

> Risanamento in situ

Un modulo dell'aiuto all'esecuzione «Risanamento di siti contaminati»



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Ufficio federale dell'ambiente UFAM

> Risanamento in situ

Un modulo dell'aiuto all'esecuzione «Risanamento di siti contaminati»

2^a edizione aggiornata, dicembre 2016; 1^a edizione 2008

Valenza giuridica

La presente pubblicazione è un modulo dell'aiuto all'esecuzione «Risanamento di siti contaminati» elaborato dall'UFAM in veste di autorità di vigilanza. Destinata in primo luogo alle autorità esecutive, essa concretizza concetti giuridici indeterminati contenuti in leggi e ordinanze, nell'intento di promuovere un'applicazione uniforme della legislazione. Le autorità esecutive che vi si attengono possono legittimamente ritenere che le loro decisioni sono conformi al diritto federale. Sono tuttavia ammesse anche soluzioni alternative, purché siano conformi al diritto in vigore. Gli aiuti all'esecuzione dell'UFAM (definiti finora anche come direttive, istruzioni, raccomandazioni, manuali, aiuti pratici ecc.) sono pubblicati nella serie «Pratica ambientale».

Nota editoriale

Editore

Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

L'UFAM è un ufficio del Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC).

Autori

Harald Burmeier, Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH,
D-Gehrden
Christian Poggendorf, Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH,
D-Gehrden
Eberhard Beitinger, D-Ladenburg

Accompagnamento UFAM

Reto Tietz, divisione Suolo e biotecnologia
Sibylle Dillon, divisione giuridica
Christiane Wermeille, divisione Suolo e biotecnologia

Indicazione bibliografica

UFAM (ed.) 2016: Risanamento in situ. Un modulo dell'aiuto all'esecuzione «Risanamento di siti contaminati». 2ª edizione attualizzata, dicembre 2016; 1ª edizione 2008. Ufficio federale dell'ambiente, Berna. Pratica ambientale n° 0834: 70 pagg.

Grafica e impaginazione

Karin Nöthiger, 5443 Niederrohrdorf

Foto di copertina

Risanamento in situ della discarica Pont Rouge, Cimo Compagnie industrielle de Monthey SA

Link per scaricare il PDF

www.bafu.admin.ch/uv-0834-i

La versione cartacea non può essere ordinata.

La presente pubblicazione è disponibile anche in tedesco e francese.

> Indice

| | | | |
|---|-----------|---|----|
| Abstracts | 5 | | |
| Prefazione | 7 | | |
| <hr/> | | | |
| 1 Introduzione | 8 | | |
| 1.1 Obiettivi del modulo di aiuto all'esecuzione | 8 | | |
| 1.2 Gruppi target | 8 | | |
| 1.3 Struttura del modulo di aiuto all'esecuzione | 9 | | |
| <hr/> | | | |
| 2 Basi giuridiche | 10 | | |
| 2.1 Obiettivo e urgenza del risanamento | 10 | | |
| 2.2 Misure di risanamento | 10 | | |
| 2.3 Studio delle varianti | 11 | | |
| 2.4 Definizione delle misure di risanamento idonee | 12 | | |
| <hr/> | | | |
| 3 Aspetti generali relativi ai procedimenti di risanamento in situ | 13 | | |
| 3.1 Delimitazione rispetto ad altri procedimenti di risanamento | 13 | | |
| 3.2 Meccanismi d'azione del risanamento in situ | 14 | | |
| 3.3 Selezione di una tecnica di risanamento idonea | 15 | | |
| 3.4 Panoramica dei procedimenti di risanamento | 17 | | |
| 3.5 Cambiamenti di procedimento | 20 | | |
| 3.6 Durata del risanamento | 21 | | |
| 3.7 Costi | 21 | | |
| 3.7.1 Fattori determinanti per i costi | 21 | | |
| 3.7.2 Strutture dei costi | 22 | | |
| 3.7.3 Assegnazione di procedimenti di risanamento | 22 | | |
| <hr/> | | | |
| 4 Descrizione dei procedimenti di risanamento in situ | 24 | | |
| 4.1 Sistematica dei procedimenti | 24 | | |
| 4.2 Procedimenti idraulici | 25 | | |
| 4.2.1 Prelevamento di fasi | 26 | | |
| 4.2.2 Procedimenti idraulici | 28 | | |
| 4.2.3 Risanamento passivo delle acque sotterranee | 32 | | |
| 4.3 Procedimenti pneumatici | 35 | | |
| 4.3.1 Aspirazione dell'aria interstiziale | 36 | | |
| 4.3.2 Slurping | 37 | | |
| 4.3.3 Strippaggio in situ | 37 | | |
| 4.4 Procedimenti di mobilizzazione | 38 | | |
| | | 4.4.1 Mobilizzazione fisica | 39 |
| | | 4.4.2 Mobilizzazione chimica | 43 |
| | 4.5 | Procedimenti biologici | 45 |
| | 4.5.1 | Aspetti generali e funzionamento | 45 |
| | 4.5.2 | Procedimenti di ossidazione | 46 |
| | 4.5.3 | Procedimenti di riduzione | 50 |
| | 4.5.4 | Enhanced Natural Attenuation (ENA) | 50 |
| | 4.5.5 | Altri procedimenti biologici | 51 |
| | 4.6 | Procedimenti chimici | 51 |
| | 4.6.1 | Ossidazione chimica in situ (ISCO) | 52 |
| | 4.6.2 | Riduzione in situ | 53 |
| | 4.7 | Procedimenti d'immobilizzazione | 53 |
| | 4.7.1 | Immobilizzazione in situ | 54 |
| | 4.7.2 | Vetrificazione in situ | 54 |
| | 4.8 | Procedimenti di trattamento | 55 |
| | 4.8.1 | Trattamento dell'acqua | 55 |
| | 4.8.2 | Trattamento dell'aria | 56 |
| | 4.8.3 | Flussi di massa e smaltimento dei rifiuti risultanti dal trattamento di acqua e aria di scarico | 57 |
| <hr/> | | | |
| 5 Controllo dei risultati, sorveglianza e verifica | 59 | | |
| 5.1 Controlli durante il risanamento | 59 | | |
| 5.2 Controllo dei risultati | 59 | | |
| 5.3 Verifica | 60 | | |
| 5.3.1 Aspetti generali | 60 | | |
| 5.3.2 Sorveglianza delle vie di contaminazione | 61 | | |
| <hr/> | | | |
| Bibliografia | 62 | | |
| Glossario | 64 | | |
| Elenchi | 68 | | |
| <hr/> | | | |
| Allegato | 70 | | |

> Abstracts

The Environmental Protection Act stipulates that contaminated sites should be remediated if they result in harmful or disagreeable consequences or if there is a real risk that such consequences could arise. When contaminated sites are remediated, there are many decontamination and securing measures to choose from. Among them are a number of in situ remedial procedures which allow pollutants to be removed or immobilised locally, without the need to excavate the whole of the affected subsoil. This enforcement aid assists in the evaluation of such in situ measures in the context of the options review.

Gemäss Umweltschutzgesetz müssen belastete Standorte saniert werden, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen oder die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen. Zur Sanierung der Altlasten stehen vielfältige Dekontaminations- und Sicherungsmassnahmen zur Auswahl. Darunter befinden sich auch eine Vielzahl von In-situ-Sanierungsverfahren, welche es erlauben, gleich vor Ort die Schadstoffe zu entfernen oder zu immobilisieren, ohne dass der gesamte belastete Untergrund ausgehoben werden muss. Die vorliegende Vollzugshilfe stellt eine Hilfestellung dar, zur Evaluation von In-situ-Sanierungsmassnahmen im Rahmen der Variantenstudie.

Conformément à la loi sur la protection de l'environnement, les sites pollués doivent être assainis s'ils engendrent des atteintes nuisibles ou incommodantes ou s'il existe un danger concret que de telles atteintes apparaissent. Il existe de multiples mesures de décontamination et de confinement pour assainir les sites contaminés. Parmi celles-ci, on compte de nombreux procédés d'assainissement in situ, qui permettent d'éliminer ou d'immobiliser les polluants sur place sans devoir excaver l'entier du sous-sol pollué. La présente aide à l'exécution facilite l'évaluation des mesures d'assainissement in situ dans le cadre de l'étude de variantes.

Secondo la legge sulla protezione dell'ambiente i siti inquinati devono essere risanati se sono all'origine di effetti nocivi o molesti oppure se esiste il pericolo concreto che tali effetti si producano. Per risanare i siti contaminati esistono diverse misure di decontaminazione e di messa in sicurezza, fra le quali figura anche un certo numero di procedure di risanamento *in situ* che consentono di eliminare o immobilizzare in loco gli inquinanti, senza che sia necessario rimuovere il sottosuolo. Il presente testo costituisce un aiuto per valutare le misure di risanamento *in situ* nel quadro dello studio delle varianti.

Keywords:

In situ measures,
Polluted sites,
Evaluation of options

Stichwörter:

In-situ-Sanierungen,
Altlasten,
Evaluation von Varianten

Mots-clés:

Assainissements in situ,
Sites contaminés,
Evaluation des variantes

Parole chiave:

Risanamenti in situ,
Siti contaminati,
Valutazione delle varianti

> Prefazione

Dall'entrata in vigore, nel 1998, dell'ordinanza sui siti contaminati in Svizzera sono stati risanati circa 1000 siti contaminati. Contrariamente alle attese di allora, una valutazione delle procedure di risanamento applicate mostra come i siti contaminati siano stati risanati quasi esclusivamente con misure di scavo, ovvero rimuovendo e smaltendo il sottosuolo inquinato.

Questa prassi si è tradotta nello smaltimento, nel nostro Paese, di circa un milione di tonnellate l'anno di materiale inquinato proveniente da siti inquinati e contaminati. Poiché questo materiale è di origine minerale e spesso non può nemmeno essere completamente decontaminato, finisce in gran parte per essere conferito in discarica. L'onere necessario e l'impatto ambientale sono notevoli e si pone inevitabilmente la domanda se il sottosuolo inquinato debba effettivamente sempre essere rimosso dal sito.

A seconda della situazione, le misure di decontaminazione mediante scavo e smaltimento esterno del sottosuolo inquinato non sono la variante di risanamento più conveniente sotto il profilo economico e nemmeno la più rispettosa dell'ambiente, nonostante offrano indubbiamente alcuni vantaggi. Con il presente aiuto all'esecuzione l'UFAM intende fare il necessario, affinché le misure *in situ* validate all'estero vengano meglio conosciute anche in Svizzera e siano in futuro prese in considerazione in modo coerente nel quadro della valutazione delle varianti di risanamento, soprattutto nell'ambito dei risanamenti finanziati con il contributo della Confederazione.

Franziska Schwarz
Vicedirettrice
Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

1 > Introduzione

Esistono molti procedimenti proposti per il risanamento dei siti contaminati. Oltre ai procedimenti «off-site» noti e di frequente impiego, esistono numerosi procedimenti di risanamento detti «in situ», in cui la decontaminazione o la circoscrizione avviene direttamente nel sottosuolo.

L'esperienza maturata nel risanamento in situ di inquinamenti del sottosuolo e delle acque sotterranee ci insegna che alcuni di questi procedimenti, pur essendo conformi allo stato della tecnica, spesso sono inefficaci poiché non si tiene sufficientemente conto delle condizioni specifiche e dei limiti di applicazione.

In linea di principio, ma in particolare nei casi sussidiati dalla Confederazione, le misure di risanamento devono essere conformi alle esigenze ecologiche e corrispondere a criteri di economicità e allo stato della tecnica.

1.1 Obiettivi del modulo di aiuto all'esecuzione

Il presente modulo di aiuto all'esecuzione si propone di fornire un aiuto per la decisione sulla scelta dei procedimenti di risanamento in situ e per la valutazione dei progetti di risanamento sotto il profilo dell'idoneità dei metodi adottati.

Per raggiungere questo obiettivo, viene indicato lo stato della tecnica e i limiti e le possibilità dei diversi procedimenti. Non si tratta tanto d'illustrare in modo esaustivo i dettagli tecnici, quanto di esplicitare i criteri che consentono di scegliere i procedimenti e la relativa ottimizzazione.

1.2 Gruppi target

Il modulo di aiuto all'esecuzione si rivolge:

- > agli ingegneri e specialisti di siti contaminati chiamati a valutare varianti di risanamento;
- > alle autorità esecutive che devono esaminare l'idoneità e la possibilità di autorizzare i sistemi di risanamento tecnici; e
- > ai proprietari dei siti quali committenti della pianificazione e della realizzazione di un risanamento.

1.3 **Struttura del modulo di aiuto all'esecuzione**

Il modulo di aiuto all'esecuzione «Risanamento in situ» è strutturato in due parti:

- > **testo:** in questa parte sono indicate le modalità secondo cui, a partire dalle proprietà delle sostanze e dalla presenza di inquinanti nel sottosuolo, possono essere elaborate misure per il risanamento in situ e i criteri da seguire nel corso della decontaminazione. Al riguardo, l'obiettivo fondamentale è rendere verificabile la scelta dei sistemi;
- > **allegati A-1 e A-2:** presentano descrizioni dettagliate, informazioni tecniche, indicazioni per l'utilizzazione e la valutazione conclusiva da un lato delle tecniche proprie del risanamento in situ (allegato A-1) e, dall'altro, dei procedimenti per il trattamento dell'acqua e dell'aria di scarico (allegato A-2) che spesso sono adottati successivamente al risanamento in situ vero e proprio. Il contenuto di questi allegati integra le descrizioni e le valutazioni contenute nel testo.

2 > Basi giuridiche

Conformemente all'articolo 32c capoverso 1 della legge sulla protezione dell'ambiente (LPAmb; RS 814.01) occorre risanare siti inquinati se questi sono all'origine di effetti nocivi o molesti oppure se esiste il pericolo concreto che tali effetti si producano.

2.1 Obiettivo e urgenza del risanamento

L'obiettivo di un risanamento è definito in termini generali nell'articolo 15 dell'ordinanza sui siti contaminati (OSiti; RS 814.680):

«Eliminazione degli effetti, o del pericolo concreto che tali effetti si producano, che hanno portato alla necessità del risanamento.»

Concretamente, ciò significa che gli effetti o il pericolo concreto devono essere eliminati a lungo termine e in modo sostenibile: in linea di principio il trattamento non deve essere addossato alle generazioni future. Ciò implica che, al più tardi dopo una o due generazioni, di norma il sito può essere trasmesso alla posterità senza che debbano essere adottate ulteriori misure.

Conformemente all'articolo 15 capoversi 2 e 3 OSiti occorre derogare all'obiettivo di risanamento se le condizioni seguenti sono soddisfatte a titolo cumulativo:

- > il carico per l'ambiente risulta complessivamente inferiore;
- > i costi risulterebbero altrimenti sproporzionati;
- > ai fini della protezione delle acque sotterranee: è assicurata l'utilizzabilità delle acque sotterranee che si trovano nel settore di protezione delle acque A_u oppure se le acque superficiali, che si trovano in collegamento con acque sotterranee al di fuori del settore di protezione delle acque A_u , soddisfano le esigenze della legislazione sulla protezione delle acque in materia di qualità delle acque;
- > ai fini della protezione delle acque superficiali: dette acque soddisfano le esigenze della legislazione della protezione delle acque in materia di qualità dell'acqua.

I risanamenti sono particolarmente urgenti se un'attuale utilizzazione è pregiudicata oppure direttamente minacciata (art. 15 cpv. 4 OSiti).

2.2 Misure di risanamento

Secondo l'articolo 16 OSiti l'obiettivo di risanamento va raggiunto mediante i provvedimenti seguenti:

- > **decontaminazione:** eliminando le sostanze pericolose per l'ambiente;
- > **circostrizione:** impedendo e sorvegliando a lungo termine la diffusione delle sostanze pericolose per l'ambiente.

2.3 Studio delle varianti

Normalmente i siti contaminati presentano caratteristiche molto diverse dovute alla gamma di inquinanti specifici e alle differenti condizioni locali del sottosuolo e del bene da proteggere. Per questa ragione, nell'ambito di un progetto di risanamento conforme all'articolo 17 OSiti, occorre di regola effettuare uno studio delle varianti che permetta di scegliere le misure di risanamento idonee.

Conformemente all'aiuto all'esecuzione «Valutazione delle varianti di risanamento», lo studio delle varianti deve consentire di confrontare e valutare le diverse varianti di risanamento in linea di principio realizzabili presso un sito contaminato. La valutazione di varianti di risanamento deve essere specifica al sito in questione, poiché per ogni sito può esistere una variante ottimale a seconda delle condizioni specifiche. Al fine di optare per una variante di risanamento possibilmente rispettosa dell'ambiente, conforme allo stato della tecnica e a criteri di economicità, nel quadro dello studio delle varianti occorre prendere in considerazione tutti i procedimenti possibili, vale a dire decontaminazioni (off-site, on-site e in situ), circostrizioni e la cosiddetta Monitored Natural Attenuation» (MNA, attenuazione naturale monitorata).

I procedimenti di risanamento in situ sono consolidati da decenni e oggi sono considerati validi per la loro economicità e la loro sostenibilità ambientale. Nel quadro della valutazione di varianti, pertanto, occorre sempre considerare anche i procedimenti in situ, che spesso, soprattutto in caso di siti densamente edificati e di focolai d'inquinamento profondi, sono l'unica opzione possibile. L'applicabilità generale nonché i vantaggi e gli svantaggi fondamentali dei diversi procedimenti in situ sono esposti nel presente modulo di aiuto all'esecuzione.

Se confrontati con un risanamento mediante escavazione degli inquinanti, di norma i risanamenti in situ presentano vantaggi ecologici in quanto risparmiano le risorse delle discariche, consumano una quantità complessivamente minore di energia e generano meno emissioni di aria, rumore, polvere e odori. A ciò si aggiunge il fatto che, per quanto concerne il criterio della «valutazione dell'ecocompatibilità e dell'utilità ecologica», non hanno un'incidenza soltanto le emissioni generate dal risanamento del sito in questione bensì, nel caso di operazioni di scavo, anche quelle generate dal trasporto e dallo smaltimento dei rifiuti.

Le misure di risanamento in situ spesso mostrano la loro efficacia solo a lungo termine, ma hanno, in generale, costi inferiori a quelli previsti per le misure di risanamento con lavori di scavo. Affinché le prospettive di successo, la durata del risanamento e i costi possano essere stimati in modo accettabile, le misure in situ presuppongono una buona conoscenza delle condizioni geologiche, idrogeologiche e geochimiche del sito nonché una previsione affidabile dei processi provocati nel sottosuolo.

In caso di conoscenze lacunose da parte delle persone soggette all'obbligo di risanamento, dell'ufficio dei rifiuti e dei siti inquinati o delle autorità, si raccomanda di avvalersi di specialisti.

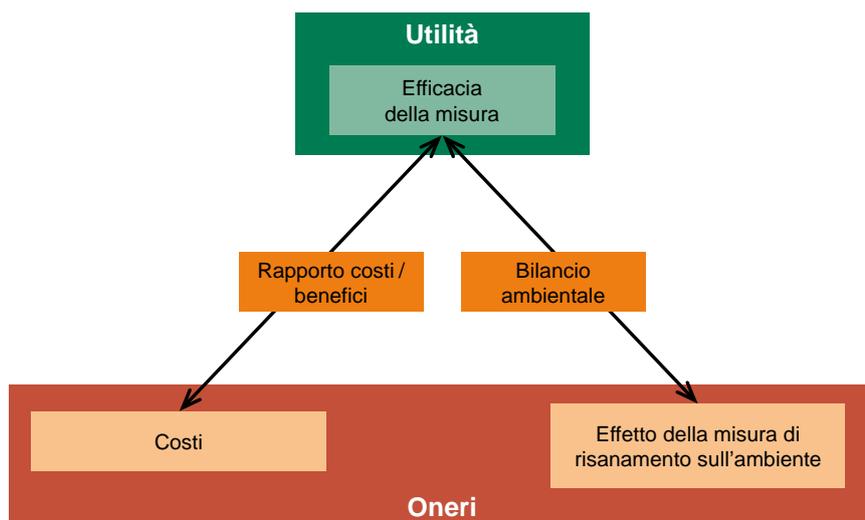
2.4 Definizione delle misure di risanamento idonee

Conformemente all'articolo 18 OSiti, l'autorità deve esaminare in particolare i seguenti elementi rilevanti in fase di decisione delle misure di risanamento necessarie o degli obiettivi di risanamento definitivi (art. 15 OSiti):

- > l'impatto ambientale delle misure (art. 18 cpv. 1 lett. a);
- > l'efficacia della misura dal punto di vista della riduzione della minaccia per l'ambiente (art. 18 cpv. 1 lett. c);
- > l'efficacia a lungo termine della misura (art. 18 cpv. 1 lett. b);
- > la controllabilità della misura (art. 18 cpv. 1 lett. d), e
- > i costi (art. 18 cpv. 1 lett. e).

Per poter definire le misure indispensabili e per l'eventuale modifica dell'obiettivo di risanamento, l'autorità deve dunque prima di tutto mettere a confronto l'efficacia della misura per l'eliminazione della necessità di risanamento, ossia comparare la sua utilità ambientale, da un lato con i costi e dall'altro con gli effetti della misura sull'ambiente (cfr. fig. 1).

Fig. 1 > Rapporto tra oneri e utilità delle misure di risanamento



Se, nel quadro dello studio di varianti, si prendono in considerazione procedimenti di risanamento che si prevede abbiano un impatto ambientale notevole, si raccomanda per poter esprimere un giudizio secondo l'articolo 18 lettera capoverso 1 lettera a OSiti di allestire un ecobilancio comparativo.

3 > Aspetti generali relativi ai procedimenti di risanamento in situ

3.1 Delimitazione rispetto ad altri procedimenti di risanamento

La circoscrizione avviene mediante immobilizzazione degli inquinanti «in situ», mentre la decontaminazione può essere effettuata «in situ», «on-site» oppure «off-site».

I procedimenti di decontaminazione sono generalmente distinti come segue:

- > il sottosuolo rimane nella sua ubicazione originaria e gli inquinanti vengono eliminati senza ricorrere a spostamenti di materiale (procedimento «in situ»), o
- > gli inquinanti vengono prelevati scavando il sottosuolo contaminato e la decontaminazione avviene o sul sito (procedimento «on-site») o all'esterno del sito (procedimento «off-site»).

Mentre i procedimenti on-site e off-site consistono nello scavare il sottosuolo contaminato, ossia nel toglierlo e caricarlo, nel trasportarlo e trattarlo o smaltirlo come un rifiuto, i procedimenti in situ puntano a lasciare il sottosuolo nella sua ubicazione originaria e a eliminare, distruggere o immobilizzare soltanto gli inquinanti presenti nel sottosuolo e nelle acque sotterranee.

