

Environmentální aspekty průmyslových činností

(11)

Fyzikální, chemické a fyzikálně-chemické metody remediace

Ivan Holoubek, Andrea Lodolo

RECETOX, Masaryk University, Brno, CR

holoubek@recetox.muni.cz; <http://recetox.muni.cz>



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

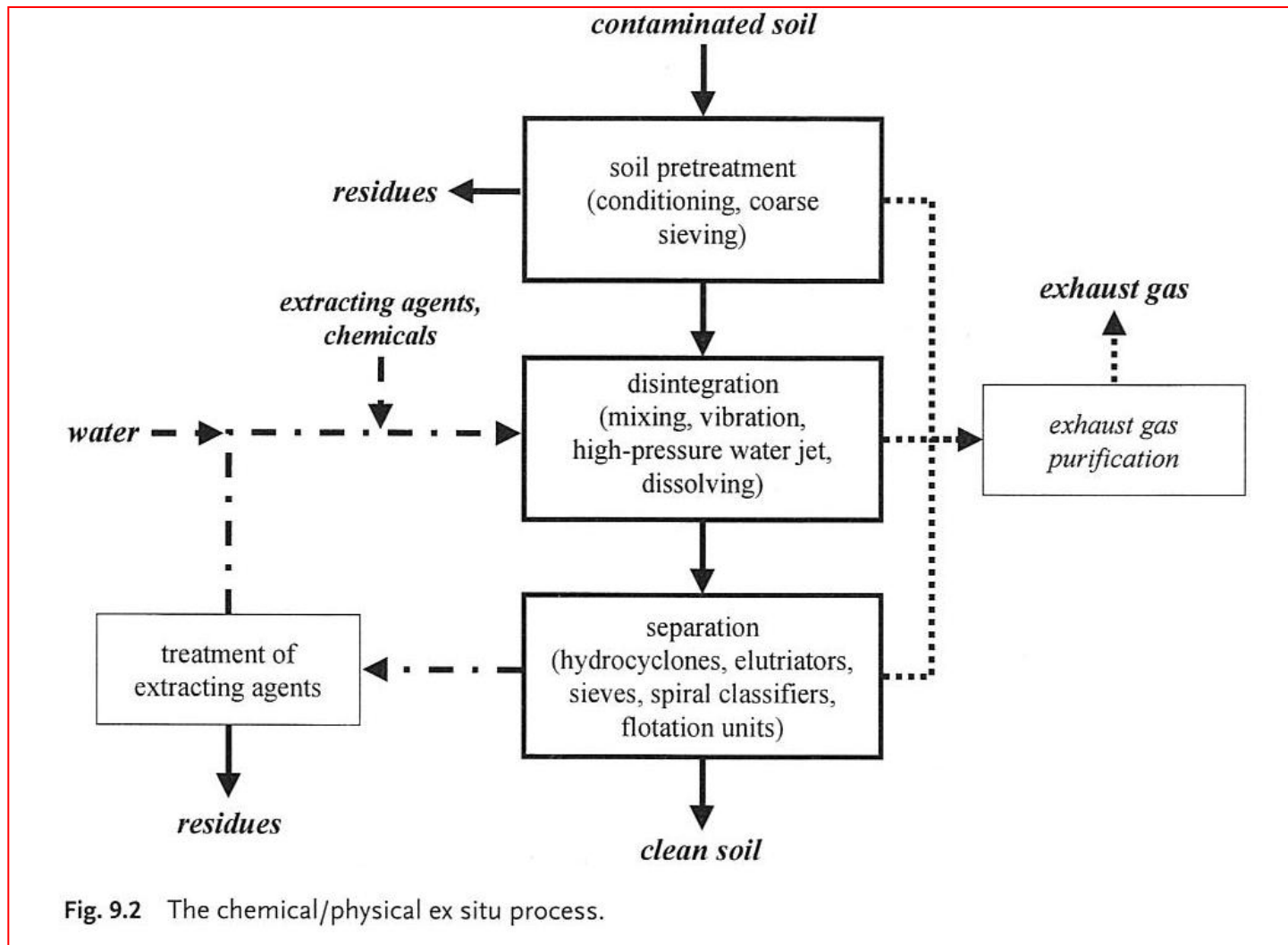


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Remediační technologie

- ↪ Termické
- ↪ Fyzikální, chemické, fyzikálně-chemické
- ↪ Biologické

Chemické/fyzikální ex situ procesy



Fyzikální a chemické technologie

- ↪ **Fyzikální procesy:** základem je fyzikální mechanismus fázového přenosu polutantů.
- ↪ **Polutanty jsou převáděny z tuhé fáze do plynné/parní fáze** (například provzdušnění půdy (soil venting), ...) nebo do kapalně fáze (například vymývání půd, ...).
- ↪ **Nedochází ke změně chemické struktury kontaminantu.**

Fyzikální procesy

Výhody:

- ↪ Rychlé provedení
- ↪ Využitelné pro široký rozsah kontaminantů
- ↪ Využitelné pro všechna media
- ↪ Lokalita nemusí být detailně charakterizována
- ↪ Relativně nižší cena

Fyzikální procesy

Omezení:

- ↪ Často se nejedná o čištění, ale pouze přesun polutantů
- ↪ Zbylá rezidua vyžadují další čištění
- ↪ Použití je omezeno místními charakteristikami

Fyzikální a chemické technologie

- ↪ **Chemické procesy:** chemická struktura (a chování) polutantu/ů je změněna chemickou reakcí.
- ↪ **Vznikají méně toxické, méně pohyblivé nebo lépe separovatelné produkty.**

Chemické procesy

Výhody:

- ↪ Rychlé provedení
- ↪ Využitelné pro široký rozsah kontaminantů
- ↪ Využitelné pro všechna média

Chemické procesy

Omezení:

- ↪ Detailní charakteristika zpracovávané lokality je nezbytná
- ↪ Použití je omezeno místními podmínkami
- ↪ Rezidua musí být čištěna dalšími postupy

Fyzikální a chemické technologie

- ↪ Systémy půdních uzavřených zásobníků (*in or ex*)
- ↪ Chemická dehalogenace, Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD) (*ex*)
- ↪ Elektrokinetické postupy (*in*)
- ↪ Plynná extrakce (SVE) a podpořená SVE (*in or ex*)
- ↪ Vyplachování půd (*in*)
- ↪ Vymývání půd (*ex*)
- ↪ Superkritická vodní oxidace (*ex*)
- ↪ Extrakce rozpouštědlem (*ex*)
- ↪ Solvátované elektrony (*ex*)
- ↪ Detoxikace slunečním zářením (*ex*)
- ↪ Solidifikace/stabilizace (*in or ex*)
- ↪ Pasivní stěny (*in*)

Fyzikální a chemické technologie

Technologie

Systémy uzavřených půdních zásodníků (*in or ex*)

Chemická dehalogenace, BCD (*ex*)

Elektrokinetické (*in*)

Plynná extrakce (SVE) (*in or ex*)

Půdní vyplachování (*in*)

Půdní vymývání (*ex*)

Superkritická vodní oxidace (*ex*)

Extrakce rozpouštědlem (*ex*)

Solvatované elektrony (*ex*)

Solární detoxikace (*ex*)

Solidifikace/stabilizace (*in or ex*)

Hlavní cílové kontaminanty

Všechny typy kontaminantů

X-VOCs, X-SVOCs, PCBs, Diox/Fur.

Těžké kovy (HMs)

X- (VOCs, SVOCs)

X- (VOCs, SVOCs), PAHs, HMs

X- (VOCs, SVOCs), PAHs, HMs, PCBs, Pest.

X- (VOCs, SVOCs), PCBs, Pest.

X- (VOCs, SVOCs), PAHs, H.M., PCBs, Pest.,
Diox/Fur.

X-VOCs, X-SVOCs, PCBs, Diox/Fur., Pest.

X- (VOCs, SVOCs), PAHs, H.M., PCBs, Pest.,
Diox/Fur.

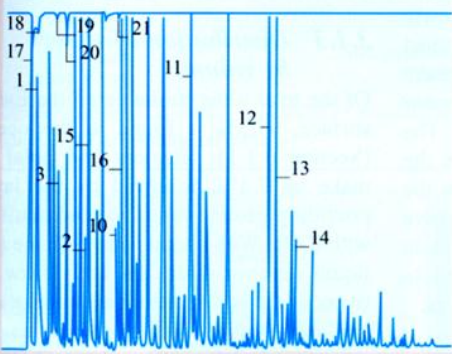
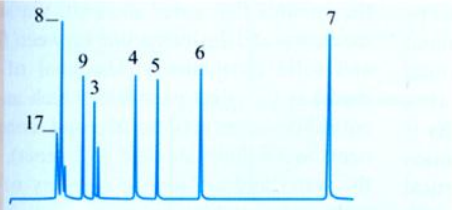
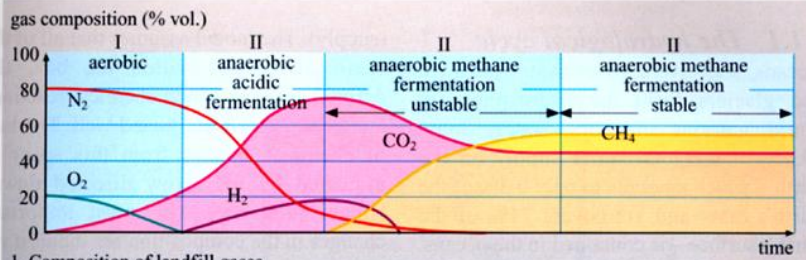
HMs, PAHs, PCBs, anorg.

Fyzikální a chemické technologie

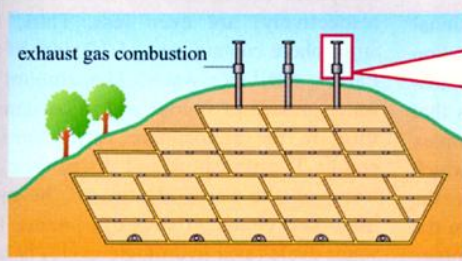
Technology	Cost (US\$/ton)	Clean-up time*
Landfill cap systems (<i>in or ex</i>)	N. A.	N. A.
Chemical Dehalogenation (<i>ex</i>)	200-500	< 6 months
Electrokinetic (<i>in</i>)	65-195	6 to 12 months
Soil vapour extraction (SVE) (<i>in or ex</i>)	20-130	6 to 12 months or >
Soil Flushing (<i>in</i>)	75-210	6 to 12 months
Soil Washing (<i>ex</i>)	140-400	6 to 12 months
Supercritical water oxidation (<i>ex</i>)	150-300	< 6 months
Solvent extraction (<i>ex</i>)	150-450	6 to 12 months
Solvated electron (<i>ex</i>)	300-500	< 6 months
Solar detoxification (<i>ex</i>)	N. A.	6 to 12 months
Solidification/stabilization (<i>in or ex</i>)	75-200	6 to 12 months or >

(*) Time referred to a standard mass of about 20000 tons

Fyzikální a chemické technologie



2. Gas chromatograms



3. Low-pollution flaring of landfill gas

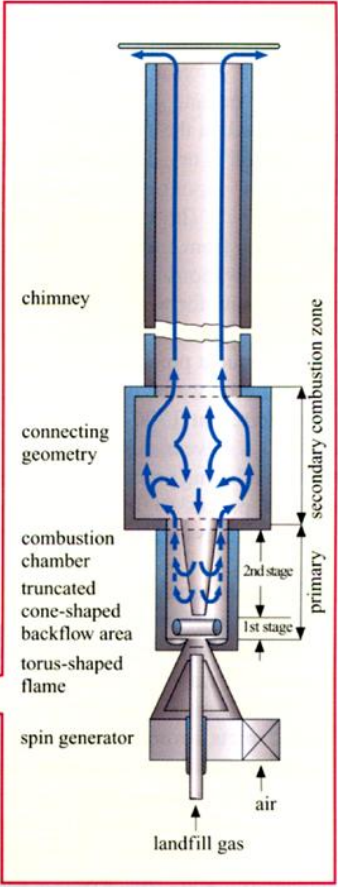


Figure 2.5.12 Landfill gases and low-pollution combustion

Fyzikální a chemické technologie

- ↪ Plyná extrakce (extrakce půdních par) (SVE) s podporou
- ↪ Vyplachování půd
- ↪ Vymývání půd
- ↪ Extrakce rozpouštědlem
- ↪ Pasivní ponorné stěny
- ↪ Dechlorace: Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD)
- ↪ Elektrokinetické procesy (elektrorekultivace)

Plynná extrakce

Cílové kontaminanty:

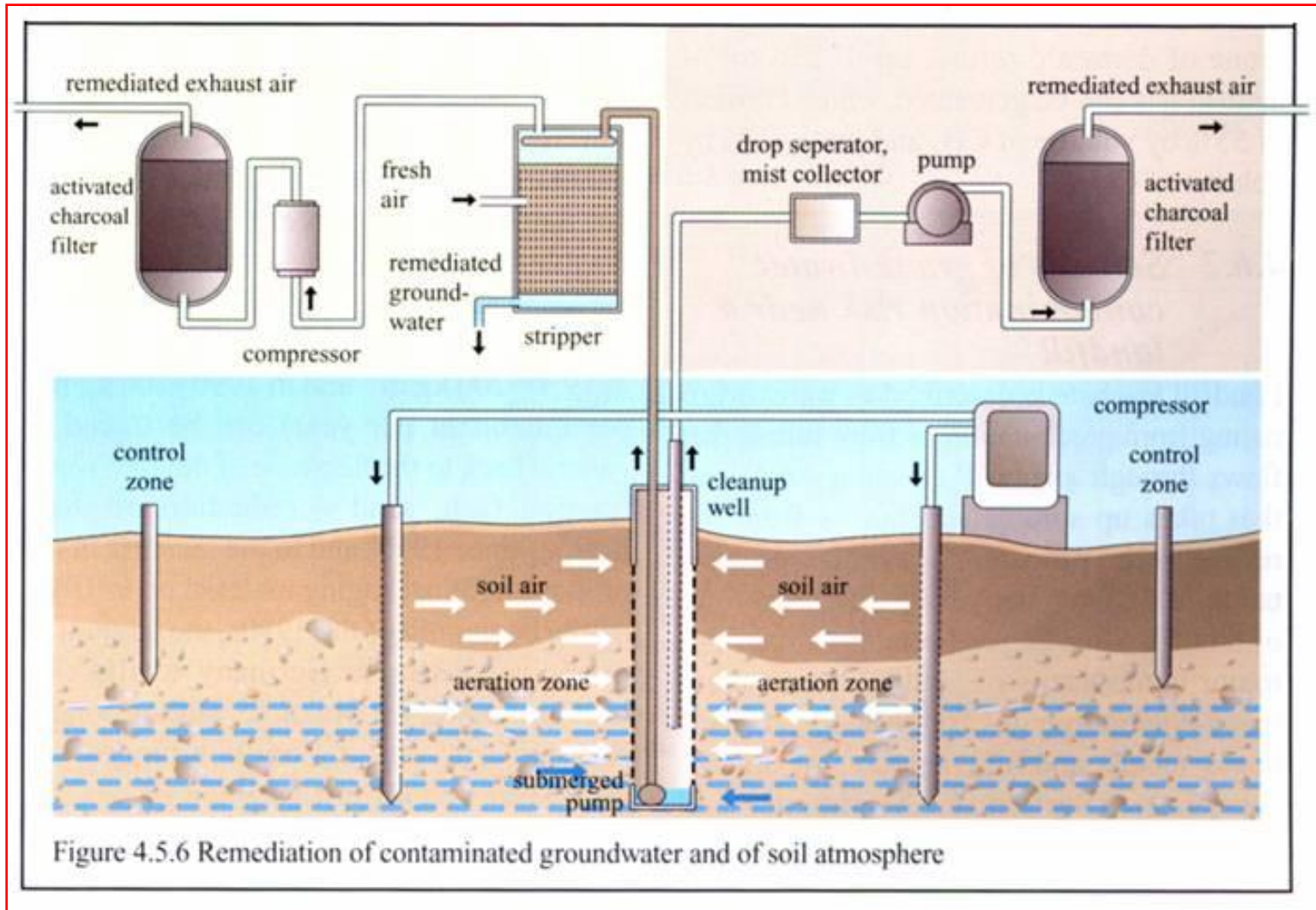
↪ VOCs

↪ SVOCs

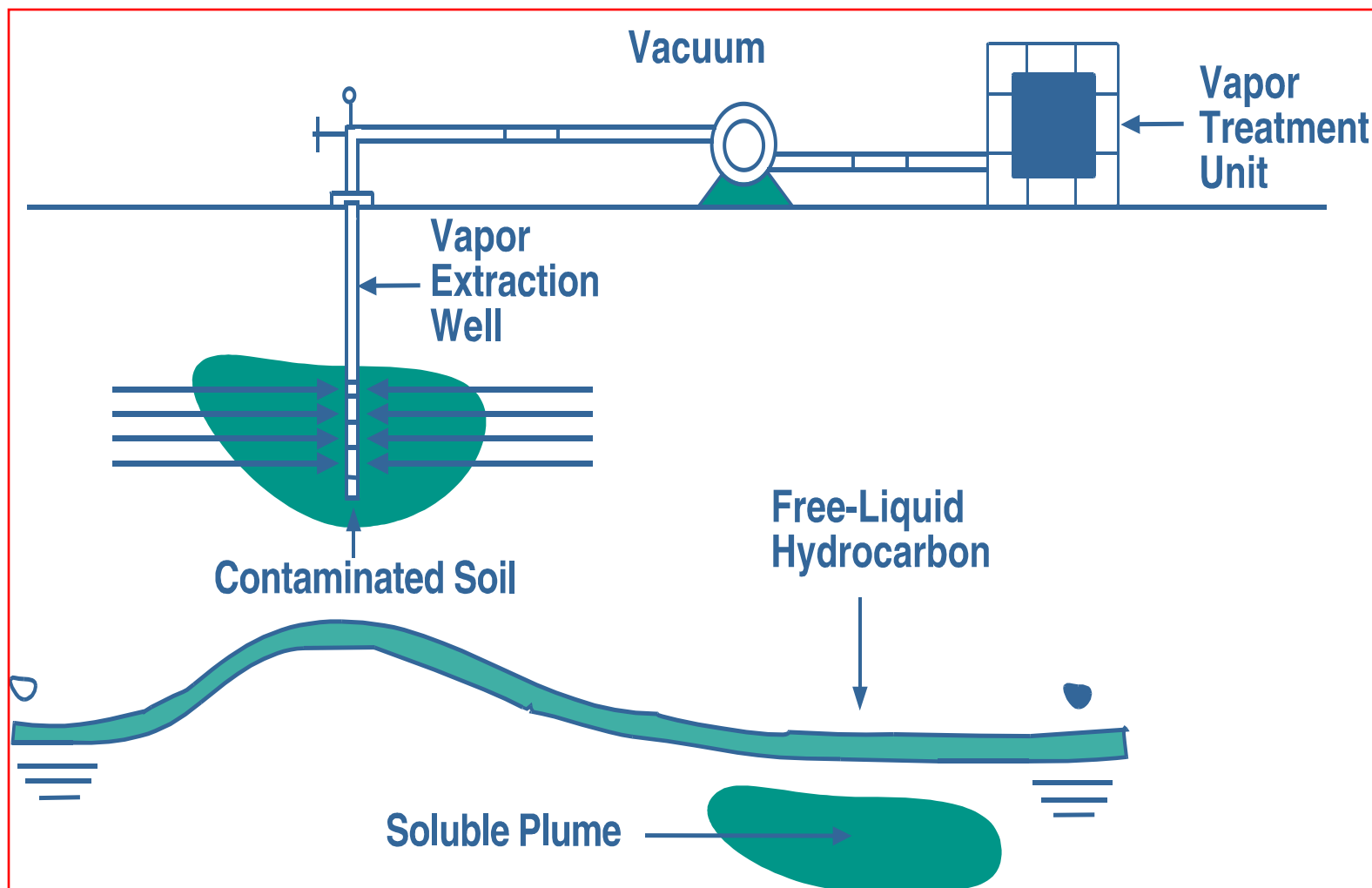
↪ X- VOCs

↪ X- SVOCs

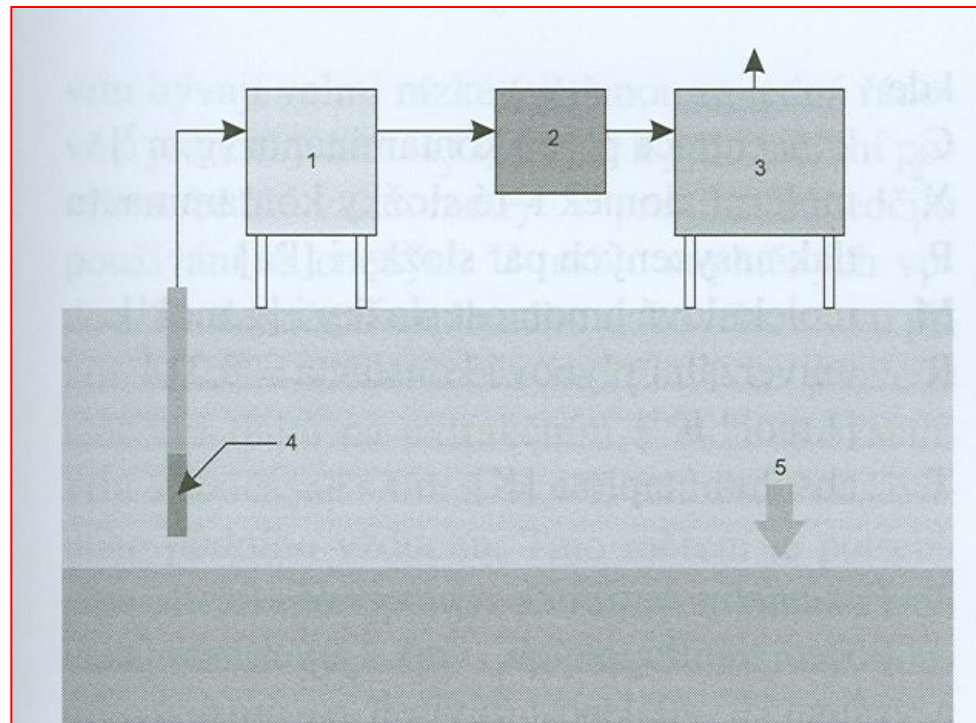
System plynné extrakce



System plynne extrakce



System plynne extrakce



Obr. č. 2.1.2-4 Schéma základního uspořádání ventingu (F. Pastuszek)

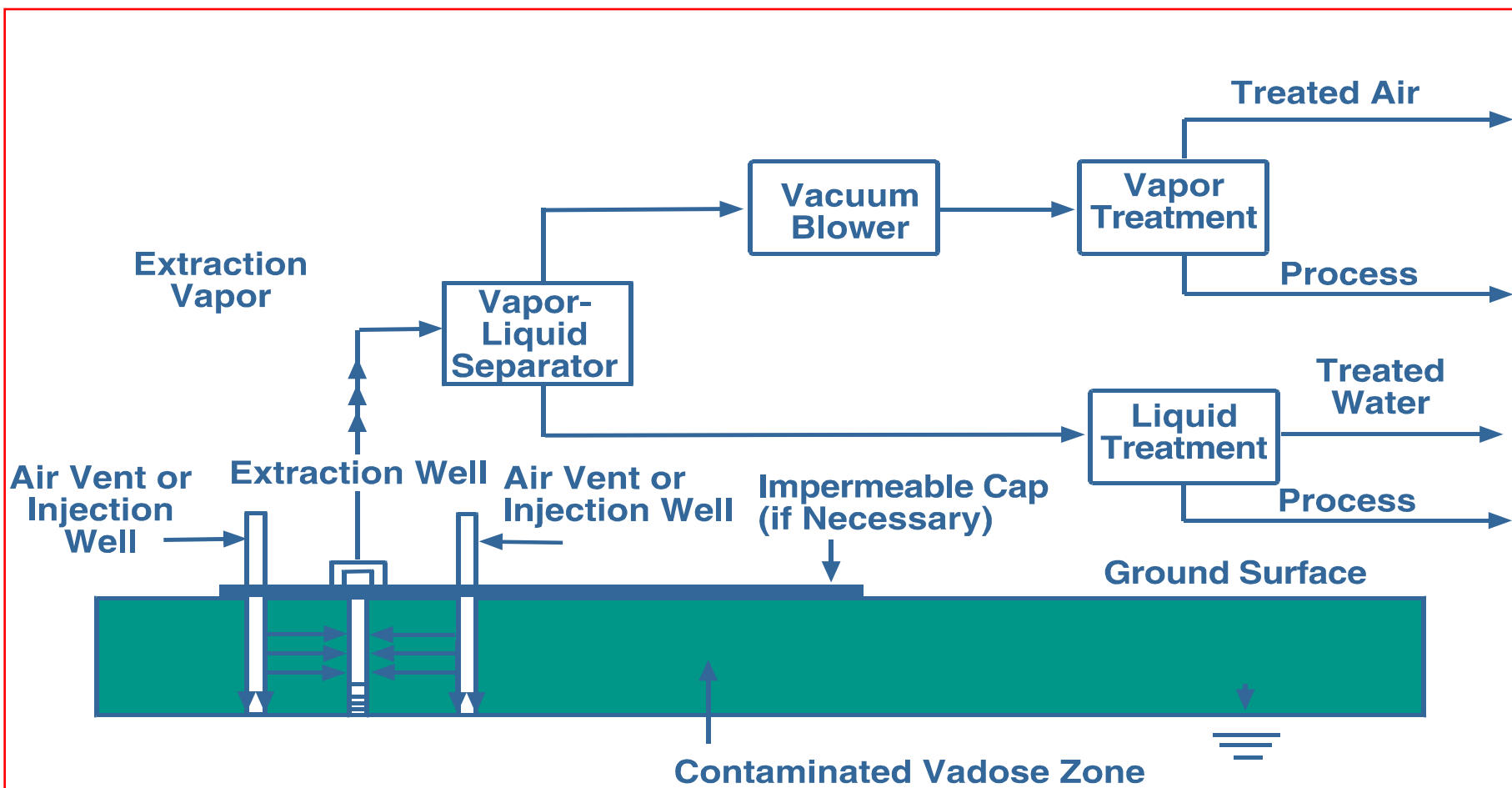
1 – separátor vlhkosti z odsávaného vzduchu, 2 – vývěva, 3 – dekontaminační jednotka, 4 – ventingový extrakční vrt, 5 – hladina podzemní vody

System plynne ekstrakce

In situ proces

- ↪ Fyzikální separace a vytěžení kontaminantů
- ↪ Vytěkávání kontaminantů z půd
- ↪ Použití vakua a série extrakčních vrtů pro odstranění par
- ↪ SVE má různé názvy (provzdušnění půd (soil venting), ...)

