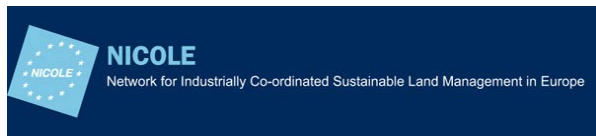




European Union Network for the Implementation
and Enforcement of Environmental Law



Working Group
Contamination

Extrakcia pôdneho vzduchu (SVE)

Záverečná správa

Dátum správy: 8. november 2021

Číslo správy: 2020/09 SVE

Preklad: Mgr. Bc. Ivica Stančík, SAŽP
Ing. Katarína Paluchová, SAŽP

Odborný konzultant: RNDr. Jaroslav Schwarz, ENVIGEO a.s.

Úvod o IMPEL

Sieť Európskej únie pre implementáciu a presadzovanie práva životného prostredia IMPEL (z angl. *The European Union Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law* je medzinárodné neziskové združenie environmentálnych orgánov členských štátov EÚ, prístupujúcich a kandidátskych krajín Európskej únie a krajín Európskeho hospodárskeho priestoru (*European Economic Area – EEA*). Združenie je registrované v Belgicku a jeho sídlo sa nachádza v Bruseli.

Združenie IMPEL bolo založené v roku 1992 ako neformálna sieť európskych regulačných orgánov a orgánov zaoberajúcich sa vykonávaním a presadzovaním práva v oblasti životného prostredia. Cieľom je vytvoriť v Európskom spoločenstve potrebný impulz na dosiahnutie pokroku pri zabezpečovaní účinnejšieho uplatňovania právnych predpisov v oblasti životného prostredia. Podstatou činnosti IMPEL je zvyšovanie povedomia, budovania kapacít a výmeny informácií a skúseností v oblasti implementácie, presadzovania a medzinárodnej spolupráce pri presadzovaní, ako aj propagácie a podpory praktickej vykonateľnosti a vymožitelnosti európskych právnych predpisov v oblasti životného prostredia.

Počas predchádzajúcich rokov sa IMPEL vypracovala na významnú, všeobecne známu organizáciu, ktorá sa spomína vo viacerých legislatívnych a politických dokumentoch EÚ, napr. v 7. environmentálnom akčnom programe a v odporúčaní na minimálne kritériá pre inšpekcie životného prostredia.

Vďaka odborným znalostiam a skúsenostiam účastníkov v rámci IMPEL je toto združenie jedinečne kvalifikované na prácu na technických a regulačných aspektoch právnych predpisov EÚ v oblasti životného prostredia.

Informácie o združení IMPEL sú dostupné na web stránke: www.impel.eu

Názov správy: Extrakcia pôdneho vzduchu (SVE) z angl. <i>Soil Vapor Extraction</i>	Číslo správy: 2020/09 SVE																																																																																		
Správa prijatá na Valnom zhromaždení IMPEL: 7. – 8. decembra 2021, Lubľana (Slovinsko)	Celkový počet strán: 299 Správa: 47 strán Príloha: 252 strán																																																																																		
Projektoví manažéri: <table border="0"> <tr> <td>Marco Falconi (IT)</td> <td>IMPEL</td> <td>ISPRA</td> </tr> <tr> <td>Dietmar Müller-Grabherr (AT)</td> <td>Common Forum</td> <td>Unweltbundesamt AT</td> </tr> <tr> <td>Frank Swartjes (NL)</td> <td>EIONET WG Contamination</td> <td>RIVM</td> </tr> <tr> <td>Tomas Albergaria (PT)</td> <td>NICOLE</td> <td>Instituto Politécnico do Porto</td> </tr> </table> Autori: <table border="0"> <tr> <td>Dietmar Müller-Grabherr (AT)</td> <td>Common Forum</td> <td>Unweltbundesamt AT</td> </tr> <tr> <td>Tomas Albergaria (PT)</td> <td>NICOLE</td> <td>Instituto Politécnico do Porto</td> </tr> <tr> <td>Francesca Benedetti (IT)</td> <td>IMPEL</td> <td>MITE</td> </tr> <tr> <td>Said El Fadili (BE)</td> <td>IMPEL</td> <td>ENVIRONNEMENT BRUSSELS</td> </tr> <tr> <td>Marco Falconi (IT)</td> <td>IMPEL</td> <td>ISPRA</td> </tr> <tr> <td>Federico Fuin (IT)</td> <td>IMPEL</td> <td>ARPAV</td> </tr> <tr> <td>Gabriella Grima (MT)</td> <td>IMPEL</td> <td>ERA</td> </tr> <tr> <td>Dirk Krebs (DE)</td> <td>IMPEL</td> <td>REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT</td> </tr> <tr> <td>Christina Pisani (MT)</td> <td>IMPEL</td> <td>ERA</td> </tr> <tr> <td>Alex Plows (UK)</td> <td>IMPEL</td> <td>CYFOETHNATURIOLCYMRU</td> </tr> <tr> <td>Andrea Sconocchia (IT)</td> <td>IMPEL</td> <td>ARPA UMBRIA</td> </tr> <tr> <td>Asa Valley (SE)</td> <td>EIONET WG Contamination</td> <td>NATURVÅRDSVERKET</td> </tr> </table> Prispievatelia do prílohy 1 SVE: <table border="0"> <tr> <td>Federico Caldera (IT)</td> <td>MARES</td> </tr> <tr> <td>Simone De Fazio (IT)</td> <td>GOLDER ASSOCIATES</td> </tr> <tr> <td>Boris Devic-Bassaget (FR)</td> <td>SUEZ RR IWS REMEDIATION FRANCE</td> </tr> <tr> <td>Paola Canepa (IT)</td> <td>ARPA LOMBARDIA</td> </tr> <tr> <td>Massimiliano Confalonieri (IT)</td> <td>ARPA LOMBARDIA</td> </tr> <tr> <td>Sophia Dore (US)</td> <td>GHD</td> </tr> <tr> <td>Alain Duchene (BE)</td> <td>HAEMERS TECHNOLOGIES</td> </tr> <tr> <td>Daniela Fiaccavento (IT)</td> <td>ARPAV</td> </tr> <tr> <td>René Fillion (US)</td> <td>GHD</td> </tr> <tr> <td>Jan Haemers (BE)</td> <td>HAEMERS TECHNOLOGIES</td> </tr> <tr> <td>Aline Jordens (BE)</td> <td>HAEMERS TECHNOLOGIES</td> </tr> <tr> <td>Angela Rosa Marin (IT)</td> <td>ARPA LOMBARDIA</td> </tr> <tr> <td>Valter Meda (IT)</td> <td>ARPA LOMBARDIA</td> </tr> <tr> <td>Davide Menozzi (AU)</td> <td>GHD</td> </tr> <tr> <td>Paola Panzeri (IT)</td> <td>ARPA LOMBARDIA</td> </tr> <tr> <td>Mathieu Petitjean (BE)</td> <td>HAEMERS TECHNOLOGIES</td> </tr> <tr> <td>Sara Puricelli (IT)</td> <td>ARPA LOMBARDIA</td> </tr> </table>		Marco Falconi (IT)	IMPEL	ISPRA	Dietmar Müller-Grabherr (AT)	Common Forum	Unweltbundesamt AT	Frank Swartjes (NL)	EIONET WG Contamination	RIVM	Tomas Albergaria (PT)	NICOLE	Instituto Politécnico do Porto	Dietmar Müller-Grabherr (AT)	Common Forum	Unweltbundesamt AT	Tomas Albergaria (PT)	NICOLE	Instituto Politécnico do Porto	Francesca Benedetti (IT)	IMPEL	MITE	Said El Fadili (BE)	IMPEL	ENVIRONNEMENT BRUSSELS	Marco Falconi (IT)	IMPEL	ISPRA	Federico Fuin (IT)	IMPEL	ARPAV	Gabriella Grima (MT)	IMPEL	ERA	Dirk Krebs (DE)	IMPEL	REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT	Christina Pisani (MT)	IMPEL	ERA	Alex Plows (UK)	IMPEL	CYFOETHNATURIOLCYMRU	Andrea Sconocchia (IT)	IMPEL	ARPA UMBRIA	Asa Valley (SE)	EIONET WG Contamination	NATURVÅRDSVERKET	Federico Caldera (IT)	MARES	Simone De Fazio (IT)	GOLDER ASSOCIATES	Boris Devic-Bassaget (FR)	SUEZ RR IWS REMEDIATION FRANCE	Paola Canepa (IT)	ARPA LOMBARDIA	Massimiliano Confalonieri (IT)	ARPA LOMBARDIA	Sophia Dore (US)	GHD	Alain Duchene (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES	Daniela Fiaccavento (IT)	ARPAV	René Fillion (US)	GHD	Jan Haemers (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES	Aline Jordens (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES	Angela Rosa Marin (IT)	ARPA LOMBARDIA	Valter Meda (IT)	ARPA LOMBARDIA	Davide Menozzi (AU)	GHD	Paola Panzeri (IT)	ARPA LOMBARDIA	Mathieu Petitjean (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES	Sara Puricelli (IT)	ARPA LOMBARDIA
Marco Falconi (IT)	IMPEL	ISPRA																																																																																	
Dietmar Müller-Grabherr (AT)	Common Forum	Unweltbundesamt AT																																																																																	
Frank Swartjes (NL)	EIONET WG Contamination	RIVM																																																																																	
Tomas Albergaria (PT)	NICOLE	Instituto Politécnico do Porto																																																																																	
Dietmar Müller-Grabherr (AT)	Common Forum	Unweltbundesamt AT																																																																																	
Tomas Albergaria (PT)	NICOLE	Instituto Politécnico do Porto																																																																																	
Francesca Benedetti (IT)	IMPEL	MITE																																																																																	
Said El Fadili (BE)	IMPEL	ENVIRONNEMENT BRUSSELS																																																																																	
Marco Falconi (IT)	IMPEL	ISPRA																																																																																	
Federico Fuin (IT)	IMPEL	ARPAV																																																																																	
Gabriella Grima (MT)	IMPEL	ERA																																																																																	
Dirk Krebs (DE)	IMPEL	REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT																																																																																	
Christina Pisani (MT)	IMPEL	ERA																																																																																	
Alex Plows (UK)	IMPEL	CYFOETHNATURIOLCYMRU																																																																																	
Andrea Sconocchia (IT)	IMPEL	ARPA UMBRIA																																																																																	
Asa Valley (SE)	EIONET WG Contamination	NATURVÅRDSVERKET																																																																																	
Federico Caldera (IT)	MARES																																																																																		
Simone De Fazio (IT)	GOLDER ASSOCIATES																																																																																		
Boris Devic-Bassaget (FR)	SUEZ RR IWS REMEDIATION FRANCE																																																																																		
Paola Canepa (IT)	ARPA LOMBARDIA																																																																																		
Massimiliano Confalonieri (IT)	ARPA LOMBARDIA																																																																																		
Sophia Dore (US)	GHD																																																																																		
Alain Duchene (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES																																																																																		
Daniela Fiaccavento (IT)	ARPAV																																																																																		
René Fillion (US)	GHD																																																																																		
Jan Haemers (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES																																																																																		
Aline Jordens (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES																																																																																		
Angela Rosa Marin (IT)	ARPA LOMBARDIA																																																																																		
Valter Meda (IT)	ARPA LOMBARDIA																																																																																		
Davide Menozzi (AU)	GHD																																																																																		
Paola Panzeri (IT)	ARPA LOMBARDIA																																																																																		
Mathieu Petitjean (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES																																																																																		
Sara Puricelli (IT)	ARPA LOMBARDIA																																																																																		

Jean Rhone (FR)	HAEMERS TECHNOLOGIES
Diego Ricci (IT)	ARPA LOMBARDIA
Hatem Saadaoui (BE/TN)	HAEMERS TECHNOLOGIES
Luca Sacilotto (IT)	RAMBOLL
Valentina Sammartino (IT)	ARPA CAMPANIA
Hadas Sharon (IL)	LUDAN ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES
Ewa Szczebak (PL)	ARCADIS
Corrado Thea (IT)	GOLDER ASSOCIATES
Aldo Trezzi (IT)	RAMBOLL
Mathieu Vion (FR)	SUEZ RR IWS REMEDIATION FRANCE

Recenzenti:

Federico Caldera (IT)	MARES
Craig Cox (US)	COX COLVIN & ASSOCIATES
Mathieu Petitjean (BE)	HAEMERS TECHNOLOGIES

Zhrnutie

Kľúčové slová

Extrakcia pôdneho vzduchu, udržateľná sanácia, pôda, podzemná voda, pôdna politika, sanácia, životné prostredie, žiadny záber pôdy, znečistenie, znečistené lokality, znečistené územie, monitorovanie, terénna skúška.

Cieľové skupiny

Príslušné orgány pre schvaľovanie/aplikáciu/monitorovanie sanácie, priemyselní prevádzkovatelia, agentúry na ochranu životného prostredia, orgány ochrany prírody, environmentálne inšpektoráty, environmentálne monitorovacie a výskumné inštitúcie, vysoké školy, environmentálne združenia, mimovládne organizácie, poisťovne a združenia, environmentálni poradcovia.

Sieť IMPEL v rámci svojho pracovného programu na rok 2020 vytvorila projekt „Sanácia vody a pôdy“ (*Water and Land Remediation*) (2020/09), týkajúci sa posúdenia použiteľnosti sanačných technológií.

Projekt „Sanácia vody a pôdy“ vychádza z definícií a postupov sanácie a zameriava sa na technickú stránku sanačných technológií. Konečným cieľom projektu je vytvoriť dokument poskytujúci kritériá pre posúdenie návrhu sanácie, posúdiť jej vhodnosť, popísať postup pri terénnych skúškach a samotnej sanácii. Príloha 1 obsahuje viacero prípadových štúdií, ktoré môžu pomôcť čitateľom pripraviť sa na problémy, s ktorými sa môžu stretnúť, a tiež zistiť, či sa prezentované riešenie môže použiť na ich lokalite. Pritom zostáva v platnosti, že každá znečistená lokalita sa líši od ostatných a vždy je potrebný špecifický prístup pre danú lokalitu.

Cieľom projektu „Sanácia vody a pôdy“ na roky 2020 - 2021 bolo sústrediť sa na dve sanačné technológie, chemickú oxidáciu in situ (ISCO) a extrakciu pôdneho vzduchu (SVE).

V konečnom dôsledku projekt „Sanácia vody a pôdy“ má za cieľ podporiť použitie *in situ* a *on-site* sanačných techník/technológií pre pôdu, horninové prostredie a podzemnú vodu, na úkor bežne používaných technológií *Dig&Dump* (odstránenie znečistenej zeminy a jej sanácia ex situ) a *Pump&Treat* (sanačné čerpanie a čistenie podzemnej vody), ktoré nie sú trvalo udržateľné v strednodobom horizonte. Pôda a voda sú prírodné zdroje, a ak je to technicky možné, mali by sa regenerovať a nie nimi plytvať .

PodĎakovanie

Táto správa bola preskúmaná širším projektovým tímom IMPEL a tímom odborníkov na vodu a pôdu IMPEL, sieťou COMMON FORUM, sieťou NICOLE, EIONET WG Contamination a skupinou externých recenzentov.

Upozornenie

Táto publikácia bola pripravená v rámci projektu IMPEL „Sanácia vody a pôdy“ s podporou partnerských sietí zaoberajúcich sa manažmentom znečistených území. Dokument napísaný a skontrolovaný tímom autorov má slúžiť ako primárny zdroj informácií na výmenu a rozšírenie vedomostí medzi európskymi krajinami a regiónmi, so zameraním sa možnosti tejto špecifickej sanačnej technológie.

Uvedený obsah vychádza z relevantnej bibliografie, skúseností autorov a zozbieraných prípadových štúdií. Dokument nemusí byť vyčerpávajúci pre všetky situácie, v ktorých bola alebo bude táto technológia použitá. Prípadové štúdie (viď príloha) sú dobrovoľné príspevky. Tím autorov nehodnotil, ani neoveroval pravdivosť údajov v prípadových štúdiách.

Okrem toho niektoré krajiny, regióny alebo miestne orgány môžu mať zavedené konkrétne legislatívne predpisy, smernice alebo metodické usmernenia pre použitie rôznych sanačných techník/technológií v rôznych podmienkach.

Tento dokument NIE JE určený ako návod alebo referenčný dokument (*BREF – BAT reference document*) pre najlepšie dostupné techniky (*BAT - best available techniques*). Pedologické, geologické a hydrogeologické podmienky znečistených území v Európe sú veľmi rozdielne. Preto kľúčom k úspechu pri sanácii znečistených území je na mieru šitý návrh a správna realizácia. Akékoľvek odporúčanie tu uvedené sa môže uplatniť, čiastočne uplatniť alebo aj neuplatniť. V každom prípade autori, prispievatelia a zapojené inštitúcie nenesú za to zodpovednosť.

Názory vyjadrené v tomto dokumente nemusia byť nevyhnutne názormi jednotlivých členov nižšie podpísaných inštitúcií. IMPEL a jeho partnerské inštitúcie dôrazne odporúčajú, aby si jednotlivci/organizácie so záujmom o aplikáciu technológie v praxi zaistili služby skúsených odborníkov v oblasti životného prostredia.

Marco Falconi – IMPEL

Dietmar Müller Grabherr – COMMON FORUM on Contaminated Land in Europe

Frank Swartjes – EEA EIONET WG Contamination

Tomas Albergaria – NICOLE

Slovník pojmov

POJEM	DEFINÍCIA	ZDROJ	Kapitola/ článok
referenčné miesto	miesto (napríklad pôda alebo podzemná voda), v ktorom sa merajú hodnotiace kritériá, ktoré nesmú byť prekročené	STN EN ISO 11074	3.4.5
kontrola dodržania cieľových hodnôt sanácie v referenčnom mieste	prieskum alebo program priebežnej kontroly, skúšky alebo monitorovania s cieľom potvrdiť, že sanácia bola riadne vykonaná (napríklad, že všetky znečisťujúce látky boli odstránené) a/alebo že bolo prijaté opatrenie založené na izolácii, ktoré bude naďalej fungovať na stanovenej úrovni	STN EN ISO 11074	6.1.5
znečisťujúca látka/kontaminant ¹	látka (látky) alebo činidlo (činidlá) prítomné v pôde v dôsledku ľudskej činnosti	STN EN ISO 11074	3.4.6
znečistené územie ²	územie, na ktorom je prítomné znečistenie	STN EN ISO 11074	2.3.5
znečistenie/ kontaminácia	látka (látky) alebo činidlo (činidlá) prítomné v pôde v dôsledku ľudskej činnosti	STN EN ISO 11074	2.3.6
účinnosť ³	(sanačná metóda) miera schopnosti sanačnej metódy dosiahnuť požadovanú účinnosť	STN EN ISO 11074	6.1.6
emisia	priame alebo nepriame uvoľnenie látok, vibrácií, tepla alebo hluku z bodového zdroja alebo z plošných zdrojov zariadenia do ovzdušia, vody alebo pôdy	Smernica 2010/75/EÚ	článok 3 (4)
norma kvality životného prostredia	súbor požiadaviek stanovených v právnych predpisoch Únie, ktoré musí dané životné prostredie alebo jeho určitá časť v danom čase spĺňať	Smernica 2010/75/EÚ	článok 3 (6)
Henryho konštanty	rozdeľovací koeficient medzi pôdnym vzduchom a vodou	STN EN ISO 11074	3.3.12
metóda sanácie in-situ ⁴	metóda sanácie aplikovaná priamo na mieste (napr. na pôdu, podzemnú vodu) bez vyťaženia znečistenej zeminy alebo odčerpania podzemnej vody	STN EN ISO 11074	6.2.3
lúhovanie	rozpúšťanie a pohyb rozpustených látok vodou	STN EN ISO 11074	3.3.15

¹ U tejto definícii nie je predpoklad, že škoda vyplýva z prítomnosti znečistenia.

² U tejto definícii nie je predpoklad, že škoda vyplýva z prítomnosti znečistenia.

³ V prípade metódy založenej na procese možno účinnosť vyjadriť v podobe dosiahnutých zvyškových koncentrácií znečisťujúcich látok.

⁴ Poznámka: ISO CD 241212 navrhuje ako synonymum 'in-situ (remediation) technique' (in-situ (sanačná) technika) [Poznámka 1 k položke: Takéto sanačné zariadenie je zriadené na mieste a činnosť spracovania znečisťujúcej látky je zameraná na priamu aplikáciu do horninového prostredia.] ISO CD 241212 3.1

POJEM	DEFINÍCIA	ZDROJ	Kapitola/ článok
<i>znečisťujúca látka</i>	<i>látka (látky) alebo činidlo (činidlá) prítomné v pôde (alebo podzemnej vode), ktoré vzhľadom na svoje vlastnosti, množstvo alebo koncentráciu spôsobujú nepriaznivý vplyv na funkciu pôdy</i>	<i>STN EN ISO 11074</i>	<i>3.4.18</i>
<i>znečisťovanie</i>	<i>priame alebo nepriame zavedenie látok, vibrácií, tepla alebo hluku do ovzdušia, vody alebo pôdy v dôsledku ľudskej činnosti, ktoré môže byť škodlivé pre ľudské zdravie alebo kvalitu životného prostredia, spôsobiť poškodenie hmotného majetku, alebo znehodnotiť či narušiť harmóniu životného prostredia a iné legitímne využívanie životného prostredia</i>	<i>Smernica 2010/75/EÚ</i>	<i>článok 3 (2)</i>
<i>cieľ sanácie</i>	<i>všeobecný termín pre akýkoľvek cieľ vrátane tých, ktoré súvisia s technickými (napr. zvyškové znečistenie, technické parametre), administratívnymi a právnymi požiadavkami</i>	<i>STN EN ISO 11074</i>	<i>6.1.19</i>
<i>stratégia sanácie⁵</i>	<i>kombinácia sanačných metód a súvisiacich prác, ktoré spĺňajú stanovené ciele súvisiace so znečistením (napr. zvyškové koncentrácie znečisťujúcich látok) a iné ciele (napr. technické) a prekonajú obmedzenia špecifické pre danú lokalitu</i>	<i>STN EN ISO 11074</i>	<i>6.1.20</i>
<i>cieľová hodnota sanácie</i>	<i>označenie účinnosti, ktorá sa má sanáciou dosiahnuť, zvyčajne definovaná ako cieľ súvisiaci so znečistením vo forme zvyškovej koncentrácie</i>	<i>STN EN ISO 11074</i>	<i>6.1.21</i>
<i>pásmo nasýtenia</i>	<i>časť horninového prostredia, v ktorej sú všetky póry celkom vyplnené vodou</i>	<i>STN EN ISO 11074</i>	<i>3.2.6</i>
<i>pôda</i>	<i>vrchná vrstva zemskej kôry, ktorá sa nachádza medzi podložíom a povrchom; pôda sa skladá z minerálnych častíc, organickej hmoty, vody, vzduchu a živých organizmov;</i>	<i>Smernica 2010/75/EÚ</i>	<i>článok 3 (21)</i>
<i>pôdny vzduch</i>	<i>vzduch, ktorý spolu s vodou vyplňa pôdne póry</i>	<i>STN EN ISO 11074</i>	<i>2.1.13</i>
<i>pásmo prevzdušnenia</i>	<i>časť pôdneho prostredia, v ktorej je časť pórov vyplnená vzduchom</i>	<i>STN EN ISO 11074</i>	<i>3.2.8</i>

⁵ Výber metód môže byť obmedzený rôznymi faktormi špecifickými pre danú lokalitu, ako sú topografia, geológia, hydrogeológia, náhynnosť na záplavy a klíma.

