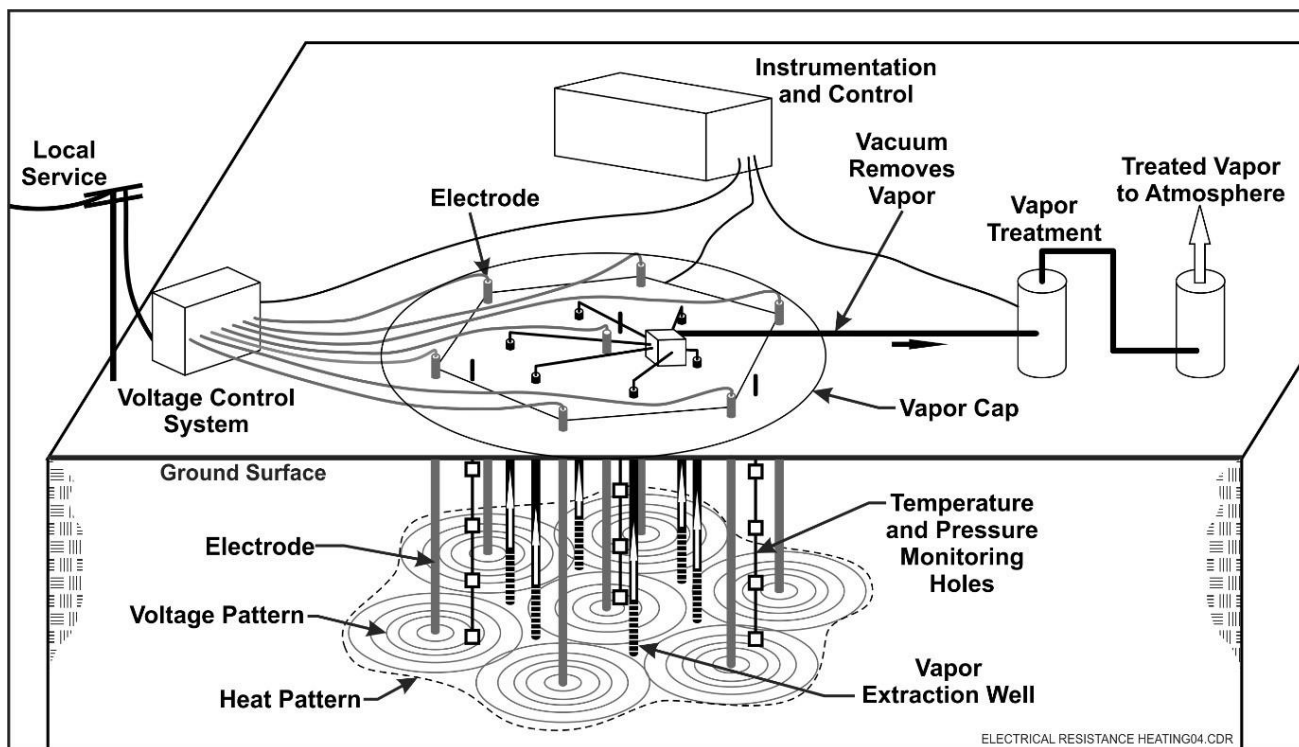


Trattamento termico in situ

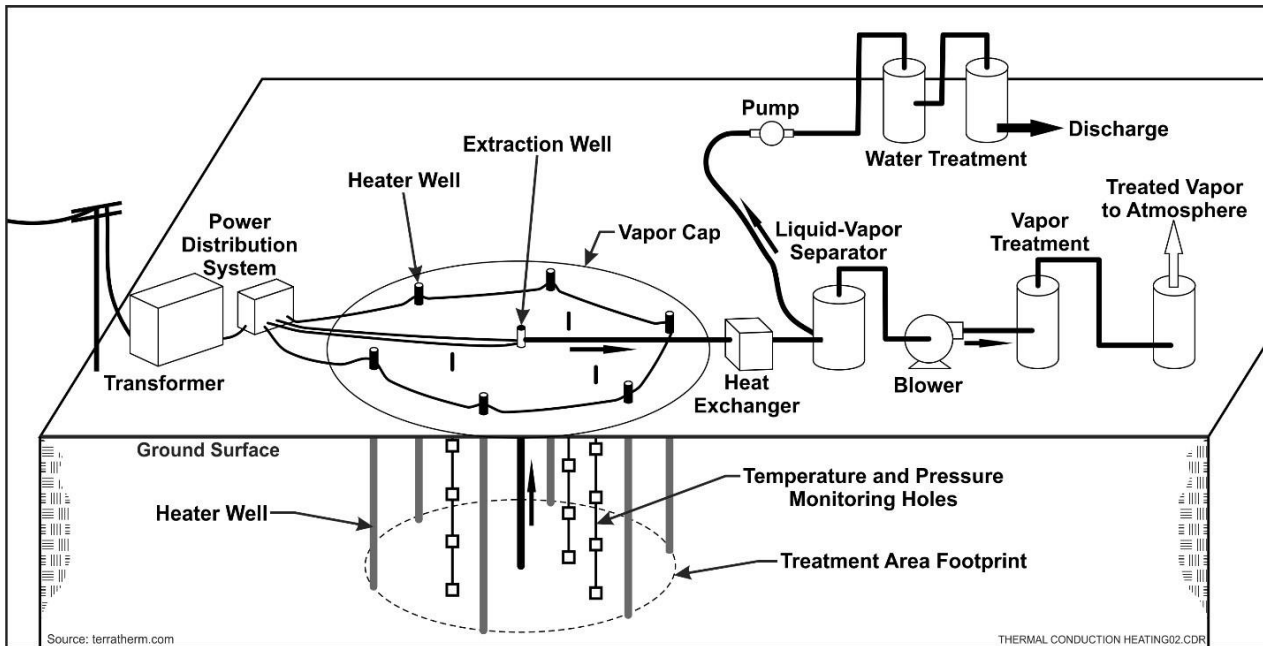
In questa pagina:

- [Schema](#)
- [Introduzione](#)
- [Altri nomi tecnologici](#)
- [Descrizione](#)
- [Stato di sviluppo](#)
- [Applicabilità](#)
- [Costo](#)
- [Durata](#)
- [Considerazioni di implementabilità](#)
- [Risorse](#)