La scelta del procedimento da impiegare (risanamento in situ o on-site/off-site) non dipende soltanto dal tipo di inquinanti, bensì piuttosto dalla struttura del sottosuolo o dall'ubicazione della contaminazione nel terreno. Spesso sono considerazioni di carattere economico che portano a una decisione in merito. Sebbene ogni caso debba essere valutato singolarmente, la scelta del procedimento di risanamento (in situ o on-site/off-site) è fatta essenzialmente in base ai seguenti criteri:

Tab. 1 > Criteri di scelta per il risanamento in situ

| | Fattori favorevoli a un risanamento | |
|---------------------------------|---|--|
| | in situ | on-site/off-site |
| Struttura del suolo | Sottosuolo non coeso | Sottosuolo coeso |
| Ubicazione della contaminazione | Nella profondità del sottosuolo | Vicino alla superficie |
| | Zona satura | Zona insatura |
| Tipo di contaminazione | Inquinanti volatili, idrosolubili, facilmente mobilizzabili, biodegradabili, chimicamente decomponibili | Inquinanti non volatili, scarsamente idrosolubili, scarsamente mobilizzabili, scarsamente o non biodegradabili, persistenti |
| | Idrocarburi clorurati volatili (VCHC), idrocarburi monociclici aromatici (BTEX), idrocarburi derivati dal petrolio (ICP), fenolo, ammonio, metalli pesanti idrosolubili e cianuri | Idrocarburi policiclici aromatici (IPA), cianuri, pesticidi, policlorobifenili (PCB), dibenzodiossine policlorurate (PCDD) e dibenzofurani policlorurati (PCDF), metalli pesanti |
| Destinazione attuale | Area utilizzata ed edificata | Area non utilizzata |
| Orizzonte temporale | Durata del risanamento non rilevante | Necessità di risanamento a breve termine |
| Utilizzazione successiva | Poco sensibile | Sensibile |

Osservazione: ogni caso deve essere valutato singolarmente. Il presente modulo di aiuto all'esecuzione presenta unicamente le tecniche di risanamento in situ.

3.2 Meccanismi d'azione del risanamento in situ

L'obiettivo consiste nell'attuare un procedimento o una tecnica che permetta di raggiungere gli inquinanti così come sono presenti nel sottosuolo e di mettere in atto la decontaminazione mediante meccanismi d'azione idonei senza dover spostare il sottosuolo stesso.

Il risanamento in situ è stabilito tenendo conto:

- > delle proprietà fisiche, chimiche o biologiche degli inquinanti e
- > dell'ubicazione degli inquinanti nel sottosuolo.

I procedimenti del risanamento in situ si basano fondamentalmente sui meccanismi d'azione seguenti (per le eccezioni cfr. «Procedimenti d'immobilizzazione»; cap. 4.7):

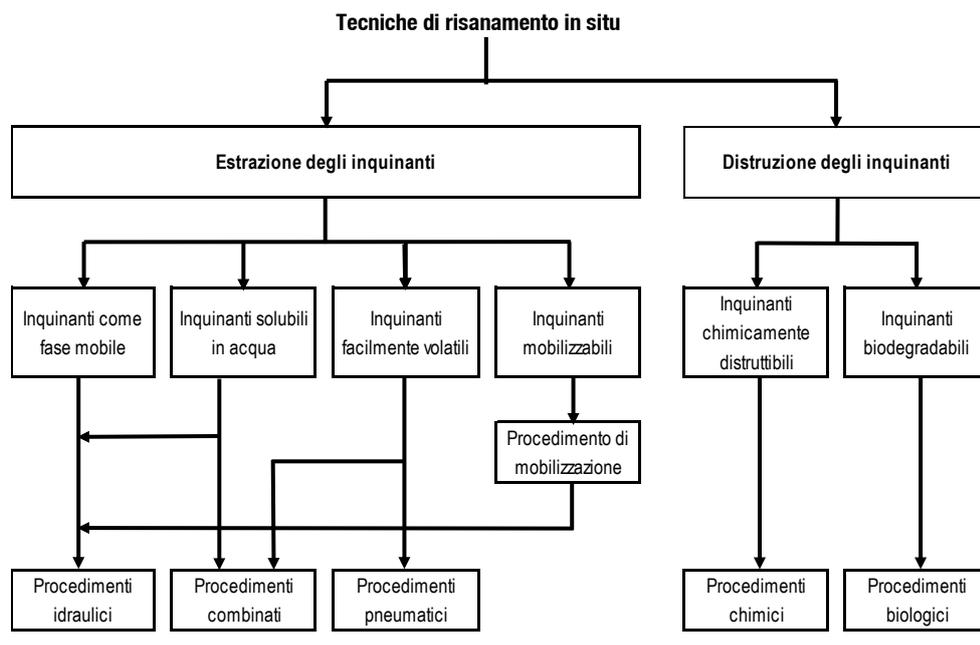
- > la fluidità delle fasi mobili degli inquinanti organici;
- > la solubilità degli inquinanti presenti nell'acqua e in altri vettori liquidi;
- > la solubilità (volatilità) degli inquinanti presenti nell'aria;
- > la capacità di mobilizzazione mediante procedimenti chimici o fisici;
- > la biodegradabilità degli inquinanti;
- > la decomponibilità chimica.

La maggior parte dei procedimenti di risanamento in situ utilizzati nonché la depurazione talvolta necessaria dei flussi di acqua o di aria di scarico contaminata si fonda su passaggi di sostanze tra diversi vettori e, al riguardo, utilizza la solubilità o la volatilità degli inquinanti.

3.3 Selezione di una tecnica di risanamento idonea

In base alle proprietà degli inquinanti, le tecniche di risanamento in situ più idonee sono le seguenti:

Fig. 2 > Classificazione delle tecniche di risanamento in base alle proprietà degli inquinanti



Di seguito sono fornite indicazioni preliminari per la selezione delle tecniche di risanamento idonee. Lo scopo è quello di presentare in modo comprensibile, sotto forma di alberi decisionali, i criteri fondamentali per la determinazione dei procedimenti da attuare. Tutte le scelte illustrate portano a tecniche di risanamento in situ. Oltre a queste ultime sono ovviamente disponibili anche tecniche che prevedono lavori di scavo.

Per un impiego mirato delle tecniche di risanamento in situ è essenziale conoscere:

- > la natura degli inquinanti;
- > la fonte della contaminazione nel sottosuolo;
- > la forma attuale degli inquinanti presenti nel sottosuolo;
- > le proprietà fisico-chimiche degli inquinanti.

In linea di massima, il punto di partenza per determinare l'applicabilità delle tecniche di risanamento è costituito dalle proprietà chimico-fisiche nonché dai meccanismi di biodegradazione degli inquinanti presenti nel sottosuolo, così come sono utilizzati anche per la rappresentazione delle tecniche di risanamento. Si tratta in particolare delle proprietà seguenti:

- > la presenza di fasi mobili;
- > la solubilità in acqua;
- > la volatilità;
- > la capacità di mobilizzazione chimica o fisica;
- > la biodegradabilità;
- > la decomponibilità chimica (trasformazione mediante reazione).

Il comportamento dei gruppi di inquinanti riscontrati frequentemente nel risanamento dei siti contaminati si caratterizza come segue:

Tab. 2 > Proprietà degli inquinanti tipici dei siti contaminati

| Comportamento inquinanti | Presenza quale fase mobile | Solubilità in acqua | Volatilità | Capacità di mobilizzazione | Biodegradabilità | Decomponibilità chimica |
|---|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| ICP • a catena corta • a catena lunga | sì (LNAPL) sì ⁵ (LNAPL) | buona limitata/scarsa | buona limitata/scarsa | buona ^{1, 2, 4} limitata/scarsa ^{1, 2, 4} | ottima limitata/scarsa | ottima limitata/scarsa |
| BTEX | sì (LNAPL) | ottima | buona | buona ^{1, 4} | ottima | ottima |
| VCHC | sì (DNAPL) | buona | buona | buo-na ^{1, 4} | buona/ limitata | ottima |
| IPA • da 2 a 4 anelli • >4 anelli | sì ⁶ sì ⁶ | limitata ⁷ scarsa | scarsa no | buona ^{1, 2} limitata ^{1, 2} | limitata no | ottima limitata |
| Metalli pesanti | no | limitata ⁸ | no | buona ³ | no ⁹ | no |

¹ in solventi organici

² in tensioattivi

³ in acidi

⁴ a livello termico

⁵ mobilità limitata per le molecole a catena lunga

⁶ di norma come fasi miste con ICP («fase d'olio di catrame»)

⁷ solo naftalina

⁸ dipendente dal valore del pH

⁹ ma bioaccumulazione

Nella selezione della tecnica di risanamento appropriata intervengono poi altri fattori, come ad esempio le caratteristiche del sito (comprese quelle geologiche e idrogeologiche), i costi, la durata del risanamento eccetera.

Un ulteriore criterio di scelta è rappresentato dall'ubicazione degli inquinanti nel sottosuolo. Oltre alla zona insatura e a quella satura, in molti casi di risanamento hanno un ruolo importante anche la superficie dell'acqua sotterranea e il bordo capillare.

La scelta può inoltre dipendere da contaminazioni concomitanti, dall'impiego di diverse tecniche di risanamento come pure dal sito stesso e da altre condizioni.

Gli alberi decisionali riportati di seguito non forniscono indicazioni univoche riguardo alle tecniche di risanamento da scegliere se:

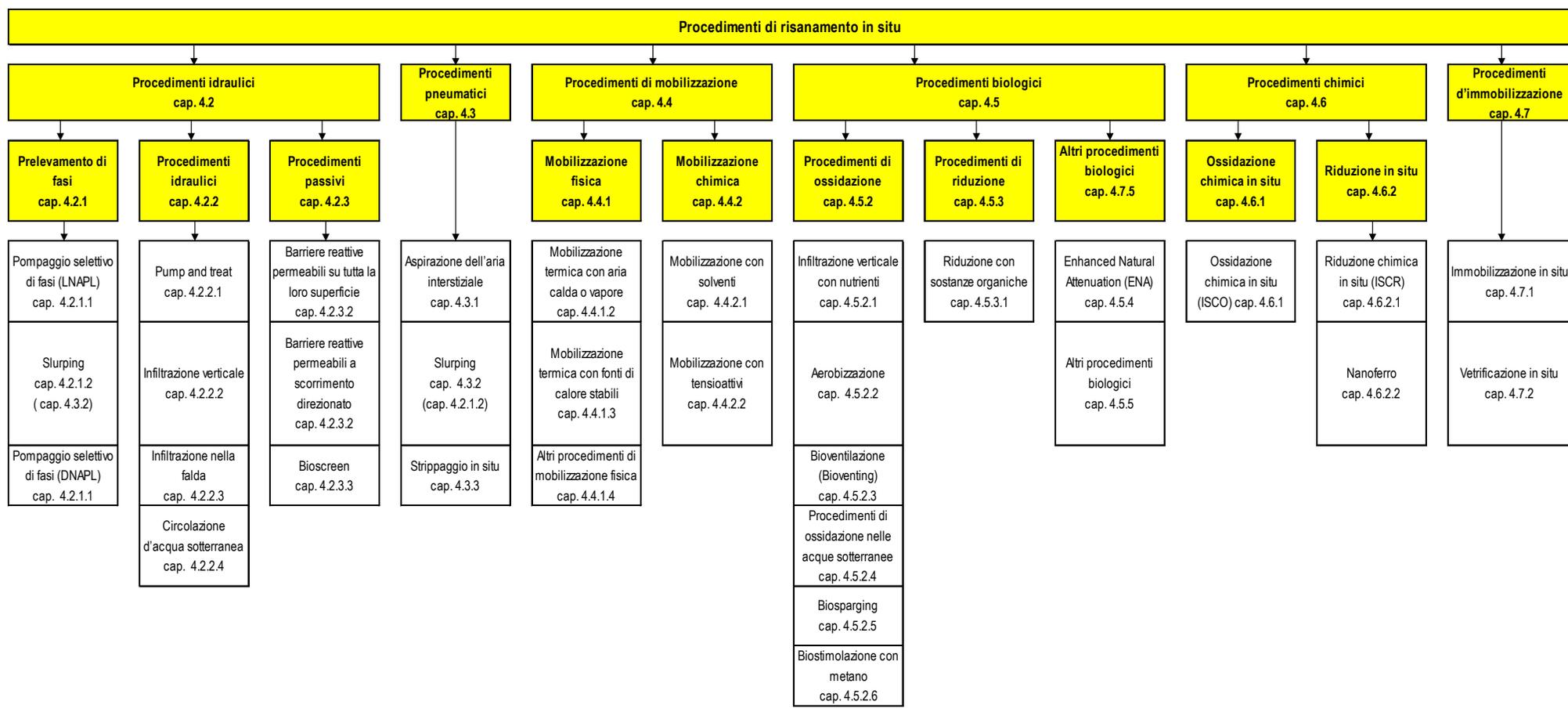
- > gli inquinanti presenti nel sito possiedono più di una delle proprietà summenzionate (p. es. gli BTEX sono volatili, idrosolubili e biodegradabili);
- > gli inquinanti presentano le proprietà summenzionate solo in maniera limitata (p. es. solo alcuni IPA sono idrosolubili);
- > nel sito si riscontrano diversi inquinanti con proprietà differenti.

In questi casi sono possibili più opzioni e la scelta deve essere effettuata applicando altri criteri.

3.4 **Panoramica dei procedimenti di risanamento**

In base alla suddivisione delle tecniche di risanamento in situ di cui al capitolo 3.3, i procedimenti illustrati più in dettaglio nell'ambito di questo modulo di aiuto all'esecuzione possono essere classificati come segue:

Fig. 3 > Panoramica dei procedimenti di risanamento in situ



Per valutare in via preliminare l' idoneità di questi procedimenti volti al trattamento degli inquinanti più comuni nei siti contaminati può essere utilizzata la seguente tabella:

Tab. 3 > Idoneità dei procedimenti in situ per i singoli inquinanti

| Procedimenti | Inquinanti | ICP | | BTEX | Idrocarburi alogenati volatili (VCHC) | IPA | | Metalli pesanti |
|--|---|----------------|----------------|------|---------------------------------------|------------|-----------|-----------------|
| | | a catena corta | a catena lunga | | | 2-4 anelli | >4 anelli | |
| + idoneo, o idoneo in misura ridotta, - non idoneo | | | | | | | | |
| Prelevamento di fasi | Pompaggio selettivo (LNAPL) | + | + | + | - | + | 0 | - |
| | Pompaggio selettivo (DNAPL) | - | - | - | + | + | + | - |
| | Slurping | + | 0 | + | 0 | 0 | - | - |
| Procedimenti idraulici | «Pump and treat» | + | 0 | + | + | + | 0 | 0 |
| | Infiltrazione verticale | + | 0 | + | + | + | 0 | 0 |
| | Infiltrazione nella falda | + | 0 | + | + | + | 0 | 0 |
| | Circolazione d'acqua sotterranea | + | 0 | + | + | + | 0 | 0 |
| Procedimenti idraulici passivi | Barriere reattive permeabili | + | - | + | + | + | - | 0 |
| | Altri procedimenti (bioscreen) | + | 0 | + | 0 | 0 | - | - |
| Procedimenti pneumatici | Aspirazione dell'aria interstiziale | + | 0 | + | + | + | - | - |
| | Slurping | + | 0 | + | 0 | 0 | - | - |
| | Strippaggio in situ | + | 0 | + | + | + | - | - |
| Procedimenti di mobilizzazione | Risanamento termico del suolo con vapore | + | + | + | + | + | + | - |
| | Risanamento termico del suolo con fonti di calore stabili | + | + | + | + | + | + | - |
| | Altri procedimenti di mobilizzazione fisica | + | 0 | + | + | + | 0 | - |
| | Risciacquo con alcool | + | + | + | + | + | 0 | + |
| | Risciacquo con tensioattivi | + | + | + | + | + | 0 | - |
| Procedimenti biologici | Infiltrazione verticale con nutrienti | + | 0 | + | + | + | 0 | - |
| | Aerobizzazione | + | 0 | + | 0 | 0 | - | - |
| | Bioventilazione | + | 0 | + | 0 | 0 | - | - |
| | Altri procedimenti biologici | - | - | - | - | - | - | 0 |
| | Procedimenti di ossidazione nelle acque sotterranee | + | 0 | + | 0 | 0 | - | - |
| | Biosparging | + | 0 | + | 0 | 0 | - | - |

| Procedimenti | Inquinanti | ICP | | BTEX | Idrocarburi alogenati volatili (VCHC) | IPA | | Metalli pesanti |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|------|---------------------------------------|------------|-----------|-----------------|
| | | a catena corta | a catena lunga | | | 2-4 anelli | >4 anelli | |
| Procedimenti biologici | Bioestimolazione con metano | + | 0 | + | + | + | 0 | - |
| | Riduzione con sostanze organiche | - | - | - | + | - | - | + |
| | Enhanced Natural Attenuation (ENA) | + | 0 | + | + | + | 0 | - |
| Procedimenti chimici | Ossidazione chimica in situ (ISCO) | + | + | + | + | + | 0 | - |
| | Riduzione chimica in situ (ISCR) | - | - | - | + | - | - | - |
| | Nanoferro | - | - | - | + | - | - | - |
| Procedimenti d'immobilizzazione | Immobilizzazione in situ | 0 | 0 | 0 | 0 | + | + | + |
| | Vetrificazione in situ | + | + | + | + | + | + | + |

3.5

Cambiamenti di procedimento

L'esperienza maturata nell'ambito del risanamento in situ insegna che spesso gli obiettivi di risanamento non possono essere raggiunti in una sola tappa, soprattutto se, ad esempio a causa dell'utilizzazione delle acque sotterranee, sono fissati obiettivi di risanamento con concentrazioni di inquinanti molto basse.

In questo contesto, in particolare in caso di danni causati da un inquinamento iniziale elevato e da valori obiettivo bassi, occorre spesso cambiare il procedimento di risanamento. Per quanto prevedibile, già nell'ambito dello studio delle varianti si dovrebbe tener conto di questa necessità di cambiamento riguardante la durata e i costi del risanamento nonché le prospettive di successo. Ciò, tuttavia, non deve essere considerato come un errore di scelta del procedimento o un fallimento del procedimento applicato inizialmente, in quanto consiste in un'ottimizzazione del piano di risanamento a risanamento in corso.

La necessità di cambiare procedimento presso una serie di siti deriva da diversi tipi di inquinanti presenti nel sottosuolo. Nel caso dei solventi organici, ad esempio, l'inquinante può essere presente in forma fasica (fase mobile o residuale nei pori) o in fase disciolta nell'aria interstiziale o nell'acqua sotterranea, oppure è assorbito dal sottosuolo. Il cambiamento del procedimento di risanamento in corso deriva da una variazione delle quote degli inquinanti presso le fonti menzionate (dopo il prelievo di fasi nei pori possono rimanere p. es. inquinanti ancora disciolti o adsorbiti).

Spesso in una prima tappa del procedimento è opportuno concentrare gli sforzi del risanamento sulla riduzione della massa di inquinanti, ad esempio mediante procedimenti semplici, realizzabili in modo rapido, quale il prelievamento di fasi. In questo contesto si sono spesso rivelati validi anche i procedimenti di risanamento classici quali il «pump and treat» o il risanamento dell'aria interstiziale. Questi procedimenti

sono vantaggiosi in particolare dal punto di vista economico qualora dal sottosuolo possano essere prelevati carichi considerevoli. Non appena l'efficacia di questi procedimenti decade senza che gli obiettivi di risanamento siano stati raggiunti, occorre riflettere sul passaggio a un altro procedimento di risanamento.

3.6 Durata del risanamento

Il ricorso a provvedimenti in situ non permette di determinare con precisione la durata del risanamento. Essa dipende infatti dai singoli procedimenti adottati, ma soprattutto dalle condizioni marginali di natura geochimica, fisica o biologica.

Due fattori essenziali sono la quantità di inquinanti nel sottosuolo e il loro relativo grado di disponibilità al procedimento di risanamento scelto. Poiché i procedimenti di risanamento si basano per lo più sul trasferimento delle sostanze da un vettore all'altro, la durata del risanamento stesso è legata da una parte al tasso di trasferimento e dall'altra alla quantità di inquinanti contenuti nel vettore di partenza.

Dal momento poi che i tassi di rimozione diminuiscono con il ridursi delle concentrazioni, la durata del risanamento dipende altresì dai valori obiettivo che si perseguono. Più bassi sono questi valori, più lunga sarà la durata.

Per una stima realistica del tempo di risanamento servono conoscenze approfondite riguardo a quantità e ripartizione degli inquinanti nel sito, conoscenze che si possono acquisire solo mediante una scrupolosa indagine. Nell'ambito di tale indagine non è sufficiente determinare la concentrazione di inquinanti nell'acqua sotterranea e nell'aria interstiziale, bensì occorre stabilirne la quantità per ogni forma (adsorbita, in fase residuale o funicolare). In caso di presenza di una fase di olio (distribuzione funicolare) quest'ultimo può fluire, mentre non può fluire in fase se l'olio si presenta sotto forma di singole gocce (distribuzione residuale).

3.7 Costi

3.7.1 Fattori determinanti per i costi

I fattori che influenzano i costi dei risanamenti in situ sono i seguenti:

- > **il tipo di contaminazione:** si applicano procedimenti diversi in base alle sostanze singole o miste da eliminare;
- > **la concentrazione degli inquinanti:** concentrazioni elevate possono richiedere trattamenti in più fasi;
- > **il flusso volumetrico del vettore da depurare:** per trattare un vettore (aria, acqua) in grandi quantità servono impianti di dimensioni adeguate;
- > **la quantità di inquinanti nel sottosuolo** (dimensioni della fonte di contaminazione): da questo fattore dipende soprattutto la durata del risanamento;

- > **l'obiettivo del risanamento:** la diminuzione asintotica della concentrazione degli inquinanti da eliminare fa sì che la durata del risanamento dipenda notevolmente dall'obiettivo fissato;
- > **l'estensione dell'infrastruttura necessaria:** qui sono compresi ad esempio gli oneri per l'approvvigionamento dei vettori e per le fondazioni degli impianti di risanamento, quelli per le misure di sicurezza e di protezione del vicinato (recinzione, eventuale sorveglianza) ecc.

3.7.2 Strutture dei costi

È difficile fornire indicazioni di validità generale sui costi delle misure di risanamento in situ poiché dipendono da numerosi fattori.

In linea di massima si distingue tra costi d'investimento e costi d'esercizio. I **costi d'investimento** sono legati alle spese per

- > la preparazione del terreno;
- > la realizzazione di pozzi e punti di misurazione;
- > la posa di condotte;
- > la realizzazione degli impianti di risanamento stessi.

I **costi d'esercizio** sono invece legati alle spese per

- > il personale necessario all'esercizio degli impianti;
- > l'energia consumata dagli impianti;
- > le sostanze ausiliarie consumate dagli impianti;
- > lo smaltimento dei residui;
- > la manutenzione e la riparazione degli impianti;
- > l'affitto/il leasing degli impianti di risanamento;
- > il controllo da parte di periti della conformità dell'esercizio alle prescrizioni in vigore.