OBSAH

1	ÚVOD	10
1.1	Základné údaje o SVE	10
1.2	SVE použiteľnosť	10
1.3	Realizácia SVE	11
2	POPIS TECHNIKY	12
2.1	Všeobecný princíp	12
2.2	Popis techniky a jej súčasti	12
2.3	Použiteľnosť techniky SVE pre rôzne znečisťujúce látky	13
2.4	Zohľadnenie geologických podmienok	13
2.5	Základné parametre návrhu techniky	14
3	ŠTÚDIA USKUTOČNITEĽNOSTI	17
3.1	Charakteristika geologickej stavby a koncepčný model územia	17
3.1.1	Rozsah a intenzita znečistenia	18
3.1.2	Geometrická charakteristika zdroja	19
3.1.3	Prítomnosť voľnej fázy ropných látok	20
3.1.4	Výsledok prieskumu pôdneho vzduchu (atmogeochemického prieskumu)	20
3.1.5	Priepustnosť pôdy a horninového prostredia pre vzduch	20
3.1.6	Heterogenita a preferenčné cesty	20
3.1.7	Topografia	21
3.2	Využitie pilotných skúšok pri návrhu sanácie technikou SVE	21
3.3	Posúdenie uskutočniteľnosti SVE	24
4	TERÉNNÉ SKÚŠKY	26
4.1	Konvenčná pilotná skúška	28
4.1.1	Požiadavky na technické zabezpečenie pilotných skúšok	30
4.1.2	Kroková skúška zvyšovania podtlaku SVE	31
4.1.3	Pilotná skúška SVE s konštantným podtlakom	34
4.2	Pilotná skúška distribúcie a účinnosti SVE s využitím stopovača (hélium)	34
4.3	Monitorovanie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu	36
4.4	Minimálne technické vybavenie na terénne skúšky SVE	37
4.5	Extrakčné vrty	37
4.6	Návrh pilotnej skúšky – minimálne požiadavky	38
4.7	Alternatíva k pilotnej skúške	39

5	MONITOROVANIE PRIEBEHU SANÁCIE	40
5.1	Monitorovanie prevádzkovej fázy (priebežné monitorovanie)	40
5.1.1	Chemické parametre	40
5.1.2	Fyzikálne parametre	41
5.1.3	Meteorologické údaje	41
5.2	Potvrdenie dosiahnutia cieľových hodnôt sanácie a ukončenie sanácie	42
5.2.1	Možné ukazovatele, ktoré je potrebné posúdiť pri ukončení sanácie	42
5.2.2	Navrhovaný postup odberu vzoriek pri odstavení sanačnej technológie	44
6	ZÁVER	45
6.1	Účinnosť metódy, výhody a nevýhody	45
6.2	Kontrola prevádzky sanácie SVE	46
	ZDROJE	47

1 ÚVOD

IMPEL (*Implementation and Enforcement of Environmental Law*), sieť Európskej únie pre implementáciu a presadzovanie práva životného prostredia, vyvíja v rámci projektu „Sanácia vody a pôdy“ (*Water and Land Remediation - WLR*) sériu metodických dokumentov zameraných na najbežnejšie a najpoužívanejšie technológie sanácie horninového prostredia, pôdy a podzemných vôd. Tieto dokumenty zahŕňajú najnovšie a najaktuálnejšie informácie o týchto sanačných technológiách, ktoré by mohli napomôcť ich porozumeniu rôznym zainteresovaným stranám, ako sú vlastníci územia, miestna komunita, projektoví manažéri, dodávatelia prác, kontrolóri a iní odborníci z praxe. Využíva informácie poskytnuté zainteresovanými prispievateľmi, získané z recenzovaných vedeckých zdrojov a oficiálnych správ. Predmetný dokument zhromažďuje najnovšie poznatky o jednej z najčastejšie používaných sanačných technológií, extrakcii (odsávaní) pôdneho vzduchu (*Soil Vapour Extraction - SVE*).

1.1 Základné údaje o SVE

Extrakcia pôdneho vzduchu (ako aj podobné sanačné technológie - odsávanie pôdneho vzduchu – venting, bioventing a prevzdušňovanie – aerácia, striping) je jednou z najpoužívanejších techník/technológií sanácie pôdy a horninového prostredia [FRTR 2020]. Vďaka častému použitiu v posledných desaťročiach je SVE v súčasnosti akceptovanou, odskúšanou a účinnou technológiou na sanáciu horninového prostredia a pôd znečisťujúcimi prchavými (alebo vzhľadom na lokalitu aj poloprchavými) organickými zlúčeninami v nenasýtenej (alebo aj nasýtenej) zóne horninového prostredia a pôdy [Suthersan 1999].

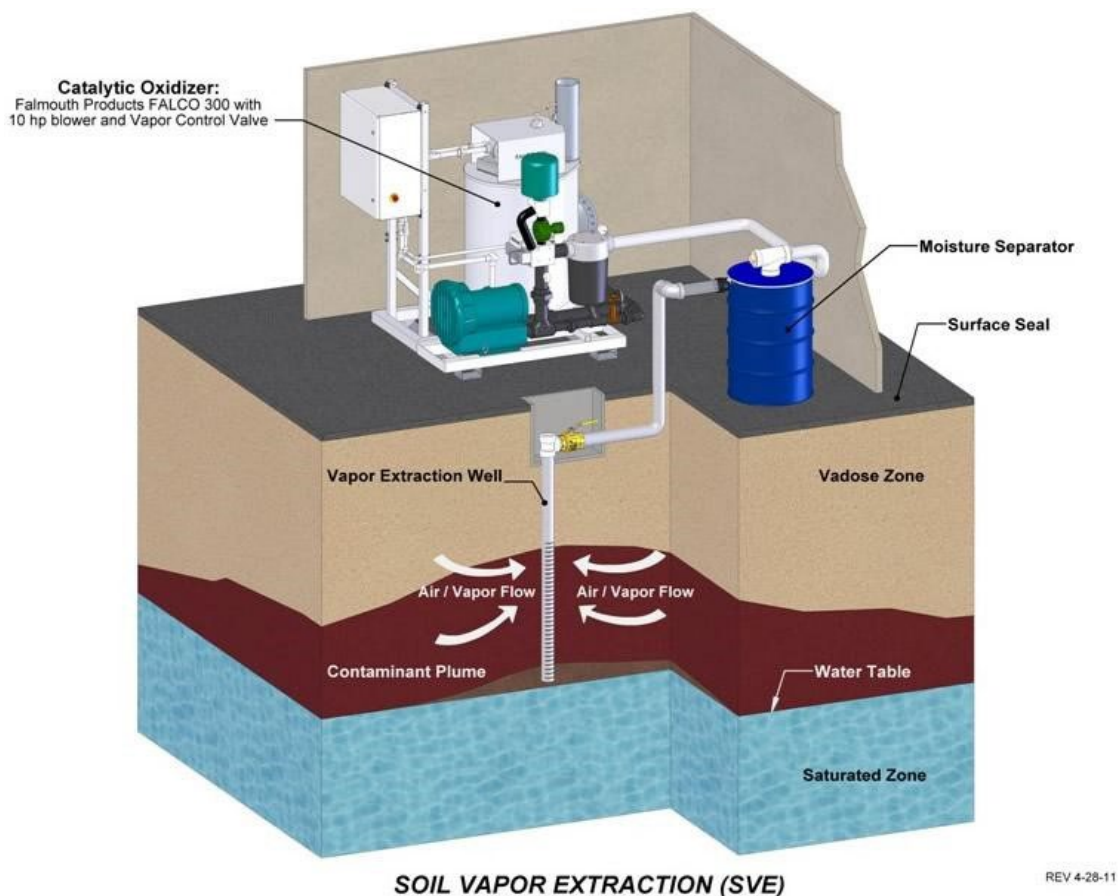
Typická schéma procesu SVE je znázornená na Obrázku 1.1. SVE využíva vysokú prchavosť znečisťujúcich látok na ich transport pomocou prúdu vzduchu vytvoreného v pôde podtlakom generovaným dúchadlami/vývevami. Prúdenie pôdneho vzduchu privádza prchavé znečisťujúce látky do extrakčných vrtov, a odtiaľ do zariadení na čistenie emisií umiestnených nad povrchom, kde sú zachytávané alebo redukované. Najbežnejšími mechanizmami úpravy sú adsorpcia na aktívne uhlie a deštrukcia katalytickou alebo tepelnou oxidáciou [EPA 2018, Soares 2012].

SVE je všestranne využiteľná sanačná technika/technológia a možno ju použiť samostatne, so zameraním výlučne na odstraňovanie prchavých znečisťujúcich látok, alebo v kombinácii s inými sanačnými technológiami, ktoré využívajú iné mechanizmy odstraňovania znečisťujúcich látok, ako je biodegradácia (napr. venting, bioventing, aerácia – striping, aplikované na nenasýtenú a nasýtenú zónu) alebo desorpcia (tepelne zosilnená SVE, ktorá využíva na zvýšenie teploty a tým aj rýchlosti odparovania znečisťujúcich látok a uľahčenie extrakcie elektrický odpor alebo vstrekovanie horúceho vzduchu/pary). Prúd vzduchu/pár, ktorý SVE vytvára v nenasýtenej zóne horninového prostredia a pôdy, podporuje prchavosť znečisťujúcich látok, čím sa zvyšuje ich mobilita v prostredí a zlepšuje transport prchavých zložiek znečisťujúcich látok smerom k extrakčným vrtom [Suthersan 1999, EPA 2018]. Nižšie rýchlosti prúdenia vzduchu/pár, ako sa zvyčajne používajú pri odvetrávaní pôdy a horninového prostredia (venting, bioventing), podporujú biodegradáciu degradovateľných zlúčenín v pôde prostredníctvom prevzdušňovania.

1.2 SVE použiteľnosť

Čo sa týka požadovaných charakteristík geologického prostredia, SVE je vo všeobecnosti účinná pre priepustné pôdy a horniny s nízkym/stredným obsahom organickej hmoty a vlhkosti a s hladinou podzemnej vody v hĺbke 2 až 30 m.

Vzhľadom na typ znečisťujúcich látok SVE preukázala účinnosť pre halogénované a nehalogénované prchavé organické zlúčeniny (*volatile organic compounds - VOC*), obmedzenú účinnosť pre halogénované a nehalogénované poloprchavé organické zlúčeniny (*semi-volatile organic compounds - SVOC*), niektoré novozavádzané znečisťujúce látky (nie však pre 1,4-dioxán alebo per- a polyfluóralkylové látky (PFAS)) a palivá. Nedá sa použiť na anorganické látky, rádionuklidy a muníciu [FRTR 2020, EPA 2018].



Catalytic Oxidizer – katalytická oxidácia, *Moisture Separator* – odlučovač vlhkosti, *Surface Seal* – povrchové tesnenie, *Vadose Zone* – pásmo prevzdušnenia, *Vapor Extraction Well* – vrt na odsávanie pôdneho vzduchu, *Air / Vapor Flow* – prúd vzduchu / prchavých zložiek, *Contaminant Plume* – mrak znečistenia, *Water Table* – hladina podzemnej vody, *Saturated Zone* – pásmo nasýtenia

Obrázok 1.1 – Schéma SVE

1.3 Realizácia SVE

Realizácia sanácie systémom SVE si vyžaduje použitie vákuových dúchadiel/výjev, budovanie extrakčných vrtov (vertikálnych alebo horizontálnych) a príslušného prepravného potrubia, ktorým sa bude extrahovať znečisťujúca látka z pôdy na povrch na ďalšiu úpravu (odstránenie). Úprava znečisteného pôdneho vzduchu si bude vyžadovať návrh/výstavbu/povolenia zariadení a vhodné vybavenie na dosiahnutie emisných limitov, aby boli v súlade s národnými/regionálnymi predpismi. Ak vezmeme do úvahy skúsenosti s prevádzkou a údržbou SVE, trvanie sanácie sa vo všeobecnosti pohybuje v rozsahu 1 až 3 roky [FRTR 2020].

2 POPIS TECHNIKY

2.1 Všeobecný princíp

SVE je in-situ technika/technológia na sanáciu nenasýtenej zóny znečistených pôd a horninového prostredia. Jej základným princípom je extrakcia prchavých znečisťujúcich látok odsávaním vzduchu, alebo naopak jeho vŕhaním do nenasýtenej zóny. Predpokladom úspešnej aplikácie je dostatočná priepustnosť pôdy a hornín.

SVE sa môže vykonávať za pomoci injektáže vzduchu alebo bez nej. Ak nie je aktívna injektáž vzduchu, čerstvý vzduch sa nasáva do pôdy z atmosféry cez povrch zeme. Cirkulácia vzduchu mení chemickú rovnováhu medzi rôznymi fázami (plyn, pórová voda, častice pôdy), čím sa podporuje vyprchanie prchavých zložiek znečisťujúcich látok z pevnej a/alebo kvapalnej fázy do pôdneho vzduchu. Odsávané pary sa následne čistia.

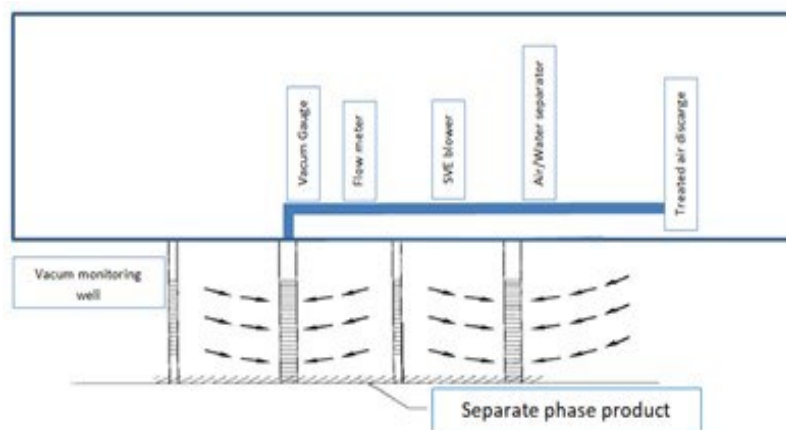
Celý proces musí byť kontrolovaný a riadený konzistentným monitorovacím systémom (napr. prietok vzduchu, koncentrácia znečisťujúcich látok, teplota, vlhkosť).

2.2 Popis techniky a jej súčasti

Ventilačný systém, ktorý bude inštalovaný na lokalite, pozostáva z nasledujúcich hlavných technologických celkov:

- vertikálne (alebo horizontálne) extrakčné vrty (nazývané „extrakčné drény“) na prístup ku znečistenej horninovej/pôdnej vrstve;
- vertikálne (alebo horizontálne) injekčné vrty (alebo sondy) na zvýšenie/usmernenie prúdenia vzduchu v oblasti, ktorá sa má sanovať, a najmä na hraniciach sanovaného územia vybavené ventilmi (a prietokomerami) na prepojenie všetkých častí systému;
- odlučovač kondenzátu alebo odvlhčovač (*demister*) na ochranu zariadenia na čistenie emisií pred vlhkosťou a podzemnou vodou strhnutou vedeným prúdom vzduchu;
- dúchadlo/výveva (na vytvorenie podtlaku potrebného na vyvolanie toku pôdneho vzduchu smerom k extrakčným vrtom) ;
- systém čistenia odpadových plynov - emisií (na odstránenie znečisťujúcich látok z extrahovaného pôdneho vzduchu).

Najbežnejšími spôsobmi čistenia emisií sú adsorpcia na aktívne uhlie a deštrukcia katalytickou alebo tepelnou oxidáciou. Typická schéma systému SVE a jeho častí je znázornená na Obrázku 2.1. Vzhľadom na to, že medzi látkami, s ktorými sa pri extrakcii nakladá sú aj horľavé látky (napr. benzín), je nevyhnutné mať vypracovaný plán bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci, resp. havarijný plán.



Separate phase product – voľná fáza znečisťujúcej látky, *Vacuum monitoring Well* – vrt na monitorovanie podtlaku, *Vacuum gauge* – manometer/tlakomer, *Flow meter* – prietokomer, *SVE blower* – dúchadlo/výveva, *Air / Water Separator* – odlučovač vlhkosti, *Treated air discharge* – výstup z čistenia emisií

Obrázok 2.1 – Komponenty zariadenia SVE

2.3 Použiteľnosť techniky SVE pre rôzne znečisťujúce látky

Účinnosť SVE je všeobecne preukázaná pre prchavé organické zlúčeniny (*VOC – volatile organic compounds*). Za určitých podmienok a v kombinácii s inými sanačnými technikami sa môže uplatniť aj pri sanácii poloprchavých organických zlúčenín (*SVOCs – semi-volatile organic compounds*). Vo všeobecnosti sa tiež vyžaduje, aby znečisťujúce látky neboli silne adsorbované na pevnú fázu pôdnych/horninových vrstiev.

Typické aplikácie sú pre aromatické uhľovodíky (BTEX), fenoly, benzín, ľahké uhľovodíky ($C_n, n < 12$), chlórované rozpúšťadlá (chloroform, VC, DCM, DCA, DCE, TCA, TCE, TC, PCE) a chlórbenzény (s nízkou substitúciou). Preto sa SVE často používa v petrochemických prevádzkach, na čerpacích staniach, v kovoobrábacom a kovopracujúcom (odmasťovanie a chemické čistenie) priemysle.

Určujúcimi faktormi pri aplikácii SVE sú vlastnosti znečisťujúcich látok, najmä distribúcia medzi fázami a geologická stavba územia, predovšetkým stratigrafia a vlastnosti geologických vrstiev ako priepustnosť, pórovitosť a heterogenita.

Niektoré charakteristiky znečisťujúcich látok sú veľmi dôležité pre účinnosť a efektívnosť procesu. Tlak pár zlúčeniny je parciálny tlak plynnej fázy tejto zlúčeniny v rovnováhe s jej kvapalnou fázou (*non-aqueous phase liquid - NAPL*). Je to teda miera rovnováhy kvapalnej a plynnej fázy. SVE je vhodná pre látky s tlakom pár $> 0,5 - 1,0$ mmHg. Bod varu súvisí s tlakom pár a určuje použiteľnosť alebo nevhodnosť SVE, ktorá je vhodná pre látky s bodom varu pod $250 - 300$ °C. Henryho konštanta predstavuje pomer koncentrácie určitej látky v plynnej fáze a rovnakej látky vo vodnej fáze. SVE je vhodná pre látky s Henryho konštantou $> 0,001$ atm m³/mol.

2.4 Zohľadnenie geologických podmienok

Geológia, stratigrafia pôdnych a horninových vrstiev a vlastnosti pôdy a horninového prostredia sú veľmi dôležité pre účinnosť a efektívnosť aplikácie SVE. Preto je kľúčové porozumieť geologickému prostrediu, aby sa vytvoril konzistentný koncepčný model územia (pozri kapitolu 3.1).

Kľúčovými parametrami vlastností pôdy sú pórovitosť, priepustnosť, vlhkosť a heterogenita. Prúdenie vzduchu vo vrstvách pôdy a hornín prebieha cez prepojené priestory pórov v pôde, takže s (efektívnou) pórovitosťou sa zvyšuje prúdenie vzduchu cez pôdu. Prítomnosť vody v póroch je fyzická prekážka, ktorá bráni prúdeniu vzduchu. Na druhej strane veľmi nízky obsah vlhkosti určuje silnejšiu adsorpciu niektorých znečisťujúcich látok na horniny/pôdu.

Prítomnosť polôh charakterizovaných výrazne odlišnou štruktúrou a priepustnosťou môže ovplyvniť prúdenie vzduchu a tak spôsobiť skraty v prúdení (napr. prednostné prúdenie vzduchu v porušených častiach pôdy v blízkosti nasávacieho vrtu). Ďalším dôležitým faktorom, ktorý môže obmedziť prúdenie vzduchu, je výška hladiny podzemnej vody. Podtlak vyvolaný extrakčnými vrtmi môže spôsobiť vyklenutie piezometrickej hladiny (podtlak o 0,2 atm by vyvolal zvýšenie hladiny asi o 2 m) a čiastočne zatopiť vrty a systém SVE. Technika je účinná pri hĺbke hladiny podzemnej vody okolo 3 m, naopak hĺbky menšie ako 1,5 m sa pre aplikáciu neodporúčajú.

Úspešnú realizáciu SVE môže zmať aj vyšší celkový obsah organického uhlíka (*TOC - total organic compound*) v pôde (napr. rašelina). (S vysokým obsahom organických látok (TOC) sa znižuje desorpcia a prchavosť a - čo nie je celkom preukázané - aj priepustnosť.)

Parametre zhrnuté nižšie by mohli byť kľúčom k úspešnej aplikácii SVE:

- vysoká priepustnosť geologických vrstiev;
- homogénne zloženie pôdy/hornín, t. j. neprítomnosť vrstiev a šošoviek rôznej štruktúry, absencia preferenčných ciest prúdenia vzduchu v dôsledku prítomnosti podzemnej infraštruktúry;
- absencia šošoviek alebo rašelinových vrstiev s vysokou absorpčnou kapacitou pre organické znečisťujúce látky;
- neprítomnosť väčších akumulácií voľnej fázy ropných látok (*contaminant pools*);
- žiadne nepriepustné preplástky;
- žiadna plytká podzemná voda.

