per il trattamento collegati al camino (tubo arancione).*

L'aerazione, chiamata anche strippaggio, consiste nel miscelare acqua con aria, con lo scopo di volatilizzare o vaporizzare determinati contaminanti organici.

E' una tecnologia adatta alla rimozione dei composti organici più volatili e di alcuni pesticidi ma non rimuove elementi inorganici (metalli pesanti), batteri e virus. La torre di strippaggio (packed tower aeration, PTA) esegue un processo di aerazione in cascata in cui l'acqua da trattare scorre attraverso un mezzo filtrante all'interno di un cilindro (torre) per essere miscelata con l'aria. Il mezzo filtrante consiste in piccole sfere di plastica appositamente studiate per ottenere un alto valore superficiale rispetto al volume occupato. L'acqua attraversando le sfere viene divisa in minuscole gocce e al di sotto dello strato filtrante viene insufflata aria.



*Figura 3.5a - Schema del processo di aerazione (strippaggio).*

La torre di strippaggio, nel nostro caso, riduce la concentrazione dei solventi clorurati presenti nell'acqua di processo. Nell'impianto l'acqua da trattare viene pompata nella porzione superiore della

torre, dove viene spruzzata e nebulizzata da appositi ugelli, verso il basso, mentre dalla base della colonna di strippaggio viene veicolato un flusso forzato d'aria verso l'alto.

Nella torre è inserito un "riempimento", costituito da piccoli corpi ovoidali cavi, l'acqua in discesa gravitativa è costretta ad attraversare questa zona che occupa gran parte della colonna, si ottiene così un forte incremento della superficie e del tempo di contatto aria/acqua. Qui avviene il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa dell'inquinante.

La ripartizione tra fase liquida e gassosa di una soluzione è governata dalla legge di Henry, per cui la frazione molare ad esempio del precloro in soluzione, è proporzionale alla frazione molare in fase gassosa, il continuo rinnovo dell'atmosfera nel corpo di riempimento, mentre transita l'acqua in moto laminare, consente appunto di "strippare" la fase gassosa man mano si forma.

Le dimensioni ed il volume del riempimento nella colonna devono dunque essere proporzionali alla portata dell'affluente e dell'aria. Per i solventi clorurati, caratterizzati da valori relativamente elevati della costante di Henry, lo "stripper" costituisce il metodo di depurazione più collaudato e applicato di questi ultimi decenni. L'acqua, privata dei solventi clorurati che trasportava, esce dalla base della torre e viene avviata allo scarico nella rete di collettamento comunale.

L'aria a circolazione forzata della torre di strippaggio esce dal camino al tetto carica dei gas strippati, e viene convogliata al sistema di depurazione. Per la depurazione del gas si è scelto il metodo più consueto e sperimentato: adsorbimento su carboni attivi. L'efficienza del trattamento è influenzata da diversi fattori come l'umidità e temperatura del gas in ingresso, oltre alle concentrazioni contaminanti, granulometria carboni, tempo di contatto (o velocità di filtrazione).

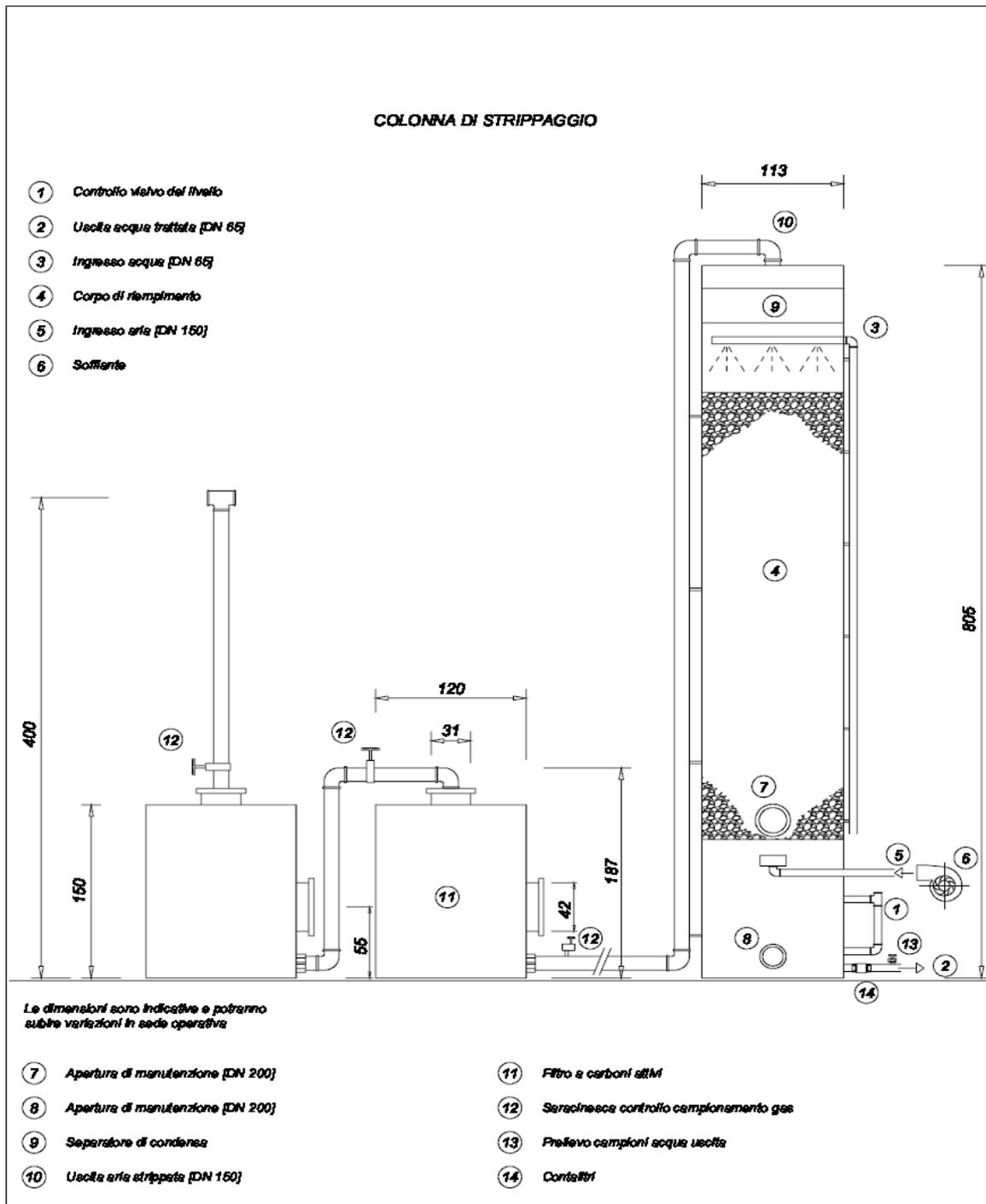


Figura 3.5b – schema di impianto della torre di strippaggio. Nella figura si possono notare, oltre ai filtri, il camino di cacciata e la pompa per lo smaltimento della portata trattata.

### 3.1.3 Tubazioni (piping)

Per il sollevamento, il trasporto, la depurazione e lo scarico in fognatura delle acque freatiche, non viene coinvolta la rete di fognatura interna a Suprema, né quella delle acque di dilavamento dei piazzali esterni. Verrà utilizzato solamente il brevissimo tratto di fognatura esistente (appena 4 metri, entro la proprietà) che connette la rete dello stabilimento al collettore fognario di via Galliera (CM 1.200).

In corrispondenza dell'angolo sud-est della proprietà, vicino a via Galliera, è presente un tombino, con copertura in ferro (40x40 cm), da cui è agevole inserirsi nella tubazione (DN 300), sarà quindi sufficiente una ripulitura del tombino ed una sua sistemazione.

Le tubazioni utilizzate per le connessioni interne sia dell'impianto di Soil Vapor Extraction sia di Pump & Treat, sono in HPDE (da 3" per il P&T da 2" per la SVE); i tubi in polietilene ad alta densità, prodotti in conformità con le normative nazionali vigenti, sono infatti idonei sia al convogliamento di acque sia di gas in pressione: questi sono caratterizzati da elevata resistenza agli urti e ai colpi di ariete, flessibilità, leggerezza facilità di giunzione, atossicità, resistenza alle basse temperature alla corrosione e agli agenti chimici. Per il raccordo con i singoli camini, invece, sono stati utilizzati tubi flessibili corrugati in HPDE (alta densità) da 2", mentre per la connessione con i pozzi di emungimento, da 1" 1/4.



*Figura 3.6 – Tubazione in HPDE.*

I camini di estrazione sono di due tipi secondo le zone di sedimento entro cui si vuole concentrare l'aspirazione:

- pozzetti verticali quando si vuole intervenire sui sedimenti più profondi profittando in particolare della presenza di strati e livelli sabbiosi;
- trincee quando si vuole aspirare i sedimenti naturali e di riporto immediatamente sottostanti le pavimentazioni in asfalto o cemento.

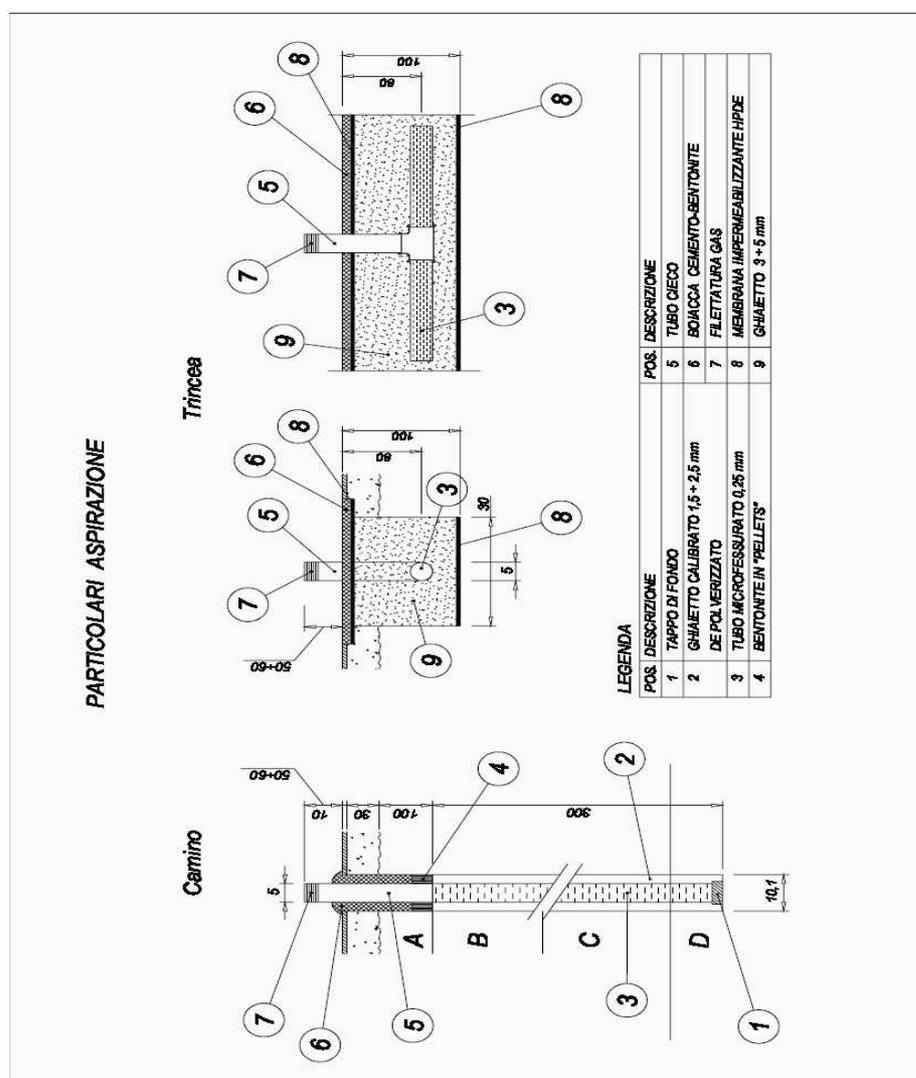
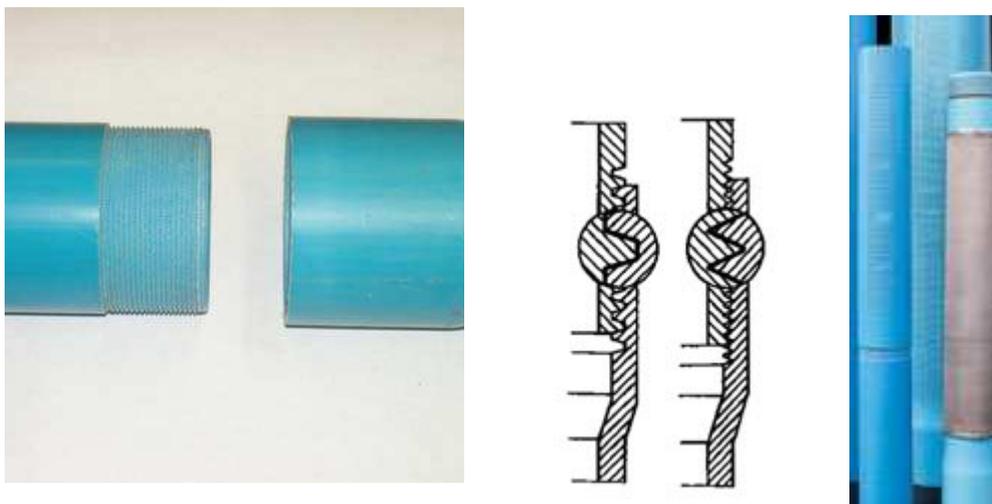


Figura 3.7 – Particolari dei camini di aspirazione (pozzetti e trincee).

Per la realizzazione di piezometri e pozzi verticali sono stati utilizzati tubi in PVC atossico, moduli componibili della lunghezza di 2 m con 4 slot da 0,25 mm e filettatura gas che garantisce la tenuta durante l'aspirazione.

I camini sono scavati fino al livello statico della falda in condizioni di magra, poco più di 4 metri dal p.c.; il foro nel sedimento, eseguito con macchina perforatrice a percussione Geoprobe, ha diametro di 10 cm. La tubazione tra le profondità -4 e -1 è fenestrato, tra -1 e p.c. è cieco e sporge in superficie per circa 40 cm; il drenaggio è costituito da ghiaietto calibrato 1,5 ÷ 2,5 mm, depolverizzato. È stato eseguito un tappo di bentonite e cementazione tra -1 e p.c. per impermeabilizzare il foro; in questo modo sono scongiurate ingressi involontari di aria, durante l'aspirazione e di acqua in caso di pioggia.



*Figura 3.8 – Tubazioni in PVC utilizzati per pozzi e trincee: particolare dei giunti de della filettatura gas e delle finestrate.*

Le trincee sono scavate fino alla profondità di 110 cm dal piano di calpestio, la loro lunghezza è dimensionata sulle possibilità locali, ma in genere di 10 metri, la larghezza dello scasso è di 30 ÷ 40 cm, fondo scavo impermeabilizzato con inserimento di ghiaietto 3 ÷ 4

mm depolverizzato; la tubazione in PVC atossico PN10 interamente fenestrato (slot 0,25 mm) è posizionata a circa 80 cm dal p.c con raccordo a “T” e uscita verticale tubo in PVC atossico PN10 cieco lungo 1 metro circa; uscita con filettatura gas, copertura con ghiaietto e, sopra questo, ricopertura con terreno di scavo fino al p.c: l'impermeabilizzazione in superficie è realizzata secondo i casi con cemento, con bitume o con tessuto non tessuto impermeabile.