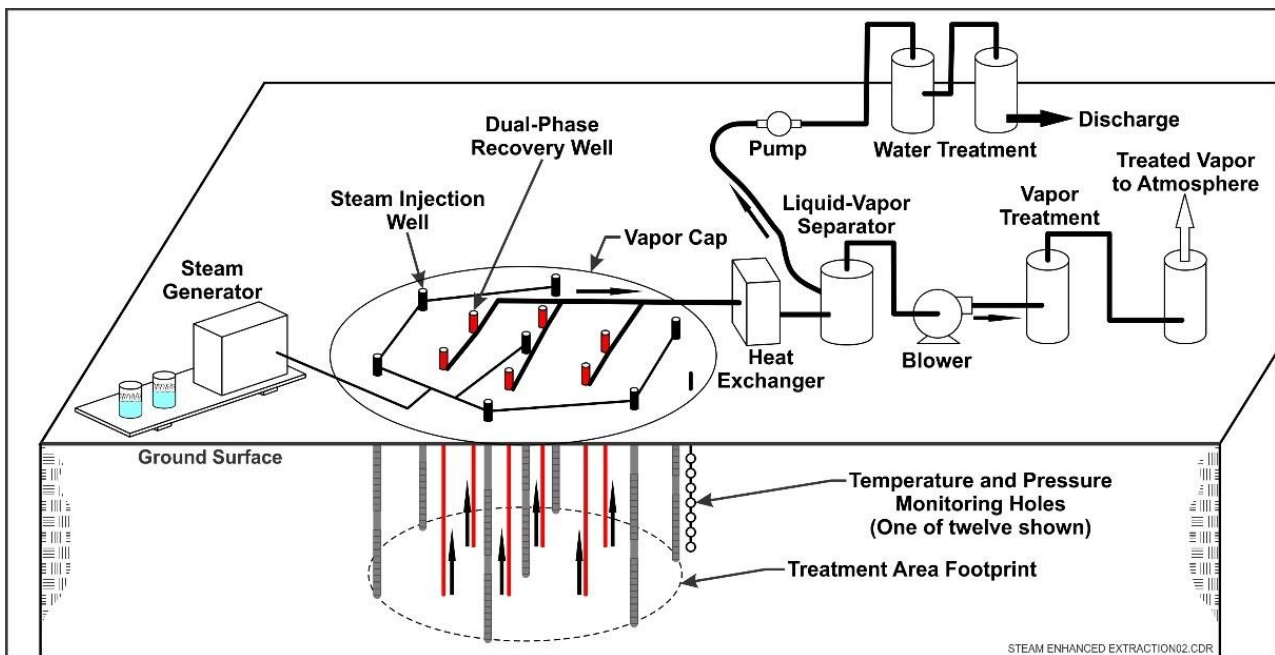
Schema



Schema del sistema di riscaldamento a resistenza elettrica



Sorgente schematica
del sistema di riscaldamento a conduzione termica: TerraTherm.com



Sistema di riscaldamento a vapore in situ

Introduzione

Il trattamento termico in situ è un termine generale per tre diverse tecnologie utilizzate oggi – riscaldamento a resistenza elettrica (ERH), riscaldamento a conduzione termica (TCH) e estrazione per amplificazione a vapore (SEE). Queste tecnologie possono realizzare lo soffiaggio, la volatilizzazione e l'ebollizione di composti organici volatili (COV) e composti organici semi-volatili (SVOC) provenienti da suoli in situ e acque sotterranee. Il trattamento termico in situ è integrato dalla raccolta di vapori all'interno del trattamento sottosuolo e sopra il suolo delle fasi gassose e liquide separate recuperate. Per SEE e alcune implementazioni di ERH, è inclusa l'estrazione multifase.

Altri nomi tecnologici

Riscaldamento a resistività elettrica in situ (ISTD) ®
Iniezione di vapore in situ Riscaldamento® trifase

Descrizione

Le tecnologie di trattamento termico in situ variano in base al metodo utilizzato per fornire calore al sottosuolo e l'intervallo di temperatura raggiungibile (e quindi i contaminanti che possono essere trattati). Tuttavia, l'obiettivo generale di tutti i metodi è aumentare la pressione di vapore, la solubilità e i tassi di diffusione diminuendo la viscosità dei contaminanti liquidi, rilasciandoli dal mezzo ambientale e portando tali contaminanti a un punto di raccolta per il trattamento sopra il suolo. Il trattamento termico in situ è talvolta progettato come parte di un ciclo di trattamento di rimediazione, con la tecnologia termica utilizzata per trattare liquidi in fase non acquosa (NAPL) e le concentrazioni disciolte più elevate, mentre altre tecnologie (come pompa e trattamento, bioremediazione in situ o ossidazione chimica in situ con persolfato) vengono utilizzate come processo di follow-up per il pennacchio di fase disciolta per raggiungere infine gli obiettivi di pulizia. In tali casi, il calore residuo della bonifica termica in situ può essere utilizzato per migliorare le prestazioni della biodegradazione.

