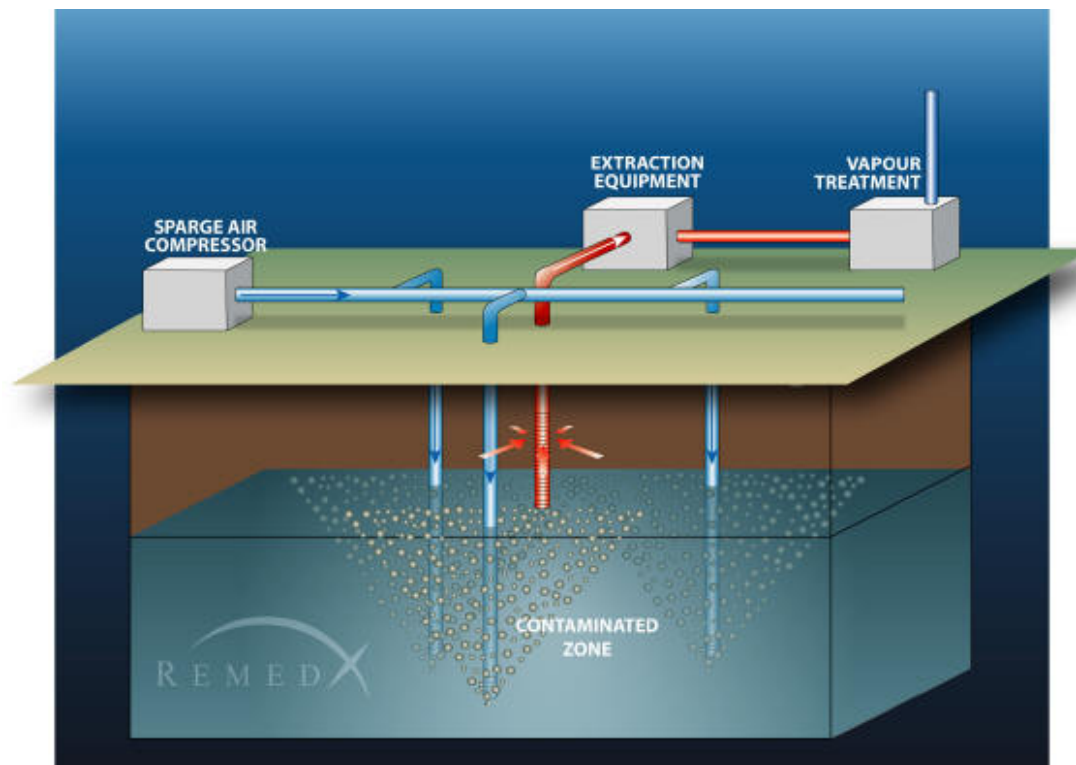


Rizikové látky v půdě

Přehled technologií,
Vícefázové proudění
SANACE - Metody dekontaminace I.
Pump-and-treat, Air Sparging, Solvent Vapor
Extraction, Soil Flushing



Přehled technologií dle snížení rizika

- **Degradace**
rozklad škodlivé látky – samovolný, podpořený (UV záření)
- **Chemická transformace**
oxidace, redukce, syntéza
- **Sterilizace**
změna životaschopnosti organismů
- **Naředění**
nejběžnější technologie snížení pod limity (směsi s pískem, rašelinou, zeminou)
- **Fixace**
snížení schopnosti migrace
- **Izolace**
zamezení migrace

Přehled technologií podle využívaných procesů

- **Fyzikální**

ředění, homogenizace, destilace, tíhová separace, flotace, solidifikace, stabilizace, sedimentace, filtrace, magnetická separace, extrakce (vodou, parou, vzduchem, rostlinami, mikroby), mikrofiltrace, termické procesy (spečení, vitrifikace), venting, stripping

- **Fyzikálně chemické**

adsorpce, dialýza (sorpce), chemisorpce, iontová výměna, reversní osmoza, solidifikace, elektrochemické procesy, termické procesy desorpce

- **Chemické**

neutralizace, rozpouštění, vysrážení, oxidace (vysušením, ozonizací, hořením, aerací, UV zářením), redukce, koagulace, fotosyntéza, dehalogenizace

- **Biologické**

aerobní + anaerobní procesy, degradace ve vzhledu, rostlinná extrakce vč. zaorávání, bioreaktory

Přehled technologií dle mechanismů likvidace rizikových látek

- **Mechanické odstranění**
odtěžení, drcení
- **Degradace**
stimulace rozkladu, spalování
- **Extrakce**
uvolnění, odčerpání, odtěžení
- **Fixace**
zabránění rozpouštění, difuzi, filtraci
- **Izolace**
pasivní vertikální - těsnící zářezy, injekční clony,
pasivní horizontální – folie, betonové desky, asfalt, jíl, atd.
aktivní – hydraulické bariéry

Přehled technologií sanací dle místa

- **Metody "ex situ"**

odstranění primárního (např. podzemní nádrže na pohonné hmoty) a sekundárního (kontaminovaná zemina) zdroje dotace polutantů ze zájmového prostoru. Likvidace je prováděna selektivním odtěžováním znečištěné zeminy a její dekontaminací v lokalitě sanace (**on site**) nebo transportem na povolené dekontaminační zařízení (**off site**)

- **Metody "in situ"**

sanační technologický postup nedestruktivním způsobem aplikován přímo do půdního a horninového prostředí nebo do podzemních vod

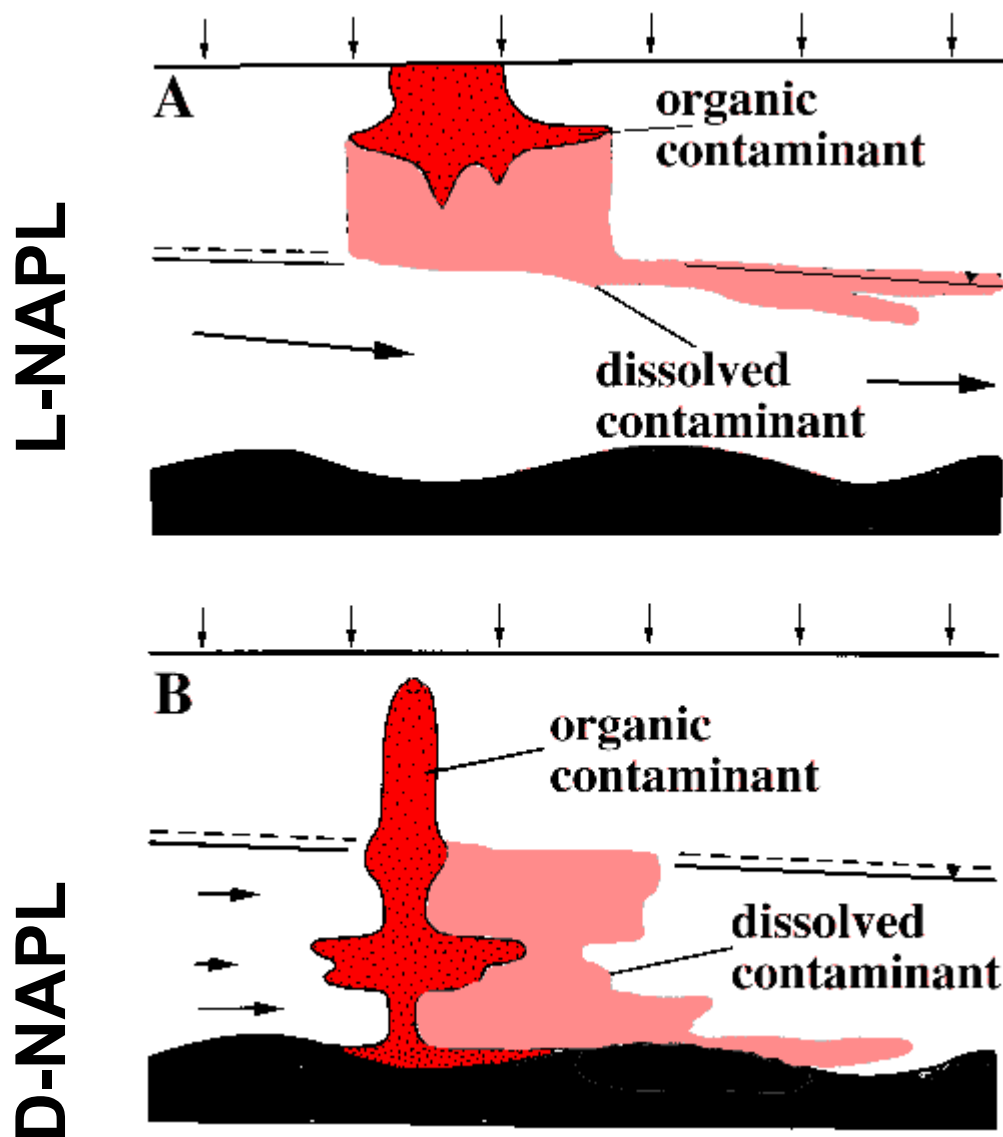
Technologie In Situ

- Air Sparging (kropení)
- **Bioremediace**
- Bioslurping
- Circulační studny
- Rozpouštědla/surfaktanty
- Extrakce dvou fází
- Dynamické podzemní stahování (stripping)
- In situ oxidace (Fentonovo činidlo, KMnO_4)
- **Přírodní atenuace** nechlorovaných látek
- Propustné reaktivní bariéry
- **Pump and Treat (čerpání a čištění)**
- Fytoremediace
- Vymývání parou
- Vertikální bariéry

Vícefázové proudění

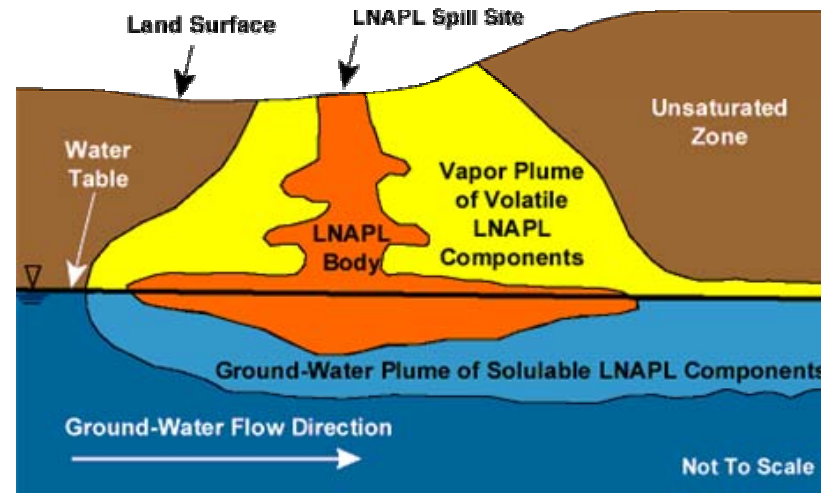
- **NAPL (Non Aqueous Phase Liquids)** – rozdílné fyzikální a chemické vlastnosti na fázovém rozhraní neumožňující mísení