Ai tubi viene avvitata in sommità la testa pozzo (figura 3.9) che connette il camino con le tubazioni di collegamento: questa consente la gestione durante il funzionamento dell'impianto attraverso due saracinesche, una per la regolazione della portata, l'altra per l'eventuale ingresso di aria falsa, nonché l'esecuzione delle operazioni di monitoraggio (depressione e concentrazioni) grazie ad una piccola valvola (in figura a destra).



*Figura 3.9 – Testa pozzo dei camini di estrazione vapori (SVE): a sinistra il collegamento con le tubazioni che portano alla soffiante con valvola a saracinesca per la regolazione della portata; in alto la valvola per l'ingresso di aria falsa; a destra la valvola per il monitoraggio (concentrazioni e depressioni).*

I pozzi di emungimento dell'impianto di Pump & Treat sono anch'essi realizzati in PVC atossico PN10 da 8", filtranti in un intervallo compreso tra i -4 ed i -20 metri dal piano campagna, entro i quali sono alloggiare elettropompe sommerse da 4" posizionate a quote variabili tra 9 e 16 metri secondo le necessità stratigrafiche locali; il foro, riempito con materiale di riempimento tra -4 e -1 m è stato cementato tra -1 e p.c.. Alla sommità delle tubazioni sono avvitate teste da pozzo in PVC per pompe sommerse che consentono, attraverso un tappo, la misurazione del livello piezometrico ed eventualmente il campionamento. In realtà nel nostro caso le acque da analizzare venivano prelevate grazie a un rubinetto posizionato lungo la tubazione di collegamento in corrispondenza del contatore di portata.



*Figura 3.10 – testa pozzo dei punti di emungimento delle acque (P&T).*

### 3.1.4 Soffiante



*Figura 3.11a – soffiante per l’aspirazione dei gas contaminati dal sottosuolo (SVE).*

Il principio di funzionamento delle macchine a canale laterale consiste nell’incrementare la pressione del gas aspirato tramite la creazione, nel canale toroidale periferico, di una serie di vortici determinati dalla spinta centrifuga del rotore alettato. Con la girante in rotazione, le palette spingono il gas in avanti e, per effetto della forza centrifuga, verso l’esterno.

Ne risulta un moto elicoidale, durante il quale il gas subisce una serie di ricompessioni dovute alla forza centrifuga, con conseguente incremento lineare di pressione lungo il canale.

Le soffianti a canale laterale sono adatte per tutte quelle applicazioni dove si richiedano pressioni sensibilmente più elevate dei normali ventilatori centrifughi. Gli aspiratori ove occorra una depressione più elevata di quella fornita da un ventilatore, ma non tanto da richiedere l’impiego di una pompa per vuoto. Le parti in movimento non sono tra di loro in contatto. Non essendoci attrito e non essendo quindi necessaria nessuna lubrificazione, il gas

convogliato non viene assolutamente inquinato.

Oltre a questo, i più elevati vantaggi nell'utilizzo delle macchine a canale laterale sono:

- massima semplicità di installazione
- rumorosità molto contenuta
- assenza di vibrazioni e quindi completa stabilità
- assenza di pulsazioni nel gas trattato
- minima manutenzione.

### SOFFIANTE A CANALE LATERALE

Scala 1:10

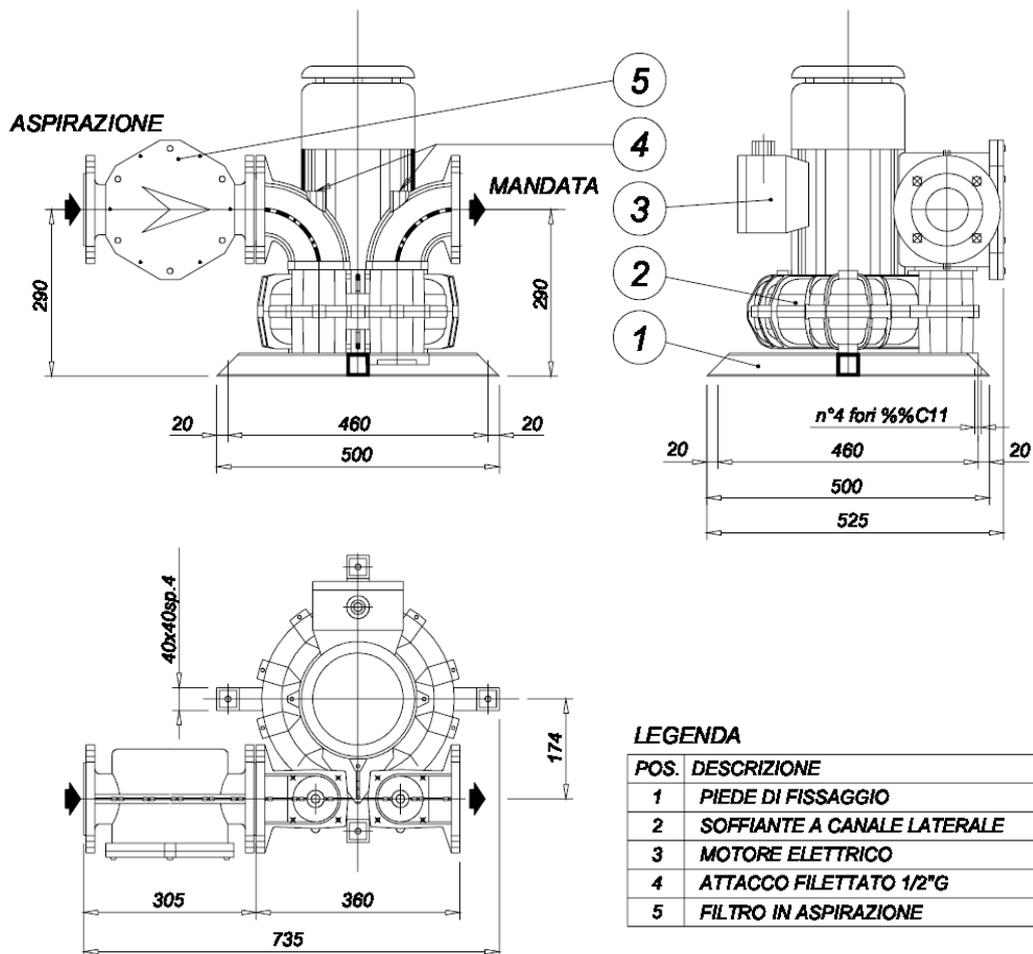


Figura 3.11b – schema progettuale della soffiante.

### 3.1.5 Separatori di condensa e valvola rompi vuoto

I condensatori sono semplicemente grossi bidoni cilindrici di metallo in cui viene fatto circolare il flusso d'aria il quale è forzato a compiere dei percorsi che modificano lo stato dissipandone il carico (calo di velocità e pressione).

All'interno del separatore è infatti inserito un "labirinto" di setti in polistirolo; la costrizione della corrente in questo tratto determina un crollo della pressione e della velocità con conseguente precipitazione della fase liquida in sospensione.

Il liquido si accumula sul fondo e viene allontanato tramite una valvola disposta sul fondo; è importante precisare che l'acqua separata proviene dal sottosuolo ed è quindi contaminata: per ciò risulta obbligatorio trattarla e infatti, con uno scarico a gravità, vengono stoccate in un serbatoio e successivamente inviate alla torre di strippaggio per la bonifica.



*Figura 3.12 – separatore di condensa. La valvola in basso al centro consente lo scarico delle acque accumulate alla torre di strippaggio.*

La valvola rompi vuoto è un particolare tipo di valvola di sicurezza studiata per evitare la formazione di vuoto nell'impianto.

Al primo accenno di formazione di vuoto nell'apparecchio a causa della condensazione del vapore, la valvola si apre automaticamente ed immette aria dall'ambiente fino a stabilire all'interno dell'apparecchio la pressione atmosferica; richiude e rimane chiusa con valori di pressione superiori.

Nel nostro caso la valvola è sistemata a monte della soffiante. In figura è rappresentato lo schema di progetto.

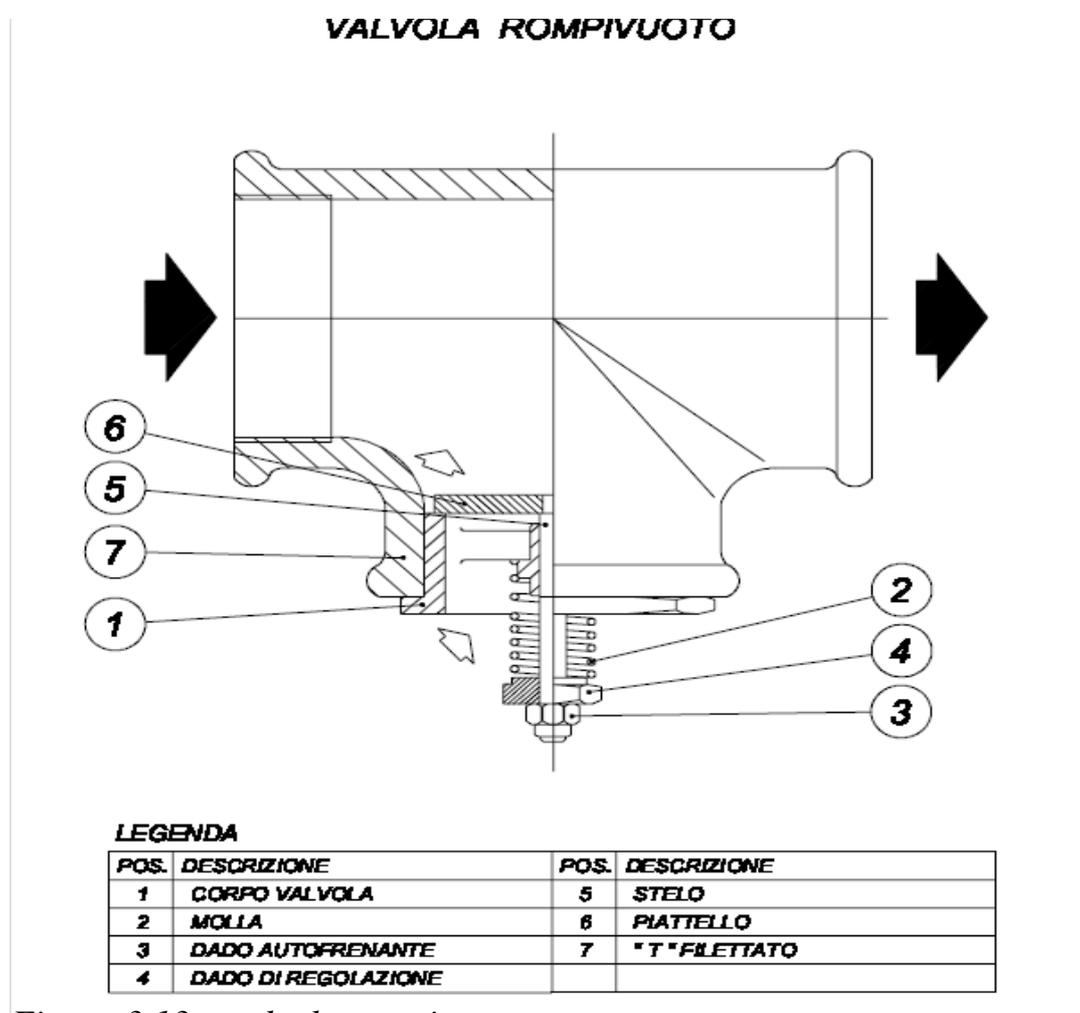


Figura 3.13 = valvola rompi vuoto.

### 3.1.6 Impianto elettrico



*Figura 3.14 – quadro elettrico di gestione degli impianti.*

Tutti gli impianti elettrici ed ausiliari sono stati realizzati in conformità alla legge 186/68 ed alla legge 46/90.

L'impianto elettrico si sviluppa nell'area interna ed esterna di due distinti edifici.

Nel primo capannone, l'impresa aggiudicataria ha provveduto alla:

- Integrazione dell'impianto disperdente di terra;
- Realizzazione della distribuzione principale ai quadri principali e ai sottoquadri interni ed esterni;
- Realizzazione delle alimentazioni alle pompe e/o soffianti;
- Realizzazione degli impianti elettrici al servizio del compressore;
- Messa in sicurezza dell'impianto esistente.
- Il secondo capannone, l'impresa dovrà:
- Messa in sicurezza dell'impianto esistente;
- Ripristino della linea di alimentazione della centrale termica;
- Realizzazione delle alimentazioni alla pompa per la bonifica

del terreno.

Gli edifici si sviluppano entrambi in una porzione ad uso capannone ed una seconda ad uso uffici, ambienti ordinari, pertanto gli impianti elettrici sono stati realizzati secondo le prescrizioni generali della Norma CEI 64.8.

L'area esterna del primo capannone è attraversata da una linea in Media Tensione. Si è quindi tenuto conto delle prescrizioni contenute nella norma CEI 64-8/7 , la quale stabilisce una distanza minima da tenere in funzione della tensione che attraversa la linea nuda sul traliccio.

La distanza in metri espressa dalla formula  $3+0.015U$ , dove U è la tensione espressa in KV, è da intendersi come distanza minima del sostegno, perciò si è tenuta una distanza superiore in modo da permettere una installazione in sicurezza da parte dell'impresa installatrice.

In entrambi gli edifici la fornitura dell'energia risulta essere già attiva. L'impresa installatrice si è derivata da valle dell'interruttore generale di ogni rispettivo quadro assicurandosi di mettere in sicurezza la porzione di impianto elettrico esistente e non utilizzata.

In prossimità del quadro generale esistente, è stato realizzato il nuovo quadro elettrico generale derivato dall'interruttore generale esistente in cavo tipo FG7OR 5G 35 mm<sup>2</sup>. Dal nuovo quadro è stato derivato l'impianto elettrico inerente al capannone 1, equipaggiato con un interruttore magnetotermico differenziale in esecuzione 4P 125A Tipo A con tempo di intervento pari a 1sec.

Dal nuovo quadro elettrico generale si è alimentato il quadro QE2, dove sono state installate le protezioni per:

- le alimentazioni delle 5 soffianti interne;
- l'alimentazione del compressore;
- l'alimentazioni ai 2 quadri che gestiscono le pompe esterne;
- l'alimentazione e tutta la logica per il controllo delle pompe.

I quadri che alimentano le pompe esterne saranno 2:

- QE3 : posizionato all'esterno dell'edificio e gestisce le pompe sul lato via Agucchi;
- QE4: posizionato all'interno dell'edificio e gestisce le pompe sul lato via Galliera.

È stato garantito un grado di protezione esterno pari ad almeno IP55/IP65 e IPXXB per le parti attive all'interno, al fine di salvaguardare la protezione dai contatti diretti in caso di interventi per manutenzione. Tutti i quadri sono in materiale termoplastico e dotati di portella trasparente con chiusura a chiave.

In caso di manutenzioni non si potrà accedere alle apparecchiature in tensione se non dopo aver sezionato il circuito ovvero dopo aver asportato gli schermi di protezione mediante apposito attrezzo.

Il quadro è stato dotato di sufficienti indicazioni in modo che sia sempre facile individuare a quale elemento del circuito si riferiscono i dispositivi del quadro stesso.

Pertanto, sia gli apparecchi montati sul fronte, sia quelli montati all'interno sono stati tutti contrassegnati da targhette indicatrici.

Per quanto concerne i conduttori, questi sono attestati ad una morsettiera interna e, al fine di renderne agevole l'identificazione, ognuno sarà contraddistinto da idonea numerazione.