2.5 Základné parametre návrhu techniky

Návrh SVE spočíva v určení:

a) Prevádzkové parametre systému:

- rýchlosť odsávania vzduchu;
- stupeň vákua (podtlaku) v extrakčnom vrte;
- polomer vplyvu (dosah účinnosti).

b) Definícia komponentov systému:

- počet extrakčných vrtov a ich poloha;
- konštrukcia vrtov;
- odsávacie dúchadlo/výveva;
- separátor voda - vzduch;
- jednotka na čistenie emisií (s výmenníkom tepla).

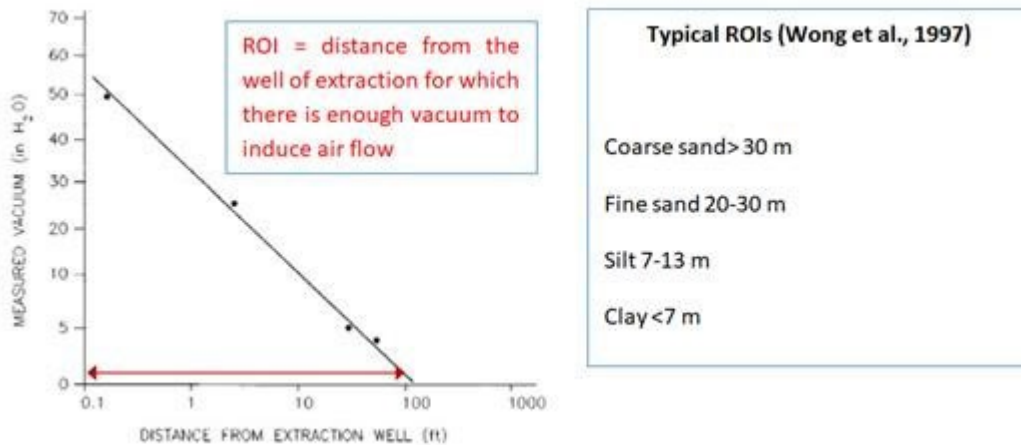
Pre projektovanie SVE sa v teréne vykonávajú pilotné skúšky. Tieto skúšky musia zahŕňať aspoň 1 extrakčný vrt a aspoň 3 monitorovacie body (viacúrovňové v prípade heterogenity územia), v ktorých je dosiahnutý podtlak. Pre preukážnu pilotnú skúšku je v prvom rade potrebné nastaviť sací výkon nastavením regulačného ventilu

bežne umiestneného na sacom potrubí. Pre každú polohu ventilu (zodpovedajúcu určitému saciemu výkonu) následne počkať asi 30 minút na stabilizáciu systému a zmerať:

- stupeň podtlaku v extrakčnom vrte;
- stupeň podtlaku vyvolaného v monitorovacích bodoch;
- prietok odsávaného pôdneho vzduchu.

Merania sa opakujú pre rôzne stupne nastavenia ventilu. Výsledkom pilotnej skúšky je údaj o priepustnosti pôdy (k - koeficient priepustnosti).

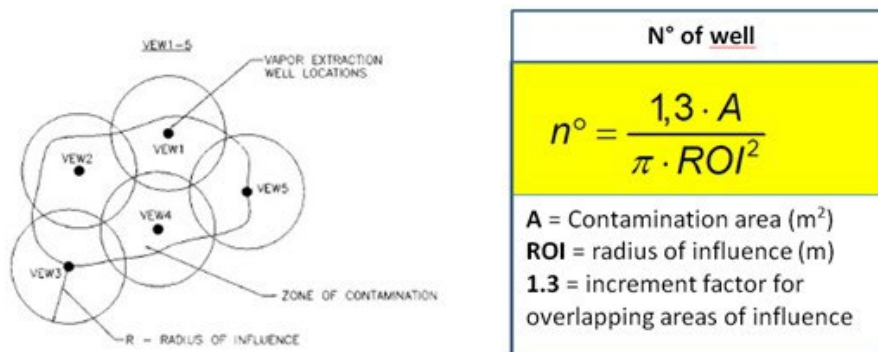
Jedným z najdôležitejších kritérií návrhu je polomer vplyvu (dosah účinnosti), ktorý je založený na meraniach získaných počas pilotného testu. Pri absencii údajov z už realizovaných prác je to najspoľahlivejšia metóda na návrh sanačnej techniky v realizačnom rozsahu.



MEASURED VACUUM – meraný podtlak, DISTANCE FROM EXTRACTION WELL – vzdialenosť od extrakčného vrtu, ROI... – vzdialenosť od extrakčného vrtu, pre ktorú je dostatočný podtlak pre vznik prúdenia pôdneho vzduchu, Typical ROIs... – typické polomery vplyvu, coarse sand – hrubozrnný piesok, fine sand – jemnozrnný piesok, silt – silt (hlina), clay - íl

Obrázok 2.2 – Polomer vplyvu

Po definovaní plochy účinnosti sa nakreslí séria kruhov s polomerom rovným polomeru vplyvu tak, aby sa kruhy prekrývali a nevznikli úseky, ktoré by neboli dostatočne ošetrené.



VAPOR EXTRACTION WELL LOCATIONS – umiestnenie vrtov na extrakciu pôdneho vzduchu, ZONE OF CONTAMINATION – znečistené územie, R – RADIUS OF INFLUENCE – polomer vplyvu, Contamination area – znečistená plocha, increment factor for overlapping areas of influence – prírastkový faktor pre prekryv plôch vplyvu (účinnosti)

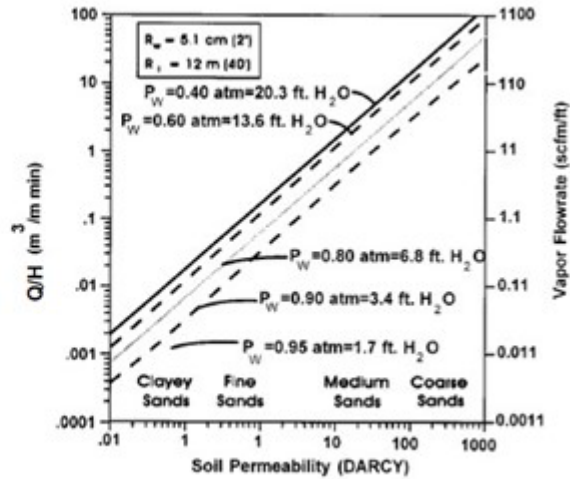
Obrázok 2.3 – Číslo vrtu

Akonáhle je definovaná hĺbka perforácie sacích vrtov (vo všeobecnosti sa rovná hĺbkovému rozsahu znečistenia) a je známa plocha účinnosti odsávania pôdneho vzduchu, je možné stanoviť rýchlosti odsávania.

EXTRACTION RATES

$$\frac{Q}{H} = \pi \frac{k}{\mu} P_w \left[\frac{1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_w}\right)^2}{\ln\left(\frac{R_w}{R_i}\right)} \right]$$

H = fenestration length (m)
k = intrinsic permeability (cm²)
P_w = well pressure (g / cm / s²)
P_{atm} = pressure atm (g / cm / s²)
R_w = well radius SVE (cm)
R_i = radius of influence (cm)
Q = well air flow (cm³ / s)



EXTRACTION RATES – rýchlosť extrakcie, *H* = fenestration length – dĺžka perforácie, *k* = intrinsic permeability – priepustnosť, *P_w* = well pressure – (pod)tlak vo vrte, *P_{atm}* = pressure atm – tlak atmosferický, *R_w* = well radius – polomer vrtu, *R_i* = radius of infuence – polomer vplyvu, *Q* = well air flow – prúdenie vzduchu vo vrte, Soil Permeability - priepustnosť pôdy/horniny, Vapor Flowrate – Rýchlosť prúdenia pár, Clayey – Fine – Medium – Coarse Sands – ílovitý – jemnozrnný – strednozrnný – hrubozrnný piesok

Obrázok 2.4 – Rýchlosti extrakcie

V pilotných štúdiách a aplikáciách sú typické návrhové hodnoty pre rýchlosť extrakcie 20 –200 m³/h a pre podtlak na ústí vrtu 0,5 - 1 atm.

Odsávaný pôdny vzduch sa podrobuje rôznym úpravám (čisteniu) v závislosti od koncentrácií znečisťujúcich látok. Vzhľadom na to, že horľavosť (a výbušnosť) predstavuje významný rizikový faktor znečisťujúcich látok, tak najdôležitejším parametrom je spodný limit výbušnosti (*low explosivit limit* - LEL). Aktívne uhlie a katalytická oxidácia sú aplikovateľné, ak koncentrácia horľavých plynov (*C (vap)*) < 25 % LEL; tepelná oxidácia sa odporúča, ak *C (vap)* < 25 - 50 % LEL; biofiltre sú aplikovateľné, ak *C (vap)* < 10 % LEL).

3 ŠTÚDIA USKUTOČNITEĽNOSTI

Primárnymi kritériami pre výber tejto sanačnej technológie sú priepustnosť vzduchu porézneho prostredia a prchavosť znečisťujúcich látok. Technológia SVE by sa potom mala ďalej posúdiť s ohľadom na rôzne faktory špecifické pre dané územie.

3.1 Charakteristika geologickej stavby a koncepčný model územia

Mnohé fyzikálne a chemické charakteristiky lokality majú významný dopad na účinnosť SVE ako sanačnej techniky. Tieto parametre sú diskutované v častiach nižšie spolu s údajmi o charakteristike územia, vo vzťahu k uskutočniteľnosti a návrhu SVE, ktoré je potrebné posúdiť.

Tabuľka 1 sumarizuje tieto údaje týkajúce sa charakteristiky lokality. Dôležitosť čo najskoršieho zberu príslušných údajov nemožno podceňovať. Hoci poznanie lokality nebude nikdy úplné (pretože použité nástroje, finančné zdroje a metódy odberu vzoriek majú svoje limity), je potrebné zhromaždiť a zdokumentovať dostatok údajov, aby sme dospeli ku konzistentnému obrazu lokality. Tento obraz alebo koncepčný model územia je nevyhnutne komplexný v tom, že zahŕňa rôzne typy údajov. Je tiež dynamický v tom, že sa vyvíja, keď sú k dispozícii novšie údaje. Je dôležité neustále optimalizovať koncepčný model územia, keďže nové terénne práce poskytujú stále nové informácie.

Koncepčný model územia by mal vychádzať z (hydro)geologickej charakteristiky územia a definovať primárny zdroj (zdroje) znečistenia, znečisťujúcu látku, spôsob šírenia sa znečistenia a najmä vertikálny a horizontálny rozsah distribúcie znečisťujúcej látky v nesaturovanej zóne (pásme prevzdušnenia). Existuje niekoľko kľúčových aspektov charakterizujúcich nesaturovanú zónu z hľadiska jej vhodnosti pre extrakciu pôdneho vzduchu:

- typ/stav pokryvu/povrchu (napr. asfalt, vegetácia) ;
- prítomnosť a rozsah podzemných štruktúr alebo inžinierskych sietí
- topografia;
- rozsah a hĺbka vhodných polôh pôdy a horninového prostredia;
- hĺbka hladiny podzemnej vody a jej sezónne kolísanie;
- obsah pôdnej vlhkosti a jej variabilita;
- hrúbka kapilárneho okraja;
- priepustnosť pôdy/hornín a jej zmeny v rámci lokality;
- obsah organického uhlíka a jeho variabilita.

Ktorákoľvek z týchto kľúčových charakteristík územia (alebo ich kombinácia) môže mať zásadný vplyv na účinnosť SVE a/alebo predstavovať vážne obmedzenie pre účinnosť SVE. Údaje o geologických charakteristikách územia v tomto rozsahu, ktorý je potenciálne dôležitý pre aplikáciu technológií SVE, sa bežne nezhrmažďujú, pretože tí, ktorí vykonávajú vrtné práce, si toho nie sú vedomí, alebo o potrebe ich získavania neboli informovaní.

Poznanie charakteristík pripovrchových horizontov je rozhodujúce. Mali by sa zaznamenať fenomény, ako sú piesčité alebo štrkovité šošovky v jemnozrnných vrstvách alebo makropóry (kaverny), ktoré môžu slúžiť ako preferenčné dráhy prúdenia vzduchu. Farba pôdy a škvrnitosť môžu poskytnúť indikáciu zóny kolísania hladiny podzemnej vody. V mestských alebo priemyselných lokalitách by sa mal podľa možnosti identifikovať kontakt medzi antropogénnymi navážkami a podložíom. Charakteristiku pôdnych a horninových vrstiev by mali vykonávať odborne spôsobilé osoby (Breckenridge, Williams, and Keck 1991; USEPA 1991h).

Parameter	Spôsob získania	Analytická metóda
Priepustnosť vzdušnej fázy (terénna skúška)	Vzduchová čerpacia skúška	Pozri Cho and DiGiulio (1992)
Priepustnosť vzdušnej fázy (skúška na vrtnom jadre)	In-situ alebo reprezentatívna neporušená vzorka s priemerom 50- až 75 mm	Pozri prílohu D; Corey (1986a)
Stratigrafia/heterogenita	Vrty alebo sondy	Vizuálne pozorovanie, Breckenridge, Williams, and Keck (1991); USEPA 1991h)
Zrinitosť	Dutinový pôdny vrták alebo iný podobný vzorkovač	ASTM D422-63 (1998)
Pórovitosť	Neporušená vzorka s priemerom 50- až 75 mm	Výpočtom z mernej hmotnosti a objemovej hmotnosti
Objemová hmotnosť	Neporušená vzorka s priemerom 50- až 75 mm	ASTM D2850
Obsah organického uhlíka	Dutinový pôdny vrták alebo iný podobný vzorkovač	SW-845 9060; Churcher and Dickhout (1989)
Saturácia (pôdna vlhkosť)	Neutrónová sonda Tenziometre Dutinový pôdny vrták alebo iný podobný vzorkovač	<i>Neutron gauge</i> (Gardner 1986); ASTM D3017, ASTM D5220
Retencia pôdnej vlhkosti (saturačná krivka kapilárneho tlaku)	Neporušená vzorka s priemerom 50- až 75 mm	Klute (1986); ASTM D2325-93
Pôdna vlhkosť suchej pôdy	Neporušená vzorka s priemerom 50- až 75 mm	Psychrometrická metóda (Jobes, Gee, and Heller 1980)
Teplota pôdy	Teplomer, termočlánok	Terénny merač
Hĺbka hladiny podzemnej vody a jej zmeny	Hydrogeologický monitorovací vrt, hladinomer, alebo dataloger	ASTM D4750
Obsah prchavých hydrouhlíčanov v pôdnom vzduchu	In situ	Downey and Hall (1994); ASTM D3416-78
Obsah O ₂ v pôdnom vzduchu	In situ	Prenosný merač, elektrochemická metóda
Obsah CO ₂ v pôdnom vzduchu	In situ	Prenosný merač, infračervená adsorpčná metóda
Rýchlosť mikrobiálnej respirácie	In situ	Hinchee et al. 1992

Tabuľka 1 – Spôsob získania údajov a analytické metódy

3.1.1 Rozsah a intenzita znečistenia

Počas prieskumu územia sa musí stanoviť rozsah a intenzita znečistenia, aby sa vyhodnotila uskutočniteľnosť SVE. Znečisťujúce látky, pre ktoré je technika SVE najvhodnejšia, sú prchavé uhľovodíky (*VOC – volatile organic compounds*), ktoré zahŕňajú benzín, petrolej, mnohé zložky motorovej nafty, freóny a rozpúšťadlá ako PCE, trichlóretén a metylénchlorid.

Obrázok nižšie predstavuje rôzne skupiny znečisťujúcich látok a hodnotí vhodnosť SVE na ich sanáciu.

Contaminant Groups		Example of Contaminants	Effectiveness
Organics	Halogenated VOCs	Tetrachloroethene, Trichloroethene	a
	Halogenated SVOCs*	Para-dichlorobenzene	b
	Nonhalogenated VOCs	Gasoline	a
	Nonhalogenated SVOCs*	Diesel fuel	a
	PCBs	Aroclor - 1242	c
	Pesticides	Chlordane	c
	Dioxins/furans	2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin	c
	Organic cyanides		c
	Organic corrosives		c
	Explosives	2,4,6 Trinitrotoluene	c
Inorganics	Volatile metals	Mercury, tetraethyl lead	c
	Nonvolatile metals	Nickel, chromium	c
	Asbestos		c
	Radioactive materials		c
	Inorganic corrosives		c
	Inorganic cyanides	Sodium cyanide	c
Reactive	Oxidizers		c
	Reducers		b

Contaminant Groups – skupiny znečisťujúcich látok, *Example of Contaminants* – príklad znečisťujúcej látky, *Effectiveness* – účinnosť, *Organics* – organické látky (hydrouhľičitany), *Inorganics* – anorganické látky, *Reactives* – reagenty

Obrázok 3.1 – Účinnosť SVE na skupiny znečisťujúcich látok

3.1.2 Geometrická charakteristika zdroja

- Rozsah znečistenia sa musí určiť v troch rozmeroch počas geologického prieskumu územia, aby sa posúdila a navrhla vhodná technika/technológia. Pokiaľ ide o SVE, musí sa charakterizovať nenasýtená zóna aj nasýtená zóna (pásmo prevzdušnenia aj pásmo nasýtenia).
- Hĺbka znečistenia ovplyvňuje realizovateľnosť a návrh techniky SVE. Ak sa znečistenie obmedzuje na povrch zeme, uprednostnia sa iné technológie ako SVE. Ak sa znečistenie nachádza v hĺbke nasýtenej zóny, samotné SVE nebude dostatočne účinné. Na miestach, kde je možné použiť SVE, hĺbka znečistenia ovplyvní zvolený typ vrtov (horizontálne verus vertikálne), interval perforácie vrtov (umiestnenie filtračnej časti) a ďalšie konštrukčné faktory.
- Objem (celkové množstvo) znečistenej pôdy tiež ovplyvňuje realizovateľnosť SVE. Ak je objem malý, iné alternatívne postupy, ako je výkop a zneškodnenie ex-situ, môžu byť ekonomicky výhodnejšie. Objem znečistenej pôdy tiež ovplyvňuje mnohé technické aspekty návrhu systému, ako je počet vrtov, výkonnosť dúchadiel a kapacita systému čistenia emisií.
- Pri návrhu a realizácii techniky SVE sa musia brať do úvahy potenciálne externé zdroje plyných znečisťujúcich látok. Ak by počas SVE mohlo do sanovanej zóny migrovať významné plyné znečistenie z vonkajších zdrojov, návrh systému bude musieť zahŕňať opatrenia na zamedzenie tohto vplyvu.

3.1.3 Prítomnosť voľnej fázy ropných látok

Prieskum územia by mal určiť, či sú prítomné (ropné) látky vo voľnej fáze (*non-aqueous phase liquid* - *NAPL*). Voľný produkt vo vzorkách podzemnej vody je jedným z indikátorov prítomnosti voľnej fázy (ropných) látok (VFRL / *NAPL*). VFRL „súťaží“ so vzdušnou a pôdnou vlhkosťou o priestor v póroch pásma prevzdušnenia, čím znižuje priepustnosť pôdy/horniny. Okrem toho VFRL predstavuje trvalý zdroj znečisťujúcej látky. Sú známe zvyškové nasýtenia nenasýtených zón v rozsahu 15 až 50 % celkového objemu pórov (USEPA 1989c).

Ak existuje podozrenie na prítomnosť voľnej fázy ropných látok ťažších ako voda (*dense non-aqueous phase liquid* - *DNAPL*), môže sa stať, že implementácia SVE by mohla skôr zvýšiť ako znížiť riziko migrácie *DNAPL* do hlbších hydrologických úrovní. Môže sa to stať napríklad vtedy, keď *DNAPL* sú zachytené v puklinách a prasklinách nad hladinou podzemnej vody. Vyvolanie prúdenia vzduchu smerom k extrakčnému vrtu v takomto prostredí môže spôsobiť migráciu *DNAPL* hlbšie do zlomového systému a možno do nasýtenej zóny. V takejto situácii techniku SVE nemožno použiť (USEPA 1993g).

3.1.4 Výsledok prieskumu pôdneho vzduchu (atmogeochemického prieskumu)

Znečisťujúce látky, pre ktoré je SVE účinná, sú zo svojej podstaty prístupné meraniu počas atmogeochemického prieskumu. Terénne atmogeochemické meranie je často užitočným spôsobom, ako charakterizovať rozsah a intenzitu znečistenia územia. Na prieskum lokality často postačujú terénne atmogeochemické merania koncentrácií znečisťujúcich látok, potvrdené obmedzeným počtom laboratórnych analýz. Stanovenie dobrej kvantitatívnej korelácie medzi obsahom znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu a v pôde je však zriedkavé. To platí najmä vtedy, keď sú prítomné vyššie koncentrácie znečisťujúcich látok v dôsledku zvyškovej VFRL. Pri porovnávaní koncentrácií znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu a v pôde/hornine je užitočné mať na pamäti, že výsledky vzoriek pôdy/horniny predstavujú znečistenie vo všetkých materiálových fázach, zatiaľ čo pôdny vzduch obsahuje iba tie, ktoré sú v plynnej fáze. Prieskum pôdneho vzduchu môže tiež poskytnúť informáciu o koncentrácií znečisťujúcich látok, ktorú možno spočiatku očakávať v odsávanom vzduchu na výstupe SVE.

3.1.5 Priepustnosť pôdy a horninového prostredia pre vzduch

Priepustnosť pôdy a horninového prostredia pre vzduch (plynopriepustnosť), t. j. schopnosť pôdy a hornín umožniť priechod vzduchu, je jedným z najdôležitejších parametrov ovplyvňujúcich realizovateľnosť a návrh techniky SVE. Je funkciou vlastností pevnej matrice a vlhkosti pôdy. Plynopriepustnosť má zásadný vplyv na rýchlosť prúdenia vzduchu a rýchlosť odstraňovania znečisťujúcich látok. Hrubozrnné pôdy / horniny typicky vykazujú veľké hodnoty plynopriepustnosti a rovnomernejšie vzory prúdenia vzduchu. Pôdy / horniny s plynopriepustnosťou menšou ako 10^{-10} cm² nemusia byť pre SVE vhodné (USEPA 1993d).