- **Riscaldamento a Resistenza Elettrica (ERH):** Il riscaldamento a resistenza elettrica riscalda direttamente la massa di terreno contaminata utilizzando la sua resistenza alla corrente elettrica. La tecnologia viene implementata posizionando elettrodi nel terreno e applicando una tensione sufficiente per produrre una corrente elettrica che scorre attraverso l'acqua negli spazi porosi. La resistenza al flusso di elettroni del suolo rilascia l'energia sotto forma di calore. La tensione necessaria per riscaldare il sottosuolo dipenderà dalla conducibilità dell'umidità del suolo e delle acque sotterranee nella zona contaminata. Il riscaldamento vaporizza l'acqua dal sottosuolo, a volte richiedendo l'aggiunta di una fornitura continua di acqua a gocce attorno a ciascun elettrodo per mantenere un'adeguata conducibilità elettrica. La temperatura massima che si può raggiungere con il riscaldamento resistivo è il punto di ebollizione dell'acqua, che è efficace nel trattamento dei COV. Durante il riscaldamento a resistenza elettrica, la superficie del terreno è coperta da una barriera isolante al vapore. A partire dal 2010, l'ERH era la tecnologia di bonifica termica in situ più comunemente implementata, superando di tre volte tutte le altre tecnologie di trattamento termico (ESTCP, 2010).
- **Riscaldamento a conduzione termica (TCH):** Il sistema di pozzi termici consiste in una disposizione di elementi riscaldanti elettrici o a gas posizionati in pozzi verticali distanziati tra circa 7 e 15 piedi e immersi nell'acquifero contaminato. Gli elementi riscaldanti funzionano fino a 1.000°C per riscaldare il terreno circostante. Il trasferimento di calore dai pozzi al suolo avviene tramite semplice conduzione e advezione (tramite acqua sotterranea o vapore in movimento). I pozzi sono talvolta installati con una griglia esterna perforata e le loro uscite superiori possono essere collegate a un collettore comune. In altri casi, i pozzi di estrazione sono separati dai pozzi di riscaldamento. Un vuoto applicato al collettore rimuove aria e contaminanti per il trattamento in superficie. La superficie del terreno è coperta da una barriera al vapore isolante.

- **Estrazione Potenziata a Vapore (SEE):** SEE utilizza vapore iniettato per migliorare e controllare la mobilità dei contaminanti. Il vapore iniettato crea un gradiente di pressione e il calore riduce la viscosità e la densità dei contaminanti organici. Il flusso del vapore iniettato sposta e mobilita i NAPL verso i pozzi di estrazione. Quando il vapore viene inizialmente iniettato nel sottosuolo, il calore viene trasferito alle acque acquifere e alla matrice acquifera nel sito di iniezione. Con l'iniezione continua di vapore, l'acqua calda inizia a muoversi attraverso l'acquifero, spingendo acqua di formazione più fredda e contaminanti davanti al fronte dell'acqua calda. Con l'iniezione continua di vapore, il vapore stesso entra nella formazione. Vapore, acqua e qualsiasi NAPL vengono raccolti in pozzi di estrazione multifase. Il vapore è considerato efficace per idrocarburi liquidi con punti di ebollizione fino a 175°C ed è stato efficace per ridurre le concentrazioni di composti, o miscele di composti (come il creosoto), con punti di ebollizione fino a 450°C. In questo caso, il recupero avviene riducendo la viscosità del NAPL e spostandolo verso pozzi di estrazione multifase.

Stato di sviluppo e disponibilità

La seguente lista di controllo fornisce un riassunto dello stato di sviluppo e implementazione del trattamento termico in situ:

- Su scala laboratorio/banco e mostra potenziale
- Negli studi pilota
- A scala reale
- Per bonificare un intero sito (fonte nella zona vadosa)
- Per rimediare solo a una fonte
- Come parte di un treno tecnologico
- Come rimedio finale in più siti
- Raggiungere con successo gli obiettivi di pulizia in più siti

Il trattamento termico in situ è disponibile tramite i seguenti fornitori:

- Disponibile commercialmente a livello nazionale
- Disponibile commercialmente tramite fornitori limitati grazie a licenze o attrezzature specializzate
- Organizzazioni di ricerca e accademia

Applicabilità

Valutazione di applicabilità della classe di contaminanti per il trattamento termico in situ - Codici di classificazione: ● Efficacia dimostrata, ○ Efficacia limitata, ◯ Nessuna efficacia dimostrata, ◇ Livello di efficacia dipendente dal contaminante specifico e dalla sua applicazione/progettazione, I/D Dati insufficienti								
VOC non alogenato	COV alogenata	SVOC non alogenato	SVOC alogenato	carburanti	inorganici	radionuclidi	munizioni	Contaminanti emergenti
●	●	●	●	●	○	○	○	I/D