3.7.3 Assegnazione di procedimenti di risanamento

Spesso i responsabili del risanamento non acquistano gli impianti da utilizzare a questo scopo, ma li affittano o li prendono in leasing oppure subappaltano l'intera esecuzione dei lavori per un importo forfettario.

Si possono quindi avere diverse strutture di costi:

1. l'acquisto degli impianti: gestione da parte del mandante (costi d'investimento elevati, costi d'esercizio contenuti);
2. l'affitto degli impianti: gestione da parte del mandatario (costi d'investimento contenuti, costi di affitto e d'esercizio elevati);
3. la prestazione sotto forma di obiettivo di risanamento da raggiungere: calcolo di un prezzo fisso (sicurezza d'investimento elevata);
4. come al terzo punto, ma calcolo dei costi in base ai metri cubi di suolo decontaminato (sicurezza d'investimento ridotta).

Delle modalità di finanziamento qui sopra riportate, che rappresentano delle tipologie di base e sono aperte a numerose variazioni, la seconda opzione risulta essere quella più frequentemente scelta nella pratica. La prima si applica nel caso di risanamenti di grande portata e lunga durata. La terza trasferisce al mandatario i rischi legati a eventuali inesattezze nella descrizione della contaminazione e dovrebbe essere limitata a risanamenti piccoli e ben definiti.

La sicurezza finanziaria nella scelta delle varianti è garantita da un calcolo comparato dei costi, ad esempio secondo il metodo del valore attuale, nel quale i costi delle diverse opzioni di risanamento sono convertiti sulla base di un modello attuariale in valori attuali per orizzonti temporali paragonabili, permettendo così un confronto diretto.

4 > Descrizione dei procedimenti di risanamento in situ

4.1 Sistematica dei procedimenti

Il presente modulo di aiuto all'esecuzione descrive i procedimenti distinguendo tra quelli effettivi di risanamento **in situ**, che esplicano il loro effetto là dove si trovano gli inquinanti, e i **procedimenti di trattamento** eventualmente necessari per l'acqua e l'aria. A seconda delle diverse modalità d'azione, le tecniche del risanamento in situ possono essere ripartite in sei gruppi principali.

Procedimenti idraulici (cfr. cap. 4.2)

> Basati sulla solubilità degli inquinanti in diversi vettori nonché sulla loro fluidità.

Procedimenti pneumatici (cfr. cap. 4.3)

> Basati sulla volatilità degli inquinanti.

Procedimenti di mobilizzazione (cfr. cap. 4.4)

> Sfruttano sostanze chimiche o procedimenti fisici per migliorare la solubilità degli inquinanti.

Procedimenti biologici (cfr. cap. 4.5)

> Basati sulla biodegradabilità degli inquinanti.

Procedimenti chimici (cfr. cap. 4.6)

> Distruggono gli inquinanti mediante ossidazione o riduzione, oppure modificano i loro legami.

Procedimenti d'immobilizzazione (cfr. cap. 4.7)

> Immobilizzano gli inquinanti, ad esempio mediante precipitazione o vetrificazione.

Soprattutto per i procedimenti idraulici si distingue inoltre tra risanamento attivo e passivo:

Procedimenti di risanamento attivo: gli inquinanti vengono trattati mediante un apporto di energia continuo o intermittente (p. es. azionando pompe d'estrazione dell'aria interstiziale o dell'acqua sotterranea).

Procedimenti di risanamento passivo: i vettori da depurare (soprattutto l'acqua sotterranea) sono sottoposti a decontaminazione sfruttando la corrente naturale, senza apporto di energia esterna.

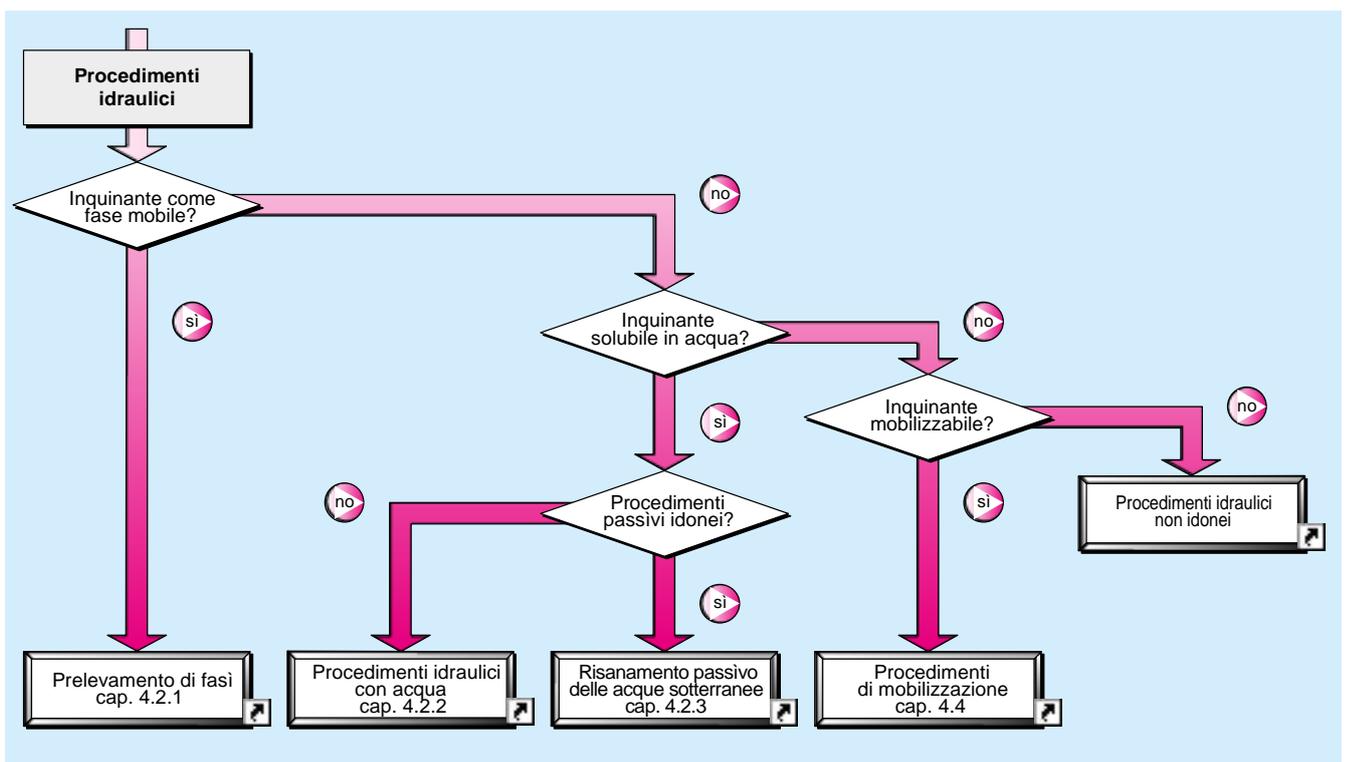
Nel quadro dei risanamenti in situ spesso bisogna inoltre tener conto anche dei **procedimenti di trattamento** di acqua e aria.

Procedimenti di trattamento (cfr. cap. 4.8)

4.2 Procedimenti idraulici

I procedimenti idraulici sfruttano le proprietà delle fasi fluide presenti o introdotte nel sottosuolo. In base a queste proprietà, i singoli procedimenti possono essere classificati come segue:

Fig. 4 > Classificazione dei procedimenti idraulici

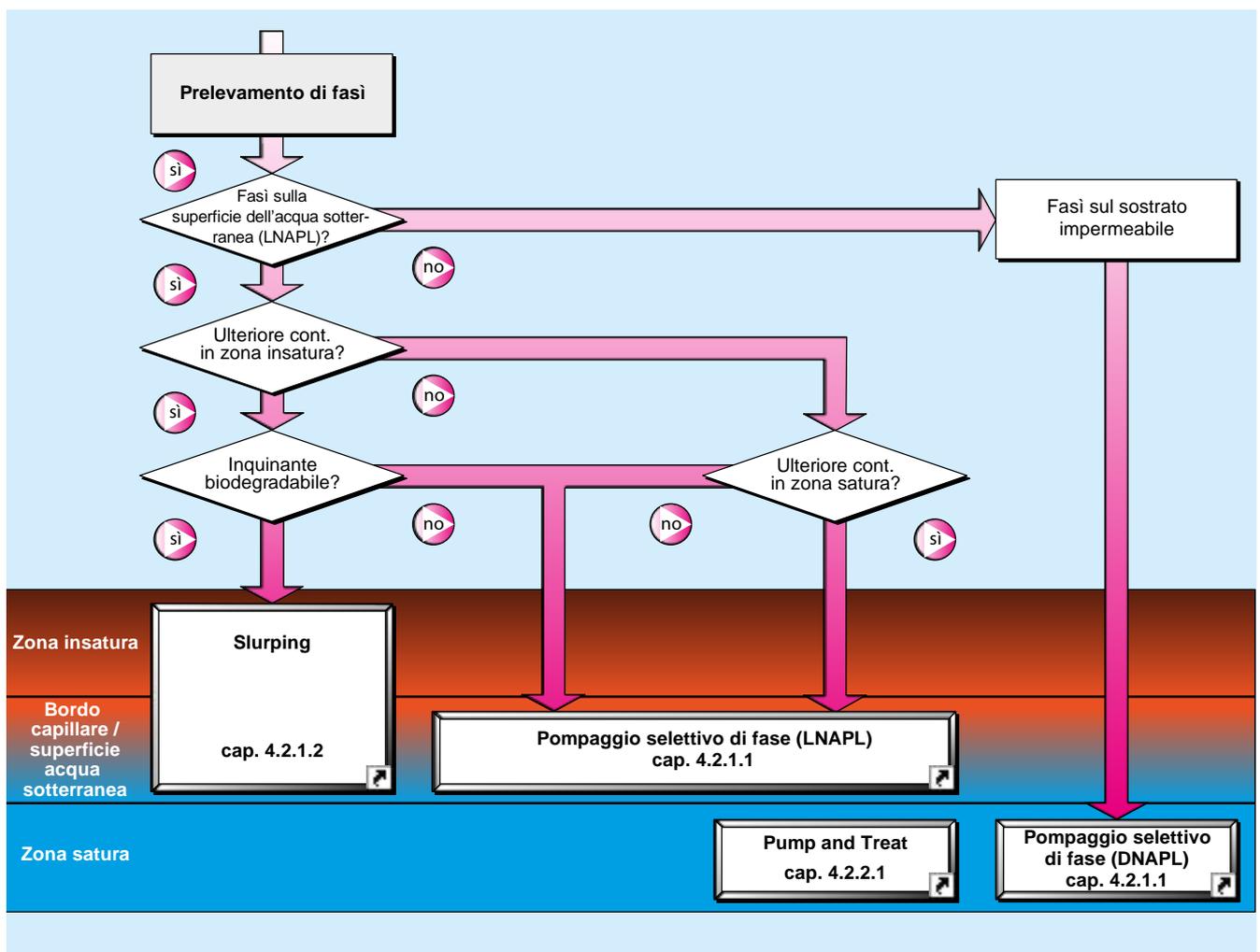


Questi procedimenti hanno lo scopo di togliere gli inquinanti dal sottosuolo estraendoli con il flusso di liquido, ad esempio mediante pompaggio. La buona riuscita del risanamento dipende dalle proprietà degli inquinanti da eliminare (solubili, pompabili e mobilizzabili) nonché dalle caratteristiche del sottosuolo (permeabile ai liquidi).

4.2.1 Prelevamento di fasi

Se gli inquinanti si presentano come fase mobile, sono possibili le seguenti opzioni:

Fig. 5 > Albero decisionale per i procedimenti del prelevamento di fasi



Pompaggio selettivo di fasi: Procedimento di risanamento per fasi più leggere (LNAPL = Light Non-Aqueous Phase Liquids) o più pesanti dell'acqua (DNAPL = Dense Non-Aqueous Phase Liquids).

Slurping: Aspirazione di fasi leggere supportata da bassa pressione.

Il prelevamento diretto di fasi inquinanti sotto forma di liquidi non acquosi, ad esempio nel caso di danni che implicano inquinanti organici, costituisce un metodo di risanamento molto efficace ed economicamente più vantaggioso rispetto agli altri procedi-

menti idraulici, pneumatici o biologici. Questo perché consente di rimuovere dal sottosuolo gli inquinanti in forma concentrata e in tempi brevi.

4.2.1.1 Pompaggio selettivo di fasi (LNAPL e DNAPL)

Occorre distinguere tra procedimenti di risanamento per fasi più leggere dell'acqua (LNAPL), come ad esempio gli oli minerali, e procedimenti per fasi più pesanti dell'acqua (DNAPL), come ad esempio gli VCHC.

L'**estrazione di fasi leggere** (LNAPL) può avvenire mediante sistemi di pompe in grado di reagire con estrema precisione alle variazioni del livello della falda o della superficie delle fasi (p. es. sistemi di prelievo galleggianti), mediante l'impiego di filtri oleofili, che lasciano entrare nel sistema di pompa soltanto la fase, oppure mediante skimmer. Questi ultimi dispositivi vengono immersi nell'acqua sotterranea e nella fase galleggiante, dove fanno aderire l'olio che portano poi con sé al momento dell'estrazione. L'uso di tubi, nastri d'acciaio o corde tessili rotanti, sottoposti a disoleatura on-site, consente un processo di risanamento continuo.

Una variante di supporto è data dal prelevamento di fasi, che consiste nel prelievo di acqua sotterranea vicino alla superficie della falda e nella simultanea aspirazione delle fasi inquinanti leggere galleggianti in superficie (LNAPL). Parallelamente in un pozzo sono effettuati il pompaggio di acqua contaminata (procedimento «pump and treat») e il prelevamento di fasi.

Il **prelevamento di fasi pesanti** (DNAPL) avviene ad esempio mediante pompe a bassa velocità da immergere nella fase, in grado di resistere ai componenti spesso molto aggressivi delle fasi stesse.

In linea di massima il prelevamento di fasi può essere supportato dal prelievo simultaneo di acqua sotterranea. La variazione di pressione così generata aumenta l'afflusso della fase verso il pozzo di risanamento.

4.2.1.2 Slurping

L'aspirazione di fasi leggere (LNAPL) può essere supportata da un abbassamento di pressione, come avviene nel caso dello slurping.

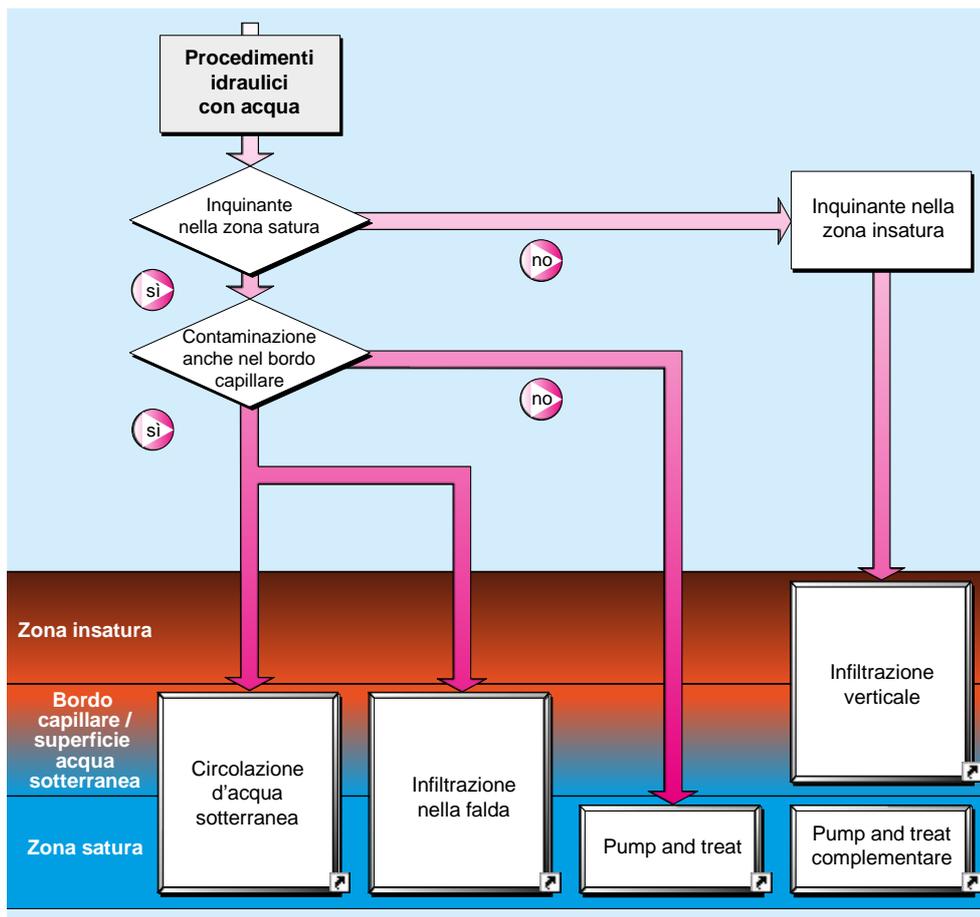
Lo slurping combina l'aspirazione di fasi leggere con una bioventilazione (cfr. cap. 4.5.2.3), nell'ambito della quale si provvede ad aerare in parallelo la zona insatura al fine di stimolare i processi di biodegradazione. Tenuto conto del trattamento simultaneo di fasi leggere e aria interstiziale, lo slurping può anche essere considerato un procedimento di estrazione multifase.

4.2.2 Procedimenti idraulici

Questi procedimenti di risanamento delle acque sotterranee sfruttano l'acqua come vettore di risciacquo e di trasporto.

I procedimenti di risanamento attivo delle acque sotterranee e i metodi corrispondenti che ricorrono all'acqua come vettore di risciacquo si distinguono soprattutto per la posizione dell'orizzonte da risanare in rapporto alla superficie della falda. Particolarmente importante è prendere in considerazione la presenza di inquinanti all'interno del bordo capillare.

Fig. 6 > Albero decisionale per i procedimenti di risanamento idraulici con acqua



Pump and treat

Procedimento idraulico più frequente. Il risanamento avviene mediante pompaggio e trattamento dell'acqua sotterranea contaminata.

Infiltrazione verticale

Procedimento per la zona insatura eseguito immettendo acqua come vettore di risciacquo. In seguito le acque d'infiltrazione contaminate sono prelevate e depurate mediante il «pump and treat».

Infiltrazione nella falda

Variante del «pump and treat», tecnicamente simile ai procedimenti per la zona insatura.

Circolazione d'acqua sotterranea

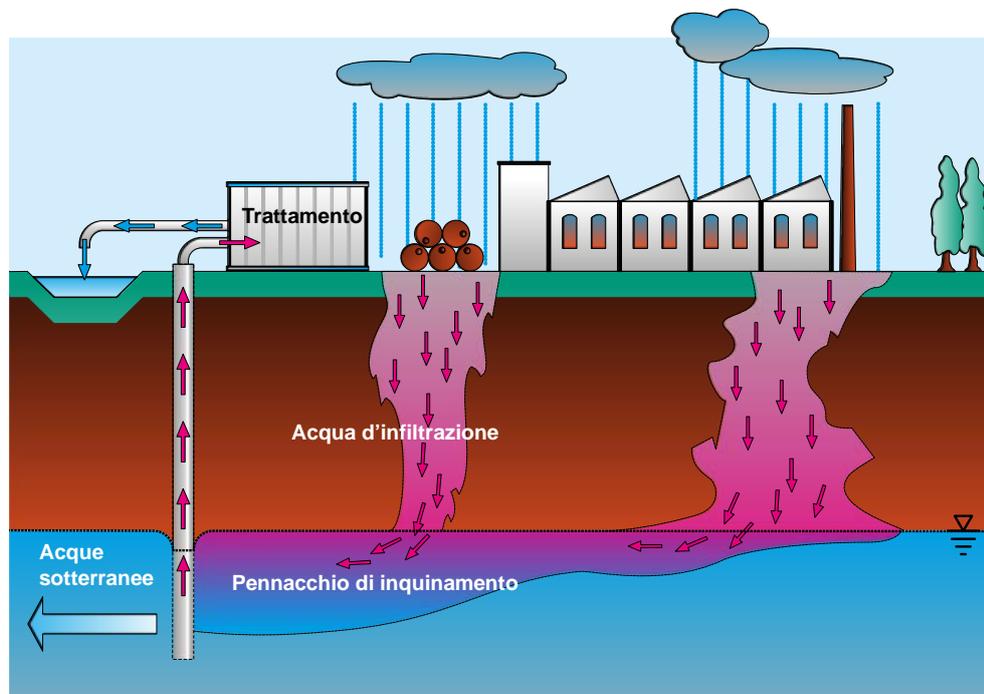
Procedimento consistente nel prelievo di acqua sotterranea e nell'infiltrazione in uno stesso pozzo.

4.2.2.1 Pump and treat

Il procedimento idraulico più frequente consiste nel risanamento della falda mediante pompaggio e trattamento dell'acqua contaminata. Nella prassi è indicato anche con l'espressione inglese «pump and treat».

In modo del tutto analogo alle misure pneumatiche, gli inquinanti sono rimossi prelevando acqua contaminata dall'acquifero. Questo procedimento è possibile soltanto se gli inquinanti sono idrosolubili.

Fig. 7 > Principio del risanamento delle acque sotterranee mediante «pump and treat»



Come si può dedurre già dal nome, il risanamento della falda mediante «pump and treat» prevede il trattamento on-site dell'acqua contaminata pompata in superficie. I procedimenti utilizzati a questo scopo sono illustrati sotto «Trattamento dell'acqua» (cap. 4.8.1).

Le tecniche di «pump and treat» sono molto importanti poiché sovente consentono di realizzare una decontaminazione della zona satura senza eccessivi oneri tecnici, garantendo in molti casi un grado di depurazione soddisfacente grazie alla buona permeabilità del sottosuolo all'acqua. Esistono tuttavia delle riserve, in particolare per quanto riguarda il bordo capillare. Al fine di rimuovere la quantità di inquinanti necessaria per raggiungere i valori obiettivo, occorre prevedere tempi di trattamento più lunghi che, nel corso del risanamento, portano spesso a optare per un procedimento di risanamento in situ più opportuno.