Per il comando delle pompe e/o soffianti del capannone 1 è stato utilizzato un controllore con sistema bus centralizzato nel quadro elettrico QE2 per poter programmare durate e tempi di ogni singolo utilizzatore.

Da questo quadro è inoltre possibile visualizzare lo stato di tutte le pompe (luce verde = marcia e luce rossa = blocco).

Da ogni rispettivo quadro, le pompe hanno un comando per il funzionamento in manuale, indipendentemente dalla logica di funzionamento centralizzata.

E' bene precisare che per mezzo di un pluviometro (capannina meteorologica), attraverso il sistema di gestione, in caso di pioggia le elettropompe vengono disattivate.

La costruzione degli impianti è stata completata nel febbraio 2009.

### **3.2 STRATEGIA DI BONIFICA DEI CLORURATI**

La strategia di bonifica adottata, prevedeva le seguenti fasi:

#### ***I) Fase di avvio e messa a regime della bonifica – suoli e acque***

Attivazione dei pozzi di emungimento dell'acqua di falda PZ1A o BR1, PB1, PB2, BR5 con portate di 1 l/s (P&T), finalizzata anche a contenere il sollevamento della falda indotto dalla depressurizzazione nell'insaturo provocata dalla SVE. Dopo non meno di tre giorni attivazione della SVE con depressioni e portate in aumento nella prima settimana, fino al raggiungimento del regime di progetto, e relativi controlli del comportamento della falda.

Successivo graduale incremento nelle portate di SVE nel focolaio/camini di aspirazione con tasso di estrazione più elevato, contemporanea regolazione dei pozzi P&T, anche modificando l'assetto di prelievo dalla falda: utilizzando BR6 o BR5 per il FC2, oppure il BR1 per il FC1, in alternativa a PB1 o a PZ1A, secondo i risultati dei monitoraggi.

#### ***II) Fase a regime – suoli e acque***

Emungimento dalla falda, e SVE continuato in tutti i focolai fino a raggiungere circa i 300 ricambi di gas interstiziale, anche utilizzando tecniche di “Pulsing” o di circolazione inversa su singoli camini. I tempi teorici di SVE per giungere al numero di ricambi voluto sono diversi per ogni focolaio, comunque al minimo occorrono almeno 70 - 90 giorni di trattamento SVE, poichè i tenori di gas interstiziale residuo nel sedimento non dipendono solo dal numero di ricambi, ma anche dal tempo di applicazione della depressione. Un criterio concreto di selezione del tempo di avvio

della fase III nei vari focolai sarà fornito dall'andamento della curva del tasso di estrazione. Analoga considerazione rispetto alle concentrazioni risultanti in uscita dalla torre di strippaggio per P&T.

### ***III) Fase di controllo dell'efficacia dei sistemi di bonifica adottati – suoli e acque***

Arresto degli impianti di emungimento della falda per un periodo da stabilirsi in funzione delle concentrazioni riscontrate, prelievo di campioni d'acqua all'inizio ed alla fine del periodo di sosta, per valutare il rimbalzo delle concentrazioni nei pozzi di prelievo ed in quelli di controllo. Arresto di SVE e prelievo campioni di suolo nei focolai per una valutazione diretta degli effetti ottenuti nei sedimenti prossimi ai camini di aspirazione nelle situazioni di alta concentrazione, ed in situazioni distali, al limite dei Re (raggi d'influenza effettivi) di progetto.

La buona riuscita di questo controllo richiede una sosta breve degli impianti di SVE (qualche giorno), mentre il fermo dell'impianto di emungimento della falda potrà essere assai più prolungato (due o più settimane), il "rebound" infatti nella falda richiede, per rendersi apprezzabile nelle concentrazioni, un tempo inversamente proporzionale alla velocità della falda. Nel nostro caso potrebbe quindi richiedere tempi maggiori di 2 settimane. Tuttavia l'abbondanza di punti di controllo esistenti influenzati dalla contaminazione al margine delle zone di focolaio riconosciuto, consentirà di avere un primo responso in tempi che si presumono ragionevoli. Se gli esiti ottenuti confermeranno che le modalità di bonifica attuate consentiranno di raggiungere gli obiettivi prefissati entro tempi ragionevoli (fino a 1,5 anni) si proseguirà con lo stesso percorso di bonifica intrapreso (fase IV).

In particolare, se i risultati ottenuti per la falda fornissero tempi di bonifica superiori a

2 anni, sarà necessario progettare trattamenti da praticare nell'intervallo saturo (acquifero e falda) diversi dal solo emungimento, depurazione e scarico in fognatura. In questo caso, verrà presentato uno specifico progetto integrativo per la bonifica della falda, da sottoporre alla Conferenza dei Servizi (fase IVa).

#### ***IV) Continuazione bonifica – suoli e acque***

Riattivazione degli impianti di SVE e regolazione delle portate dei camini di aspirazione (pozzetti verticali e trincee), secondo le necessità emerse nella fase III, anche adottando circolazione inversa per alcuni camini di ventilazione, e tecniche di spegnimento e riattivazione dell'aspirazione su singoli camini o per l'intero impianto. Riattivazione dell'impianto di strippaggio dalla falda, se la fase III conferma il percorso di bonifica adottato.

#### ***IVa) Continuazione bonifica – acque***

Nel caso in cui la scelta adottata per la bonifica della falda fornisca esiti insufficienti per condurre agli obiettivi di bonifica, vista la verificata impossibilità di applicare tecniche di strippaggio dell'acquifero con "air sparging", si ritiene che il progetto integrativo da sottoporre alla Conferenza dei Servizi dovrà scegliere tra le seguenti tecnologie in situ:

- *degradazione biologica in ambiente anaerobico,*
- *ferro zero valente (ZVI, Zero-Valent Iron),*
- *trattamento EHC,*
- *ossidazione chimica ISCO.*

La scelta dovrà fondarsi su una serie di test di laboratorio ed in campo. Questi ultimi per poter essere eseguiti richiederanno la piena attivazione della barriera idrogeologica e la sua buona efficienza (portate di almeno 1 l/s ogni pozzo, per otto pozzi), e quindi si dovranno smaltire portate doppie rispetto a quelle massime concesse per lo scarico in fognatura. La proposta più

economica e meno impattante per il territorio urbano circostante (eviterebbe il passaggio di autocisterne) può essere quella di immettere in falda i 4 l/s eccedenti, naturalmente dopo la depurazione in colonna di strippaggio. Il punto di immissione dovrà essere collocato immediatamente a monte dell'area contaminata nella direzione di deflusso, cioè ove attualmente è collocato il capannone della Max Clean. Il sollevamento del tetto della falda in corrispondenza del punto di immissione determinerà un aumento della cadente piezometrica locale e quindi della velocità della falda, con un netto miglioramento delle condizioni di bonifica e di funzionamento della stessa barriera idrogeologica.

#### ***V) Dichiarazione di bonifica eseguita – suoli e acque***

##### **3.2.1 Piano dei controlli ex-post**

###### ***Insaturo***

Per l'insaturo si prevede di realizzare le verticali di controllo indicate nella tavola 3, oltre a quelle eventualmente richieste dall'Agenzia di controllo, e di raccogliere due campioni ogni verticale, uno nel primo metro di profondità (suolo superficiale), l'altro tra i 3,0 ed i 3,60 metri di profondità (suolo profondo).

Il criterio di distribuzione delle verticali di campionamento indicate in tavola 3 vede 5 punti di controllo per il focolaio FC1 (capannone) di cui 2 distali rispetto le zone di aspirazione dell'impianto di SVE, 3 punti di controllo per il focolaio FC2 (magazzino) di cui 1 distale rispetto ai camini di aspirazione, e 2 per il focolaio FC3 (Max Clean) di cui uno distale rispetto al punto di aspirazione. Il focolaio FC4 prevede prelievo di n.5 campioni di validazione direttamente dalle pareti dello scavo (4 pareti verticali e fondo scavo) eseguito per la rimozione dei terreni insaturi nell'area residenziale contaminati da idrocarburi.

In accordo con l'Agenzia di controllo (ARPA), l'esecuzione dei sondaggi e l'assunzione dei campioni avverrà secondo metodi ed attrezzature utilizzati nel lavoro di precedente caratterizzazione:

- sonda GeoProbe (standard) a vibro infissione per limitare la perdita di volatili con la temperatura. Se le condizioni locali non consentissero l'impiego di questa macchina, ad esempio nei locali di altezza inferiore allo sviluppo della torre, si potrà ricorrere ad una sonda sempre a vibro-infissione ma non "GeoProbe";
- recupero del campione con fustella trasparente sigillata alle estremità, per consentire la visione e la definizione della quota di campionamento da eseguire;
- taglio fustella ed assunzione di un'aliquota di sedimento con subcampionatore (circa 3 centimetri cubi) e suo inserimento in vial da 40 Ml già preparato in precedenza con modificatore di matrice (10 Ml di metanolo prepesato), prelievo contemporaneo dello stesso sedimento in quantità pari a circa 150 grammi ogni campione, attorno al prelievo effettuato con subcampionatore, e sua conservazione in barattolo di vetro con chiusura ermetica;
- conservazione dei campioni in cella refrigerata portatile.

### ***Falda***

Per la falda la tavola 3 riporta la disposizione dei piezometri esistenti e di quelli che si propone di realizzare per effettuare i controlli di concentrazione degli alifatici clorurati e idrocarburi in falda al confine del sito di progetto.

I piezometri nell'area degli solventi clorurati avranno le seguenti caratteristiche:

- profondità 20 metri, così da monitorare l'intero acquifero;
- diametro foro insaturo 5" (125 mm), che verrà rivestito con tubazione PVC atossico;
- diametro foro nel saturo 101 mm, impiego di rivestimento

fino a fondo foro;

- tubo piezometrico da 3" (75 mm) con filtro (slot 0,2 - 0,25 mm) nell'acquifero saturo, cieco nell'insaturo, centratori;
- drenaggio con ghiaietto selezionato siliceo nella porzione satura, bentonite nell'insaturo, cemento nell'ultimo metro, chiusura con lucchetto.

I piezometri nell'area degli idrocarburi avranno le seguenti caratteristiche:

- profondità 6 metri;
- diametro foro nel saturo 3", impiego di rivestimento fino a fondo foro;
- tubo piezometrico da 2" (50 mm) con filtro (slot 0,2 - 0,25 mm) nell'acquifero saturo, cieco nell'insaturo, centratori;
- drenaggio con ghiaietto selezionato siliceo nella porzione satura, bentonite nell'insaturo, cemento nell'ultimo metro, chiusura con lucchetto;

I prelievi verranno effettuati ogni tre mesi per un anno solare (4 prelievi), con le seguenti modalità:

- inserimento pompa low-flow nel piezometro fino alla profondità di 18 ÷ 19 metri, secondo la quota dei depositi fangosi di fondo; la base della pompa deve comunque restare almeno 1 metro sopra il fondo per garantire che il limo, sempre presente al fondo e sulle pareti del piezometro, non venga assunto dalla girante della pompa low-flow in quantità tale da comprometterne il funzionamento;
- spurgo per il tempo necessario al ricambio completo dell'acqua contenuta nel tubo piezometrico e nel drenaggio con portate non superiori a 3 l/minuto;
- prelievo del campione d'acqua limpida con portate non superiori a 0,5 l/minuto, solo dopo 4 minuti di prelievo (sicuro svuotamento della pompa e del tubo di cacciata).

### **3.3 CONDIZIONI E VINCOLI SULL'AREA CONTAMINATA**

La seguente figura 8.1 riporta la zonizzazione dell'area "Ex Suprema" in termini di limitazioni e condizionamenti all'edificazione direttamente sulla planimetria dell'accordo di programma. La successiva figura 8.2 riporta la medesima scomposizione sulla planimetria catastale che propone lo stato di fatto attuale.

#### **3.3.1 Caratteristiche edifici nel Lotto 1 (Residenziale e Verde Privato/Pubblico)**

Il Lotto residenziale (Lotto 1) è suddiviso in tre aree:

- 1a: Area Residenziale non contaminata
- 1b: Area Residenziale contaminata da idrocarburi
- 1c: Area residenziale contaminata da solventi clorurati.

Per quel che riguarda gli edifici ubicati nell'area 1a non esistono vincoli da analisi

di rischio in quanto l'area risulta NON contaminata (tutti gli edifici a destinazione

Residenziale previsti da progetto sono contenuti all'interno dell'area 1a, quindi su aree NON contaminate).

Ad oggi il progetto urbanistico non prevede costruzioni residenziali nelle aree

destinate a verde pubblico o privato, ne quanto meno nelle aree 1b (contaminate da

idrocarburi) e 1c (contaminate da solventi clorurati). Qualora la destinazione d'uso

delle aree 1b e 1c dovesse cambiare, e su queste aree fossero previste delle

costruzioni residenziali, i seguenti vincoli devono essere rispettati:

- Uno spessore minimo delle fondazioni pari a 30 cm.
- E' possibile eseguite ambienti interrati adibiti ad uso parcheggio .
- Altezza ambienti indoor di almeno 2,7m.
- Utilizzo di membrana altamente impermeabile ai vapori (membrana di tipo Visqueen, contenente foglio micrometrico di alluminio) a protezione delle fondamenta.

### **3.3.2 Caratteristiche edifici nel Lotto 2 (Commerciale Direzionale)**

Per l'edificazione nel lotto Commerciale Direzionale (Lotto 2) il modello

concettuale prevede i seguenti vincoli:

- Uno spessore minimo delle fondazioni pari a 30 cm.
- Altezza ambienti indoor di almeno 3m di altezza.

### **3.3.3 Caratteristiche eventuali edifici nel Lotto 3 (Commerciale Parcheggio)**

Per una eventuale edificazione nel lotto Commerciale Parcheggio (Lotto 3) occorre applicare i medesimi vincoli del lotto Commerciale Direzionale (Lotto 2).