3.1.6 Heterogenity a preferenčné cesty

Heterogenity zohrávajú významnú úlohu v distribúcii znečisťujúcich látok v nenasýtenej zóne a sú spôsobené priestorovými variáciami v druhu hornín, hrúbke polôh, ich pórovitosti a obsahu vlhkosti. Počas prevádzky systému SVE môžu tieto variácie ovplyvniť smery prúdenia vzduchu a v konečnom dôsledku účinnosť odsávania znečisťujúcich látok v nenasýtenej zóne. Napríklad, ak nenasýtená zóna pozostáva zo striedajúcich sa vrstiev hrubozrnných a jemnozrnných hornín, prúdenie vzduchu môže byť obmedzené len na hrubozrnné polohy. Znečisťujúce látky sa často odstraňujú z jemnozrnných vrstiev oveľa pomalšie. Informácie o heterogenitách je možné zistiť z prieskumných sond, penetračných skúšok a dokumentácie vrtného jadra z jadrových vrtov.

V niektorých prípadoch môžu podzemné inžinierske siete, ako sú drény na zrážkovú vodu a kanály na odpadovú vodu, spolu s ich výplňou a obsypmi, spôsobiť skrat prúdenia vzduchu v systéme SVE. Výsledkom je, že prúdenie vzduchu sa bude prednostne uskutočňovať cez preferenčné cesty pozdĺž drénov a kanálov a nie v želanom priestore. Okrem toho tieto prvky môžu tiež poskytovať migračné cesty pre znečisťujúce kvapaliny vo voľnej fáze, ako aj pre prchavé zložky v nenasýtenej zóne. V dôsledku toho môže orientácia a geometria týchto prvkov určovať smer, ktorým kvapaliny, alebo pary migrujú. Často neexistujú presné nákresy podzemných inžinierskych sietí, takže súčasťou prípravy sanácie by mali byť aj konzultácie s osobami oboznámenými s územím. Tiež je potrebné vziať do úvahy aj suterény okolitých budov a ďalšie prvky, ktoré môžu ovplyvniť tok pôdneho vzduchu.

3.1.7 Topografia

Topografia a charakter povrchu terénu ovplyvňujú SVE. Nepriepustný (spevnený) povrch bude mať tendenciu zvyšovať horizontálne prúdenie vzduchu a zvyšovať dosah účinnosti. Priepustný povrch spôsobí opak a zvýši množstvo atmosférického vzduchu vstupujúceho do pôdy a horninového prostredia. Spevnené povrchy, ako sú budovy, cesty a inžinierske siete, môžu byť pre výber SVE ako sanačnej metódy výhodou v porovnaní s inými možnosťami. Ak je povrch zeme spevnený, mala by sa preskúmať aj celistvosť spevnenia. Mali by sa identifikovať trhliny, a ak je to možné, tieto utesniť.

3.2 Využitie pilotných skúšok pri návrhu sanácie technikou SVE

Kolónové testy na určenie technických parametrov návrhu sanácie. Ball a Wolf (1990) odporúčajú vykonať laboratórne testy v skúšobných kolónach na určenie technických parametrov sanácie SVE, pokiaľ ide o jednotlivé znečisťujúce látky v homogénnom prostredí a v malom rozsahu. Ich podstatou je naplniť kolónu pôdou/horninou z miesta výkonu sanácie, použiť reprezentatívny prúd vzduchu a zmerať koncentrácie znečisťujúcich látok na výstupe, vzhľadom na objem pórov a množstvo čerpaného vzduchu. Z toho sa potom vypočíta rovnica rýchlosti rozkladu znečisťujúcej látky a kalibračné parametre pre realizačný návrh sanácie SVE. Na základe týchto informácií je potom možné odhadnúť celkový čas a náklady na sanáciu.

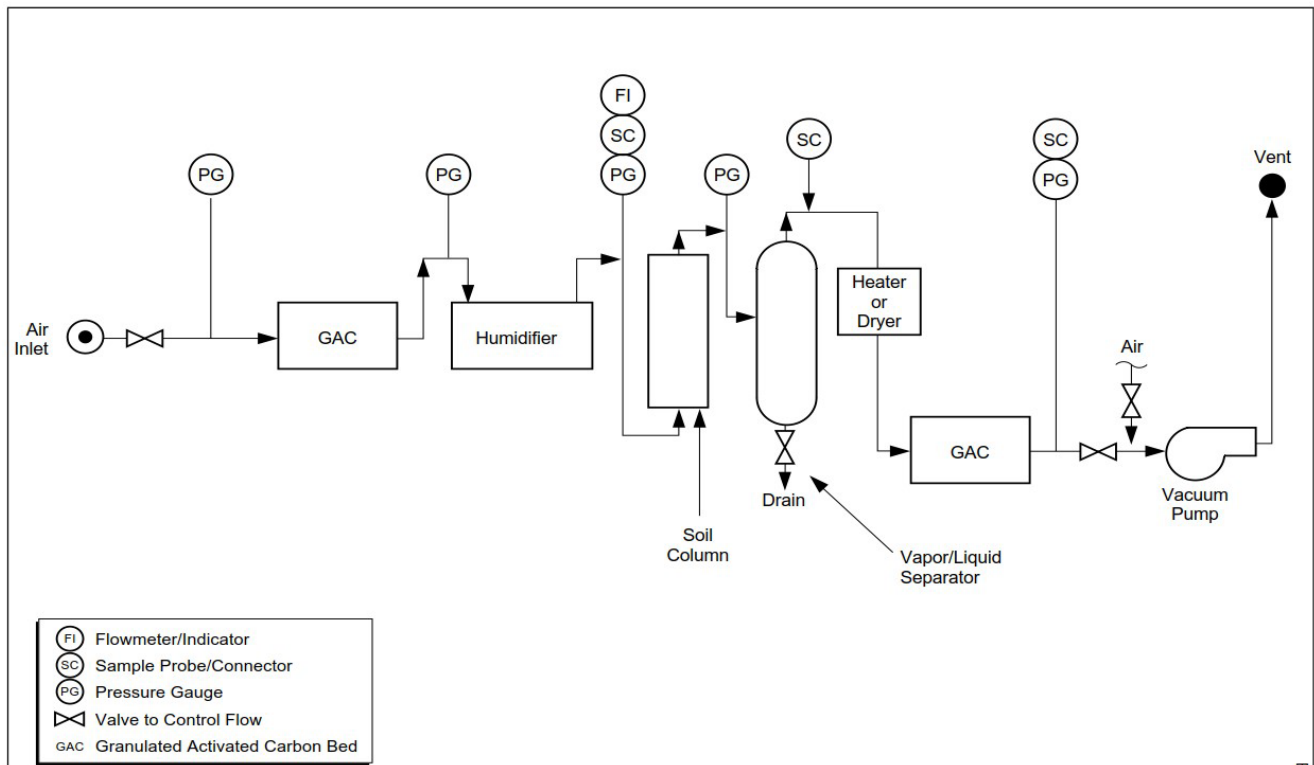
Kolónové testy na určenie účinnosti SVE. USEPA (1991c) odporúča vykonať kolónové testy pred samotnou sanáciou v prípade, že existuje obava, či bude SVE na mieste účinná. Tento krok možno preskočiť, keď je parciálny tlak cieľových znečisťujúcich látok 10 mm Hg alebo vyšší. Kolónové testy tiež nie sú uskutočniteľné pre miesta s rozpukaným skalným podložím alebo heterogénnou výplňou pozostávajúcou z veľkých úlomkov.

Náklady na tieto pilotné skúšky sú relatívne nízke a zahŕňajú prečerpávanie kolóny naplnenej pôdou množstvom vzduchu rovnajúcim sa 2 000-násobku objemu pórov pôdy/horniny v kolóne (*2,000-pore volumes of air*) (počas približne 6 dní prevádzky). Je potrebné poznamenať, že toto množstvo závisí od podmienok prostredia, ako je priepustnosť a obsah vlhkosti. Napríklad v suchej piesočnatej pôde by sa znečistenie mohlo odstrániť prečerpávaním vzduchom s objemom 2 000-násobku objemu pórov už za jeden rok, zatiaľ čo vlhká, hlinitá hlina by si mohla vyžadovať viac ako 6 rokov. Vo väčšine prípadov by sa však miestne špecifické scenáre sanácie SVE pohybovali niekde v rozmedzí 3 až 6 rokov. Dôvodom na vykonanie kolónových testov je štúdium kinetiky odstránenia znečistenia difúziou z pôdy. Zistilo sa, že uvoľňovanie znečisťujúcich látok difúziou sa takmer vždy obmedzuje na prečerpanie objemom vzduchu rovnajúcemu sa 1 000-násobku objemu pórov, čo naznačuje, že rovnováha sa dosiahne relatívne rýchlo. Trvanie pilotnej skúšky s čerpacím objemom 2 000-násobku objemu pórov preto umožňuje kvantifikovať kinetiku difúzie.

Koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu sa monitorujú počas pilotnej skúšky a zníženie o 80 % alebo viac naznačuje, že SVE je technika pre dané miesto použiteľná a malo by sa pokračovať v skúškach ďalšími

kolónovými skúškami. Ak sa dosiahne zníženie väčšie ako 95 %, môže sa analyzovať zvyšková pôda z kolóny, aby sa kvantifikovalo zvyškové znečistenie pôdy. Ak sú koncentrácie znečisťujúcich látok pod cieľovými hodnotami sanácie, kolónové testy na zistenie vhodnosti sanačnej techniky možno ukončiť a následne vykonať testy priepustnosti.

Kolónové testy sa nevyžadujú pre väčšinu aplikácií SVE, ale môžu byť užitočné za určitých okolností, napr. pri ventingu a/alebo biodegradácii odolných (ťažko odbúrateľných) znečisťujúcich látok. Kolónové testy zvyčajne používajú 2 až 8 kg znečistenej pôdy (napr. valce s rozmermi kolóny v rozmedzí od 5 do 10 cm v priemere a 30 až 60 cm na dĺžku) a vykonávajú sa, kým sa výsledky meraní nestanú asymptotické (t. j. takmer nemenné), pričom trvanie a náklady závisia od vlastností pôdy a znečisťujúcich látok. Laboratórne stanovenia vykonávané pred testami v kolóne môžu zahŕňať objemovú hustotu, obsah vlhkosti a koncentrácie znečisťujúcich látok v pôde, vo výluhu a v pôdnom vzduchu. Je možné testovať rôzne rýchlosti prietoku vzduchu, aby sa skontrolovala citlivosť rýchlosti odstraňovania znečisťujúcich látok na prietok vzduchu. Merania vykonané počas testovania zahŕňajú tlak vzduchu na vstupe a na výstupe, koncentrácie znečisťujúcich látok na výstupe, rýchlosti prúdenia vzduchu a teplotu. Po teste sa merajú zvyškové koncentrácie znečisťujúcich látok v pôde a vo výluhu na porovnanie s cieľovými hodnotami sanácie. Náčrt kolónového testovacieho zariadenia je znázornený na obrázku 3.3.



Flowmeter/Indicator – prietokomer/indikátor, *Sample Probe/Connector* – pôdna/horninová vzorka/spojka, *Pressure Gauge* – tlakomer, *Valve to Control Flow* – ventil na kontrolu prúdenia, *Granulated Activated Carbon Bed* – vrstva granulovaného aktívneho uhlia

Obrázok 3.3 – Schéma kolónového testovacieho zariadenia

Tabuľka 2 predstavuje výhody a nevýhody kolónových testov. Hoci sa na kolónové testy vo všeobecnosti nemožno spoliehať ako na jediný zdroj údajov o priepustnosti, môžu poskytnúť užitočné informácie na doplnenie terénnych (pilotných) skúšok priepustnosti in situ.

Napríklad, zatiaľ čo in situ skúšky priepustnosti vzduchu možno zvyčajne vykonávať len na obmedzenom počte miest, neporušené vzorky z vrtných jadier možno často zbierať z mnohých miest a hĺbok, vrátane miest testovaných v rámci in situ testov, takže je možné vyhodnotiť koreláciu medzi laboratórnymi a in situ údajmi. Ak sú výsledky dobre korelovateľné, laboratórne údaje sa môžu použiť na zovšeobecnenie výsledkov in situ v oblasti odberu vzoriek.

Výhody	Obmedzenia
<ul style="list-style-type: none"> Môže urýchliť povoľovací proces vyhodnotením maximálnej miery odstránenia znečistenia 	<ul style="list-style-type: none"> Vzduch prúdiaci kolónou má vždy zaistený dobrý prístup k znečisteniu. Prírodné podmienky sú oveľa variabilnejšie.
<ul style="list-style-type: none"> Poskytuje rádové údaje o rozdeľovacích koeficientoch pre matematické modelovanie 	<ul style="list-style-type: none"> Difúzne procesy sú často modelované nesprávne.
<ul style="list-style-type: none"> Rádové údaje o priepustnosti sa môžu získať z „neporušených“ vzoriek 	<ul style="list-style-type: none"> Kvôli rozdielom v mierke a smere prúdenia vo vzťahu k orientácii vrtného jadra dávajú terénne skúšky reprezentatívnejšie výsledky
<ul style="list-style-type: none"> Umožňujú analyzovať vzorky z tesnej blízkosti 	<ul style="list-style-type: none"> Musia byť formulované a overené štandardné postupy

Tabuľka 2 – Výhody a obmedzenia kolónového testu

Kolónové testy sa najlepšie vykonávajú s neporušenými vzorkami jadra. Neporušené vzorky jadra možno získať pomocou vzorkovacích súprav alebo zariadení na kontinuálne odoberanie jadier (jadroviek). Vzorky jadra by sa mali odoberať do odberných valcov a mali by sa označiť názvom, hĺbkou odberu a orientáciou (hore/dolu). Vzorky by mali byť po odbere zaparafinované a uložené v chladničke, aby sa zabránilo vyparovaniu a degradácii znečisťujúcich látok. Štandardne sa získavajú neporušené vzorky z jadier vo vertikálnej alebo takmer vertikálnej orientácii. Typické prúdenie vzduchu počas SVE, aj keď je určite trojrozmerné, však nie je vertikálne a pravdepodobne je zaujímavejšia horizontálna priepustnosť vzduchu. Túto skutočnosť je potrebné dôkladne zvážiť pri rozhodovaní, či sa majú na testovanie v kolónach odoberať vzorky zo zvislých jadier.

V laboratóriu môžu byť vzorky jadra vtlačené do testovacích kolón alebo môžu byť valce so neporušenými vzorkami priamo začlenené do zostavy kolóny. Ak sa získali porušené vzorky, tieto by sa mali znova zhrnúť do pôvodnej hustoty, blízkej podmienkam v teréne. Ak je test navrhnutý tak, aby simuloval vertikálny tok cez viacvrstvový profil, rôzne polohy pôdy a hornín môžu byť vrstvené do skúšobnej kolóny. Mal by sa zvážiť odber neporušených, horizontálne orientovaných jadier, ak je test určený na simuláciu horizontálneho prúdenia vzduchu.

Testovacie zariadenie zvyčajne zahŕňa systém odsávania alebo prívodu vzduchu, zariadenia na meranie prietoku a zariadenia na meranie tlaku vzduchu. Môžu byť zahrnuté aj zariadenia na meranie vlhkosti pôdy (napr. tenziometer). Všetky spojenia medzi systémom prívodu vzduchu, stenami kolóny a vzorkou pôdy by mali byť vzduchotesné. Niektoré kolóny obsahujú nafukovací vak (obturátor) v medzikruží medzi vzorkou jadra a stenou kolóny, aby sa zabránilo úniku pozdĺž okraja vzorky pôdy. Koncentrácie znečisťujúcich látok možno merať v tuhej alebo plynnej fáze. Keďže merania pôdy/hornín vyžadujú deštruktívne vzorkovanie, laboratórne analýzy sú obmedzené na počiatočnú a konečnú koncentráciu. Odber vzoriek pár umožňuje meranie koncentrácií vo výluhoch v časovom rade, ale zvyčajne si vyžaduje sofistikované meracie zariadenie na mieste (napr. plynový chromatograf). Merania koncentrácií plynnej fázy by mali byť verifikované meraním koncentrácií znečisťujúcich látok v pôde/hornine na začiatku a na konci testu. Výsledky testov sú zvyčajne vyjadrené ako koncentrácia znečisťujúcich látok v porovnaní s celkovým objemom vymeneného vzduchu.

Aby sa kolónové testy dali aplikovať na terénne skúšky, výmena vzduchu sa zvyčajne vyjadruje v násobkoch celkového objemu pórov.

Výpočet objemu pórov vyžaduje stanovenie pórovitosti na vzorkách, ako aj prietoku vzduchu a uplynutého času. Výsledky možno použiť na vyhodnotenie rýchlosti odstraňovania znečisťujúcich látok a odhadovaných

zvýškových koncentrácií. Je možné určiť aj rozdeľovacie koeficienty za predpokladu, že rovnovážne koncentrácie sa merajú súbežne v každej fáze spolu s frakciou organického uhlíka (foc).

3.3 Posúdenie uskutočniteľnosti SVE

- Znečisťujúce látky s nízkymi Henryho konštantami sa pomocou SVE sanujú obtiažne. Za určitých podmienok možno zvážiť pri SVE použitie tepla na zlepšenie prchavosti pomocou horúceho vzduchu, vstrekovania pary alebo iných technológií podpovrchového ohrevu.
- SVE nie je účinná v nasýtenej zóne (pásme nasýtenia) a filtračné úseky extrakčných vrtov musia byť umiestnené tak, aby zohľadňovali sezónne zmeny výšky hladiny podzemnej vody. Na niektorých miestach sa môže zvážiť zníženie hladiny podzemnej vody pomocou čerpania, aby sa väčšia časť nenasýtenej zóny vystavila sanácii SVE.
- Geologická stavba a stupeň laterálnej a vertikálnej heterogenity sa musia brať do úvahy pri navrhovaní systému SVE, aby sa zabezpečilo účinné odstránenie prchavej zložky zo všetkých častí cieľovej zóny. Napríklad je jednoduchšie vyvolať prúdenie cez piesčitú polohu v porovnaní s prachovou (siltovou) alebo ílovou šošovkou. Ílový preplástok by tiež mohol brániť extrakcii pár v časti znečistenej zóny, ak filtračná časť vrtu nie je prispôsobená tak, aby sa táto skutočnosť zohľadňovala.
- Pôda/hornina s vysokým podielom jemných častíc a vysokým stupňom nasýtenia vodou si bude vyžadovať väčší podtlak, vyššie náklady a/alebo nižšiu účinnosť.
- Pôda/hornina s veľmi premenlivou priepustnosťou alebo stratifikáciou môže viesť k nerovnomernému odvádzaniu pôdneho vzduchu zo znečistených zón. Po vypnutí systému SVE (dočasnom alebo trvalom) to môže viesť k opätovnému zvýšeniu koncentrácií znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu zo znečistených polôh s nižšou priepustnosťou, kde boli procesy odsávania prchavých zložiek menej efektívne. Úpravu konštrukcie extrakčných vrtov, ich rozmiestnenia a/alebo prevádzky pri technike SVE (napr. cyklovanie extrakčných vrtov, pulzná prevádzka), ako aj možnú potrebu dodatočného rozrušenia vybraných polôh, je potrebné vziať do úvahy pri riešení sanácie v geologickom prostredí s rôznymi priepustnosťami a rizikom opätovného znečistenia (*rebound effect*).
- Konštrukcia systému SVE by mala umožňovať meranie prietoku vzduchu a koncentrácií znečisťujúcich látok na každom jednotlivom extrakčnom vrte (nielen spoločné meranie na dúchadle). Vylúčenie meraní jednotlivých vrtov neumožní správne vyhodnotenie výkonu extrakčného systému alebo jeho optimalizáciu. V prípade heterogénnej litológie nie je nezvyčajné, že jeden alebo niekoľko extrakčných vrtov umiestnených na priepustnejšom mieste zodpovedá za takmer celý celkový prietok vzduchu. Keďže miera odstraňovania znečisťujúcich látok sa časom znižuje, možnosť pulzovať alebo odstaviť jednotlivé extrakčné vrty s nižšími rýchlosťami odstraňovania znečistenia sa stáva výhodnou.
- Inštalácia meracích bodov podtlaku sa odporúča na reprezentatívnych miestach v celej sanovanej zóne, ako aj vo vzdialenosti od extrakčných vrtov a v rôznych hĺbkových úrovniach pri sanácii vo väčších hĺbkach. Meranie podtlaku pri dostatočnom počte plynomerných sond umožňuje mať prehľad o rýchlostiach prúdenia vzduchu a distribučných vzorcoch v sanovanej oblasti. Respirácia (nasávanie vzduchu) a meranie koncentrácií znečisťujúcich látok môže byť tiež vykonávané pre vyhodnotenie vplyvu dotácie zo vzduchu (z atmosféry) a priebehu sanácie, ako aj pre identifikáciu potenciálnych "mŕtvych zón" neefektívnej sanácie, ktoré si budú vyžadovať optimalizáciu riešenia.
- Infiltrácia zrážkovej vody a/alebo vzlínania podzemnej vody do systému SVE môže predstavovať niekoľko prevádzkových problémov. Prívodné potrubie musí byť naklonené k extrakčným vrtom alebo strategicky umiestneným zberným miestam, aby sa zabránilo zaplaveniu potrubia vodou. Naťahovanie väčších objemov plytkej podzemnej vody saním alebo strhávanie infiltrovaných zrážok do systému

môže zahliť separátor vzduch/voda a spôsobiť silnú koróziu a zadretie vnútorných častí dúchadla (čo bude vyžadovať výmenu). Počas obdobia silných dažďov alebo vysokej hladiny podzemnej vody bude možno potrebné systém SVE vypnúť, alebo znížiť prúd vzduchu, aby sa predišlo týmto problémom.