Le tecnologie di bonifica termica in situ sono particolarmente applicabili ai siti dove sono necessari tempi di bonifica brevi. Queste tecnologie hanno anche il vantaggio di trattare contemporaneamente molti contaminanti chimici ed essere meno sensibili rispetto ad altre tecnologie alle eterogeneità del sottosuolo. Le tecnologie termiche in situ sono state utilizzate in una vasta gamma di siti, con una grande varietà di condizioni idrogeologiche. Queste tecnologie possono essere utilizzate sopra e sotto la falda acquifera, su un'ampia gamma di conducibilità idraulica e possono essere applicate sotto e direttamente adiacenti agli edifici occupati. Le tecnologie di bonifica ERH e TCH non sono adatte a acquiferi con velocità di flusso di acqua sotterranea relativamente elevate (superiori a circa 1 piede al giorno) a causa dell'effetto raffreddamento. Possono essere necessari controlli sulle acque sotterranee come pareti di lamiera o pozzi di estrazione a monte. Il SEE è applicabile a portate di acqua sotterranea più elevate. I siti con abbondanti detriti conduttivi nel sottosuolo non sono inoltre adatti all'ERH.

Il riscaldamento in situ è utilizzato principalmente per trattare alte concentrazioni disciolte di COV alogenati e non alogenati, combustibili a gamma a benzina e liquidi leggeri/densi in fase non acquosa (LNAPL/DNAPL) (USACE, 2014; ESTCP, 2010). I COV e gli SVOC vengono vaporizzati aumentando la pressione di vapore. I composti che hanno un punto di ebollizione superiore all'acqua (come il tetracloroetene [PCE]) possono comunque essere efficacemente rimossi utilizzando tecnologie termiche in situ perché la temperatura di co-ebollizione di un NAPL di COV in presenza di acqua sotterranea è inferiore alla temperatura del punto di ebollizione del composto puro. Il vapore acqueo e gli organici generati dal riscaldamento vengono raccolti da pozzi di estrazione a vuoto multifase e separati e trattati in superficie. Il riscaldamento in situ ad alta temperatura con TCH è utilizzato principalmente per trattare SVOC alogenati e

non alogenati, bifenili policlorati (PCB), carburanti diesel e a olio e DNAPL (USACE, 2014; ESTCP, 2010).

La fattibilità e la costi-efficacia del riscaldamento in situ dipendono dall'idrogeologia del sito e da altre condizioni del sito. Pertanto, è importante condurre una valutazione approfondita del sito per determinare l'esito atteso del riscaldamento e chiarire le proprietà geologiche (tipo di suolo, ecc.), le proprietà idrologiche (flusso delle acque sotterranee, grado di saturazione, ecc.), l'entità della contaminazione (natura e estensione della colonna, l'estensione della zona sorgente e la posizione di NAPL noti o sospetti) e le proprietà dei contaminanti target (generalmente disponibili per contaminanti comuni).

Costo

La bonifica termica in situ è una tecnologia di trattamento molto aggressiva e il costo per implementarla è tipicamente elevato rispetto ad altre tecnologie meno aggressive. Le tecnologie termiche in situ vengono tipicamente selezionate quando è necessario ridurre al minimo il tempo di trattamento o quando le concentrazioni sono molto elevate (soprattutto quando è presente NAPL). In molti casi, la bonifica termica in situ può essere l'unica tecnologia in grado di raggiungere gli obiettivi di bonifica. Il fattore di costo più critico è il volume di trattamento. Come per tutte le tecnologie in situ, i costi di applicazione variano a seconda del sito e dei contaminanti. I principali fattori di costo includono attrezzature, utenze e numero/distanza di elettrodi e pozzi di recupero del vapore.