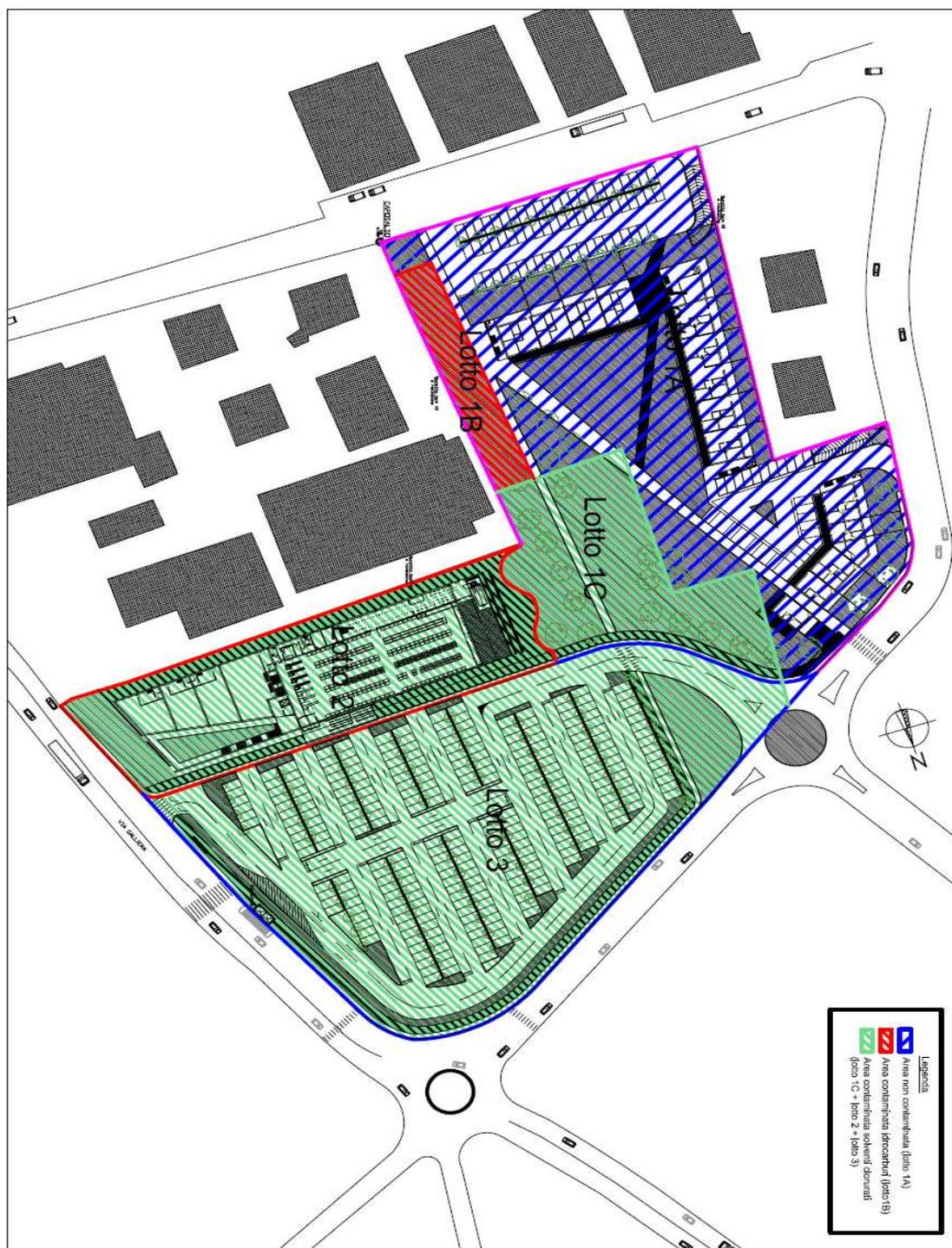


Figura 3.15 – zonizzazione dell'area Ex-Suprema sulla base della contaminazione.

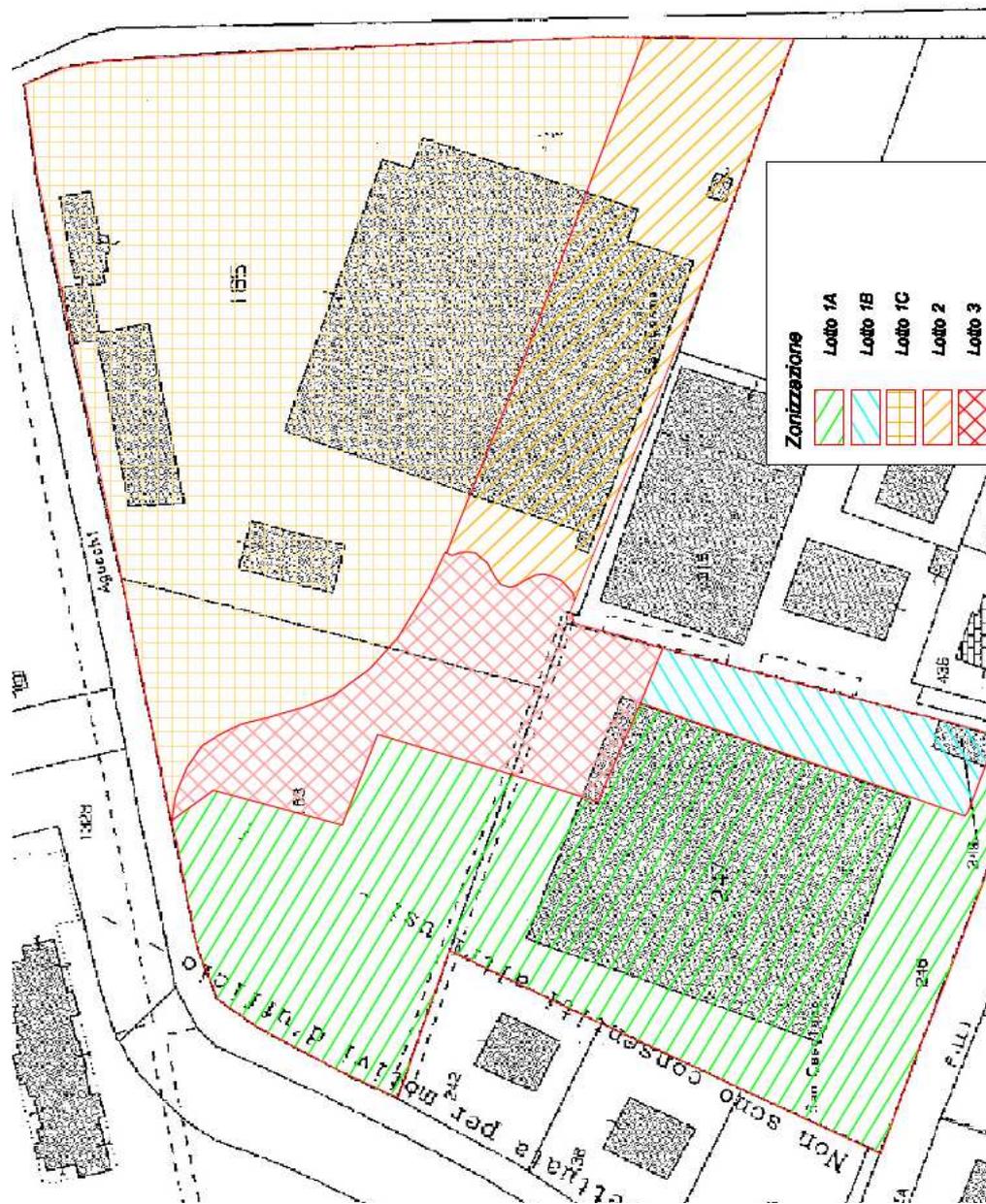


Figura 3.16 – divisione dei lotti allo stato attuale.

### 3.4 STRUMENTI PER IL MONITORAGGIO

Per le misurazioni effettuate durante il monitoraggio in corso d'opera, sono stati utilizzati principalmente tre strumenti.

### 3.4.1 Fotoionizzatore PID

Il principio di funzionamento di questo strumento si fonda sull'effetto ionizzante dei fotoni, le unità energetiche della luce.

Una lampada a raggi UV posta all'interno dell'apparecchio, emette fotoni di energia definita in grado di provocare l'allontanamento di un elettrone da determinati composti chimici, trasformando, di fatto, una molecola in uno ione carico positivamente. Gli ioni immersi in un campo elettrico, creato dagli elettrodi di una batteria, provocano una microcorrente la quale, attraverso gli opportuni trasduttori, viene proporzionalmente correlata alla concentrazione dell'inquinante presente nell'aria aspirata dal fotoionizzatore. Proprio per quanto descritto, tale strumento non riesce a rilevare tutti i composti, ma esclusivamente quelli ionizzabili con la lampada a disposizione che, generalmente, fornisce un'energia fotonica pari a 10.6 eV e quindi ionizza solo le molecole di quei composti che hanno un potenziale di ionizzazione inferiore a tale valore; d'altronde l'apparecchio non distingue un composto dall'altro, ma ne misura solo la concentrazione in aria, sommandone le quantità se i composti sono molteplici, per cui l'individuazione dello specifico composto è demandata anche ad altri indicatori, quali fialette o striscette colorimetriche, effetti sullo stato fisico degli individui venuti a contatto dell'inquinante, strumentazioni maggiormente sofisticate come i gas cromatografi da campo, ad esempio. La calibrazione dello strumento fissa solitamente due valori: lo zero assoluto ed un valore noto di una sostanza ben precisa, in genere l'*isobutilene* in concentrazione nota, conservato nell'apposita bombola di calibrazione.

Tutte le altre letture, attraverso una semplice interpolazione lineare, sono di conseguenza rilevabili, collegando il valore fisico della microcorrente effettivamente misurata alla concentrazione realmente presente dell'inquinante. In effetti il foto ionizzatore non viene, solitamente, utilizzato per rilevare la presenza di isobutilene

in aria, ma ben altro, per cui risulta necessario, al fine di conoscere l'effettiva concentrazione di una sostanza diversa dall'isobutilene, moltiplicare il valore letto dallo strumento per il fattore di correzione (CF) caratteristico della sostanza rilevata, che, come si è detto, dovrà essere individuata per altre vie, tenendo, altresì, presente che valori del fattore di correzione inferiori a 10 indicano una buona sensibilità dello strumento a quella determinata sostanza, mentre valori superiori a 10 indicano che il fotoionizzatore, in quel caso, potrà fornire solo informazioni grossolane. La casa produttrice acclude allo strumento le tabelle ove sono indicate le sostanze rilevabili, i relativi fattori di correzione e i relativi valori caratteristici più importanti.

L'uso del PID (photo ionization detector) non altera la concentrazione della sostanza in aria, in quanto solo una parte per cento circa delle molecole viene effettivamente ionizzata dallo strumento, il resto fuoriesce dall'apposito foro non ionizzata.

Un fotoionizzatore con lampada a raggi UV da 10.6 eV è adatto a rilevare i VOC (volatile organic compound), i composti organici volatili, ovvero quei composti caratterizzati dalla presenza di atomi di carbonio e da una tensione di vapore non estremamente bassa.

Eccezione a questa regola fanno l'ammoniaca, l'ossido di azoto, l'idrazina, il bromo e lo iodio, l'arsina e la fosfina, sostanze che pur non appartenendo alla famiglia dei VOC hanno un potenziale di ionizzazione inferiore a 10.6 eV. Alla famiglia dei VOC

appartengono moltissimi composti tra i quali si distinguono gli *idrocarburi aromatici* (benzene, etilbenzene, toluene, xilene, composti dotati di anello esagonale benzenico, fatto che li distingue dagli idrocarburi alifatici a struttura lineare – l'anello aromatico privato di un atomo d'idrogeno si definisce gruppo arilico), gli *idrocarburi alifatici saturi* (come il butano e l'ottano, composti binari contenenti solo legami C-C semplici), gli *idrocarburi alifatici insaturi* (come butadiene e isobutilene, composti binari

contenenti almeno un legame multiplo C=C o C=C), i *chetoni* (come acetone o metiletilchetone, composti in cui un atomo di carbonio oltre ad essere legato doppiamente con l'ossigeno ha gli altri due legami liberi agganciati ad altrettanti gruppi alchilici e/o arilici), le *aldeidi* (come l'acetaldeide, composti in cui è presente il gruppo alchilico o arilico che si lega al gruppo aldeidico costituito da un atomo di carbonio legato doppiamente all'ossigeno ed avente un legame con l'idrogeno ed uno libero – quello cui si aggancia il gruppo alchilico o arilico), le *ammine* (composti ove uno o più atomi d'idrogeno dell'ammoniaca sono sostituiti da gruppi alchilici o arilici, es. dietilammina) e le *ammidi* (composti ove un atomo di carbonio oltre a legarsi con un gruppo alchilico o arilico e con doppio legame all'ossigeno, ha un legame con il gruppo ammidico-NH<sub>2</sub>), *compostidello zolfo* (come i mercaptani o i solfuri organici, comunque derivati dall'acido solfidrico i cui atomi di idrogeno sono sostituiti rispettivamente da uno o due gruppi alchilici), gli *alcoli* (derivati dagli idrocarburi e costituiti dal gruppo alchilico – idrocarburo binario privato di un atomo d'idrogeno – unito al gruppo ossidrilico-OH, come ad es. l'isopropanolo e l'etanolo). Con il fotoionizzatore sono inoltre rilevabili molti di quei composti organici utilizzati

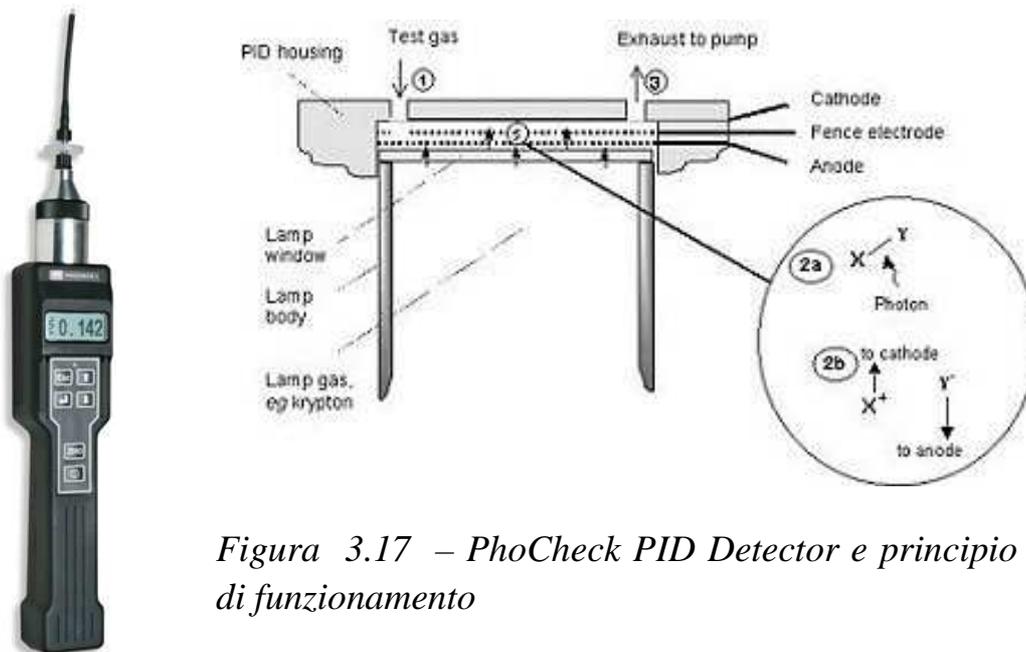
sovente come armi chimiche (di caratteristiche molecolari assasimili ai pesticidi) come i *nervini* (sarin, soman, tabun, VX) ed i *vescicanti* (iprite, lewisite). Al contrario un fotoionizzatore con lampada da 10.6 eV non riesce a rilevare il fosgene (che bisognerebbe di una lampada da 11.7 eV), i tossici comuni (monossido di carbonio, anidride solforosa, acido cianidrico), i gas naturali (metano, etano), i componenti principali dell'aria (ossigeno, azoto, anidride carbonica, vapore acqueo), i freons, l'ozono, i PCB (PoliCloroBifenoli) ed i grassi (questi ultimi due sono praticamente non volatili e quindi i loro vapori non si mescolano con l'aria). Anche se non se ne è fatto cenno, si

rammenta che il foto ionizzatore in questione non è idoneo in campo radiometrico.

Esistono poi alcune sostanze molto reattive, quali l'idrazina, il salicilato di metile, il fenolo, il dimetilmetilfosfonato che sono facilmente assorbite dal filtro e dalla tubazione di aspirazione dello strumento, per cui la lettura che si ricava rilevando gli stessi risulta assai inferiore a quella reale: in questo caso lo strumento andrebbe privato del tubo di aspirazione e del filtro, anche quello metallico, e ricalibrato.