- Úprava (čistenie) vypúšťaného plynu (emisii) sa často požaduje a výrazne zvyšuje náklady na prevádzku SVE. Napríklad odseparované kvapaliny môžu vyžadovať úpravu/likvidáciu, použité aktívne uhlie bude musieť byť regenerované alebo zlikvidované a tepelná/katalytická oxidácia môže vyžadovať značné prevádzkové náklady na elektrickú energiu/plyn. Projekt dlhotrvajúcej sanácie by mal umožňovať dostatočnú flexibilitu pri výmene alebo prerušení úpravy vzduchu, pretože koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu v priebehu času klesajú (napr. používanie prenajímaných zariadení, časté monitorovanie koncentrácií znečisťujúcich látok a ich porovnávanie s limitmi na vypúšťanie).
- Účinnosť SVE má tendenciu časom klesať, až nakoniec dosiahne asymptotické/nemenné stavy. Asymptotické/nemenné stavy môžu nastať následkom odstraňovania prchavých znečisťujúcich látok hmoty prednostne z polôh s vyššou priepustnosťou, zatiaľ čo odstraňovanie znečistenia z polôh s nižšou priepustnosťou je problematickejšie, podobne aj zo zón s vyššou vlhkosťou, alebo pri vyššej adsorpcii znečisťujúcich látok do pôdnej/horninovej matrice. Ak k tomu na danej lokalite dôjde, odporúča sa prehodnotenie návrhu a prevádzky systému SVE. Analýza vplyvu, ktorý môžu mať koncentrácie perzistentných znečisťujúcich látok v podzemnej vode na koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu, by sa mala vykonať pomocou vhodných modelovacích nástrojov. Pred prijatím správnych rozhodnutí týkajúcich sa ďalšej optimalizácie systému, alebo jeho odstávky, by sa malo vykonávať testovanie spätnej rekontaminácie (*rebound effect*) a meranie koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu a jeho (pod)tlaku, pre vyhodnotenie úrovne zvyškového znečistenia v celej sanovanej zóne.
- Účinnosť SVE možno zvýšiť použitím pulzných prevádzkových plánov. Keď je systém vypnutý, nečistoty môžu difundovať do priestoru pórov a potom sa odstrániť, keď je systém aktívny.
- Teplota pôdneho vzduchu na výstupe pred jeho vyčistením môže limitovať možnosti jeho spracovania. Pred spracovaním (čistením) je potrebné na zníženie teploty dôkladne zvážiť použitie výmenníkov tepla.

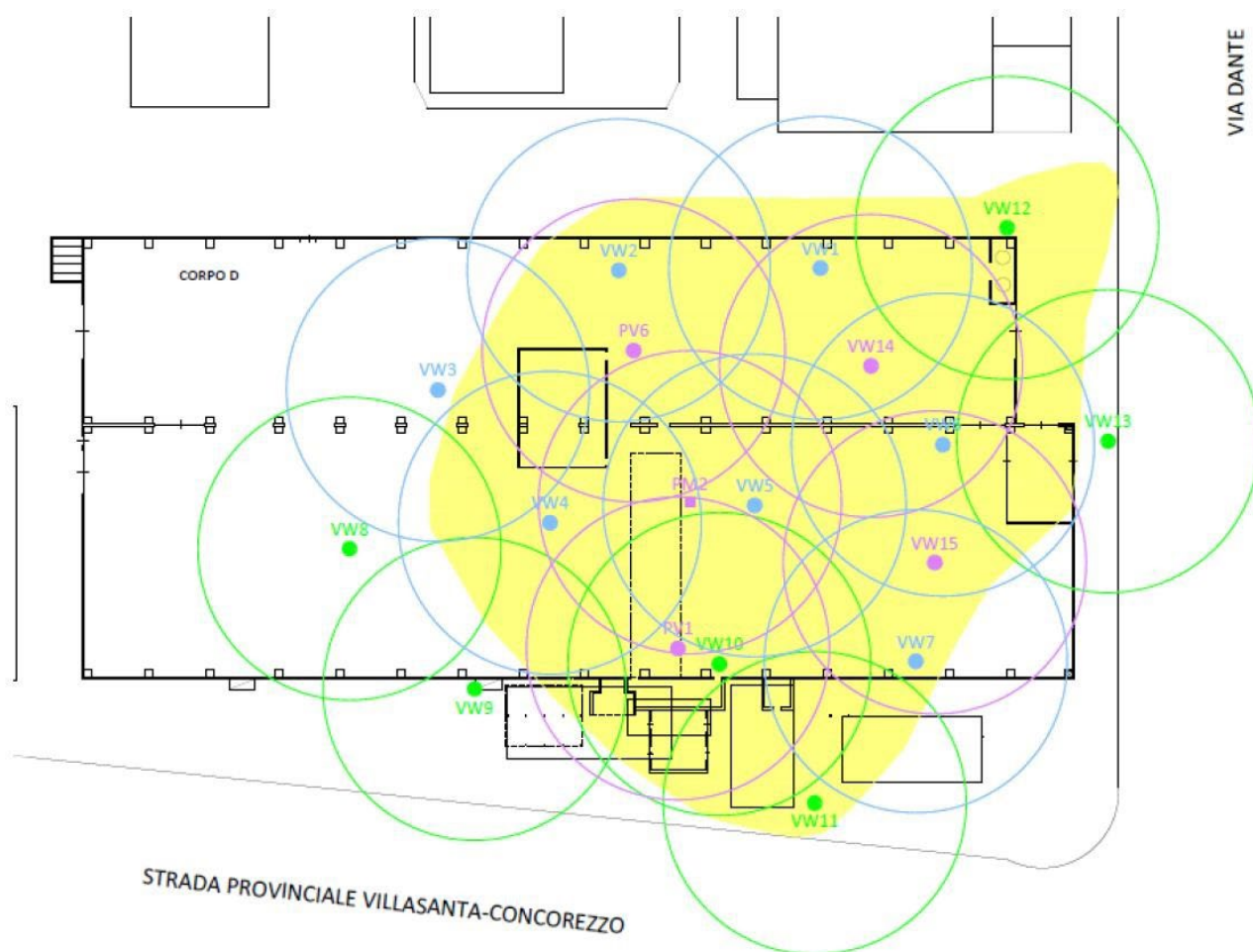
4 TERÉNNE SKÚŠKY

Pre aplikáciu SVE je dôležité primerane charakterizovať geologické prostredie z hľadiska prúdenia vzduchu. Aj keď poznanie skutočnej distribúcie vzduchu v tejto fáze nie je možné, približné vlastnosti z hľadiska distribúcie vzduchu možno predvídať ak ide o územie s jednoduchou geologickou stavbou (napr. vysoko priepustné a homogénne prostredie a prostredie s veľkými heterogenitami na makroúrovni, ako sú ílovité polohy v inak piesočnatých pôdach), a preto sú poznatky získané dokumentáciou vrtných jadier často pre aplikáciu SVE neoceniteľné.

Na konci geologického prieskumu územia a pred fázou overovania a pilotných skúšok by sa údaje z geologického prieskumu územia mali použiť na definovanie cieľovej zóny sanácie a na navrhnutie koncepčného modelu distribúcie a čerpania vzduchu na lokalite.

Pilotné skúšky SVE by mali poskytnúť spoľahlivé údaje pre konečný návrh systému z hľadiska:

- definovania cieľovej zóny sanácie;
- navrhnutia koncepčného modelu distribúcie a čerpania vzduchu v sanovanej zóne;
- udržateľnej rýchlosti prúdenia vzduchu;
- celkovej miery extrakcie vzduchu;
- predpokladu rýchlosti odstraňovania pár (plynnej fázy) znečisťujúcej látky;
- preferovaného smerovania podpovrchového prúdenia vzduchu
- účinného polomeru vplyvu a určenia, či je hustota vrtov cenovo únosná a ak nie je, tak zistiť minimálny rozostup injektážnych vrtov, aby bola cena sanácie únosná;
- navrhnutia hĺbky, umiestnenia a spôsobu zabudovania vrtov;
- požadovaného počtu vrtov na odsávanie pôdneho vzduchu;
- technológie čistenia emisií.



Obrázok 4.1 – Polomer vplyvu po pilotnej skúške (Confalonieri et al., vid' Príloha 1)

Primárne determinanty pre tieto projektované parametre SVE sú (1) druh a rozsah znečistenia v pôde a horninovom prostredí, (2) distribúcia priepustnosti (t. j. heterogenity) v pôde a horninovom prostredí a (3) koncentrácie znečisťujúcich látok v extrahovanom pôdnom vzduchu. Tieto informácie by mali byť k dispozícii pri tvorbe koncepčného modelu územia a návrhu sanácie.

Okrem poskytnutia údajov pre návrh sanácie by mala riadne vykonaná pilotná skúška pomôcť konzultantovi stanoviť, či daný časový rámec sanácie je postačujúci vzhľadom na dosiahnuteľné rýchlosti odstraňovania znečistenia z pôdneho vzduchu.

ČINNOSŤ / SKÚŠKA	ZODPOVEDANÉ OTÁZKY
Injekčný tlak/rýchlosť prúdenia	Je možné dosiahnuť požadovanú rýchlosť prietoku pri primeranom tlaku?
Stopovacia skúška hélia (He)	Aká je približná vzdialenosť laterálnej distribúcie vzduchu? Sú nejaké indicie tvorby preferovaných ciest prúdenia?
Vzorkovanie pôdneho vzduchu na vstupe a výstupe	Aká je miera prchavosti? Aké sú prevádzkové riziká?

4.1 Konvenčná pilotná skúška

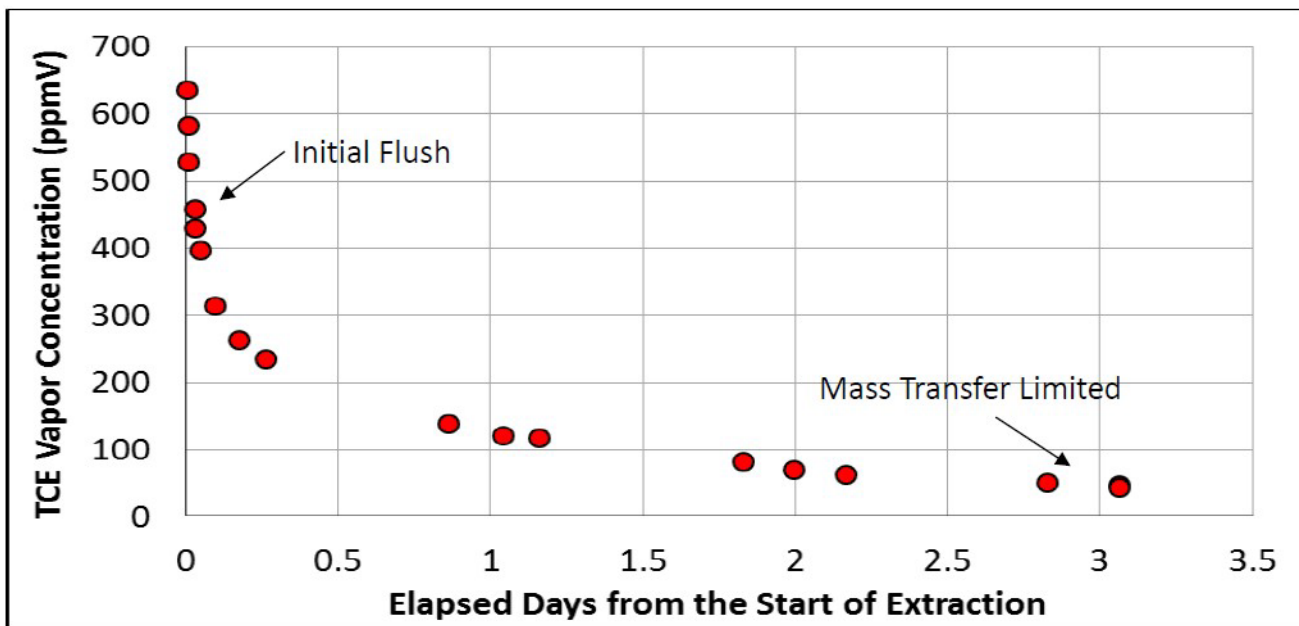
Bežné údaje o charakteristike lokality sú dôležité pre hodnotenie SVE; tieto údaje však nie sú dostatočné pre návrh sanácie v plnom rozsahu. Najmä dynamické účinky rýchlosti extrakcie znečisťujúcich látok je ťažké predpovedať bez vykonania pilotnej skúšky SVE. Priebeh extrakcie sa vo veľkej miere riadi celkovým objemom znečistenej pôdy a horninového prostredia, frakciami pôdy a hornín charakterizovanými ako advektívne verzus difúzne, charakteristikami prenosu hmoty zdrojových zón s obmedzenou difúziou, umiestnením filtrov extrakčných vrtov vzhľadom na zdroje a existenciou voľnej fázy ropných látok (VFRL). Nasledujúca diskusia nezohľadňuje prítomnosť VFRL, hoci ak sa pri skúškach SVE identifikuje zóna s koncentráciou znečisťujúcich látok, ktorá sa po viacerých prerušeníach extrakcie opätovne vracia k takmer identickej pôvodnej koncentrácii, je to indikátorom prítomnosti VFRL.

Čím skôr dôjde k pilotným skúškam v procese projektovania sanácie (najlepšie ako súčasť predsanačného prieskumu), tým je menej pravdepodobné, že po spustení systému bude potrebné návrh priebežne upravovať. Pilotné skúšky sa odporúčajú najmä na väčších a zložitejších lokalitách.

Návrh pilotnej skúšky vyžaduje špecifikáciu požadovanej celkovej rýchlosti odstraňovania znečisťujúcich látok z pôdneho vzduchu alebo trvania extrakcie. V ideálnom prípade pilotná skúška extrahuje (odsaje) ekvivalent násobku alebo viacerých násobkov celkového objemu pórov znečistenej pôdy a hornín. Účelom takejto skúšky je odskúšať systém odsávania dostatočne dlho na zaznamenanie počiatočného poklesu koncentrácie extrahovaných prchavých uhľovodíkov (VOC) a zníženia koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu v pozorovacích (monitorovacích) sondách v rôznych vzdialenostiach. To poskytne prvý odhad potenciálu odstraňovania znečisťujúcich látok a polomeru efektívnej sanácie z jedného vrtu [DiGiulio a Varahan, 2001a]. Platí že, rýchlosť a trvanie pilotnej skúšky závisia na celkovom objeme (V) znečistenej pôdy v koncepčnom modeli lokality, pórovitosti pôdy a vlhkosti pôdy nasledovne.:

$$Q = V_{\text{soil}}(1-S)$$

Koncentrácie pár TCE počas 3 dní extrakcie pri 64 Nm³/h vo vrte umiestnenom blízko stredu zóny predpokladaného zdroja TCE sú znázornené na obrázku nižšie. Extrahovaná koncentrácia rýchlo klesala počas počiatočných hodín extrakcie v súlade s odhadovanou extrakciou pôdneho vzduchu a rýchlosťou jeho výmeny. Nasledovalo spomalenie úbytku koncentrácie TCE následnou extrakciou, ktorá je spojená so znížením difúzneho prenosu hmoty spôsobeného prítomnosťou ílovej polohy v strede vadóznej (nesaturovanej) zóny. Tieto pozorovania naznačujú, že pilotný systém bol dostatočný na to, aby slúžil ako model pre sanáciu v plnom rozsahu na tomto malom území. Ukázalo sa tiež, že použitie aktívneho uhlia na čistenie odsávaného pôdneho vzduchu je ekonomicky únosné.



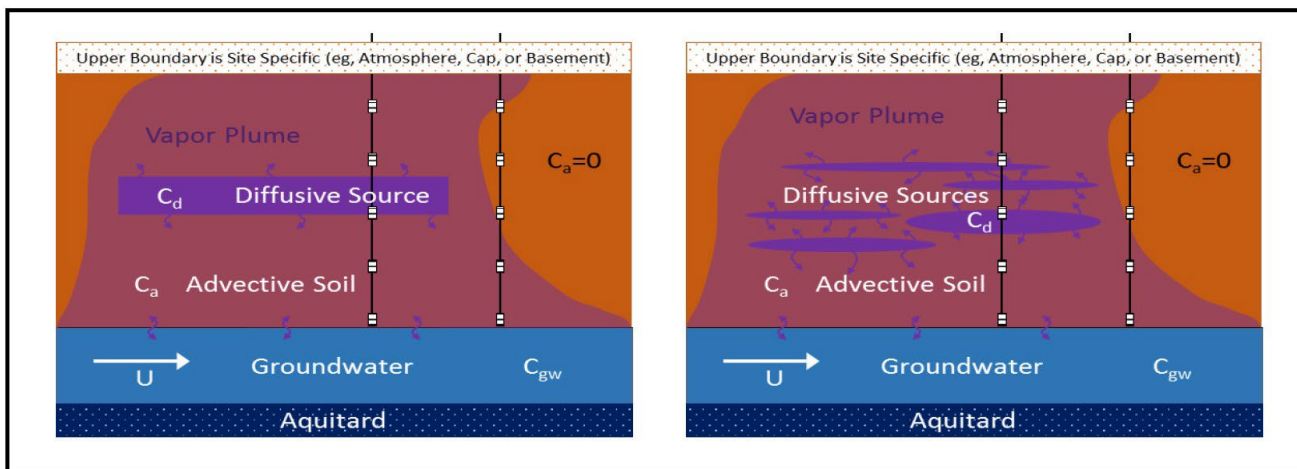
TCE Vapor Concentration – koncentrácia pár TCE/trichlóreténu, Elapsed Days from the Start of Extraction – dni uplynuté od začiatku extrakcie, Initial Flush – počiatočný prítok, Mass Transfer Limited – vrstva granulovaného aktívneho uhlia

Obrázok 4.2 – Príklad údajov o koncentrácii znečisťujúcich prchavých látok z pilotnej skúšky SVE

Pre nižšiu priepustnosť pôdy môže byť potrebný druhý vrt na dosiahnutie požadovaného prietoku alebo môže byť potrebná dlhšia perióda čerpania vzduchu na identifikáciu faktorov obmedzujúcich prenos hmoty. Ako sa uvádza nižšie, ďalšie informácie o faktoroch obmedzujúcich prenos hmoty sa získali meraním spätnej rekontaminácie (*rebound effect*) TCE vo vrte po ukončení extrakcie. Okrem toho, ak koncentrácia pár TCE bola pôvodne vyššia a po počiatočnom poklese sa vrátila na rovnako vysoké hodnoty, to poukazuje na prítomnosť voľnej fázy ropných látok ťažších ako voda (*DNAPL*), adsorpcia odsávaného pôdneho vzduchu na aktívne uhlie nemusí byť nákladovo efektívna pre vyšší hmotnostný prietok.

Monitorovacie body môžu byť inštalované aj vo viacerých hĺbkach, vrátane podložia, ak je to vhodné, a v rámci dosahu polomer vplyvu (napr. 3 – 15 m) pilotného extrakčného vrtu, ak už tam nie sú prítomné z predchádzajúcich prieskumných prác. Každé monitorovacie miesto môže mať viacero meracích bodov umiestnených vertikálnym smerom v rámci vadóznej (nesaturovanej) zóny v závislosti od hĺbky hladiny podzemnej vody a geologickej stavby.

Ako je znázornené na nasledujúcom obrázku, meracie body môžu byť umiestnené nad, pod a aj uprostred sledovaných polôh. Počas pilotnej skúšky sa tieto body používajú na meranie koncentrácie prchavých znečisťujúcich látok a miery podtlaku.



Upper Boundary is ... – povrch je pre každú lokalitu špecifický (napr. atmosféra, prekrytie alebo spevnenie), *Vapor Plume* – mrak prchavých znečisťujúcich látok, *Diffusive Source* – difúzny zdroj, *Advective Soil* – advektívna pôda/hornina, *Groundwater* – podzemná voda, *Aquitard* - izolátor

Obrázok 4.3 – Konceptualizované scenáre pre hmotnostný prietok s obmedzenou difúziou a typické body monitorovania extrakcie pôdneho vzduchu

Použitelnosť údajov o veľkosti podtlaku je závislá na priepustnosti pôd a horninového prostredia, nie je však možné sa na ne spoliehať pri určovaní polomeru vplyvu pre SVE. Dôležitejšia je odozva poklesu koncentrácie prchavých látok. V priepustných pieskoch môže byť veľmi malý podtlak spojený s relatívne vysokým prietokom vzduchu, zatiaľ čo veľký podtlak v íle neposkytuje žiadnu istotu, že s podtlakom súvisí aj nejaké prúdenie. Údaje z monitorovania podtlaku sa však môžu použiť na posúdenie laterálneho verzus vertikálneho rozsahu prúdenia a vplyvu povrchových podmienok (napr. nasávanie vzduchu cez panely alebo povrch pôdy otvorený do atmosféry) pri odsávaní pripovrchových polôh pôdy.

Počas pilotných skúšok sa odporúča vykonávať rozsiahle monitorovanie koncentrácií prchavých uhľovodíkov v pôdnom vzduchu na identifikáciu trendov v monitorovacích bodoch. Tieto trendy možno korelovať s násobkom objemu odčerpaného vzduchu v porovnaní s celkovým objemom pórov, aby sa poskytlo východisko pre návrh rozmiestnenia extrakčných vrtov v realizačnej fáze sanácie na základe požadovanej frekvencie výmeny pôdneho vzduchu (t. j. počtu výmen objemu vzduchu v porovnaní s celkovým objemom pórov v pôde), ako je uvedené v ďalšej časti. Odporúča sa použitie poľného plynového chromatografu so skúseným operátorom na nákladovo efektívne napĺňanie údajovej databázy o koncentráciách prchavých uhľovodíkov v pôdnom vzduchu.

Priame vypúšťanie emisií bez úpravy je často neprijateľné z dôvodu ochrany zdravia, bezpečnosti alebo obáv verejnosti. Ak je situácia taká, že je to potrebné, môžu sa implementovať technológie na čistenie emisií, ako je sorpcia na aktívne uhlie, tepelná oxidácia alebo iné relevantné technológie na zlepšenie kvality emisií pred ich uvoľnením do atmosféry.

