



European Union Network for the Implementation
and Enforcement of Environmental Law



Working Group
Contamination

Viacfázová extrakcia

Multi Phase Extraction (MPE)

Závěrečná správa

Dátum vydania: 21 November 2022

Číslo správy: 2022/10 MPE EN

Preklad: Mgr. Beáta Bednárová, 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: Viacfázová extrakcia (Multi Phase Extraction – MPE) – záverečná správa	Číslo správy: 2022/10 MPE EN
Správa prijatá na Valnom zhromaždení IMPEL: 29. – 30. november 2022, Praha (Česká republika)	Celkový počet strán: 136 Správa: 38 strán Prílohy: 100 strán
Projektoví manažéri: Marco Falconi (IT) IMPEL ISPRA Dietmar Müller-Grabherr (AT) Common Forum Umweltbundesamt AT Frank Swartjes (NL) EIONET WG Contamination RIVM Wouter Gevaerts (NL) NICOLE Arcadis Autori: Wouter Gevaerts (NL) NICOLE ARCADIS Pavlos Tyrologou (GR) EFG, CERTH Nazare Couto (PT) NOVA FCT, CENSE Francesca Benedetti (IT) IMPEL MITE Iustina Boaja (RO) Romanian Geological Survey Matteo Cozzani (IT) RAMBOLL Marco Falconi (IT) IMPEL ISPRA Federico Fuin (IT) IMPEL ARPAV Güray Hatipoğlu (TK) Farmlabs Agriculture Technologies Antonio Laganà (IT) IMPEL ARPAV Jussi Reinikainen (FI) Common Forum SYKE Prispievatelia do prílohy 1: Andro Barabesi (IT) SIMAM Paolo Boitani (IT) ZÜBLIN UMWELTTECHNIK Tommaso Brinati(IT) JACOBS Simone Biemmi (IT) ARCADIS Federico Caldera (IT) MARES Rodolfo Costa (IT) ARCADIS Claudia Costanzo (IT) WSP GOLDER Luca Ferioli (IT) ERM Nicola Pozzi (IT) ARCADIS Gianpiero Zaccone (IT) WSP GOLDER	
Zhrnutie <i>Kľúčové slová</i> Viacfázová extrakcia, duálna extrakcia, dvojfázová extrakcia, udržateľná sanácia, pôda, podzemná voda, pôdna politika, sanácia, životné prostredie, nulový záber pôdy, znečistenie, znečistené lokality, kontaminácia, kontaminované lokality, monitorovanie, terénne skúšky. <i>Cieľové skupiny</i> Príslušné orgány pre schvaľovanie/aplikáciu/monitorovanie sanačných metód, priemyselní prevádzkovatelia, orgány ochrany životného prostredia, orgány ochrany prírody, inšpektoráty životného prostredia, monitorovacie a výskumné inštitúcie, technické univerzity, environmentálne združenia, mimovládne organizácie, poisťovne a združenia, environmentálni poradcovia.	

Združenie IMPEL v rámci svojho pracovného programu na rok 2020 vytvorila projekt týkajúci sa posúdenia použiteľnosti sanačných metód (2020/09).

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 sanačnej technológie, posúdiť jej vhodnosť, popísať postup pri terénnych skúškach a samotnej sanácii.

Príloha 1 obsahuje niekoľko 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, viacfázovú extrakciu a pranie znečistenej zeminy.

Projekt „Sanácia vody a pôdy“ má za cieľ podporiť použitie *in situ* a *on-site* sanačných 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, horninové prostredie a voda sú prírodnými zdrojmi, a pokiaľ je to technicky možné, mala by sa dosiahnuť ich obnova a nie plytvanie.

Poďakovanie

Správu odborne posúdil širší projektový tím IMPEL a skupina expertov IMPEL pre vodu a pôdu, členovia Common Forum pre znečistené územie, NICOLE, pracovná skupina EIONET pre znečistenie a skupina externých posudzovateľov.

Upozornenie

Táto publikácia bola spracovaná v rámci projektu IMPEL (*European Union Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law*) projektu s názvom „Sanácia vody a pôdy“ (*Water & Land Remediation*), s podporou skupiny partnerov, ktorí sa zaujímajú o manažment znečistenej pôdy. Dokument, ktorý napísal a zhodnotil tím autorov, má slúžiť ako primárny zdroj informácií na premostenie a rozšírenie poznatkov medzi európskymi krajinami a regiónmi. Zameriava sa na podporu spoločného chápania potenciálu špecifickej sanačnej metódy/techniky.