Premesso quanto sopra è importante che l'operatore addetto all'uso del PID sappia che i VOC sono presenti in molti prodotti normalmente utilizzati in casa (insetticidi, pesticidi, cosmetici, colle, prodotti per la pulizia, detergenti, decapanti, smacchiatori, diluenti, acqua ragia, pitture, prodotti per stampanti e fotocopiatrici, adesivi, prodotti per sviluppo fotografico, fumo di tabacco e persino materiali da costruzione, mobili ed arredi, senza tener conto delle emissioni industriali e dei veicoli) e, quindi, è sostanzialmente impossibile che lo strumento, sensibilissimo, una volta acceso, dia lettura pari allo "0", per cui risulterebbe appropriato, attraverso la funzione del "cancel background", annullare il fondo ambientale in zona sicura, prima di iniziare le operazioni di misura vere e proprie, in quanto se è vero che avvicinandosi all'epicentro del fenomeno dispersivo della sostanza di cui si sospetta la presenza, lo strumento comincerà a rilevare concentrazioni più significative (si passerà dai ppm-par ti per milioni - ai ppb-par ti per miliardo) è altrettanto vero che alcune sostanze estremamente tossiche (quali i nei vini, ad esempio) sono caratterizzate da valori di TLV-TWA (riferimento di sicurezza per l'operatore VVF) ridottissimi, dell'ordine di pochi ppb (parti per miliardo), per cui lo strumento diventerebbe praticamente inidoneo a fissare, se utilizzato da solo e senza tener conto dell'esperienza professionale, i limiti dell'area di sicuro pericolo.

In particolare il modello utilizzato è stato il PhoCheck PID Detector della ION Science in grado di rilevare con precisione i composti organici volatili (VOC) da 1 ppb a 10.000 ppm.



*Figura 3.17 – PhoCheck PID Detector e principio di funzionamento*

### 3.4.2 Manometro digitale di precisione

Sono strumenti portatili con display LCD di grandi dimensioni, eseguono misure di pressione assoluta, relativa, differenziale e misure di temperatura.

Per la misura della pressione si fa uso di un modulo interno di tipo differenziale rispetto l'atmosfera a fondo scala fisso.

La temperatura viene acquisita con sonde ad immersione, penetrazione, contatto o aria, con modulo SICRAM o a 4 fili diretta.

Le sonde di temperatura provviste di modulo SICRAM hanno memorizzati al loro interno i dati di calibrazione di fabbrica e vengono riconosciute automaticamente all'accensione dello strumento.

Gli strumenti HD2114.2, HD2134.2, HD2164.2 e HD2114B.2 sono datalogger, memorizzano fino a 36.000 campioni che possono essere trasferiti ad un PC collegato allo strumento tramite la porta seriale multi-standard RS232C e USB 2.0. Da menu è possibile configurare l'intervallo di memorizzazione, la stampa, il baud rate. Sono inoltre dotati di porta seriale RS232C con la quale possono trasferire, in tempo reale, le misure acquisite ad un PC o ad una stampante portatile. La funzione Max, Min e Avg calcola i valori massimo, minimo e medio, la funzione Peak, rileva la presenza di picchi di pressione.

Altre funzioni sono: la misura relativa REL, la funzione HOLD e lo spegnimento automatico escludibile. Gli strumenti hanno grado di protezione IP67.



*Figura 3.18 – Manometro di precisione digitale.*

### 3.4.3 Freatimetro

Il freatimetro Consente di misurare la profondità a cui si trova il livello d'acqua in pozzi, cisterne, etc.

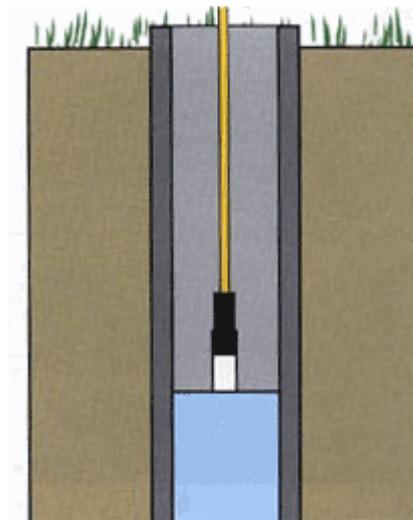
Un sensore piezometrico, tramite la chiusura del circuito in presenza d'acqua, determina un segnale sonoro.

Contemporaneamente si accende una spia luminosa (LED) per poterli utilizzare in zone rumorose (Prossimità di cantieri, strade, corsi d'acqua).

La graduazione centimetrata è serigrafata sul cavo con precisione 1%.

Il cavo è a sezione tonda con un diametro di 4,7 mm; l'anima è in kevlar con guaina esterna di protezione in poliuretano antigraffio e contiene 4 conduttori.

La sonda ha un diametro di 10mm.



*Figura 3.19 – freatimetro di precisione per la misurazione del livello piezometrico.*

## 3.5 ATTIVITA' DI GESTIONE DEGLI IMPIANTI

### 3.5.1 Impianto di estrazione acque (P&T)

L'impianto di risanamento della falda è stato avviato il 21 febbraio 2009.

Il monitoraggio delle acque di scarico è effettuato direttamente sia per le quantità scaricate, con un apposito misuratore di portata collocato allo scarico, sia per la qualità (analisi chimica) prelevando l'acqua all'uscita della torre di strippaggio o dai singoli pozzi attraverso un rubinetto; i campionamenti sono stati effettuati ogni 30 giorni, nei periodi di mantenimento dell'attività stabile dell'impianto.



*Figura 3.20 – contatore della portata liquida (sinistra), valvola di regolazione (pomello rosso), valvola di scarico per il prelievo di campioni (maniglia nera).*

Per lo scarico in atmosfera il monitoraggio è stato concentrato attorno ai due filtri a carboni attivi di progetto, dotati di apposita

saracinesca per il controllo e per il prelievo di campioni di gas. Il monitoraggio è stato effettuato con fotoionizzatore (PID) che, oltre a consentire la lettura immediata delle concentrazioni delle sostanze selezionate, permette anche di prelevare campioni degli stessi gas monitorati in apposite sacche ermetiche, per l'analisi di controllo in laboratorio.

I risultati del monitoraggio con PID è registrato in un apposito diario, sottoscritto alla fine di ogni giornata di controllo sullo scarico all'uscita dai due filtri a carboni attivi. Il monitoraggio di controllo periodico con campionatura dei gas, a monte e a valle dei filtri, e successiva analisi di laboratorio è effettuato ogni 30 giorni con prelievo su fiala di carbone attivo, oppure, a richiesta, del gas tal quale con apposita sacca ermetica.

La configurazione adottata ha previsto l'attivazione, in modalità di emungimento continua, dei pozzi PZ1A o BR1, PB1, PB2, BR5 con portate di 1 l/s. Questo schema garantisce di smaltire la portata trattata senza provocare significativi cambiamenti idrogeologici nella falda e contemporaneamente di contenere il sollevamento dell'acquifero indotto dalla depressurizzazione nell'insaturo provocata dalla SVE.

La tecnologia utilizzata non prevede particolari interventi da parte dell'operatore in corso d'opera; una volta avviato e configurato l'impianto, il mio compito ha consistito semplicemente nel controllare l'effettivo pompaggio attraverso il misuratore di portata (contatore) posto in testa al pozzo e verificare il funzionamento della pompa che garantisce lo scarico delle acque in fognatura.

L'attività di monitoraggio ha previsto il prelievo di campioni di acque contaminate dai pozzi attivi; l'analisi dei campioni è stata affidata ai laboratori specializzati della Nier ingegneria S.p.a..

Di fondamentale importanza è stato il controllo del tenore di volatili totali all'uscita dei filtri a carboni attivi posizionati a valle della torre di stripping; il monitoraggio di tali emissioni,

finalizzato ovviamente a verificare l'efficacia del trattamento, ha fornito anche indicazioni sullo stato di degrado dei filtri: infatti, quando i carboni esauriscono le loro proprietà adsorbenti, il flusso d'aria trattato presenta una concentrazione di inquinanti quasi superiore a quella stabilita per legge e quindi questi devono essere sostituiti (tipicamente ogni 2/3 mesi) e inviati allo smaltimento o alla riattivazione all'esterno dell'impianto.

### **3.5.2 Impianto di estrazione sottovuoto di volatili (SVE)**

Il monitoraggio principale si è svolto attorno ai due filtri a carboni attivi di progetto in uscita dalle tre linee, dotati di apposita saracinesca per il controllo e per il prelevamento di campioni di gas. Il monitoraggio è stato effettuato con fotometro ionizzatore (PID) che, oltre a consentire la lettura immediata delle concentrazioni delle sostanze selezionate, permette anche di prelevare campioni degli stessi gas monitorati in apposite sacche ermetiche, per l'analisi di controllo in laboratorio.

I risultati del monitoraggio con PID sono stati registrati in un apposito diario, sottoscritto alla fine di ogni giornata di controllo sullo scarico all'uscita dai due filtri a carboni attivi. Il monitoraggio di controllo periodico con campionatura dei gas, a monte e a valle dei filtri, e successiva analisi di laboratorio è stato effettuato ogni 30 giorni con prelievo su fiala di carbone attivo, oppure, a richiesta, del gas tal quale con apposita sacca ermetica.

Per il controllo dell'efficacia del trattamento sono stati prelevati campioni di terreno successivamente inviati in laboratorio per le analisi.

Le prime giornate di attività dell'impianto (21/02 – 25/02) sono state dedicate al collaudo del sistema e alle prime regolazioni con numerose accensioni, spegnimenti e variazioni di assetto; la SVE è stata definitivamente avviata il 26 febbraio 2009. La configurazione adottata, frutto dei test compiuti nei giorni

precedenti, ha garantito l'aspirazione con depressioni considerevoli (fino a 180 mBar) tali da garantire lo strippaggio dei contaminanti, senza incorrere in inconvenienti tecnici, come l'intromissione di acqua di falda nei pozzi.

Il lavoro da me svolto all'interno del cantiere è stato principalmente incentrato sulla gestione e il monitoraggio dell'impianto di Soil Vapor Extraction.

Inizialmente, nella fase di avvio e messa a regime, la frequenza dei controlli è stata pressoché giornaliera; col sistema pienamente a regime invece è stato sufficiente compiere le misurazioni una volta a settimana, fatta eccezione per le situazioni di emergenza (piogge intense).

La mia attività consisteva sostanzialmente in quanto segue.

In primis, attraverso strumentazione PID (foto ionizzatore), misuravo i tenori dei contaminati nei gas estratti:

1. all'uscita della soffiante, per verificare l'efficacia della configurazione adottata (concentrazioni alte sono sintomo di un assetto efficiente);
2. nei punti di monitoraggio posti tra i filtri e a valle degli stessi, per controllare l'avvenuto trattamento dei gas e lo stato di degrado dei filtri.

Successivamente tutte e tre le linee venivano spente per poter determinare la frazione di inquinanti pozzo per pozzo; la misurazione avveniva attraverso una piccola valvola a sfera, sulla testa-pozzo, nella quale veniva inserito lo strumento PID. Le concentrazioni venivano riportate sull'apposita scheda di campo (figura ), nella quale annotavo anche l'eventuale presenza di acqua nel pozzo (verificata grazie a un freatometro).

Sulla base delle informazioni raccolte veniva decisa la nuova configurazione da adottare: per esempio, i pozzi nei quali erano stati riscontrati tenori bassi venivano parzialmente o totalmente chiusi (attraverso valvole con saracinesca a ghigliottina all'imbocco della

LINEA1: SV1,SV2,SV3,SV4,SV5,SV6,SV16; TR7, TR8, TR9, TR10, TR11, TR12, TR13; PSV6,PSV8,PSV9,PSV10						
PID: CONTROLLO TENORI VOLATILI [ppm], IMPIANTO SVE FERMO				CONTROLLO INFLUENZE IMPIANTO ATTIVO		
Identificativi	VOC totali	Tetracloroetilene	Tricloroetilene	Dicloroetilene	Depressione [mBar]	H2O [cm]
SV1						
SV2						
SV3						
SV4						
SV5						
SV6						
SV16						
TR7						
TR8						
TR9						
TR10						
TR11						
TR12						
TR13						
PSV6						
PSV8						
PSV9						
PSV10						

Figura 3.22 – tabella per la registrazione dei dati di monitoraggio.

testa-pozzo); al contrario, nei pozzi dove le concentrazioni erano alte, poteva essere accentuata la depressione, mentre i pozzi precedentemente chiusi potevano venire aperti, cercando sempre di mantenere le depressioni sufficientemente alte e di non provocare l'immissione di acque dal sottosuolo nelle tubazioni.

Il continuo cambio di assetto utilizzando anche tecniche di "Pulsing" o di circolazione inversa su singoli camini è alla base del Soil Vapor Extraction: infatti la prolungata estrazione sottovuoto dei gas interstiziali provoca, nella matrice solida, la formazione di vie preferenziali percorse dal gas aspirato; questi piccoli canali si possono allargare nel tempo, causando cadute di pressione che vanificano l'effetto di strippaggio del contaminante dalle particelle solide e impedendo un aspirazione uniforme da tutti i pori del terreno.

Il pompaggio pulsato favorisce, durante le interruzioni, il "rilassamento" della matrice solida e la chiusura dei canaletti; riavviando l'impianto verranno verosimilmente aperti nuovi canali che consentiranno di raggiungere zone diverse della contaminazione. Lo stesso effetto può essere prodotto alternando i camini di aspirazione, infatti la chiusura di un pozzo e l'apertura di un altro ad esso adiacente determina un cambiamento dei percorsi preferenziali di estrazione dei vapori e quindi aumentando l'efficacia del trattamento.

La circolazione inversa viene realizzata aprendo, sulle teste-pozzo dei camini non attivi, una valvola a saracinesca direttamente a contatto con l'atmosfera; in questo modo si provoca l'ingresso nel sottosuolo di aria "pulita" che stimola processi di degradazione aerobica oltre a favorire il ricambio del gas nei pori e la formazioni di nuove vie, con effetti benefici sulla riuscita dell'intervento.

Per modificare la configurazione si riavviavano le linee dell'impianto e, attraverso l'utilizzo di un manometro di precisione collegato alla testa del camino, si agiva sulla saracinesca per

regolare depressione e portata.

Questa è sicuramente la fase più delicata della gestione dell'impianto; infatti, poichè la regolazione coinvolge più pozzi idealmente interconnessi nel sottosuolo dalla porosità efficace, agendo su un singolo camino si modifica l'equilibrio di tutta la linea; per cui non è semplice realizzare l'assetto precedentemente stabilito in teoria ma sono necessarie una certa sensibilità e una profonda conoscenza delle dinamiche dell'impianto.

Inoltre, da un lato è facile incappare in inconvenienti piuttosto pericolosi (come il richiamo di acque di falda all'interno del pozzo) dall'altro si può determinare una configurazione poco efficace per eccesso di prudenza (allungando notevolmente tempi e costi dell'intervento).

L'immissione di acque dal sottosuolo rappresenta uno dei problemi più frequenti negli interventi di SVE, in particolare in situazioni come quella in esame dove il tetto della falda si trova a pochi metri dal piano campagna. Le cause di questo fenomeno possono essere sostanzialmente due:

- eccessive depressioni generate dalla soffiante possono risucchiare l'acqua dall'acquifero fino all'interno del pozzo;
- l'innalzamento del livello di falda fino alla quota delle finestrate del camino per variazioni stagionali (errore nella progettazione) o piogge intense.