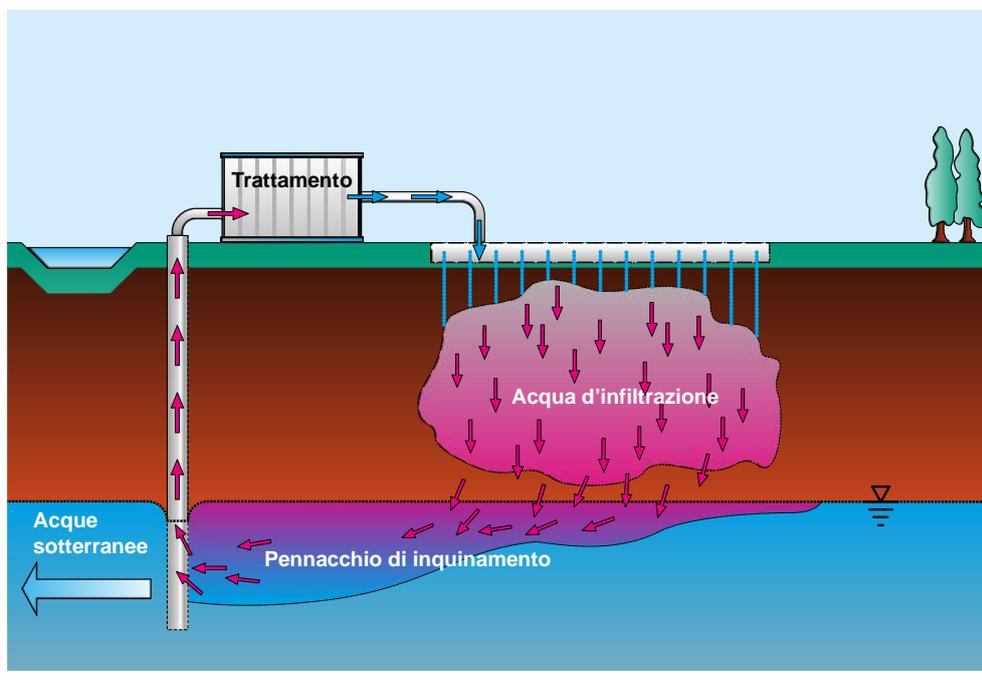
4.2.2.2 Infiltrazione verticale

Per la zona insatura si può utilizzare un procedimento idraulico che vi immette acqua come vettore di risciacquo (mediante pozzi, fosse d'infiltrazione o dispositivi di asperzione).

Grazie a questo procedimento, denominato infiltrazione verticale, gli inquinanti della zona insatura si sciolgono nell'acqua di percolazione e con essa finiscono nell'acquifero, da dove vengono prelevati mediante un sistema complementare di pompaggio dell'acqua sotterranea. L'acqua contaminata così recuperata viene poi sottoposta a trattamento on-site (cfr. «Trattamento dell'acqua»; cap. 4.8.1). L'infiltrazione verticale agisce sia sulla zona insatura che sul bordo capillare.

Tra l'altro, allo stesso tempo il procedimento serve anche ad apportare alla zona insatura l'umidità e i nutrienti necessari e a creare le giuste condizioni ambientali per una degradazione microbiologica in situ (cfr. cap. 4.5.2.1).

Fig. 8 > Principio dell'infiltrazione verticale



4.2.2.3 Infiltrazione nella falda

Variante del «pump and treat», l'infiltrazione nella falda è eseguita in modo tecnicamente simile al procedimento per la zona insatura (cfr. «Infiltrazione verticale»).

La sua particolare importanza consiste nel fatto che provoca un innalzamento del livello dell'acqua sotterranea, cosicché, attraverso il flusso dell'acqua stessa, si possono raggiungere e risanare contaminazioni localizzate, come capita spesso con gli oli minerali, sulla superficie della falda o nel bordo capillare.

4.2.2.4 Circolazione d'acqua sotterranea

La circolazione d'acqua sotterranea è un procedimento che consiste nel prelievo di acqua dal sottosuolo e nell'infiltrazione in un pozzo (cosiddetto pozzo di circolazione).

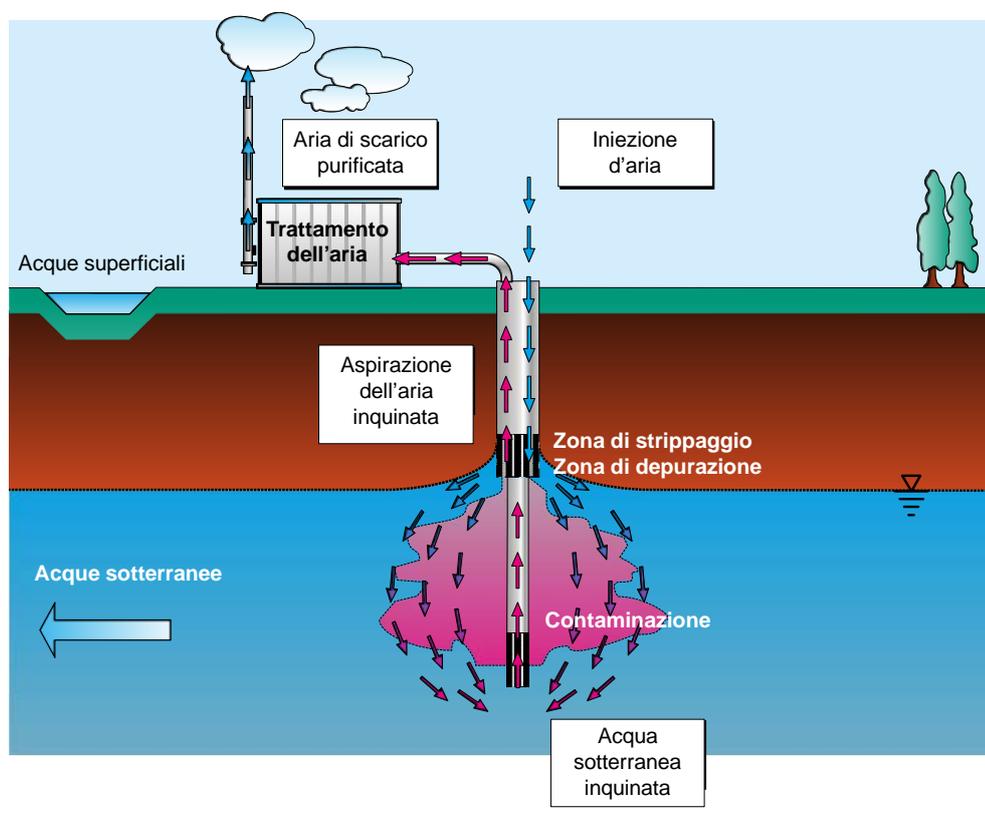
Si crea così una corrente prevalentemente verticale tra il punto di prelievo dell'acqua, di norma posto più in basso, e quello d'infiltrazione più in alto, che genera un intenso scorrimento verticale concentrico intorno al pozzo.

Le diverse varianti di circolazione dell'acqua sotterranea permettono di combinare singoli vantaggi per un determinato sito. Succede ad esempio per la depurazione del bordo capillare mediante innalzamento del livello della falda a seguito di infiltrazione. La misura idraulica può anche essere associata all'iniezione d'aria all'interno del pozzo, che da una parte fornisce l'energia necessaria alla circolazione e dall'altra consente di estrarre dall'acqua sotterranea gli inquinanti volatili (pozzo d'aspirazione a

bassa pressione). Tale variante prevede anche l'aspirazione dell'aria contaminata e il suo trattamento on-site.

Il procedimento può essere altresì combinato con l'impiego di reattori biologicamente attivi all'interno del pozzo e con l'aspirazione parallela dell'aria interstiziale al di sopra dei pozzi.

Fig. 9 > Principio della circolazione d'acqua sotterranea



Una critica frequente riguarda il fatto che, in pratica, non è possibile caratterizzare il flusso circolare risultante dallo scorrimento naturale dell'acqua sotterranea e da quello verticale ad esso sovrapposto, cosicché diventa più difficile monitorare il funzionamento della circolazione d'acqua sotterranea. Occorre inoltre prestare attenzione al variare delle condizioni di ossidoriduzione dell'acquifero e al conseguente pericolo di precipitazione di sostanze.

4.2.3 Risanamento passivo delle acque sotterranee

4.2.3.1 Criteri per l'applicazione dei procedimenti passivi

In merito all'applicabilità dei procedimenti di risanamento delle acque sotterranee occorre distinguere tra tecniche attive e tecniche passive, come ad esempio le pareti pulenti permeabili.

Contrariamente al risanamento attivo, quello passivo non utilizza energia esterna. Sono noti procedimenti di questo tipo per le acque sotterranee che ne sfruttano il flusso naturale per trasportare i contaminanti verso un'area di reazione creata artificialmente nel sottosuolo e avviare processi di degradazione e ritenzione.

La questione dell'idoneità dei procedimenti passivi è estremamente complessa e richiede notevoli competenze tecniche nonché una conoscenza precisa delle modalità di diffusione degli inquinanti nella zona satura. I criteri indicati di seguito rappresentano solo un primo approccio per decidere se sia meglio applicare procedimenti attivi o passivi.

Tab. 4 > Criteri di idoneità e di fattibilità dei procedimenti di risanamento passivo delle acque sotterranee

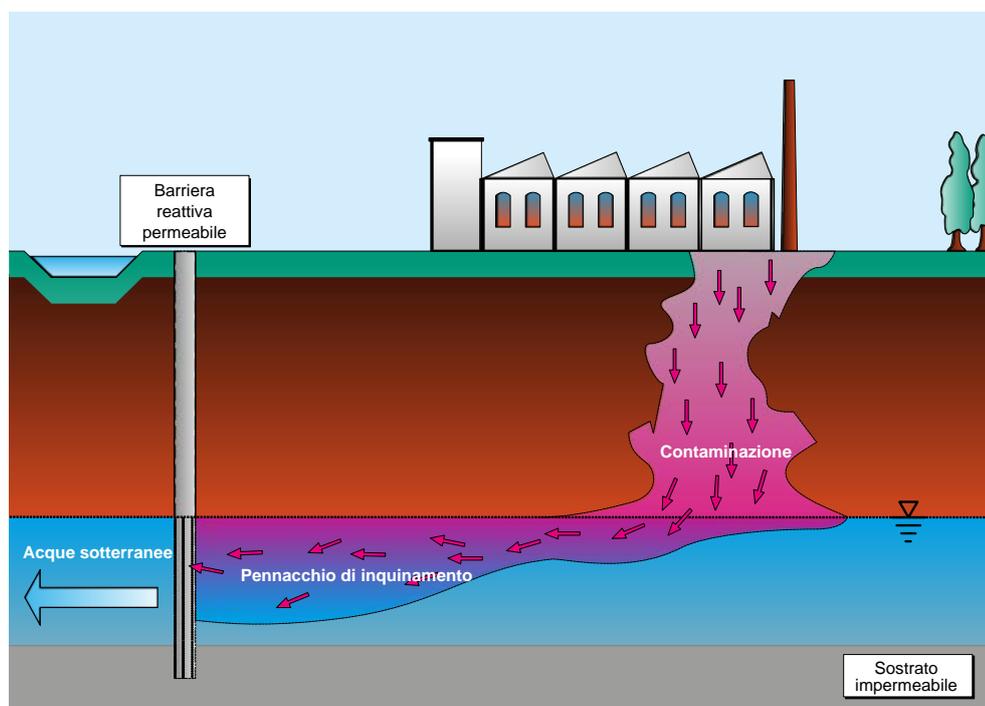
| | Fattori favorevoli a(d) un risanamento passivo delle acque sotterranee | altre tecniche di risanamento (compreso il risanamento attivo delle acque sotterranee) |
|--|--|---|
| Acquifero | Acquifero omogeneo; scorrimento dell'acqua sotterranea nelle porosità interstiziali | Acquifero eterogeneo e anisotropo |
| | Acquifero superficiale | Acquifero profondo |
| | Presenza di un sostrato impermeabile omogeneo ed esteso | Assenza di un sostrato impermeabile omogeneo ed esteso |
| Idraulica delle acque sotterranee | Direzione costante di scorrimento dell'acqua sotterranea | Direzione variabile di scorrimento dell'acqua sotterranea |
| | Velocità di scorrimento ridotte | Velocità di scorrimento elevate |
| Tipo di contaminazione | Contaminazione dovuta a un solo tipo di inquinante o tutte le contaminazioni sono sensibili a un medesimo tipo di materiale reattivo | Contaminazione mista complessa; necessità di impiego di diversi materiali reattivi |
| Fonte della contaminazione | Emissione di inquinanti ridotta o in via di conclusione; fonte risanata | Emissione di inquinanti rilevante e persistente; fonte non risanata |
| Pennacchio di contaminazione | Pennacchio ben definito; delimitato dal punto di vista idraulico | Pennacchio ampio e profondo; nessuna delimitazione |
| Carico/concentrazione di inquinanti | Carico/concentrazione esigua | Carico/concentrazione considerevole |
| Possibilità di trattare gli inquinanti | Esperienze positive con materiali reattivi | Nessuna esperienza positiva con materiali reattivi |
| Potenziale di pericolo dovuto a sottoprodotti e prodotti di degradazione | Potenziale di pericolo inferiore a quello delle sostanze di partenza | Potenziale di pericolo pari o superiore a quello delle sostanze di partenza |
| Tecnica edile | Disponibilità di spazio e accessibilità per un sistema di barriere reattive | Ridotta disponibilità di spazio, edificazione |
| Tempo necessario | Accettabile | Non accettabile |
| Costi | Vantaggiosi per un esercizio a lungo termine | Non vantaggiosi per un esercizio a lungo termine |

4.2.3.2 Barriere reattive permeabili

I procedimenti di risanamento passivo si sono affermati grazie alle barriere reattive permeabili. Questa tecnica prevede che a valle di una contaminazione si introducano nell'acquifero materiali reattivi sotto forma di pareti o di reattori con una buona permeabilità idraulica, cosicché l'acqua sotterranea inquinata vi possa scorrere attraverso.

Le applicazioni più note sono costituite dalle pareti pulenti permeabili su tutta la superficie e dalle pareti pulenti con flusso incanalato, come ad esempio i sistemi «funnel and gate».

Fig. 10 > Principio della barriera reattiva permeabile



4.2.3.3 Bioscreen

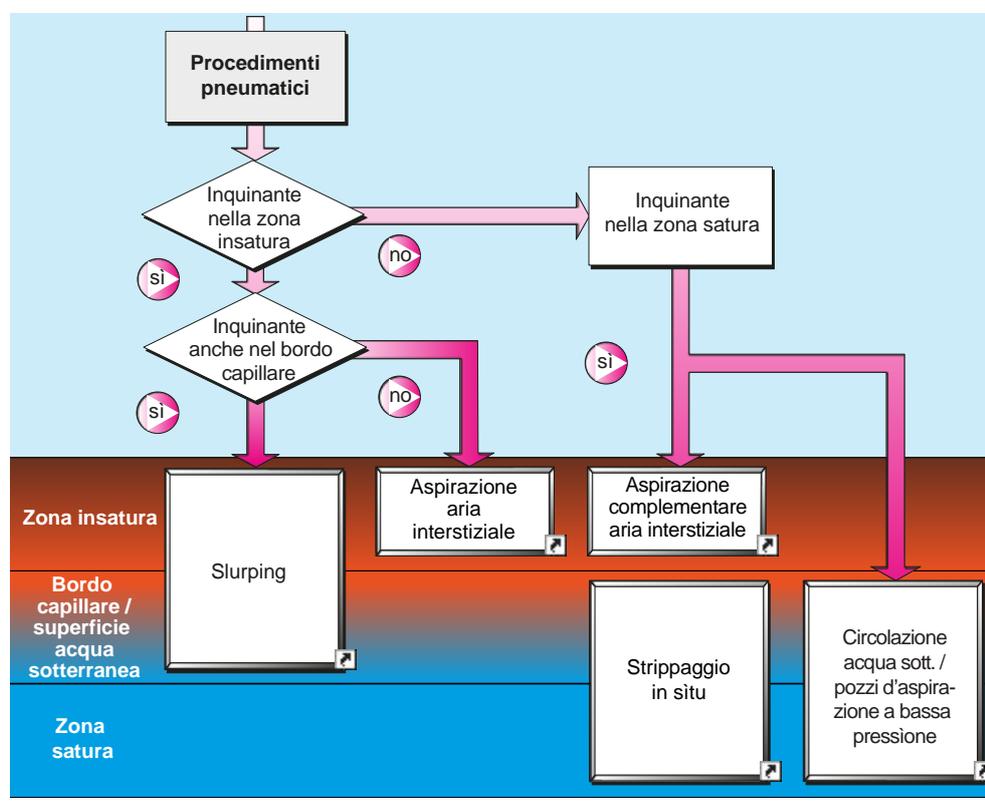
Tra le varianti del risanamento passivo rientra anche il **bioscreen**, con cui si introducono nell'acquifero sostanze in grado di stimolare la biodegradazione e si creano così zone biologicamente attive. Questo metodo va inteso anche come procedimento biologico in situ per la zona satura.

4.3 Procedimenti pneumatici

In molti casi la volatilità degli inquinanti, vale a dire la capacità di evaporazione nell'aria, svolge un ruolo importante.

Se le sostanze da eliminare possiedono la suddetta proprietà, le opzioni di risanamento sono quelle illustrate di seguito:

Fig. 11 > Albero decisionale per il risanamento di siti contaminati da inquinanti facilmente volatili



I procedimenti pneumatici sono contraddistinti dall'utilizzo dell'aria come vettore per la decontaminazione. Lo scopo è quello di captare gli inquinanti facilmente volatili e di eliminarli dal sottosuolo con il flusso d'aria, ad esempio mediante aspirazione. La buona riuscita del risanamento dipende dalla volatilità delle sostanze da eliminare nonché dalla buona permeabilità all'aria del sottosuolo. In alcuni casi i tempi di risanamento, spesso lunghi, possono essere fortemente ridotti se il sottosuolo viene ulteriormente riscaldato (cfr. cap. 4.4.1 Mobilizzazione fisica).

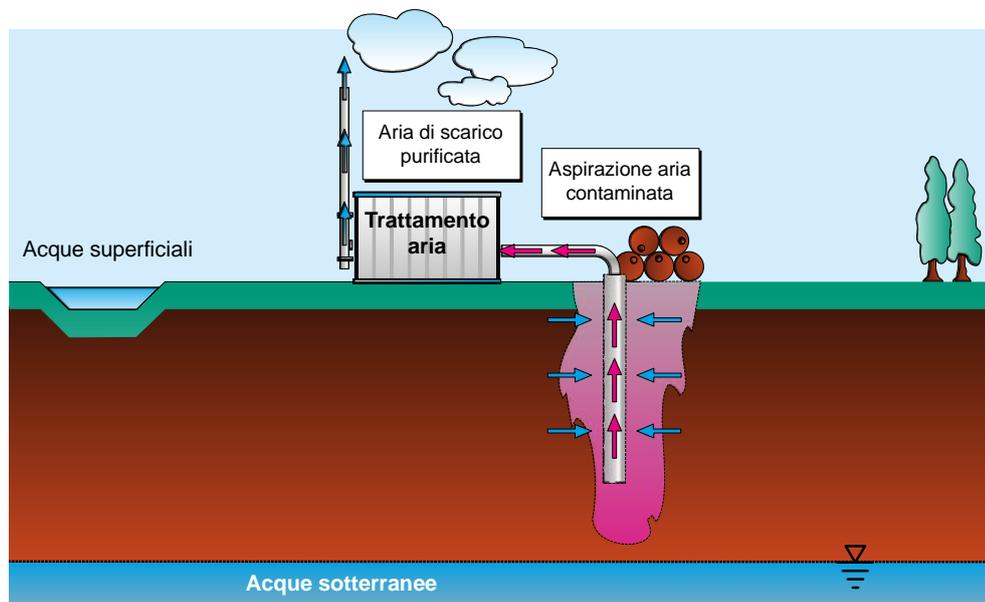
4.3.1 Aspirazione dell'aria interstiziale

Per il risanamento pneumatico della zona insatura si può ricorrere all'aspirazione dell'aria interstiziale. Questo procedimento molto diffuso consiste nell'aspirare dal sottosuolo gli inquinanti gassosi per mezzo di impianti appropriati e nel trattarli on-site.

I composti organici facilmente volatili presenti nel sottosuolo, ad esempio sotto forma di fasi residue adsorbite o disciolte nell'acqua interstiziale (VCHC, ICP, BTEX ecc.), si volatilizzano nell'aria presente nel terreno (aria interstiziale) fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio. Aspirando quest'aria per più giorni, ad esempio mediante appositi pozzi, si genera un flusso d'aria non contaminata che modifica il suddetto equilibrio e favorisce il passaggio di altri inquinanti alla fase gassosa.

Il procedimento di aspirazione dell'aria interstiziale prevede anche il trattamento dell'aria contaminata portata in superficie. I procedimenti utilizzati a questo scopo sono illustrati sotto «Trattamento dell'aria» (cap. 4.8.2):

Fig. 12 > Risanamento della zona insatura mediante aspirazione dell'aria interstiziale



L'aspirazione dell'aria interstiziale è particolarmente importante poiché spesso consente di realizzare decontaminazioni senza eccessivi oneri tecnici, garantendo un buon grado di depurazione laddove il sottosuolo presenta un'adeguata permeabilità all'aria. In molti casi, però, il raggiungimento degli obiettivi di risanamento richiede tempi lunghi. Se l'efficacia del risanamento diminuisce, pertanto, dopo breve tempo può rivelarsi opportuno optare per un procedimento di risanamento in situ ulteriore.

Nell'ambito di progetti edili si può comunque installare l'infrastruttura necessaria (piezometro, condotta di raccordo ecc.) durante la fase di costruzione, in modo da poterla poi usare senza problemi per tutto il tempo richiesto.

Da notare che con l'aspirazione dell'aria non si estraggono solo gli inquinanti presenti nel sottosuolo, ma anche l'acqua contenuta negli interstizi (il sottosuolo si prosciuga). Questo effetto può essere ridotto dosando la quantità di aria pompata.

4.3.2 **Slurping**

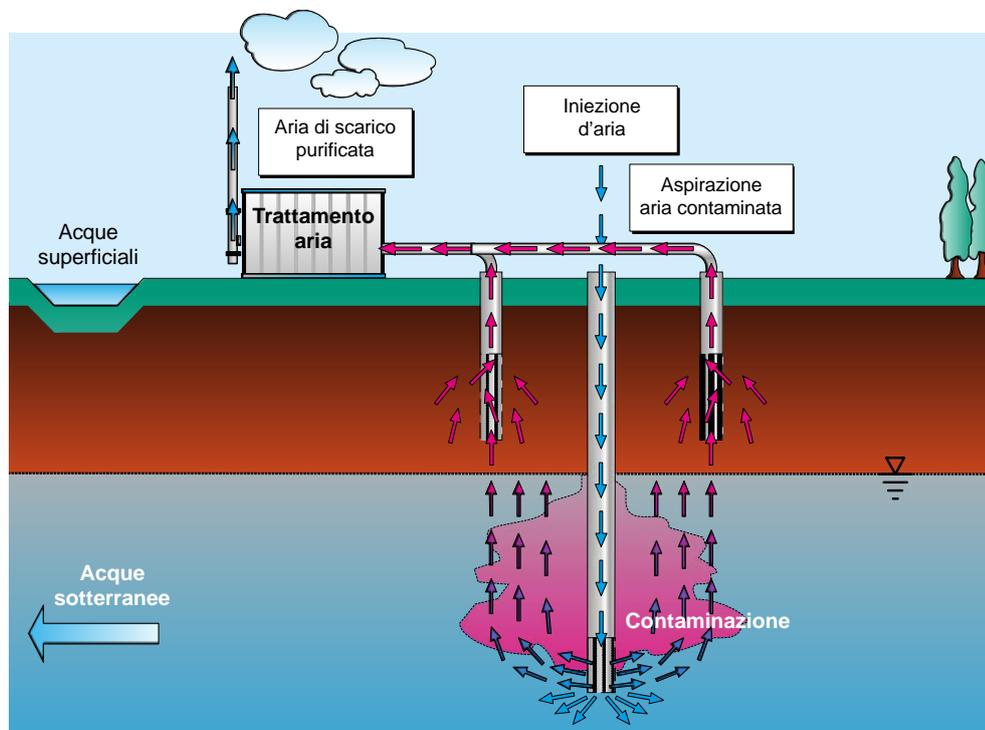
Variante dell'aspirazione di aria interstiziale applicabile soprattutto all'orizzonte di transizione verso la zona satura, lo slurping prevede un prelevamento di fasi galleggianti sull'acqua sotterranea (p. es. oli minerali; cfr. cap. 4.2.1.1) in combinazione con un risanamento dell'aria interstiziale. Dato che l'abbassamento della pressione durante l'aspirazione causa l'immissione di ossigeno nel sottosuolo, il procedimento può essere applicato ai sensi di un risanamento biologico della zona insatura (bioslurping). Ciò lo accomuna anche al procedimento della bioventilazione (cap. 4.5.2.3).