Schéma systému plynné extrakce



Hlavní faktory ovlivňující plynnou extrakci

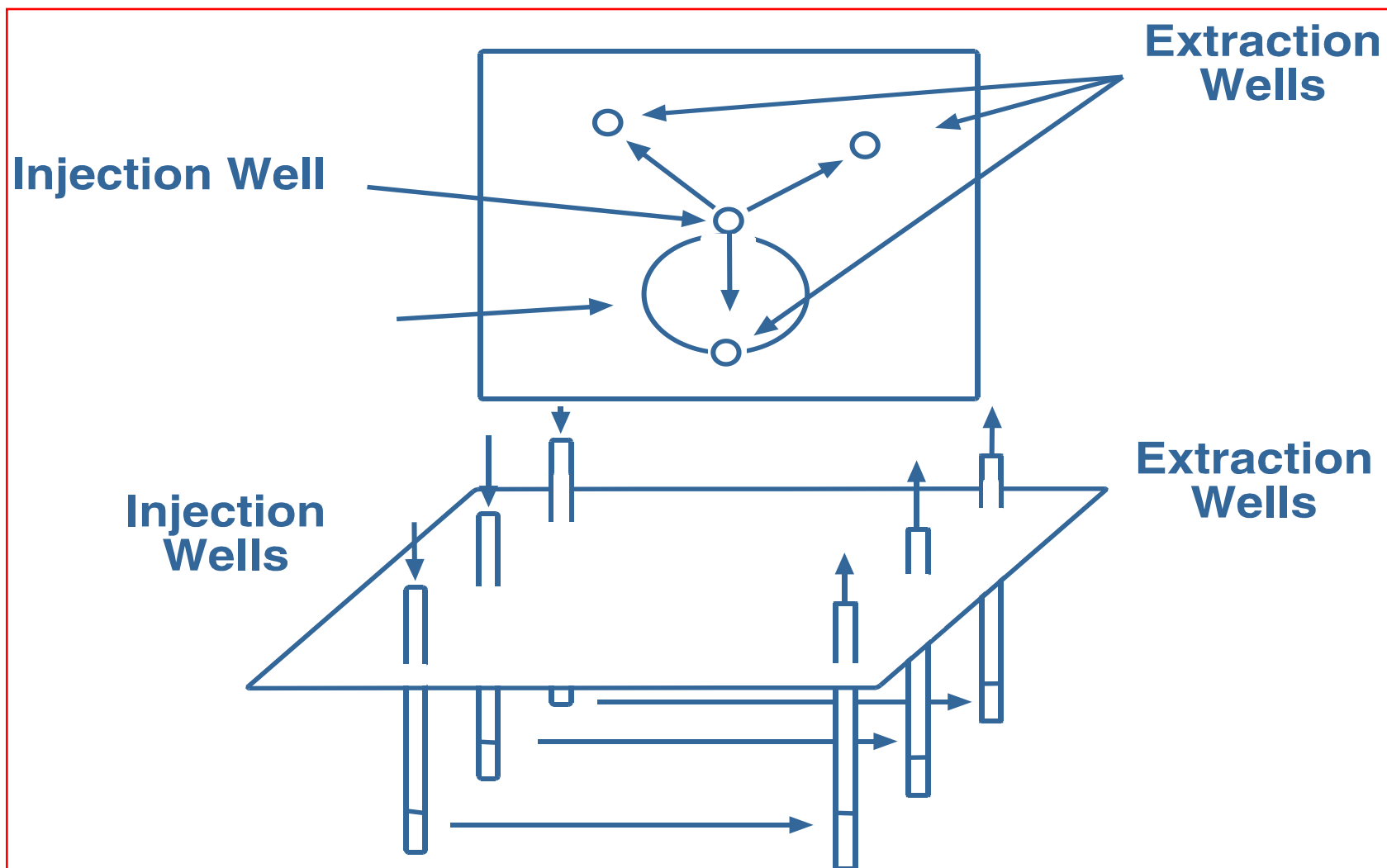
Faktory ovlivňující použité vakuum

- ↪ Půdní vlhkost
- ↪ Porozita půdy
- ↪ Půdní pneumatická permeabilita
- ↪ Stratigrafie lokality

Faktory ovlivňující pohyb par

- ↪ Těkavost kontaminantu
- ↪ Obsah organické hmoty v půdě
- ↪ Půdní vlhkost

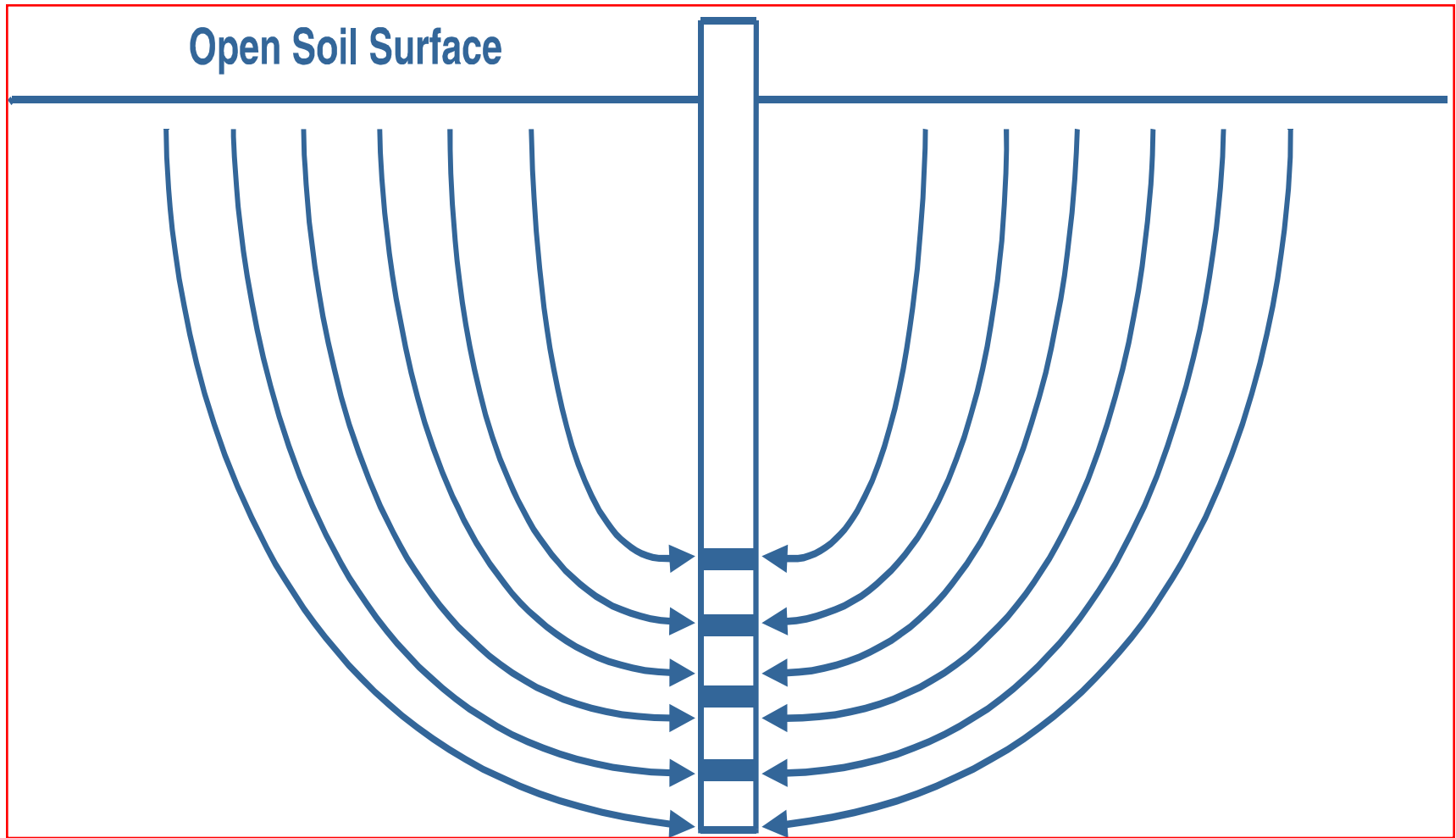
Konfigurace půdní provzdušňovací vrtu



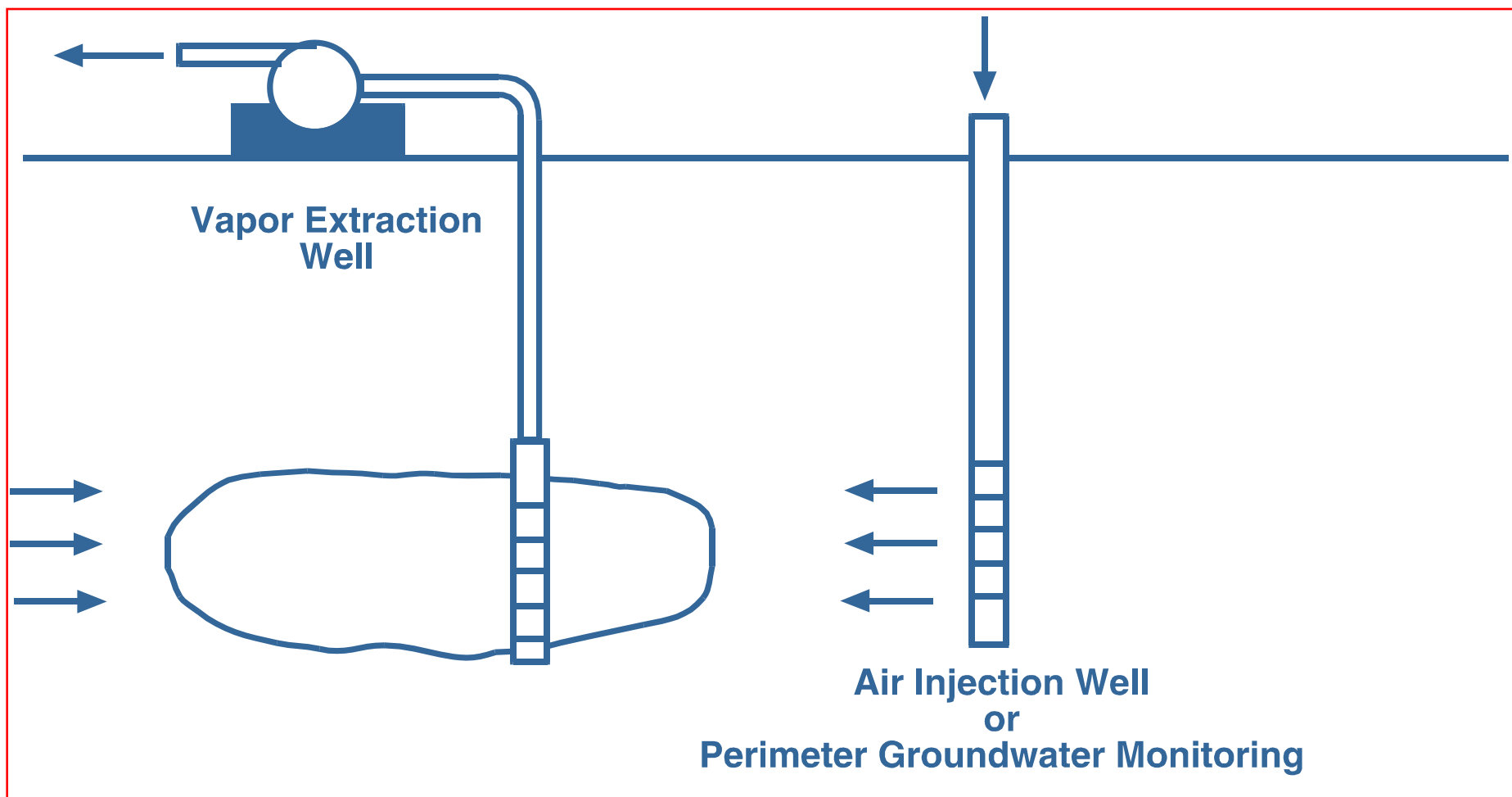
Možnosti SVE vhánění vzduchu

- ↪ Vhánění vzduchu v podzemí
- ↪ Aktivní vrty pro vhánění vzduchu
- ↪ Pasivní vrty pro vhánění vzduchu

Vhánění vzduchu v podzemí



Aktivní vrty pro vhánění vzduchu



Plynná extrakce

Aplikace:



Půdní vlastnosti ovlivňující SVE

- Propustnost, nesaturované půdy, jako jsou písky, štěrky a bahna jsou nejvhodnější



Těkavé organické látky jsou nejlépe extrahovatelné touto metodou

Provedení systému plynné extrakce

Vliv zvětrávání:

- ↪ SVE ovlivňuje složení reziduálního produktu
- ↪ Tlak par klesá v čase
- ↪ Rozpustné složky se rozpouštějí rychleji
- ↪ Složení par se mění směrem k těžším koncovým frakcím

Plynná extrakce

Specifické výhody:

- ↪ Nevyžaduje vybagrování
- ↪ Je relativně jednoduchá na instalaci
- ↪ Je využitelná pro většinu těkavých kontaminantů
- ↪ Vyznačuje se flexibilitou designu umožňující rychle změny v provádění
- ↪ Může být využita ve spojení s dalšími remediačními technologiemi
- ↪ Prováděcí ceny jsou nižší ve srovnání s odstraněním například vybagrováním

Plynná extrakce

Specifická omezení:

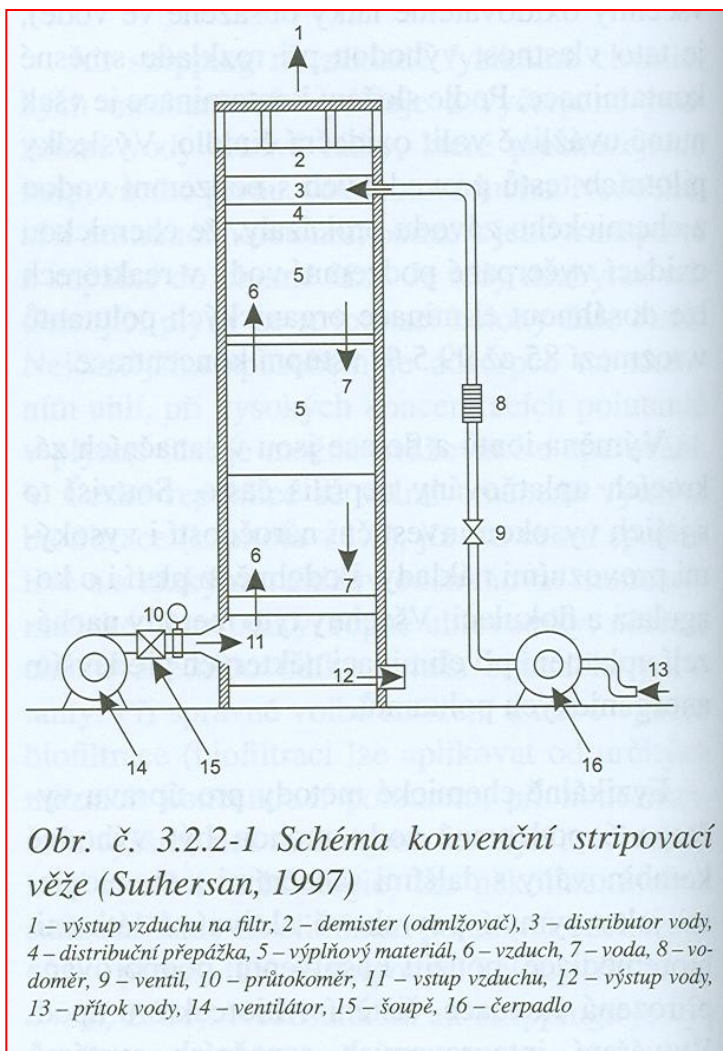
- ↪ Využitelnost je omezena na těkavé látky
- ↪ Půda musí být propustná a relativně homogenní
- ↪ Nadbytek půdní vlhkosti musí být odstraněn a zpracován
- ↪ Úplný provozní design vyžaduje pilotní studii proveditelnosti

Plynná extrakce

Proveditelnost:

- ↪ Proveditelnost SVE je snížena pokud naléhavé limity na úroveň koncentrace musí být dosažena v krátkém čase
- ↪ Účinnost SVE je úměrná hladinám reziduí

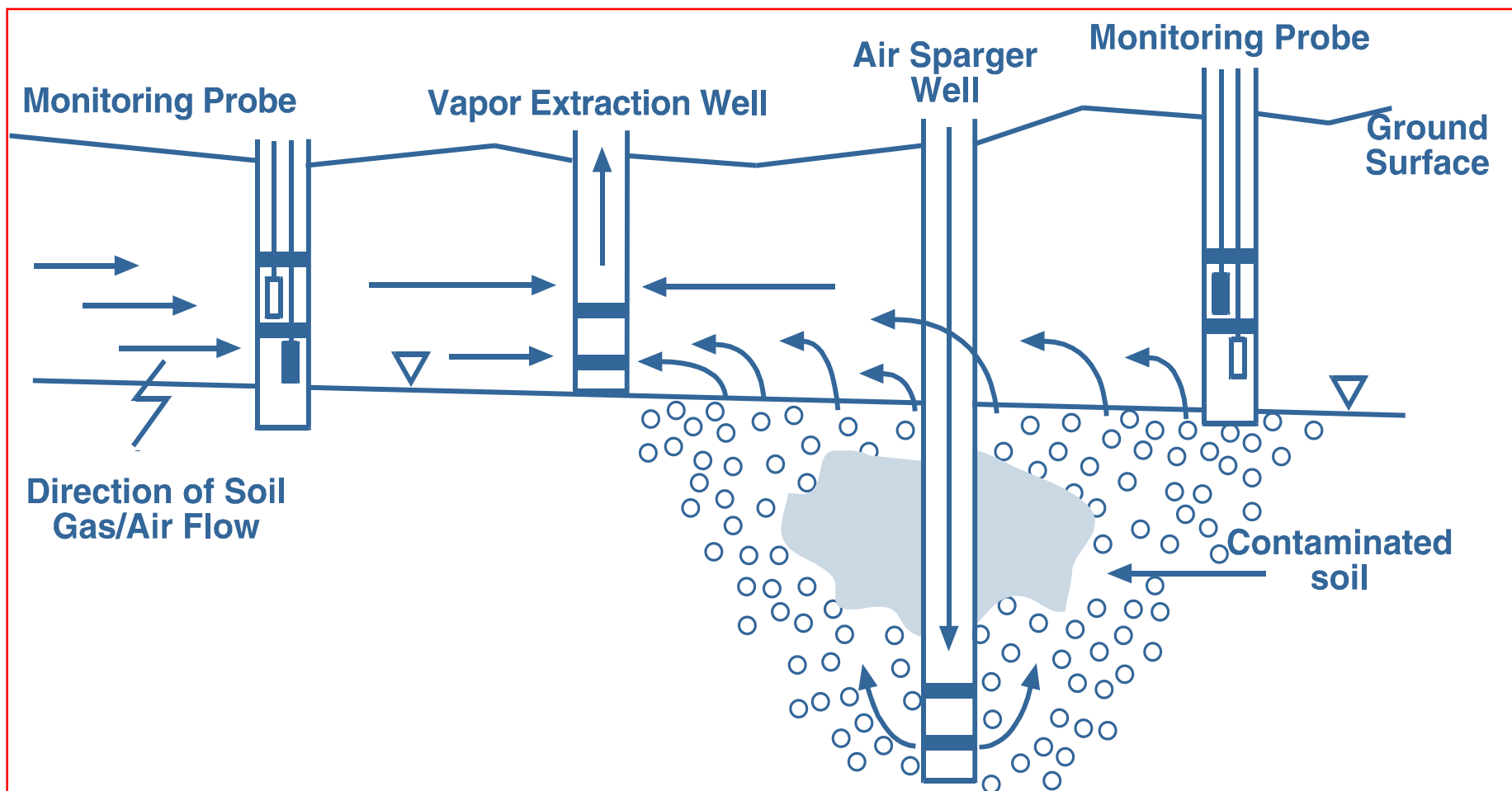
Stripovací věž



SVE s podporou

- ↪ Air Sparging
- ↪ Přímé vrtání
- ↪ Dvoufázová extrakce
- ↪ Pneumatické a hydraulické lámání
- ↪ Termické procesy

Air sparging – idealizovaný systém



Air sparging

Předpoklady:

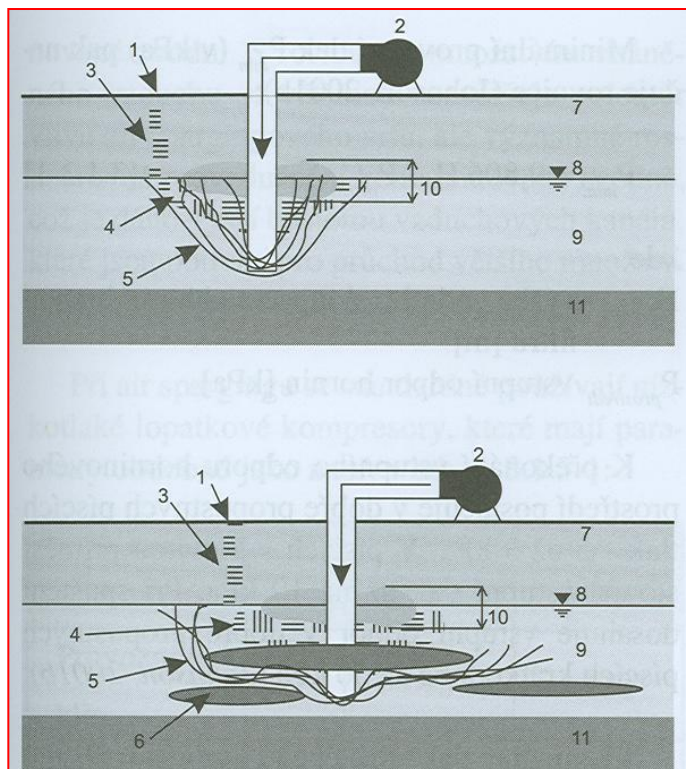
- ↪ Vysoký “tlak vháněného vzduchu” přemístuje vodu ze saturované zóny
- ↪ Vháněný vzduch jde cestou nejmenšího odporu
- ↪ Konstantní tlak udržuje integritu kanálu vzdušné fáze

Air sparging

Podmínky pro účinnou aplikaci:

- ↪ Neomezené zvodně, jenž dovolují vhánět vzduch do výpustí
- ↪ Dostatečný proud vzduchu pro odstranění vody a vytvoření cest
- ↪ Relativně nerozpustné kontaminanty jsou ideální cíl

Air sparging



Obr. č. 3.1.3-1 Vliv nehomogenit geologického profilu na distribuci vzduchu při air spargingu (NAVFAC, 2001)

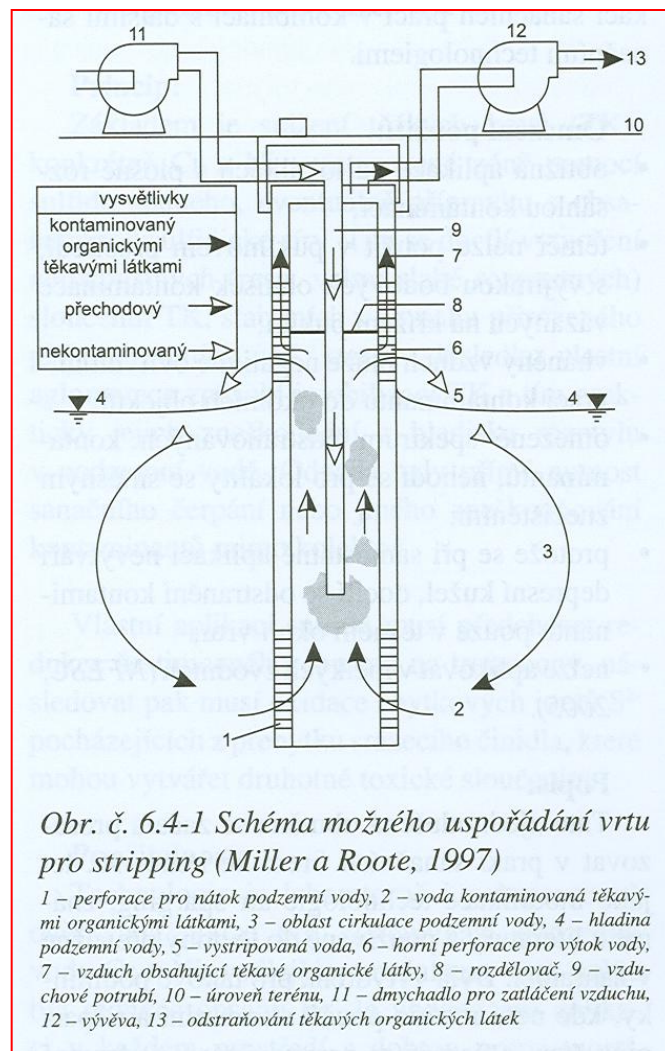
1 – únik ropných látek, 2 – vtláčení vzduchu, 3 – zbytková kontaminace, 4 – rozpuštěný kontaminant, 5 – vzduchové kanály, 6 – nepropustné vrstvy, 7 – nenasycená zóna, 8 – hladina podzemní vody, 9 – nasycená zóna, 10 – silně kontaminovaná zóna, 11 – nepropustná vrstva

Stripping ve vrtu

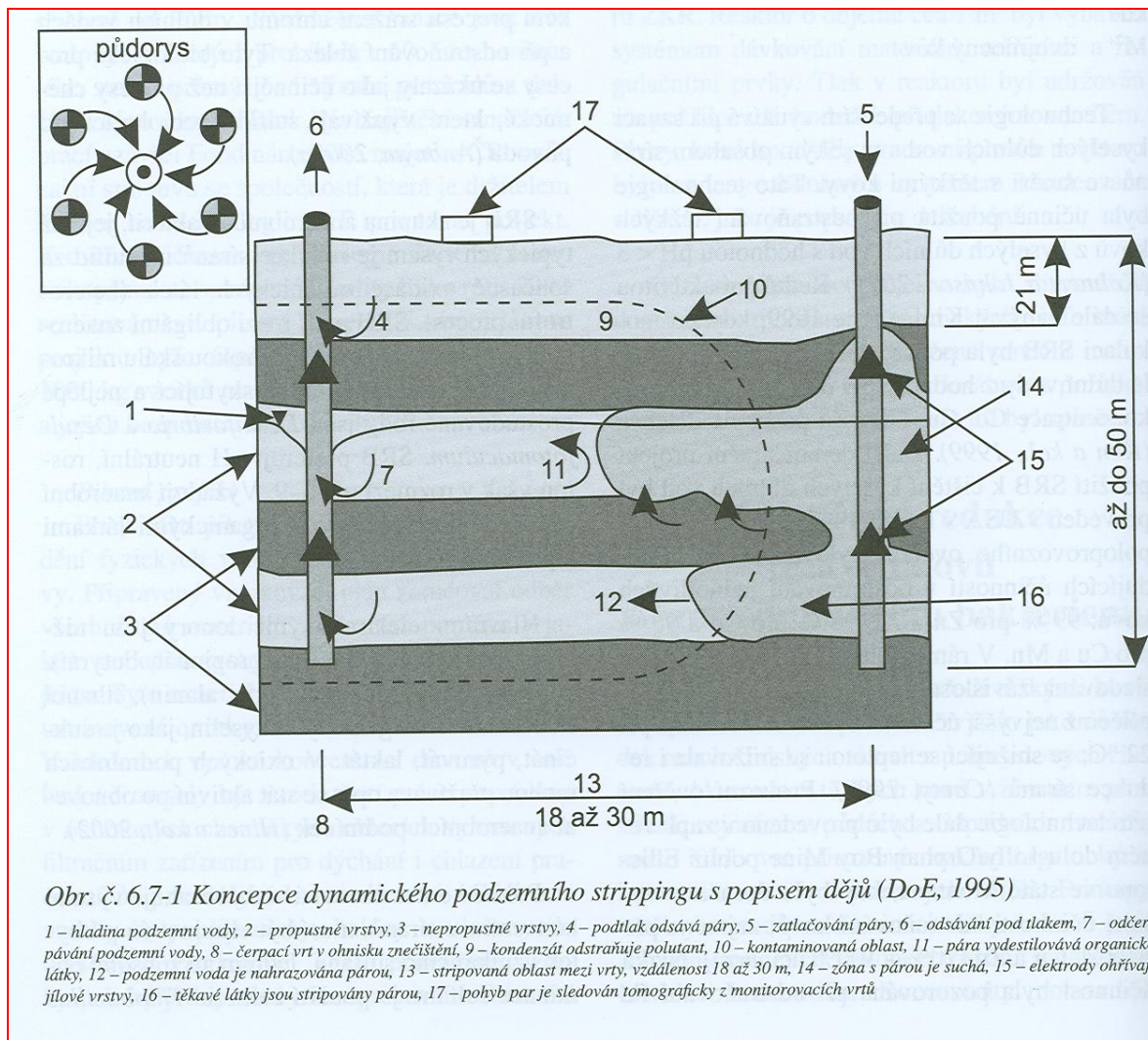
6.4 Stripping ve vrtu

Princip:

Jde o modifikaci metody air sparging bez čerpání podzemní vody, v podstatě o stripping přímo ve vrtech. Do satureované zóny se dopravuje vzduch vháněním do sanačního vrtu, přičemž z téhož vrtu se vzduch po průchodu podzemní vodou i odsává.