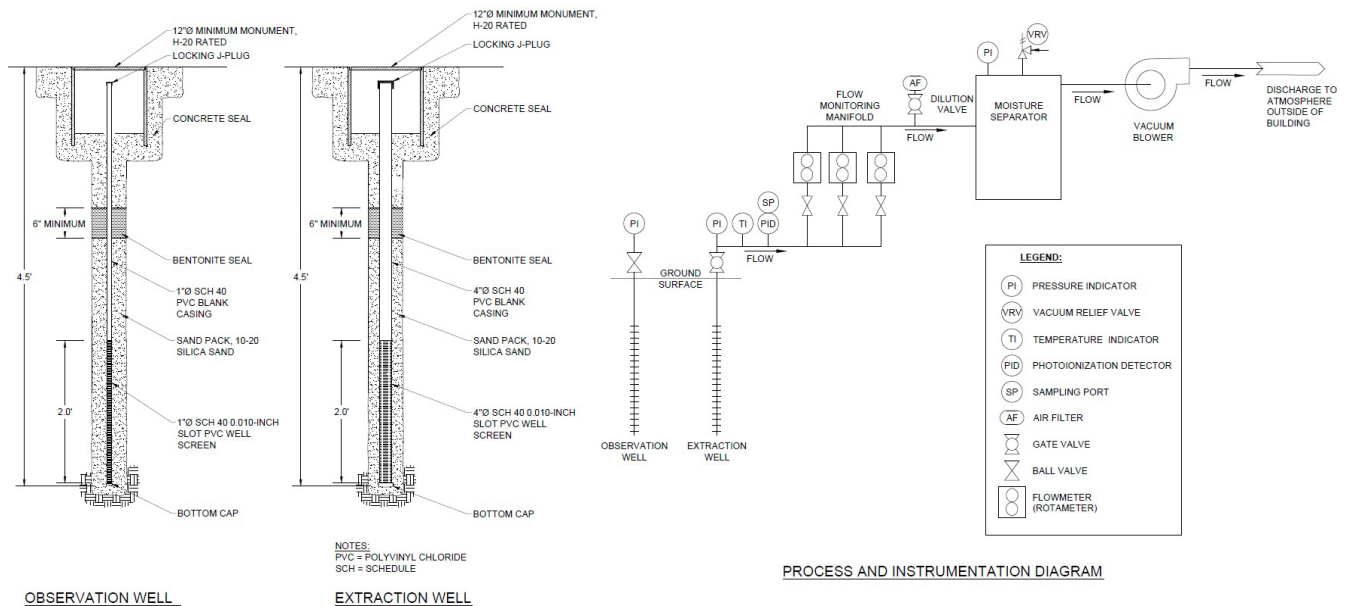
4.1.1 Požiadavky na technické zabezpečenie pilotných skúšok

Technické zabezpečenie pilotnej skúšky SVE môže pozostávať z nasledujúceho vybavenia [Farallon 2019] alebo ekvivalentného:

- Regeneratívne dúchadlo s výkonom minimálne 1 konskej sily (0,7 kW) schopné dosiahnuť tlak 125 mbar a prietok až 180 m³/hod.
- Odlučovač vlhkosti s meraním tlaku, podtlakovým poistným ventilom a vypúšťacím ventilom.

- Rozvádzacie potrubie pozostávajúce zo série ventilov, indikátorov podtlaku a prietokomeru schopného monitorovať rýchlosť prúdenia odsávaného vzduchu v rozsahu od 1 do 180 m³/hod a podtlak v rozsahu od 0,25 do 200 mbar.
- Pogumované flexibilné spojky, flexibilné hadice a/alebo polyvinylchloridové armatúry Schedule 40 na pripojenie zariadenia z extrakčného vrtu SVE k bodu vypúšťania emisií.

Pozorovacie vrty by mali mať vzduchotesné armatúry zakončené guľovým ventilom na pripojenie k vákuovému manometru na monitorovanie podtlaku počas pilotnej skúšky. Schéma procesu a prístrojového vybavenia je uvedená na obrázku nižšie.



OBSERVATION WELL – pozorovací vrt, **EXTRACTION WELL** – extrakčný vrt, **PROCESS AND INSTRUMENTATION DIAGRAM** – procesný a prístrojový diagram

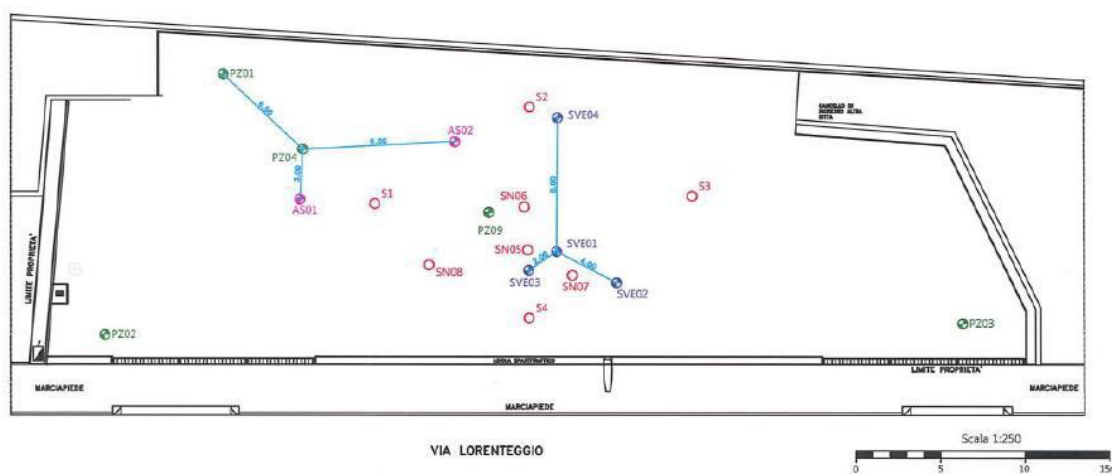
Obrázok 4.4 – Príklad diagramu procesu a prístrojového vybavenia (Farallon Consulting)

4.1.2 Kroková skúška zvyšovania podtlaku SVE

Pilotná skúška SVE by sa mala vykonať ako kroková skúška s použitím najmenej troch stupňov zvyšovania prietoku vzduchu. Každý krok skúšky by mal trvať aspoň tak dlho, kým parametre namerané v bodoch monitorovania podtlaku nedosiahnu ustálený stav. Pri udržiavaní konštantnej prietokovej rýchlosti a podtlaku v extrakčnom vrte (na zaistenie tejto podmienky by sa mali vykonávať časté merania) by sa mali vykonávať merania tlaku v extrakčnom vrte, ako aj vo všetkých bodoch monitorovania podtlaku sanovanej zóny. Monitorovanie by malo byť časté na začiatku pilotnej skúšky (každých päť až desať minút); časový interval sa môže v priebehu skúšky predĺžiť.

Do pilotnej skúšky sa odporúča zapojiť minimálne jeden extrakčný vrt a tri monitorovacie body podtlaku, ktoré sa nachádzajú v rôznych vzdialenostiach od extrakčného vrtu. Odporúča sa použiť extrakčné vrty určené a zabudované na SVE, môžu sa však použiť aj monitorovacie vrty na podzemnú vodu, ak sú na extrakciu pôdneho vzduchu náležite vystrojené. Schválenie používania monitorovacích vrtov podzemnej vody na účely extrakcie pôdneho vzduchu SVE alebo ako monitorovacie body SVE sa vykoná na základe znalosti konkrétnej lokality.

Vo všeobecnosti platí, že monitorovacie body na meranie podtlaku by mali byť umiestnené vo vzdialenosti 1,5 m až 3,0 m, 3,0 až 6,0 m, 6,0 m až 12,0 m a viac ako 12,0 m od vrtu na odsávanie pôdneho vzduchu. Monitorovacie body na meranie podtlaku by mali byť inštalované radiálne od extrakčného vrtu (t. j. 120° od seba), a nie v línii, aby sa lepšie vyhodnotili potenciálne preferenčné cesty prúdenia vzduchu na lokalite. Ak znečistenie pôdy a horninového prostredia zasahuje viacero geologických jednotiek (vrstiev, polôh) s rôznou priepustnosťou, každá stratigrafická jednotka by sa mala vyhodnotiť s vlastným extrakčným vrtom a tromi bodmi monitorovania podtlaku.



Obrázok 4.5 – Typické umiestnenie pri 120° uhla umiestnenia monitorovacieho bodu SVE (Confalonieri et al., vid' Príloha 1)

Typický extrakčný vrt je vertikálny vrt s priemerom 25 až 100 mm, s dĺžkou filtračného úseku 30 až 150 cm, ale tieto údaje by sa mali stanoviť na základe poznania geologickej stavby lokality.

Pred začatím krokovej skúšky SVE sa z pozorovacích vrtoch zhromaždia základné údaje o parciálnom tlaku. Odporúčajú sa aj terénne merania prchavých organických látok (atmogeochemické merania), ktoré by sa mali vykonávať plameňovo-ionizačným detektorom (FID) alebo kombináciou fotoionizačného detektora (PID) a expozimetra (jednoplynového účelového detektora).

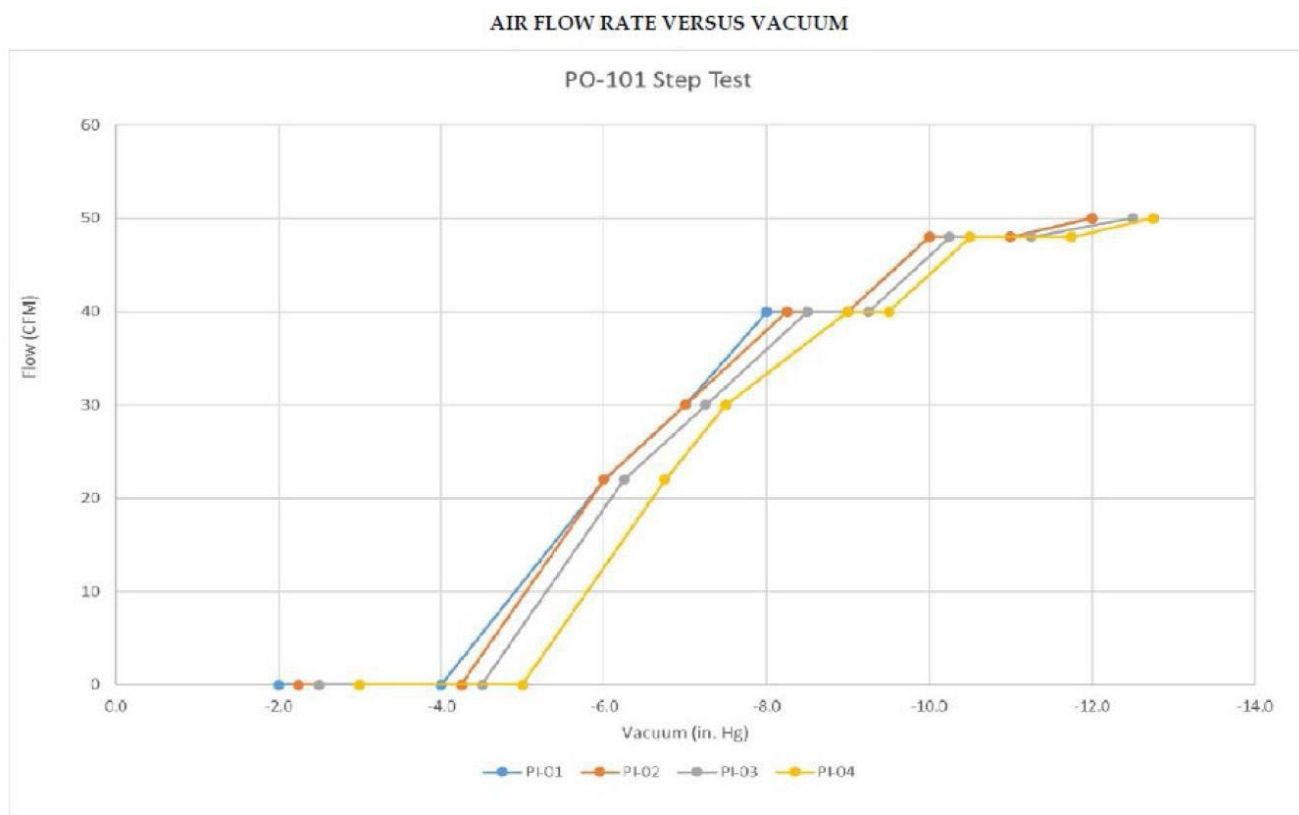
Kroková skúška SVE sa vykonáva postupným zvyšovaním podtlaku aplikovaného na extrakčný vrt SVE. Maximálne množstvo podtlaku, ktoré je možné aplikovať na extrakčný vrt SVE, je založené na vzdialenosti od vrchu filtračnej časti vrtu po hladinu podzemnej vody alebo dno vrtu. Na základe výkonnostnej krivky dýchadla pre regeneračné dýchadlo s výkonom 1 konskej sily (0,7 kW) bude predpokladaný maximálny podtlak aplikovaný na extrakčný vrt SVE okolo 125 mbar [Farallon 2019]. Postupné zvyšovanie podtlaku bude na 30, 70 a 100 percentách maximálneho menovitého podtlaku pre dané dýchadlo. Počas každej fázy krokovej skúšky by sa mali monitorovať nasledujúce parametre minimálne v 15-minútových intervaloch, kým sa parametre neustália (menej ako 5-percentný rozdiel medzi meraniami) alebo počas maximálneho trvania 2 až 3 hodín pri každom kroku podtlakovej skúšky:

- Podtlak aplikovaný na extrakčný vrt SVE;
- Rýchlosť extrakcie pôdneho vzduchu z extrakčného vrtu SVE;
- Teplota extrahovaného pôdneho vzduchu;
- Meranie prchavých organických zlúčenín v prúde extrahovaného pôdneho vzduchu fotoionizačným detektorom;
- Podtlak v monitorovacích vrtoch;
- Hodnoty podtlaku sa budú zaznamenávať ako hodnoty tlakomeru.

minutes	Pid ppm	Lel %	O2 %	CO2 %	Depress mbar	V m/s	T °C	Q mc/h
0	480.1	18	21.3	1.22	-286.0	7.74	1.4	47
10	2147.0	16	21.5	3.45	-258.0	6.57	0.8	47
30	2371.0	13	20.9	3.16	-249.0	6.23	4	43
60	4106.0	13	20.9	2.7	-236.0	6.77	4.1	50
90	4469.0	10	20.9	2.26	-232.0	7.46	4.6	53
120	5000.0	10	20.9	2.08	-229.0	8.27	5.2	57
180	5000.0	9	20.9	1.83	-225.0	9.03	5.9	64
240	5000.0	9	20.9	1.62	-222.0	9.53	6.9	67
300	5000.0	8	20.9	1.44	-220.0	9.6	7	72

Obrázok 4.6 – Príklad monitorovacej tabuľky (Confalonieri et al., vid' Príloha 1)

Vzorky pôdneho vzduchu sa môžu odoberať do špeciálnych vzorkovacích nádob (napr. *Summa canisters*) a/alebo vreciek (napr. *Tedlar bags*) a/alebo podobných a ekvivalentných vzorkovačov a poslať na laboratórnu analýzu na konci každého kroku skúšky, pri maximálnej koncentrácii znečisťujúcich látok v extrahovanom pôdnom vzduchu na základe merania fotoionizačným detektorom (PID).



AIRFLOW RATE VERSUS VACUUM – rýchlosť prúdenia vzduchu vs. podtlak

Obrázok 4.7 – Príklad krokového podtlakového testu SVE (Menozzi et al., vid' Príloha 1)

4.1.3 Pilotná skúška SVE s konštantným podtlakom

Na základe výsledkov krokovej skúšky SVE je možné prikrčiť k pilotnej skúške SVE s konštantným podtlakom, ktorý je druhou fázou pilotných skúšok SVE a určiť tak ideálny podtlak a extrakčný prietok. Optimálny podtlak a prietok by sa mali určiť z meraného podtlaku a prietokov z extrakčného vrtu, čistenia odsávaného pôdneho vzduchu (emisii), odozvy pozorovanej v monitorovacích vrtoch a vplyvu na hladinu podzemnej vody. Optimálny prietok môže byť tiež určený z polomeru vplyvu určeného v krokovej skúške.

Skúška SVE s konštantným podtlakom by sa mala uskutočniť bezprostredne po krokovej skúške SVE a mala by trvať približne 24 hodín. Monitorované sú rovnaké parametre, ako pri krokovej skúške a zaznamenávané v 15-minútových intervaloch:

- Podtlak aplikovaný na extrakčný vrt SVE;
- Rýchlosť extrakcie z extrakčného vrtu SVE;
- Teplota extrahovaného pôdneho vzduchu;
- Meranie prchavých organických zlúčenín v prúde extrahovaného pôdneho vzduchu fotoionizačným detektorom;
- Podtlak v monitorovacích vrtoch;
- Hodnoty podtlaku sa budú zaznamenávať ako skúšky upraviť na základe pozorovaní v teréne. Pilotná skúška SVE s konštantným podtlakom s dlhšou dobou trvania môže pomôcť vyhodnotiť koncentrácie emisii v ustálenom stave a prevádzkový prietok vzduchu a podtlak SVE špecifický pre danú lokalitu.

Vzorky pôdneho vzduchu sa môžu odoberať do špeciálnych vzorkovacích nádob (napr. *Summa canisters*) a/alebo vreciek (napr. *Tedlar bags*) a/alebo podobných a ekvivalentných vzorkovačov a poslať na laboratórnu analýzu na konci skúšky.

4.2 Pilotná skúška distribúcie a účinnosti SVE s využitím stopovača (hélium)

Terénna skúška s využitím plynného stopovača – hélia (He) - nie je v praxi bežná, silnou stránkou tejto skúšky však je to, že ju možno ľahko opakovať, zvyčajne s odstupom iba niekoľkých hodín. To umožňuje rýchlo posúdiť účinky zmien techniky odsávania (napr. distribúciu prúdu pôdneho vzduchu so zapojením rôznych vrtov).

Hélium je najbežnejšie používaný indikátorový (stopovací) plyn, pretože je relatívne lacný, ľahko dostupný a analytické prístroje na jeho stanovenie sú dostupné aj na použitie v teréne. Bežné detektory dokážu detekovať koncentrácie He od 0,1 % do 100 %. V dodávanej forme je továrensky kalibrováný, takže ho nie je potrebné kalibrovať v teréne, ale mala by sa vykonať kontrola koncentrácie He pomocou héliových štandardov, aby sa overilo, či terénny merací prístroj funguje správne. Vzorky vzduchu s He sa zvyčajne musia zbierať do vreciek (*Tedlar bags*) alebo nádob (*Summa canisters*). Héliový detektor sa potom pripojí priamo k nádobke na meranie. Alternatívou môže byť héliový detektor upravený tak, aby meral kontinuálne. Kontinuálne meranie vzoriek pôdneho vzduchu je výhodné pri meraní odsávaného pôdneho vzduchu na výstupe SVE, kde je k dispozícii nepretržitý prietok.

Opísané skúšky účinnosti SVE sa môžu vykonávať ako súčasť pilotných skúšok alebo počas prevádzky sanácie v plnom rozsahu. Skúška je veľmi jednoduchá na vykonávanie a interpretáciu. V zásade sa inertný indikátor (zvyčajne hélium) zavádza do zeme konštantnou známou rýchlosťou a koncentrácia indikátora sa monitoruje na výstupe odsávania SVE. Po určitom čase (napr. hodina alebo aj menej pre mnohé systémy) začne koncentrácia indikátora na výstupe stúpať. Stále stúpa až nakoniec dosiahne stabilnú hodnotu.

Percento zachyteného vzduchu sa dá vypočítať vynásobením prietoku SVE podielom He v pôdnom vzduchu SVE, keď sa koncentrácia stabilizuje, a vydelením tohto čísla rýchlosťou injektáže indikátora, ako je uvedené nižšie.

$$\%Recovery = \frac{SVE \text{ flowrate}}{Trace \text{ injection rate}} \times \% \text{ tracer in offgas} \times 100$$

miera účinnosti (%) = prietok SVE / prietok injektáže stopovača x % stopovača na výstupe x 100

Robustnejšou terénnou technikou na výpočet účinnosti SVE je najprv zmerať „účinnosť pri 100 % koncentrácií“ v odsávanom pôdnom vzduchu na výstupe a to priamym vstreknutím hélia do rozvádzacieho potrubia SVE. (Je potrebné dbať na to, aby bol prietok v oboch prípadoch rovnaký, pretože protitlaky pre tieto dva systémy sú výrazne odlišné.) V tomto prípade je percentuálna účinnosť daná koncentráciou He na výstupe SVE vydelená koncentráciou injektovaného stopovača.

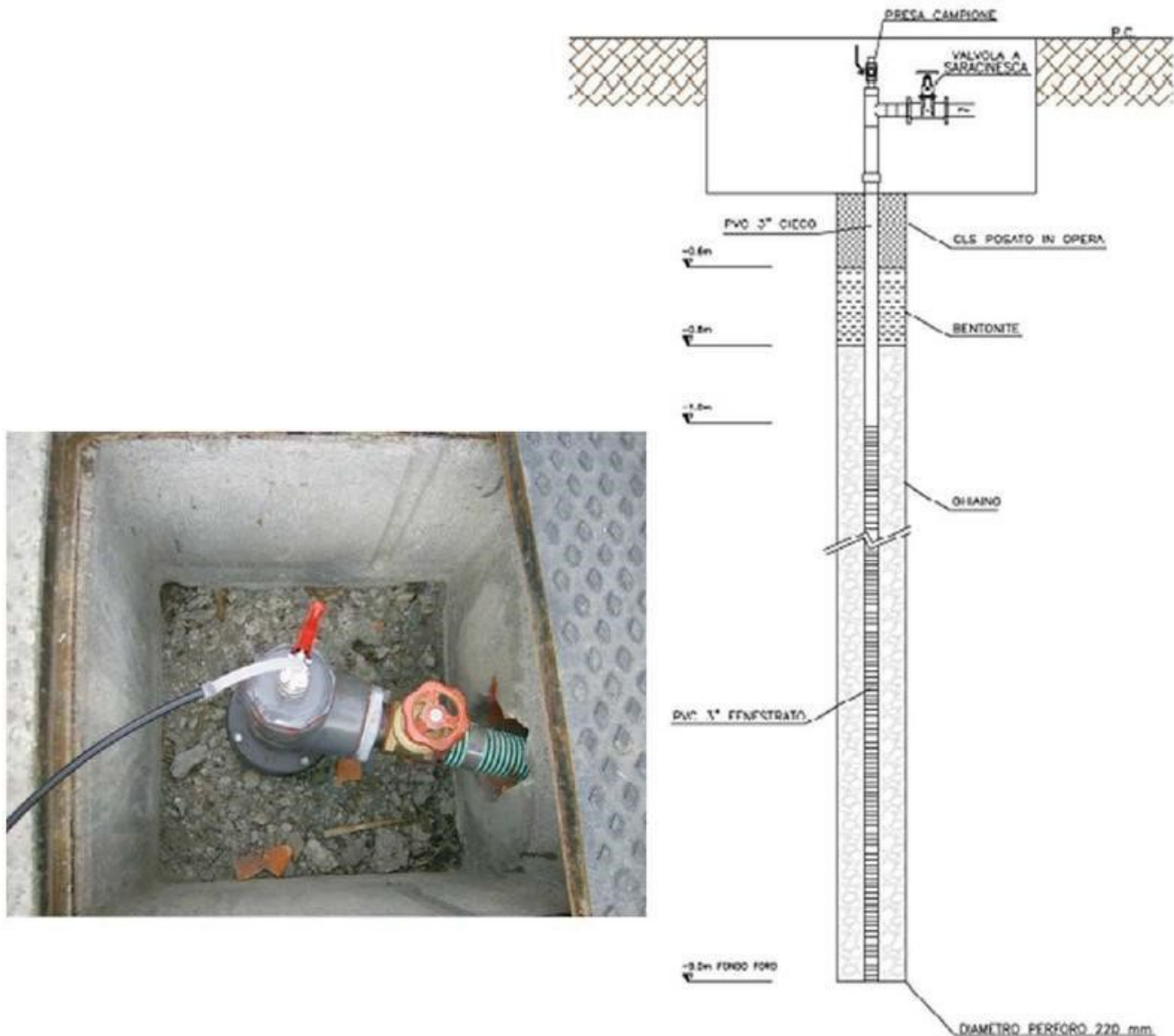
Ak sa ako indikátor použije He, injekčná koncentrácia by sa mala udržiavať pod 10 % objemu, aby sa zabránilo vztlakovým účinkom vo vadóznej (nesaturovanej) zóne. Na zabezpečenie konzistentného prietoku hélia v podmienkach meniaceho sa protitlaku by sa mal použiť kalibrovaný prietokomer s priamym odčítaním spolu s tlakomerom a dávkovacím ventilom, aby sa zabezpečil konzistentný vysoký protitlak na prietokomere.