4.3.3 **Strippaggio in situ**

I procedimenti pneumatici possono essere utilizzati anche per la zona satura. In questo caso, l'iniezione controllata di aria nell'acquifero consente di stabilire un intenso contatto tra l'acqua sotterranea contaminata da una parte e il sottosuolo inquinato e l'aria dall'altra.

La decontaminazione avviene sfruttando gli equilibri di ripartizione degli inquinanti tra l'acqua sotterranea e l'aria come pure tra il sottosuolo e l'aria. Per analogia con il procedimento di trattamento dell'acqua applicato on-site, questo metodo è detto strip-paggio in situ.

Fig. 13 > Risanamento della zona saturata mediante strippaggio in situ



Lo strippaggio in situ deve essere accompagnato da un'aspirazione dell'aria interstiziale presente nella zona insatura e da un adeguato trattamento on-site dell'aria estratta, al fine di prevenire emissioni non controllate di inquinanti nell'ambiente.

Un effetto positivo di questo procedimento è l'apporto di ossigeno alla falda, che favorisce i processi di degradazione microbiologica in situ (cfr. «Biosparging»; cap. 4.5.2.5). La mancata captazione dell'aria contaminata può invece rappresentare un problema.

Oltre che nell'acquifero, lo strippaggio in situ può avvenire anche all'interno di un pozzo speciale (cfr. «Circolazione d'acqua sotterranea»; cap. 4.2.2.4).

4.4

Procedimenti di mobilizzazione

Se gli inquinanti non sono sufficientemente mobili per essere rimossi con successo dal sottosuolo, si possono applicare procedimenti volti ad aumentarne la mobilità. Le cause di una capacità di mobilizzazione ridotta possono risiedere nelle proprietà delle sostanze (idrosolubilità scarsa, pressione di vapore scarsa ecc.) oppure nella concentrazione delle stesse (concentrazione ridotta di inquinanti).

I procedimenti di mobilizzazione richiedono sempre un procedimento complementare di captazione (risanamento idraulico o pneumatico) o di distruzione (chimica o biologica) degli inquinanti, poiché, in assenza di queste misure di messa in sicurezza, si arriverebbe temporaneamente e localmente piuttosto a una maggiore minaccia per l'acqua sotterranea (concentrazione e carico elevati di inquinanti). I procedimenti di mobilizzazione aumentano l'efficacia della rimozione di inquinanti e, di conseguenza, accorciano la durata del risanamento. A causa dell'aumento della concentrazione di inquinanti nelle acque sotterranee è necessario controllare la distribuzione degli inquinanti nel sottosuolo.

La mobilizzazione può avvenire mediante effetti fisici (aumento della temperatura, energia meccanica) oppure mediante l'immissione di sostanze chimiche. Le possibilità d'impiego sono illustrate alla tabella 5.

Tab. 5 > Possibilità d'impiego dei procedimenti di mobilizzazione

| | Procedimenti termici | | Procedimenti chimici | |
|--|----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | Vapore/Aria calda | Fonti di calore stabili | Risciacquo con alcool | Risciacquo con tensioattivi |
| Zona insatura | si ¹ | si ¹ | si ² | si ² |
| Bordo capillare/ superficie dell'acqua sotterranea | si ¹ | no | si ² | si ² |
| Zona satura | si ¹ | no | si ² | si ² |

¹ combinazione con misure P+T nonché di risanamento dell'aria interstiziale necessaria

² combinazione con misure P+T necessaria

4.4.1 Mobilizzazione fisica

I procedimenti di mobilizzazione fisica degli inquinanti sfruttano soprattutto l'immissione di calore. Esistono tuttavia anche altri procedimenti che utilizzano l'energia meccanica e i campi elettrici.

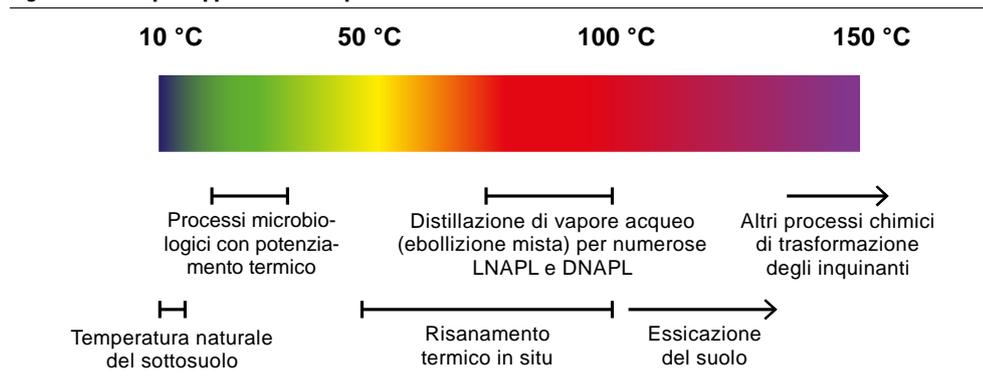
4.4.1.1 Aspetti generali della mobilizzazione di inquinanti mediante immissione di calore

I procedimenti che sfruttano l'immissione di calore sono anche denominati procedimenti di risanamento termico in situ. Essi vengono impiegati soprattutto per il risanamento di focolai di inquinamento, ossia nei settori con carico inquinante da elevato a molto elevato, e normalmente accanto e tra gli edifici utilizzati parzialmente o interamente durante il risanamento. Di regola, nei diversi procedimenti e ambiti di applicazione il risanamento si conclude in poche settimane o, al massimo, in pochi mesi. Con l'aumento della temperatura

- > spesso la concentrazione di saturazione delle sostanze nell'acqua o nell'aria aumenta,
- > le sostanze evaporano (soprattutto quelle organiche), diventando gassose, o
- > si decompongono in altri composti (termolisi).

I procedimenti di mobilizzazione termica noti puntano in particolare sull'evaporazione dei composti. In questo contesto, la pressione di vapore del composto da risanare determina spesso la temperatura di mobilizzazione necessaria e, di conseguenza, il procedimento da applicare. Nella pratica è importante che evaporino sia l'agente inquinante sia l'acqua presente nel suolo (zona insatura e zona satura), che da un lato aumenta il fabbisogno energetico del procedimento e, dall'altro, implica la gestione di condensati acquosi e contenenti inquinanti in fase di trattamento dell'aria interstiziale inquinata. La temperatura d'ebollizione dell'acqua non limita comunque il procedimento e dopo il prosciugamento del suolo, soprattutto nella zona insatura, per la mobilizzazione sono possibili anche temperature elevate; in tal modo possono essere risanate anche sostanze nocive poco volatili. L'effetto della riduzione termolitica di inquinanti va valutato in modo critico in rapporto a quello della mobilizzazione, in quanto i composti che si creano sono difficili da prevedere e da determinare.

Fig. 14 > Campi d'applicazione dei procedimenti di risanamento termico in situ¹



Un approccio di mobilizzazione fisica di inquinanti alternativo all'immissione di calore tramite aria calda/vapore e fonti di calore stabili consiste nell'immissione di calore tramite onde elettromagnetiche (procedimento ad energia di radiofrequenza) o l'immissione diretta di corrente elettrica nel sottosuolo (riscaldamento a resistenza elettrica). Un'iniezione di aria calda non può essere scambiata dal punto di vista tecnico e termodinamico con una iniezione di vapore. A causa della scarsa capacità termica, un'iniezione di aria calda provoca soprattutto la stimolazione di processi microbiologici, ma certo non la capacità di evaporazione degli inquinanti come nell'iniezione di vapore o nell'esercizio di fonti di calore stabili.

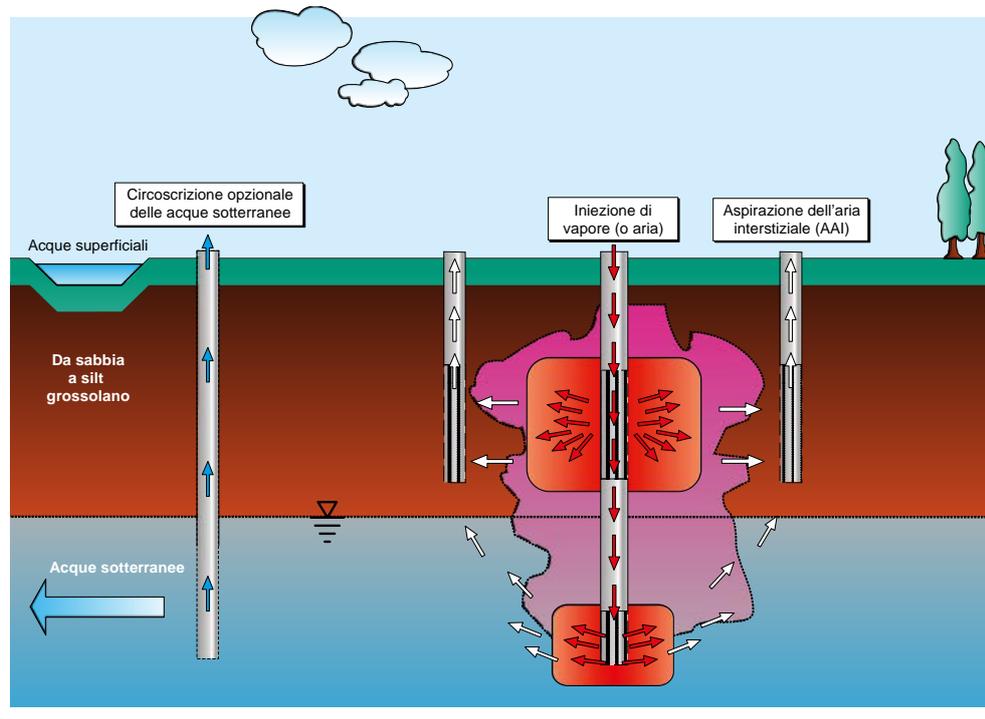
4.4.1.2 Mobilizzazione termica con aria calda o vapore

Il procedimento di risanamento termico del suolo con vapore o aria calda si basa sull'immissione di gas caldi nel sottosuolo. La diffusione del vapore segue vie di scorrimento preferenziali con elevata permeabilità. Strati accumulati poco permeabili vengono riscaldati in differita attraverso la conduzione termica. Teoricamente ciò crea una camera di vapore che si estende a simmetria radiata attorno ai punti d'immissione e consente di riscaldare il suolo fino a raggiungere la temperatura necessaria per la

¹ «Leitfaden Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser», Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum (TASK).

decontaminazione auspicata. Inoltre nelle acque sotterranee le forze ascensionali del vapore provocano una corrente di densità verticale ascendente. Un'iniezione di aria calda non può essere scambiata dal punto di vista tecnico e termodinamico con una iniezione di vapore. L'aria calda ha una scarsa capacità termica (riscaldamento del sottosuolo $\ll 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), mentre il vapore si condensa e, a seguito della sua elevata capacità termica, riscalda il sottosuolo attraverso questa condensazione. Un'iniezione di aria calda dovrebbe perciò essere valutata piuttosto come stimolazione di processi microbiologici naturali di degradazione. Il suolo viene riscaldato portandolo alla temperatura necessaria per la decontaminazione dei contaminanti obiettivo del trattamento. Gli inquinanti desorbiti e l'acqua evaporata sono rilevati e depurati tramite un risanamento complementare dell'aria interstiziale. Se il vapore o l'aria calda sono iniettati nella zona satura, i gas contenenti inquinanti sono liberati nella zona insatura analogamente allo stripping in situ. Al contempo può avvenire una mobilizzazione degli inquinanti nell'acqua sotterranea, che rende possibile un procedimento complementare di «pump and treat» per il rilevamento del deflusso di acqua sotterranea contaminata (cfr. fig. 15).

Fig. 15 > Iniezione di vapore e aria nella zona insatura e nella zona satura

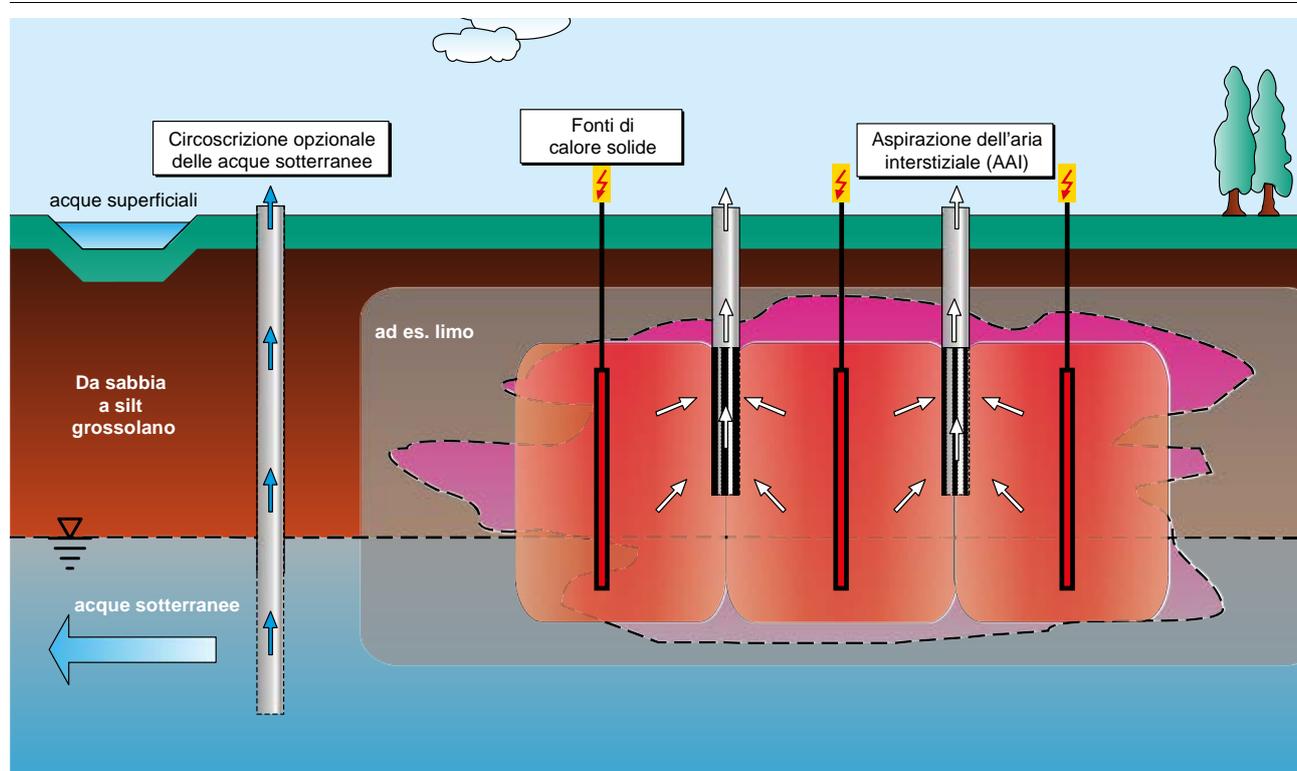


4.4.1.3 Mobilizzazione termica con fonti di calore stabili

Il risanamento termico del suolo con fonti di calore stabili consiste nell'immissione nel sottosuolo di elementi riscaldanti elettrici che raggiungono perlopiù temperature fino a 600 gradi. Il dispendio energetico necessario per l'evaporazione dell'acqua è considerevole soprattutto in caso di utilizzazione nella zona satura. Fintantoché l'acqua non è

evaporata completamente, non è possibile raggiungere temperature superiori a quella di ebollizione. Il procedimento si rivela dunque adatto in presenza di sostanze nocive poco volatili nella zona insatura, soprattutto se quest'ultima è poco permeabile (p. es. limo). Nel suolo prosciugato si formano crepe che consentono la rimozione degli inquinanti desorbiti tramite un procedimento complementare di aspirazione dell'aria interstiziale. Anche in questo caso potrebbe rivelarsi necessaria una circoscrizione idraulica mediante il «pump and treat».

Fig. 16 > Mobilizzazione termica con fonti di calore stabili nella zona insatura



4.4.1.4 Altri procedimenti di mobilizzazione fisica

Oltre ai procedimenti di mobilizzazione termica esistono anche alcuni procedimenti fisici meno consueti che impiegano l'energia meccanica e i campi elettrici ai fini della mobilizzazione, ad esempio

- > il procedimento di geochoc/idrochoc,
- > l'elettrocinesi e
- > la fratturazione (fracturing).

Per la mobilizzazione il procedimento di geochoc e idrochoc impiega energia meccanica che può agire sul suolo (**procedimento di geochoc**) o sull'acqua di falda (**procedimento di idrochoc**).

L'**elettrocinesi** realizza un potenziale elettrico mediante la collocazione di elettrodi nel suolo contaminato. Sotto l'effetto della tensione continua, l'acqua e gli ioni disciolti migrano verso questo o quell'elettrodo in base alla loro carica.

Questo procedimento è stato a lungo utilizzato per prosciugare i terreni a grana fine. Gli inquinanti non vengono distrutti, ma solo mobilizzati. Possono essere estratti dal sottosuolo oppure trattati in corrispondenza degli elettrodi, applicando in linea di principio i consueti procedimenti di decontaminazione in situ (p. es. «pump and treat»; cap. 4.2.2.1).

L'elettrocinesi è utilizzabile soprattutto per i metalli pesanti e i composti polari, come ad esempio il tricloroetene o gli BTEX in suoli a grana fine e poco permeabili all'acqua nella zona satura. Anche a causa dell'elevata quantità di energia richiesta, finora il procedimento non ha trovato nessuna applicazione commerciale rilevante.

Per **fratturazione** si intendono tutti i procedimenti volti ad aumentare il volume dei pori o le dimensioni delle fessure nella roccia coerente o nei terreni coesivi.

Lo scopo è quello di favorire la permeabilità del sottosuolo all'aria o all'acqua ed eventualmente anche la possibilità di spostamento delle fasi mobili, migliorando così il potenziale di risanamento del sottosuolo.

Di norma l'aumento delle dimensioni dei pori o delle fessure avviene mediante la rapida iniezione di acqua pressurizzata nell'acquifero (fratturazione idraulica). Talvolta per le rocce coerenti si impiega la sabbia, che consente di tenere aperte le fessure dopo l'immissione a getto di acqua. Un'ulteriore alternativa è costituita dai getti d'aria compressa (fratturazione pneumatica). Infine, le fessure si possono ingrandire anche mediante brillamento.

4.4.2 Mobilizzazione chimica

La mobilità di inquinanti non idrosolubili può essere migliorata mediante l'impiego di solventi o tensioattivi. Questa tecnica permette di eliminare dal sottosuolo anche le contaminazioni non idrosolubili.

In linea di principio si tratta di procedimenti idraulici con aggiunta di acqua, che tuttavia è stata arricchita con additivi per consentire una rimozione ottimizzata degli inquinanti. I solventi o i tensioattivi sono additivi appropriati a tal fine. In presenza di metalli pesanti sarebbe possibile anche l'aggiunta di acidi o soluzioni alcaline volte ad aumentare la rimozione degli inquinanti (desolforizzazione o leaching). Oltre all'aggiunta di solventi o agenti di solubilizzazione occorre applicare in particolare le tecniche descritte per i procedimenti idraulici.

4.4.2.1 Mobilizzazione con solventi

Un'ulteriore variante di mobilizzazione chimica è costituita dal cosolvent flushing, che consiste in un'infiltrazione di solventi. Il solvente impiegato più di frequente nella pratica è l'alcool. In linea di principio potrebbero essere impiegati anche altri solventi.

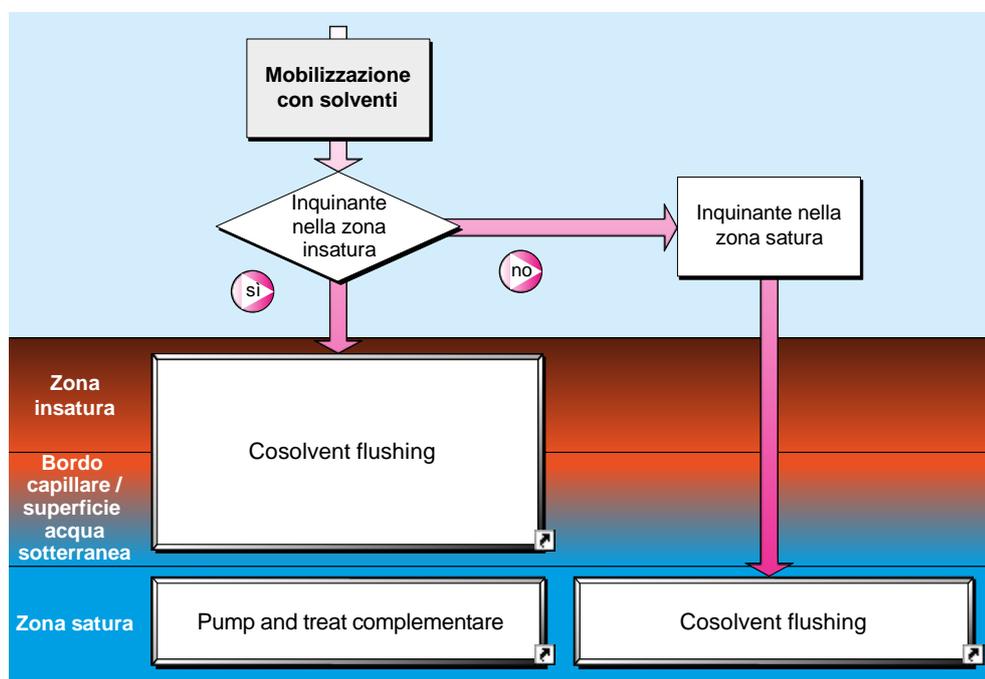
Tuttavia, se questi ultimi presentano una tossicità elevata e non sono biodegradabili, nella maggior parte dei casi non possono essere impiegati.