La pericolosità risiede nel fatto che le acque risucchiate possono arrivare fino alla soffiante compromettendone il funzionamento; per questo motivo a monte della pompa, lungo le tubazioni, sono sistemati una serie di condensatori che consentono di separare l'acqua (in caso di eventi straordinari) ma, più spesso, l'umidità trascinata dalla corrente. Le acque separate dal flusso nei separatori, vengono inviate ad un serbatoio di stoccaggio da cui, con un sistema a gravità, raggiungono la torre di strippaggio per la depurazione.

Un altro problema riguarda i sedimenti più fini che, trascinati dal flusso liquido, superano il filtro ghiaioso (messo a protezione dei tubi finestrati) intasando il pozzo; infatti anche una piccola quantità di sedimento, spalmandosi sulle pareti del tubo è in grado di “murare” le fessure e rendendo impossibile l’aspirazione; il camino può essere ripristinato attraverso un’opera di pulizia manuale o con idropulitrice che disintasi le pareti dello stesso. Ciò non è sempre possibile, il che significa perdere un punto di aspirazione scelto accuratamente in fase di progetto, il che naturalmente determina notevoli disagi, sia operativi che economici.

Una volta riavviata la linea era necessario aspettare circa un’ora affinché il sistema andasse a regime; successivamente rimisuravo i tenori nei punti di monitoraggio posti a valle della soffiante. Come ho detto in precedenza la nuova configurazione risultava efficace se le concentrazioni dei contaminanti nei gas estratti erano sufficientemente alte; in caso contrario era necessario ricominciare il processo di riassetto della linea fino a trovare una soluzione soddisfacente.

### **3.6 DIARIO DELLA BONIFICA**

#### **3.6.1 Configurazioni impiantistiche della linea 1**

L’impianto ha le seguenti caratteristiche:

- Soffiante 5,5 kw; 500 mc/h; 300 mBar
- Camini aspirazione (pozzetti): SV1; SV2; SV3; SV4; SV5; SV6;SV16; PSV6; PSV7; PSV8; PSV10
- Trincee: TR7; TR8; TR9; TR10; TR11; TR12; TR13

Le prime giornate di attività dell’impianto sono state dedicate ai collaudi del sistema ed alle prime regolazioni con numerose

accensioni, spegnimenti e variazioni di assetto.

Giorno 26/2 avvio delle attività con la seguente configurazione: attivi i camini di aspirazione (pozzetti) SV2, SV3, SV4, SV5, SV6, SV16, la trincea TR7 regolata per una modesta depressione. Con questa configurazione le depressioni indotte passivamente sui punti di aspirazione non utilizzati sono risultate, in millibar (mBar):

PSV6 =0,45; PSV8 =2,98; PSV9 =7,29; PSV10 =1,22; TR8 =0,16; TR9 =0; TR10 =0,05; TR11=0; TR12 =0,04.

I) Il 3/3 la pioggia costringe a modificare la configurazione: la completa apertura di TR7 produce una diminuzione della depressione ai pozzetti da 180 mBar a 60 mBar circa, altrimenti vengono sollevati acqua e fango.

II) Il giorno 6 marzo viene nuovamente diminuita la pressione di aspirazione per non compromettere la funzionalità dei pozzetti con il richiamo di acqua dalla falda, poi viene chiusa la linea.

III) 11/3: riavvio la linea con una nuova configurazione: SV2, SV3, SV4, SV5, SV6, SV16, PSV6, PSV10, le depressioni attive variano tra 170 e 183 mBar. La trincea TR12 è regolata con depressione attiva di 7 mBar. Le depressioni passive misurate in mBar nei pozzi non attivi sono: PSV8 =3,14; PSV9 =9,47; TR7 =0; TR8 =0.

IV) Il 17 marzo modifico la configurazione a causa dalle piogge persistenti con una diminuzione delle depressioni attive (mBar) tra 157 e 167 e regolazione del pozzetto SV6 (70 mBar) e delle trincee TR9, TR11, TR12; il pozzetto SV4 viene chiuso perché invaso dal fango: non ha più portata utile. La nuova configurazione è SV2, SV3, SV5, SV6, SV16, PSV6, PSV10, TR9, TR11, TR12.

V) Il 27/3 fermo la linea per invasione di acqua e fango nei pozzetti.

VI) Riprendo l'aspirazione il 5/4 dopo una pulizia manuale

dei pozzetti e di tratti di linea, eseguo una nuova regolazione delle depressioni. La configurazione con le depressioni regolate espresse in mBar è: SV2 (93), SV3 (120), SV6 (74), PSV6 (108), PSV8 (120), PSV9 (112), PSV10 (108), TR7 (14).

VII) Il 15 maggio le piogge costringono a un nuovo fermo di impianto.

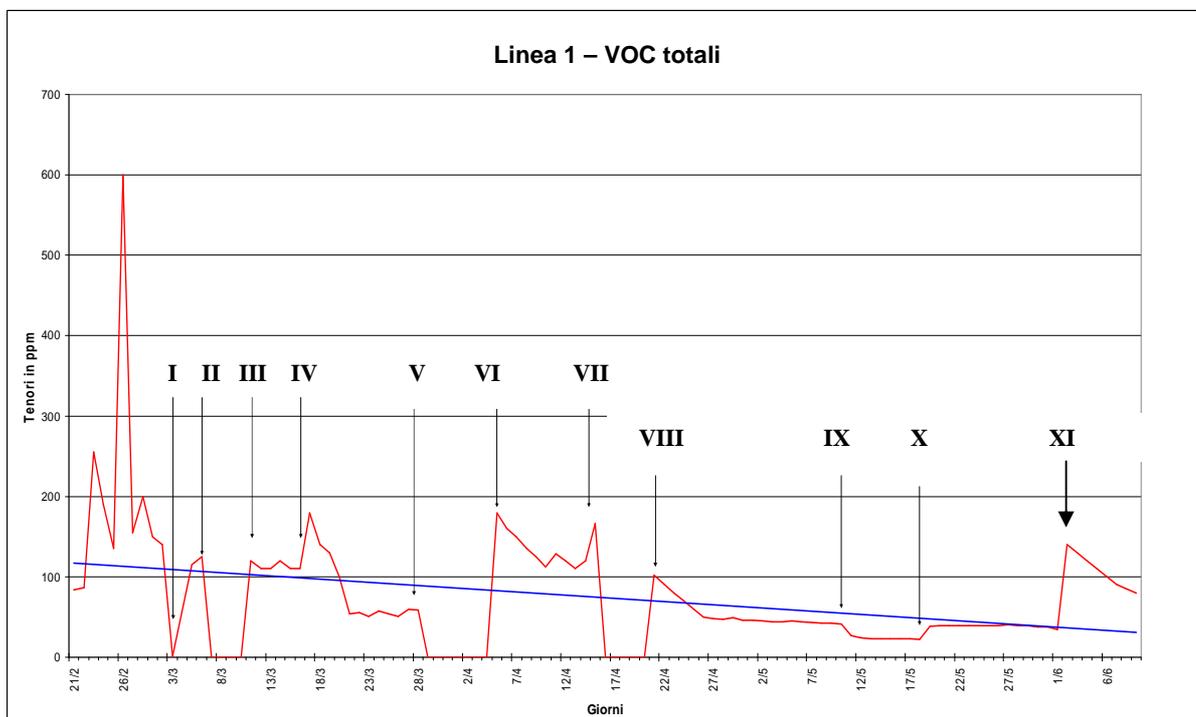
VIII) Ripresa dell'aspirazione il 21/4 con configurazione: SV1, SV2, SV3, SV6, SV16, PSV6, PSV8, PSV10, PSV9, PSV10, TR12 (regolato).

IX) 10/5, configurazione: SV1, SV2, SV3, SV5, SV6, SV16, PSV6, PSV8, PSV10, PSV10, TR7 (regolato).

X) Nei giorni 18-19-20/4 vengono testate differenti configurazioni, invertendo spesso i camini attivi; l'assetto definitivo è: SV1, SV2, SV3, SV6, SV16, PSV6, PSV8, PSV9, PSV10, TR11 (regolato), TR12 (regolato).

XI) Il 2/6 viene eseguita una pulizia manuale pozzetti SV6, SV16, SV2, PSV8. Ripresa dell'aspirazione con configurazione: SV1, SV2, SV3, SV5, SV6, SV16, PSV6, PSV8, PSV10, TR9 (regolato), TR12 (regolato).

Il giorno 8 giugno sono costretto nuovamente a fermare la linea per pulizia con strumentazione (idropulitrice e pompa) dei pozzi PSV8, SV16, PSV6, PSV9, SV5, e il rifacimento del pozzetto SV4, da tempo inutilizzabile. Successivamente si procede all'asciugatura di pozzetti e sedimenti, configurazione: TR7, TR8, TR9, TR12, SV2, SV3, TR11. Il 20/6 fermo tutto a causa della pioggia.



*FIG. 3.23 - Diagramma di variazione nel tempo dei tenori rilevati all'ingresso dei filtri a carboni attivi della linea SVE 1. I numeri romani costituiscono richiami che hanno spiegazione nel testo. La linea blu rappresenta l'andamento tendenziale statistico.*

### **3.6.2 Configurazioni impiantistiche della linea 2**

Caratteristiche della linea:

- Soffiante 3 kw; 300 mc/h; 200 - 240 mBar
- Camini aspirazione (pozzetti): SV9; SV10; SV11
- Trincee: TR3; TR4; TR5; TR6

La prima giornata di attività dell'impianto (22/2) è dedicata al collaudo del sistema ed alle prime regolazioni con numerose accensioni, spegnimenti e variazioni di assetto.

I) Il giorno 23/2 avvio attività imponendo la depressione della soffiante solamente alla trincea TR4 che costituisce il punto di aspirazione che ha fornito i tenori di clorurati di gran lunga più elevati dell'intera configurazione, ed inoltre è stata realizzata per aspirare con modalità direzionali: solamente verso il reparto verniciatura. La depressione iniziale è di 100 mBar e scenderà nei successivi 10 giorni a 90 mBar.

II) Il giorno 4/3 la pioggia costringe a modificare la configurazione: la fognatura interna che passa in testa alla trincea TR4 ha una perdita che evidentemente scarica nella trincea, che così solleva acqua. Per questo viene chiusa TR4 e aperta TR3;

III) Il 10/3 TR3 aspira pochi contaminanti e si avvicina presto a zero. L'11/3 chiuso TR3 aperto TR4, dopo due giorni riaperto anche TR4 con bassa depressione.

IV) Il giorno 17 modifica della configurazione: SV9, SV11, TR4, TR5. Avvio della linea il 17/3 sera, con nuova configurazione, depressione attiva al TR4 di 70 mBar.

V) Il 21/9 aumento la depressione TR4 (95 mBar), con esclusione di TR3, e dei pozzi SV9, SV11.

VI) Il giorno 24/3 entra acqua in TR4, perciò viene aperta la trincea TR3.

VII) Tra il 27 e il 28/3 registro l'azzeramento clorurati all'ingresso dei filtri. La configurazione impostata il 26/03 era:

SV9,SV11, TR5. Il giorno 30 si verifica l'ingresso di acqua nell'impianto a causa del mancato funzionamento delle pompe di cacciata dei separatori di condensa delle linee 2 e 3, la linea 1 era spenta. Il giorno 31/3 viene ripresa l'aspirazione con basse depressioni da TR3 e aria falsa regolata per asciugare impianto e carboni attivi del primo filtro che erano stati allagati.

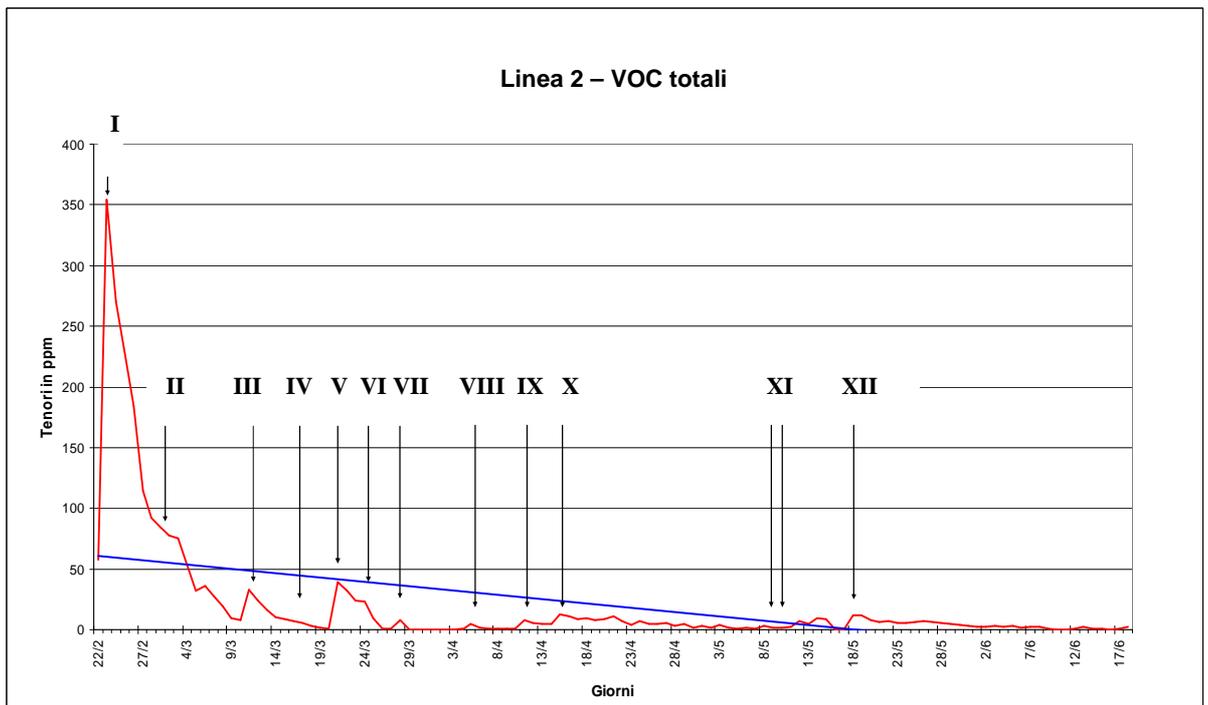
VIII) Il giorno 5/4 aumento le depressione dei pozzi esterni che però causa l'ingresso di acqua; sospendo impianto e dopo 12 ore riattivo l' aspirazione da TR3 con modalità continua.

IX) Dal giorno 10/4 ripresa dell'aspirazione dai pozzi SV9, SV11 e dalle trincee TR5, TR4 (regolata a 10 mBar). Il giorno 11/4 chiudo TR4, con conseguente modesto aumento della depressione sulla linea attivata.

X) Giorno 15/4, configurazione: SV11, TR4; il filtro della trincea TR4 è stato ripulito un poco dal fango.

XI) Il giorno 10 maggio si effettua la pulizia manuale della trincea TR4, la configurazione precedente era: TR6, SV10 per controllo aspirazione con risultati prossimi a zero per 24 ore. Perciò si modifica l'assetto, TR4, SV10. Dopo la pulizia manuale la depressione in TR4 passa da 125 a 102 poi a 95 mBar.

XII) Dal giorno 18/5 vengono effettuate varie modifiche alla configurazione mantenendo come base TR4 (TR3 fornisce tenori di clorurati in PPM inferiori all'unità, TR6 tenori molto modesti) ed aggiungendo i pozzetti esterni o la trincea TR5. I tenori misurati all'ingresso del primo filtro CA si sono sempre più approssimati all'unità fino al 18/6, giorno di spegnimento dell'impianto di strippaggio dell'acqua sollevata.