- souběžný pohyb vody a jedné nebo více s vodou nemísitelných tekutých fází

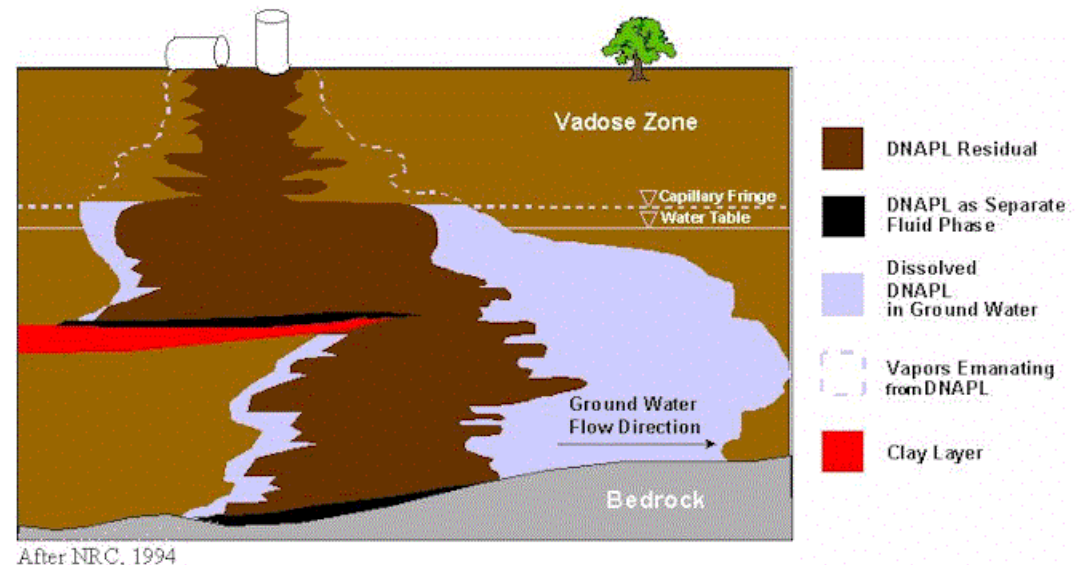


Vícefázové proudění

- **L-NAPL (Light Non Aqueous Phase Liquid)** – snadnější odstranění z hladiny podz. vody



- **D-NAPL (Dense Aqueous Phase Liquid)** – obtížné odstranění z rozhraní s podložím, nebo méně hydr. vodivými vrstvami



Příklady NAPLů

Metyl-T-Butyl-Eter (MTBE)

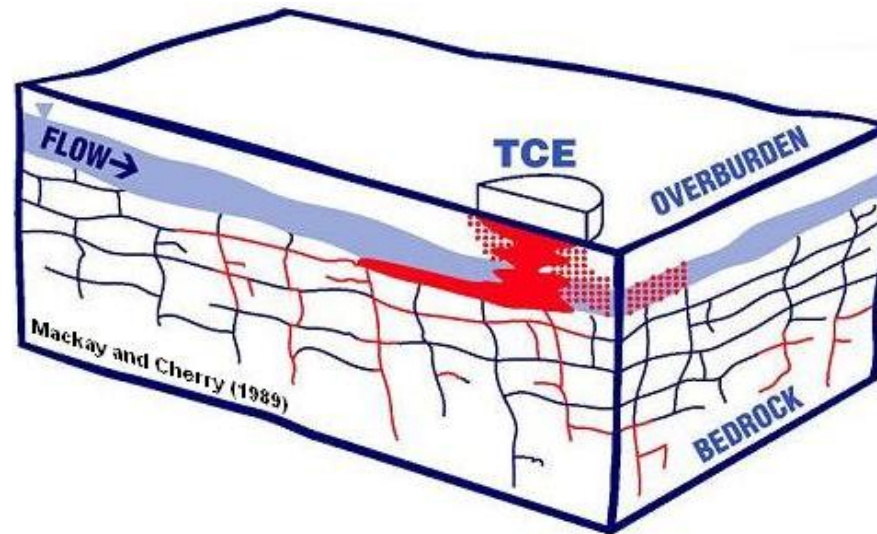
Benzen, Toluen, Etylbenzen a Xylen (BTEX)

Perchloroetylen (PCE), Trichloroetylen (TCE), Dichloroetylen (DCE), Vinylchlorid (VC), eten

Volatile Organic Compounds (VOCs)

Typy lokalit s výskytem NAPL

- Chlorovaná rozpouštědla a odmašťovadla
TCE : nejčastější DNAPL - dřevovýroba, kovovýroba
- Průmyslová výroba plynu - dehty
- Rafinérie ropy LNAPL (MTBE)
- Vojenské prostory LNAPL/DNAPL



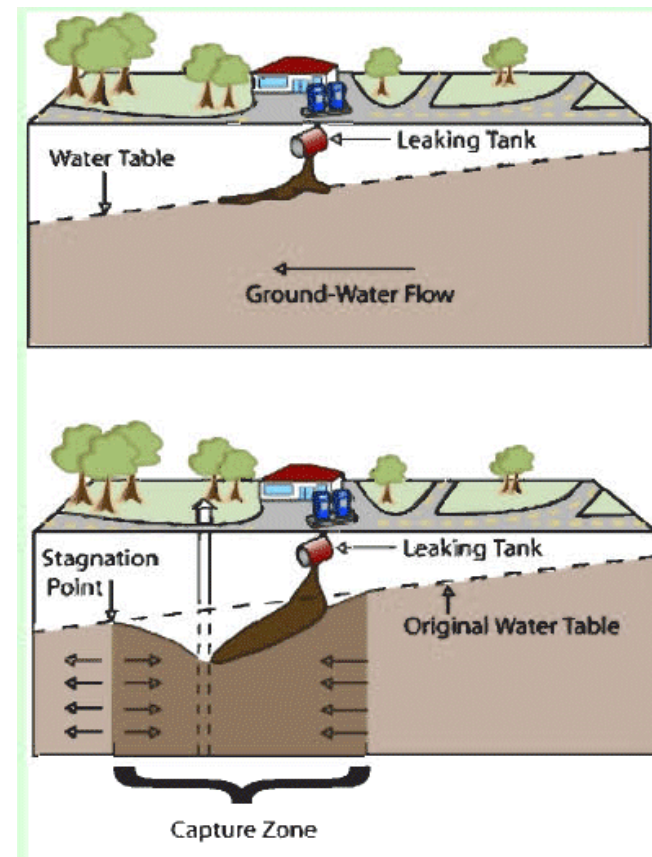
Kritéria obtížnosti sanace NAPLů

Hydrogeologické podmínky	Mobilní a rozpuštěné (degraduje/těká)	Mobilní rozpuštěné	Silně sorbované, rozpuštěné	Silně sorbované, rozpuštěné (degraduje/těká)	Samostatná fáze LNAPL	Samostatná fáze DNAPL
jedna homogenní vrstva	1	1-2	2	2-3	2-3	3
souvrství homogenních vrstev	1	1-2	2	2-3	2-3	3
jedna heterogenní vrstva	2	2	3	3	3	4
souvrství heterogenních vrstev	2	2	3	3	3	4
rozpukané podloží	3	3	3	3	4	4

nejjednodušší = 1 / nejtěžší = 4

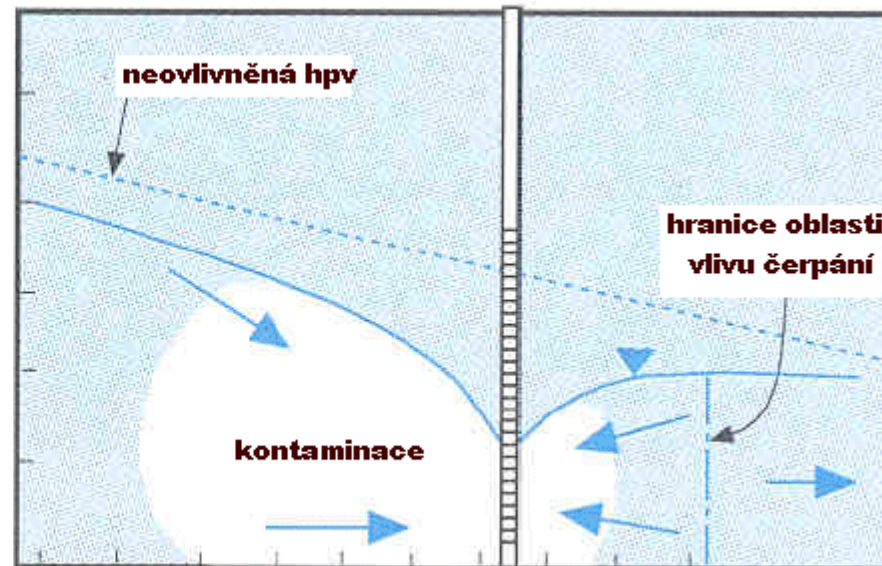
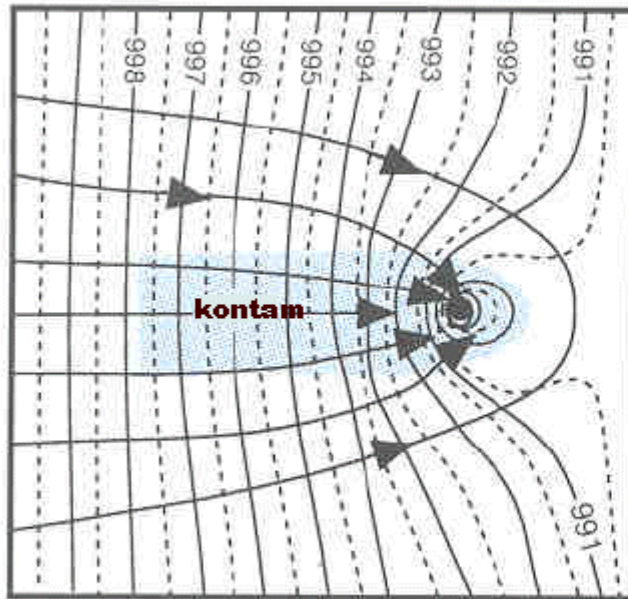
Metody Sanace I. Pump-and-treat (čerpání a čištění)

- Základní aktivní metoda čištění půdního a horninového kontam. prostředí in-situ
- **Zadržetí** kontaminované podzemní vody
- **Prevence před rozšiřováním znečištění** do nekontaminovaných oblastí
- **Extrakce kontaminace** z půdněhorninového prostředí s následným čištěním
- **Snižování koncentrace** látek v podzemní vodě



Principy proudění podz. vody

- hydraulika podzemní vody - Darcyho zákon
 $Q = K i A$
K = hydraulická vodivost,
i = hydraulický gradient
A = průřezová plocha kolmá na proudění