Di seguito sono elencate le varianti possibili della mobilizzazione con solventi:

- > l'infiltrazione verticale di solventi nella zona insatura (cfr. «Infiltrazione verticale»; cap. 4.2.2.2);
- > l'infiltrazione di solventi nella zona satura (cfr. «Infiltrazione nella falda»; cap. 4.2.2.3).

Mediante l'infiltrazione controllata del solvente è possibile separare gli inquinanti dalla matrice del sottosuolo per poi estrarli in fase acquosa e trattarli on-site in un impianto apposito (cap. 4.8.1). È assolutamente necessario minimizzare il pericolo di contaminazioni indesiderate dell'acqua sotterranea da parte dei solventi impiegati o degli inquinanti disciolti. Per questo le misure idrauliche di accompagnamento devono soddisfare requisiti elevati e l'approvazione del procedimento può andare incontro a certe difficoltà.

Fig. 17 > Albero decisionale per il risanamento di siti contaminati da inquinanti solubili in solventi



4.4.2.2 Mobilizzazione con tensioattivi

Nel caso della mobilizzazione con tensioattivi, gli inquinanti sono liberati agendo sulla tensione interfacciale tra l'inquinante non disciolto e la matrice del suolo. Per quanto concerne l'applicazione dell'agente di solubilizzazione nel sottosuolo, la mobilizzazione con tensioattivi non diverge da quella con solventi.

4.5 Procedimenti biologici

4.5.1 Aspetti generali e funzionamento

I procedimenti biologici si basano soprattutto sulla degradabilità degli inquinanti ad opera di microrganismi.

Nell'ambito di processi metabolici, i composti, in genere organici, vengono trasformati chimicamente per fornire energia all'organismo responsabile della degradazione.

La biodegradabilità degli inquinanti dipende dalle caratteristiche proprie di questi ultimi, ma al contempo anche dalle condizioni ambientali del sottosuolo (apporto di sostanze nutritive, condizioni di ossidoriduzione, effetti tossici) in grado di influire sui processi metabolici. In linea di massima, i procedimenti di questo tipo richiedono la presenza di (micro)organismi che possano appunto compiere i processi metabolici.

Il metodo sfrutta gli organismi noti per essere naturalmente presenti nel sottosuolo e che, all'occorrenza, devono essere adattati per la degradazione degli inquinanti. Al riguardo, nell'ambito del risanamento biologico in situ ci si limita a ottimizzare le condizioni ambientali, di trasporto e dei nutrienti. In linea di principio si parte dal presupposto che gli organismi che metabolizzano gli inquinanti sono ubiquitari e, di conseguenza, disponibili nei siti. Un'alternativa, raramente utilizzata nella pratica, è l'inoculazione nel sottosuolo di organismi speciali, ottimizzati per la degradazione delle sostanze nocive ma non presenti naturalmente nel sito.

La degradabilità degli inquinanti e le necessarie condizioni ambientali sono oggetto di ricerche tuttora in corso. La tabella seguente fornisce indicazioni riguardo all'attuale stato delle conoscenze sulla degradabilità microbiologica dei contaminanti più frequenti e al livello di attuazione (nei siti o nei laboratori).

Tab. 6 > Degradabilità ed esperienza pratica di degradazione per gli inquinanti più frequenti

| | In linea di principio degradabili | In linea di principio difficilmente degradabili | Dimostrazione sul sito | Dimostrazione in laboratorio |
|---|-----------------------------------|---|------------------------|------------------------------|
| Idrocarburi alifatici, ICP e derivati | + | | + | + |
| Idrocarburi monociclici aromatici (p. es. BTEX) ed eterociclici (p. es. piridina) | + | | + | + |
| IPA | + ¹⁾ | + ²⁾ | - | +/- |
| VCHC | + | | +/- ³⁾ | + |
| PCB | | + | - | - |
| PCDD e PCDF | | + | +/- | +/- |
| Pesticidi e derivati | | + | ? | +/- |
| Metalli pesanti | Nicht abbaubar | | - | - |

¹⁾ IPA fino a 4 anelli, ²⁾ IPA con 5-6 anelli, ³⁾ Requisiti speciali concernenti le condizioni ambientali

In generale i procedimenti biologici si distinguono in

- > procedimenti di ossidazione (cap. 4.5.2) e in
- > procedimenti di riduzione (cap. 4.5.3).

La fitorimediazione per i metalli pesanti costituisce una forma particolare di procedimento biologico, poiché non si basa sulla degradazione degli inquinanti, bensì sulla bioaccumulazione degli stessi (cap. 4.5.5). Gli inquinanti accumulati nelle piante possono essere inceneriti o smaltiti in altro modo insieme alle stesse.

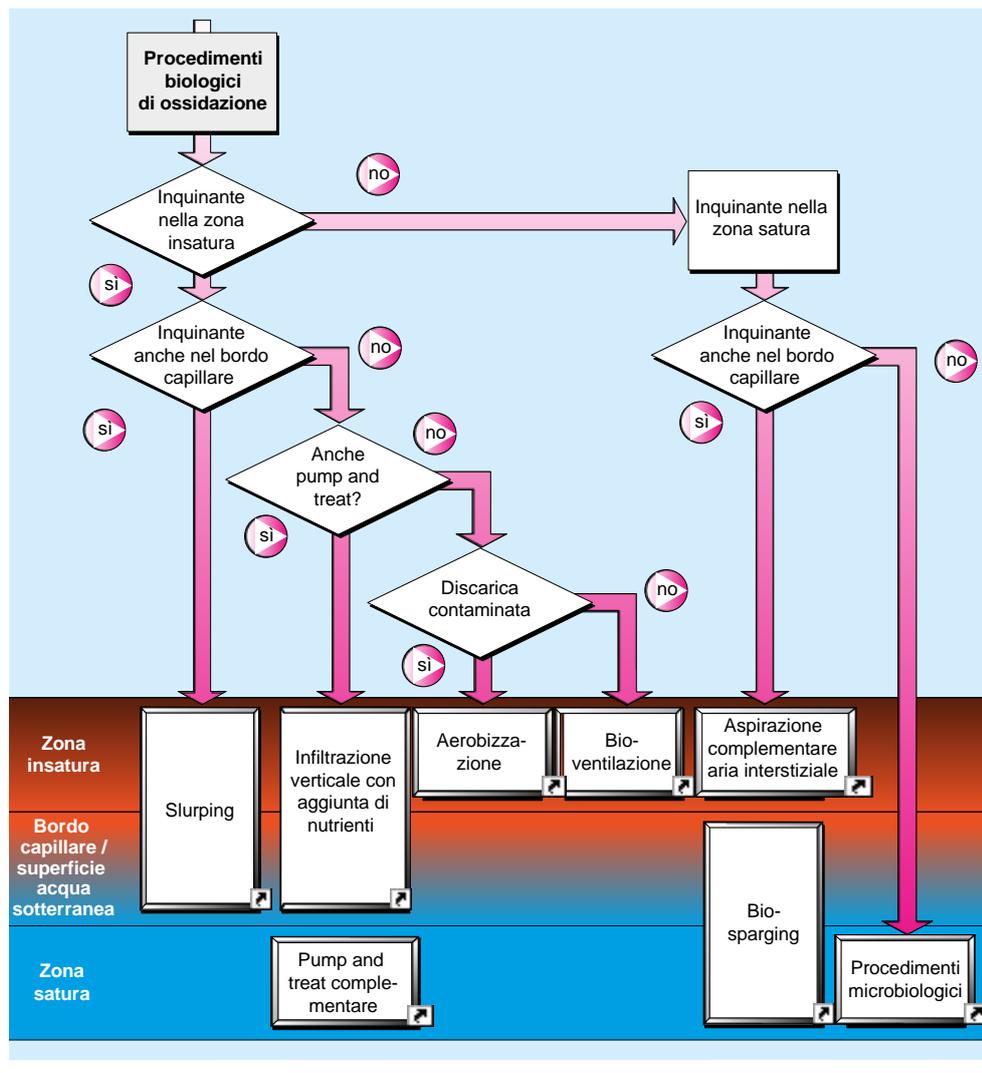
4.5.2 **Procedimenti di ossidazione**

Molti inquinanti possono essere rimossi mediante processi di biodegradazione con ossigeno oppure in ambito ossidativo (aerobico). L'ossidazione dei composti consente di eliminare dal suolo o dall'acqua sotterranea soprattutto sostanze organiche quali gli ICP, gli idrocarburi aromatici, i fenoli e i VCHC (p. es. cloruro di vinile).

Per i procedimenti di ossidazione risultano le opzioni illustrate nella fig. 18 a seconda della presenza di inquinanti nel sottosuolo.

Il procedimento della biostimolazione con metano è una forma speciale dei procedimenti biologici di ossidazione che consente di attivare in modo indiretto con il metano una degradazione aerobica degli inquinanti mediante processi metabolici nella microbiologia coinvolta.

Fig. 18 > Albero decisionale per il risanamento mediante procedimenti biologici di ossidazione



4.5.2.1 Infiltrazione verticale con nutrienti

Il procedimento dell'infiltrazione verticale con nutrienti differisce dall'infiltrazione verticale con acqua (cap. 4.2.2.2) soltanto nella misura in cui non si focalizza sulla mobilitazione degli inquinanti mediante l'acqua di percolazione bensì sulla biodegradazione degli stessi. A tal fine, insieme all'acqua necessaria per la degradazione, nella zona insatura sono immessi anche nutrienti e, se del caso, reagenti regolatori.

È possibile che con l'acqua di percolazione verticale si infiltrino nel suolo anche sostanze che possono avere effetti dannosi sulle acque sotterranee (immissione di nutrienti, sostanze con effetto sul potenziale di ossidoriduzione, aumento della solubilità ecc.), pertanto questo procedimento deve essere accompagnato da un procedimento idraulico concomitante («pump and treat»).

4.5.2.2 Aerobizzazione

L'aerobizzazione della zona insatura ha un'importanza particolare nel risanamento di discariche. Da una parte l'immissione di ossigeno nella massa di rifiuti impedisce la loro degradazione anaerobica, eliminando i rischi di esplosione in caso di lavori edili e l'emissione di gas dall'odore pungente derivanti dalla degradazione anaerobica.

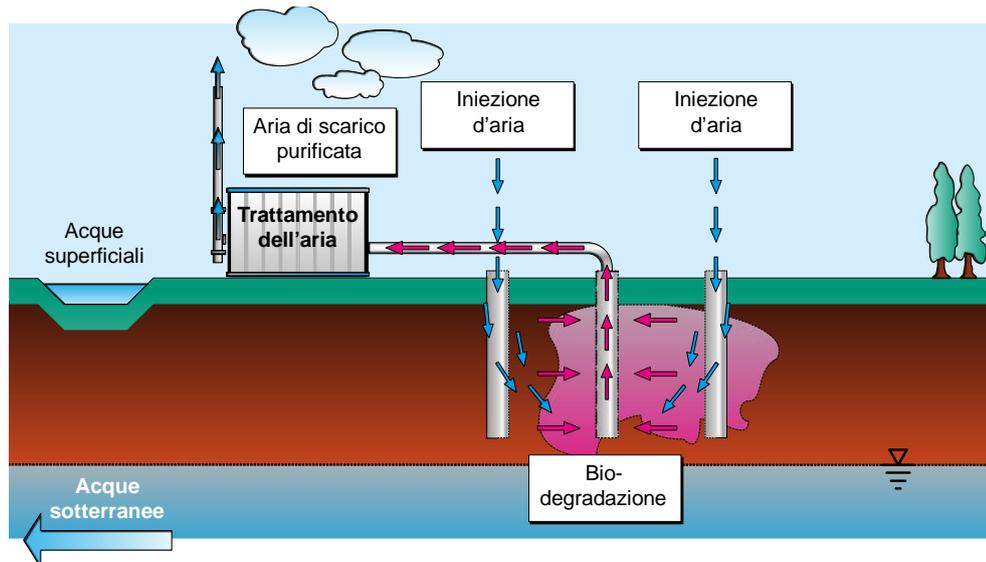
D'altra parte, questo procedimento avvia un processo di degradazione aerobica che porta alla rapida mineralizzazione dei rifiuti. Le diverse varianti del procedimento si distinguono soprattutto per il metodo d'immissione dell'ossigeno. Oltre all'aerazione forzata o a getto, con ricorso a volte all'ossigeno tecnico, si utilizza l'aspirazione.

4.5.2.3 Bioventilazione

Nel risanamento biologico in situ della zona insatura, l'approvvigionamento dei microrganismi con ossigeno per la degradazione aerobica degli inquinanti svolge un ruolo fondamentale. La bioventilazione, ad esempio, agisce in tal senso immettendo nel sottosuolo l'ossigeno atmosferico.

Il procedimento utilizza installazioni per l'aerazione (pozzi d'iniezione) e dispositivi tecnici per il risanamento dell'aria interstiziale (livello di aspirazione, trattamento dell'aria di scarico). La differenza sostanziale rispetto al risanamento dell'aria interstiziale sta quindi non tanto nella tecnologia quanto nell'obiettivo della misura.

Fig. 19 > Esempio di applicazione della bioventilazione



4.5.2.4 Procedimenti di ossidazione nelle acque sotterranee

Il risanamento microbiologico in situ della zona satura mediante ossidazione avviene per lo più immettendo nell'acquifero contaminato, in forma disciolta, ossigeno addizionale, nutrienti e sostanze regolatrici dell'ambiente.

Questi procedimenti utilizzano le stesse installazioni tecniche del «pump and treat» per il risanamento dell'acqua sotterranea o dell'infiltrazione nella falda. Il know-how essenziale sta nella ricerca di sostanze coadiuvanti in grado di stimolare il metabolismo e la degradazione degli inquinanti, nella scelta di nutrienti adatti nonché nelle modalità di applicazione all'interno dell'acquifero.

L'ossigenazione delle acque sotterranee mira ad accrescere l'efficacia dei processi di biodegradazione aerobica nella zona satura. A differenza dell'ossidazione chimica (cfr. «Ossidazione chimica in situ (ISCO)»; cap. 4.6.1), si immette soltanto la quantità di ossigeno necessaria ai batteri per un'attività ottimale di degradazione aerobica. L'ossigenazione delle acque sotterranee è anche un metodo impiegato di frequente per migliorare la degradazione naturale (cfr. anche «Enhanced Natural Attenuation (ENA)»; cap. 4.5.4.).

L'ossigenazione può essere raggiunta mediante

- > la vaporizzazione dell'aria o dell'ossigeno presente nell'acqua sotterranea (in modo analogo al biosparging; cfr. cap. 4.5.2.5), volta non a effettuare uno strippaggio degli inquinanti bensì ad aumentare il tenore di ossigeno;
- > l'iniezione di liquidi con un contenuto elevato di ossigeno;
- > l'immissione nelle acque sotterranee di sostanze che rilasciano ossigeno in modo lento ma costante (p. es. Oxygen Releasing Compounds [ORC]).

4.5.2.5 Biosparging

Nel caso del biosparging si ricorre a un'iniezione controllata d'aria nell'acquifero per sostenere o ottimizzare l'approvvigionamento di ossigeno necessario alla biodegradazione all'interno della falda.

Il procedimento è simile allo *strippaggio in situ* (cfr. cap. 4.3.3).

4.5.2.6 Biostimolazione con metano

Il procedimento di biostimolazione con metano è una forma speciale della degradazione aerobica di inquinanti nella zona satura. Mediante l'iniezione di un miscuglio di aria e metano al di sotto della contaminazione, una flora microbica speciale (quella degli organismi metilotrofi) subisce un processo metabolico che catalizza l'ossidazione e, di conseguenza, anche la degradazione ad esempio degli VCHC.

4.5.3 **Procedimenti di riduzione**

In generale le possibilità di applicazione dei processi metabolici di riduzione volti alla decontaminazione del sottosuolo sono molto meno frequenti rispetto a quelli di ossidazione. Finora nella pratica si applicano soltanto il procedimento della dechlorurazione riduttiva con sostanze organiche e quello degli Hydrogen Releasing Compounds (HRC).

4.5.3.1 Riduzione con sostanze organiche

Immettendo composti facilmente degradabili nelle acque sotterranee si stimola i microrganismi presenti ai processi di degradazione. Il potenziale di ossidoriduzione cala e l'idrogeno che si forma contribuisce a ridurre le molecole degli inquinanti. È noto soprattutto il procedimento della dechlorurazione riduttiva degli VCHC, che in parte consente di liberare del tutto questi ultimi dagli atomi di cloro fino a trasformarli in idrocarburi puri.

La dechlorurazione riduttiva è applicata in modo analogo al risanamento biologico mediante ossidazione, vale a dire aggiungendo sostrati nel sottosuolo (soprattutto melassa, acidi organici, alcool ecc.).

Un procedimento speciale consiste nell'immissione regolamentata di idrogeno nelle acque sotterranee (procedimento degli HRC).

4.5.4 **Enhanced Natural Attenuation (ENA)**

Per Natural Attenuation (NA) si intendono tutti i processi naturali in corso nel sottosuolo che contribuiscono a diminuire la concentrazione di inquinanti nel suolo o nel sottosuolo (riduzione della massa, della concentrazione o della tossicità) o a ridurre l'emissione di inquinanti (riduzione del carico). Tra questi processi si menzionano

- > la degradazione microbiologica;
- > la trasformazione chimica;
- > l'assorbimento;
- > la dispersione;
- > la diffusione;
- > la volatilizzazione delle sostanze.

Il concetto di ENA include tutte le misure che sostengono l'efficacia dei processi naturali già in corso. Ciò avviene ad esempio in caso di

- > miglioramento dell'apporto di sostanze nutritive, o
- > influenza sui potenziali di ossidoriduzione.

Non è possibile distinguere in modo preciso i procedimenti ENA da quelli attivi di risanamento biologico o chimico in situ. Entrambi i tipi di procedimento si basano sui medesimi processi delle scienze naturali e sfruttano installazioni tecniche paragonabili, pertanto si può passare senza problemi dai procedimenti attivi all'ENA e viceversa. In

linea di principio, l'ENA presuppone l'esistenza di processi naturali che riducono gli inquinanti presenti nel sottosuolo, migliorandone l'efficacia. L'approccio ENA richiede pertanto l'acquisizione di conoscenze ampie dei processi di NA mediante indagini corrispondenti.

Spesso, quale opzione in caso di siti contaminati, oltre all'ENA si applica anche la MNA, che in senso stretto non è un procedimento di risanamento in quanto non prevede interventi nel sottosuolo compresi il suolo o le acque sotterranee).

4.5.5 Altri procedimenti biologici

La fitorimediazione è una forma speciale di risanamento biologico in situ per la zona insatura che non si serve di processi metabolici, bensì sfrutta la capacità di particolari piante di solubilizzare gli inquinanti (soprattutto metalli pesanti) nella zona radicale (grazie al rilascio di metaboliti), di catturarli e accumularli. Le piante cariche di sostanze nocive devono essere raccolte e successivamente smaltite.

In linea di massima, grazie ai metaboliti rilasciati nella zona radicale (essudati) è possibile anche la degradazione di inquinanti organici. Nella pratica questo effetto è stato sfruttato per degradare IPA e altri composti aromatici mediante l'utilizzo di funghi putrefattivi bianchi.

4.6 Procedimenti chimici

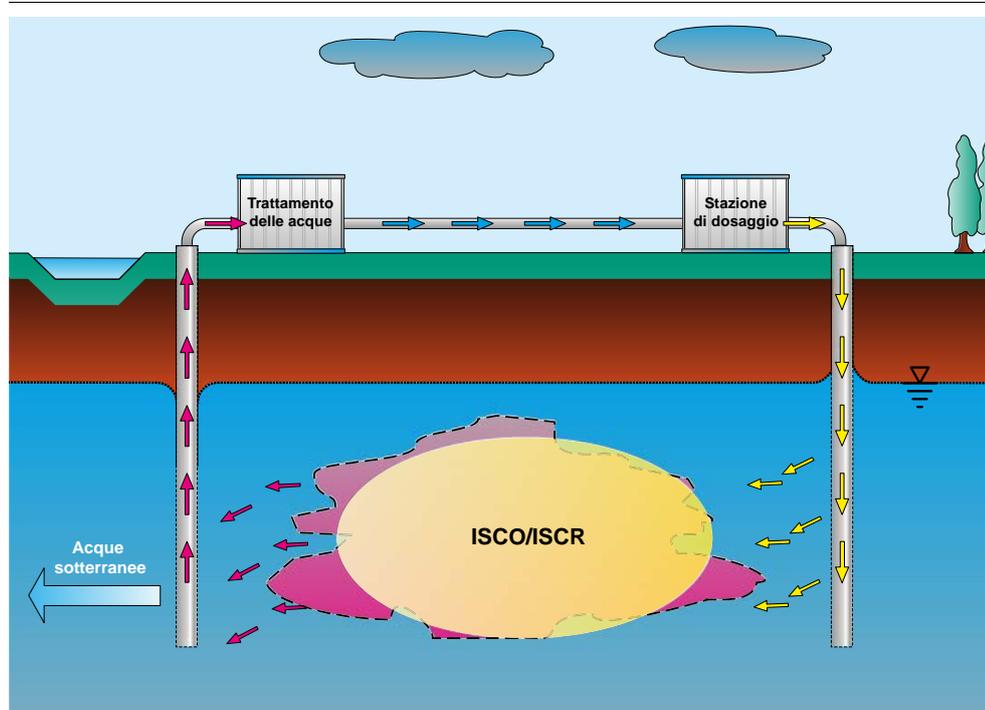
I procedimenti di trattamento chimico in situ degli inquinanti prevedono la modifica delle molecole degli inquinanti mediante processi chimici. Gli inquinanti sono trasformati o modificati in composti meno pericolosi o più mobili, ad esempio al fine di separarsi dalla fase acquosa e di essere immobilizzati nel sottosuolo in modo possibilmente irreversibile.

Esempi di dette reazioni chimiche sono:

- > l'ossidazione di inquinanti organici con distruzione completa delle molecole fino all'anidride carbonica;
- > la riduzione di inquinanti organici volatili, ad esempio, alla dechlorurazione degli VCHC;
- > la formazione di composti chimici complessi di metalli o
- > la riduzione di metalli pesanti volta all'immobilizzazione (p. es. cromato).

I reagenti chimici per la decontaminazione devono essere immessi nel sottosuolo ad esempio con lance d'iniezione, in modo tale che i reagenti si diffondano in modo ottimale e possa avvenire una reazione completa delle molecole di inquinanti su base stechiometrica. I procedimenti di risanamento chimico in situ, pertanto, presuppongono una buona permeabilità e omogeneità dell'acquifero.