La quantità di massa contaminante contenuta nella zona di trattamento termico in situ ha anche un certo impatto sulla costo-efficacia. Più alte sono le concentrazioni di contaminanti, più le tecnologie termiche in situ diventano economicamente convenienti (in termini di dollari per libbra di contaminante recuperato). Alcuni dei costi di mobilitazione/smobilizzazione e personale sono indipendenti dalla dimensione del progetto. Inoltre, queste tecnologie sono spesso associate a fornitori specializzati e i costi fissi sono spesso incorporati nel costo di gestione e manutenzione come costo di leasing delle apparecchiature. I principali fattori di costo includono:

Costi iniziali

- Estensione areale della contaminazione e profondità di contaminazione, che influisce sulla profondità e la distanza tra il pozzo e gli elettrodi
- Presenza di strutture e servizi metallici sopra e sottoterra
- È necessario abbandonare i pozzi di monitoraggio in PVC nell'area di trattamento e installare acciaio inossidabile o altri metalli resistenti alla temperatura
- Densità delle sonde di monitoraggio della temperatura, come le termocoppie installate in varie località e profondità multiple.
- Disponibilità di sufficiente capacità elettrica nel sito o necessità di aggiornamento
- Disponibilità d'acqua per ERH e SEE
- Disponibilità e costo del combustibile per la caldaia SEE

Costi operativi e di manutenzione

- Requisiti tecnologici di trattamento per liquidi e vapori estratti
- Tariffe delle utenze (elettricità e talvolta acqua)
- Tassi di smaltimento per rifiuti liquidi e vapori trattati

L'elenco sopra evidenzia le dipendenze di costo specifiche della combustione in situ e non considera le dipendenze generali alla maggior parte delle tecnologie di bonifica in situ. Clicca [qui](#) per una discussione generale sul costo che include definizioni e costi ripetitivi per le tecnologie di bonifica. Una stima dei costi specifica per progetto può essere ottenuta utilizzando un'applicazione integrata di stima dei costi come RACER® o consultando un esperto della materia.

Durata

La bonifica del suolo tramite riscaldamento in situ può generalmente essere effettuata in sei-nove mesi; tuttavia, possono essere necessarie durate di trattamento più lunghe nei siti di grandi dimensioni. In molti casi porzioni del sito raggiungono gli obiettivi di trattamento prima di altre e il trattamento di queste aree viene interrotto, con l'operazione che prosegue per un periodo prolungato nelle aree resistenti. La durata del trattamento dipende da sito e dipende dalle seguenti condizioni:

- Obiettivi di pulizia.
- Velocità di applicazione energetica (input di energia)
- Volume di mezzi in situ che necessitano di trattamento, sia estensione areale che intervallo di profondità
- Concentrazioni e distribuzione dei contaminanti
- Caratteristiche idrogeologiche tra cui portata e variazione delle acque sotterranee nel sito, profondità rispetto alle acque sotterranee, permeabilità della formazione (materiali a bassa permeabilità possono richiedere più tempo per essere rimossi) e anisotropia
- Caratteristiche fisiche dei contaminanti, inclusa la pressione di vapore e la costante della legge di Henry
- Contenuto di umidità del suolo

Considerazioni di implementabilità

Di seguito sono riportate considerazioni chiave associate all'implementazione del trattamento termico in situ:

Tutte le tecnologie descritte

- Solo un numero limitato di fornitori offre queste tecnologie
- Il vapore può uscire dai pozzi di monitoraggio e il riscaldamento sotterraneo può danneggiare le utenze sepolte sia a causa del calore che delle correnti elettriche. Tutti gli artefatti sotterranei (elettrodi, pozzi, ecc.) dovrebbero essere progettati e costruiti correttamente in modo che non avvenga la ventilazione.
- Le utility possono fornire un percorso di flusso preferenziale per i contaminanti mobilitati che migrano fuori dall'area di trattamento, anche all'interno degli

edifici. Il riscaldamento non dovrebbe essere effettuato vicino alle utenze sepolte.