Principy čerpání

zóna vlivu (capture zone)

na tvaru a velikosti zóny vlivu čerpání v proudu podzemní vody má vliv

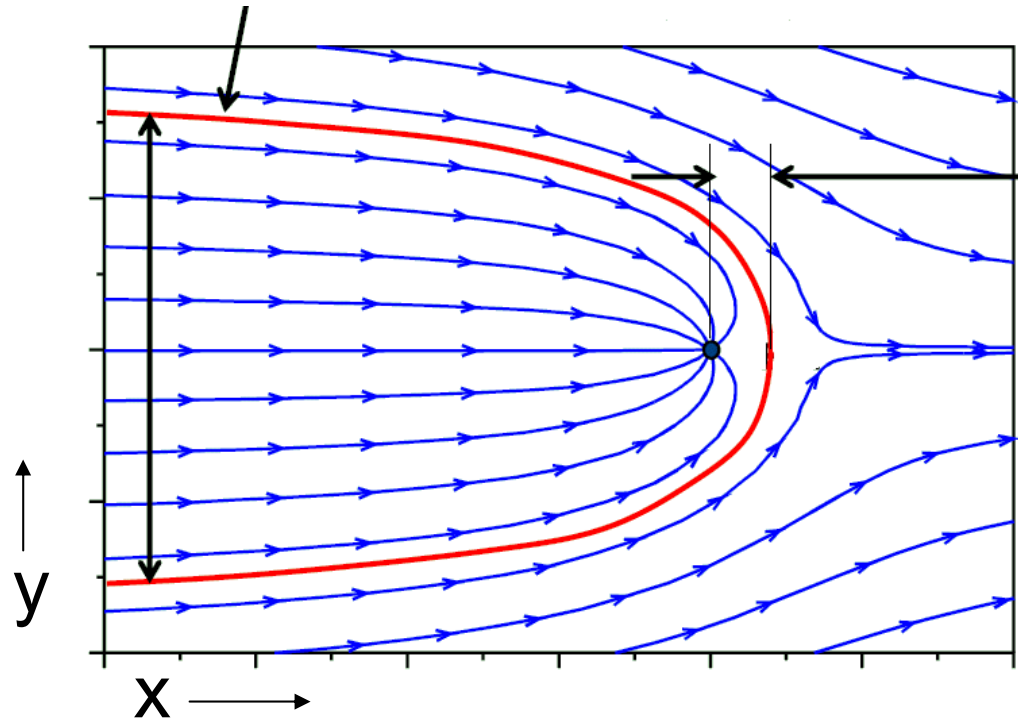
tvaru a velikosti zóny vlivu

$$\frac{y}{x} = \pm \tan\left(\frac{2\pi Tiy}{Q}\right)$$

- transmisivita zvodně **T** (m²/s)
- hydraulický gradient **i** (-)
- čerpané množství **Q** (m³/s)

šířka zóny

$$w = \frac{Q}{Ti}$$



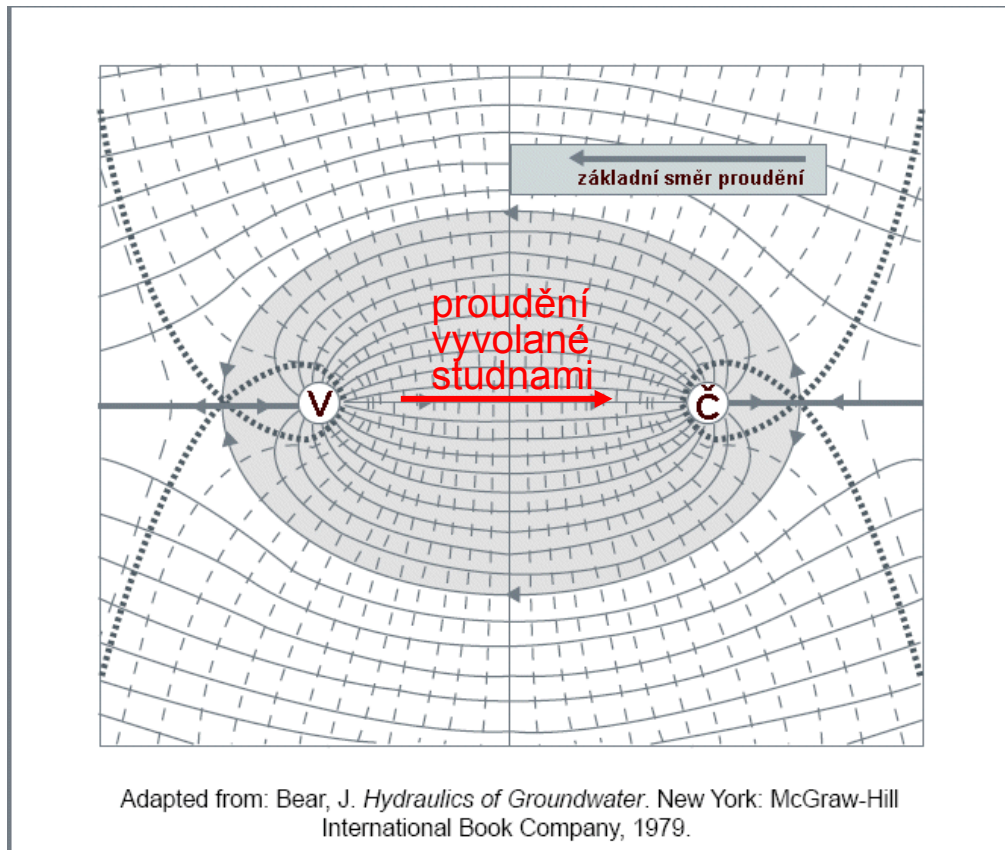
bod stagnace

$$x = \frac{Q}{2\pi Ti}$$

Principy čerpání

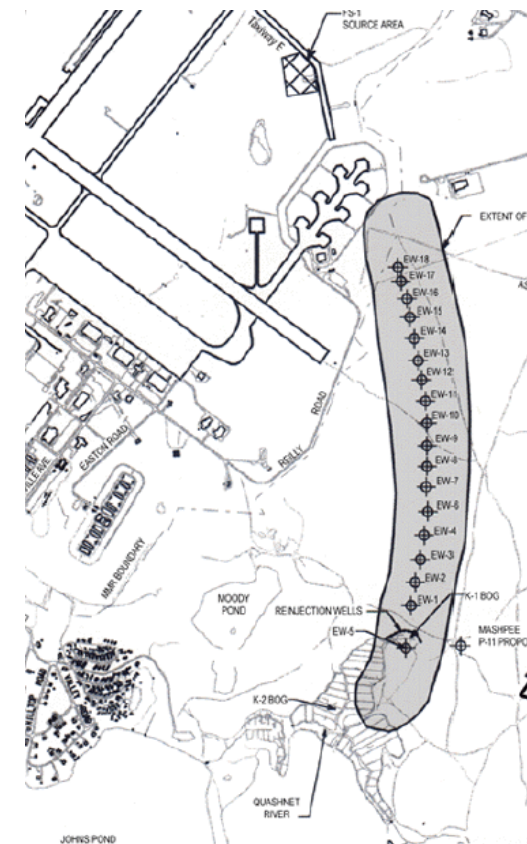
dvojice vsakovací a čerpací studně

Č - čerpací studna
V – vsakovací studna



hydraulická bariéra

sadou vsakovacích, čerpacích studní, či jejich kombinací lze vytvořit dynamickou ochranu podzemní vody a usměrnění proudění kontaminace (např. obrácení jeho přirozeného proudění)

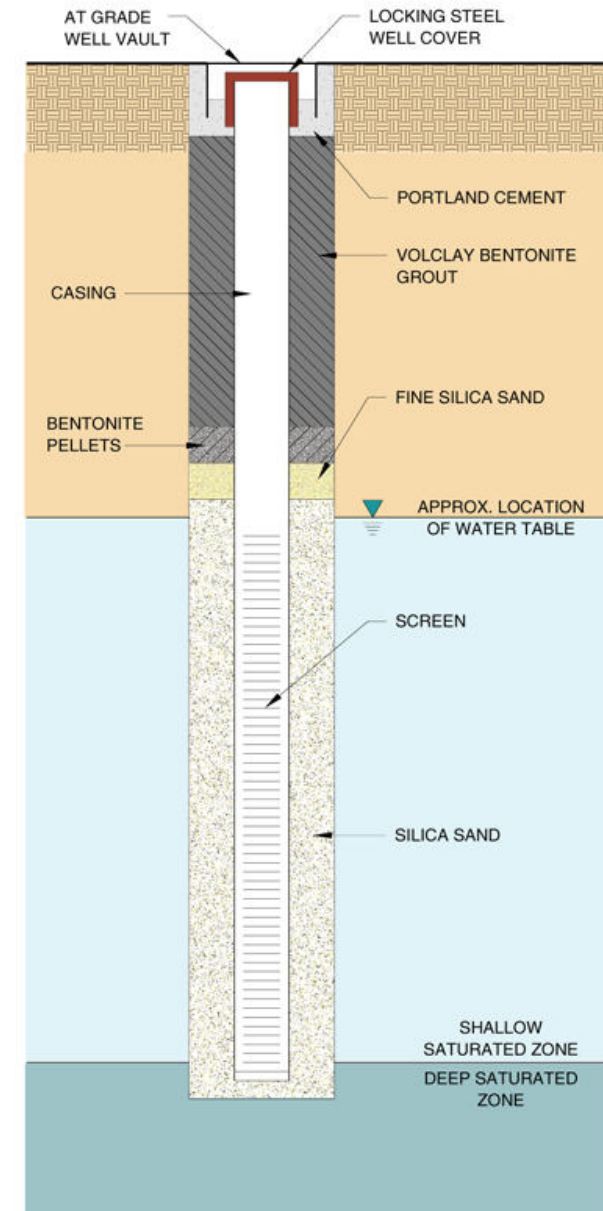


Optimalizace čerpání dosažení limitu sanace

matematické modely – lze zvýšit účinnost čerpání, posouzením různých návrhů množství a rozmístění čerpacích (vsakovacích vrtů) a rychlosti dekontaminace v závislosti na vlastnostech prostředí a typu kontaminace

účinnost vrtu závisí na dobře zvoleném **umístění perforace** (otevřeném úseku) a správném obsypu vrtu (vhodné zastoupení frakcí), hydraulické “úplnosti” studny atd. testy vydatnosti se provádí, tzv. čerpací zkouškou kdy se sleduje vydatnost vrtu a pokles hladiny vody

nevýhodou metody je **relativně malá účinnost**, tj. velmi dlouhá doba nutná k ukončení sanace – k té vedou ekonomické i praktické důvody



Čištění vyčerpané vody

obvyklým znečištěním jsou ropné produkty a další těkavé uhlovodíky, minerální oleje a rozpuštěné kovy