Koncepce dynamického podzemního strippingu



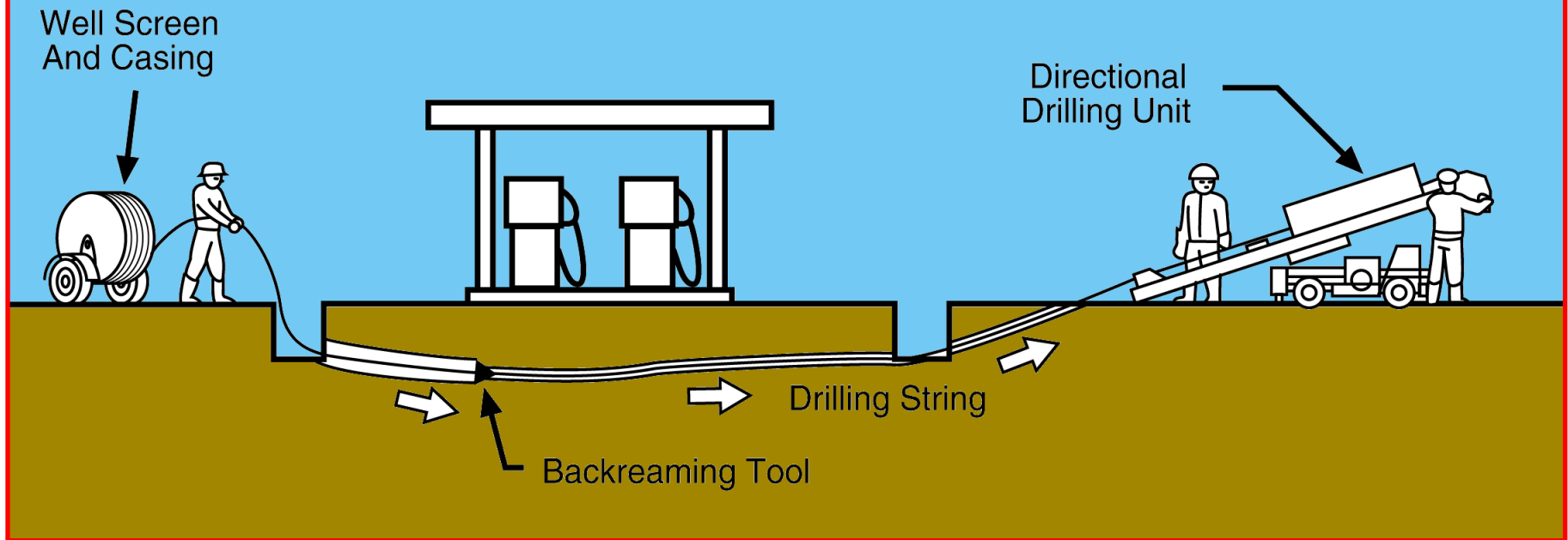
SVE – přímé vhánění

Aplikační výhody:

- ↪ Umožňuje SVE aplikace v oblastech kde není možné provádět vertikální vrtání
- ↪ Koncentruje remediaci podél geometrie kontaminované zóny
- ↪ Minimalizuje křížné kontaminace podpovrchových zón
- ↪ Kombinuje funkce dvou technologií
- ↪ Eliminuje potřebu mnohonásobných vertikálních vrtů
- ↪ Redukuje čas čištění

SVE – přímé vhánění

BACKREAMING AND WELL CASING INSTALLATION

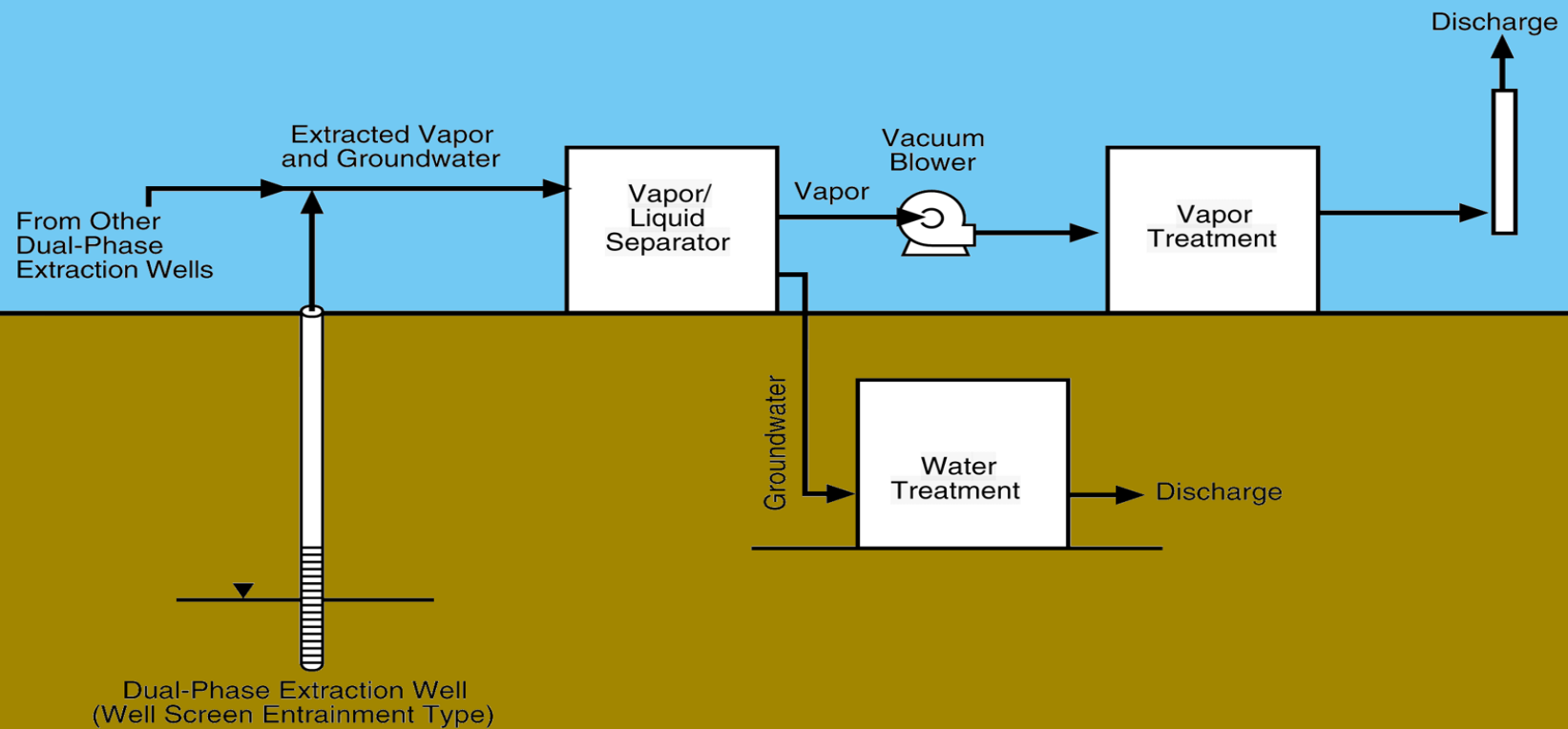


SVE – dvoufázová extrakce

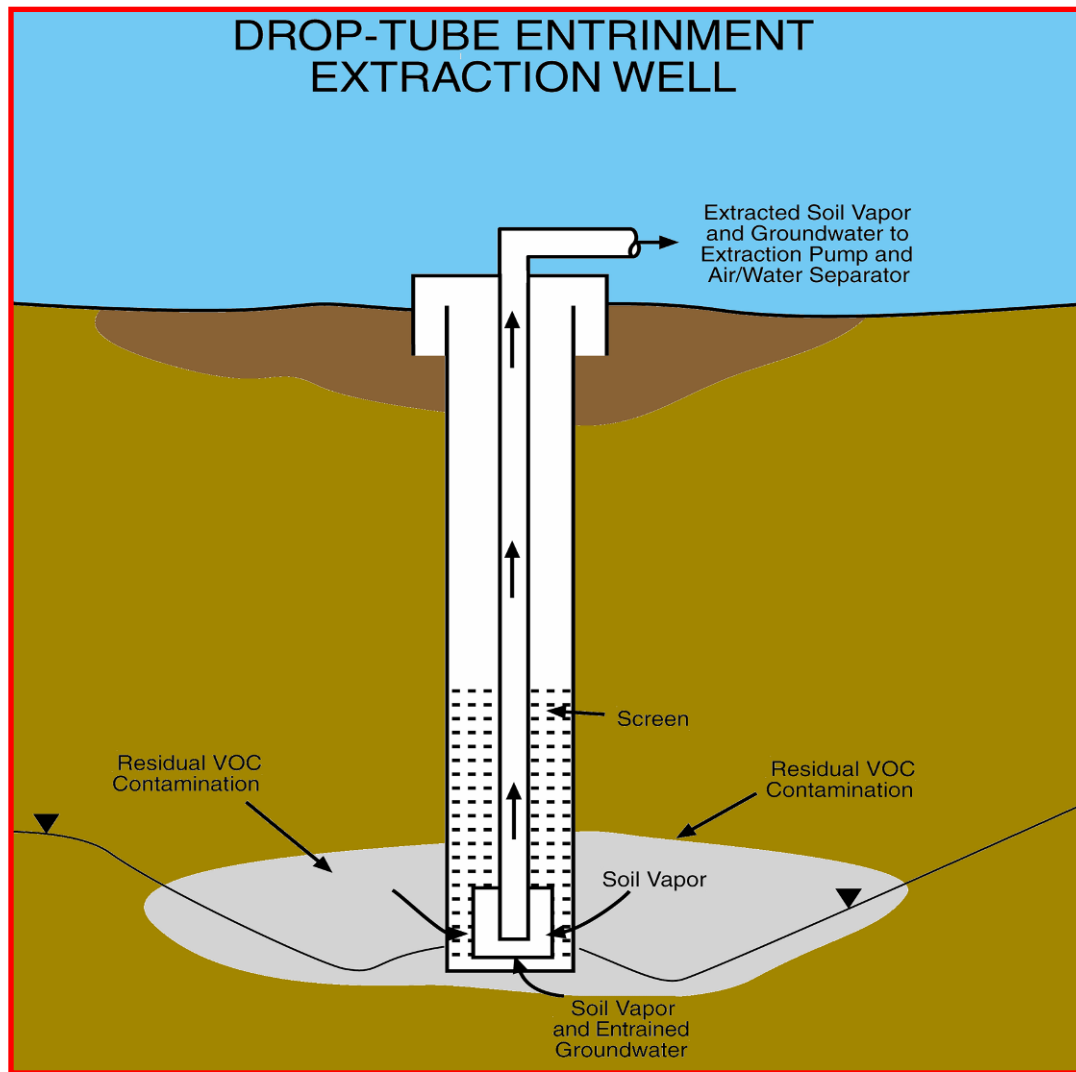
- ↪ Odstraňuje podzemní vodu a páry kontaminantů ze stejného vrtu
- ↪ Fáze jsou extrahovány použitím vakuové pumpy
- ↪ Podzemní voda a páry jsou separovány a zpracovány
- ↪ Hladina podzemní vody snižuje kontaminaci půdy pro *in situ* zpracování

SVE – dvoufázová extrakce

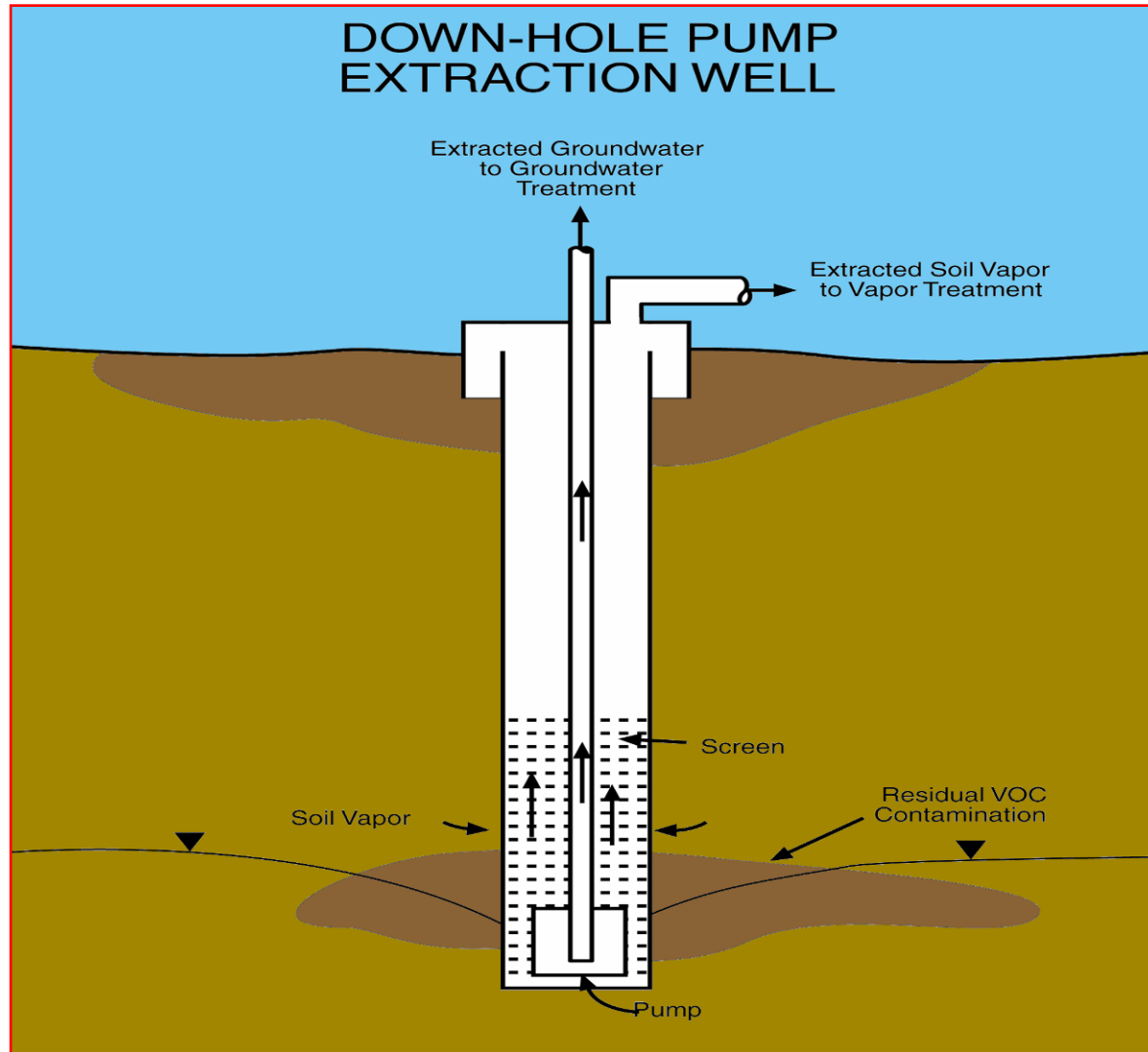
SCHEMATIC OF DUAL-PHASE EXTRACTION SYSTEMS



SVE – dvoufázová extrakce

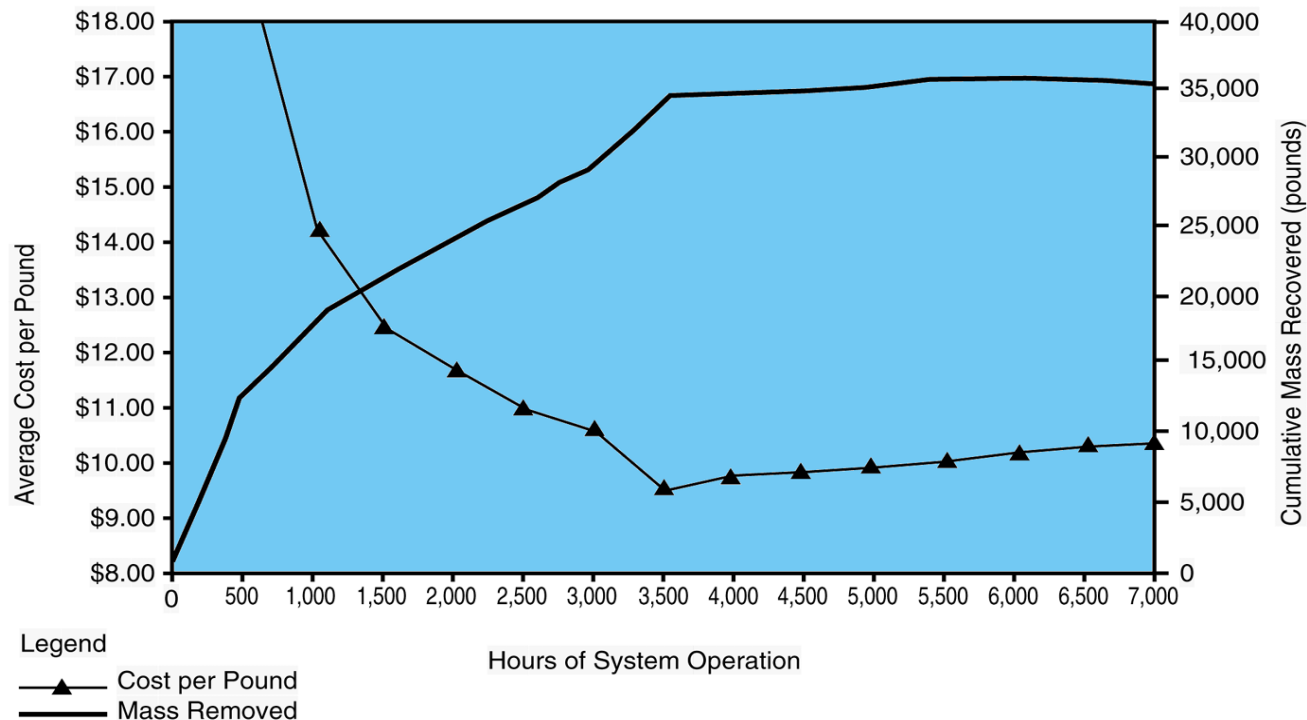


SVE – dvoufázová extrakce



SVE – dvoufázová extrakce

EXTRACTION SYSTEM PERFORMANCE

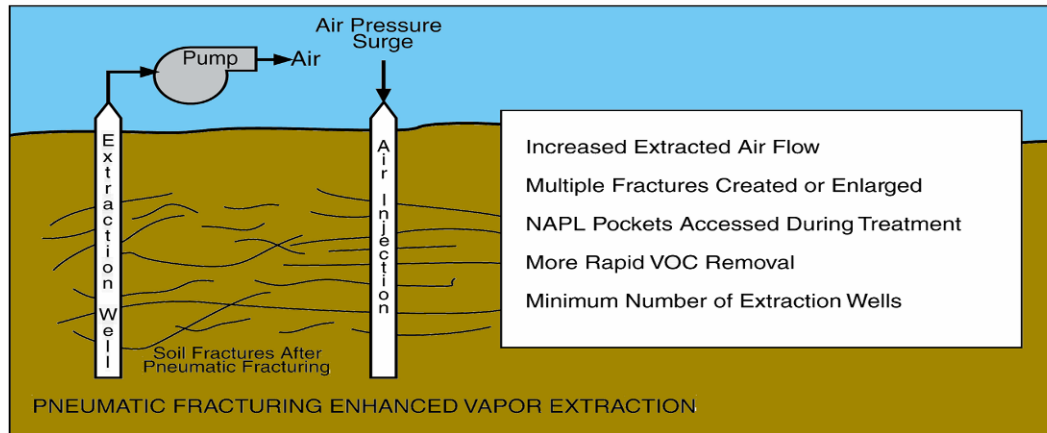
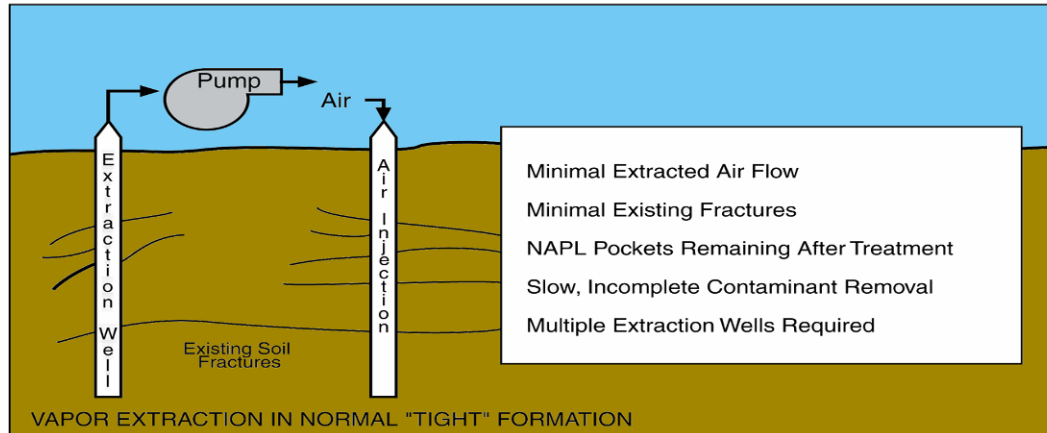


SVE – proces pneumatického a hydraulického lámání

- ↪ Vytváří trhliny a zlomy v málo propustných půdách
- ↪ Umožňuje provádění SVE v bahnitých jílových půdách
- ↪ Pneumatický proces lámání jílovité půdy
- ↪ Hydraulický proces vytváří zlomy v písčitých výplních

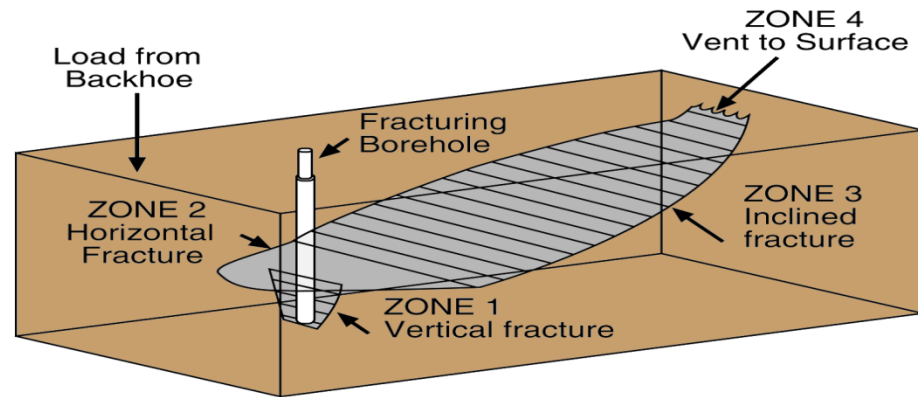
SVE – proces pneumatického a hydraulického lámání

Schematic of Pneumatic Fracturing Enhanced Vapor Extraction

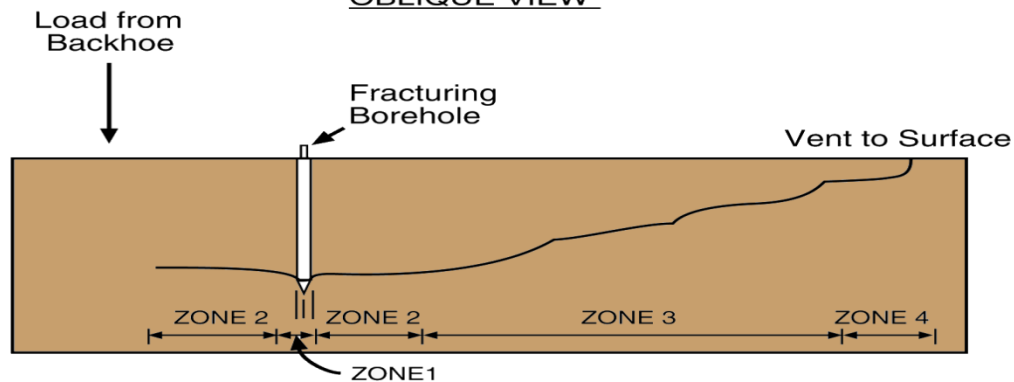


SVE – proces pneumatického a hydraulického lámání

SCHEMATIC OF HYDRAULIC FRACTURING



OBLIQUE VIEW



CROSS SECTION ALONG MAJOR AXIS OF THE FRACTURE

SVE – termické podpůrné procesy

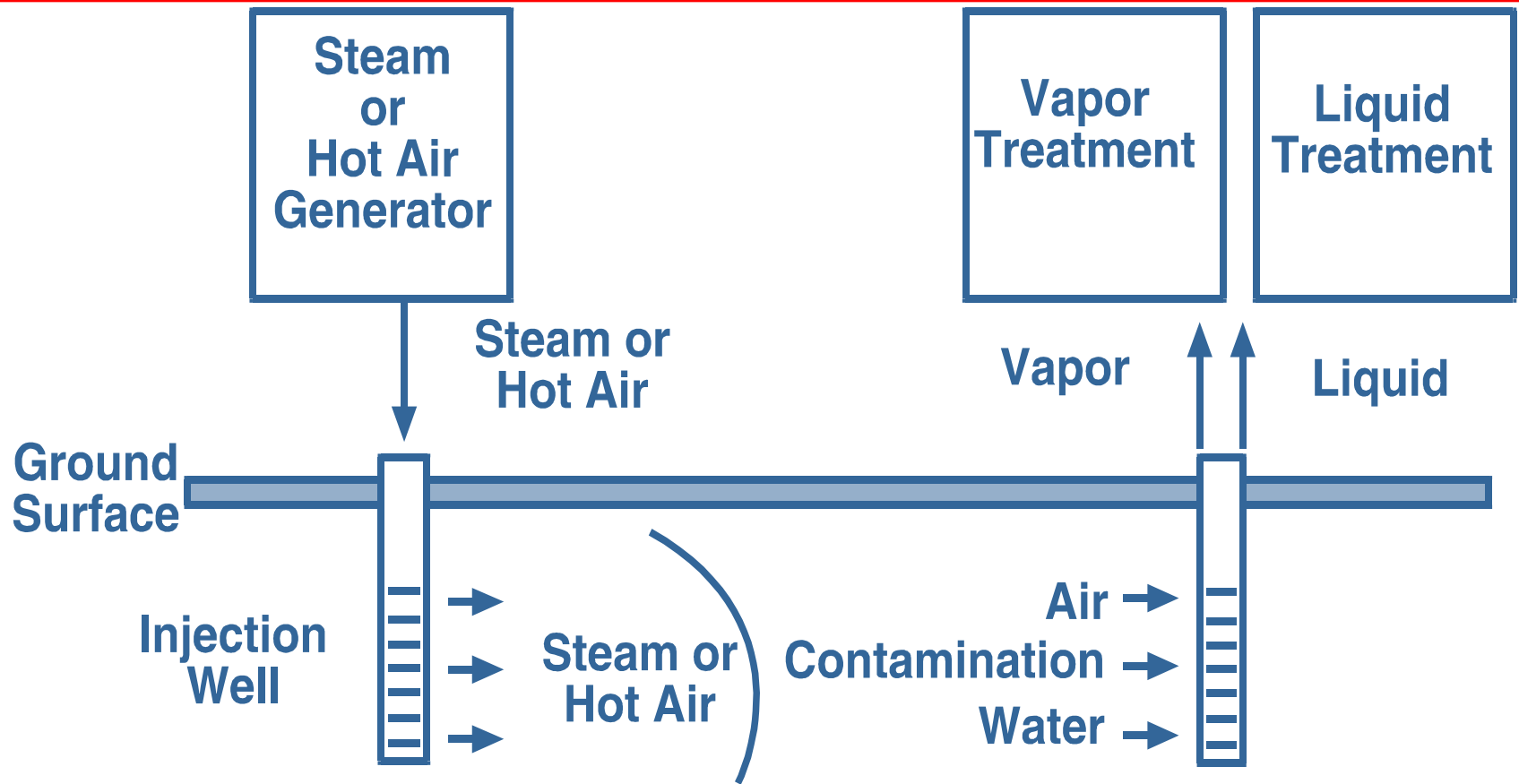
- ↪ Teplo pod povrchem zvyšuje těkavost kontaminantů
- ↪ Rozšiřuje aplikovatelnost SVE o méně těkavé kontaminanty
- ↪ Zahrnuje různé techniky pro zavedení tepla (vhánění páry, vhánění horkého vzduchu, radio-frekvenční zahřívání, vodivostní zahřívání a další)

SVE – termické podpůrné procesy

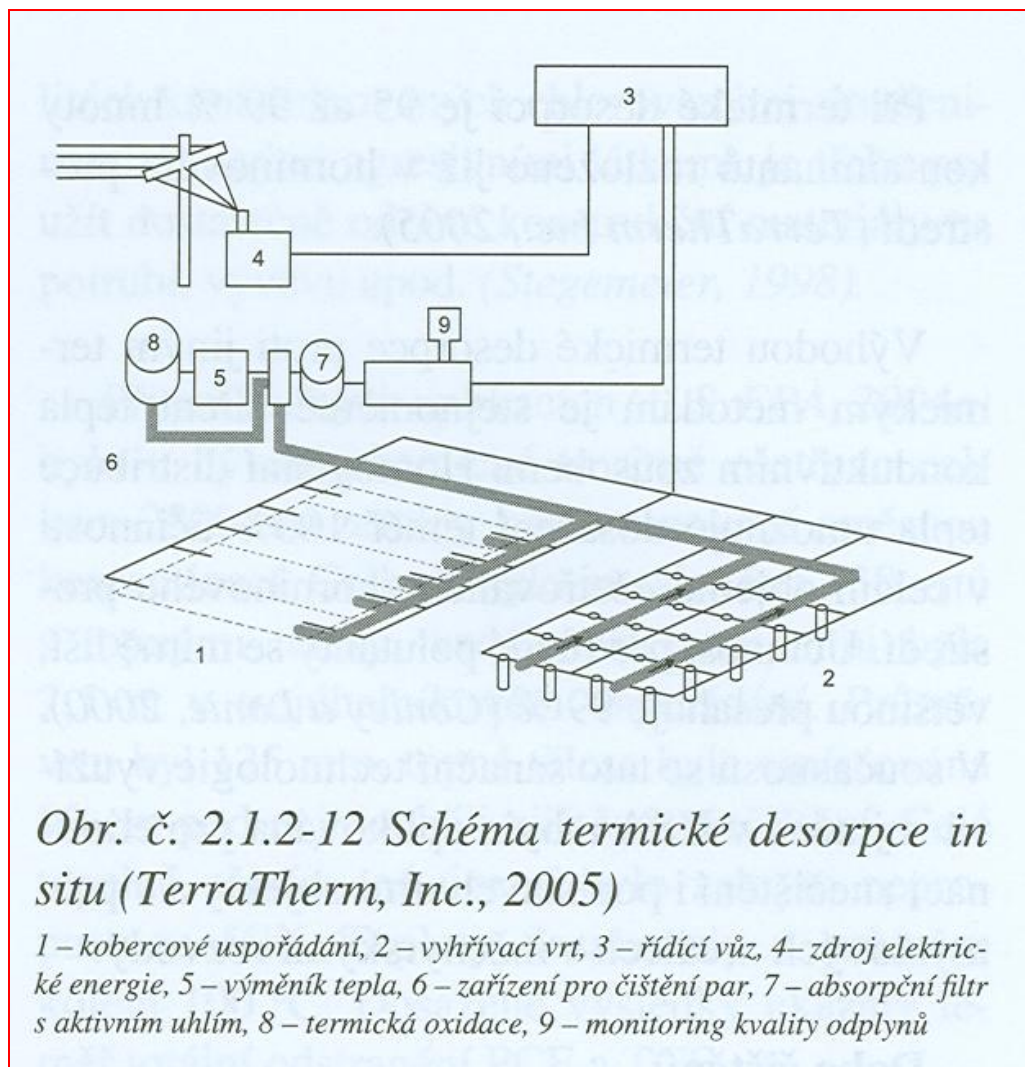
Příklady aplikací:

- ↪ Používání začalo v roce 1990 v Solvent Services (USA)
- ↪ Aplikováno pro půdy kontaminované VOCs
- ↪ Cílové VOCs - TCE, aceton, ethylbenzen, xyleny a SVOC dichlorbenzen