Fig. 20 > Schema del procedimento di risanamento chimico in situ



L'immissione di reagenti nel sottosuolo può avvenire semplicemente mediante infiltrazione continua o intermittente dai piezometri immessi nelle acque sotterranee. Nell'acquifero occorre sempre sorvegliare il deflusso possibile di eventuali inquinanti mobilizzati e di reagenti inutilizzati. Spesso lo scorrimento auspicato attraverso il focolaio d'inquinamento è ottenuto applicando una circolazione dell'acqua carica di reagenti. Questo sistema permette anche di modificare la direzione della circolazione (sostituendo i pozzi d'infiltrazione con quelli di prelievo).

Occorre considerare che l'impiego dei reagenti non implica soltanto il trattamento dei contaminanti finali, bensì anche di tutti i composti influenzabili chimicamente e presenti nel sottosuolo. Nell'ossidazione chimica in situ, ad esempio, occorre ossidare tutti i componenti organici del sottosuolo (sostanze contenute nell'humus, torbiere ecc.) e ciò può richiedere un impiego notevole di reagenti.

4.6.1 Ossidazione chimica in situ (ISCO)

L'ISCO prevede l'impiego di potenti ossidanti quali

- > il perossido d'idrogeno,
- > il permanganato di potassio o di sodio,
- > i persolfati,
- > il reattivo di Fenton (soluzione di perossido di idrogeno e sali di ferro [II]) e
- > l'ozono.

Questi ossidanti possono rivelarsi difficoltosi dal punto di vista tecnico della sicurezza (p. es. ozono), poiché nella zona oggetto del risanamento, ad esempio negli impianti, sono fortemente reattivi. Ciò va considerato nell'ambito della pianificazione degli impianti e della protezione dei lavoratori. Nel sottosuolo altri reagenti provocano precipitazioni (p. es. formazione di biossido di manganese da permanganato) che possono causare sigillature.

4.6.2 Riduzione in situ

Le riduzioni chimiche possono servire per la decontaminazione, tuttavia il campo d'applicazione relativo ai parametri da decontaminare è notevolmente più limitato rispetto a quello dell'ossidazione chimica. Le reazioni di riduzione sono impiegate per

- > la riduzione di metalli pesanti (soprattutto cromo [VI]) ai fini della precipitazione e
- > la riduzione di inquinanti organici ai fini della dechlorurazione.

4.6.2.1 Riduzione chimica in situ (ISCR)

La ISCR serve in particolare per far precipitare il cromato (cromo [VI]) nell'acqua sotterranea. A tal fine sono impiegati soprattutto sali di ferro (p. es. solfato ferroso [II]) o altri sali (idrosolfito di sodio, metabisolfito di potassio ecc.).

In casi eccezionali, come pure in caso di dosaggio ridotto, la ISCR può anche dare supporto ai processi di biodegradazione anaerobica.

4.6.2.2 Nanoferro

Attualmente si sta elaborando un procedimento per introdurre particelle ferrose di dimensioni ridottissime («nanoferro») nei pori dell'acquifero, ad esempio per la dealogenazione degli VCHC. Le particelle ferrose non disciolte devono diffondersi nei pori e reagire in maniera ottimale con l'inquinante attraverso la loro vasta superficie. Siccome non è semplice distribuire il nanoferro nei pori e la creazione di vaste zone reattive è possibile soltanto con un onere considerevole, l'utilizzazione di nanoferro serve in prima linea per il risanamento del focolaio d'inquinamento.

4.7 Procedimenti d'immobilizzazione

Oltre ai procedimenti di risanamento in situ esiste anche il metodo della circoscrizione in situ mediante immobilizzazione degli inquinanti. I procedimenti d'immobilizzazione degli inquinanti si distinguono nei due procedimenti seguenti:

- > **L'immobilizzazione in situ:** procedimento in cui gli inquinanti presenti nel suolo sono trasformati in sostanze difficilmente solubili mediante iniezione di reagenti oppure i pori sono chiusi al fine di impedire un contatto con l'acqua e, di conseguenza, l'emissione degli inquinanti;

> **la vetrificazione in situ:** procedimento che, mediante l'immissione di corrente elettrica nel sottosuolo, provoca la fusione della roccia. Durante il raffreddamento si formano strutture vetrose che intrappolano gli inquinanti non volatili.

4.7.1 Immobilizzazione in situ

In questo procedimento gli inquinanti presenti nel suolo sono trasformati in sostanze difficilmente solubili mediante iniezione di reagenti oppure i pori sono chiusi al fine di impedire un contatto con l'acqua e, di conseguenza, un'estrazione degli inquinanti.

Detti reagenti possono essere agenti precipitanti, sostanze adsorbenti e/o scambiatrici di ioni. In parte la delimitazione degli inquinanti nel sottosuolo avviene mediante riduzione degli stessi (p. es. cromato; cfr. cap. 4.6.2).

I materiali che causano l'immobilizzazione interrompendo il contatto con l'acqua sotterranea sono, ad esempio, il cemento, la bentonite o il vetro solubile.

In generale i procedimenti di risanamento in situ vanno valutati in relazione all'inalterabilità a lungo termine dell'immobilizzazione degli inquinanti, al fine di prevenire una nuova liberazione posteriore di questi ultimi. In questo contesto possono rivelarsi necessarie indagini preliminari corrispondenti. Il successo dell'immobilizzazione va monitorato nelle acque sotterranee, di norma a lungo termine.

4.7.2 Vetrificazione in situ

La vetrificazione in situ è un procedimento che, mediante l'immissione di corrente elettrica nel sottosuolo, genera temperature tali da fondere la roccia.

Durante il raffreddamento si formano strutture vetrose che intrappolano gli inquinanti non volatili (p. es. i metalli pesanti), impedendone così l'eluizione. Le contaminazioni organiche vengono distrutte dalle temperature elevate, tuttavia bisogna tener presente che, a causa di processi in situ non pienamente controllabili, non si possono fare previsioni e monitoraggi per i prodotti generati.

Data la grandissima quantità di energia richiesta, in Europa questo procedimento non ha ancora trovato applicazione su larga scala.

4.8 Procedimenti di trattamento

Molti procedimenti di risanamento prevedono l'estrazione dell'acqua o dell'aria contaminata al fine di prelevare gli inquinanti dal sottosuolo, dall'aria interstiziale o dalla falda. In questi casi i vettori contaminati, acqua o aria, devono essere trattati.

Di norma il trattamento avviene in impianti on-site. In casi eccezionali vi è la possibilità di utilizzare un impianto di depurazione comunale o di ricorrere a uno smaltimento esterno.

In linea di principio, per il trattamento dell'acqua e dell'aria estratte dai siti contaminati si possono applicare tutte le tecniche attualmente disponibili per la depurazione degli scarichi industriali o comunali. Tuttavia, nella pratica di risanamento di questi siti poche tecniche si sono dimostrate applicabili per gli inquinanti più frequenti. In molti casi si basano su proprietà identiche o simili a quelle sfruttate per il risanamento in situ (volatilità, biodegradabilità ecc.) oppure esattamente sull'opposto (adsorbimento anziché desorbimento nel sottosuolo). Gli inquinanti possono essere distrutti anche per via chimica o fisica.

4.8.1 Trattamento dell'acqua

Per il trattamento dell'acqua si considerano in linea di massima sei procedimenti, illustrati in dettaglio qui di seguito.

Tab. 7 > Efficacia delle tecniche di trattamento per le acque contaminate

| Procedimenti | Metalli | Sostanze anorganiche | ICP alifatici | BTEX | Fenoli, cresoli | IPA | VCHC | Idrocarburi alogenati aromatici |
|------------------------------|---------|----------------------|---------------|------|-----------------|-----|------|---------------------------------|
| Strippaggio | (+) | (+++) | + | ++ | - | - | +++ | (+++) |
| Ossidazione | - | (+++) | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| Adsorbimento | + | - | ++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ |
| Precipitazione/flocculazione | +++ | (+) | +++ | - | - | + | - | - |
| Trattamento biologico | (+) | (+++) | ++ | +++ | +++ | - | (++) | - |
| Osmosi inversa | + | (++) | ++ | - | + | - | ++ | ++ |

Secondo: «Leistungsbuch Altlastensanierung und Flächenentwicklung» (Risultati del risanamento dei siti contaminati e sviluppo delle aree); LUA Nordrhein-Westfalen

+++ Procedimento particolarmente idoneo per questo gruppo di sostanze e tecnicamente collaudato

++ Procedimento particolarmente idoneo per questo gruppo di sostanze

+ Procedimento volto a un altro scopo, con effetti secondari su questo gruppo di sostanze

- Procedimento non idoneo

() Efficacia limitata a singole sostanze del gruppo

Lo **strippaggio** degli inquinanti contenuti nell'acqua sotterranea prelevata è un trattamento impiegato spesso per le sostanze nocive volatili (VCHC, BTEX ecc.). Il procedimento consiste in un'iniezione d'aria che estrae gli inquinanti dall'acqua (desorbimento). Di norma è poi necessaria un'ulteriore fase di trattamento per depurare il flusso d'aria (cfr. cap. 4.8.2).

Il procedimento di **ossidazione** prevede l'aggiunta di reagenti chimici all'acqua da depurare o l'impiego di UV per distruggere gli inquinanti in modo chimico-fisico o per trasformarli in maniera tale da poterli poi rimuovere dall'acqua.

Per gli inquinanti organici, e a volte anche per quelli inorganici, si sceglie spesso l'**adsorbimento**. Con questo procedimento l'acqua viene depurata attraverso il trasferimento degli inquinanti sulla superficie di un materiale adsorbente (in genere carbone attivo). Quest'ultimo va poi smaltito come rifiuto contaminato oppure va rigenerato.

Con la **precipitazione** le sostanze disciolte in acqua passano del tutto o in parte a uno stato non solubile in seguito all'aggiunta di determinate sostanze. I precipitati così ottenuti possono essere separati sotto forma di cristalli, fiocchi o goccioline mediante opportuni procedimenti fisici (sedimentazione, filtrazione, flocculazione). Nell'ambito della depurazione delle acque di scarico la precipitazione è un metodo di uso corrente, ad esempio per ridurre i fosfati disciolti nell'acqua (misura contro l'eutrofizzazione).

La **flocculazione** è un procedimento che porta al depositarsi di sostanze in sospensione in un liquido (p. es. precipitati). Flocculanti di uso frequente sono i sali di ferro o di alluminio nonché i composti organici a catena lunga (polimeri).

Dal trattamento degli scarichi comunali e industriali deriva il procedimento della **biodepurazione**, che può essere applicato alle acque contaminate da inquinanti con una buona biodegradabilità (p. es. ICP, BTEX). Rientrano qui tutti i metodi di depurazione delle acque di scarico (impianti a fanghi attivati, a filtri percolatori ecc.).

Più recente ma già collaudato è il metodo di trattamento dell'acqua per **osmosi inversa** (iperfiltrazione), con cui spesso si effettua la dissalazione. Alla base del procedimento vi sono membrane a permeabilità unidirezionale («semipermeabili») che agiscono da filtri a livello molecolare. Facendo passare una soluzione acquosa ad alta pressione (superiore a quella osmotica) attraverso una di queste membrane, la maggior parte dei sali, dei batteri e delle altre sostanze (detergenti, prodotti fitosanitari) viene trattenuta. Dall'altra parte si raccoglie solo acqua pura («permeato»). Il concentrato così ottenuto deve essere trattato in modo separato o smaltito esternamente.

4.8.2 **Trattamento dell'aria**

Per il trattamento dell'aria si applicano in linea di massima quattro procedimenti di depurazione.

L'**adsorbimento** degli inquinanti, soprattutto di quelli organici, non viene usato solo per depurare l'acqua ma anche per l'aria contaminata (allegato A-2, n. 2.1). Ad esempio, il carbone attivo utilizzato in questo caso ha una capacità di adsorbimento addirittura superiore a quella del carbone attivo umido. Una volta che gli inquinanti sono stati trasferiti sulla superficie interna dell'adsorbente, quest'ultimo deve essere smaltito all'esterno oppure rigenerato.

La depurazione dell'aria di scarico tramite **adsorbimento** è usata per la rimozione di solfati, azoto e acido cloridrico/fluoridrico. A tal fine è impiegato un liquido (acqua e reagente) che adsorbe gli inquinanti. I composti solforosi con idrossido di calcio, ad esempio, sono legati al gesso e successivamente eliminati.

In molti casi gli inquinanti organici che contaminano l'aria di scarico possono essere distrutti efficacemente per via termica. Il **trattamento termico** più utilizzato è la combustione ad alta temperatura dei flussi d'aria di scarico, che a causa delle concentrazioni di contaminanti spesso relativamente esigue richiede la combustione aggiuntiva di combustibili fossili per il mantenimento della temperatura necessaria. Questo procedimento si addice anche a impianti di dimensioni ridotte.

In alternativa, il trattamento dell'aria per **ossidazione catalitica** ha già dato buona prova di sé nei cantieri di risanamento. Gli impianti sono piccoli e spesso funzionano in modo continuo senza apporto di energia esterna e si possono quindi utilizzare a basso costo e senza «dare nell'occhio». I catalizzatori che inducono la distruzione degli inquinanti hanno ormai raggiunto uno standard qualitativo elevato e per di più non richiedono grande manutenzione o non producono sostanze residue da smaltire.

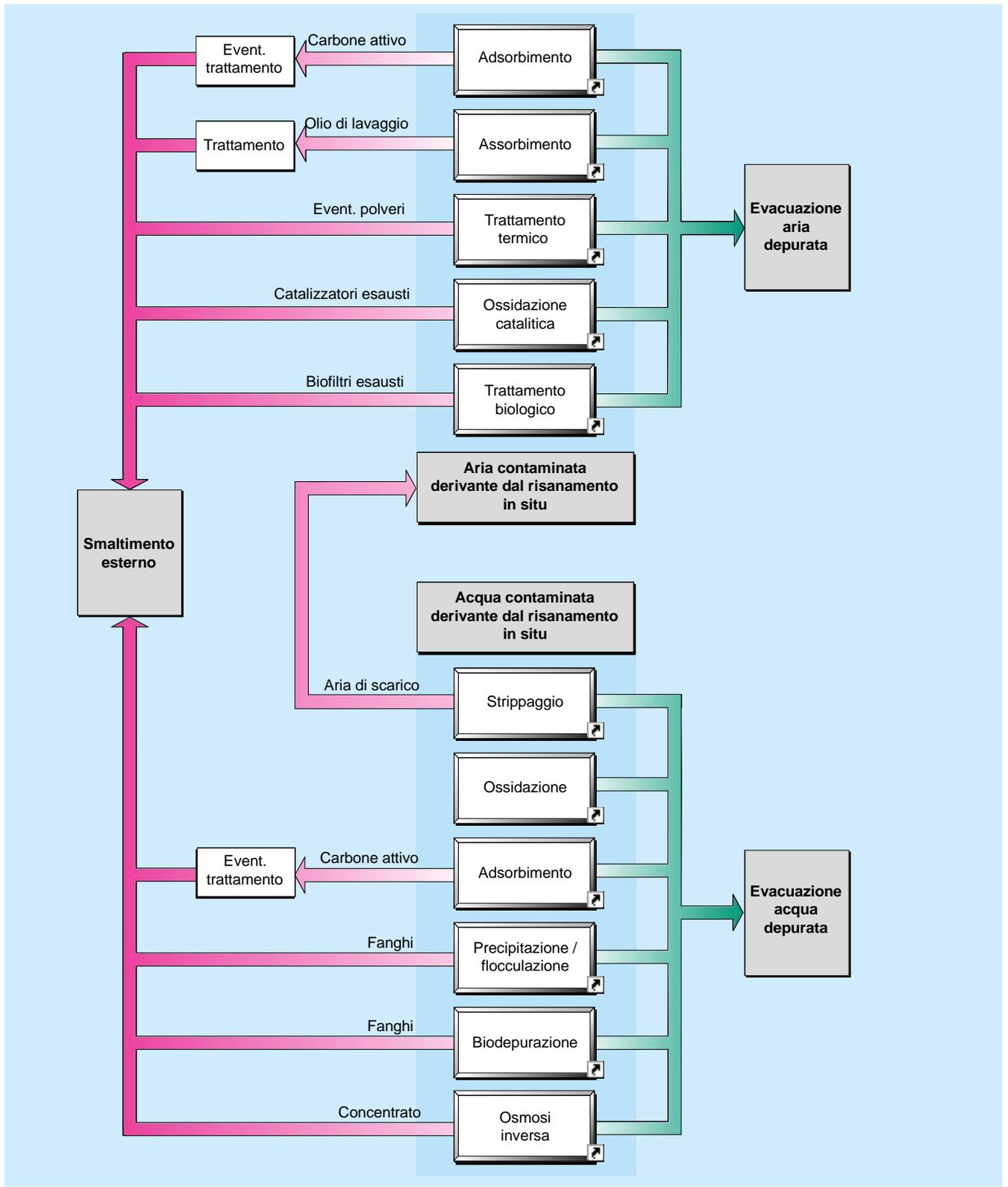
Come per l'acqua, anche per i flussi d'aria di scarico contaminati esiste la possibilità di un **trattamento biologico**. Di norma si utilizzano reattori a letto fisso. Il procedimento è particolarmente adatto per le sostanze organiche biodegradabili.

4.8.3 **Flussi di massa e smaltimento dei rifiuti risultanti dal trattamento di acqua e aria di scarico**

Tutti i procedimenti di trattamento danno origine a residui contaminati che devono essere smaltiti in modo rispettoso dell'ambiente.

Alcuni dei metodi per acqua e aria di scarico descritti nel presente modulo di aiuto all'esecuzione non funzionano singolarmente, ma s'inseriscono in vere e proprie catene di procedimenti. Inoltre vi sono ulteriori fasi che possono risultare necessarie ad esempio per la rigenerazione dei materiali adsorbenti o per il trattamento dei concentrati di inquinanti. Alla fine i rifiuti residui devono essere smaltiti in conformità alla normativa. La figura seguente presenta una sintesi delle sinergie e interdipendenze dei procedimenti illustrati fin qui, mettendo altresì in evidenza i principali tipi di rifiuti prodotti.

Fig. 21 > Flussi di massa e necessità di smaltimento dei rifiuti risultanti dal trattamento di acqua e aria di scarico



5 > Controllo dei risultati, sorveglianza e verifica

5.1 Controlli durante il risanamento

Per tutti i risanamenti in situ vanno previste al contempo anche misure di controllo.

Da una parte si tratta di vigilare sull'esercizio degli impianti per garantirne la conformità alle prescrizioni vigenti (p. es. il rispetto delle condizioni di immissione delle acque trattate nel corso del risanamento, monitoraggio delle emissioni gassose degli stessi impianti ecc.), dall'altra occorre invece monitorare l'efficacia dei lavori di risanamento.

Sorvegliare la progressione del risanamento è utile per verificare se i procedimenti utilizzati stanno dando gli effetti desiderati in termini di decontaminazione e se sarà possibile raggiungere gli obiettivi di risanamento nel tempo previsto. A questo proposito è opportuno fissare scadenze intermedie per decidere su eventuali adeguamenti in merito all'esecuzione delle misure.

5.2 Controllo dei risultati

Il controllo dei risultati si effettua al termine del risanamento ed è sancito nell'OSiti. Serve a dimostrare il raggiungimento degli obiettivi e consente alle autorità, al termine dei lavori, di confermare la buona riuscita del risanamento.

Per quanto riguarda la circoscrizione, il risanamento punta soprattutto a interrompere le vie di emissione. Il controllo dei risultati serve allora a provare che le opere realizzate sono sostanzialmente conformi al progetto di costruzione e che le suddette vie sono state interrotte in modo efficace.

Nel caso della decontaminazione, il controllo dei risultati serve a fornire la prova concreta che i valori obiettivo (contenuto residuo tollerabile di inquinanti) per i vettori da risanare (sottosuolo, acqua sotterranea, aria interstiziale) sono stati raggiunti in modo duraturo e stabile.

Particolarità delle barriere reattive

Le barriere reattive costituiscono un caso speciale per quanto concerne il controllo dei risultati, poiché vi sono opere che rimangono nel sottosuolo.

In analogia alle tecniche di circoscrizione, il controllo dei risultati per le barriere reattive avviene subito dopo la realizzazione, così da dimostrarne l'efficacia all'inizio del periodo di esercizio (p. es. rispetto dei valori obiettivo nel flusso a valle della barriera).

In fase di controllo dei risultati si eseguono i seguenti compiti:

- > **l'esercizio a lungo termine:** gestione dell'esercizio e manutenzione (attività di preservazione del funzionamento, p. es. ispezione, assistenza, cura, sostituzione di materiali reattivi esausti, pulitura);
- > **la manutenzione a lungo termine:** riparazione o rinnovo parziale, ossia tutte le misure necessarie in caso di danno o di usura per ristabilire il normale funzionamento;
- > **il controllo del funzionamento:** prova del fatto che la barriera reattiva espleta le sue funzioni nell'ottica degli obiettivi di risanamento (p. es. misurazione del livello dell'acqua sotterranea e del tenore di inquinanti a valle della barriera).

5.3 Verifica

5.3.1 Aspetti generali

Il termine verifica indica il periodo del risanamento che deve seguire al controllo dei risultati. Per la decontaminazione serve a provare che l'eliminazione degli inquinanti ha prodotto un abbassamento duraturo del grado di minaccia per i beni da proteggere. La verifica è necessaria se in futuro non si può escludere del tutto un pericolo per i suddetti beni.

Nell'ambito dell'elaborazione del progetto di risanamento, i responsabili devono definire un piano per il controllo dei risultati e per la verifica. Questo piano deve illustrare in particolare le misure autonome di controllo nonché i rapporti e le prove da fornire all'autorità competente.

Tra i compiti fondamentali della verifica rientrano:

- > l'esercizio a lungo termine;
- > la manutenzione a lungo termine;
- > il controllo del funzionamento di opere e impianti;
- > il monitoraggio delle vie di contaminazione.

Per quanto riguarda la sorveglianza e la verifica della circoscrizione di discariche, si rimanda all'aiuto all'esecuzione «Sorveglianza dei siti inquinati», UFAM 2015, contenente informazioni essenziali sull'argomento.

Per la decontaminazione la verifica si limita alla sorveglianza delle vie di contaminazione. Gli altri aspetti sono rilevanti soprattutto nell'ambito delle misure di circoscrizione.

5.3.2 Sorveglianza delle vie di contaminazione

La sorveglianza delle vie di contaminazione effettuata nell'ambito della verifica di una decontaminazione in situ serve a monitorare a lungo termine gli effetti dell'inquinamento residuo sui beni da proteggere.

A determinare questo inquinamento residuo sono le sostanze ancora presenti nel sito in concentrazione inferiore ai valori obiettivo, come pure le contaminazioni non rilevate durante le indagini e quindi non trattate in modo mirato.