*Figura 3.24 - Diagramma di variazione nel tempo dei tenori rilevati all'ingresso dei filtri a carboni attivi della linea SVE 2. I numeri romani costituiscono richiami che hanno spiegazione nel testo. La linea blu rappresenta l'andamento tendenziale statistico della bonifica.*

### 3.6.3 Configurazioni impiantistiche della linea 3

Caratteristiche della linea:

- Soffiante: 4 kw; 500 mc/h; 200 - 240 mBar
- Camini aspirazione (pozzetti): SV7; SV8; SV12; SV13; SV14; SV15; ESISTENTE; PSV1, PSV3; PSV5;
- Trincee: TR1; TR2.

Le prime giornate di attività dell'impianto (23 - 26/2) sono state dedicate al collaudo del sistema ed alle prime regolazioni con numerose accensioni, spegnimenti e variazioni di assetto.

I) Il giorno 26/2 avvio dell'attività imponendo una depressione da 170 a 150 mBar alla configurazione di soli pozzetti: SV7, SV8, SV12, SV13, SV14, SV15, ESISTENTE. Il giorno 3/3 inizia la pioggia e modifico la configurazione, soprattutto diminuendo la depressione: SV12 (70 mBar), SV13 (70 mBar), SV14, SV15, ESISTENTE (100 mBar), TR2 (15 mBar).

II) Il 4/3, dato il persistere del maltempo, si provvede alla chiusura della linea e del pozzo PB1, per non compromettere funzionalità dei camini;

III) Il 6 marzo riprende l'aspirazione con depressioni modeste, configurazione: SV12, SV14, SV15, ESISTENTE, TR2.

IV) Il giorno 11 marzo viene modificata la configurazione: SV12, SV14, ESISTENTE, SV15, PSV3, a depressioni alte (135 – 145 mBar). Questo cambiamento è dovuto al fatto che il giorno 10/3 SV12 solleva fango, SV14 solleva acqua: regolate le depressioni SV12 a 50 mBar, SV14 a 120 mBar; aperta TR1 con depressione 6 mBar.

V) Il 17/3 la configurazione adottata prevede SV7, SV8, SV12, SV14, SV15, PSV3, con depressioni superiori a 140 mBar, mentre ESISTENTE 60 mBar e TR1 10 mBar.

VI) Il 27 marzo viene nuovamente variato l'assetto: SV8, SV12 (68 mBar), SV14, SV15, ESISTENTE (90 mBar), PSV5, tr1

(4 mBar). La depressione, ove non specificato varia tra 150 e 160 mBar.

VII) Il 30 viene fermata la linea per allagamento dell'impianto, in particolare nelle linee 2 e 3, a causa mal funzionamento delle pompe di cacciata dei separatori di condensa, la soffiante è stata sostituita, solamente il giorno 3 /4 si è riusciti a far ripartire la linea 3.

VIII) Il giorno 3/4 viene ripresa l'aspirazione con bassa depressione e ingresso di aria falsa regolata per asciugare l'impianto e i carboni attivi del primo filtro i quali erano stati allagati.

IX) La rottura dello scarico di PB1 il giorno 5/4 produce un locale allagamento del capannone e l'acqua entra nella trincea TR2 (linea 3) e TR4 (linea2). L'assetto impostato nel giorno 6/4 ha previsto: SV8, SV12, SV14, SV15, ESISTENTE, PSV5, TR1 (11,5 mBar), con depressioni contenute (100 – 110 mBar). In questo campo di depressione al pozzetto PSV1 misurati 11,1 mBar passivi.

X) Giorno 15/4, configurazione: SV7, SV8, SV12, SV13 (70 mBar), SV14, SV15, ESISTENTE, PSV1, PSV3, TR1 (regolato basso). Alcuni pozzetti sono stati puliti manualmente per la presenza di fanghi sulle pareti del tubo che munivano gli slot.

XI) 22 aprile, configurazione: SV7, SV8, SV12, SV13 (70 mBar), SV14, SV15, ESISTENTE, PSV1, PSV3, TR1 (8 mBar). Nei giorni di pioggia alcuni pozzetti si sono nuovamente infangati, quindi è stata eseguita una nuova pulizia. Nel campo di depressione prodotto si sono misurati i seguenti valori passivi: nella TR2 4,79 mBar e in PSV5 0,7 mBar.

XII) Il 10/5 riprende l'aspirazione con configurazione: SV14, SV15, TR1, TR2 (45,7 mBar). I valori di depressione indotta passivamente sui pozzetti PSV1, ESISTENTE E SV12 sono risultati rispettivamente di 3,2 mBar, 6,55 mBar e 5,7 mBar. Dopo

qualche giorno si modifica la configurazione attivando nuovi pozzetti ottenendo tenori di clorurati sempre modesti.

XIII) Il 31/5 viene fermata la linea per la pulizia dei pozzetti ESISTENTE, SV12, PSV1. si effettua anche l'asciugatura di pozzetti e sedimenti; l'avvio dell'aspirazione avviene con configurazione: SV7, SV8, SV12, SV13, SV14, SV15, ESISTENTE, PSV1, PSV3. Il giorno 18 viene spenta l'impianto, successivamente sono state effettuate solo brevi aspirazioni di verifica.

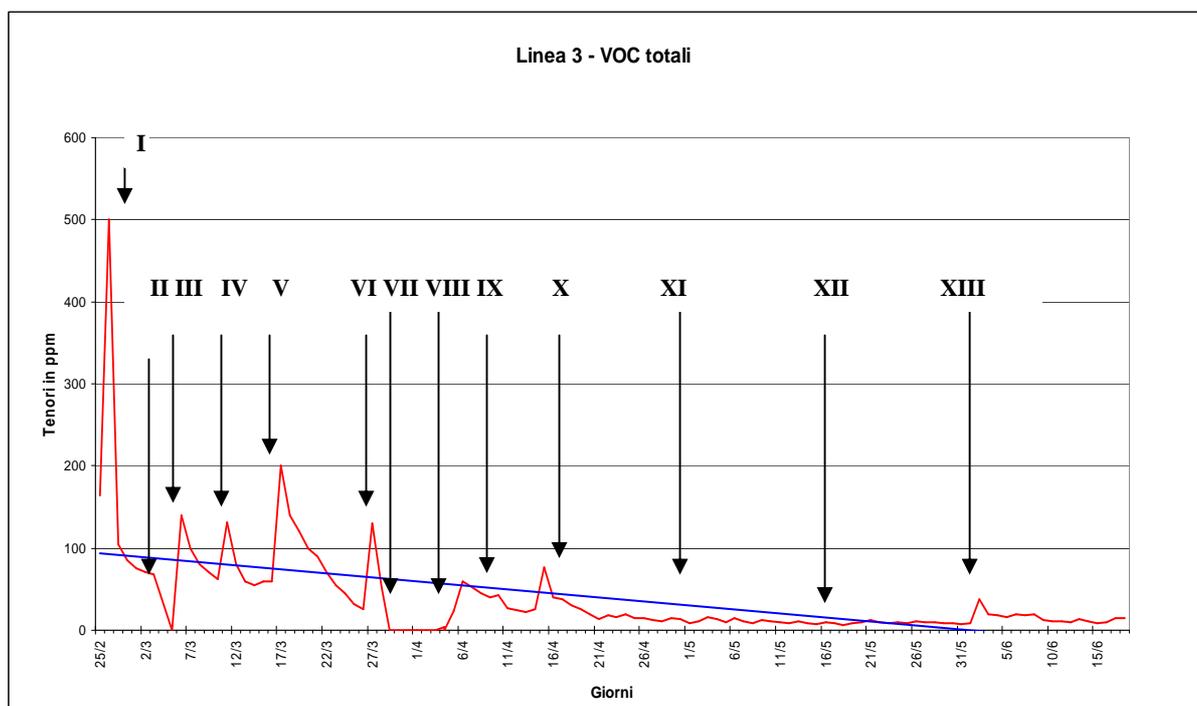


FIG. 3.25 - Diagramma di variazione nel tempo dei tenori rilevati all'ingresso dei filtri a carboni attivi della linea SVE 3. I numeri romani costituiscono richiami che hanno spiegazione nel testo. La linea blu rappresenta l'andamento tendenziale statistico.

## 3.7 CONCLUSIONI

### 3.7.1 Bonifica della falda (P&T)

Il sistema di disinquinamento della falda (Pump & Treat) non è stato in grado di assolvere agli obiettivi stabiliti dal progetto di bonifica nell'analisi di rischio; infatti, pur dimostrandosi efficace nel contenimento della contaminazione che non ha mai oltrepassato i confini dello stabilimento, è risultato altresì inadeguato allo scopo del risanamento, come peraltro supposto in fase progettuale: i motivi di questo insuccesso sono principalmente da imputare al forte adsorbimento del contaminante alla fase solida e alla scarsa solubilità dei contaminanti (alifatici clorurati). Infatti gli idrocarburi clorurati risultano per la maggior parte *idrofobi*, cioè non si sciolgono facilmente in acqua, ma diventano solubili solo se immersi in mezzi idrocarburo-simili come oli o tessuti adiposi (lipofilia). Per questo erano stati indicati, nel progetto dell'intervento, eventuali tecnologie alternative quali:

- *degradazione biologica in ambiente anaerobico,*
- *ferro zero valente (ZVI, Zero-Valent Iron),*
- *trattamento EHC,*
- *ossidazione chimica ISCO.*

Tra queste, dopo aver attentamente ponderato la scelta, è stata preferita l'ossidazione chimica in sito (ISCO); il progetto integrativo è stato sottoposto alla Conferenza dei Servizi e successivamente approvato dalle autorità competenti; successivamente, si è proceduto a svolgere i test di laboratorio in vasca, finalizzati alla scelta dell'agente chimico da iniettare nel sottosuolo per scatenare le reazioni desiderate al fine di ridurre la contaminazione. Determinata la sostanza (permanganato di potassio) e stimate le quantità, sono stati svolti i test in campo per verificare la reale efficacia del trattamento. Nello svolgimento delle prove è stato utilizzato il campo-prova del Soil Vapor Extraction;

questi però non hanno dato risultati positivi, perciò è stato necessario aumentare le portate di permanganato. Affinate le caratteristiche dell'intervento anche l'impianto di ISCO è stato avviato: la bonifica è attualmente in atto.

### **3.7.2 Bonifica dell'insaturo (SVE)**

Al contrario di quanto successo per il trattamento della falda, il sistema di risanamento dell'insaturo con estrazione sottovuoto di volatili (Soil Vapor Extraction SVE) ha consentito di raggiungere gli obiettivi di bonifica stabiliti dall'analisi di rischio sito specifica eseguita in fase progettuale.

Dai grafici riportati in figura 3.23, 3.24, 3.25 risulta evidente l'efficacia della tecnologia in questa specifica situazione operativa, in particolare per le linee 2 e 3.

La linea blu, che indica lo sviluppo tendenziale statistico, ha infatti un andamento chiaramente decrescente; in particolare i valori di concentrazioni, espressi in ppm, sono diminuiti fortemente da tenori prossimi a 500 fino a poche unità.

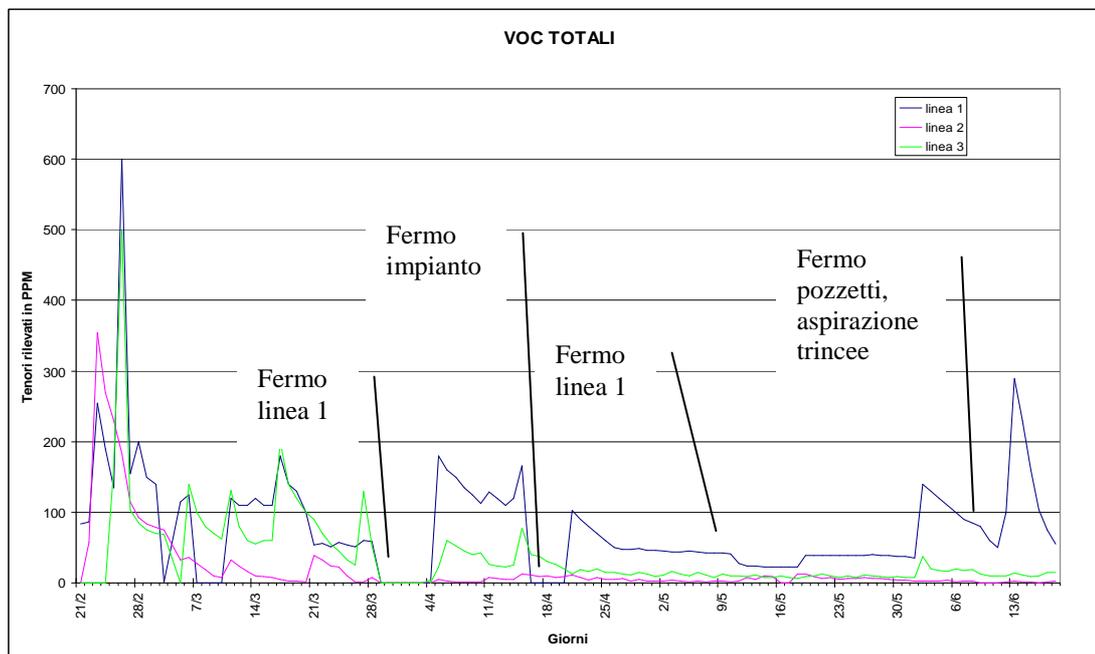
Nella figura 3.26 sono stati rappresentati contemporaneamente gli andamenti di tutte e tre le linee. Il confronto evidenzia lo stato di bonifica maggiormente avanzato delle linee 2 e 3; la linea 1 ha infatti subito di numerosi fermi sia per acqua risucchiata nei piping, sia per pulizia in seguito a muratura del pozzo; essendo una linea esterna, infatti, imbarca acqua ogni volta che piove, sollevando fango il quale ovviamente o riempie l'intero pozzetto (se non si interviene prontamente) o comunque si spalma sulle pareti "murando" i meati del filtro.

Così la portata utile si riduce, le quote profonde di sedimento aspirate vengono chiuse, in poche parole il camino è inutilizzabile; in totale circa 1/4 del tempo utile è andato in soste di manutenzione o di maltempo. Inoltre i valori di concentrazione iniziali dei clorurati erano decisamente superiori e la zona di terreno trattata

era più vasta tanto da stabilire, già in fase progettuale, tempi di bonifica maggiori.

Un'altra considerazione molto rilevante, che emerge soprattutto dal grafico della linea 1, è la rappresentazione dei valori caratterizzata da numerosi picchi e gole: questo è il risultato dell'applicazione della tecnologia la quale necessita, per ottenere i risultati prefissati, di funzionamento pulsato.