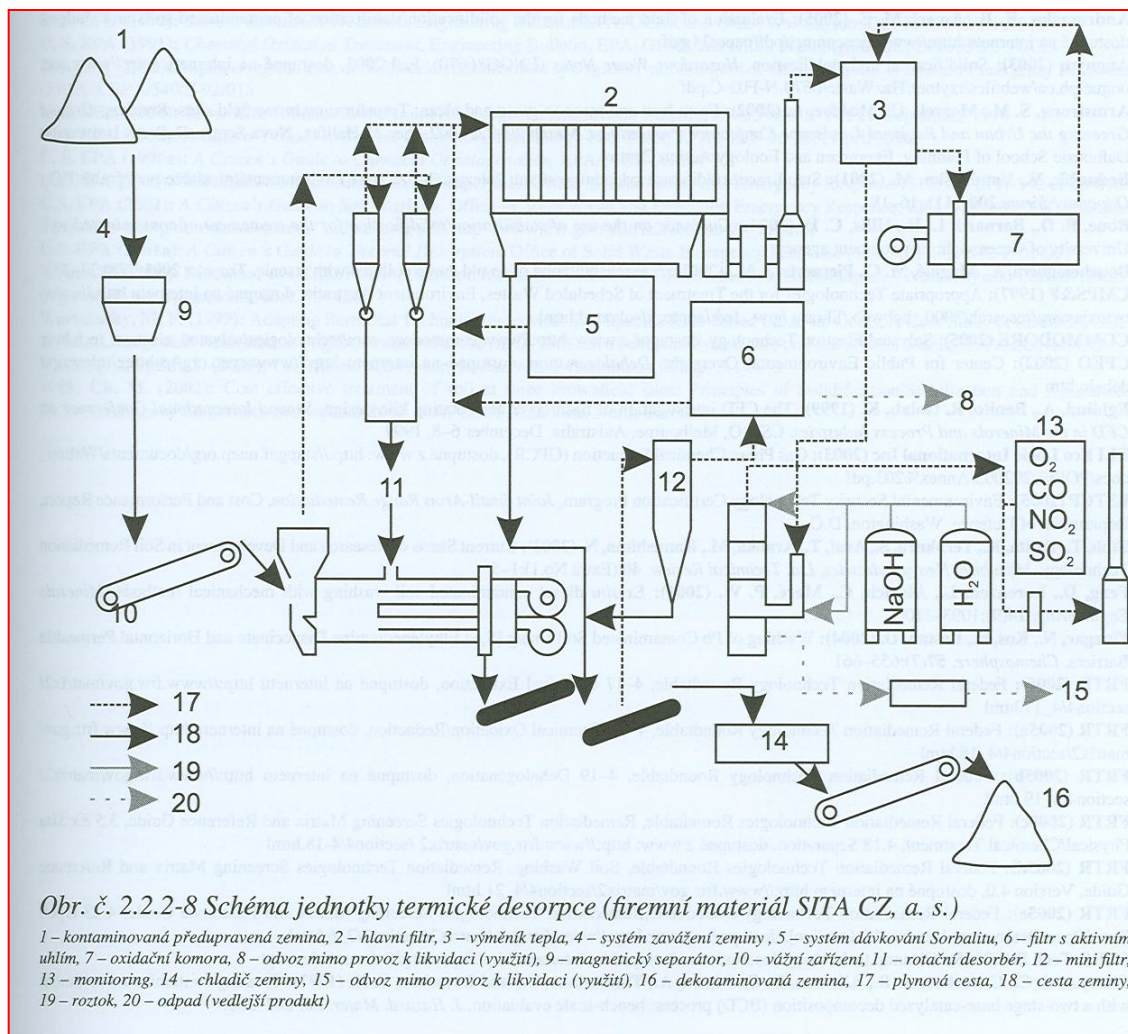
SVE – termické podpurné procesy



SVE – termické podpůrné procesy



Termická desorpce



SVE – podpůrné procesy - souhrn

- ↪ **Air Sparging** vhání vzduch na saturované zóny, zvyšuje vytěkávání rozpuštěných kontaminantů
- ↪ **Přímé vrtání** umožňuje aplikace SVE při omezených možnostech vertikálního vrtání
- ↪ **Dvoufázová extrakce** odstraňuje podzemní vody a páry z jednoho vrtu
- ↪ **Lámání** fyzikálně mění půdní matrici a zvyšuje účinnost SVE
- ↪ **Termické procesy** napomáhají vyseparovat kontaminanty z půd

Fyzikální a chemické technologie

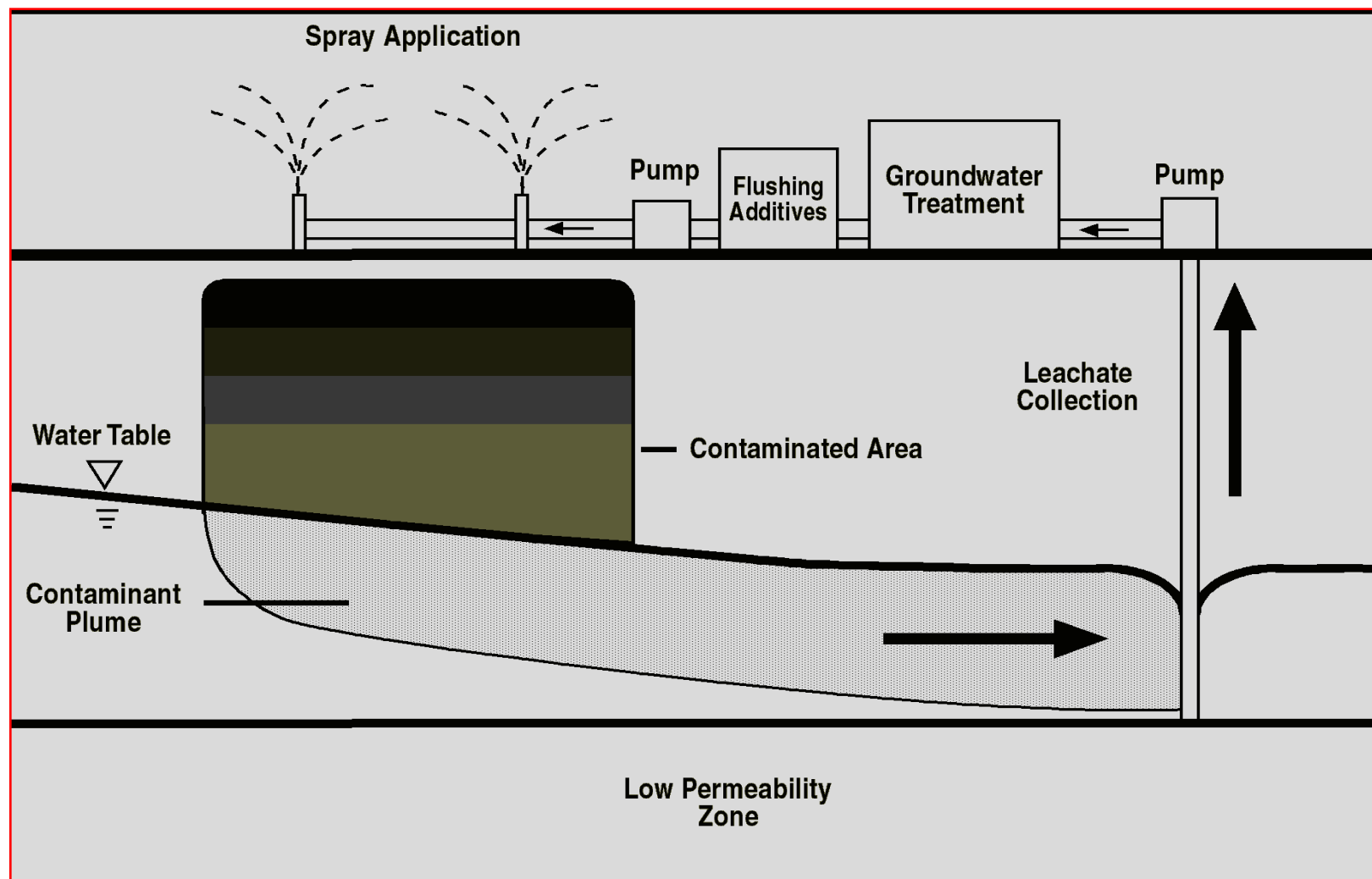
- ↪ Plynná extrakce (extrakce půdních par) (SVE) s podporou
- ↪ Vyplachování půd
- ↪ Vymývání půd
- ↪ Extrakce rozpouštědlem
- ↪ Pasivní ponorné stěny
- ↪ Dechlorace: Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD)
- ↪ Elektrokinetické procesy (elektrorekultivace)

Vyplachování půd

Cílové kontaminanty:

- ↪ VOCs
- ↪ SVOCs
- ↪ X- VOCs
- ↪ X- SVOCs
- ↪ PAHs
- ↪ Těžké kovy

Vyplachování půd – popis procesu



Vyplachování půd

- ↪ Záchyt polutantů před tím než kontaminují podzemní vodu
- ↪ Minimalizuje objem pro čištění
- ↪ Použitá voda cirkuluje pro usnadnění mobilizace kontaminátu v nesaturované zóně
- ↪ Cenové výhody vzrůstají s hloubkou, ve které je kontaminant lokalizován
- ↪ Ceny se pohybují mezi \$105 až \$210 za zpracovaný m³

Vyplachování půd

Konvenční transportní mechanismus:

- ↪ **Konvenční transport:**
 - **Transportní medium: voda**
 - **Transportní mechanism: advekce**
 - **Sekundární procesy: rozpouštění, redox reakce a desorpce**

- ↪ **Konvenční transport využívá tradiční konfiguraci záchytné zóny**

- ↪ **Advekce a chemie přírodních vod napomáhají mobilizaci kontaminantu**

Vyplachování půd

Zvýšený transportní mechanismus:

↪ Zvýšený transport zahrnuje terciární procesy:

- ✓ chemická aditiva
- ✓ termická kontrola

↪ Provádění

Vyplachování půd

Fyzikální přístupnost lokality:

- ↪ Homogenita
- ↪ Hydraulická vodivost a poróznost
- ↪ Geologie
- ↪ Podpovrchová charakterizace je nezbytná

Vyplachování půd

Chemická přístupnost lokality:

↪ **Kontaminanty**

↪ **Geochemie**

- pH
- Rozpuštěný kyslík

↪ **Mikrobiální společenstva**

Vyplachování půd

Fyzikální omezení:

- ↪ Heterogenita
- ↪ Podpovrchová charakterizace
- ↪ Geologie
- ↪ Vodní tabule

Vyplachování půd

Chemická omezení:

- ↪ **Kontaminanty a geochemie**
- ↪ **Obtížné čištění ropného znečištění a nevodných kapalných fází**
- ↪ **Kvalita dat**

Fyzikální a chemické technologie

- ↪ Plynná extrakce (extrakce půdních par) (SVE) s podporou
- ↪ Vyplachování půd
- ↪ **Vymývání půd**
- ↪ Extrakce rozpouštědlem
- ↪ Pasivní ponorné stěny
- ↪ Dechlorace: Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD)
- ↪ Elektrokinetické procesy (elektrorekultivace)

Vymývání půd

Cílové kontaminanty:

- ↪ VOCs
- ↪ SVOCs
- ↪ X- VOCs
- ↪ X- SVOCs
- ↪ PAHs
- ↪ Těžké kovy
- ↪ PCBs
- ↪ Pesticidy

Vymývání půd

- ↪ Použití mechanických postupů pro separaci kontaminantů z povrchu jemných částic
- ↪ Určeno pro předčištění nebo snížení objemu

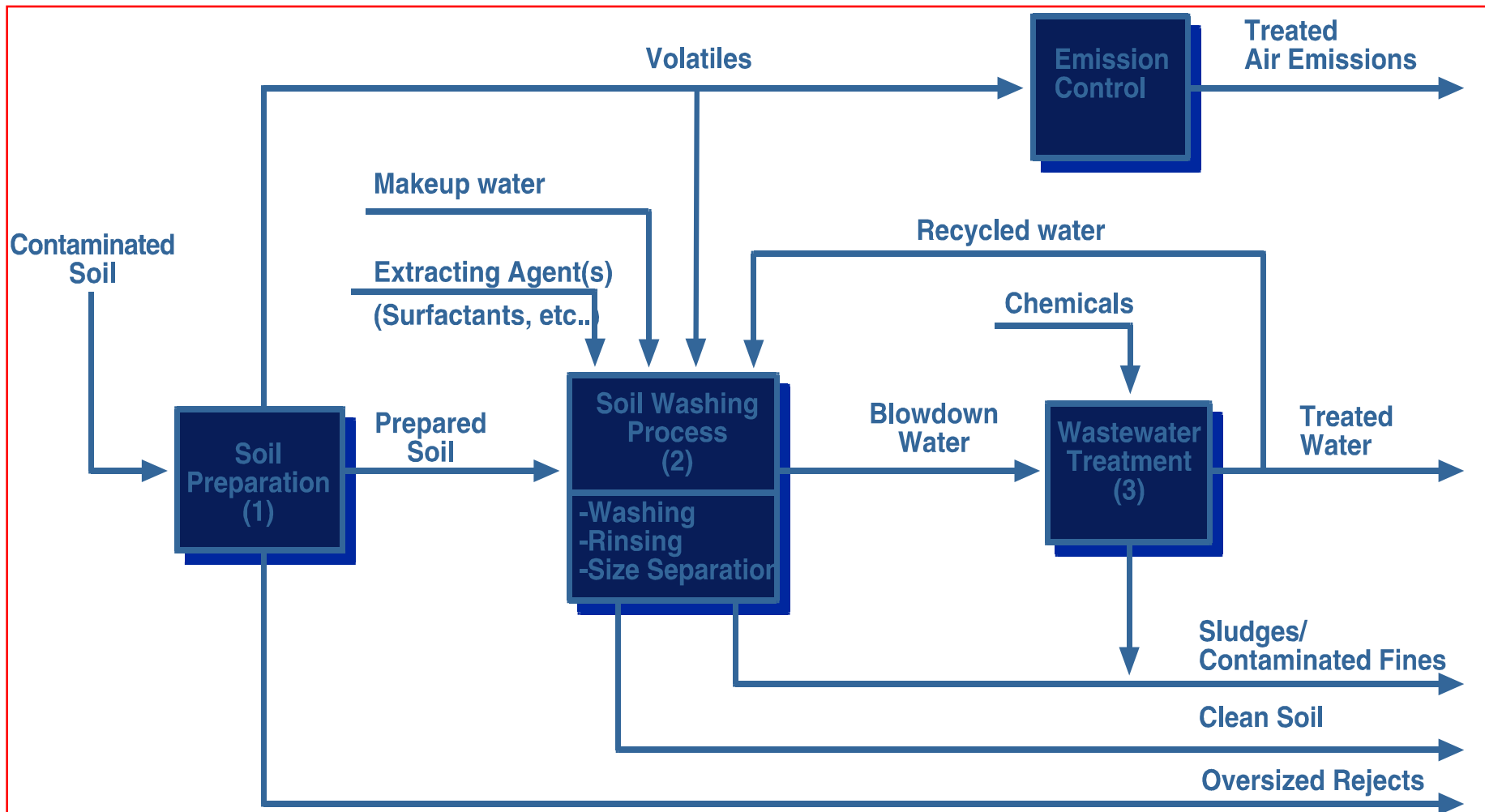
Vymývání půd

Odstraňování kontaminantů:

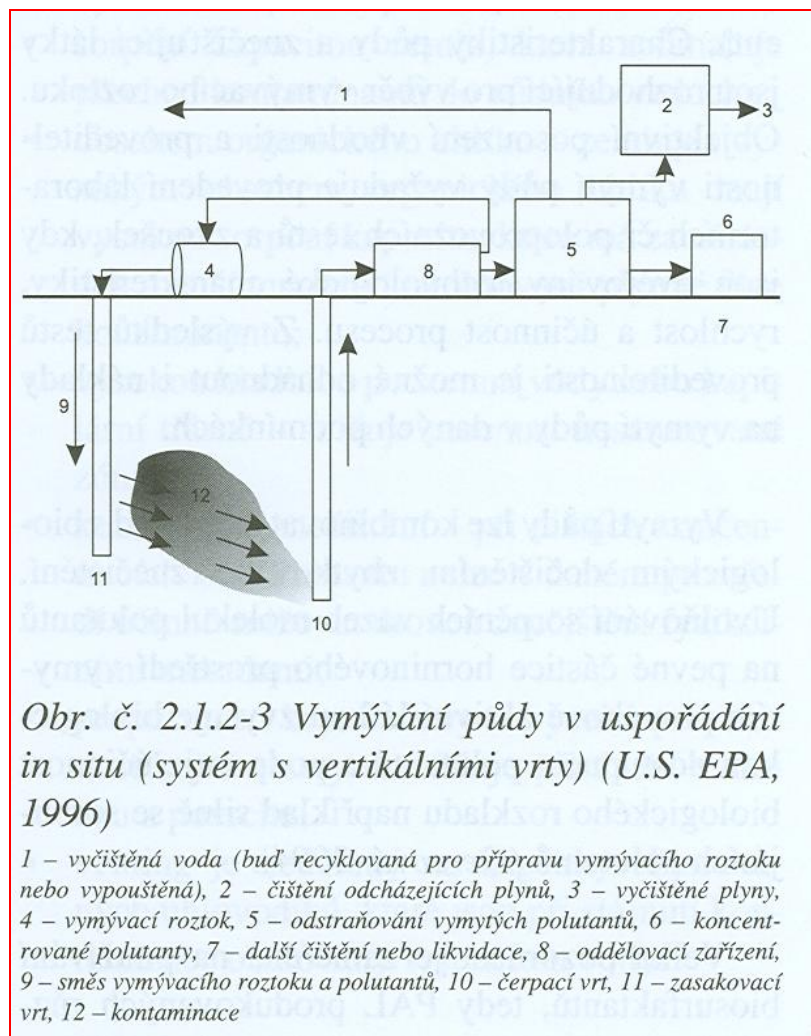
↪ **Separační proces**

- Rozpuštěné nebo suspendované kontaminanty ve vymývacím roztoku
- Separuje částice dle velikosti

Proces vymývání půd vodou



Proces vymývání půd vodou



Obr. č. 2.1.2-3 Vymývání půdy v uspořádání *in situ* (systém s vertikálními vrty) (U.S. EPA, 1996)

1 – vyčištěná voda (buď recyklovaná pro přípravu vymývacího roztoku nebo vypouštěná), 2 – čištění odcházejících plynů, 3 – vyčištěné plyny, 4 – vymývací roztok, 5 – odstraňování vymytých polutantů, 6 – koncentrované polutanty, 7 – další čištění nebo likvidace, 8 – oddělovací zařízení, 9 – směs vymývacího roztoku a polutantů, 10 – čerpací vrt, 11 – zasakovací vrt, 12 – kontaminace

Vymývání půd

↪ Příprava půdy

- Materiál větší 1 cm je odstraněn
- Klasifikace půdních frakcí pro separaci kontaminantů

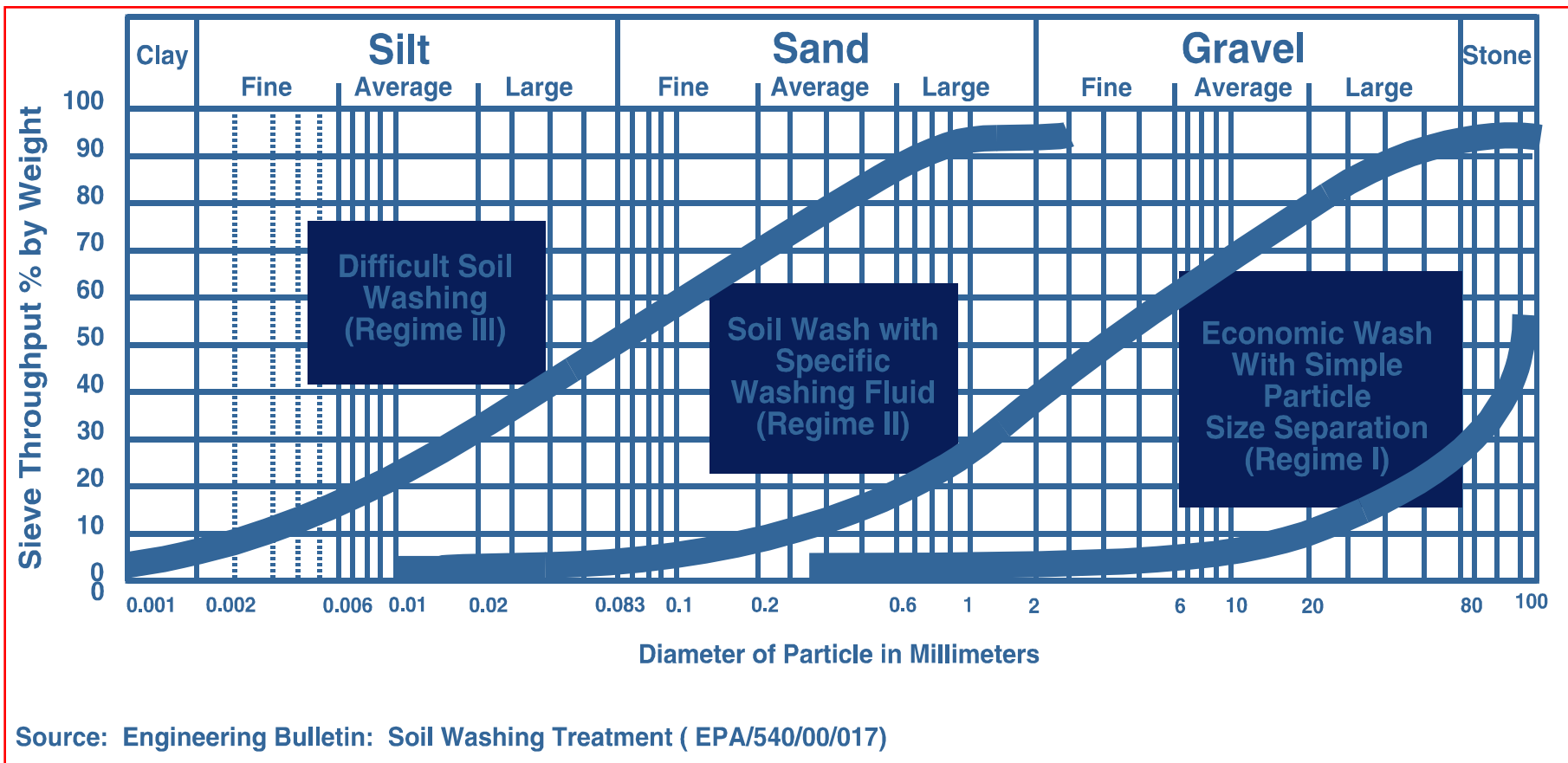
↪ Proces vymývání půd

- Může být zvětšeno použitím vhodných vymývacích činidel, tenzidů nebo chelatačních činidel

↪ Čištění odpadních vod

↪ Management reziduí

Aplikace vymývání půd na materiály o různé velikosti částic



Vymývání půd

Specifické výhody:

- ↪ **Upřednostňovaná veřejností**
- ↪ **Relativně nízká cenová alternativa ve vztahu k třídění odpadů**
- ↪ **Uzavřený čistící systém umožňující kontrolu těkavých emisí ve volném ovzduší**
- ↪ **Může redukovat objem kontaminovaného media a koncentraci kontaminantu**

Vymývání půd

Specifická omezení:

- ↪ Aditiva přidávaná do vymývací vody mohou vyžadovat čištění odpadních vod před vypouštěním
- ↪ Účinnost závisí na půdních podmínkách a povaze kontaminantů – u všech technologií
- ↪ Obvykle je nutný další stupeň čištění

Vymývání půd

Cenové relace:

- ↪ Průměrná cena - \$120-\$200 /t včetně vybagrování
- ↪ Prodejní cena se pohybuje mezi \$40-\$300/t
- ↪ Možnost recyklace vymývacích kapalin může významně ovlivňovat cenu

Vymývání půd

Proveditelnost:

- ↪ **Může odstranit až 99% VOCs a 90% semi-volatilních látek**
- ↪ **Je omezena komplexností směsi odpadů a půdami s vysokým obsahem huminových a jílových složek**

Fyzikální a chemické technologie

- ↪ Plynná extrakce (extrakce půdních par) (SVE) s podporou
- ↪ Vyplachování půd
- ↪ Vymývání půd
- ↪ **Extrakce rozpouštědlem**
- ↪ Pasivní ponorné stěny
- ↪ Dechlorace: Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD)
- ↪ Elektrokinetické procesy (elektrorekultivace)

Extrakce rozpouštědlem

Cílové kontaminanty:

- ↪ VOCs
- ↪ SVOCs
- ↪ X- VOCs
- ↪ X- SVOCs
- ↪ PAHs
- ↪ Těžké kovy
- ↪ PCBs
- ↪ Pesticidy
- ↪ PCDDs/Fs

Extrakce rozpouštědlem

- ↪ Používá se v kombinaci nebo jako samostatná technologie
- ↪ Separuje kontaminanty z odpadů, půd, sedimentů, kalů nebo vod

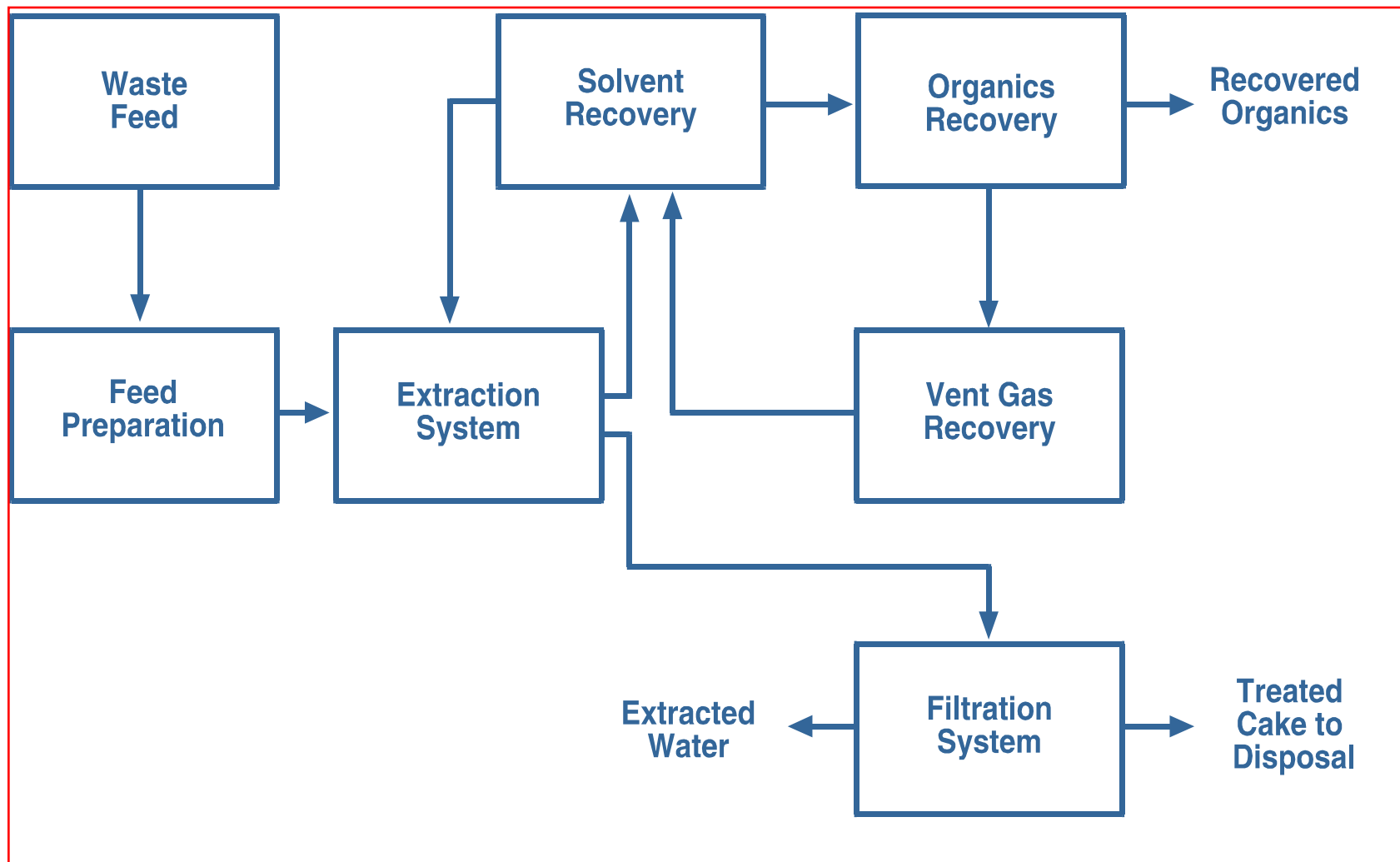
Proces extrakce rozpouštědlem

- ↪ Kontaminovaný materiál je vybagrován a přenesen do přípravného systému
- ↪ Surovina je transportována do extrakční nádoby (nádob) a smíšena s rozpouštědlem(y)
- ↪ Důležité jsou vlastnosti použitého rozpouštědla nebo směsi rozpouštědel

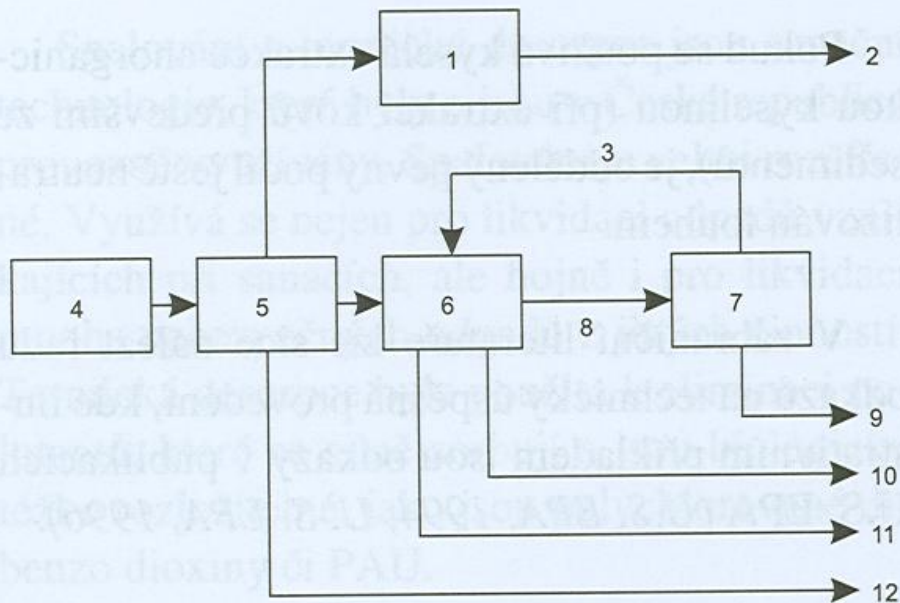
Proces extrakce rozpouštědlem

- ↪ Proudý suroviny a rozpouštědel vstupují kontinuálně do kontaktního systému v uspořádání paralelních proudů nebo protiproudě
- ↪ Dekontaminovaná tuhá fáze je separována od rozpouštědel
- ↪ Extrační rozpouštědlo je přesunuto do systému pro přečištění