Uvedený obsah vychádza z príslušnej bibliografie, skúseností autorov a zozbieraných prípadových štúdií. Dokument nemusí byť vyčerpávajúci vo všetkých prípadoch, v ktorých bola alebo bude táto sanačná technika použitá. Prípadové štúdie (viď. príloha) sú uznanými dobrovoľnými príspevkami. Kolektív autorov nemal za úlohu vyhodnocovať a overovať správy o prípadových štúdiách.

Niektoré krajiny, regióny alebo miestne orgány môžu zaviesť osobitné právne predpisy, metodické pokyny alebo usmernenia, ktoré stanovujú uplatňovanie metódy a jej použiteľnosť.

Tento dokument NIE JE metodickou príručkou pre uvedenú sanačnú techniku a tiež nie je referenčným dokumentom (*BREF – BAT reference document*) pre najlepšie dostupné techniky (*BAT - best available techniques*). Pedologická, geologická a hydrogeologická charakteristika prostredia znečistených území v Európe vykazuje veľkú variabilitu. Preto je pre úspech pri sanácii znečistených území kľúčový návrh a realizácia, ktoré sú prispôbené konkrétnej lokalite. Takže každé uvedené odporúčanie sa môže buď uplatniť, čiastočne uplatniť alebo aj neuplatniť. V každom prípade autori, prispievatelia a zapojené inštitúcie nenesú za to zodpovednosť.

Názory vyjadrené v tomto dokumente sa nemusia stotožňovať s názormi jednotlivých zúčastnených členov. IMPEL a jeho skupina partnerov dôrazne odporúčajú, aby jednotlivci/organizácie, ktorí majú záujem o zavedenie metódy v praxi, využili 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

Wouter Gevaerts – NICOLE

Slovník pojmov

POJEM	DEFINÍCIA	ZDROJ	Kapitola/ článok
referenčné miesto	miesto (napr. pôda alebo podzemná voda), v ktorom sa merajú hodnotiace kritériá, ktoré nesmú byť prekročené	STN EN ISO 11074	3.4.5
kontrola dodržiavania cieľových hodnôt sanácie v referenčnom mieste	prieskum alebo program priebežnej kontroly, skúšky alebo monitorovania s cieľom potvrdiť, že sanácia bola riadne vykonaná (napr. 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 (čínidlá) 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 (čínidlá) 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 konštanta	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
znečisťujúca látka	látka (látky) alebo činidlo (čínidlá) prítomné v pôde (alebo podzemnej vode), ktoré vzhľadom na svoje vlastnosti, množstvo alebo koncentráciu spôsobujú nepriaznivý vplyv na funkciu pôdy	STN EN ISO 11074	3.4.18
znečisťovanie	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	Smernica 2010/75/EÚ	článok 3 (2)
cieľ sanácie	všeobecný termín pre akýkoľvek cieľ vrátane tých, ktoré súvisia s technickými (napr. zvyškové znečistenie, technické parametre), administratívnymi a právnymi požiadavkami	STN EN ISO 11074	6.1.19

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

² U tejto definícii nie je predpoklad, že 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 24212 3.1

POJEM	DEFINÍCIA	ZDROJ	Kapitola/ článok
<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 podložím 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 vyplnína 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, náchylnosť na záplavy a klíma.

OBSAH

1 ÚVOD	9
2 OPIS TECHNIKY	11
2.1 Všeobecný opis sanačnej techniky.....	11
2.2 Dvojfázová extrakcia (TPE).....	11
2.3 Duálna extrakcia (DPE).....	13
2.4 Bioslurping.....	15
2.5 Výber a implementácia viacfázovej extrakcie (MPE).....	16
3 CHARAKTERISTIKA LOKALITY, ZNEČISŤUJÚCE LÁTKY A LABORATÓRNE SKÚŠKY	18
3.1 Podmienky lokality a koncepčný model lokality.....	18
3.2 Pohyby plynnej a kvapalnej fázy.....	19
3.2.1 Hydraulická vodivosť (priepustnosť) a prietočnosť.....	19
3.2.2 Plynopriepustnosť zemín v pásme prevzdušnenia.....	19
3.2.3 Geologické prostredie.....	20
3.2.4 Charakteristika horninového prostredia.....	20
3.2.5 Čerpanie/miera výťažnosti.....	20
3.2.6 Miesto výskytu znečisťujúcej látky.....	20
3.2.7 Charakteristika znečisťujúcich látok.....	20
3.3 Poznámky k laboratórnym analýzám a skúškam pri navrhovaní viacfázovej extrakcie.....	22
3.4 Usutočiteľnosť viacfázovej extrakcie (MPE) – základný prehľad.....	22
4 TERÉNNE/LABORATÓRNE SKÚŠKY	23
4.1 Zariadenie na terénne (pilotné) skúšky.....	23
4.2 Technológia čistenia extrahovanej zmesi.....	28
4.3 Kontrolné parametre.....	28
5 MONITOROVANIE ÚČINNOSTI	30
5.1.1 Chemické parametre.....	30
5.1.2 Fyzikálne parametre.....	30
5.1.3 Meteorologické údaje.....	32
5.2 Potvrdenie dosiahnutia cieľov sanácie a ukončenie sanácie.....	32
5.2.1 Možné dôkazné línie, ktoré sa zväžia na potvrdenie dosiahnutia cieľov sanácie.....	32
5.2.2 Navrhovaný spôsob monitorovania po ukončení sanácie.....	34
6 ZÁVER	35
ZDROJE	36