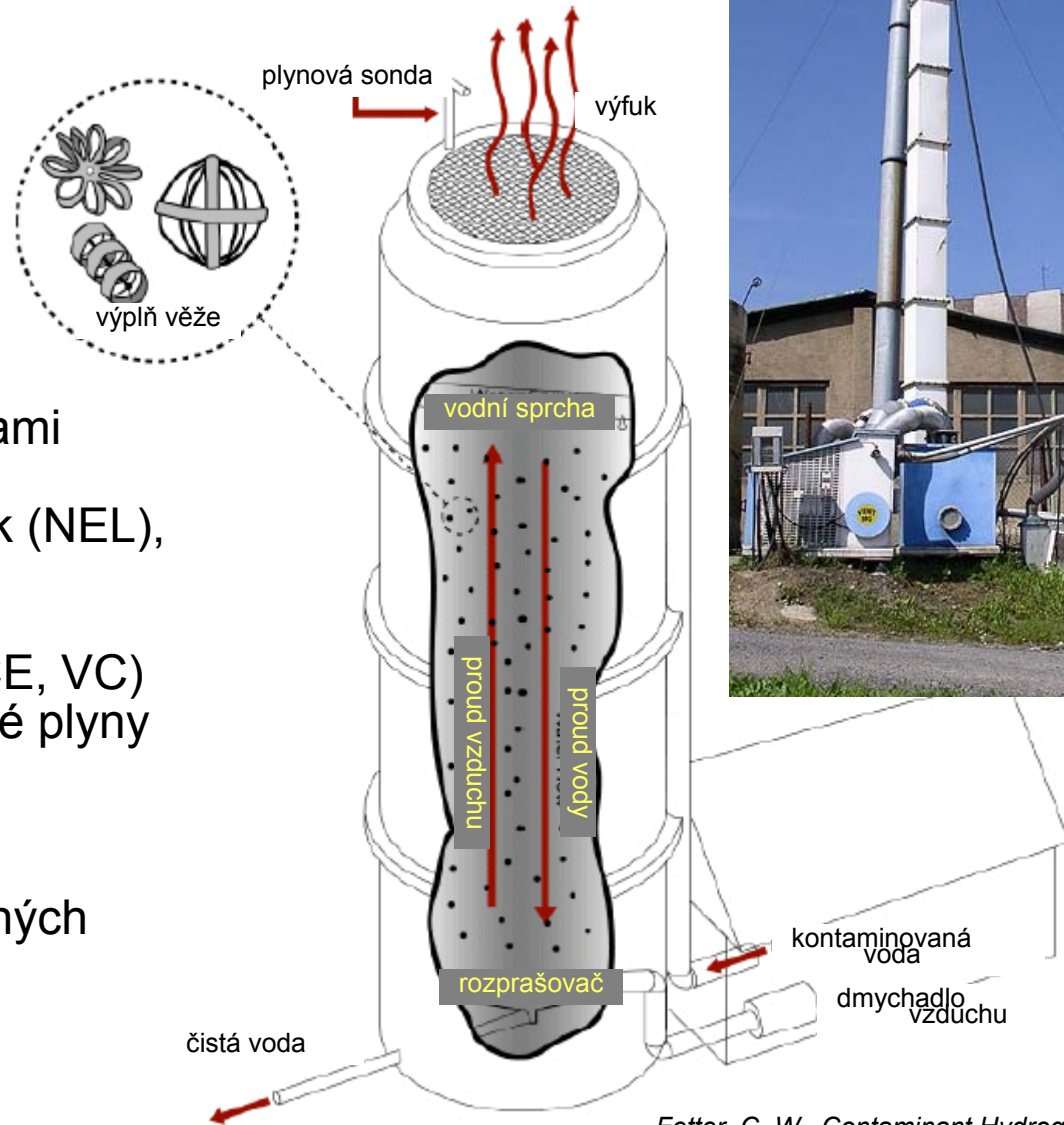
- air stripping - stripování „vyfoukávání“ vzduchem koloně z gravitačně proudící vody v prostředí umožňující kontakt vody a vzduchu
- chemická oxidace
- termální oxidace
- granulovaný aktivní uhlík (GAC) – sorpce na zrna filtru
- srážení kovů
- gravitační separace olejů



Air stripping – intenzivní vertikální aerace

“vyfoukávání” látek
vzestupným proudem
vzduchu ve vertikální
koloně, kde voda
proudí gravitačně

- čištění vod s těkavými látkami (VOC), BTEX
 - lehké frakce ropných látek (NEL), MTBE
 - aromatické a chlorované uhlovodíky (PCE, TCE, DCE, VC)
 - radon, sulfan a rozpuštěné plyny
- téměř 100% účinnost
- Pro odstraňování chlorovaných uhlovodíků je doposud nejpoužívanější metodou



Fetter, C. W. Contaminant Hydrogeology,
Second Edition. Upper Saddle River,
NJ:Prentice Hall, 1999.

Air stripping - intenzivní aerace (horizontální)

- horizontální provzdušňovač je kontejner ve tvaru krychle nebo hranolu, proudící voda je probublávána vzduchem.
- nižší výška než kolona, jednoduché čištění
- vyšší spotřeba energie a vyšší hlučnost

Gravitační separace olejů

- využití rozdílné měrné hmotnosti kapalin
- odsazení kapalné fáze kontaminantu na hladině vody (ropné látky) nebo na dně separační nádrže (chlorované uhlovodíky)
- separovaný kontaminant je sčerpáván a předán k ekologické likvidaci.
- za gravitační stupeň je obvykle instalována sopční jednotka dočištění - sorpční náplň : volná stříž, pásy, tkaniny, hydrofobní materiály, schopné vázat ropné látky



Mokrý sorpce na aktivním uhlí

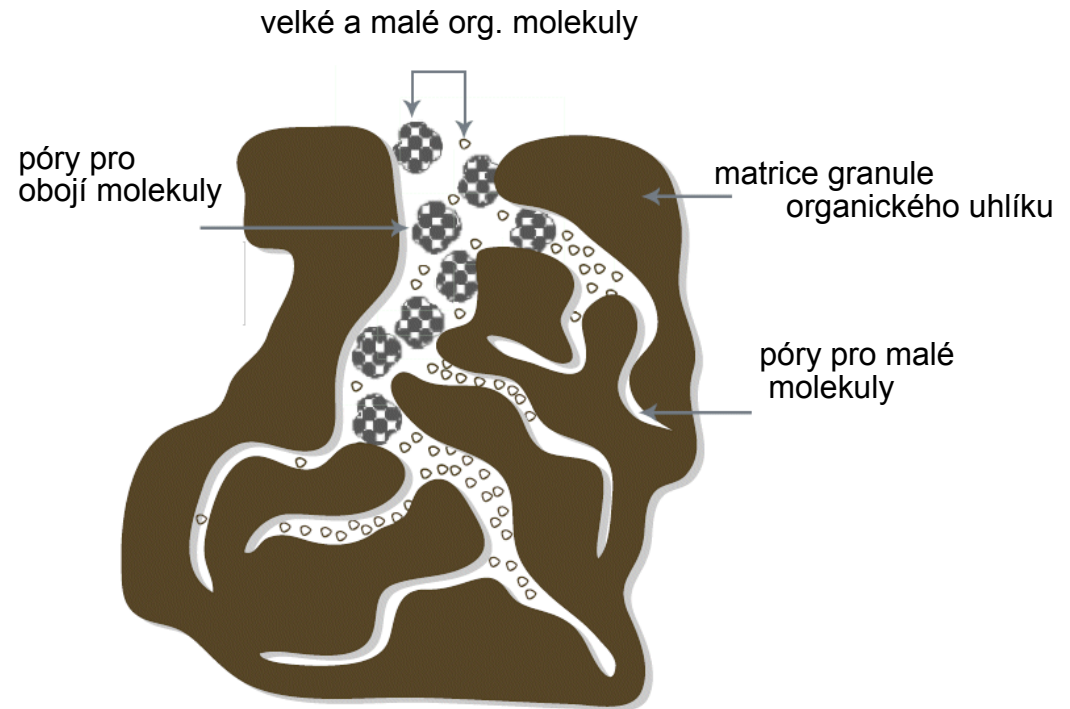
Kontaminant převedený do plynné fáze je většinou zachytáván na filtru s **aktivním uhlím** nebo biofiltru.

Aktivní uhlí má univerzální využití pro dočišťování vody i vzduchu

Připravuje se z rašeliny/dřeva dehydratací ve směsi s P_2O_5 a ohřátím na teploty 500-800C

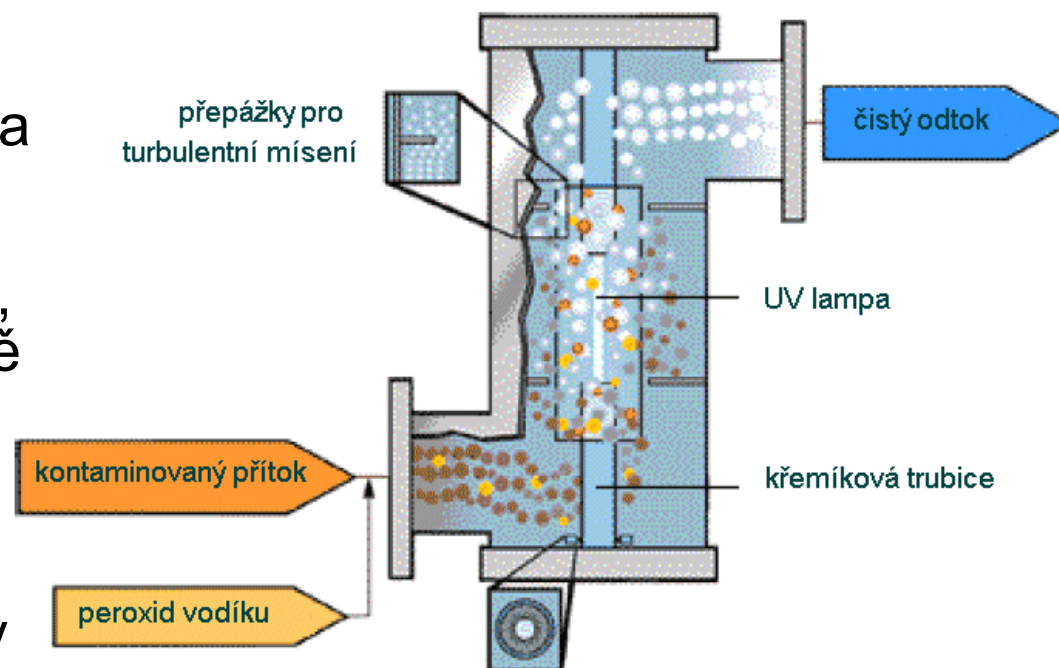
Při sanaci podzemních vod je využíváno **pro sorpci ropných látek, aromatických a chlorovaných uhlovodíků, polycyklických aromatických uhlovodíků** atd

Výhodou aktivního uhlí je také možnost jeho **regenerace** a tím vícenásobné použití



Chemická oxidace

- **silná oxidační činidla** použitá k urychlení rozkladu látek v plynné a kapalně fázi
- **ozón, peroxid vodíku** nebo **UV** produkují $\text{OH}\cdot$,
- destrukce látek na místě (on-site)
- dosažení limitů pod hranicí detekce
- nevznikají druhotné odpady a odpadní plyny
- tichá kompaktní a subtilní zařízení, nízké náklady na provoz



Chemická oxidace se používá i k intenzifikaci in-situ metody pump-and-treat/soil flushing. Jako katalyzátor oxidace se používá KMnO_4 , H_2O_2 nebo Fentonovo činidlo ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$)