Proces extrakce rozpouštědlem



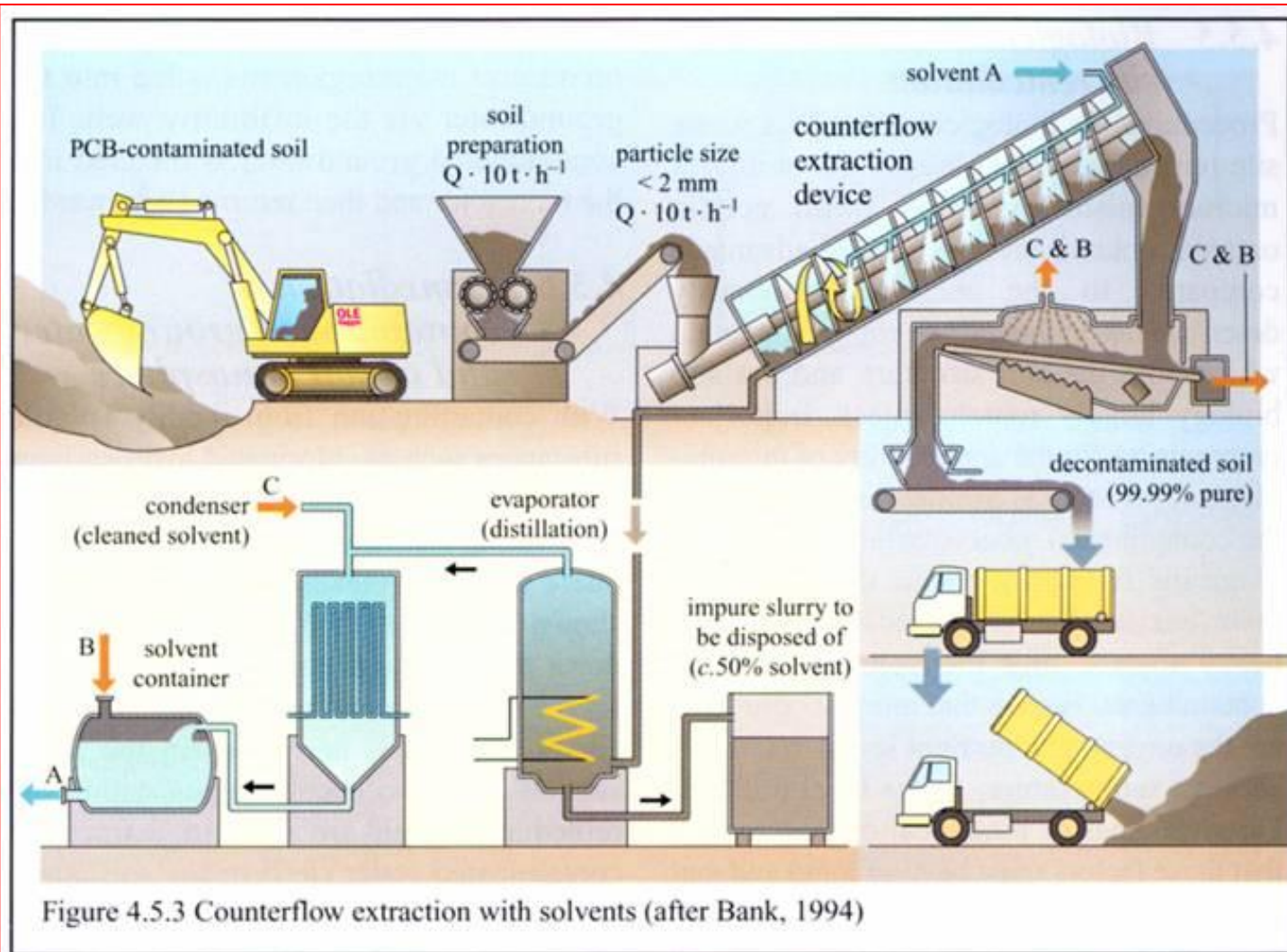
Proces extrakce rozpouštědlem



Obr. č. 2.2.2-1 Blokové schéma chemické extrakce ex situ (FRTR, 2005)

1 – čištění emisí, 2 – vyčištěné emise, 3 – recyklovaná rozpouštědla, 4 – odštěpení, 5 – extrakční jednotka, 6 – mechanické třídění, 7 – zpracování rozpouštědla, 8 – rozpouštědlo obsahující kontaminanty, 9 – zakoncentrovaný kontaminant, 10 – tuhý vyčištěný materiál, 11 – odpadní voda, 12 – nekontaminovaná nadsítná frakce

Proces extrakce rozpouštědlem



Proces extrakce rozpouštědlem

Technologické aplikace:

- ↪ Čištěná media: sedimenty, kaly a půdy
- ↪ Čištění kontaminantů
- ↪ Čištění petrochemických odpadů
- ↪ Obecně není využitelná pro čištění půd s obsahy anorganických sloučenin

Proces extrakce rozpouštědlem

Dočišťování:

- ↪ Produktů procesu
- ↪ Obsah kontaminantů
- ↪ Generované směsi rozpouštědla a vody

Proces extrakce rozpouštědlem

Výhody:

- ↪ Redukce objemu nebezpečných odpadů pro čištění

- ↪ Účinné pro zpracování a čištění:
 - Odpadů ze zpracování dřeva
 - Olejových emulzí s obsahem tuhých látek
 - Kalů ze separátoru

- ↪ Media mohou být vrácena na původní místo po dosažení požadovaných standardů

Proces extrakce rozpouštědlem

Omezení:

- ↪ Organicky vázané kovy omezují zpracování
- ↪ Přítomnost detergent může být problémem
- ↪ Stopy rozpouštědel zůstávají v tuhé fázi
- ↪ Není účinné pro organické látky s vysokou molekulovou hmotností
- ↪ Úroveň obsahu vlhkosti omezuje účinnost

Proces extrakce rozpouštědlem

Ceny:

- ↪ Ceny kolísají v rozmezí \$105 až \$770/t
- ↪ Ceny jsou srovnatelné s alternativními remediačními technologiemi

Proces extrakce rozpouštědlem

Provedení

- ↪ Extrakční účinnost pro PCBs v sedimentech se pohybuje od 90 do 98%
- ↪ Extrakční účinnost pro VOCs a SVOCs v laboratorních podmínkách bylo 99.9%
- ↪ Problémem jsou tuhé zbytky zůstávající v tancích

Extrakce do makroporézních polymerů

6.11 Extrakce do makroporézních polymerů

Princip:

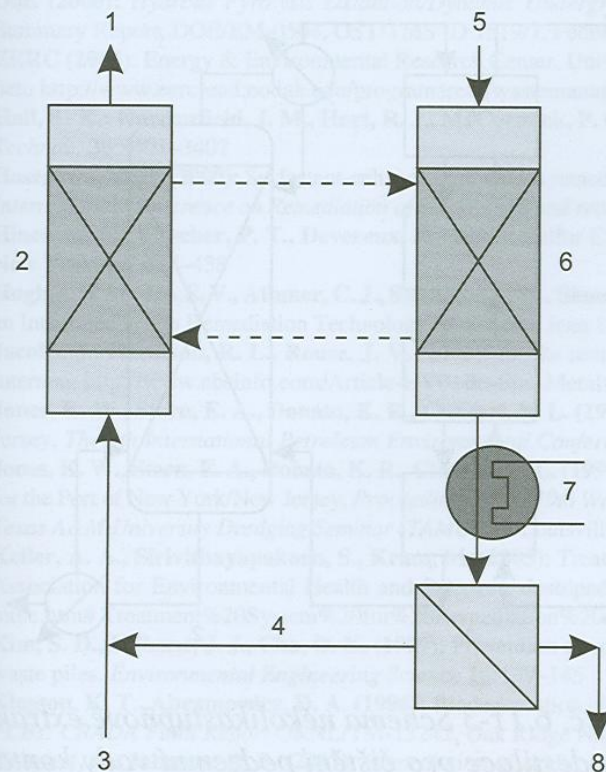
Makroporézní polymery jsou schopné ve svých pórech mimo jiné poutat extrakční kapalinu. Makroporézní polymer s extrakční kapalinou se umístí do kolony, kterou prochází podzemní voda s rozpuštěnými polutanty. Při průchodu kolonou se polutanty rozpouštějí v extrakční kapalině imobilizované v makroporézním polymeru a tím jsou odstraňovány z vody. V podstatě se jedná o extrakci kapalina – kapalina.

Použitelnost:

Tato inovační technologie je použitelná pro čištění podzemních vod kontaminovaných trinitrotoluenem (TNT), všech typů uhlovodíků včetně chlorovaných a polycyklických aromatických (Sluys, 2001).

Omezení použití:

Nelze ji aplikovat pro čištění podzemní vody s vysokým obsahem pevných částic či rozpuštěných organických látek.



Obr. č. 6.11-1 Schéma zařízení pro extrakci do makroporézních polymerů s regenerací parním strippingem (Sluys, 2001)

1 – vyčištěná voda, 2 – extrakce, 3 – kontaminovaná podzemní voda, 4 – parní kondenzát k recyklaci, 5 – pára, 6 – stripping, 7 – kondenzátor, 8 – vystripované a zkondenzované polutanty

Fyzikální a chemické technologie

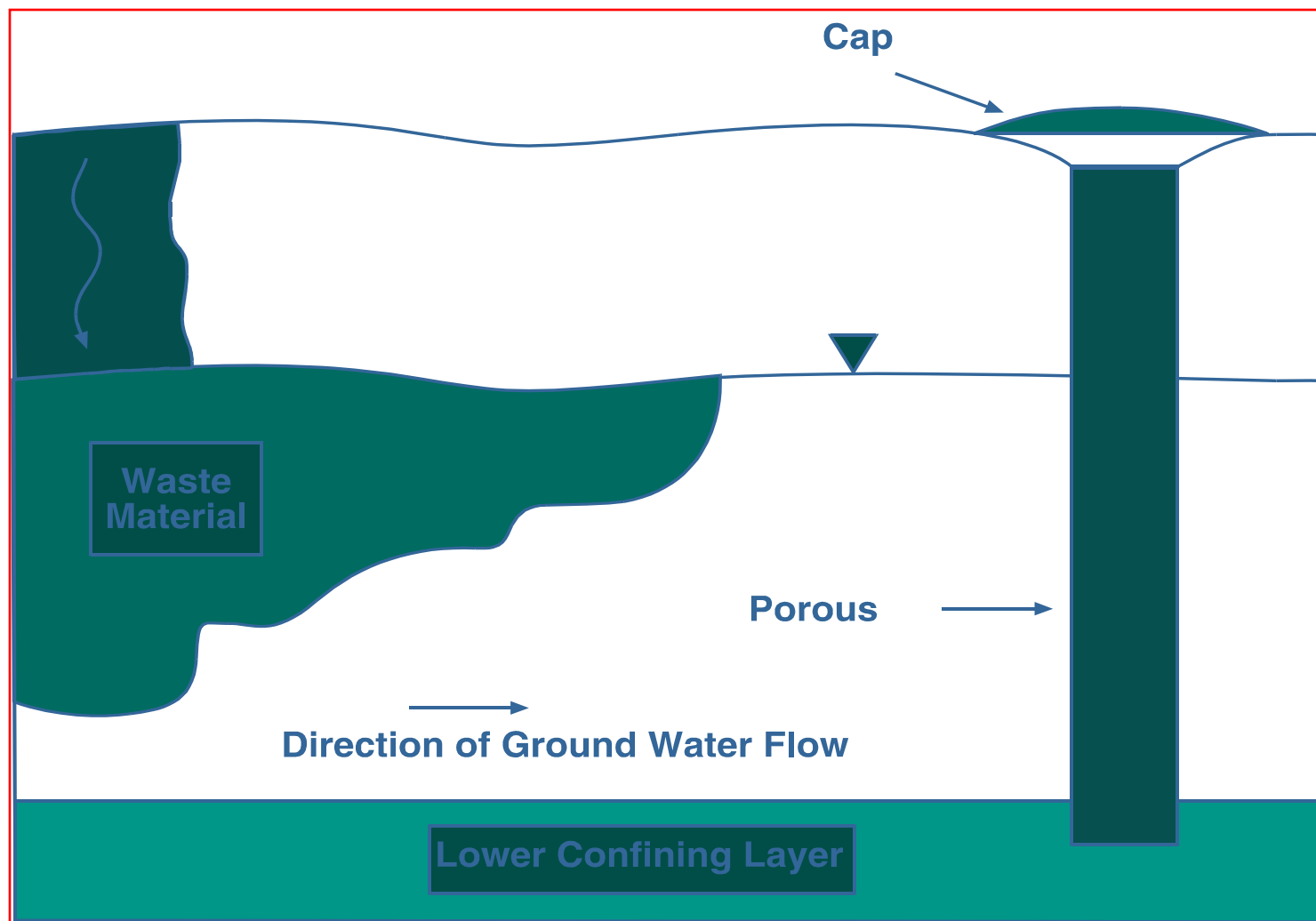
- ↪ Plynná extrakce (extrakce půdních par) (SVE) s podporou
- ↪ Vyplachování půd
- ↪ Vymývání půd
- ↪ Extrakce rozpouštědlem
- ↪ **Pasivní ponorné stěny**
- ↪ Dechlorace: Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD)
- ↪ Elektrokinetické procesy (elektrorekultivace)

Pasivní ponorné stěny

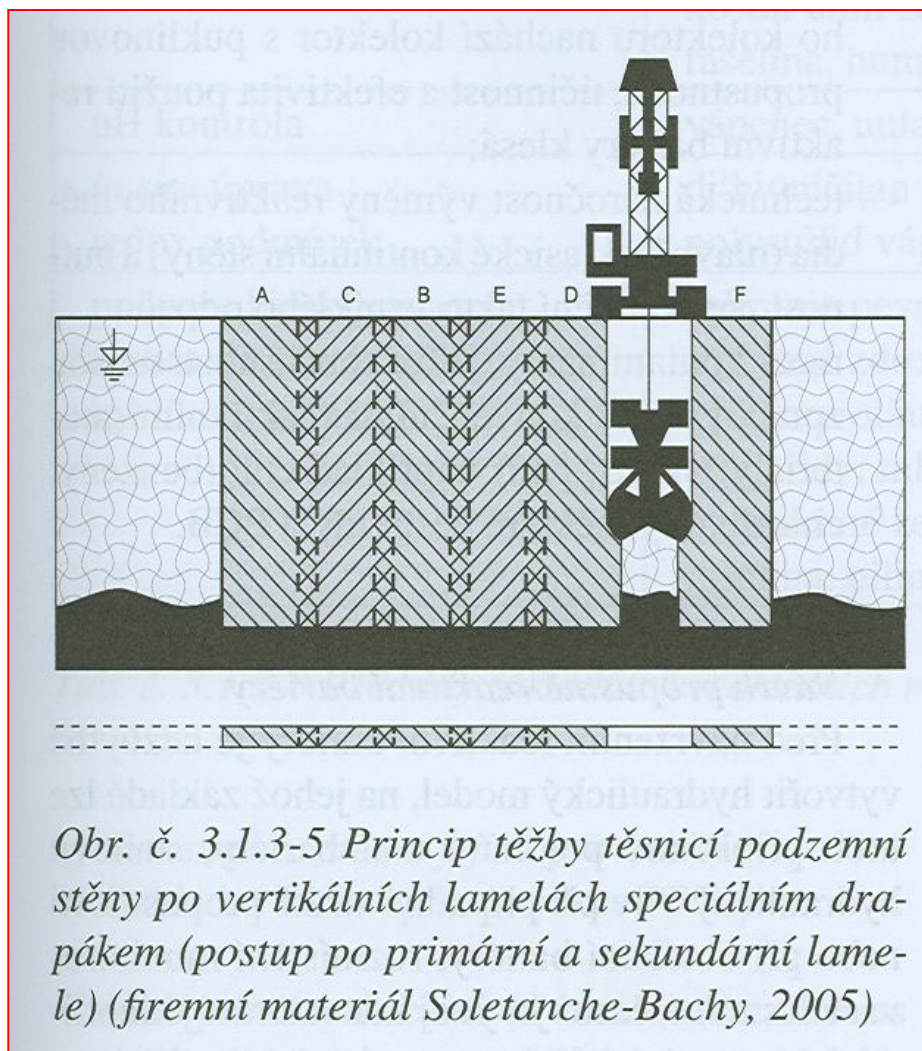
Cílové kontaminanty:

- ↪ **Kontaminovaná media/isotropická voda ložiskové zóny**
- ↪ **Může být využito pro čištění organických i anorganických látek**
- ↪ **Koncentrace kontaminantů není limitujícím faktorem**

Typická pasivní ponorná stěna



Pasivní ponorné stěny



Pasivní ponorné stěny

Hledisko	Druh bariéry
půdorysná poloha	uzavřená – kolem dokola ložiska znečištění otevřená – například tvaru „U“ nebo „L“ apod.
pozice ve svislém řezu	úplná – vetknutá do nepropustného podloží neúplná – „norná stěna“ proti plovoucímu znečištění
doba využitelnosti	dočasná – určený počet let trvalá – bez určení doby (pro geokontejnment)
funkce (účel)	nepropustná <ul style="list-style-type: none">• těsnicí – brání průtoku vody a znečištění• separační – odděluje sousedící geosystémy znečištění drenážní – regulovaně odvádí tok vody hydraulická – systém čerpacích/vsakovacích vrtů propustná reaktivní – obsahuje reaktivní médium pro dekontaminaci protékající vody

Tab. č. 3.1.3-5 Rozdělení a určení vertikálních bariér

Pasivní ponorné stěny

Tab. č. 3.1.3-6 Hlavní typy nepropustných vertikálních bariér pro sanaci znečištění

Typ (název)	Způsob provedení	Materiál	k_f [m.sec ⁻¹]	Tloušťka [mm]	Hloubka [m]	Využitelnost	Použití	Omezení použití
Podzemní těsnicí stěna - PTS	- těžba drapákem (jednofázově)	samotuhnoucí suspenze	$10^{-8} - 10^{-10}$	600–1200	40	trvalé	univerzální	- vysoce agresivní prostředí - rašelina
	- rypadlem (kontinuálně)			600–2000	15			
	- hydrofrézou (dvojfázově)	- plastický beton		600–1500	130			
Geomembrána (kompozitní PTS)	- zatažená v rýze (kontinuálně)	HDPE	$10^{-12} - 10^{-15}$	1,5–2	4–6	dočasné	extrémní znečištění a plyny	- riziko malého vetknutí a následného podtékání
	- uložena v PTS po vertikálních pasech (jedno- či dvojfázově)	HDPE + samotuhnoucí suspenze		2–3	30	trvalé		- důležitý vliv spojovacích zámků
Tenká těsnicí stěna – TTS	- vibračně předražena s injekční výplní	samotuhnoucí suspenze	$10^{-8} - 10^{-9}$	100–150	20	dočasné	pomocné (např. normé stěny)	- malá tloušťka
Štetová stěna	- beranění nebo vibrování	ocel	$10^{-7} - 10^{-8}$	6–15	15	dočasné	dočasné (např. výkopy)	- četné spáry mezi štetovnicemi
Promíchávání zeminy (soil mixing)	- promíchání směsi se zeminou <i>in situ</i> vrtáky či frézou	- zemina se samotuhnoucí směsí	$10^{-8} - 10^{-9}$	600–1000	20–30	dočasné (trvalé)	speciální případy	- pouze u vhodné zeminy (písečné) - příměs původ. zeminy (nehomog.)
Injekční clona	- impregnační injektáž a tlaková výplň pórů a mezer	- injekční směs v pórech a puklinách hornin	$10^{-7} - 10^{-8}$	800–2000 a více	100 (i více)	dočasné (trvalé)	speciální případy	- nutno prodloužit průsakové dráhy zvětšením tloušťky
Trysková injektáž	- TI jednořadá	- injekční směs s příměsí zeminy	$10^{-8} - 10^{-9}$	600–1000	30 (i více)	dočasné	speciální případy (v místě inženýrských sítí apod.)	- při výskytu šterků s valouny vznik mezer
	- TI dvouřadá	- dtto		1000–2000	30	trvalé		- příměs původní zeminy (nehomog.)
	- TI usměrněná	- dtto		200	30	dočasné		- ve skalní hornině nelze

Pasivní ponorné stěny

Složky procesu:

↪ Reagující media:

☞ Nul-valentní kovy

☞ Chelatační činidla

☞ Sorbenty

↪ Náplňový a uzavírací materiál

Pasivní ponorné stěny

Výhody:

- ↪ Dobrá účinnost pokud jde o redukci výskytu kontaminantu
- ↪ Relativně nízká cena
- ↪ Provedení a udržování – pravidelný monitoring

Pasivní ponorné stěny

Omezení:

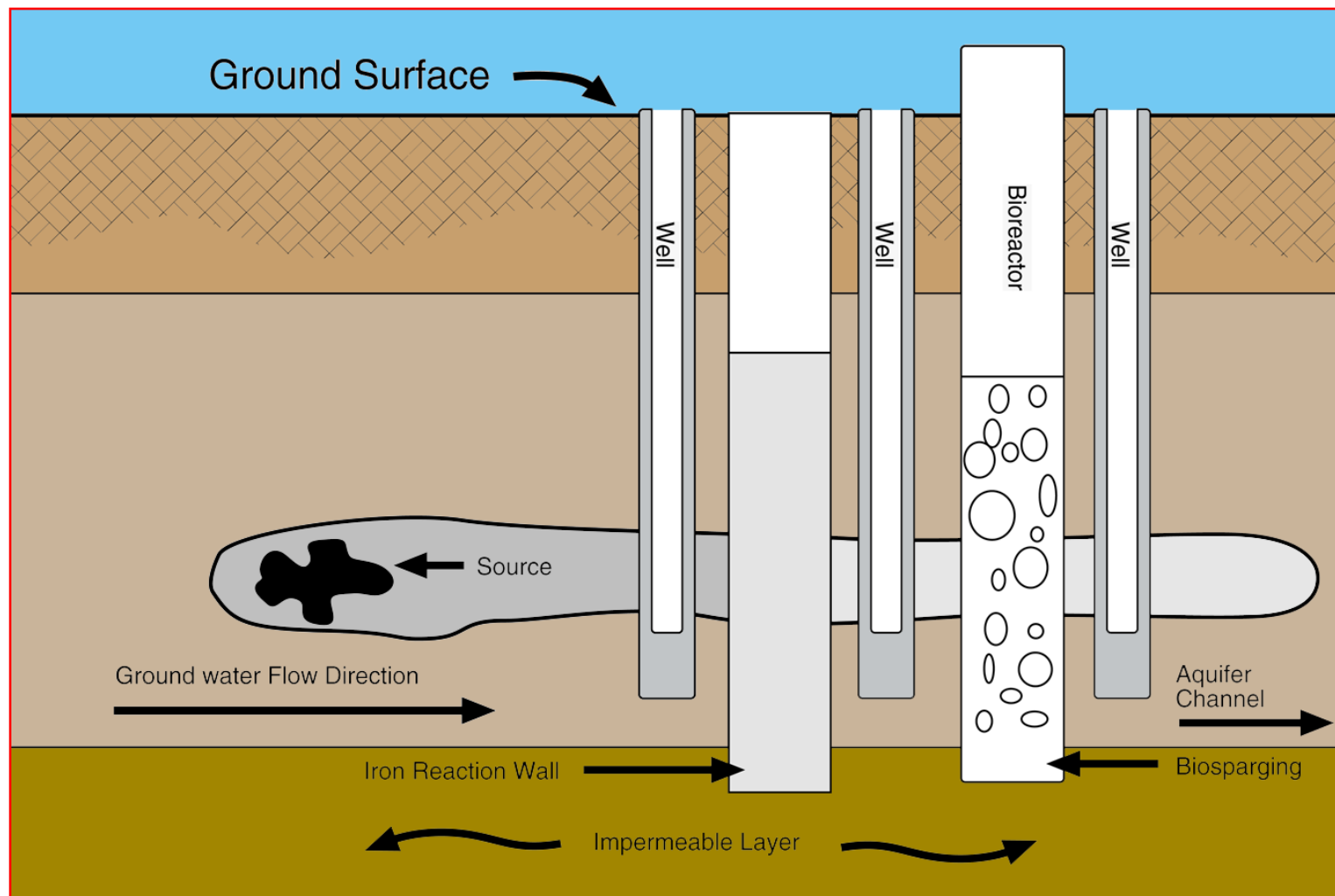
- ↪ Potřeba nezpevněných podpovrchových vrstev se styčnou upevněnou vrstvou
- ↪ Může dojít ke snížení reakční kapacity v čase
- ↪ Bionánosy způsobené mikrobiální aktivitou
- ↪ Je nutná kontrola pH na stěně – na hodnotě pH závisí reakční rychlost

Pasivní ponorné stěny

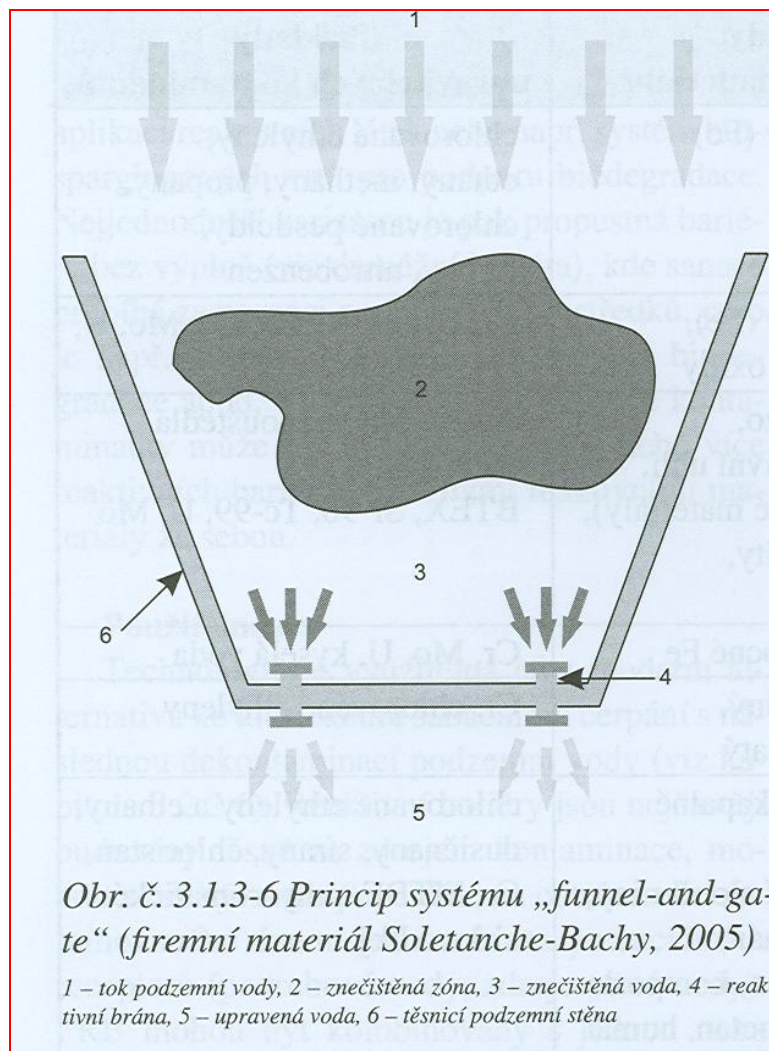
Cenové údaje:

- ↪ Relativně nízká cena pilotní a prováděcí aplikace
- ↪ Nízké prováděcí a udržovací náklady (je nutný pravidelný monitoring)
- ↪ Cena životního cyklu se předpokládá 5-10 nižší než vybagrování

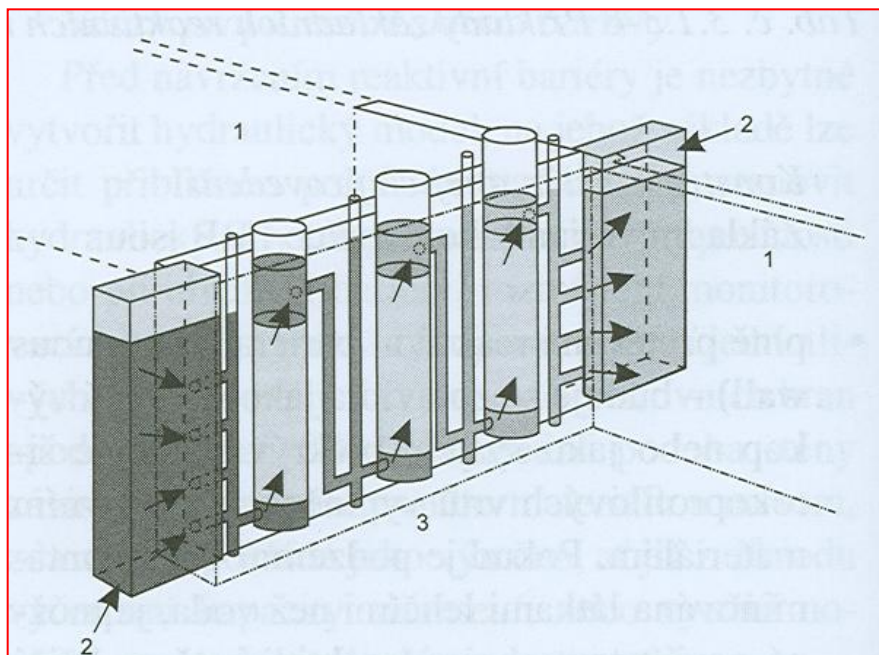
Technologie nálevky a brány



Ponorné reaktivní bariéry



Ponorné reaktivní bariéry



Obr. č. 3.1.3-7 Schéma systému s kontrolovatelnou branou a obměnitelnými náplněmi (firemní materiál Soletanche-Bachy, 2005)