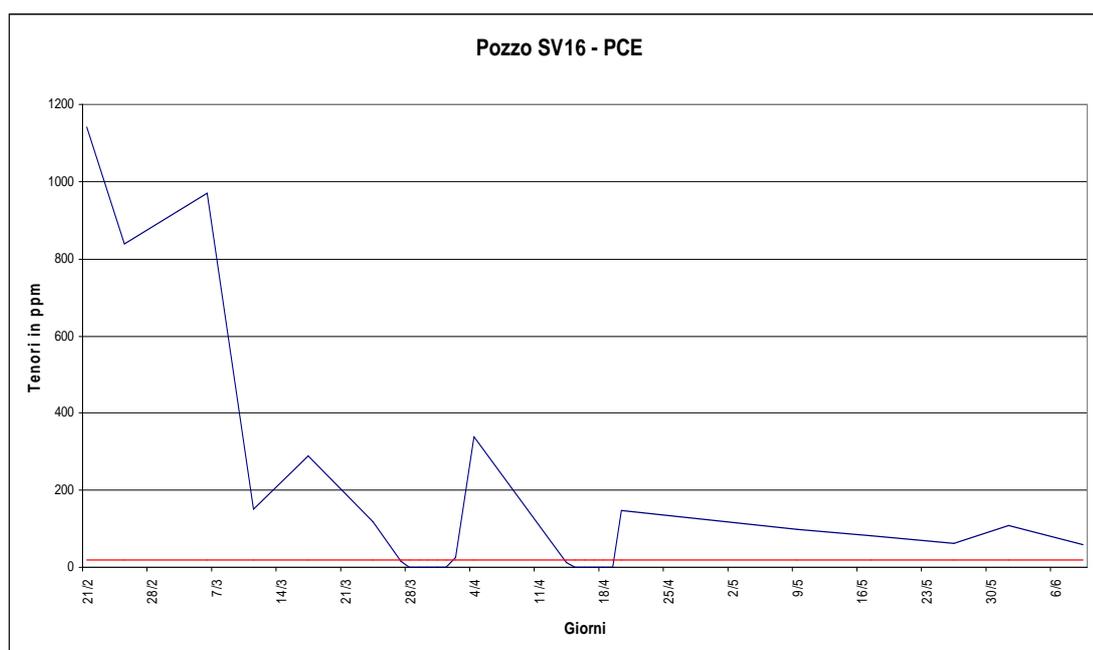
Infatti, come detto in precedenza, uno degli aspetti fondamentali di questo genere di contaminazione, è la presenza di rebound (picchi di concentrazione) dovuti all'adsorbimento degli inquinanti da parte della matrice solida del terreno, che vengono rilasciati sotto forma di vapori fino all'equilibrio. Mantenendo attivo l'impianto con modalità continua, una volta estratti i gas saturi di clorurati l'efficacia del trattamento precipita fortemente per i motivi precedentemente affrontati.



*FIG. 3.26 - Inviluppo delle curve di variazione dei tenori di VOC rilevati all'ingresso dei filtri nelle tre linee di SVE, nei primi 4 mesi di attività.*

Quest'andamento a “zig zag”, è facilmente riconoscibile anche nelle figure 3.27 (a,b,c) che riportano i valori di concentrazione registrati singolarmente nei pozzi SV (uno per ogni linea) i quali sono stati ritenuti i più rappresentativi; allo stesso modo è possibile notare come per i camini delle linee 2 e 3, già dopo quattro mesi si siano stabilmente raggiunti tenori inferiori alle CSR individuate con l'analisi di rischio (linea rossa).

Questo non accade nella linea 1 per i motivi già accennato, anche se l'evidente riduzione dei valori registrati conforta sulla riuscita dell'intervento; ricordo che i mesi necessari per la completa bonifica, stabiliti in fase di progetto, sono stati nove.



*Figura 3.27a – andamento delle concentrazioni di PCE nel pozzo SV16 della linea 1 (blu) e concentrazione di soglia determinata con l'analisi di rischio (rosso). I tenori, pur in forte diminuzione, sono ancora superiori ai limiti imposti per la bonifica.*

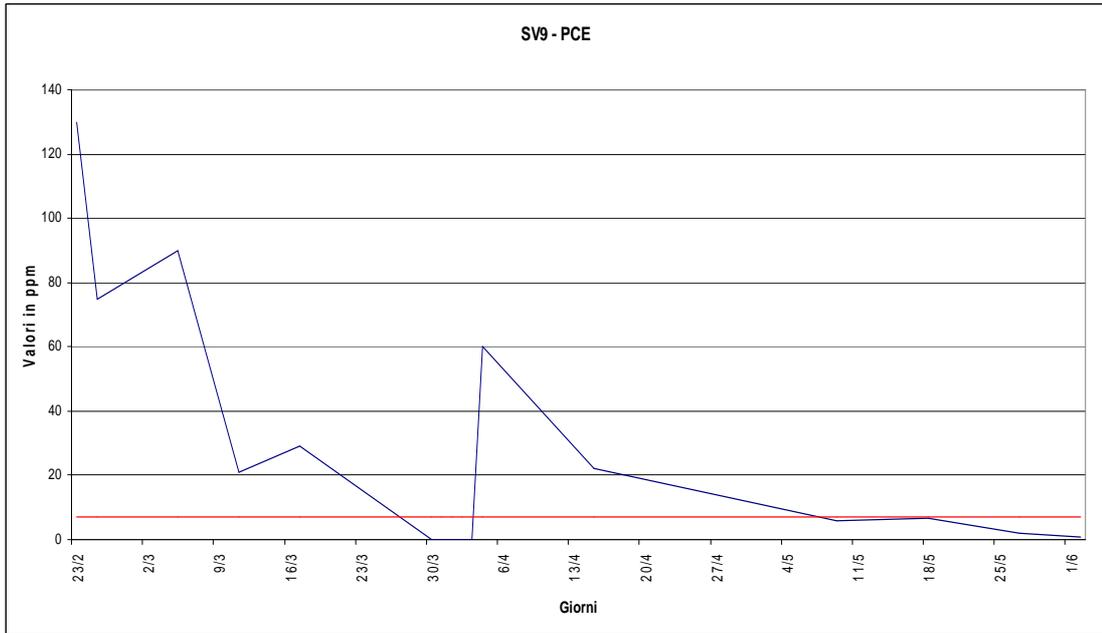


Figura 3.27b – andamento delle concentrazioni di PCE nel pozzo SV9 della linea 2 e concentrazione di soglia determinata con l'analisi di rischio (rosso).

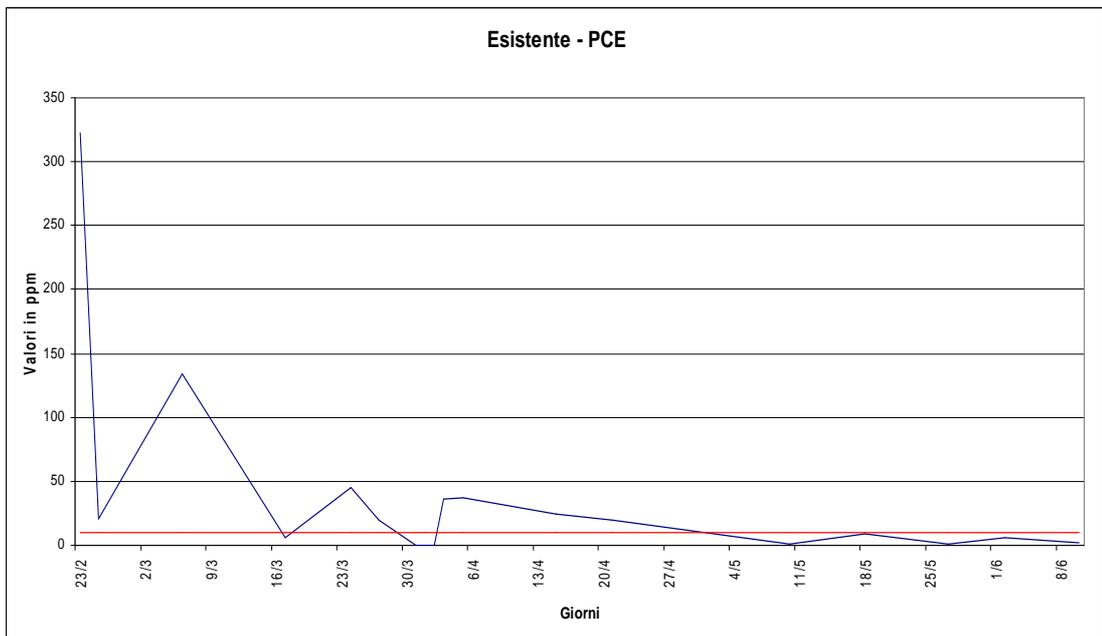


Figura 3.27c – andamento delle concentrazioni di PCE nel pozzo esistente della linea 3 (blu) e concentrazione di soglia determinata con l'analisi di rischio (rosso). Come mostrano le figure (b) e (c) i tenori di contaminante sono stabilmente sotto i limiti di bonifica.

Anche le analisi effettuate su sei campioni di terreno prelevati dall'interno del capannone sotto il reparto verniciatura, dal piazzale tra il capannone e il magazzino e dal secondo capannone, dimostrano la riduzione della contaminazione; i valori di PCE si avvicinano fortemente ai limiti stabiliti per la bonifica con la definitiva scomparsa dei clorurati sparsi.

L'estrazione delle carote è stata effettuata con campionatore a percussione Geoprobe. La figura 5.1 mostra i rapporti dell'analisi compiuta sui campioni raccolti da parte di Analamb, laboratorio che effettua analisi chimico industriali in campo ambientale.

Dopo un periodo di sosta dei trattamenti previsto nella strategia di bonifica e i controlli di verifica sullo stato delle operazioni, gli impianti di Soil Vapor Extraction sono stati riavviati. Nel frattempo Arcadis Set ha svolto i test (in laboratorio e di campo) necessari per l'implementazione dell'ISCO (In Situ Chemical Oxidation) che è attualmente in corso.

I termini del risanamento sono previsti per aprile 2010, naturalmente se le indagini del terreno e della falda daranno risultati positivi.



ANALISI CHIMICHE  
**Analamb**

Analamb srl - 41037 Mirandola MO - ITALY  
Via Statale Nord, 162 - Tel 0535 615311 - Fax 0535 615330  
U.O. di Poggio Rusco MN  
Via Mondadori, snc - Tel. 0386-733669 - Fax 0386-741301  
e-mail laboratorio@analamb.it

Rif. Rapp.Prova: 620.1-An09.xls

### Rapporto di prova n° 620.1 - An09

Committente: GEMA 96 - Via Altopiano, 54 - Sasso Marconi (BO)  
Provenienza: Cantiere Suprema - Funo di Argelato (BO)  
Tipologia campione: Terreno  
Campione prelevato da: Dott. Giovanni Viel  
Campione consegnato da: Dott. Giovanni Viel  
Riferimento campione: C1 (1,20-2,40m)

### ANALISI di CONTROLLO

#### Caratteristiche chimico fisiche:

Parametro	Un. mis.	Valore	Tab. A	Tab. B	Metodo analitico
Residuo a 105°C	%	87,4	--	--	IRSA-Quad.64-vol.2-n°2
Scheletro (frazione sopravaglio a 2mm)	%	inf. 1	--	--	DM 13/9/99 metodo II.1

#### Determinazione composti alifatici clorurati cancerogeni:

Parametro	Un. mis.	Valore	Tab. A	Tab. B	Metodo analitico
Clorometano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,1	5	EPA5035 + EPA8260C
Diclorometano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,1	5	EPA5035 + EPA8260C
Triclorometano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,1	5	EPA5035 + EPA8260C
Cloruro di vinile	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,005	0,01	0,1	EPA5035 + EPA8260C
1,2 Dicloroetano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,2	5	EPA5035 + EPA8260C
1,1 Dicloroetilene	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,1	1	EPA5035 + EPA8260C
Tricloroetilene	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	1	10	EPA5035 + EPA8260C
Tetracloroetilene	mg/Kg (s.s.)	0,89	0,5	20	EPA5035 + EPA8260C

#### Determinazione composti alifatici clorurati non cancerogeni:

Parametro	Un. mis.	Valore	Tab. A	Tab. B	Metodo analitico
1,1 Dicloroetano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,5	30	EPA5035 + EPA8260C
1,2 trans-Dicloroetilene	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,3	15	EPA5035 + EPA8260C
1,2 cis-Dicloroetilene	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02			EPA5035 + EPA8260C
1,2 Dicloropropano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,3	5	EPA5035 + EPA8260C
1,1,1 Tricloroetano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,5	15	EPA5035 + EPA8260C
1,1,2 Tricloroetano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,5	15	EPA5035 + EPA8260C
1,2,3 Tricloropropano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	1	10	EPA5035 + EPA8260C
1,1,1,2 Tetracloroetano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,5	10	EPA5035 + EPA8260C



ANALISI CHIMICHE  
**Analamb**

Analamb srl - 41037 Mirandola MO - ITALY  
Via Statale Nord, 162 - Tel 0535 615311 - Fax 0535 615330  
U.O. di Poggio Rusco MN  
Via Mondadori, snc - Tel. 0386-733669 - Fax 0386-741301  
e-mail [laboratorio@analamb.it](mailto:laboratorio@analamb.it)

Rif. Rapp.Prova: 620.1-An09.xls

**Determinazione composti alifatici alogenati cancerogeni:**

Parametro	Un. mis.	Valore	Tab. A	Tab. B	Metodo analitico
Tribromometano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,5	10	EPA5035 + EPA8260C
1,2 Dibromoetano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,005	0,01	0,1	EPA5035 + EPA8260C
Dibromoclorometano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,5	10	EPA5035 + EPA8260C
Bromodichlorometano	mg/Kg (s.s.)	inf. 0,02	0,5	10	EPA5035 + EPA8260C

I risultati analitici sopra riportati si riferiscono esclusivamente al campione consegnato al laboratorio

Legenda:	inf.	Inferiore (inferiore al limite di rilevabilità della metodica adottata)
	s.s.	Valore riferito alla sostanza secca
	Un. mis.	Unità di misura della grandezza determinata
	Tab.A, Tab.B	Concentrazione limite per le aree residenziali e industriali, rispettivamente (All.to 5 alla parte IV del D.Lgs 152/06)
	IRSA	Metodo Quaderni IRSA-CNR
	EPA	Environmental Protection Agency statunitense

Poggio Rusco (MN), 23 giugno 2009

l'Analista



Il responsabile del laboratorio

Figura 3.28 – rapporti delle analisi di un campione di terreno prelevato, svolte da Analamb.

## BIBLIOGRAFIA

Berbenni P., Saponaro S., *Comportamento degli inquinanti nel terreno*; in *Bonifica Dei Siti Inquinati* a cura di Luca Bonomo, ed. Mc Graw-Hill Companies, S.r.l., Milano, 2005

Beretta G.P. *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*; *Quaderni di tecniche di protezione ambientale*, CNR GNDICI, ed. Pitagora, Bologna, 1992;

Carmine M., Antoniotti A., et Al *Intervento di bonifica del terreno mediante soil venting e di messa in sicurezza della falda*; in *Protezione e recupero delle acque sotterranee* a cura di Beretta G.P. e Francani V., *I quaderni delle acque sotterranee "2"*, 1994, geo – graph s.n.c, Segrate;

Dyksen J.E., Hess III A.F. *Alternatives for controlling organics in groundwater supplies*; in Lubello et Al. (o.c.)

Lozza A. *Impianti di strippaggio per il trattamento di acque sotterranee contaminate da solventi organici clorurati*; in *Metodologie per il disinquinamento delle acque sotterranee* a cura di Beretta G.P. e Francani V., GeoFluid, 1992, TecnoPrint, Bologna;

Lubello C., Masotti L., Preti F., Spannocchi G. *Depurazione delle acque e bonifica idraulica delle falde*; in *Guida al disinquinamento degli acquiferi*, CNR GNDICI, ed. Pitagora, Bologna, 1994;

Romele L., Butelli P. *Analisi dei terreni*; in *Bonifica Dei Siti Inquinati* a cura di Luca Bonomo, ed. Mc Graw-Hill Companies, S.r.l., Milano, 2005;

San Nicolò L. *Sistemi di risanamento del sottosuolo inquinato con sostanze organiche volatili*; in *Guida al disinquinamento degli acquiferi* a cura di V. Francani, CNR GNDICI, ed. Pitagora, Bologna, 1994;