Stopovacia skúška účinnosti slúži na identifikáciu problémov („red flag“) pre výkon systému odsávania. Ak je výťažnosť He na výstupe nízka, potom je možné, že pôdny vzduch (spolu s He) je zachytený pod hladinou podzemnej vody pod vrstvami s nižšou priepustnosťou a môže prúdiť laterálne mimo dosah systému SVE.

V niektorých prípadoch sa môže stať, že výťažnosť He počas stopovacej skúšky je nulová, čo spôsobuje prítomnosť súvislých (nepriepustných) polôh. Prítomnosť takýchto polôh by sa mala zistiť aj monitorovaním tlaku podzemnej vody počas spúšťania a odstavovania systému. Preto sa odporúča, aby sa stopovacia skúška s He vykonala spolu s meraním tlaku podzemnej vody.

Ak je výťažnosť He vysoká (napr. > 80 %), potom systém SVE funguje dobre a je nepravdepodobné, že by bočná migrácia vzduchu predstavovala problém.

4.3 Monitorovanie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu



Obrázok 4.8 – Príklad inštalácie Nesty Probe – filtra na odber pôdneho vzduchu (Trezzi et al., viď Príloha 1)

Počas pilotnej skúšky by sa vzorky pôdneho vzduchu mali odberať z extrakčného vrtu v každom stupni skúšania pri rôznych prietokoch na prípadnú laboratórnu analýzu. Frekvencia a počet vzoriek zadaných na laboratórnu analýzu by mali vychádzať z podmienok špecifických pre danú lokalitu; na laboratórnu analýzu by sa však mala predložiť minimálne jedna vzorka odobratá z kroku s najvyšším údajom (o koncentrácii znečisťujúcich látok) z terénneho meracieho prístroja. Odber vzoriek pôdneho vzduchu by sa mal vykonávať v bode extrakcie pár z otvoru na odber vzoriek (ventilu) umiestneného medzi hlavou vrtu a dúchadlom. Na odber laboratórnych vzoriek na analýzu prchavých uhľovodíkov (VOC – *volatile organic compounds*), CO₂ a O₂ sa môžu použiť špeciálne vzorkovacie vrecká (*Tedlar bags*), sorpčné trubičky s aktívnym uhlím (napr. *Anasorb*) alebo vzorkovacie nádoby (napr. *Summa containers*), hoci sa uprednostňuje druhá možnosť. Analytická metóda by mala byť schválená technickým personálom projektu. Draegerove trubice sa bežne používajú na meranie CO₂ a môžu sa použiť aj na monitorovanie koncentrácie prchavých uhľovodíkov (VOC).

Ak nie je možné získať dostatok relevantných údajov z dôvodu špecifických podmienok na lokalite, malo by sa to vysvetliť alebo prediskutovať.

Zvýšenie koncentrácií znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu na výstupe a rýchlosť extrakcie SVE sa môžu použiť na určenie rýchlosti odstraňovania znečisťujúcej látky. Samozrejme, merania vykonané počas krátkeho trvania pilotnej skúšky nie sú určujúce pre dlhodobú prevádzku SVE. Vo všeobecnosti však možno predpokladať, že údaje z pilotnej skúšky reprezentujú maximálnu rýchlosť odstraňovania znečisťujúcich látok z prostredia. Z tohto hľadiska, ak je miera odstraňovania znečisťujúcich látok počas (napr. na záver) pilotnej skúšky príliš nízka, je potrebné zvážiť použitie SVE na danej lokalite.

4.4 Minimálne technické vybavenie na terénne skúšky SVE

Na pilotné skúšky SVE je potrebné mať k dispozícii extrakčný vrt umiestnený v znečistenom území, jeden s podobným zabudovaním v území bez znečistenia (porovnávací), a niekoľko zodpovedajúcich pozorovacích (monitorovacích) vrtov. Ďalšie dôležité časti konfigurácie pilotného testu môžu zahŕňať:

- prenosnú vývevu alebo dúchadlo;
- ventily na vzorkovanie vrtov;
- meracie prístroje pre extrakčné vrty;
- zariadenia na odber vzoriek.

Bežné meracie prístroje zahŕňajú:

- fotoionizačný (PID) detektor, na meranie prchavých uhľovodíkov;
- množstvo tlakomerov alebo prietokomerov, na stanovenie polomeru vplyvu pre každý extrakčný vrt;
- tepelné snímače, na meranie teploty pôdneho vzduchu, ktorá môže ovplyvniť celkovú rýchlosť prúdenia vzduchu.

Vzorkovacie vybavenie môže zahŕňať:

- špeciálne vzorkovacie vrecká (tzv. tedlarové vrecká) a prenosné vzduchové pumpy na odber vzoriek vzduchu na vstupe alebo výstupe;
- jednorazové vzorkovače na odber vzoriek vody alebo voľnej fázy z pozorovacích vrtov.

4.5 Extrakčné vrty

Extrakčné vrty sú neoddeliteľnou súčasťou pilotných skúšok sanácie SVE. Tieto vrty predstavujú spôsob, ako odstrániť znečistenie z pásma prevzdušnenia vytvorením podtlaku. Znečistenie je „nasávané“ smerom k extrakčnému vrtu, pretože je v ňom vytvorený podtlak. Základom každého projektu sanácie SVE je určiť správnu a efektívnu mieru zmeny tlakového gradientu (optimálnu mieru podtlaku). Bežným spôsobom zisťovania tohto parametra je pilotná skúška.

Samozrejme, ak odoberáte vzorky iba v extrakčných vrtoch, získate neúplné informácie. Zatiaľ čo pozorovania v extrakčných vrtoch poskytnú informácie o tom, ako sa menia podmienky v mieste extrakcie, nemusí to platiť vo väčšej vzdialenosti. Práve v takýchto prípadoch sú pozorovacie vrty dôležité. Pozorovacie (monitorovacie) vrty, ktoré sú zabudované podobne ako extrakčné vrty, poskytnú informácie akými je fluktuácia (pohyby) hladiny podzemnej vody, gradienty tlaku pôdneho vzduchu a dokonca aj zmeny v migrácii mraku znečistenia.

Pravidelným odberom vzoriek a vykonávaním meraní v pozorovacích aj extrakčných vrtoch môžu vedci získať komplexnejší a špecifickejší obraz, než by im mohla poskytnúť ktorákoľvek časť samostatne. V ideálnom

prípade by vykonané merania mali zahŕňať hladinu podzemnej vody meranú hladinomerom (príp. datalogrom), hrúbku voľnej fázy ropných látok meračom rozhrania olej/voda a koncentráciu prchavých uhľovodíkov (VOC) fotoionizačným detektorom (napr. *Ecoprobe*). Odobraté vzorky by mali zahŕňať vzorky vzduchu zo vstupu a výstupu do a zo sanačnej technológie a tiež z výstupu po čistení emisií. Odobraté vzorky by sa mali analyzovať v laboratóriu na obsah prchavých uhľovodíkov (VOC) a celkové ropné uhľovodíky (*Total Petroleum Hydrocarbons - TPH*). Potreby špecifických analýz sa môžu v jednotlivých krajinách líšiť, preto je dobré kontaktovať v prípade potreby miestny regulačný úrad a požiadať o usmernenie.

4.6 Návrh pilotnej skúšky – minimálne požiadavky

1. Popis terénnych postupov, očakávaných výsledkov pilotnej skúšky vrátane určenia efektívneho polomeru vplyvu a diskusia o zložení znečisťujúcich látok a rýchlosti odstraňovania pár.
2. Statické údaje (pred skúškou):
 - údaje o statickej hladine podzemnej vody (s presnosťou na cm), ak sa monitorovacie vrty používajú na meranie podtlaku alebo ako extrakčné vrty;
 - teplota pôdy a pôdneho vzduchu;
 - statický tlak (mbar); a atmosférické podmienky (tlak a teplota)
3. Skúšobné údaje zozbierané v mieste extrakcie (snímané v určených časových intervaloch):
 - rýchlosť prúdenia vzduchu;
 - výška hladiny podzemnej vody s presnosťou na cm (ak sa používa monitorovací vrt);
 - koncentrácie znečisťujúcich látok - prchavých uhľovodíkov (VOC), CO₂ a O₂;
 - FID (alebo PID a explozimeter) terénne merania;
 - tlak;
 - teplota pôdy a pôdneho vzduchu.
4. Skúšobné údaje zozbierané v mieste monitorovania podtlaku (snímané v určených časových intervaloch):
 - podtlak (mbar);
 - hladina podzemnej vody (s presnosťou na cm).
5. Grafická dokumentácia:
 - mapy lokality (nakreslené v mierke) znázorňujúce umiestnenie zdrojových oblastí znečistenia, odberné a podtlakové monitorovacie body, budovy, spevnené plochy a existujúce inžinierske siete, rozsah znečistenia pôdy a podzemnej vody a hladinu podzemnej vody v deň pilotnej skúšky;
 - geologické rezy územím znázorňujúce geologickú stavbu, distribúciu znečisťujúcich látok a umiestnenie extrakčných a monitorovacích bodov;
 - konštrukčné schémy extrakčných vrtov a monitorovacích bodov podtlaku.
 - konštrukčná schéma znázorňujúca návrh rozvodov vrátane nasledujúcich prvkov: potrubie, prístrojové vybavenie, regulačné ventily, odberové ventily a akékoľvek ďalšie komponenty pilotného testovacieho systému.
6. Grafy:
 - normalizovaný podtlak (podtlak v meracom bode / podtlak v mieste extrakcie) verzus vzdialenosť od extrakčného vrtu pre každý testovaný stupeň prietokovej rýchlosti (vynesené na semilogaritmický papier);

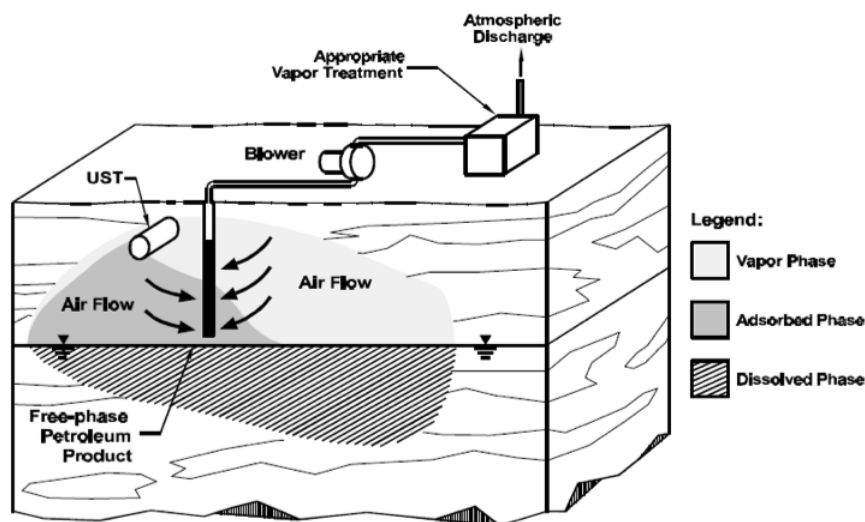
- aplikovaný podtlak (mbar) verzus prúd vzduchu v extrakčnom vrte pre každý testovaný stupeň prietokovej rýchlosti;
- celková koncentrácia pár prchavých uhľovodíkov (VOC) v závislosti od času;
- hladiny podzemnej vody v závislosti od času.

4.7 Alternatíva k pilotnej skúške

Vykonanie pilotnej skúšky sanačného systému je ideálne z dlhodobého aj ekonomického hľadiska. V niektorých situáciách však nie je vykonanie skúšky možné a tu sa ponúkajú iné možnosti, poskytujúce prijateľné výsledky, aj keď v konečnom dôsledku nemusia byť ekonomicky výhodnejšie.

Prvou alternatívou k vykonaniu pilotnej skúšky je jednoduchá inštalácia dočasného sanačného systému na mieste a okamžité spustenie sanácie SVE. Dnešný technologický pokrok priniesol menšie, všestrannejšie systémy SVE a mnohé z nich sa ponúkajú na prenájom. Tieto menšie mobilné systémy umožňujú v prípade potreby vykonať modifikácie systému.

Druhou alternatívou k vykonaniu pilotnej skúšky je použitie dostupných údajov o lokalite na stanovenie predpokladaných charakteristík lokality. Ak je známa litológia a základný rozsah znečistenia, potom je možné pomocou analýz zrnitosti odhadnúť priepustnosť pôdy a prípadne aj prúdenie vzduchu. Táto metóda hrubého odhadu (z angl. originálu „back of the envelope“) je vhodná pre oblasti s relatívne malým rozsahom znečistenia. Nevýhody tejto metódy spočívajú v tom, že niekedy zistené fyzikálne a chemické parametre na jednom mieste nie sú rovnaké na celom skúmanom území a existuje značný problém s hodnotením lokalít pozostávajúcich z viacerých vrstiev. Okrem toho, ak sanácia zahŕňa emisie do ovzdušia, odhady emisií by pred začatím sanácie neboli k dispozícii.



Atmospheric Discharge – výpusť do atmosféry, *Appropriate Vapor Treatment* – primerané čistenie emisií, *Blower* – dúchadlo/výveva, *Air Flow* – prúdenie vzduchu, *Free-phase Petroleum Product* – voľná fáza ropných látok, *Vapor Phase* – plynná fáza, *Adsorbed Phase* - adsorbovaná fáza, *Dissolved Phase* – rozpustená fáza (v roztoku)

Obrázok 4.9 – Schéma s jedným dúchadlom

Tieto kroky môžu alebo nemusia prebiehať postupne.

5 MONITOROVANIE PRIEBEHU SANÁCIE

Monitorovanie priebehu sanácie sa vykonáva počas prevádzkovej etapy na vyhodnotenie postupu sanácie a pred vypnutím systému na overenie dosiahnutia cieľových hodnôt sanácie.

Plán priebežného monitorovania by mal zahŕňať častejší odber vzoriek pri spustení systému a na potvrdenie výsledkov sanácie. Počas prevádzkovej etapy sa po optimalizácii systému môže znížiť frekvencia a intenzita vzorkovania [USACE 2002].

5.1 Monitorovanie prevádzkovej fázy (priebežné monitorovanie)

Nižšie je uvedený krátky popis hlavných parametrov, ktoré je potrebné brať do úvahy pri rutinnom monitorovaní.

5.1.1 Chemické parametre

- Chemické monitorovanie pôdneho vzduchu je nevyhnutné na vyhodnotenie účinnosti sanácie. Pôdny vzduch by sa mal zbierať z jednotlivých extrakčných vrtoch a sond. Počas prevádzky sa na časté alebo nepretržité meranie celkového množstva prchavých uhľovodíkov (VOC) často používajú terénne prístroje, ako sú plameňové (FID) alebo fotoionizačné (PID) detektory. Merania vykonané s vyššie uvedenými prístrojmi by sa mali považovať za skriningové metódy z dôvodu ich nešpecifických reakcií a nasledujúcich ďalších obmedzení [EPA 2001]:
 - Vysoký ionizačný potenciál mnohých bežných prchavých uhľovodíkov (VOC) bude mať za následok ich nezachytenie pri použití konvenčnej PID lampy.
 - Účinky zložiek vzduchu, ako je vlhkosť, oxid uhličitý a alkán (najmä metán), môžu znížiť reakciu PID. Keď je však relatívna vlhkosť veľmi vysoká, takmer 100 %, vodná para môže kondenzovať na senzore a spôsobiť falošne pozitívnu odozvu. Tento signál je spôsobený únikom prúdu medzi elektródami v senzore [RAE System 2013].
 - Vysoký obsah halogénov v mnohých bežných prchavých uhľovodíkoch (VOC) povedie k podhodnoteniu alebo nezisteniu VOC pomocou plameňového detektora (FID).
- Merania koncentrácií prchavých uhľovodíkov (VOC) na vstupe do systému SVE a prípadne v jednotlivých extrakčných vrtoch by sa mali použiť na výpočet rýchlosti odstraňovania znečisťujúcich látok z nenasýtenej zóny.
- Koncentrácie znečisťujúcich látok sa zvyčajne merajú na vstupe a výstupe zo zariadenia na čistenie emisií (pred a za nádobami s aktívnym uhlím), aby sa posúdila účinnosť čistenia pred ich vypustením do ovzdušia.
- Chemické monitorovanie podzemných vôd: sanácia vo vadóznej (nesaturovanej) zóne by sa nemala vykonávať nezávisle od sledovania chemizmu podzemných vôd. Nenasýtená zóna môže byť v skutočnosti opätovne znečistená kapilárnym pôsobením a kolísaním hladiny podzemnej vody (ak je táto znečistená). Na vyhodnotenie prenosu znečistenia z vodnej fázy do pôdneho vzduchu by sa mali monitorovať aj obsahy znečisťujúcich látok v podzemnej vode.

5.1.2 Fyzikálne parametre

- Meranie teploty pôdy a pôdneho vzduchu: Údaje o teplote pôdneho vzduchu môžu pomôcť vyhodnotiť účinnosť sanácie a umožniť normalizáciu údajov o prietokoch, ako je uvedené nižšie. Teplota pôdy by mohla byť indikátorom biodegradačných procesov prebiehajúcich vo vadóznej (nesaturovanej) zóne.
- Relatívna vlhkosť: prítomnosť vlhkosti znižuje objem pórov, cez ktoré prechádza prúdiaci vzduch. Vysoká vlhkosť teda môže znížiť priepustnosť a prietok vzduchu cez vadóznu (nesaturovanú) zónu; z rovnakého dôvodu môže ovplyvniť výsledky monitorovania pôdneho vzduchu. Ďalej je možné znižovať relatívnu vlhkosť extrahovaného plynu, aby sa ochránilo dúchadlo a zvýšila sa účinnosť čistenia emisií (adsorpčná kapacita aktívneho uhlia sa výrazne zníži, keď je relatívna vlhkosť vyššia ako 50 %). Relatívna vlhkosť prúdu pôdneho vzduchu môže byť zvyčajne znížená pomocou systému ohrevu vzduchu [USACE 2002]. Často už napojené dúchadlo dodáva potrebné teplo. Ohrev prúdu vzduchu je obmedzený najvyššou povolenou teplotou pri použití aktívneho uhlia.
- Hladina podzemnej vody: mala by sa monitorovať v oblasti extrakčných vrtov, aby sa určila miera vztlínania, ku ktorej dochádza v dôsledku aplikovaného podtlaku. Je potrebné venovať osobitnú pozornosť kolísaniu hladiny podzemnej vody, pretože by to mohlo ovplyvniť fázový prenos znečisťujúcich látok medzi pevnou, kvapalnou a plynnou fázou. Okrem toho môže vztlínanie spôsobiť nadmernú vlhkosť v sanovanej zóne, čím sa zníži sorpčná kapacita aktívneho uhlia (v zariadení na čistenie emisií). Tento problém možno zmierniť zlepšením separácie vlhkosti a/alebo aktívnym čerpaním podzemnej vody, aby sa zabránilo vztlínaniu *in situ* [USACE 2002].
- Meranie prietoku: údaje o prietoku vzduchu z každého vrtu v spojení s príslušným vyvíjaným podtlakom môžu poskytnúť informácie o priepustnosti vzduchu nesaturovanej zóny. Odporúča sa normalizovať namerané prietoky na štandardnú teplotu a tlak, aby bolo možné ľahko porovnávať údaje zozbierané v rôznych prieskumoch.
- Meranie tlaku/podtlaku: meranie podtlaku v rôznych miestach a hĺbkach poskytuje informáciu o dráhach prúdenia vzduchu. Tlakové gradienty určené z meraní podtlaku by mali byť spojené s odhadmi horizontálnej a vertikálnej vodivosti vzduchu na posúdenie času obehu alebo rýchlosti [Truex 2013].

5.1.3 Meteorologické údaje

Pre správne vyhodnotenie výsledkov monitorovania by sa mali zaznamenávať a vyhodnocovať meteorologické údaje (napr. zrážky, barometrický tlak, teplota vzduchu).