Termální oxidace - destrukce

- **těkavé páry** mohou být **spáleny** nebo pyrolyzovány
- to je **vhodné pro PAH a chl. uhlovodíky**, když je dosaženo úplného spálení
- oxidace chlorovaných látek může produkovat krátkodobé **vysoce toxické meziprodukty**
- je **účinná** pro **vysoce koncentrované** páry
- v nízkých koncentracích je cena paliva příliš vysoká
- je nutné sledovat a upravovat průtok – nákladná elektronika
- může dosáhnout až (>99.9%) destrukce

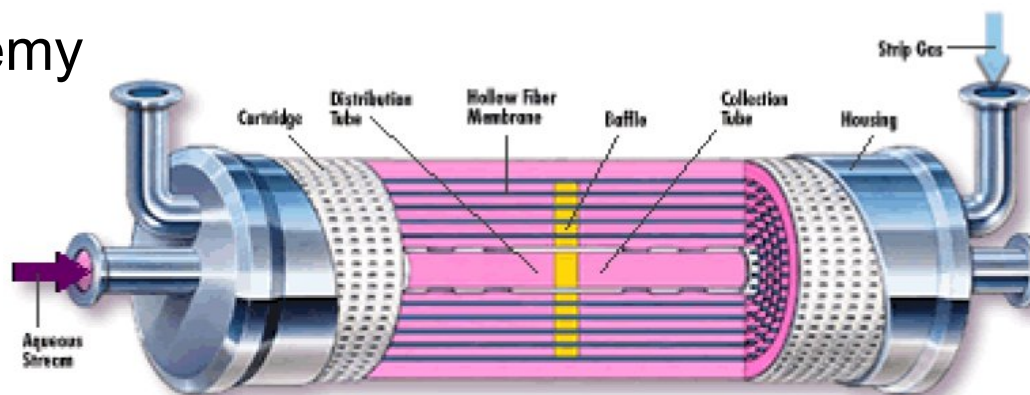


Stripování parou

- vhodné pro těkavé látky s nízkou hodnotou Henryho konstanty, z důvodu jejich rozpustnosti (např. MTBE a alkoholy)
- funguje jako destilace, teplo zahřívá látky, a ty jsou separovány v procesu kondenzace
- vyžaduje zdroj energie – tepla

Membrány z dutých vláken

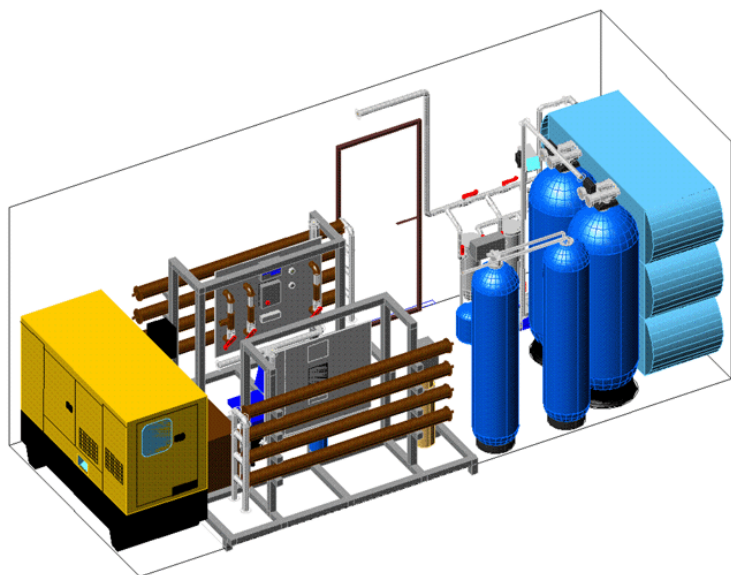
- převádí organické látky hydrofobní membránou na plynnou fázi bez přítomnosti vody
- vyžaduje velmi malé objemy vzduchu k dosažení účinnosti air strippingu
- méně kontaminovaného vzduchu
- levnější provoz



Air sparging – “prodouvání” vzduchem

in-situ air stripping, in-situ volatilisation, (bioventing)

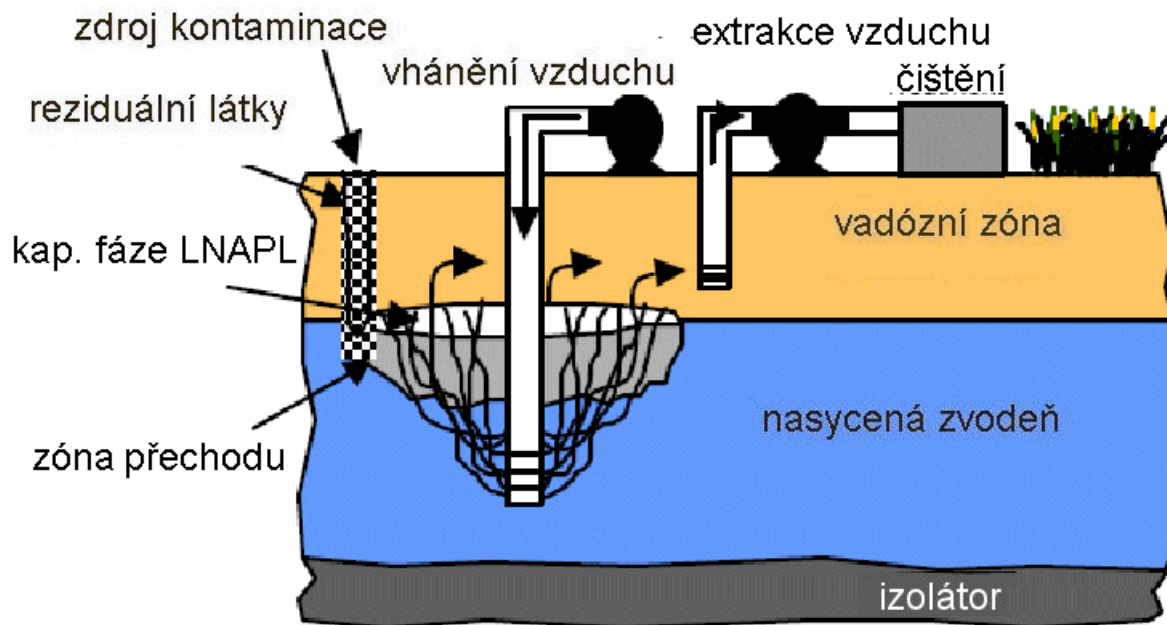
- vzduch (obvykle kyslík) je vháněn přetlakem přímo do nasycené zvodně v půdním nebo horninovém prostředí.
- provzdušňováním dochází k přechodu těkavých látek rozpuštěných ve vodě vázaných, na pevné fázi, nebo se vyskytujících v samotné kapalně fázi kontaminantu do formy plynné.
- kontaminanty se desorbují lépe v plynné fázi než ve vodě (tam jen díky difuzi)



Air sparging

- **těkavé látky se pohybují směrem vzhůru** a jsou zachyceny při přechodu do vadózní zóny, většinou pomocí extrakce půdních par (**soil vapor extraction – sve**)
- plynná fáze je odsávána systémem kombinovaných nebo ventingových vrtů podtlakem.

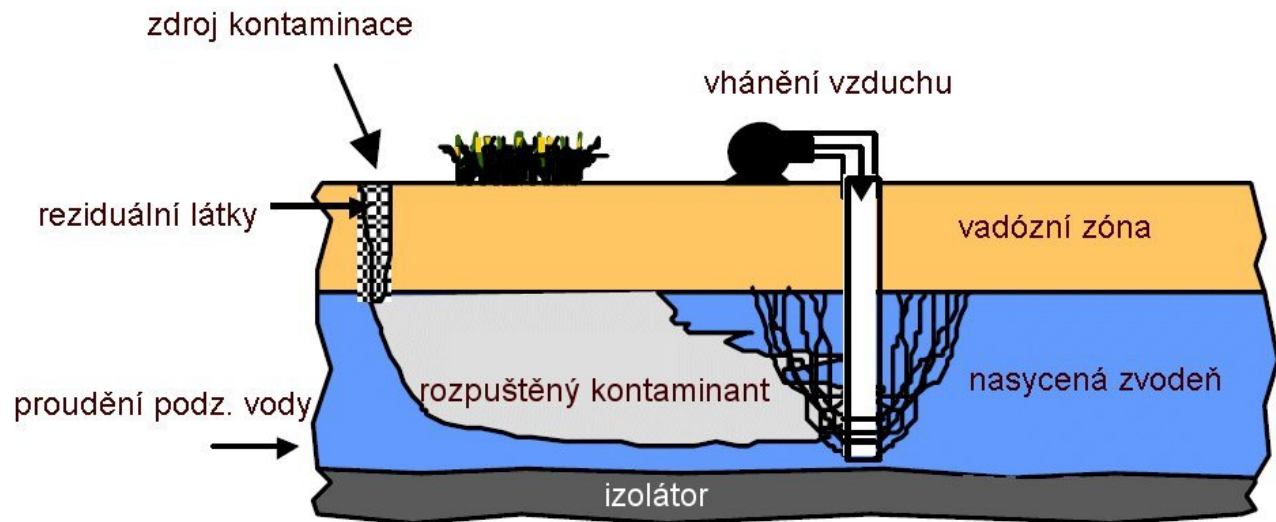
dekontaminace LNAPL : air sparging/sve



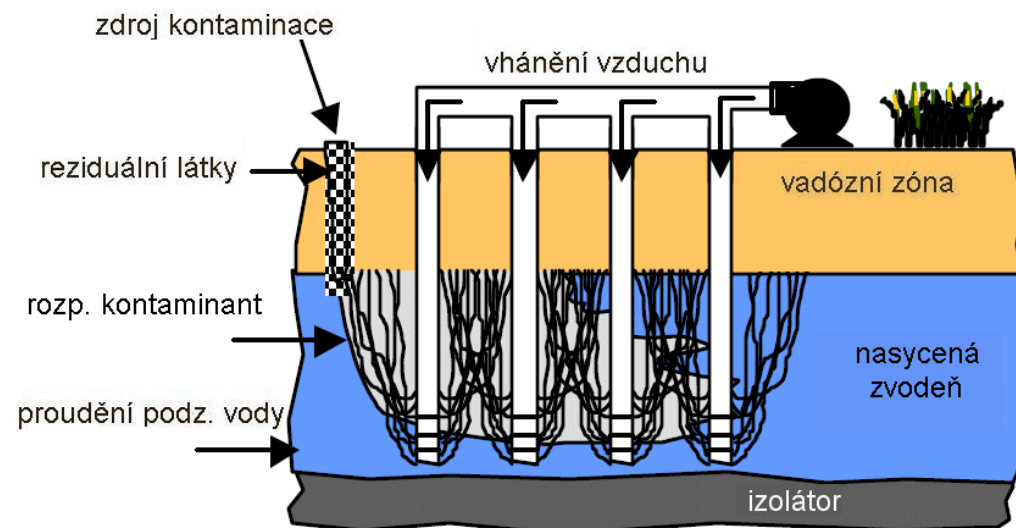
Air sparging

- Air sparging je **efektivnější než pump-and-treat ale...**
- **nasycená zvodeň musí být relativně mocná** aby byla metoda účinná
- **možnost použití** pro dekontaminaci **jak v nasycené tak vadózní zóně** na rozdíl od SVE (soil vapor extraction-jen ve vadózní zóně)