1 – těsnicí podzemní stěna, 2 – drenážní část, 3 – reaktivní brána s výměnnými náplněmi

Ponorné reaktivní bariéry

Mechanismus úpravy kontaminantu	Příklady reaktivních materiálů	Příklady upravitelných kontaminantů
kovem podpořená reduktivní dechlorace organických sloučenin	nulamocné kovy (Fe)	chlorované ethyleny, ethany, methany, propany, chlorované pesticidy, freony, nitrobenzen
kovem podpořená redukce kovů	nulamocné kovy (Fe), struska, železité oxidy	Cr, U, As, Tc, Pb, Cd, Mo, U, Hg, P, Se, Ni
sorpce a iontová výměna	nulamocné železo, granulované aktivní uhlí, apatit (a příbuzné materiály), kostní uhlí, zeolity, rašelina, humát	chlorovaná rozpouštědla (některá), BTEX, Sr-90, Tc-99, U, Mo
pH kontrola	vápenec, nulamocné Fe	Cr, Mo, U, kyselá voda
<i>in situ</i> úprava redox podmínek	dithioničitan sodný, polysulfid vápenatý	Cr, chlorované ethyleny
podpora biodegradace (zahrnuje zdroje uhlíku, kyslíku a vodíku)	zahrnuje pevné, kapalné a plynné zdroje: kyslík uvolňující sloučeniny, sacharidy, mléčnan, nulamocné železo, kompost, rašelina, piliny, octan, humát	chlorované ethyleny a ethany, dusičnany, sírany, chloristan, Cr, MTBE, polyaromatické uhlovodíky

Tab. č. 3.1.3-8 Příklady základních reaktivních materiálů používaných v PRB (ITRC, 2005)

Fyzikální a chemické technologie

- ↪ Plynná extrakce (extrakce půdních par) (SVE) s podporou
- ↪ Vyplachování půd
- ↪ Vymývání půd
- ↪ Extrakce rozpouštědlem
- ↪ Pasivní ponorné stěny
- ↪ **Dechlorace: Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD)**
- ↪ Elektrokinetické procesy (elektrorekultivace)

BCD proces

Cílové kontaminanty:

↪ **X-VOCs**

↪ **X-SVOCs**

↪ **PCBs**

↪ **PCDDs/Fs**

↪ **Pesticidy (HCH)**

BCD proces

- ↪ Donor vodíku + báze
- ↪ Produkce nukleofilního vodíku
- ↪ Chlór je nahrazován nukleofilním vodíkem

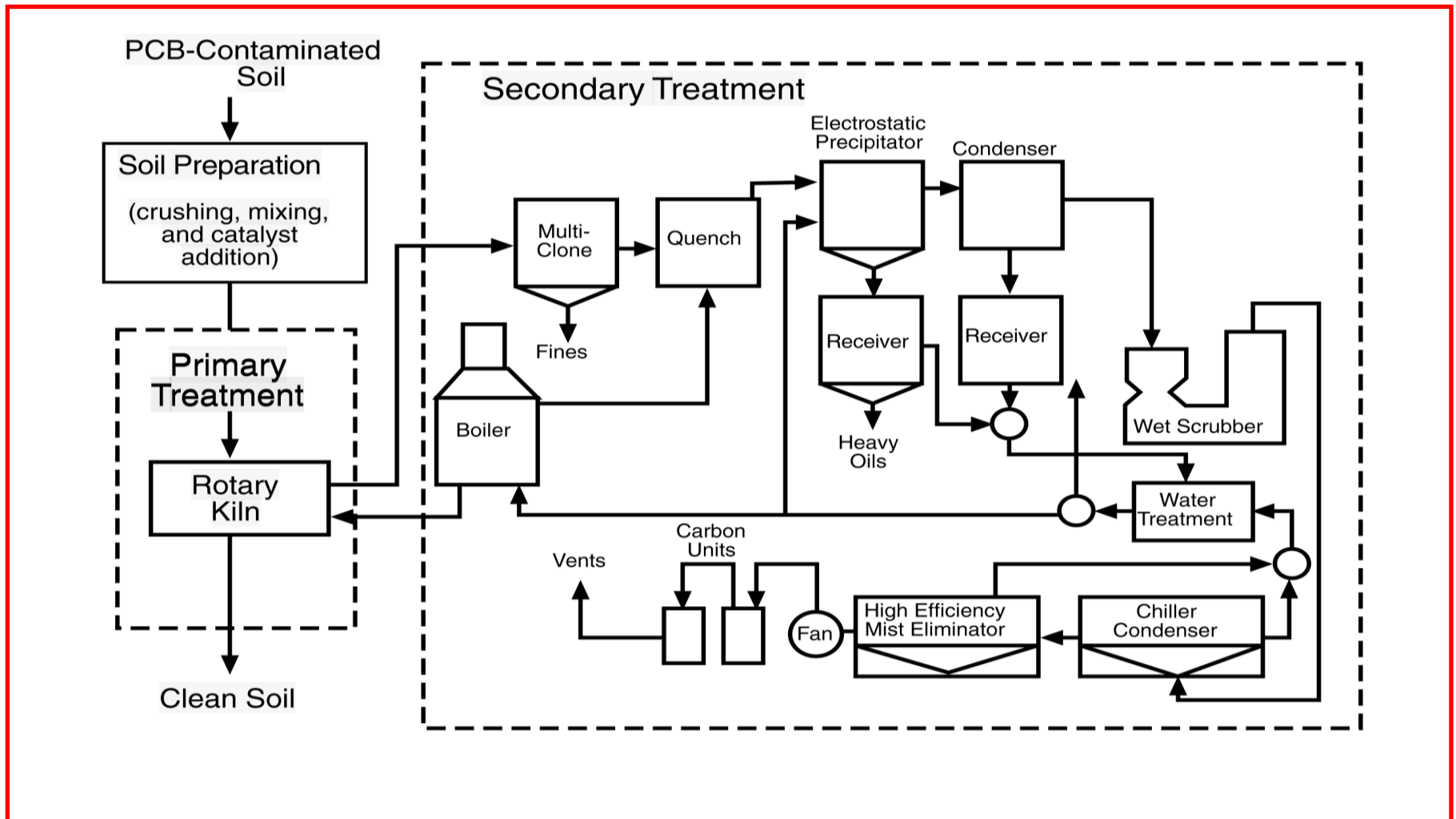
Složky BCD procesu

↪ Jsou využívány termické a chemické procesy:

- Půdy jsou po rozdrcení smíchány s NaHCO_3
- Směs je zahřívána v rotační peci
- Unikající plyny, vyčištěné půdy a kaly jsou zpracovány tak, že nevyžadují žádné další čištění

↪ Variace mohou zvyšovat účinnost

BCD proces



BCD proces

Aplikace:

- ↪ **Kontaminované matrice**
- ↪ **Kontaminanty**
- ↪ **Koncentrace kontaminantů**

BCD proces

Výhody:

- ↪ **Bezpečnost**
- ↪ **Destrukce polutantů**
- ↪ **Rychlost a kapacita**
- ↪ **Provozní proveditelnost**

BCD proces

Omezení:

- ↪ *Cena (200-500 USD/t)*
- ↪ *Další látky ve směsi*
- ↪ *Rozsah odstranění chloru, jenž ovlivňuje podmínky procesu a polutanty, jenž mají být dehalogenovány*

Fyzikální a chemické technologie

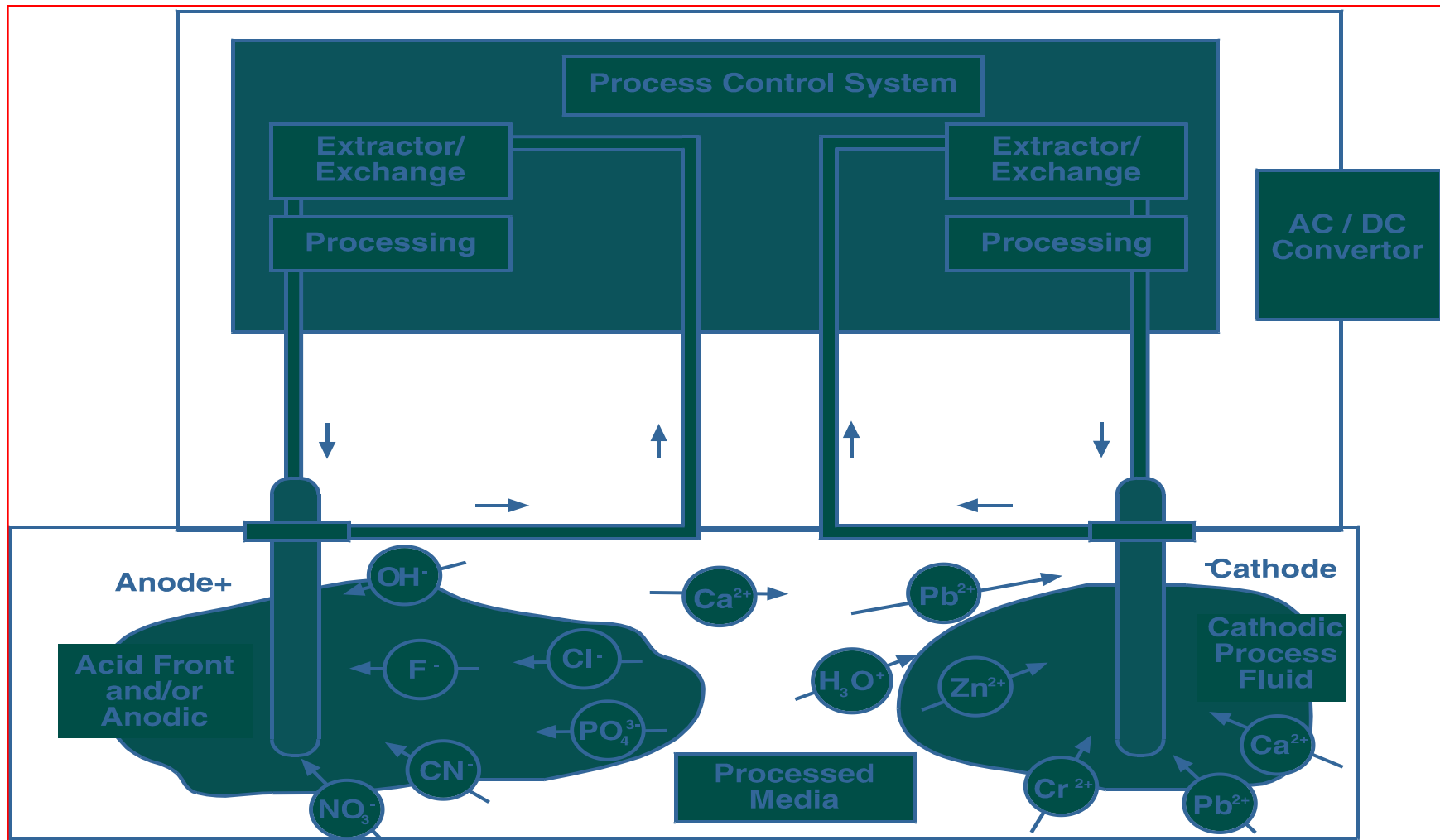
- ↪ Plynná extrakce (extrakce půdních par) (SVE) s podporou
- ↪ Vyplachování půd
- ↪ Vymývání půd
- ↪ Extrakce rozpouštědlem
- ↪ Pasivní ponorné stěny
- ↪ Dechlorace: Bazicky katalyzovaný rozklad (BCD)
- ↪ **Elektrokinetické procesy (elektrorekultivace)**

Elektrokinetické procesy

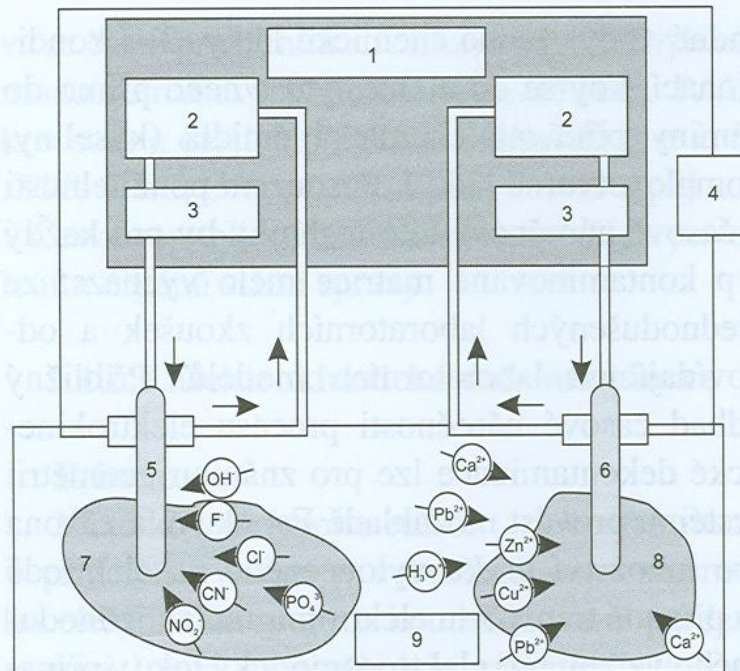
Cílové kontaminanty:

- ↪ Použití pro extrakci kovů a radionuklidů z půd, suspenzí a sedimentů

Konfigurace a geometrie elektrod



Konfigurace a geometrie elektrod



Obr. č. 2.1.2-1 Zjednodušené schéma technického uspořádání metody in situ elektrokinetické dekontaminace (U.S. EPA, 1995)

1 – zpracování elektrolytů, 2 – extrakce/iontová výměna, 3 – zpracování,
4 – zdroj stejnosměrného napětí, 5 – anoda, 6 – katoda, 7 – kyselá vlna,
8 – alkalická vlna, 9 – kontaminovaná porézní matrice

Elektrokinetické procesy

Typické procesy:

- ↪ **Separační a odstraňovací techniky elektrosrážením na elektrodách nebo v čistící jednotce**
- ↪ **Použití nízké proudové intenzity mezi elektrodami**
- ↪ **Je nejúčinnější v jemnozrnné, málo propustné půdě**

Elektrokinetické procesy

Předběžné hodnocení:

↪ Laboratorní screening musí být prováděn:

- ➔ Polní sledování vodivosti
- ➔ Chemická analýza vody a půdy
- ➔ pH hodnoty vody a půdy
- ➔ Testy limitních hodnot

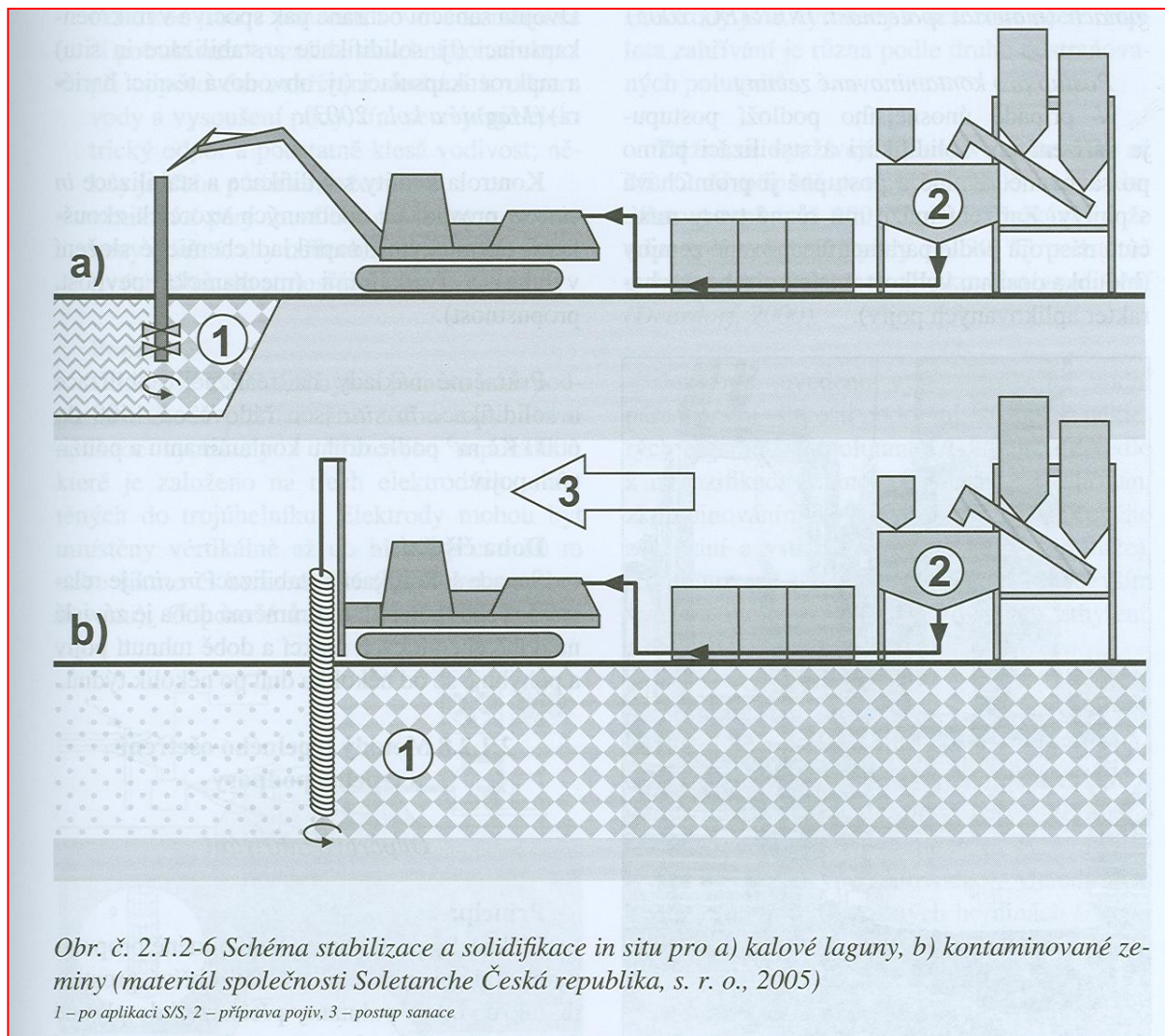
Elektrokinetické procesy

Proveditelnost a cena:

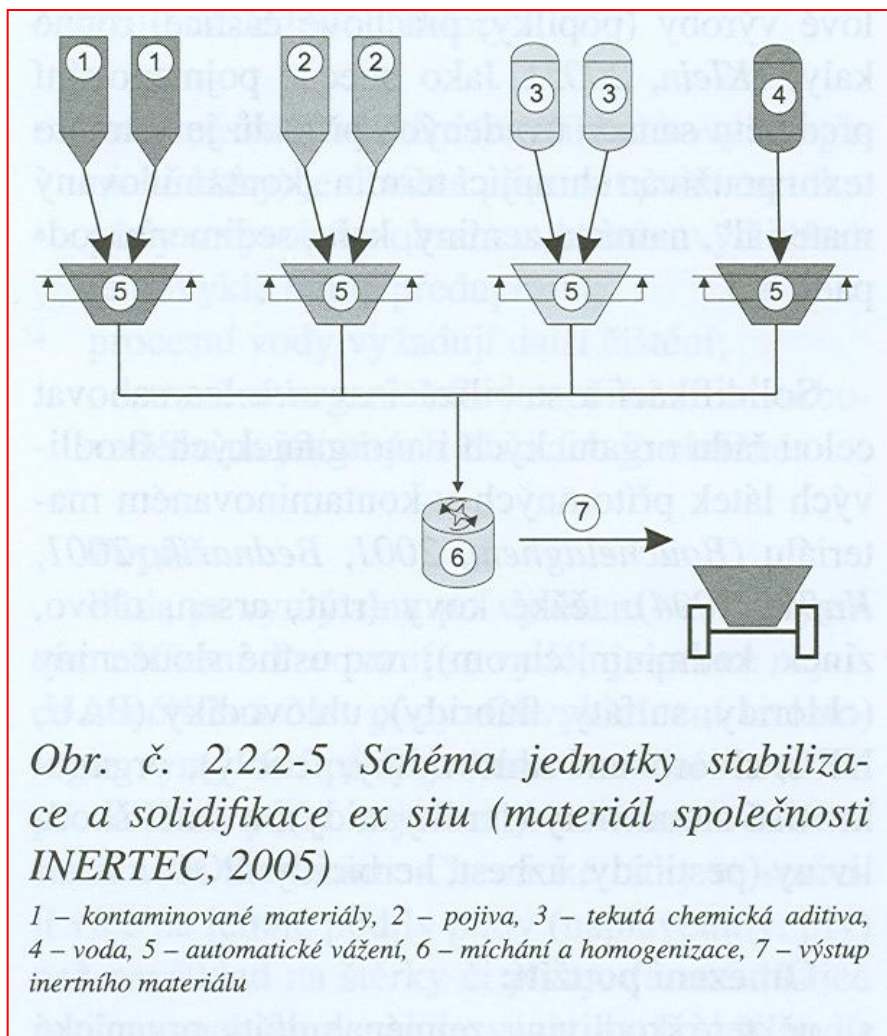
- ↪ Testy limitních hodnot výskytu radionuklidů a organických látek
- ↪ Pilotní studie zaměřené na elektrokinetické půdní procesy
- ↪ Dosažena odstraňovací účinnost 90 až 95% při relativně nízké ceně

Další možné metody

Stabilizace a solidifikace *in situ*



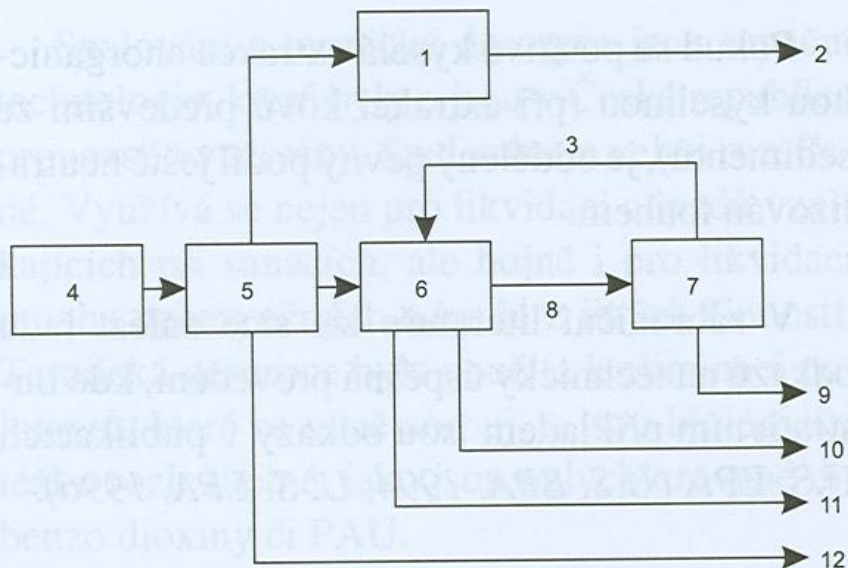
Stabilizace a solidifikace *in situ*



Obr. č. 2.2.2-5 Schéma jednotky stabilizace a solidifikace *ex situ* (materiál společnosti INERTEC, 2005)

1 – kontaminované materiály, 2 – pojiva, 3 – tekutá chemická aditiva, 4 – voda, 5 – automatické vážení, 6 – míchání a homogenizace, 7 – výstup inertního materiálu

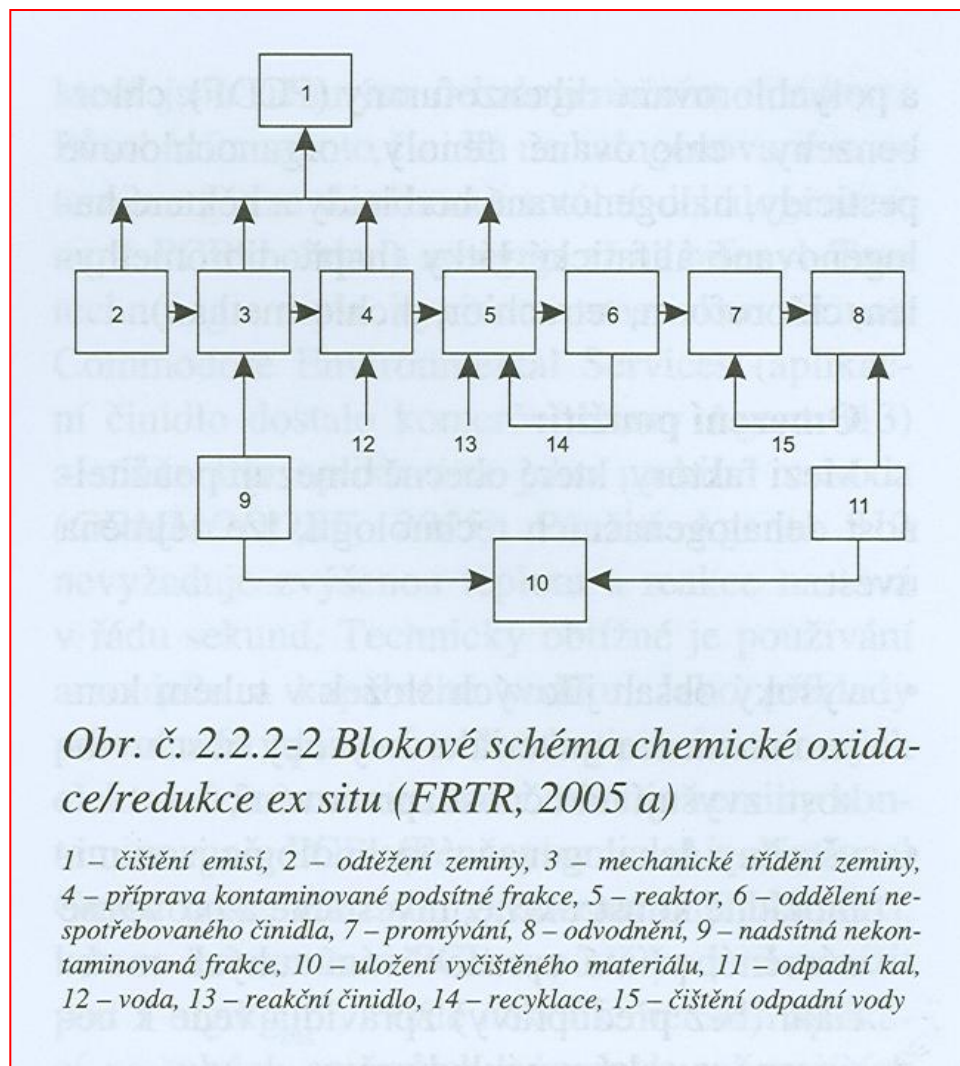
Chemická extrakce *ex situ*



Obr. č. 2.2.2-1 Blokové schéma chemické extrakce *ex situ* (FRTR, 2005)

1 – čištění emisí, 2 – vyčištěné emise, 3 – recyklovaná rozpouštědla, 4 – od-těžení, 5 – extrakční jednotka, 6 – mechanické třídění, 7 – zpracování roz-pouštědla, 8 – rozpouštědlo obsahující kontaminanty, 9 – zakoncentrovaný kontaminant, 10 – tuhý vyčištěný materiál, 11 – odpadní voda, 12 – nekon-taminovaná nadsítná frakce