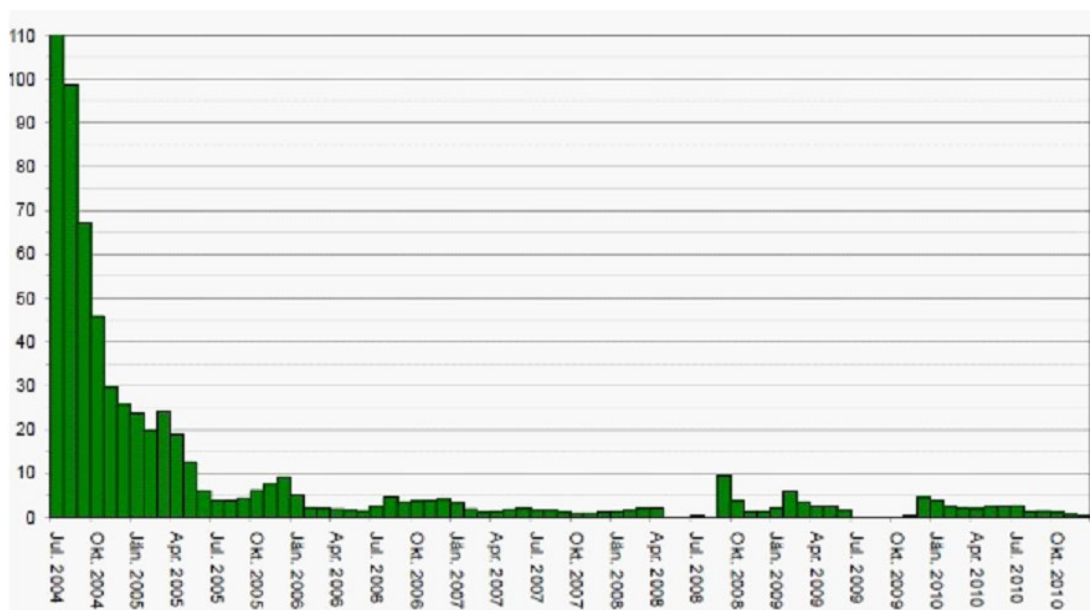
- Zrážky: zrážky, ktoré obmedzujú transport prchavých znečisťujúcich látok v nenasýtenej zóne, môžu mať významný vplyv na výkonnosť SVE a na výsledky monitorovania pôdneho vzduchu. Odber vzoriek pôdneho vzduchu by sa preto nemal uskutočňovať po výraznom daždi (100 mm alebo viac zrážok počas 24-hodín). Doba odstávky by mala byť založená na krivkách odvodňovania pôdy [CalEPA 2015].
- Barometrický tlak: Kolísanie atmosférického tlaku vyvoláva pohyb vzduchu medzi atmosférou a nesaturovanou zónou. Pohyb vzduchu v nesaturovanej zóne vyvolaný prirodzeným kolísaním atmosférického tlaku sa označuje ako barometrické čerpanie. Keď atmosférický tlak klesá, pôdny vzduch je nasávaný zo zeme do atmosféry. Naopak, keď sa atmosférický tlak zvýši, atmosférický vzduch sa nasáva do zeme [Kuang 2013]. Vplyv kolísania barometrického tlaku na transport atmosférických plynov môže byť zreteľnejší počas odstávok.

5.2 Potvrdenie dosiahnutia cieľových hodnôt sanácie a ukončenie sanácie

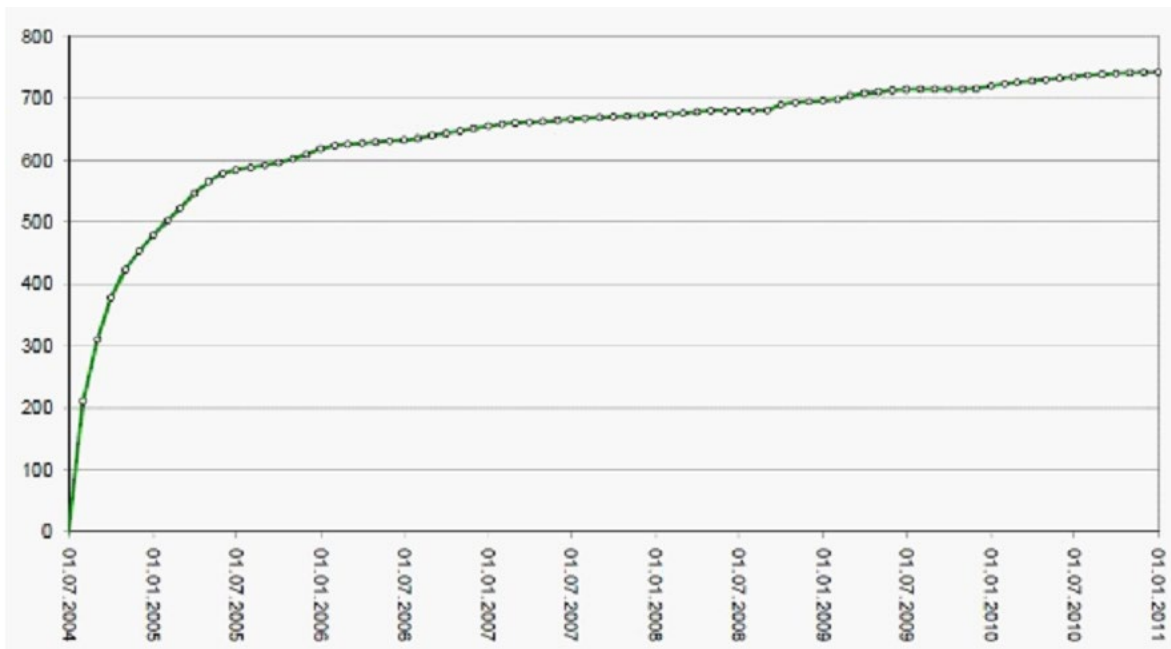
Cieľom sanácie je vo všeobecnosti dosiahnutie vopred stanovených noriem kvality pre rôzne environmentálne matrice - cieľových hodnôt sanácie. Kritériá na ukončenie sanácie SVE sú zvyčajne založené na dosiahnutí limitnej koncentrácie znečistenia pôdy získanej analýzou rizika. Odber vzoriek pôdy je však nákladný a potenciálne deštruktívny, navyše presné sledovanie zvyškovej kontaminácie vyžaduje analýzu veľkého počtu vzoriek, pretože pôda, ktorá je nezmiešaným médiom, je heterogénna [USACE 2002]. Preto pred začatím rozsiahleho prieskumu odberu vzoriek pôdy sa posudzujú/monitorujú ďalšie parametre (cieľové hodnoty), aby sa vyhodnotil pokrok v sanácii a aby sa zväžilo, či sa ciele sanácie splnili.

5.2.1 Možné ukazovatele, ktoré je potrebné posúdiť pri ukončení sanácie

- Odber vzoriek pôdy: drahý a deštruktívny. Pri použití odberu vzoriek pôdy na potvrdenie odstránenia znečistenia a ukončenie sanácie sa musí starostlivo zväžiť heterogénna distribúcia obsahov znečisťujúcich látok na lokalite a neistoty spojené s odberom vzoriek pôdy na prchavé uhľovodíky [USACE 2002].
- Trend koncentrácie znečisťujúcich látok v extrahovanom pôdnom vzduchu: Koncentrácia prchavých uhľovodíkov (VOC) v extrakčných vrtoch môže poskytnúť informáciu o miere odstránenia znečisťujúcich látok a postupe sanácie. Zvyčajne po niekoľkých mesiacoch prevádzky sanačnej technológie trend obsahov znečisťujúcich látok ukazuje rýchly pokles, po ktorom sa koncentrácie blížia k asymptotickým úrovniam (viď Obr. 5.1 a Obr. 5.2). V mnohých prípadoch sa dosiahnutie asymptotického stavu považuje za rozhodujúce pri stanovovaní limitov výkonu sanačnej technológie a uzatváraní ventilačných systémov. Pozorovanie nízkych asymptotických koncentrácií pár v emisiách je však nevyhnutnou, ale nie postačujúcou podmienkou na preukázanie pokroku v odstraňovaní znečisťujúcich látok z horninového prostredia a pôdy. Asymptotické úrovne koncentrácií znečisťujúcich látok na výstupe môžu v skutočnosti súvisieť s konštrukciou odsávania pôdneho vzduchu (napr. vzdialenosť medzi vrtmi) alebo prevádzkovými podmienkami (napr. prietoková rýchlosť) ako aj s obmedzenou rýchlosťou odsávania pôdneho vzduchu [EPA 2001].



Obrázok 5.1 – Trendy v odstraňovaní množstva znečisťujúcich látok (SVE)_ kg PCE/deň



Obrázok 5.2 – Trendy v odstraňovaní množstva znečisťujúcich látok (SVE): kg PCE (celkom v čase)

- Extrakcia pôdneho vzduchu je účinnejšia v častiach horninového prostredia a pôdy blízko alebo medzi vrtmi, ktoré sú dôkladne prepláchnuté (prevetrané), kde koncentrácie prchavých uhľovodíkov môžu dosiahnuť veľmi nízke asymptotické úrovne, zatiaľ čo v okolitej pôde a horninách zostáva značné množstvo znečisťujúcich látok, najmä v zónach stagnácie prúdenia vzduchu.
- Dosiahnutie asymptotických úrovní koncentrácie v extrahovanom pôdnom vzduchu môže navyše znamenať, že počas odvetrávania pôdy a horninového prostredia dochádza k prenosu znečistenia s obmedzenou rýchlosťou. Ak rýchlosť extrakcie vzduchu prekročí rýchlosť difúzneho prenosu znečisťujúcich látok medzi fázami (tuhá, kvapalná a plynná) v nenasýtenej zóne, koncentrácie znečisťujúcich látok v extrahovanom pôdnom vzduchu sa môžu znížiť bez odstránenia všetkej znečisťujúcej látky z pôdy a pórovej vody [USACE 2002].
- Monitorovanie pôdneho vzduchu: odber vzoriek pôdneho vzduchu je relatívne lacný a keďže vzduch je zmiešané médium, vo všeobecnosti predstavujú plynné vzorky integrovanejšie údaje (t. j. reprezentujúce väčšiu oblasť). Monitorovanie prchavých uhľovodíkov v monitorovacích sondách je preto pravdepodobne efektívnejšou a účinnejšou metódou na hodnotenie postupu sanácie, ako odber vzoriek pôdy a vyhodnocovanie koncentrácií znečisťujúcich látok v emisiách pôdneho vzduchu. Odber vzoriek pôdneho vzduchu by sa však mal riadiť určitým štandardizovaným postupom, ktorý zohľadňuje vplyv terénnych podmienok (napr. litológia, vlhkosť) a parametrov vzorkovania (napr. prietok vzorky, objem vzorky) na výsledky monitorovania. Monitorovacie sondy (vrty) pôdneho vzduchu by mali byť inštalované aj v oblastiach dostatočne vzdialených od extrakčných vrtov, ktoré sa ťažšie sanujú, aby sa sledovalo zvyškové znečistenie.
- Opätovné znečistenie (*rebound effect*): počas prevádzkovej fázy sa vo všeobecnosti pozoruje pokles koncentrácií prchavých uhľovodíkov v pôdnom vzduchu ako dôsledok limitovanej rýchlosti fázového prechodu znečisťujúcej látky do plynnej fázy a zriedenia okolitým vzduchom. Preto, keď je systém SVE vypnutý, koncentrácie prchavých uhľovodíkov sa môžu opätovne zvýšiť v dôsledku difúzie medzi rôznymi fázami. Tento jav, zvyčajne označovaný ako opätovné (spätne) znečistenie (rekontaminácia), možno považovať za spoľahlivý indikátor účinnosti sanácie. Minimálne spätne znečistenia alebo jeho

absencia po určitom období prevádzky a zastavení odsávania naznačuje, že dostupné znečistenie bolo pravdepodobne odstránené. Časové obdobie potrebné na dosiahnutie koncentračnej rovnováhy je špecifické pre daný druh znečisťujúcej látky a typ pôdy resp. horninového prostredia.

Piesočnaté pôdy vo všeobecnosti dosiahnu rovnováhu za niekoľko týždňov, zatiaľ čo pre viacvrstvové pôdy (horninové prostredie) môže byť potrebných niekoľko mesiacov. Testovanie spätného znečistenia (rekontaminácie) riadenou odstávkou v ročných intervaloch sa odporúča [AFCEE 2001].

5.2.2 Navrhovaný postup odberu vzoriek pri odstavení sanačnej technológie

Podmienky pre konečné odstavenie sanačnej technológie SVE sú zvyčajne založené na dosiahnutí cieľových hodnôt sanácie z hľadiska koncentrácií znečisťujúcich látok v pôde, resp., horninovom prostredí. Ako však už bolo povedané, pretože odber vzoriek pôdy je nákladný a potenciálne deštruktívny, pred začatím rozsiahleho odberu vzoriek pôdy (posanačného prieskumu) sa monitorujú ďalšie parametre (pomocné ukazovatele), aby sa vyhodnotilo, či sa ciele sanácie splnili. Preto sa navrhuje nasledujúci postup na potvrdenie dosiahnutia cieľov sanácie, ktorý je založený na procese overovania v troch krokoch.

- dosiahnutie cieľovej koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu počas prevádzkovej fázy;
- dosiahnutie cieľovej koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu po dočasnom odstavení systému;
- porovnanie výsledkov odberu vzoriek pôdy s cieľovými hodnotami sanácie.

6 ZÁVER

SVE je in situ sanačná technika/technológia, ktorá je vhodná na zníženie koncentrácie prchavých znečisťujúcich látok v nenasýtenej zóne.

Vo všeobecnosti sa preukázalo, že SVE je účinná na prchavé uhľovodíky (VOC) a môže podporiť sanáciu poloprchavých organických zlúčenín (SVOC). V konkrétnych projektoch, pri sanácii lokalít znečistených chlórovanými eténmi, ako sú perchlóretén a trichlóretén (PCE a TCE) alebo prchavé ropné produkty, ako je benzín, sa SVE často používa v kombinácii s inými technológiami.

6.1 Účinnosť metódy, výhody a nevýhody

Kľúčové faktory, ktoré rozhodujú o účinnosti SVE, sú:

- plynopriepustnosť pôdy a horninového prostredia (ovplyvňuje množstvo vzduchu, ktorý sa môže pohybovať cez póry pôdy a horninového prostredia);
- štruktúra a stratifikácia pôdy a horninového prostredia (dôležité, pretože môžu ovplyvniť spôsob prúdenia pár v pôde a horninovom prostredí počas extrakcie);
- pôdna vlhkosť (môže obmedziť prúdenie plynov cez póry);
- hĺbka hladiny podzemnej vody.

Hlavné výhody sú:

- Známa účinnosť, ľahko dostupné technické vybavenie, jednoduchá inštalácia;
- Nie je prekážkou vykonávania činnosti na sanovanej lokalite: návrh systému SVE je dosť flexibilný na prispôsobenie sa akýmkoľvek podmienkam na lokalite a aj v zastavanom území, rovnako aj technické armatúry sa dajú inštalovať tak, aby neprekážali;
- Krátke trvanie sanácie (6 mesiacov – 2 roky v optimálnych podmienkach): trvanie sanácie do značnej miery závisí od podmienok na lokalite, preto sú v porovnaní s inými technológiami relatívne krátkotrvajúce, zvyčajne od niekoľkých mesiacov do niekoľkých rokov, s efektívnym odstránením hmoty do 90 % pre veľmi prchavé zlúčeniny a okolo 30–40 % pre poloprchavé zlúčeniny;
- Jednoduchá obsluha, relatívne lacné a nákladovo efektívne riešenie v porovnaní s inými technológiami vhodnými na sanáciu prchavých znečisťujúcich látok (konkurenčné náklady: približne 15 – 60 EUR / tona znečistenej pôdy);
- Aplikovateľná na územia s prítomnosťou voľnej fázy ropných látok, možno ju kombinovať s inými technológiami. Podtlak vyvolaný vo vrstve pôdy alebo horniny, ovplyvňuje migráciu plyných znečisťujúcich látok a chráni budovy, ako aj podzemnú infraštruktúru pred vniknutím horľavých alebo toxických prchavých znečisťujúcich látok.

Hlavné obmedzenia sú:

- Je ťažké dosiahnuť zníženie koncentrácie znečisťujúcich látok o viac ako 90 %;
- Slabá účinnosť na miestach s nízkou priepustnosťou alebo heterogénne stratifikovaných pôdach a nesúdržných horninách.

6.2 Kontrola prevádzky sanácie SVE

Medzi hlavné faktory, ktoré je potrebné posúdiť pri kontrole správneho vyhodnotenia použiteľnosti technológie, patria geometrické, litologické a hydrogeologické charakteristiky nenasýtenej zóny (pásma prevzdušnenia) a prípadné zvýšenie alebo zníženie hladiny podzemnej vody. Pri zvažovaní 3-D vymedzenia nenasýtenej zóny, ktorá má byť predmetom sanácie, je užitočné odhadnúť celkovú hmotnosť znečisťujúcich látok pred sanáciou (bilanciu), aby bolo možné porovnať mieru odstránenia znečisťujúcich látok, zmenu účinnosti počas trvania sanácie a celkový úbytok znečisťujúcich látok po ukončení sanácie.

Medzi parametre, ktoré sa majú kontrolovať počas inštalácie sanačnej technológie, patria hlavne: polomer vplyvu (R) a rozsah účinnosti sanácie. Ďalšie parametre, ktoré je potrebné kontrolovať a ktoré ovplyvňujú prevádzku, sú: kolísanie hladiny podzemnej vody, systémy čerpania vzduchu, účinnosť systému na čistenie pôdneho vzduchu na výstupe (kontrola emisií). Systém je potrebné mať počas prevádzky pod kontrolou, aj preto, aby sa určil vhodný čas na ukončenie sanácie.

Na konci sanácie SVE je potrebné vykonať niektoré kontroly pred jeho odstávkou. Prevádzkovateľ musí orgánom štátnej správy predložiť komplexnú informáciu (správu), obsahujúcu údaje z prevádzky, monitorovania a posačného prieskumu, aby bolo možné posúdiť mieru splnenia environmentálnych cieľov sanácie.

ZDROJE

Dokumenty sú citované v abecednom poradí ako: [Autori, rok, názov, #]

- AFCEE, 2001. United States Air Force Environmental Restoration Program: Guidance on Soil Vapor Extraction Optimization. Air Force Center for Environmental Excellence, Brooks Air Force Base, Texas. Last accessed July 17, 2012, at <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA392205>;
- Air Sparging: Technology Transfer and Multi-Site Evaluation ESTCP Project ER-9808, freely downloadable at <https://www.serdp-estcp.org/content/download/3734/59418/file/ER-9808%20Design%20Paradigm.pdf>
- Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction, September 1997, EPA-542-R-97-007, consulted at <https://clu-in.org/download/remed/sveenhmt.pdf>
- Baker, R. S., and Wiseman, J. T. 1992. Importance of vadose zone monitoring during soil vapor extraction pilot studies. Proceedings: International Symposium on In Situ Treatment of Contaminated Soil and Water. Cincinnati, OH. February 3-6, 1992. Air and Waste Management Association, pp. 26-41.
- Ball, R., and Wolf, S. 1990. Design considerations for soil cleanup by soil vapor extraction. Environmental Progress. 9(3):187-90
- Breckenridge, R. P., Williams, J. R., and Keck, J. F. 1991. Characterizing Soils for Hazardous Waste Site Assessments. Ground-Water Issue, EPA/540/4-91/003, Office of Research and Development, Office of Solid Waste and Emergency Response.
- CalEPA, 2015: California Environmental Protection Agency, Advisory – Active Soil Gas Investigations, Department of Toxic Substances Control.
- Davies, S. H. 1989. The influence of soil characteristics on the sorption of organic vapors. The Workshop on Soil Vacuum Extraction. R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK. April 27-28, 1989.
- DiGiulio, D.C., and R. Varahan. 2001a. Limitations of ROI testing for venting design: description of an alternative approach based on attainment of a critical pore-gas velocity in contaminated media. Ground Water Monitoring & Remediation 21(1): 97-114.
- Engineering Issue: Soil Vapor Extraction (SVE) Technology, February 2018, EPA/600/R-18/053, consulted at https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=538425&Lab=NRMRL.
- Farallon consulting, Final capital industries plant 4soil vapor extraction pilot study work plan freely downloadable at <https://www.farallonconsulting.com/wp-content/uploads/2020/09/2019-Final-SVE-Pilot-Study-WP.pdf>
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 604 pp.
- FRTR Technology Screening Matrix: Thermal Treatment, March 2020, consulted at <https://frtr.gov/matrix2/section4/4-9.html>.
- Interim Final. Directive 9234.2-25, September 1993. OSWER. Washington, DC. 26 pp.
- Johnson, Jeffrey, DeWitt, Christopher B., Wolfe, Bryan, and Mark Garman. 1999. Moisture and Ammonia Enhanced Bioventing in Arid Environments, abstract, in "Proceedings of the Fifth International Symposium on In-Situ and On-Site Bioremediation, San Diego, CA, April 19-22, 1999"
- Jury, W. A., Winer, A. M., Spencer, W. F., and Focht, D. D. 1987. Transport and transformations of organic chemicals in the soil-air-water ecosystem. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 99:120-64.
- Kuang et al., 2013 Review on airflow in unsaturated zones induced by natural forcings. Water Resour. Res., 49 (2013), pp. 6137-6165

- Minnesota Pollution Control Agency Voluntary Investigation and Cleanup Design Criteria and Reporting Requirements Guidance Document #17 (Vapor Extraction, Air Sparging), freely downloadable at <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/vic-gd17.pdf>
- PNNL. SVE System Operation, Transition, and Closure Guidance (2013)
- RAE System, 2013 The PID handbook. Theory and Applications of Direct-Reading Photoionization Detectors, ISBN: 0-9768162-1-0
- Soares, A.A., Pinho, M.T., Albergaria, J.T. et al. Sequential Application of Soil Vapor Extraction and Bioremediation Processes for the Remediation of Ethylbenzene-Contaminated Soils. *Water Air Soil Pollut* 223, 2601–2609 (2012).
- Soil Vapor Extraction (SVE) treatment technology resource guide, September 1994, EPA/542-B-94-007, freely downloadable at https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/sve_tt_res_guide.pdf
- State of Florida, Soil Vapor Extraction Pilot Test Guidance <https://floridadep.gov/sites/default/files/BPSS12B-SVEGuidance.pdf>
- Suthersan, S. S. (1999). Soil vapour extraction. In *Remediation engineering: Design concepts* (pp. 27–88). Boca Raton: Lewis Publisher Inc.
- The SVE Pilot Test, consulted 16/03/2021 at <https://www.enviroequipment.com/blog/soil-vaporhttps://www.enviroequipment.com/blog/soil-vapor-extraction-sve-pilot-testextraction-sve-pilot-test>
- Truex, M. J., D. J. Becker, M. A. Simon, M. Oostrom, A. K. Rice, AND C. D. Johnson. *Soil Vapor Extraction System Optimization, Transition, and Closure Guidance*, PNNL-21843. U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2013.
- USACE. 2002. *Engineering and Design: Soil Vapor Extraction and Bioventing*. EM 1110-1-4001, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. Last accessed July 17, 2012, at http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_1110-1-4001_sec/toc.htm
- USAF. *Guidance on Soil Vapor Extraction Optimization* (2001)
- US EPA. 2001. *Development of Recommendations and Methods to Support Assessment of Soil Venting Performance and Closure*. EPA/600/R-01/070, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- USEPA. 1991h. *Description and Sampling of Contaminated Soils, A Field Pocket Guide*. EPA 625/12-91/002, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH.
- USEPA. 1989c. *Laboratory Investigation of Residual Liquid Organics from Spills, Leaks, and the Disposal of Hazardous Wastes in Groundwater*. EPA/600/6-90/004. New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM.
- USEPA. 1993g. *Guidance for Evaluating the Technical Impracticability of Ground-Water Restoration*.