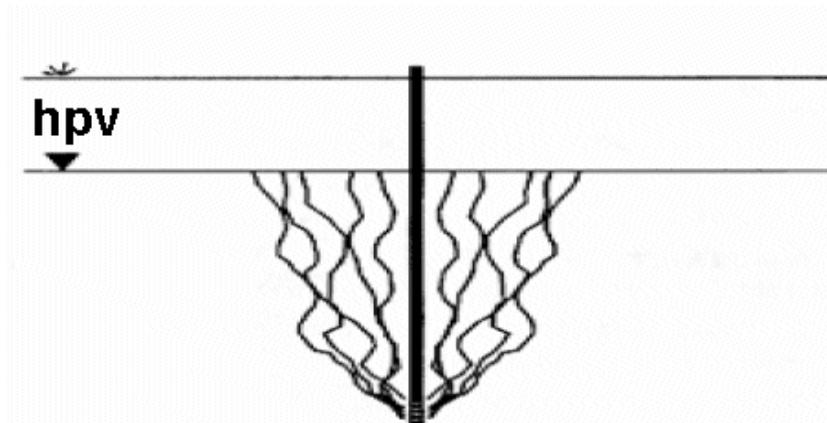
zamezení šíření kontaminace



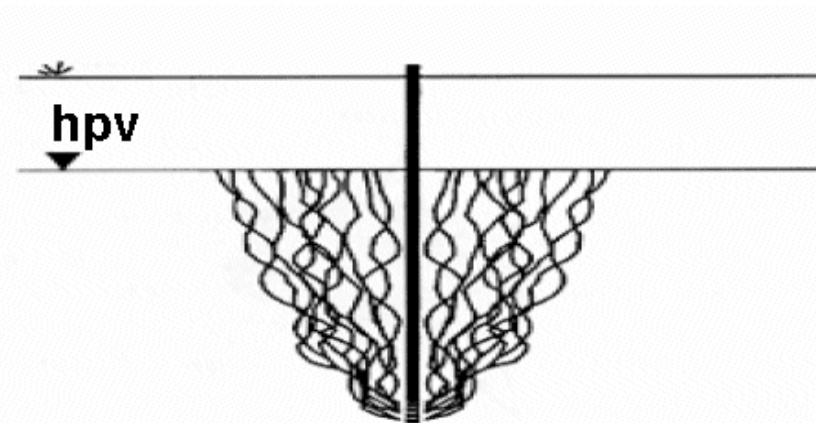
dekontaminace rozpuštěných těkavých látek



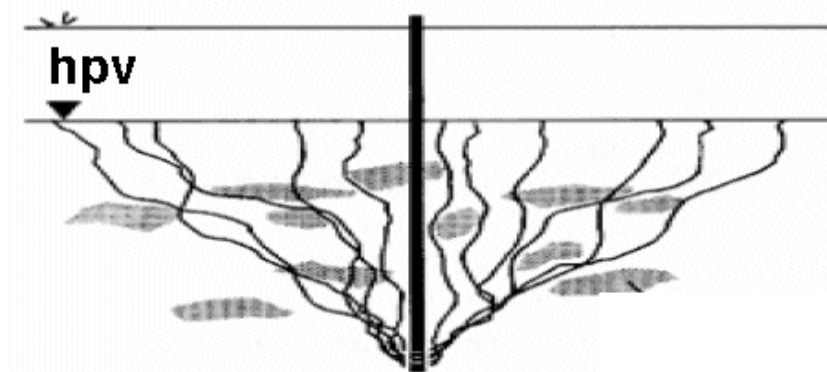
Air sparging – typy proudění vzduchu



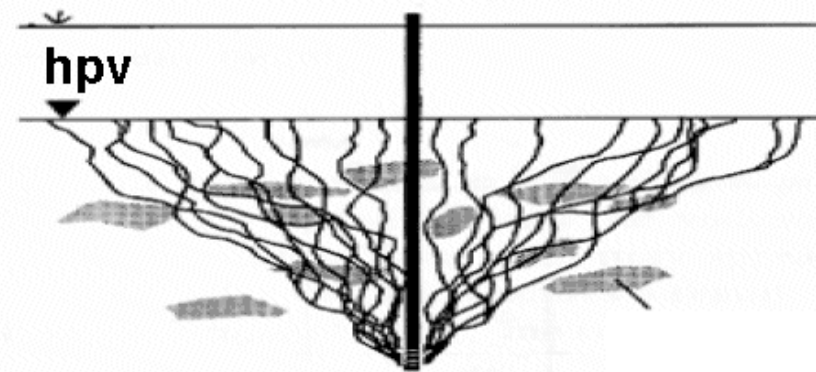
homogenní prostředí, nízký přetlak



homogenní prostředí, vysoký přetlak



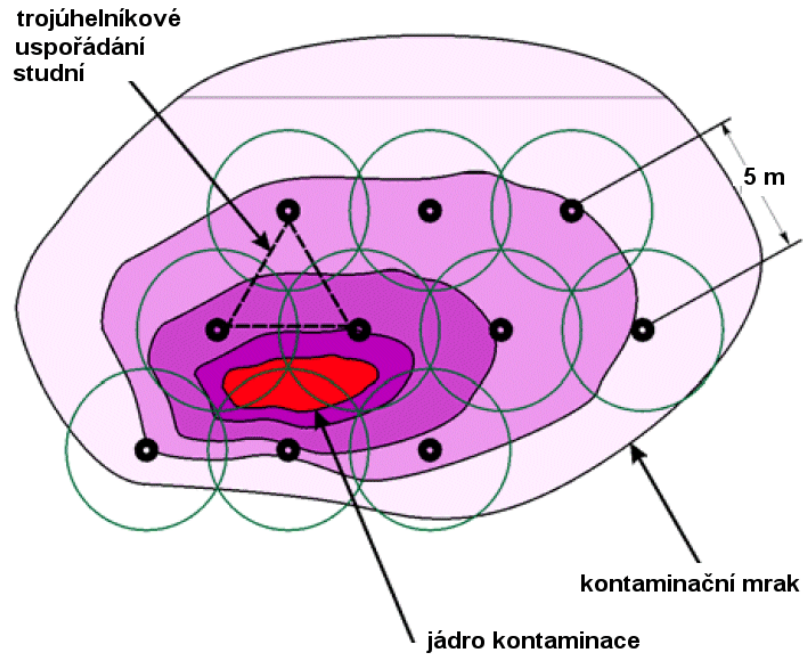
heterogenní prostředí, nízký přetlak



heterogenní prostředí, vysoký přetlak

neúčinná metoda v prostředí s preferenčními cestami

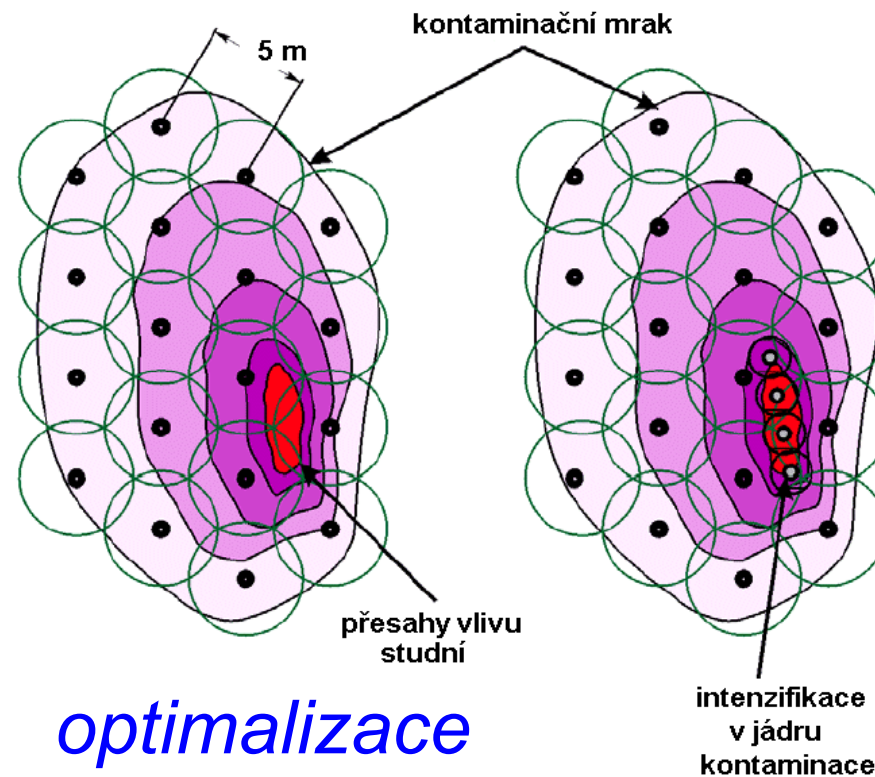
Air sparging – návrh sítě vrtů



uspořádání

před instalací je nutné odstranit volnou kapalnou fázi kontaminantu

čištění obvykle trvá 1/2 - 4 roky

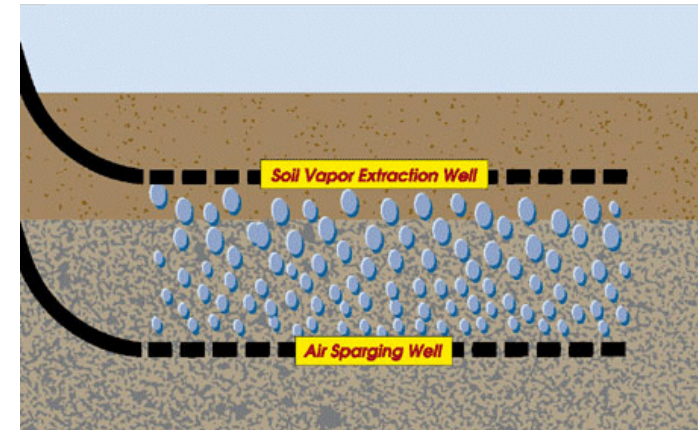


optimalizace

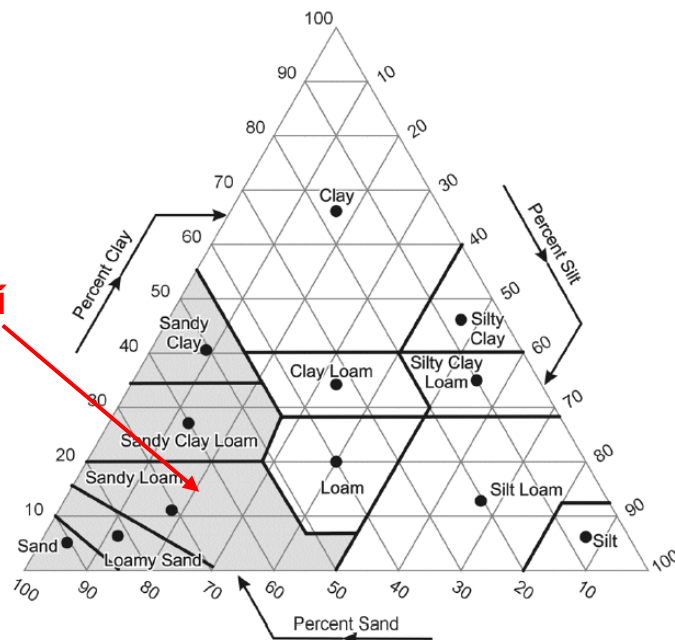
Air sparging – účinnost

- Metoda je nejvhodnější na těkavé organické kontaminanty v **homogenním** prostředí se střední nebo vysokou propustností
- Posiluje biodegradaci zvyšováním množství kyslíku v prostředí – **biosparging**: degradace za přísunu kyslíku je hlavním procesem dekontaminace před volatilizací (vytěkáním).