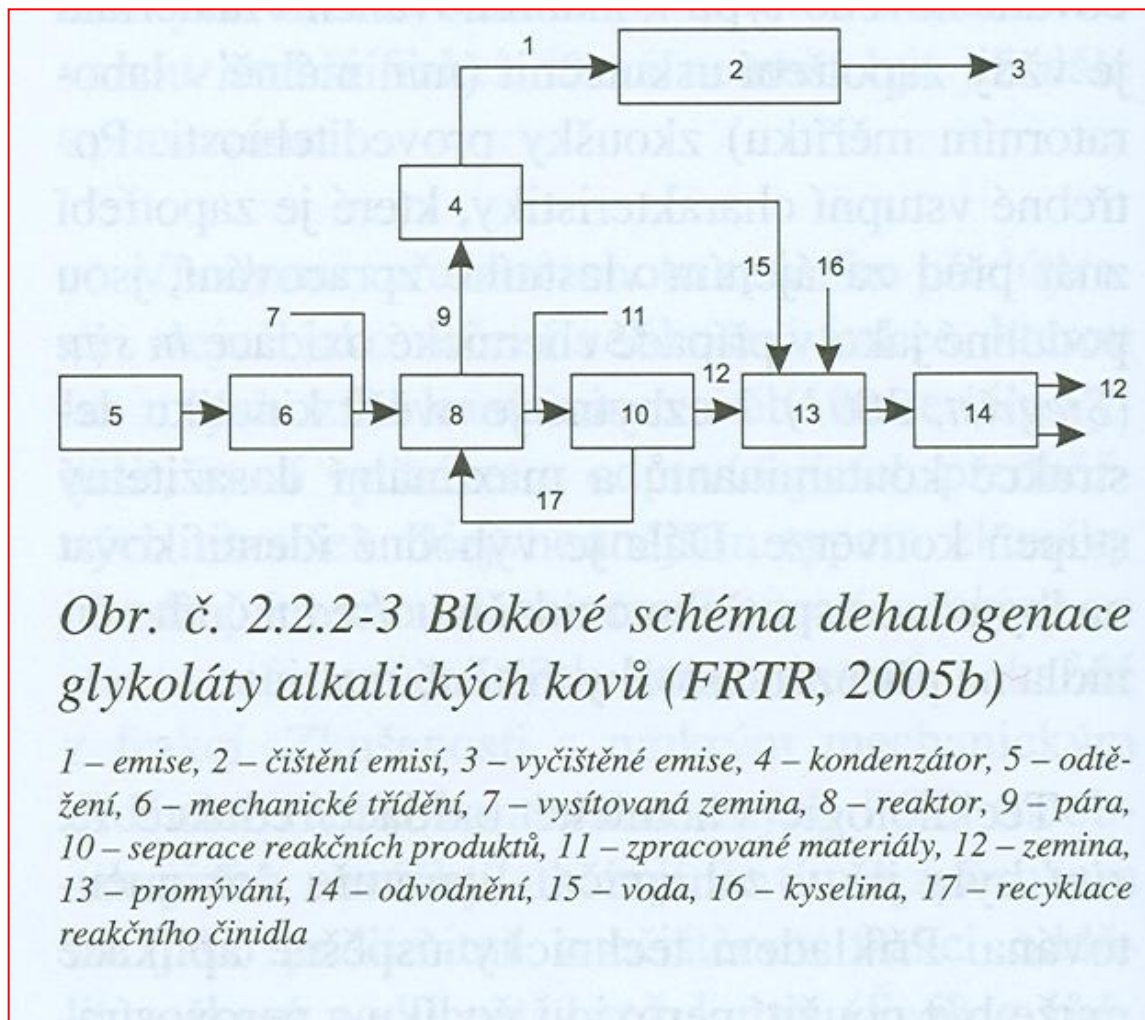
Chemická oxidace/redukce *ex situ*



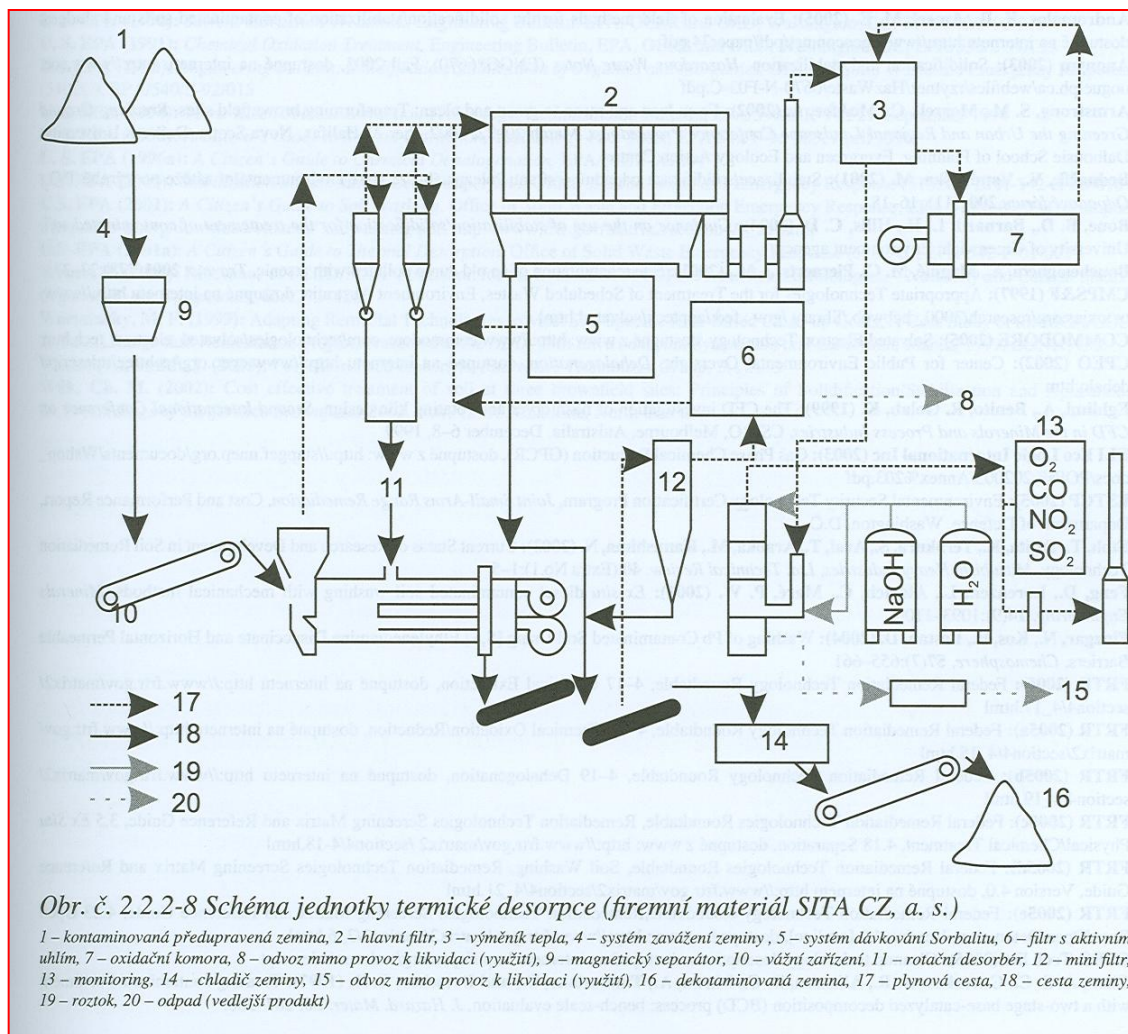
Obr. č. 2.2.2-2 Blokové schéma chemické oxidace/redukce *ex situ* (FRTR, 2005 a)

1 – čištění emisí, 2 – odtěžení zeminy, 3 – mechanické třídění zeminy, 4 – příprava kontaminované podsítné frakce, 5 – reaktor, 6 – oddělení nepotřebovaného činidla, 7 – promývání, 8 – odvodnění, 9 – nadsítná nekontaminovaná frakce, 10 – uložení vyčištěného materiálu, 11 – odpadní kal, 12 – voda, 13 – reakční činidlo, 14 – recyklace, 15 – čištění odpadní vody

Dehalogenace glykoláty alkalických kovů



Termická desorpce



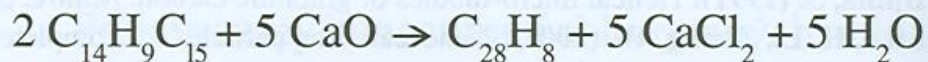
Mechanickochemická dehalogenace

6.2 Mechanickochemická dehalogenace

Mechanickochemická dehalogenace byla vyvinuta na Novém Zélandě a převzata do Austrálie a Japonska. V Evropě, pokud je autorovi známo, využívá tuto technologii pouze jediná společnost v Německu (*Birke, 2003, Birke 2005, Anonym, 2003, Anonym 2005b*).

Princip:

Kontaminovaný materiál nebo čistá chemická látka jsou mechanicky rozemílány ve vibračních kulových mlýnech. Mlýny slouží jako účinné míchací zařízení a chemický reaktor současně v jednom procesním kroku. Organicky vázaný chlor se odděluje z molekuly polutantu působením kovů (sodík, hořčík, hliník, železo nebo slitiny). Je zaměněn za vodíkový iont z pomocné látky, která je jejich zdrojem. Z procesu odchází jako chlorid použitého kovu, který není škodlivý. Pro dehalogenaci DDT je možné reakci popsat následovně (*Hall a kol., 1996*):



[6.2-1]

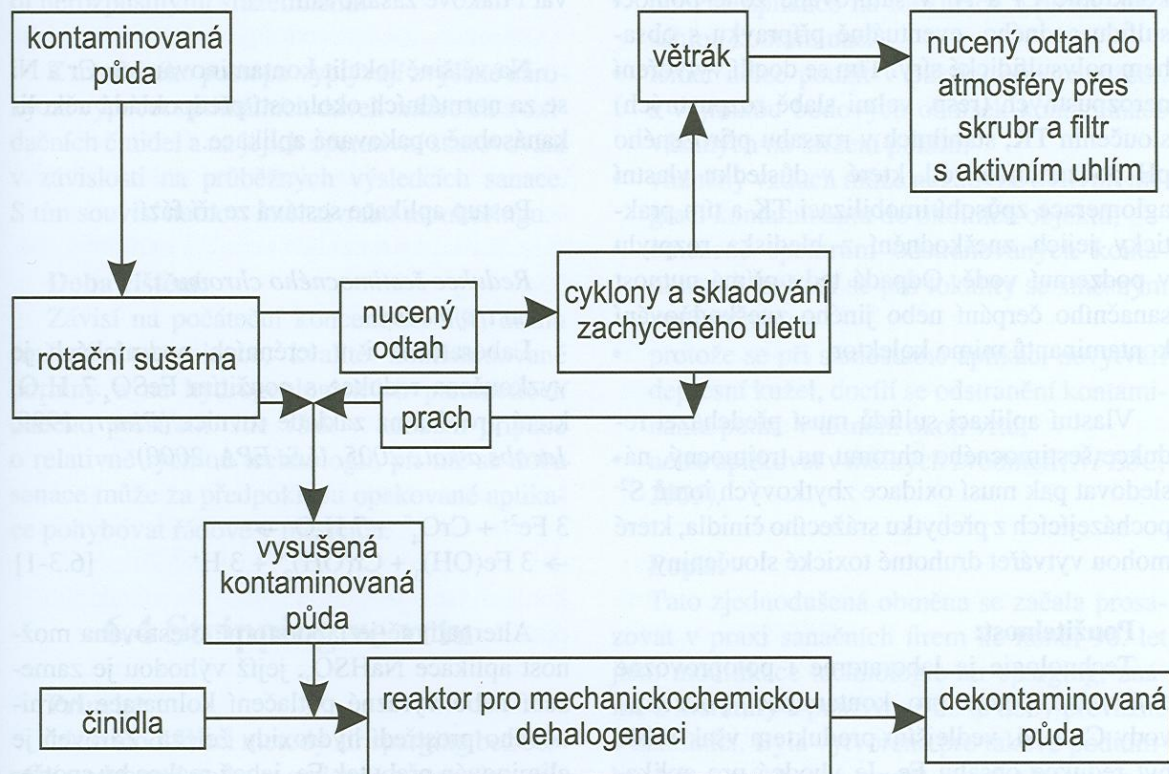
Mechanickochemická dehalogenace

Použitelnost:

Tuto technologii lze použít při rozkladu prakticky všech polyhalogenovaných látek jako polychlorovaných bifenylů (PCB), pesticidů (lindan, dieldrin, DDT), polychlorovaných dioxinů, pentachlorofenolu, chlorovaných ethylenů.

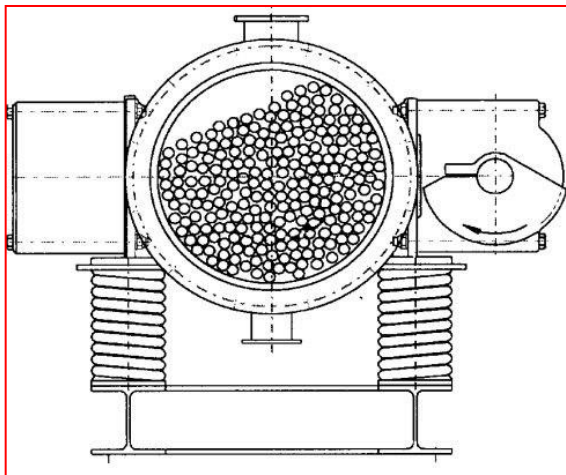
Omezení použití:

Pokud mají být čištěny stavební materiály, musí tomu předcházet drcení a roztřídění materiálu podle velikostních frakcí. Vysoký obsah jílu v ošetřované půdě prodlužuje reakční dobu a zvyšuje náklady.

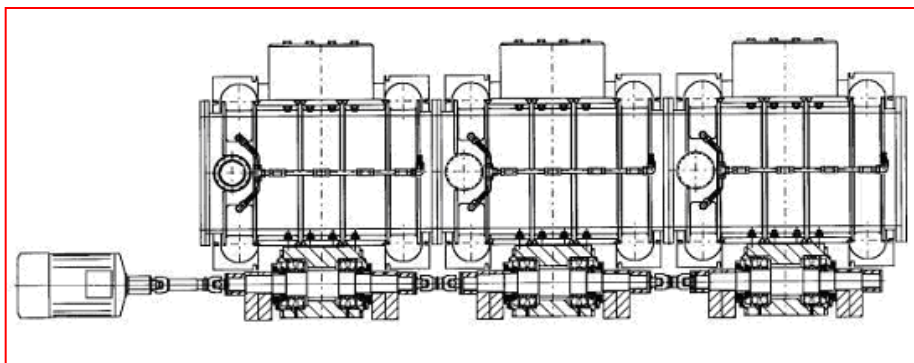


Obr. č. 6.2-1 Blokové schéma provozního zařízení na likvidaci polyhalogenovaných polutantů s výkonem 108 m³ za týden s mechanickochemickou dehalogenací v jednom stupni. Toto zařízení bylo s úspěchem použito na dekontaminaci půdy v Aucklandu na Novém Zélandě (Anonym, 2003).

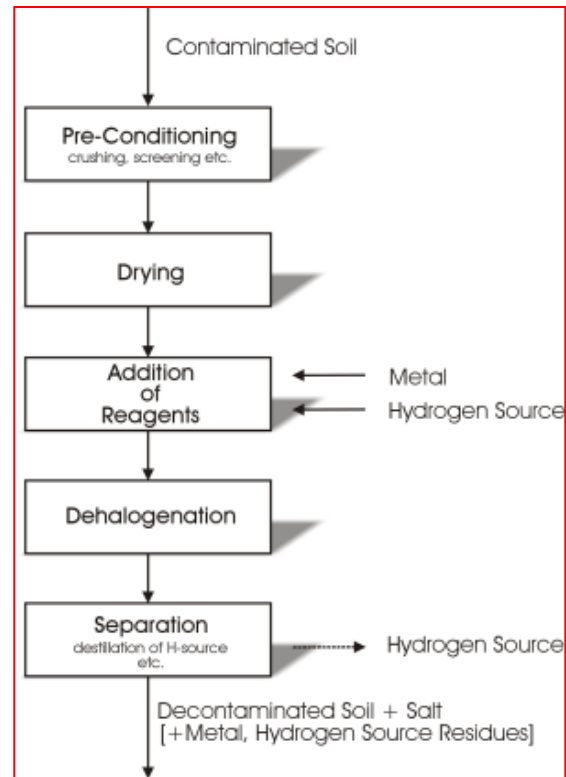
Mechanickochemická dehalogenace



Sketch and photo of the DMCR vibratory mill (mobile design)

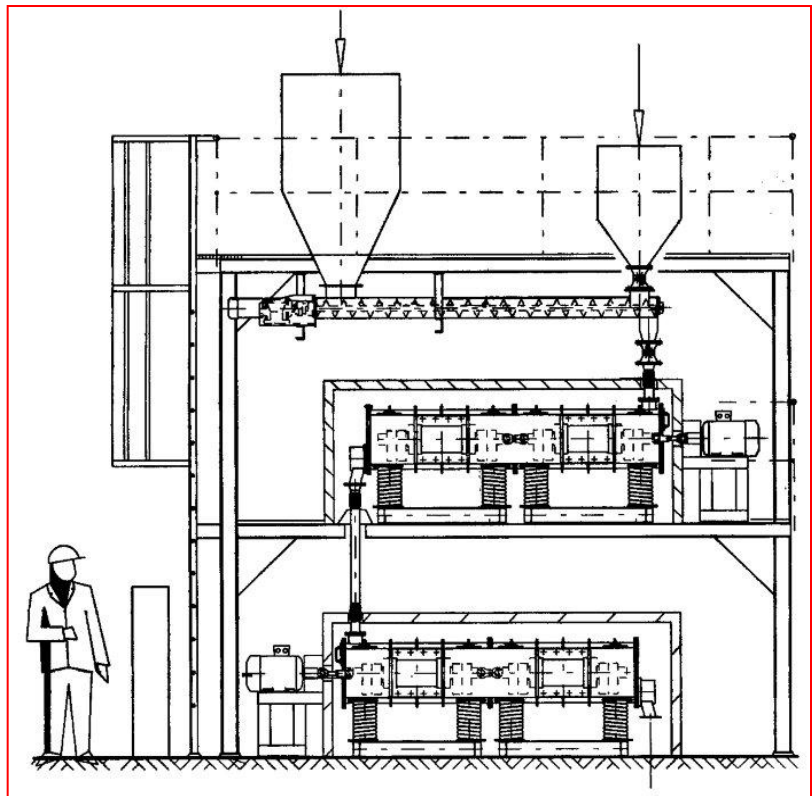


Sketch of the DMCR process containing three ball mills



Flow diagram for treating contaminated soils by DMCR process

Mechanickochemická dehalogenace

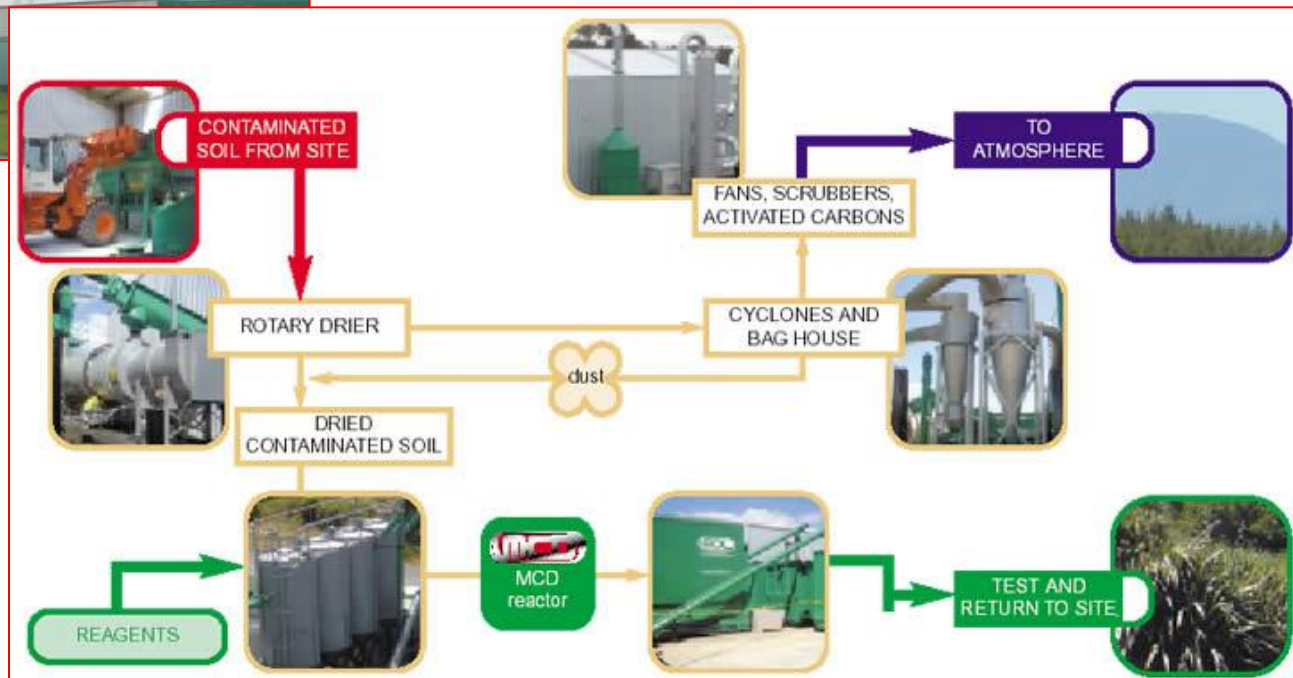


Outline of an off site Tribochem's vibratory mill plant capable of treating solid materials principally (throughput approximately up to 1 ton per hour) and a photo of a pilot vibratory mill plant

Mechanickochemická dehalogenace



Full scale EDL's
MCD plant in New
Zealand



General scheme of the EDL's MCD process

Mechanickochemická dehalogenace

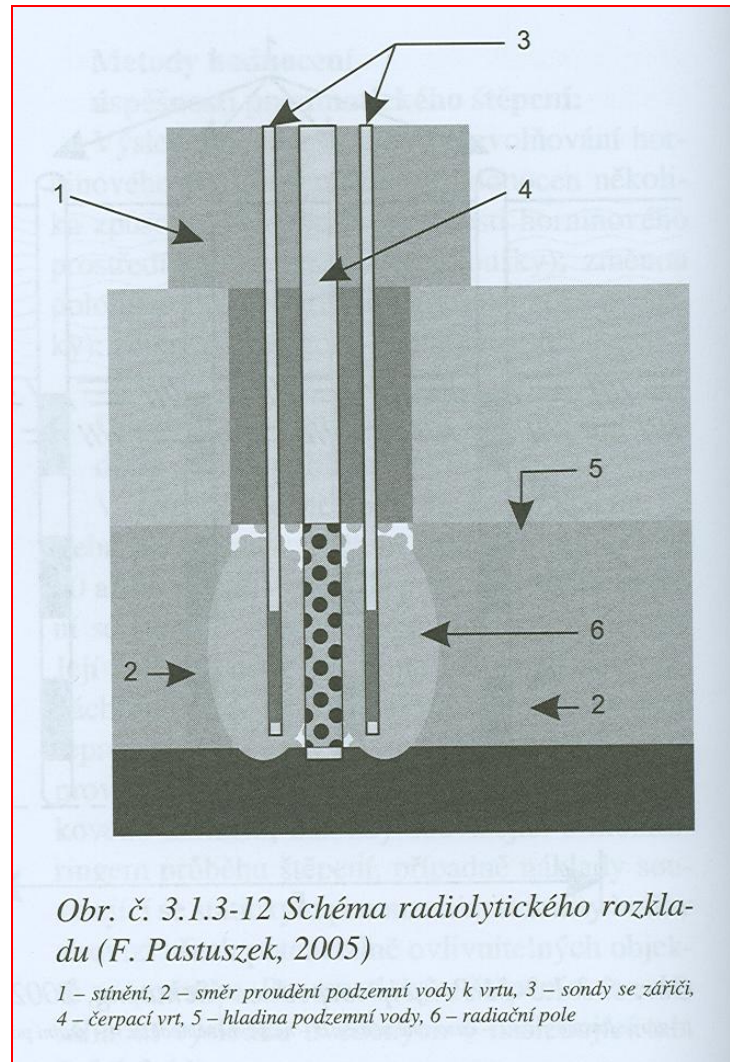
Advantages:

- ↪ Very low risk of forming new contaminants, such as dioxins because of low temperature and reductive environment.
- ↪ Low risk of the release of contaminants because of the containment. The process can also be readily shutdown in a short period of time.
- ↪ Increased safety because of ambient conditions and absence of rigorous reactions that can go out of control.
- ↪ Electrical equipment, contaminated with PCB or other heterogeneous waste may be treated directly.
- ↪ Almost no gaseous emissions are produced.

Limitations, disadvantages, and concerns:

- ↪ Noise and vibration
- ↪ Long reaction times
- ↪ High electricity requirements
- ↪ Limited to dry, solid, and non-concentrated POP waste
- ↪ Water streams

Radiolytický rozklad



Kombinovatelnost metod rozvolňování se sanačními metodami

Sanační metoda	Typ kontaminace	Pneumatické štěpení	Hydraulické štěpení	Torpedace
venting/bioventing	TOL	A	A	P
dvojfázová extrakce	TOL	A	A	A
sanační čerpání	rozpuštěné kontaminanty	A	A	A
sbírání fáze	ve vodě nerozpustné polutanty	A	A	A
biodegradace	organické polutanty	A	A	P
reaktivní stěny	bez omezení	A	A	P
chemická oxidace/redukce	organická a anorganická	A	A	P
air sparging	TOL	A	A	P
elektrokinetika	organická a anorganická	P	A	N
<i>in situ</i> vitrifikace	bez omezení	A	P	N
termické metody	TOL, ČTOL, netěkavé	A	A	N
promývání surfaktanty	organická a anorganická	P	P	N

Tab. č. 2.1.2-1: Kombinovatelnost jednotlivých metod rozvolňování se sanačními metodami (Schuring, 2002).

A – realizováno minimálně jako terénní pilotní zkouška, P – nerealizováno, ale je proveditelné, N – neproveditelné

Hlavní omezení zavedených fyzikálně-chemických technologií

	Landfill /Cap Systems	Solidification/Stabilization	Vapor extraction (SVE)
Technical / Economic	The toxicity is not reduced and pollutants are not destroyed with these methods	The solidified material may hinder future site use if carried out <i>in-situ</i> . The process is not effective in immobilizing organic waste.	Low permeabilities, high humidity content and soil heterogeneity limit the performance. The method is only suitable for medium to high volatile compounds.
Social	In some cases this methods may attract public opposition.	In some cases this methods may attract public opposition.	Usually does not attract public opposition.
Environmental / Risk	Precautions must be taken to ensure the cap is not damaged by land use activities. Several semivolatile pollutants may evaporate more rapidly with increased moisture in soils and sediments (Chiarenzelli, 1998). Potential leaking of hazardous compounds.	Precautions must be taken to minimize components leaching from stabilized media. Environmental conditions may affect the long-term immobilization of contaminants. There is no reduction of pollutants toxicity	Potential releases of hazardous compounds during excavation and materials handling. Exhaust air from SVE requires secondary treatment.

Hlavní omezení zavedených fyzikálně-chemických technologií

	Base catalyzed dechlorination (BCD)	Electrochemical oxidation	Solvent extraction Chemical dehalog. Radiolytic degradation
Technical/ Economic	Not economical to treat large volumes of aqueous waste. The waste may require pre-dilution to achieve required destruction efficiencies. Overall efficiency is limited by thermal desorption efficiency. Energy costs to treat pesticides waste may be higher, due to the solvents distilled from the mixture.	Highly dependent on soil moisture content. Requires neutralization of treated soil.	Less effective when treating weight organic and hydrophilic compounds. Requires secondary treatment (including extracted metals). Soil types and moisture may impact efficiency.
Social	Generally not regarded adversely by community.	No public opposition.	No public opposition.
Environmental	Potential to form dioxins and furans is low, since the system operates under an inert atmosphere and the process should dechlorinate dioxins. Exclusion of air is required to prevent auto ignition of hot oil. Alkaline pretreatment and solvent extraction imply fire and explosion risks.	Acids' handling implies spill risk.	Solvent extraction implies fire and explosion risks. Must be assured the proper handling, recycling and disposal of used solvents.

Hlavní omezení zavedených fyzikálně-chemických technologií

	Solvated electron	Supercritical water oxidation	Solar detoxification - Photochemical degradation
Technical/ Economical	May require a pretreatment for dewatering of sludge and/or sediments.	The end products (ash and brine) require proper disposal. Limited to treat liquid waste with solids sizing less than 200µm. Applicable to waste with organic content less than 20%.	The photolysis rates for pesticides are highly dependent on latitude, season and other meteorological conditions.
Social	No public opposition known at this stage.	Not known public opposition at this stage.	No known public opposition.
Environmental	Ammonia is a volatile liquid; toxic and fire risks. Calcium metal combined with hydrogen may form explosive mixtures.	Due to the high temperatures and pressures used in this technology, requires specialized control equipment, reactor materials and safety practices.	Low environmental impact due to limited use of chemicals and low off-gas generation rates.

Hlavní omezení zavedených fyzikálně-chemických technologií

	Gas phase chemical reduction	Catalytic hydrogenation
Technical/ Economical	Pollutants such as sulphur and arsenic may inhibit treatment. Sulphur in combination with iron may produce slimes that require additional centrifuge separation. The existence of irregular solids may also limit waste treatment due to materials handling. May need to be linked to special waste handling facilities in order to improve waste material handling.	Potential poisoning of catalysts may decrease or nullify process efficiency.
Social	Generally not regarded adversely by community.	No public opposition.
Environmental	Potential fugitive emissions of PCBs, pesticides or dioxins. The handle, use and storage of hydrogen within the process represent fire and explosion risks. The facilities must be subjected to an internal hazardous operations reviews and specialized process control to prevent release of waste materials during a process upset.	Gaseous products may generate safety and toxicity hazards. Combustion products may require scrubbing that would generate aqueous waste.

Základní charakteristiky tradičních metod čištění odpadních plynů

Technologie	Vstupní koncentrace [ppmv]	Účinnost [%]	Výhody	Nevýhody
absorpce	250 1000 50 000	90 95 98	zvláště vhodná pro anorganické kyselé plyny	omezená použitelnost
adsorpce	200 1000 5000	50 90–95 98	nízké kapitálové nároky; vhodná pro rekuperaci rozpouštědel	omezení z důvodů vlhkosti plynu a teploty
termická oxidace	20 100	95 99	vysoká účinnost odstranění; rozsáhlá aplikovatelnost; zpětné získávání energie možné	nelze rekuperovat organické látky; nákladově náročná
katalytická oxidace	50 100	90 >95	vysoká účinnost odstranění; může být méně nákladná než termická oxidace	nelze rekuperovat organické látky; nebezpečí otravy katalyzátorů
spalování na fléře		>98	vysoká účinnost odstranění	nelze rekuperovat organické látky; pro velké emise

Tab. č. 4.2-1 Základní charakteristika tradičních metod čištění odpadních plynů
(Schnelle a Brown, 2002)

Nanotechnologie pro sanace ekologických zátěží

Moderní slovo nanotechnologie popisuje použití materiálů či struktur o rozměrech většinou v mezích od 1 do 100 nm (od 10^{-9} do 10^{-7} m). I přesto, že se jedná o velmi moderní terminologii, i bez tohoto termínu se setkáváme s objekty této velikosti v běžném denním životě. Např. běžné molekuly proteinů, viry nebo složité organické molekuly, jako třeba hemoglobin, mají rozměry v řádu jednotek až stovek nanometrů. I v oblasti výzkumu ochrany životního prostředí se vyskytují přirozené nanostruktury – zvětrávání minerálů vede k produkci koloidních částic, které mají nanorozměry a putují podzemní vodou stejně jako bakterie a řasy. Migrace těchto látek a organismů může být důležitá pro transport, transformaci či biologickou dostupnost nebezpečných látek (*Masciangioli a Zhang, 2003*).