Oltre al controllo ripetuto o continuo del rispetto a lungo termine degli obiettivi di risanamento fissati, la sorveglianza può comprendere quanto segue:

- > la determinazione delle variazioni relative al potenziale inquinante ancora presente nel sito dopo la decontaminazione; descrizione e valutazione delle emissioni nonché previsione del loro sviluppo futuro nell'ottica delle minacce e dei danni che possono pesare sui beni da proteggere;
- > la rilevazione e l'esame dei parametri relativi al sito, ad esempio le caratteristiche idrogeologiche, geochimiche e idrochimiche, il grado di impermeabilizzazione, la morfologia, la vegetazione, i fattori climatici ed eventi particolari, nell'ottica di un possibile effetto sulle vie di contaminazione rilevanti;
- > la rilevazione e il controllo delle utilizzazioni attuali o ammesse dalla normativa in materia di pianificazione del territorio, sia per il sito che per la zona circostante, in previsione di un cambiamento delle condizioni di esposizione.

> Bibliografia

Aiuti all'esecuzione

UFAFP 2001: Erstellung von Sanierungsprojekten für Altlasten. Vollzug Umwelt.

UFAM 2007: Sicherung von Deponie-Altlasten. Stand der Technik, Grenzen und Möglichkeiten.

UFAM 2013: Projektmanagement bei komplexen Altlastensanierungen.

UFAM 2014: «Valutazione delle varianti di risanamento», un modulo dell'aiuto all'esecuzione «Risanamento di siti contaminati».

UFAM 2015: «Sorveglianza dei siti inquinati», un aiuto all'esecuzione di OSiti

ITVA Dezember 1994: Mikrobiologische Verfahren zur Bodendekontamination. ITVA-Arbeitshilfe H1–3. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 1997: Bodenluftsanierung. ITVA-Arbeitshilfe H1–7. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 1998: Grundwasserreinigung. ITVA-Arbeitshilfe H1–9. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 1999: Hydraulische Massnahmen. ITVA-Arbeitshilfe H1–10. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 2004: Monitored Natural Attenuation. ITVA-Arbeitshilfe H1–12. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 2010: Innovative In-situ-Sanierungsverfahren. ITVA Arbeitshilfe H1–13. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin.

ITVA 2012: Grundwasseraufbereitung. ITVA Arbeitshilfe H1–14. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin.

LfULG 2000: Materialien zur Altlastenbehandlung. Mikrobiologische Sanierungsverfahren. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden. Nr. 1/2000.

LfULG 2007: Materialien zur Altlastenbehandlung. In-situ-Sanierungsverfahren. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie-Referat Grundwasser und Altlasten, Dresden.

TASK 2012: Thermische in situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrums – TASK, Leipzig.

Bibliografia secondaria

Birke V., Rosenau D., Burmeier H.: Praxisrelevante Aspekte, Erfahrungen zur Leistungsfähigkeit sowie Trends bei Reinigungswänden in Deutschland und Österreich an 13 Standorten nach 6 Jahren.

Hiester U., Müller, M.: Thermische in-situ-Sanierung (THERIS) unter Gebäuden und Effekte auf die CKW-Belastung im Grundwasser. Altlastensymposium 2016 – GAB (Gesellschaft zur Altlastensanierung in Bayern mbH) und altlastenforum BW (Baden-Württemberg). Neu-Ulm/Ulm, 22.–23.06.2016, S.110–118

Held T. 2014: «In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwasser-sanierung». Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

Stupp H.D.: Vergleich von LCKW-Grundwassersanierungen durch «Pump and Treat» und «Reaktive Systeme» – Verfahren und Kosten – Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. C.F. Müller Verlag, Heidelberg.

Stupp H.D. 1998: Bodenluftsanierung – Theoretische Grundlagen und Praxiserfahrungen. Terra Tech 2/1998: S. 39–42.

Schroers S., Odensass M. 2005: In-situ-Sanierungsverfahren für die gesättigte Zone – Erste Erfahrungen und Hinweise aus nordrhein-westfälischen Einzelfällen. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. AAV-Fachtagung am 9.11.2005, Hattingen.

Schwerin 2008: Auswertung internationaler Fachliteratur zu in-situ Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung. Projekt im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms «Wasser, Boden und Abfall» 2007.

Umweltbundesamt Österreich 2010: Technologiequicksan In-situ-Sanierungstechnologien.

Zittwitz M., Gerhardt M. 2006: Das Methan-Biostimulationsverfahren – Vollständige Sanierung von LCKW-Schadensfällen durch biologische In-situ-Massnahme. TerraTech 10/2006.

Links Internet

Pagine in tedesco

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden
Württemberg/Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg:
Altlasten – Fachinformationen im World-Wide Web.
www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de

www.itv-altlasten.de

Pagine in inglese

GWRTAC Ground-Water Remediation Analyses Center:
www.gwrtac.org («www.gwrtac.org/html/techs.html» für schnelle
Einstieg in Sanierungstechniken verwenden)

US EPA Hazardous Waste Clean-up Information – Technology Focus:
www.clu-in.org/techfocus

Federal Remediation Technologies Roundtable: www.frtr.gov
(«www.frtr.gov/matrix2/top_page.html» für schnelle Einstieg in
Sanierungstechniken verwenden)

Center for Public Environmental Oversight: www.cpeo.org
(«www.cpeo.org/techtree/ttdescript/index.html» für schnelle Einstieg
in Sanierungstechniken verwenden)

Naval Facilities Engineering Service Center Environmental Services:
enviro.nfesc.navy.mil
(«www.enviro.nfesc.navy.mil/erb/webindex/topic_list.htm» oder
«www.enviro.nfesc.navy.mil/erb/restoration/technologies/remed/main.htm» für schnelle Einstieg in Sanierungstechniken verwenden)

> Glossario

Nel presente aiuto all'esecuzione sono utilizzati i seguenti termini tecnici:

Acquiclude

Formazione geologica che non contiene acqua mobilizzabile. È composta di materiali sedimentari (argilla) o di roccia consolidata (argillite, granito, roccia metamorfica).

Acquifero

Formazione geologica che contiene acqua mobilizzabile. È composta di materiali sedimentari (sabbia e ghiaia) o di roccia consolidata (dolomite, calcare, calcare marnoso).

Acquitardo

Formazione geologica che contiene acqua mobilizzabile in quantità ridotta. È composta di materiali sedimentari (silt, argilla) o di roccia consolidata (quarzite, arenaria, siltite).

Adsorbimento

Fenomeno di superficie a seguito del quale una sostanza allo stato gassoso o disciolta nell'acqua (adsorbato) si fissa sulla superficie di un corpo solido (adsorbente) secondo diversi processi essenzialmente fisici. Gli adsorbati «aderiscono» al loro supporto senza combinarsi in modo chimico (non formano nuovi componenti). La capacità di adsorbimento dei minerali usati per l'impermeabilizzazione delle discariche svolge un ruolo importante nella ritenzione degli inquinanti.

Aerobico

Caratteristico di un ambiente ossigenato in cui possono verificarsi processi di biodegradazione che necessitano di ossigeno.

Anaerobico

Caratteristico di un ambiente non ossigenato in cui possono verificarsi solo processi di biodegradazione che non necessitano di ossigeno.

Angolo di raccordo

→ tensione interfacciale

Argilla

Parte principale dei suoli di grana fine la cui granulometria è inferiore a 2 μm (0,002 mm).

Assorbimento

→ Adsorbimento o → assorbimento

Assorbimento (per il trattamento dell'aria)

Captazione in un agente solido o liquido di gas che si dissolvono in questo stesso agente.

Biopuster©

Procedimento che consiste nell'iniettare l'ossigeno dell'aria nel corpo di una discarica. Lo si utilizza specialmente per eliminare il metano

contenuto in una discarica prima di trasferirne il contenuto o per accelerare la stabilizzazione di una discarica.

BTEX

Categoria di sostanze chimiche: designa la somma dei composti monoaromatici (benzene, toluene, etilbenzene, xilene).

Canale di scolo

Corso d'acqua ricettore

Capacità di assorbimento al suolo

Quantità massima d'acqua che un suolo insaturo e nella sua ubicazione naturale può assorbire e trattenere contro la forza di gravità (in % volumetrica).

Carbone attivo

Carbone puro che, grazie alla sua struttura porosa, presenta una superficie interna enorme. È utilizzato soprattutto nell'ambito tecnico per l'→ adsorbimento di inquinanti organici nei processi di trattamento delle acque.

CFC

Categoria di sostanze chimiche: clorofluorocarburi o clorofluorocarboni

CHC

Categoria di sostanze chimiche: idrocarburi clorurati (ad es. tricloroetilene e percloroetilene, diclorometano, triclorometano, tetraclorometano, cloruro di vinile ecc.)

Circoscrizione

Insieme di misure che consentono di interrompere i flussi di inquinanti tra una discarica e l'ambiente (eliminazione della trasmissione).

Colmataggio

Sedimentazione di materiali in sospensione

Condizioni redox

Condizioni di un ambiente dovute alle reazioni di ossidazione e di riduzione che vi si svolgono.

Contaminante

Inquinante

Convezione

Trasporto di sostanze sciolte o in sospensione trascinate da una corrente d'acqua. In generale, si considera che lo scorrimento è laminare e che si applica la legge di Darcy. Il fattore determinante è la velocità effettiva v_n .

Dealogenazione

Rimozione di alogeni nei composti organici. In genere gli alogeni sono sostituiti dall'idrogeno o da un ponte doppio.

Deferrizzazione

Procedimento di trattamento dell'acqua che consiste nell'eliminare il ferro ivi disciolto.

Degradazione

Decomposizione di composti chimici, ad esempio nell'ambito di uno scambio di sostanze (→ metabolizzazione)

Demanganizzazione

Procedimento di trattamento delle acque che consiste nell'eliminare il manganese in esse disciolto.

Desorbimento

Fenomeno di superficie, opposto dell' → adsorbimento, che provoca il distacco di una sostanza allo stato gassoso o sciolta nell'acqua (adsorbato) dalla superficie di un corpo solido (adsorbente).

Diffusione

Migrazione di molecole dovuta al movimento di Brown che provoca la disseminazione di sostanze secondo un gradiente di concentrazione. Poiché avviene anche in liquidi immobili, essa riveste una grande importanza, segnatamente nel trasporto mediante le argille e nella propagazione di sostanze gassose.

Dispersione

Processo di disseminazione dovuto alle differenze tra le velocità di trasporto, le lunghezze dei percorsi e le direzioni di scorrimento nei pori. La dispersione causa un allargamento e un allungamento dei pennacchi di inquinamento.

Dissociazione

Scissione di molecole in componenti più semplici (ad es. ioni)

Enhanced Natural Attenuation

Procedimento che consiste nello stimolare o nell'avviare processi naturali (Natural Attenuation) introducendo sostanze nel sottosuolo e sfruttando aree di reazione anch'esse naturali. Questo procedimento in situ è applicato per rafforzare processi di attenuazione che si svolgono naturalmente nel sottosuolo.

Erosione

Distruzione del suolo (ad es. per ablazione) dovuta all'azione dell'acqua, del ghiaccio o del vento

Evaporazione

Passaggio diretto delle acque pluviali allo stato gassoso a partire dal suolo o dalle parti aeree delle piante

Fase

Stato di un inquinante presente nel sottosuolo. Si distingue la fase (puramente) liquida (inquinanti non disciolti come → DNAPL o → LNAPL), la fase gassosa o vapore, la fase sciolta (acquosa) e la fase solida.

Fase inquinante

→ Fase

Fase residua

→ Fase contenuta nel suolo e corrispondente a concentrazioni di inquinanti fissi, non mobilizzabili (ad es. sotto forma di goccioline nei pori per quel che riguarda i VCHC)

Ferro (ferro a valenza zero, limatura di ferro, spugna di ferro)

Ferro elementare a valenza zero utilizzato per dealogenare composti organici (rimozione di cloro, fluoro ecc.). È utilizzato in barriere reattive di diverso tipo, dove presenta superfici di assorbimento particolarmente grandi (limatura di ferro, spugna di ferro).

Fluido

Liquidi

Funnel and gate

Forma particolare di barriera reattiva permeabile, costituita da pareti stagne poste verticalmente per formare un imbuto («funnel») che trattiene le acque sotterranee inquinate e le convoglia verso un'uscita sotterranea filtrante («gate»). Questo termine è tutelato da un brevetto.

Gradiente

Differenza di → livello piezometrico rilevata tra due punti di misurazione

Gradiente idraulico

Differenza di pressione tra due punti di una falda freatica che determina uno scorrimento di acqua sotterranea. Generalmente, questa differenza è causata da un dislivello (pendenza della superficie della falda).

Grado di saturazione S_{fluido}

Proporzione volumetrica dei pori riempiti da un fluido. La somma dei gradi di saturazione di tutti i fluidi contenuti nei pori è pari a 1. Ne risulta così $S_w = 1$ e $S_a = 0$ per un suolo saturo d'acqua e $S_a = 1$ e $S_w = 0$ per un suolo saturo d'aria (dunque secco).

In situ

Misura con la quale il suolo o i rifiuti sono lasciati nella loro ubicazione naturale.

IPA

Categoria di sostanze chimiche: idrocarburi policiclici aromatici (ad es. naftalina, benzo(a)pirene ecc.)

Laminare

Modalità di scorrimento regolare

Limo

Miscela di particelle minerali di tre classi granulometriche diverse: sabbia (0,063–2 mm), silt (0,002–0,063 mm) e argilla (<2 µm)

Livello piezometrico

Altezza della superficie di una falda libera in un pozzo (= piezometro)

Metabolizzazione

Trasformazione di composti chimici nel quadro di uno scambio di sostanze

Monitored Natural Attenuation

Procedimento che consiste nel sorvegliare processi di attenuazione naturale (→ Natural Attenuation) tramite analisi periodiche e verifiche delle previsioni.

Natural Attenuation

Procedimento che consiste nell'utilizzare diversi processi fisici, chimici e biologici che agiscono senza intervento umano e che, a determinate condizioni, provocano una diminuzione della massa, della tossicità, della mobilità, del volume o della concentrazione di inquinanti presenti nel suolo e nelle acque sotterranee.

PCB

Categoria di sostanze chimiche: bifenili policlorurati o policlorobifenili

Pedogenesi

Processo di formazione e di evoluzione dei suoli

Pedologia

Scienza che studia i suoli.

Pericolo

Situazione che, con un sufficiente livello di probabilità, a più o meno lungo termine metterà in pericolo la sicurezza delle persone o dei beni, se non viene adottata alcuna misura preventiva.

Persistenza

Perdurare di uno stato per un lungo periodo; in questo caso: stabilità delle componenti chimiche

Petrografia

Scienza che studia la composizione mineralogica e chimica delle rocce, della loro struttura, nomenclatura e classificazione.

Porosità

Roccia: caratteristica di una roccia contenente cavità.

Suolo: espressione della percentuale di pori presenti nel suolo, ossia del volume non compreso nella matrice. Questo volume è pari alla somma dei pori riempiti d'aria n_a , d'acqua n_w ed eventualmente di altri fluidi n_{fluidi} , come l'olio.

Porosità della matrice

→ Porosità della roccia solida (matrice)

Precipitazione

Procedimento chimico che consente di rendere insolubili delle particelle sciolte in una soluzione acquosa aggiungendovi un'altra sostanza. Il prodotto derivato dalla precipitazione (o precipitato) può essere estratto dal liquido attraverso un procedimento fisico. Si utilizza la precipitazione soprattutto per estrarre dell'acqua dagli ioni metallici sciolti.

Ritardazione

Fenomeno dovuto al succedersi di → adsorbimento e → desorbimento

Sabbia

Parte principale dei suoli a grana fine la cui granulometria è compresa tra 0,063 e 2 mm.

Scorrimento polifasico

Scorrimento di una → fase nel sottosuolo in presenza dello scorrimento di altre fasi

Silt

Parte principale dei suoli a grana fine la cui granulometria è compresa tra 0,002 e 0,063 mm.

Sito aziendale

Sito inquinato da un impianto o un'azienda chiusa o ancora funzionante nel quale sono state utilizzate sostanze pericolose per l'ambiente.

Sito contaminato

Sito inquinato che deve essere risanato.

Sito contaminato da una discarica

→ Sito di deposito inquinato a tal punto da dover essere risanato.

Sito da risanare

Sito inquinato che deve essere risanato perché è all'origine di effetti dannosi o molesti oppure perché esiste un pericolo concreto che tali effetti si producano.

Sito da sorvegliare

Sito inquinato che non soddisfa più un certo numero di requisiti sulla protezione delle acque sotterranee o superficiali, ma il cui risanamento non è ancora necessario.

Sito di deposito

Discarica chiusa o ancora in funzione e ogni altro deposito di rifiuti; sono esclusi i siti in cui è pervenuto unicamente materiale di scavo o di sgombero non inquinato.

Sito di un incidente

Sito inquinato a causa di un evento straordinario, ivi compreso un incidente tecnico

Sito inquinato

Luogo di estensione limitata inquinato da rifiuti

Tenore di acqua

Massa d'acqua rapportata alla massa (secca) dei solidi contenuti in un dato volume di questo suolo (Si adottano anche altre definizioni, come ad es. il tenore d'acqua w rapportato alla massa umida del suolo e il tenore d'acqua volumetrico Θ)

Tensione interfacciale

Energia libera dell'interfaccia tra due fasi non mescolabili i e j che possono assumere una forma solida, liquida o gassosa. Le proprietà di raccordo di un corpo solido sono espresse dalla tensione interfacciale σ_{ij} e dall'angolo di raccordo α . Quest'ultimo è l'angolo situato tra le tangenti a due superfici contigue.

Tettonica

Scienza che studia la struttura della crosta terrestre e i suoi movimenti.

VCHC

→ CHC volatili

Viscosità

Resistenza opposta da un liquido o da un gas

Xenobiotici

Sostanze non naturali

Zeoliti

Le zeoliti sono silicati d'alluminio alcalini di diversa composizione. Le si trova allo stato naturale, ma è anche possibile produrle per via di sintesi. La loro principale caratteristica è di possedere una rete molecolare cristallina a tre dimensioni che presenta un sistema di canali sottili (pori) di diametro definito e ripartiti regolarmente. Le zeoliti sono utilizzate come scambiatori ionici o come materiali adsorbenti (→ adsorbimento).

Zona insatura

Settore del sottosuolo non riempito di acqua sotterranea

Zona satura

Settore del sottosuolo riempito di acqua sotterranea

> Elenchi

Abbreviazioni

BAM

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Istituto federale per la ricerca e l'esame dei materiali, Germania)

BTEX

Cfr. cap. 1 del presente allegato

CFC

Clorofluorocarburi o clorofluorocarboni (cfr. cap. 1 del presente allegato)

CH₄

Metano

CHC

Idrocarburi clorurati (cfr. cap. 1 del presente allegato)

CO₂

Diossido di carbonio

DNAPL

«Dense non-aqueous phase liquid»; fase inquinante liquida di densità superiore a quella dell'acqua (ad es. fase di CHC)

i

Gradiente idraulico

IPA

Idrocarburi policiclici aromatici (cfr. cap. 1 del presente allegato)

k_f

Coefficiente di permeabilità idraulica (m/s)

LNAPL

«Light non-aqueous phase liquid»; fase inquinante liquida di densità inferiore a quella dell'acqua (ad es. fase di oli minerali o di aromi)

LPAmb

Legge sulla protezione dell'ambiente

n

Porosità

N₂

Azoto

Nm³

Metro cubo normalizzato (per la misura dei gas; in rapporto a condizioni standard di pressione e di temperatura)

O₂

Ossigeno

OSiti

Ordinanza sui siti inquinati

PCB

Bifenili policlorurati o policlorobifenili (cfr. cap. 1 del presente allegato)

S_{fluido}

Grado di saturazione

SIA

Società svizzera degli ingegneri e degli architetti

UFAFP

Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio (attualmente UFAM)

UFAM

Ufficio federale dell'ambiente

w

Tenore di acqua

α

Angolo di raccordo

σ_j

Tensione interfacciale

Figure

| | | |
|----------------|---|----|
| Fig. 1 | Rapporto tra oneri e utilità delle misure di risanamento | 12 |
| Fig. 2 | Classificazione delle tecniche di risanamento in base alle proprietà degli inquinanti | 15 |
| Fig. 3 | Panoramica dei procedimenti di risanamento in situ | 18 |
| Fig. 4 | Classificazione dei procedimenti idraulici | 25 |
| Fig. 5 | Albero decisionale per i procedimenti del prelievo di fasi | 26 |
| Fig. 6 | Albero decisionale per i procedimenti di risanamento idraulici con acqua | 28 |
| Fig. 7 | Principio del risanamento delle acque sotterranee mediante «pump and treat» | 29 |
| Fig. 8 | Principio dell'infiltrazione verticale | 31 |
| Fig. 9 | Principio della circolazione d'acqua sotterranea | 32 |
| Fig. 10 | Principio della barriera reattiva permeabile | 34 |
| Fig. 11 | Albero decisionale per il risanamento di siti contaminati da inquinanti facilmente volatili | 35 |
| Fig. 12 | Risanamento della zona insatura mediante aspirazione dell'aria interstiziale | 36 |
| Fig. 13 | Risanamento della zona satura mediante strippaggio in situ | 38 |
| Fig. 14 | Campi d'applicazione dei procedimenti di risanamento termico in situ | 40 |
| Fig. 15 | Iniezione di vapore e aria nella zona insatura e nella zona satura | 41 |

| | | |
|----------------|--|----|
| Fig. 16 | Mobilizzazione termica con fonti di calore stabili nella zona insatura | 42 |
| Fig. 17 | Albero decisionale per il risanamento di siti contaminati da inquinanti solubili in solventi | 44 |
| Fig. 18 | Albero decisionale per il risanamento mediante procedimenti biologici di ossidazione | 47 |
| Fig. 19 | Esempio di applicazione della bioventilazione | 48 |
| Fig. 20 | Schema del procedimento di risanamento chimico in situ | 52 |
| Fig. 21 | Flussi di massa e necessità di smaltimento dei rifiuti risultanti dal trattamento di acqua e aria di scarico | 58 |

Tabelle

| | | |
|---------------|--|----|
| Tab. 1 | Criteri di scelta per il risanamento in situ | 14 |
| Tab. 2 | Proprietà degli inquinanti tipici dei siti contaminati | 16 |
| Tab. 3 | Idoneità dei procedimenti in situ per i singoli inquinanti | 19 |
| Tab. 4 | Criteri di idoneità e di fattibilità dei procedimenti di risanamento passivo delle acque sotterranee | 33 |
| Tab. 5 | Possibilità d'impiego dei procedimenti di mobilizzazione | 39 |
| Tab. 6 | Degradabilità ed esperienza pratica di degradazione per gli inquinanti più frequenti | 45 |
| Tab. 7 | Efficacia delle tecniche di trattamento per le acque contaminate | 55 |

> Allegato

A1 **Faktenblätter zu den technischen In-situ-Verfahren**

Disponibile in tedesco e francese

A2 **Faktenblätter zu den Wasser- und Abluftbehandlungs-Verfahren**

Siehe separate PDF: www.bafu.admin.ch/uv-0834-d

A1 **Description des systèmes techniques in situ**

A2 **Systèmes de traitement des effluents liquides et gazeux**

Voir PDF séparé: www.bafu.admin.ch/uv-0834-f