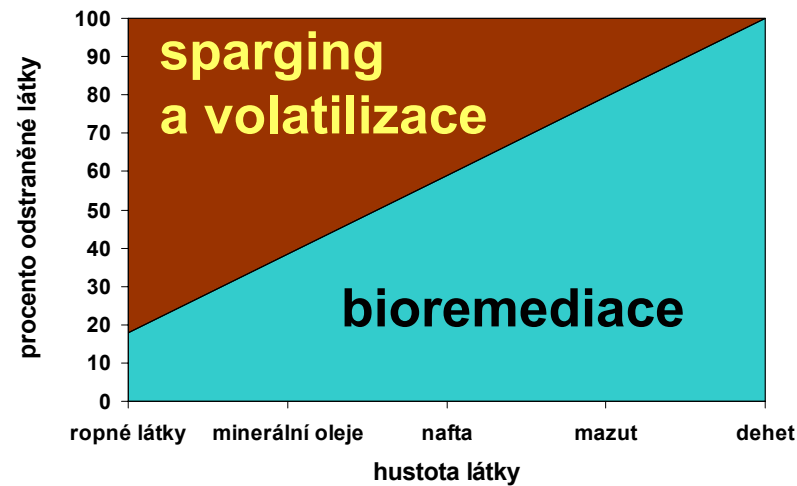
horizontální air sparging/sve



vhodné prostředí



Účinnost metod sanace



Stripování v cirkulačních studních

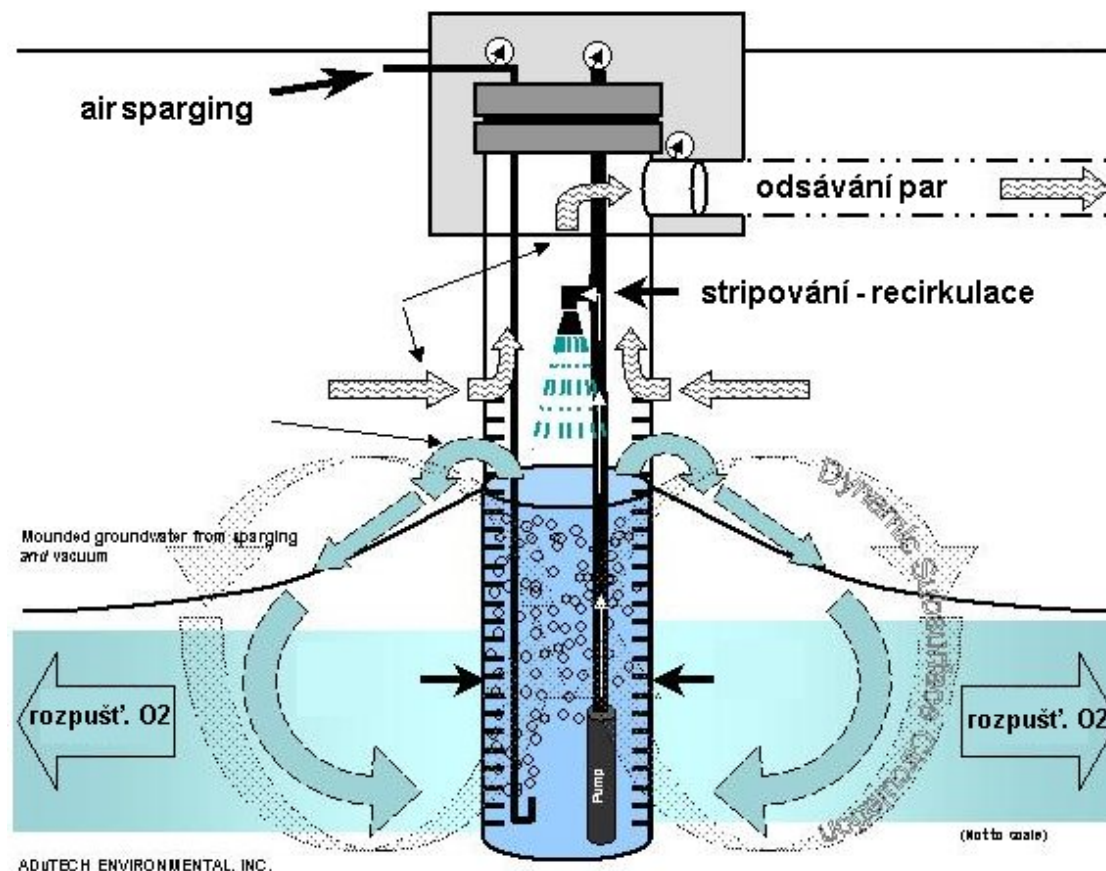
In-Well Air stripping/Groundwater Circulating Wells

- zakládá se na **vstřikování tlakového vzduchu na dno studny**
- studna se chová jako **malá stripovací kolona**, kde kontaminanty ve vodě přecházejí do plynné fáze
- studna jako celek je **udržována v podtlaku, páry jsou odsávány**
- stripování ve studních je často **kombinováno s cirkulací** pro zvýšení dosahu studny:
 - vzduch provádí čištění - volatilizaci
 - vzduší vlivem vhnání vzduchu a odsávání par zvedá hladinu a cirkuluje vodu v okolí studně

Stripování v cirkulačních studních

In-Well Air stripping/Groundwater Circulating Wells

- recirkulační studna má dva otevřené úseky: u dna a v místě hladiny vody pro vytvoření hydraulického spádu
- **vytváří trojrozměrné proudění**: čerpáním a vhnáním vody
- tvary proudění jsou vysoce závislé na návrhu studny a prostředí v němž se nachází



Stripování v cirkulačních studních

In-Well Air stripping/Groundwater Circulating Wells

Výhody a omezení vzhledem k air spargingu

- odstranění těkavých látek bez nutnosti čerpání podzemní vody a jejího čištění na povrchu
- povolení k odběrům vody není nutné, úspora energie především v hluboko situovaných zvodních
- použití je citlivější na geologické podmínky, úspěch jen na malém počtu lokalit v USA a Evropě, především v nepoměru horizontální a vertikální složky hydraulické vodivosti (použitelná pro 3 - 10 Kh/Kv)
 - málo propustné půdy - odpor cirkulaci
 - velmi propustné – zkratové cesty
 - vrstvení – zamezuje recirkulaci jako takové

Odsávání par (SVE)

soil vapor extraction, vacuum extraction, soil venting

- doplňová metoda k air spargingu
- **vlivem podtlaku – vakua** v blízkosti zdroje kontaminace, dochází k těkání látek a jejich odsávání a následnému čištění
- **vhodná pro lehké těkavé produkty** podléhající evaporaci
- odsávání je **funkční jen nad hladinou podzemní vody**
- při mělké hladině podzemní vody není metoda účinná
- v kombinaci s SVE je někdy nutné provádět zčerpávání podzemní vody
- je **použitelné pro zastavěné prostory**, kde může docházet k průniku toxických par do budov
- proudění vzduchu podporuje biodegradaci,
- zvláště těžších, méně těkavých látek



Odsávání par (SVE)

- **propustnost půdy ovlivňuje rychlost pohybu** vzduchu a par, půdy s vyšší propustností jsou vhodnější pro tuto metodu
- **půdní struktura a stratifikace jsou důležité pro efektivitu**, protože ovlivňují tok půdních par, vrstvení může vyústit v preferenční proudění a neefektivitě, minimálně prodloužit doby proudění
- **vysoká vlhkost a jemná zrnitost (vysoké kapilární síly) též zamezuje** efektivnímu proudění
- **poloměr dosahu je základní parametr při posuzování systému**, poloměr je definován jako největší vzdálenost od studny, kde je podlak dostatečný k podpoření těkání a odsávání kontaminantu z půdy, poloměry by se měly překrývat, aby pokryly celé území



Odsávání par (SVE)

- při návrhu systému je nutné počítat s denní či **sezónní fluktuací hladiny podzemní vody**, to platí zvláště pro horizontálně uložené systémy
- na půdním povrchu je možné **instalovat těsnění** (např. fólie) k zamezení infiltrace vody a přísávání par z atmosféry – zkratování systému
- pro návrh systému jsou velmi důležité **pilotní projekty**, ty umožní po vyhodnocení navrhnout celý systém efektivně, včetně škály kontaminantů a jejich schopnostem pro odsávání



Odsávání par (SVE)