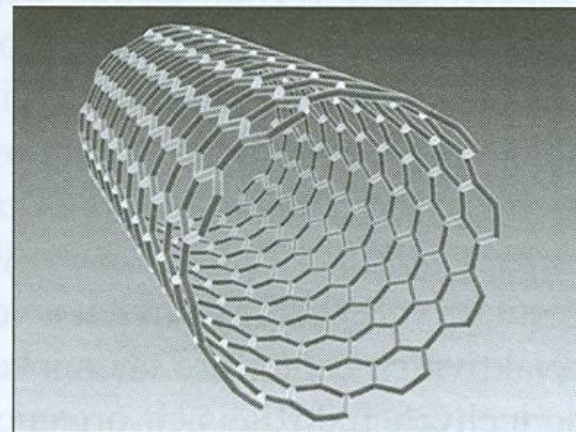
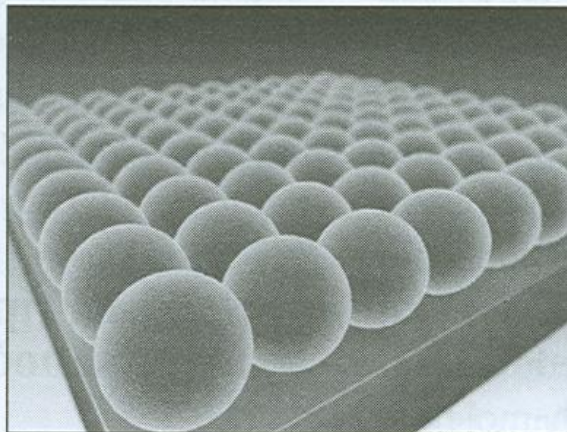
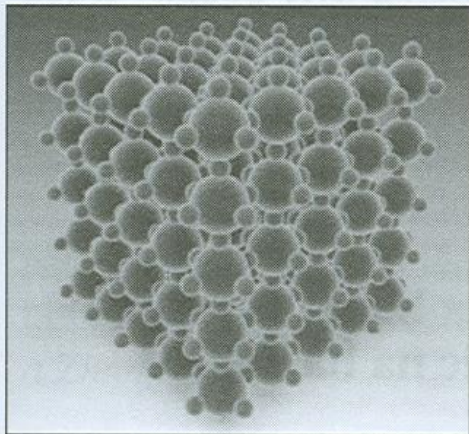
tí. Např. nanočástice různých oxidačních a redukčních činidel se začínají komerčně používat pro podporu mikrobiálního růstu vedoucího k odstranění organické kontaminace vod; fotocitlivé nanočástice oxidů zinku či titanu jsou použitelné k odstranění chlorovaných uhlovodíků fotokatalytickou reakcí; trubičky nanorozměrů jsou testovány pro odstraňování dioxinů; senzory o nanorozměrech jsou schopny indikovat ionty těžkých kovů s velmi vysokou citlivostí v řádu několika atomů; polovodivé nanoklastry se začínají používat k cílené oxidaci organických molekul slunečním světlem.

Nanotechnologie pro sanace ekologických zátěží

Z hlediska sanací podzemní vody a kontaminovaného horninového prostředí jsou velmi slibné metody založené na použití kovových částic (většinou nulamocného železa) povrchově pokrytých dalším kovem (Pd, Pt, Ni, Ag atd.) (Zhang, 2003). Nanočástice tohoto typu jsou účinné pro sanace podzemní vody a kontaminované půdy od alifatických či aromatických uhlovodíků, chlorovaných uhlovodíků, některých karcinogenních látek, PCB a těžkých kovů (Masciangioli a Zhang, 2003). Výhodou těchto částic je velký měrný povrch a velká koncentrace aktivních center pro chemickou redukci jednoduchých i složitějších organických molekul. Při aplikaci nanočástic do sanačních vrtů jich část ulpí na horninovém prostředí a část migruje s podzemní vodou a sanuje tak oblast ve směru

proudění podzemní vody. Vedle možnosti velmi efektivní a rychlé sanace kontaminace *in situ* se tyto nové technologie jeví i relativně levné v porovnání s klasickými sanačními postupy.

Nanotechnologie pro sanace ekologických zátěží



Obr. č. 5.1-1 (vlevo) Nanočástice či nanokrystal (Anonym, 2005); obr. č. 5.1-2 (uprostřed) Nanovrstva (Anonym, 2005); obr. č. 5.1-3 (vpravo) Nanotrubička (Anonym, 2005)

Nanotechnologie pro sanace ekologických zátěží

Veškeré známé aplikace nanočástic pro sanaci v horninovém prostředí *in situ* jsou ve stadiu laboratorních testů a zkoušek na pilotních lokalitách.

5.3 Popis technologie sanace kontaminované podzemní vody *in situ*

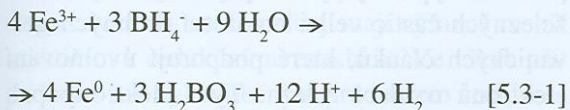
Laboratorní experimenty provedené na konci 90. let minulého století ukázaly, že bimetalické částice (Pd/Fe, Pd/Zn apod.) mají velkou účinnost pro odstranění chlorovaných uhlovodíků z vodného prostředí. Např. částice železa s malým přídatkem paladia jsou v laboratorních podmínkách schopny rozložit sloučeniny, jako jsou PCE, TCE, 1,1-DCE, c-DCE, t-DCE, na ethan a chloridový iont během několika minut (*Muftikian a kol., 1995*). Obdobně kladné výsledky má i použití podobných částic k odstranění PCB (*Griffini a kol., 1995, Mikszewski, 2004*). Částice na bázi Ni/Fe či Cu/Fe byly použity k rozkladu 1,1,1-trichlorethanu a částice typu Pt/Fe či Pd/Zn k rozkladu chlorovaných benzenů (*Fennelly a Roberts, 1997*).

Nanotechnologie pro sanace ekologických zátěží

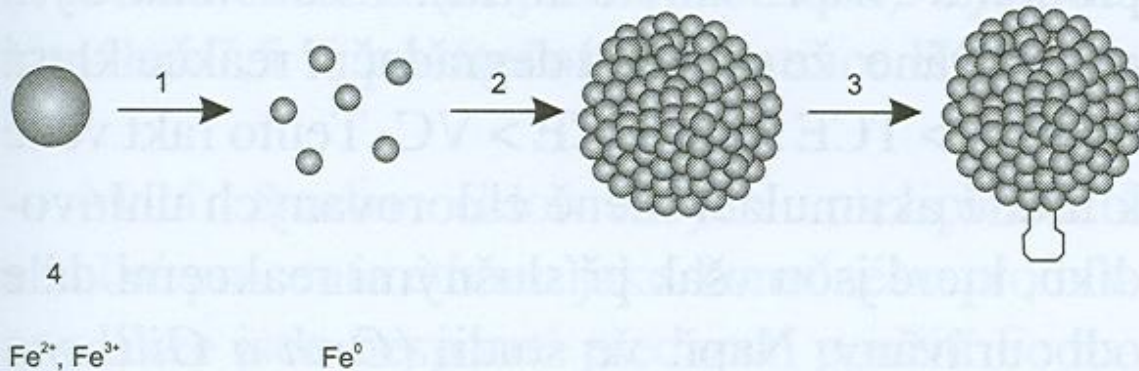
5.3.1 Příprava bimetalických nanočástic na bázi Fe

Nanočástice na bázi nulamocného železa Fe^0 byly poprvé syntetizovány na konci 90. let minulého století.

Základem chemické reakce je smíchání roztoků 0,25 M NaBH_4 a 0,045 M FeCl_3 . Po smísení probíhá následující chemický děj:



Reakce probíhá při pokojové teplotě a sraženiny železa se objeví přibližně za 5 minut. Vzhledem ke stechiometrii reakce je NaBH_4 přidán ve značném přebytku (7,4násobku stechiometrického poměru podle uvedené reakce). Podle autorů (Lien a Zhang, 2001) je tento nadbytek klíčovým faktorem pro rychlý a homogenní růst železných krystalů. Vysušené částice mají velikost obecně menší než 100 nm (většinou mezi 10 a 100 nm) a specifický povrch okolo $35 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

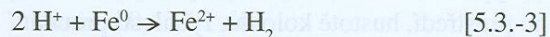


Obr. č. 5.3-1: Schematický obrázek vzniku železných nanočástic (Zhang, 2003a)

1 – redukce, 2 – tvorba klastrů, 3 – stabilizace, 4 – prekurzory reakce

Nanotechnologie pro sanace ekologických zátěží

nízký, že částice jsou za normálních podmínek schopny redukovat protony na molekulární vodík podle reakce:



Tato reakce způsobuje zvýšení pH podzemní vody při aplikaci částic. V případě, že podzemní voda nemá dostatečnou pufrovací kapacitu, může být dlouhodobě pozorováno zvýšení pH až o 2 jednotky (Elliot a Zhang, 2001).

5.3.2 Použití Fe nanočástic

Při sanacích *in situ* se v naprosté většině případů injektují do vrtů rozpuštěné látky. Tyto látky pak putují podzemní vodou a jsou retardovány, dispergovány a spotřebovávány při chemických reakcích v roztoku. Aplikace nanočástic injektáží a následná disperze látek ve formě nerozpuštěných částic či koloidů způsobuje komplikace při jejich následné migraci horninovým prostředím. Materiál horninového prostředí v okolí aplikačního vrtů působí jako jemný filtr, který má snahu tyto částice zachytit a omezuje tím jejich migraci. Například pískové filtry jsou schopny odstranit většinu přirozeně se vyskytujících koloidů. Ve skutečnosti migraci koloidních částic ovlivňují tři hlavní mechanismy:

- i) Brownův pohyb či molekulární difuze, při které se částice pohybují v náhodných směrech;
- ii) konvekční pohyb částic v proudu podzemní vody;
- iii) gravitační pohyb způsobující vertikální klesání částic.

Zatímco difuzní pohyb způsobuje odstranění částic z proudu podzemní vody setrváním na místě náhodnými pohyby ve všech směrech bez preference směru proudění podzemní vody, gravitační pohyb způsobuje sedimentaci a vypadnutí částic z proudu podzemní vody. Oba tyto mechanismy závisejí na velikosti částic a mají své hranice – Brownův pohyb se uplatní především pro velmi malé částice (obecně $< 0,1 \mu\text{m}$) a gravitační sedimentace naopak pro částice větší (obecně $> 1 \mu\text{m}$). Mezi velikostními hranicemi těchto dvou mechanismů existuje oblast, kde se částice koloidních rozměrů budou pohybovat převážně v proudu podzemní vody s tím, že při-

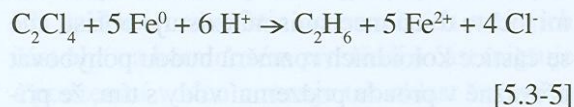
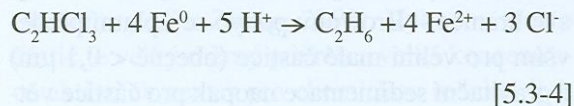
spěvek ostatních dvou mechanismů bude možné víceméně zanedbat. Tato „optimální“ velikost částic pro jejich migraci podzemní vodou závisí na typu a velikostní distribuci částic horninového prostředí, hustotě koloidů, rychlosti proudění podzemní vody, teplotě apod. Pro přírodní koloidní částice s hustotou blízkou hustotě vody je tato „optimální“ velikost okolo $1 \mu\text{m}$, což je přibližně rozměr bakteriální buňky, zatímco pro kovové nanočástice je optimální rozměr pod hranici 100 nm (Nurmi a kol., 2005).

Ve většině případů je horninové prostředí přirozeně reduktivní, a proto při aplikaci redukčních metod není potřeba kompletně měnit fyzikálně chemické podmínky a lze k dosažení stanovených cílových parametrů použít relativně malé množství podpurné látky. Již dříve bylo známo, že Fe^0 piliny či drobné kuličky mají silný redukční účinek, a proto jsou využívány v reakčních branách propustných hydraulických bariér. Ve srovnání s železnými pilinami milimetrových či centimetrových rozměrů mají nanočástice nesrovnatelně větší povrch ($30 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ve srovnání s $\sim 1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) a i větší reaktivitu. Navíc reaktivita povrchu může být výrazně zvýšena malou příměsí ušlechtilého kovu, např. paladia, kdy vlivem výměny elektronů mezi těmito dvěma kovy vznikají na povrchu drobné elektrické články, kde železo působí jako anoda a je snadněji oxidováno.

Nanotechnologie pro sanace ekologických zátěží

Na povrchu železných pilin dochází k redukčnímu rozkladu chlorovaných uhlovodíků na bázi methanu, ethanu, ethylenu, benzenu i polychlorovaných bifenylů. Při tomto rozkladu působí Fe^0 jako donor elektronů a chlorovaný uhlovodík, který je z pohledu reakce redukovatelnou sloučeninou, je akceptor elektronů. Při této reakci jsou chlorované uhlovodíky transformovány na méně toxické sloučeniny.

Dva nejběžnější chlorované uhlovodíky TCE a PCE jsou transformovány podle těchto reakcí:



Přesná role paladia pro rychlou a úplnou degradaci chlorovaných uhlovodíků bimetalickým systémem není známa. Podle existující pravděpodobné hypotézy vytváří paladium na povrchu železných částic velké množství drobných galvanických článků, které podporují uvolňování elektronů oxidací železa. Tyto elektrony pak reagují s protony (ionty H^+) a vytvářejí plyný vodík, který vstupuje do krystalické mřížky paladia. Pro atomy chlorovaných uhlovodíků, které se dostávají do kontaktu s železnými částicemi, pak plyný vodík působí jako velmi silné redukční činidlo pro dechlorační proces (obr. č. 5.3-2) (Cheng a kol., 1997).

Výhodou nanočástic na bázi Fe^0 oproti např. biodegradacím reakcím je, že vzniká podstatně méně chlorovaných meziproductů či konečných produktů (např. vinylchlorid). I zde však bylo pozorováno, že rychlost degrační reakce klesá od $\text{PCE} > \text{TCE} > \text{cis-DCE} > \text{VC}$. Tento fakt vede k určité akumulaci méně chlorovaných uhlovodíků, které jsou však příslušnými reakcemi dále odbourávány. Např. ve studii (Orth a Gillham, 1996), kde byl degradován TCE, bylo množství těchto meziproductů (součet všech DCE a VC) na úrovni 3 až 3,5 % počáteční koncentrace TCE. V případě použití bimetalických částic je množství těchto meziproductů ještě výrazně nižší (Lien a Zhang, 2001). Dalším faktem, který přispívá k tvorbě meziproductů, je mikrobiální redukce, která v případě příznivých podmínek může doprovázet aplikaci nanočástic. I v tomto případě je však podíl těchto látek velmi malý.



Obr. č. 5.3-2
Redukce polutantu
bimetalickou částicí
(Lingle, 2004)

Porovnání cen za sanaci podzemní vody různými sanačními technologiemi

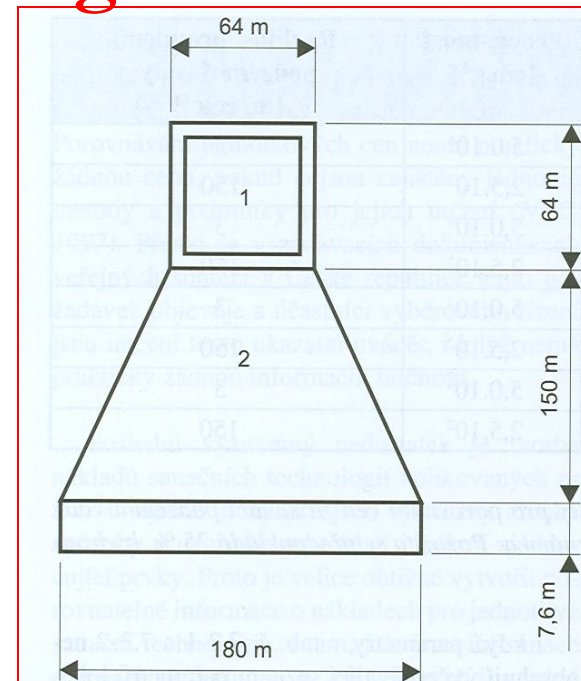
Vzor číslo	Hloubka hladiny podzemní vody [m]	Mocnost zvodně [m]	Propustnost [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Rychlost proudění podzemní vody [$\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}$]
1	4,6	7,6	$5,0\cdot 10^4$	3
2	4,6	7,6	$2,5\cdot 10^2$	150
3	4,6	21	$5,0\cdot 10^4$	3
4	4,6	21	$2,5\cdot 10^2$	150
5	30	7,6	$5,0\cdot 10^4$	3
6	30	7,6	$2,5\cdot 10^2$	150
7	30	21	$5,0\cdot 10^4$	3
8	30	21	$2,5\cdot 10^2$	150

Tab. č. 7.3-1 Obecné parametry pro vzorové lokality pro porovnání cen za sanaci podzemní vody různými sanačními technologiemi (NRC, 1997). Poznámka: Porozita se předpokládá 25 %, hydraulický gradient $0,005 \text{ cm}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro všech osm případů.

Porovnání cen za sanaci podzemní vody/půdy různými sanačními technologiemi

Charakteristika lokality
Dostupnost lokality
Dostupnost energií
Petrografie nesaturované zóny
Petrografie saturované zóny
Plošný rozsah kontaminace
Objem kontaminované saturované a nesaturované zóny
Charakteristika podzemní vody
pH a koncentrace rozpuštěného kyslíku
Redox potenciál
Koncentrace konečných akceptorů elektronů pro biologickou degradaci
Rozpuštěné látky, tvrdost, koncentrace železa, manganu a dalších anorganických látek
Sorpční vlastnosti horniny
Charakteristika polutantu
Koncentrační profily polutantu
Charakter ohniska
Vlastnosti polutantu (těkavost, specifická hmotnost, viskozita, sorpční vlastnosti)
Biodegradovatelnost
Celkové množství polutantu

Tab. č. 7.3-2 Podrobné informace nutné pro vzorovou lokalitu pro porovnání cen čištění podzemní vody a zemin různými sanačními technologiemi (NRC, 1997)



Obr. č. 7.3-1 Příklad vzorové lokality, kterou lze použít pro porovnání nákladů různých sanačních technologií. V tomto případě bylo 4000 m² kontaminováno 680 kg PCE. Hladina podzemní vody byla 4,6 m pod terénem a mocnost zvodně byla 7,6 m. Rychlost proudění podzemní vody 150 m.r⁻¹, porozita 0,25. Tyto parametry korespondují se vzorovou lokalitou 2 v tab. č. 7.3-1.

1 – ohnisko znečištění PCE, 2 – koncentrace PCE 1 mg.l⁻¹ na okraji kontamináčního mraku

Porovnání cen za sanaci podzemní vody/půdy různými sanačními technologiemi

Matrice	Ex situ	In situ
Půda, pevný odpad	cena za jednotkový objem [Kč.m ⁻³]	cena za jednotkový objem [Kč.m ⁻³]
	cena za jednotkovou hmotnost [Kč.t ⁻¹]	cena za odstraněnou jednotkovou hmotnost polutantu [Kč.kg ⁻¹] [Kč.t ⁻¹]
	cena za odstraněnou jednotkovou hmotnost polutantu [Kč.kg ⁻¹] [Kč.t ⁻¹]	cena za ošetřenou jednotkovou plochu [Kč.m ⁻²]
Podzemní voda	cena za jednotkový objem ošetřené podzemní vody [Kč.m ⁻³]	cena za jednotkový objem ošetřené podzemní vody [Kč.m ⁻³]
	cena za odstraněnou jednotkovou hmotnost polutantu [Kč.kg ⁻¹] [Kč.t ⁻¹]	cena za odstraněnou jednotkovou hmotnost polutantu [Kč.kg ⁻¹] [Kč.t ⁻¹]
		cena za ošetřenou jednotkovou plochu [Kč.m ⁻²]

Tab. č. 7.4-1 Běžně užívané jednotkové ceny pro vyjádření nákladů sanační technologie (NRC, 1997)

Porovnání cen za sanaci podzemní vody/půdy různými sanačními technologiemi

Investiční náklady		Provozní náklady	
A.	Příprava lokality	A.	Přímá práce
	Vyčištění lokality		Práce spotřebovaná na obsluhu zařízení
	Vybudování přístupu na lokalitu		Řízení prací
	Získání povolení a licencí		Mzdové prostředky (včetně sociálního a zdravotního pojištění)
	Hloubení vrtů		Spotřební materiál
	Oplocení		Najímaná práce
B.	Instalace přívodu vody, elektřiny, plynu, kanalizace	B.	Údržba zařízení
	Stavby		Přímý materiál
	Budovy		Spotřební materiál
	Montážní plošiny		Chemikálie a pomocné látky
	Ocelové konstrukce pro technologická zařízení		Paliva
	Přístřešky pro stroje a zařízení, sklady		Náhradní díly
C.	Procesní zařízení a doplňky	C.	Pracovní pomůcky ochranné
	Náklady na části technologie a dodávky		Režie, dopravné a cestovné
	Materiál a dodávky, které umožňují provoz technologie		Údržba zařízení
	Dopravní prostředky		Odpovědnostní pojištění
			Nájem zařízení
			Dopravné
D.	Další zařízení	D.	Poplatky za licence
	Zařízení kanceláří		Cestovné
	Počítače		Poštovné
	Bezpečnostní zařízení		Administrativa
			Administrativní práce
			Marketing
E.		E.	Telefon a ostatní komunikace
			Úroky
			Management lokality
			Likvidace odpadu
			Zajištění bezpečnosti práce a požární ochrany
			Služby
			Laboratorní práce
			Pilotní testy
			Kontrahované služby
			Ukončení činnosti

Tab. č. 7.5-1 Cenové prvky potřebné při určování ceny či odhadu nákladů (Herricksen a Booth, 1995)

Technologie	Ošetřené množství půdy za rok [t.r ⁻¹]	Cena [euro.t ⁻¹]
spalování	725 000	35 až 60
biologické čištění	265 000	20 až 40
praní půdy	855 000	20 až 45
imobilizace	150 000 až 250 000	40 až 45
skládkování	550 000	40 až 70
recyklace neošetřené půdy	9 000 000	2 až 7
recyklace půdy po vyčištění	1 500 000	0 až 3

Tab. č. 7.6-1 Náklady na ošetření kontaminovaných zemín ex situ v Nizozemí (Honders a kol., 2001)

Porovnání cen různých sanačních technologií

Technologie	Typ technologie	Cena
Biologické čištění půdy	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	< \$ 150 za 1 tunu zeminy, cena zahrnuje vytěžení zeminy, dopravu, projekt, provozní náklady
Biologický suspenzní systém	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	\$ 80 až \$ 230 za tunu zeminy, cena zahrnuje pouze provozní náklady
Praní půdy	separace polutantu <i>ex situ</i>	\$ 55 až \$ 165 za tunu zeminy, cena zahrnuje pouze provozní náklady
Dehalogenace	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	> \$ 450 za tunu zeminy cena zahrnuje zpracování projektu, vytěžení, instalaci zařízení a provozní náklady
Chemická extrakce	separace polutantu <i>ex situ</i>	\$ 65 až \$ 300 za tunu zeminy, cena zahrnuje pouze provozní náklady
Chemická oxidace-redukce	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	\$ 150 až \$ 450 za tunu zeminy, cena zahrnuje zpracování projektu, vytěžení, instalaci zařízení a provozní náklady
Nízkoteplotní termická desorpce	separace polutantu <i>ex situ</i>	< \$ 150 za tunu zeminy, cena zahrnuje zpracování projektu, vytěžení, instalaci zařízení a provozní náklady
Vysokoteplotní termická desorpce	separace polutantu <i>ex situ</i>	\$ 150 až \$ 450 za tunu zeminy, cena zahrnuje zpracování projektu, vytěžení, instalaci zařízení a provozní náklady
Spalování	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	\$ 120 až \$ 1175 za tunu zeminy, cena zahrnuje pouze provozní náklady
Vytěžení a uložení na skládku	<i>ex situ</i> odstraňování	\$ 70 za tunu zeminy při uložení na skládku komunálního odpadu \$ 550 za tunu zeminy při uložení na skládku nebezpečného odpadu
Solidifikace a stabilizace	<i>in situ</i> a <i>ex situ</i> uzavření a imobilizace	\$ 70 až \$ 200 za tunu zeminy, cena zahrnuje pouze provozní náklady
Vitrifikace	<i>in situ</i> a <i>ex situ</i> uzavření a imobilizace	\$ 700 za tunu zeminy, cena zahrnuje zpracování projektu, vytěžení (při aplikaci <i>ex situ</i>), instalaci zařízení a provozní náklady

Tab. č. 7.6-2 Přehled jednotkových cen sanačních technologií publikovaných Ministerstvem životního prostředí v Kanadě pro čištění zemín (Environment Canada, 1997)

Porovnání cen různých sanačních technologií

Technologie	Typ technologie	Cena
Přirozená atenuace	destrukce polutantu <i>in situ</i>	náklady pouze na vzorkování a monitoring
Podporovaná bioremediace	destrukce polutantu <i>in situ</i>	\$ 1,10 až \$ 3,70 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
Air sparging	separace polutantu <i>in situ</i>	< \$ 1,10 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
Odsávání volné fáze	odstraňování polutantu <i>ex situ</i>	< \$ 1,10 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
Bioreaktory	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	< \$ 1,10 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
Stripping	separace polutantu <i>ex situ</i>	< \$ 1,10 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
Adsorpce na aktivní uhlí	separace polutantu <i>ex situ</i>	> \$ 3,70 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
UV oxidace	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	\$ 1,10 až \$ 3,70 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
Nepropustná bariéra	uzavření <i>in situ</i>	< \$ 1,10 na 1000 litrů ošetřené podzemní vody, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady

Tab. č. 7.6-3 Přehled jednotkových cen sanačních technologií publikovaných Ministerstvem životního prostředí v Kanadě pro čištění podzemních vod (Environment Canada, 1997a)

Porovnání cen různých sanačních technologií

Technologie	Typ technologie	Cena
Přírozená atenuace	destrukce polutantu <i>in situ</i>	náklady pouze na vzorkování a monitoring
Biodegradace	destrukce polutantu <i>in situ</i>	\$ 150 až \$ 450 na tunu zeminy, cena zahrnuje zpracování projektu, instalaci zařízení a provozní náklady
Bioventing	destrukce polutantu <i>in situ</i>	\$ 30 na 1 m ³ půdy, cena zahrnuje pouze provozní náklady
Odsávání půdního vzduchu	separace polutantu <i>in situ</i>	\$ 25 000 až \$ 50 000 projekt a instalace zařízení, \$ 75 na 1 tunu zeminy, cena zahrnuje pouze provozní náklady
Solidifikace a stabilizace	<i>in situ</i> a <i>ex situ</i> uzavření a imobilizace	\$ 70 až \$ 200 na 1 tunu zeminy, cena zahrnuje pouze provozní náklady

Tab. č. 7.6-4 Přehled jednotkových cen sanačních technologií publikovaných Ministerstvem životního prostředí v Kanadě pro čištění zemin *in situ* (Environment Canada, 1997b)

Porovnání cen různých sanačních technologií

Tab. č. 7.6-4 Přehled jednotkových cen sanačních technologií publikovaných Ministerstvem životního prostředí v Kanadě pro čištění zemin *in situ* (Environment Canada, 1997b)

Technologie	Typ technologie	Cena
Biodegradace na dekontaminační ploše	destrukce polutantu <i>ex situ</i>	\$ 40 až \$ 80 na 1 m ³ zeminy
Bioremediace	destrukce polutantu <i>ex situ</i> a <i>in situ</i>	\$ 26 až \$ 105 na 1 m ³ zeminy
Bioventing	destrukce a separace polutantu <i>in situ</i>	\$ 13 až \$ 92 na 1 m ³ zeminy
Landfarming	destrukce a odstranění polutantu <i>ex situ</i>	< \$ 98 na 1 m ³ zeminy
Fytoremediace	destrukce polutantu <i>in situ</i>	\$ 29 až \$ 48 na 1 m ³ zeminy
Vytěžení a uložení na skládku	odstranění polutantu <i>ex situ</i>	\$ 196 až \$ 824 na 1 m ³ zeminy
Air sparging	separace polutantu z podzemní vody <i>in situ</i>	\$ 375 až \$ 875 na 1 ha kontaminačního mraku
Uzavření	uzavření <i>in situ</i>	\$ 437 500 až \$ 562 500 na 1 ha kontaminované plochy
Vymytí	separace polutantu z půdy, vody a odpadů <i>in situ</i>	\$ 33 až \$ 328 na 1 m ³
Vhánění horkého vzduchu	separace polutantu z půdy <i>in situ</i>	\$ 33 až \$ 131 na 1 m ³
Spalování	odstranění polutantu <i>ex situ</i>	\$ 200 až \$ 1000 na 1 t zeminy, pro určité typy polutantů se cena zvyšuje až na \$ 1500 až \$ 6000 na t
Reverzní osmóza	separace polutantu z podzemní vody <i>ex situ</i>	\$ 0,35 až \$ 1,14 na 1 m ³ podzemní vody
Odsávání půdního vzduchu	separace polutantu z podzemní vody <i>in situ</i>	\$ 13 až \$ 50 na 1 m ³ zeminy
Praní půdy	separace polutantu ze zeminy <i>ex situ</i>	\$ 170 na 1 t zeminy
Termická desorpce	separace polutantu ze zeminy <i>ex situ</i>	\$ 40 až \$ 300 na 1 t zeminy
Chemická oxidace a redukce	destrukce polutantu ze zeminy <i>in situ</i>	\$ 196 až \$ 654 na 1 m ³ zeminy

Tab. č. 7.6-5 Přehled cen z kompendia zpracovaného Purdue University. Informace umožňují porovnat jednotkové ceny sanačních technologií vytvořené na různých pracovištích (Anonym, 2005)



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Inovace tohoto předmětu je spolufinancována
Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem
České republiky**