ERH

- Le aree contaminate e poco profonde possono causare perdite di calore proibitivamente elevate nell'atmosfera
- Per l'ERH soltanto, è necessario essere presente umidità nel sottosuolo per permettere il flusso di corrente tra gli elettrodi, si può aggiungere acqua a bassi flussi per consentire il trattamento in suoli insaturi.
- L'eterogeneità del sottosuolo può interferire con il trattamento uniforme dei mezzi in situ, specialmente quando il flusso di acqua sotterranea (e gli effetti di raffreddamento associati) è sostanzialmente più elevato in una o più porzioni della zona di trattamento.
- Terreni ad alta permeabilità e idraulicamente conduttivi possono essere più difficili da riscaldare. Potrebbero essere necessari controlli aggiuntivi.
- L'essiccazione del suolo modifica le proprietà del suolo e può causare cedimenti nel terreno nelle aree con argille e torba spesse, e deve essere considerata durante la progettazione quando questa tecnologia viene utilizzata sotto gli edifici o quando sono pianificati edifici in futuro.
- Le prestazioni nell'estrazione di contaminanti meno volatili variano a seconda della temperatura massima raggiunta - l'ERH generalmente non è applicabile agli SVOC e agli idrocarburi di estremità più pesante.
- Un elevato calore di vaporizzazione per l'acqua aumenta significativamente i costi e l'impronta energetica, specialmente quando viene trattata la zona satura.

TCH

- Le aree poco profonde contaminate possono causare perdite di calore nell'atmosfera proibitivamente elevate. Solo un numero limitato di fornitori offre queste tecnologie
- L'eterogeneità del sottosuolo può interferire con il trattamento uniforme dei mezzi in situ, specialmente quando il flusso di acqua sotterranea (e gli effetti di raffreddamento associati) è sostanzialmente più elevato in una o più porzioni della zona di trattamento. (si noti però che il calore si propaga in base alla conducibilità termica che, per i materiali geologici, varia di 3 a 5 fattori, mentre altre tecnologie dipendenti dal flusso del fluido affrontano le conduttività dei fluidi che variano su 5-10 ordini di grandezza, quindi l'effetto di eterogeneità è molto più limitato per la TCH).
- L'essiccazione del suolo altera le proprietà del suolo e può causare cedimenti in aree di argilla spessa e torba, e deve essere presa in considerazione durante la progettazione quando questa tecnologia viene utilizzata sotto gli edifici o dove sono previsti edifici in futuro.
- Le prestazioni nell'estrazione di contaminanti meno volatili variano a seconda della temperatura massima raggiunta. La TCH può raggiungere temperature fino a ~350°C quando applicata sopra la falda acquifera, trattando così gli SVOC.
- Terreni ad alta permeabilità e idraulicamente conduttivi possono essere più difficili da riscaldare. Potrebbero essere necessari controlli aggiuntivi.

VEDI

- Le aree contaminate poco profonde possono causare perdite di calore proibitivamente elevate nell'atmosfera e una pressione di sovraccarico insufficiente per consentire pressioni di iniezione adeguatamente elevate.
- Non è efficace per materiali a bassa permeabilità (conducibilità idraulica inferiore a 10⁻⁴ cm/sec), anche se queste zone saranno riscaldate per conduzione.
- È difficile prevedere con precisione il percorso di migrazione del vapore in materiali eterogenei, il che può portare a un trattamento in alcune zone meno efficacemente rispetto ad altre. Le zone a bassa permeabilità che non accettano direttamente il vapore e che hanno uno spessore inferiore a 10 piedi possono essere riscaldate per conduzione del vapore che scorre su entrambi i lati della zona. Le zone più spesse a bassa permeabilità possono essere riscaldate combinando ERH o TCH con iniezione di vapore.
- Non è limitato dall'elevato flusso delle acque sotterranee come ERH o TCH.