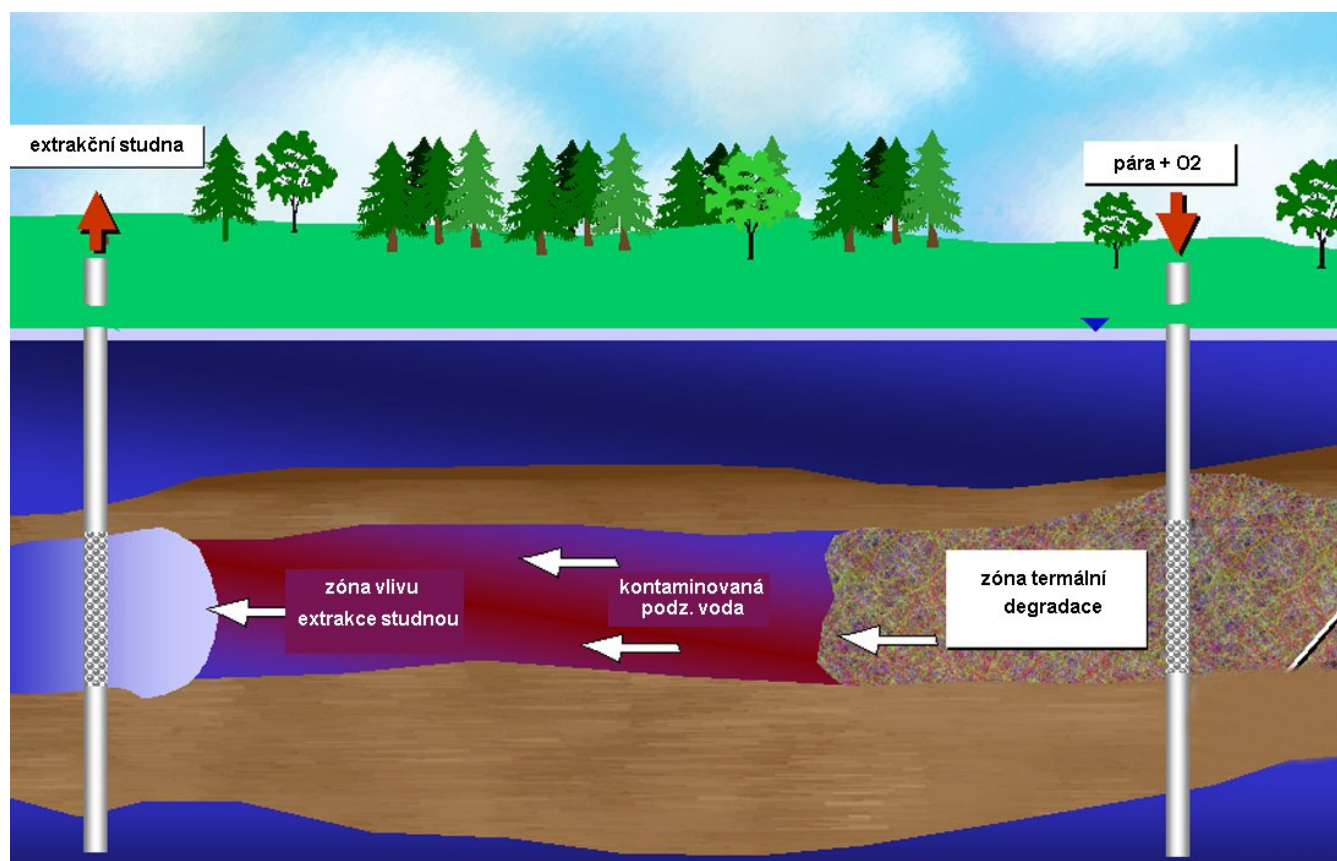
- instalace zahrnuje **vrtání odsávacích studní** v systému se vzduchovou pumpou
- množství studní závisí na **ploše kontaminace, hustotě půdy a požadovanému času** dekontaminace
- je též možné instalovat jen pasivní systém podporující výměnu půdního vzduchu
- systém má **malé provozní náklady** a jen základní obsluhu a kontrolu filtrů, pump a studní
- **odsáté produkty** jsou sorbovány, spalovány, ev. podrobeny katalytické oxidaci, kondenzaci, biodegradaci
- vyčištěný vzduch je možné injektovat nazpět



Promývání parou

steam flushing/stripping, hydrous pyrolysis/oxidation

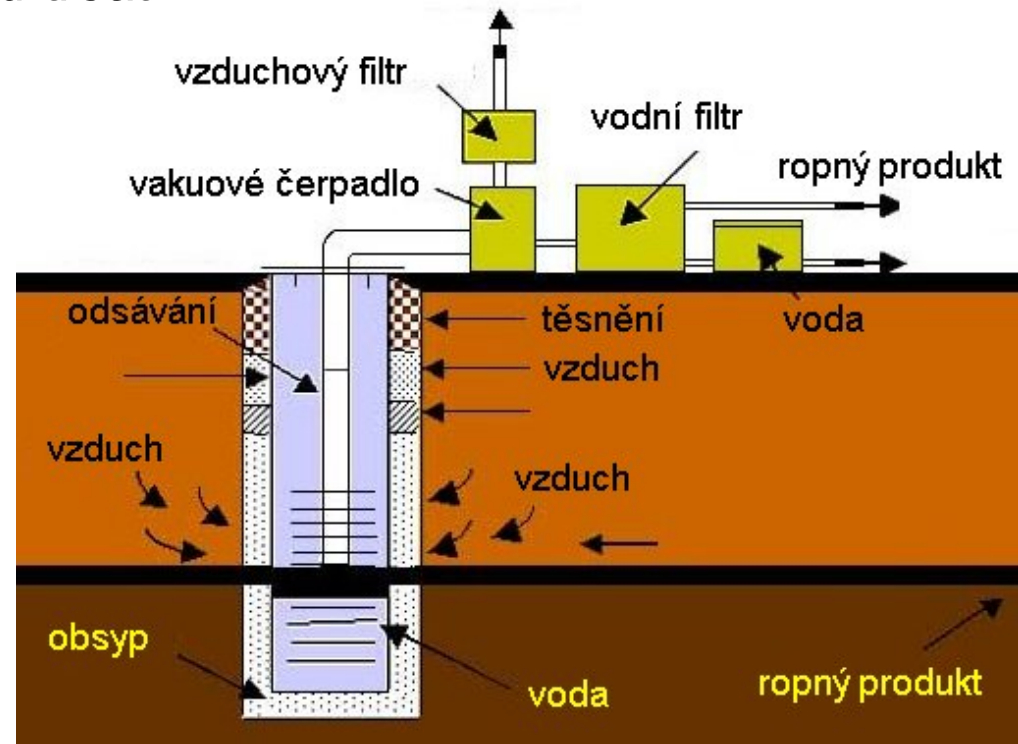
- do půdy je **injektován ohřátý vzduch** ke zvýšení těkavosti látek, vypařování obecně s teplotou roste.
- ekonomicky to **nemusí být únosné**, použitelné jen několik týdnů či měsíců, ostatní limity viz sparging a sve



Strhávání dvou fází

dual phase extraction / slurping

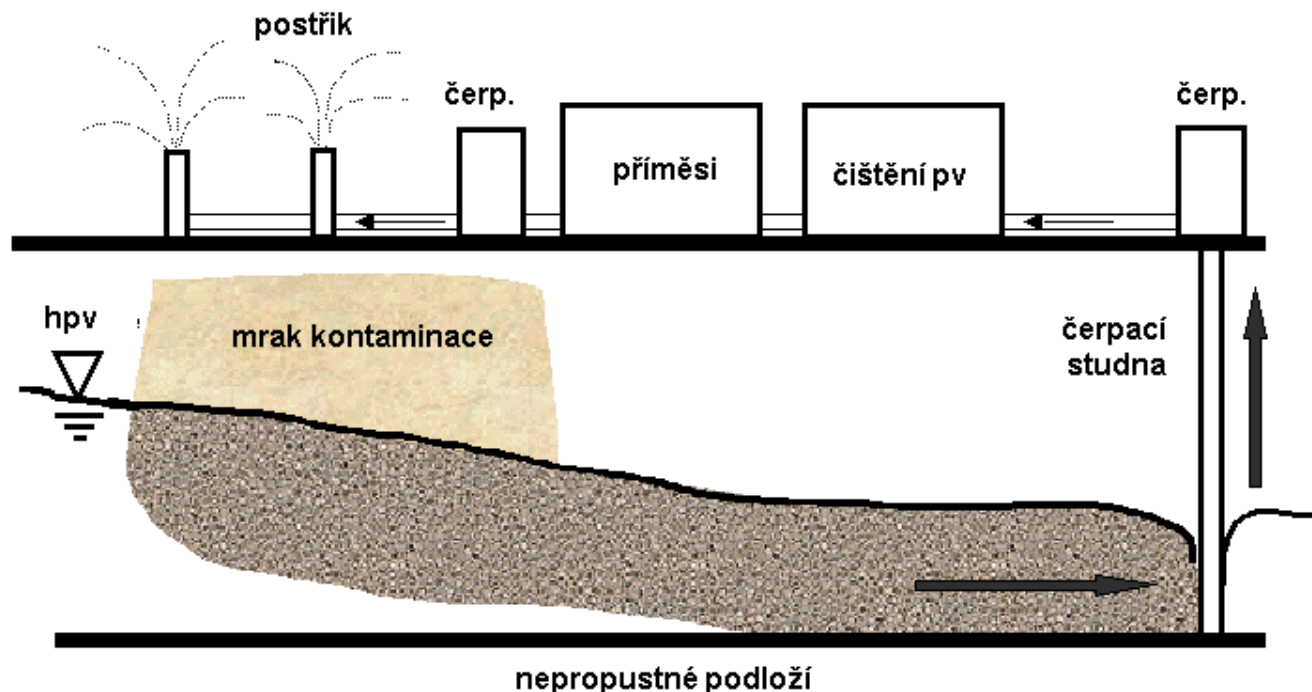
- strhávání kapének ropné fáze z hladiny podzemní vody **za velmi vysokých podtlaků**
- ve zvodněném prostředí se vytváří v důsledku podtlaku negativní depresní kužel a dohází k růstu hladiny podzemní vody s vyšší mocností fáze ropných látek.
- metoda je **technicky nenáročná** a má výrazně vyšší výtěžnost fáze ropných látek oproti pump-and-treat



Promývání zeminy

in-situ flushing, soil washing, injection/recirculation

- zvyšuje mobilitu látek jejich rozpouštěním a umožněním odstranění
- základem metody je injektování, postřik, výtopa nebo infiltrace roztoku do zóny kontaminované zeminy (nad i pod hladinou podzemní vody)
- návazně se ve směru klesajícího gradientu proudění voda odčerpává, čistí a znovu injektuje do prostředí
- aplikovaný roztok může obsahovat látky snižující povrchové napětí - surfaktanty, rozpouštědla-alkoholy, kyseliny a zásady



Promývání zeminy

in-situ flushing, soil washing, injection/recirculation

- technicky se může jednat vsakovací studny, zářezy, infiltrační galerie – čerpací studny, sběrné příkopy
- dobrá znalost hydrogeologického režimu je zásadní pro dosažení úspěchu
- metoda je nejvhodnější pro půdy se střední a vysokou propustností
- může být použita na řadu organických kontaminantů – NAPL, i anorganické látky – např. kovy

Limity

- Promývání může v půdě zanechat reziduální koncentrace příměsí
- K promývání může dojít mimo vymezenou oblast a výtoku příměsí na povrch, tj. použití jen v prostředí, které lze kontrolovat
- Příměsí musí být vyčerpány a recyklovány
- Odpady správně ukládány či zneškodňovány
- nefunkční pro málo propustné horniny
- příměsí mohou snižovat pórovitost

Použitelnost

- Touto metodou lze odstraňovat kovy, radioaktivní látky, těkavé produkty, paliva, pesticidy
- pro organické látky je to obvykle finančně nákladné



Diamo s.p. Stráž p. Ralskem, sanace těžby uranu

Použitá literatura

- MIT Open courseware Civil and Environmental Engineering » Waste Containment and Remediation Technology, Spring 2004
<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Civil-and-Environmental-Engineering/1-34Spring2004/LectureNotes/index.htm>
- Nyer, E.K. et al: 2001 In Situ Treatment Technology. 2nd edition. Lewis publishers.
- Keller, A.A. ESM 223 Soil and Groundwater Quality Management
http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/esm223_syllabus.htm
- <http://www.hgcinc.com/watersupp.htm>
- <http://www.srs.gov/general/enviro/erd/technology/Pages/g05p.html>
- www.g-servis.cz
- www.diamo.cz
- <http://www.fliteway.com/pages/pumpandtreat.html>
- http://www.gwrtac.org/html/tech_topic.htm