Risorse

Corpo degli Ingegneri dell'Esercito (USACE). Progettazione: bonifica termica in situ. (2014)

Questo documento fornisce indicazioni sullo screening e la selezione delle tecnologie di trattamento termico in situ, tra cui: estrazione potenziata con vapore, riscaldamento a resistività elettrica e riscaldamento termicamente conduttivo. Il documento esamina la corretta applicazione delle tecnologie e individua importanti questioni di progettazione, operatività e monitoraggio.

EPA. Documento di tema: Come il calore può migliorare la bonifica in situ del suolo e delle falde acquiferiche. (1997)

Questo documento informativo contiene informazioni approfondite sulle proprietà di alcuni contaminanti organici comuni che influenzano il loro movimento e il recupero dal sottosuolo, oltre a informazioni su come queste proprietà siano influenzate dalla temperatura.

EPA. Iniezione di vapore per la bonifica del suolo e dell'acquifero. Problema di acqua sotterranea. EPA 540-S-97-505 (1998)

Questo documento di esame fornisce informazioni tecniche di base sull'uso dell'iniezione di vapore per la bonifica di suoli e acquiferi contaminati da composti organici volatili o semi-volatili.

EPA. Trattamento termico in situ di solventi clorurati: fondamenti e applicazioni sul campo. (2004)

Questo rapporto fornisce una panoramica dei principi e della scienza alla base della tecnologia di trattamento termico in situ; la sua applicabilità e considerazioni ingegneristiche generali; e applicazioni della tecnologia attraverso esempi site-specific e casi di studio. Le tecnologie specifiche includono l'estrazione potenziata con vapore, il riscaldamento elettrico resistivo e il riscaldamento termoconduttivo.

EPA. CLU-IN Technology News and Trends EPA 542-N-12-005, Numero 61 (2012)

Questo numero di *Technology News and Trends* mette in evidenza tecnologie IST come il riscaldamento a resistenza elettrica, l'estrazione potenziata a vapore e il

riscaldamento a conduzione termica. Fornisce un elenco di 18 siti Superfund dove l'IST è stato proposto, progettato o implementato e contiene tre articoli di riassunto sui siti in cui le tecnologie IST sono state utilizzate con successo, inclusi informazioni sui costi.

EPA. Guida del cittadino al trattamento termico in situ (2012)

Questa scheda informativa di 2 pagine offre una panoramica dei processi di trattamento termico, della sicurezza e di come questa tecnologia di bonifica possa influenzare il pubblico generale. Viene fornito un breve esempio di progetto.

EPA. Articolo di ingegneria: Tecnologie di trattamento termico in situ: lezioni apprese. (2014)

Lo scopo di questo articolo è trasmettere informazioni utili ottenute in circa 10 anni di sviluppo e implementazione di tecnologie di trattamento termico in situ (ISTT).

EPA. [Trattamento termico CLU-IN: Profilo tecnologico in situ](#)

Una pagina web contenente una panoramica delle tecnologie di trattamento termico in situ, inclusi orientamenti, applicazioni, formazione e risorse aggiuntive.

EPA. [Database dei profili dei siti di trattamento termico in situ CLU-IN](#)

Questo documento di tema fornisce informazioni tecniche di base sull'uso dell'iniezione di vapore per la bonifica di suoli e acquiferi contaminati da composti organici volatili o semi-volatili.

ESTCP. Valutazione critica delle tecnologie di trattamento termico in situ all'avanguardia per il trattamento a zone di sorgente DNAPL. Progetto ER-200314 (2009)

Il progetto fornisce una valutazione delle prestazioni delle tecnologie di bonifica termica per le indagini di bonifica delle zone sorgenti DNAPL.

Kingston, J.L.T., P.R. Dahlen e P.C. Johnson. 2010. Revisione dello stato delle pratiche delle tecnologie termiche in situ. *Monitoraggio e bonifica delle acque sotterranee* 30, n. 4/Autunno: 64-72.

Questo documento di tema fornisce informazioni tecniche di base sull'uso dell'iniezione di vapore per la bonifica di suoli e acquiferi contaminati da composti organici volatili o semi-volatili.