1 ÚVOD

V posledných desaťročiach sa výrazne zvýšilo naše povedomie o znečistení zemín a podzemnej vody. Tento typ znečistenia môže pochádzať buď z bodových, alebo difúzných zdrojov znečistenia a môže mať vplyv na ľudské zdravie a životné prostredie. Tieto poznatky zvýšili úsilie o účinnejšie a udržateľnejšie riešenie znečistenia. Vyústilo to aj do vývoja niekoľkých sanačných prístupov, ktoré sa uplatňujú buď ex-situ, alebo in-situ, prípadne na mieste (on-site) alebo mimo miesta (off-site). Výber a aplikácia konkrétnej sanačnej schémy závisí od viacerých faktorov, od environmentálnych, sociálnych, ale aj ekonomických. Z praktického hľadiska výber technológie závisí napríklad od obmedzení na lokalite, druhu znečisťujúcich látok, veku znečistenia (čerstvé alebo zdegradované), času na realizáciu sanácie a budúceho využitia územia. Ako pri každej metóde sanácie je však účinnosť použitia viacfázovej extrakcie (MPE), pokiaľ ide o jej environmentálnu účinnosť a náklady, závislé od mnohých charakteristík lokality, ako je typ a rozsah znečistenia zemín a podzemnej vody, geológie lokality a zastavania lokality. Okrem toho sa požadovaný stav sanácie určí na základe súčasného a budúceho využitia územia.

V súčasnosti sa pri zohľadnení tzv. prístupu zdroj-cesta-receptor používa niekoľko metód a techník, ktorých cieľom je odstrániť znečistenie alebo eliminovať expozičné cesty znečistenia. Každá sanačná technika má svoje výhody a nevýhody, pričom jej vhodnosť závisí od podmienok na lokalite a fyzikálno-chemických vlastností sledovaných znečisťujúcich látok. Preto je na zabezpečenie účinnosti sanácie nevyhnutné zabezpečiť, aby sa pri výbere a použití akejkoľvek techniky zodpovedne zohľadnili jej technická realizovateľnosť a obmedzenia.

Techniky sanácie zemín a podzemnej vody in-situ sú často nákladovo efektívnejšie ako výkopové práce (sanácia zemín ex-situ) a nepresúvajú znečistenie na iné miesto. Samotné použitie týchto techník však má viacero obmedzení, napríklad pokiaľ ide o trvanie sanácie, znečistenú polohu a zónu, ktorá sa dá sanovať (napríklad extrakcia pôdneho vzduchu a bioventing sanujú len pásma prevzdušnenia, zatiaľ čo čerpanie a čistenie podzemných vôd pôsobí len v pásme nasýtenia). Preto sa odporúča použiť metódu, ktorá pôsobí viacfázovo, ako je viacfázová (multifázová) extrakcia (MPE).

Viacfázová extrakcia je in-situ sanačná technika (alebo kombinácia techník) na simultánnu extrakciu znečisťujúcich látok vo fáze plynnej, kvapalnej a neviazanej (voľnej) fáze. Pôsobí na pásma prevzdušnenia, kapilárny okraj a pásma nasýtenia zemín a na útvary podzemnej vody. Ide o kombináciu extrakcie pôdneho vzduchu (SVE), sanačného čerpania a čistenia podzemnej vody (P&T) a bioventingu (BV), pričom jej použiteľnosť pri sanácii lokalít bola potvrdená viacerými prípadovými štúdiami z lokalít so stredne až málo priepustnými zeminami. Pôdny vzduch sa odsáva vytvorením podtlaku v pásme prevzdušnenia pomocou extrakčných vrtov alebo rýh napojených na odsávanie. To všetko robí z viacfázovej extrakcie výnimočnú techniku na riešenie zmiešaného znečistenia (napr. anorganického a organického; vo vode rozpustných a nerozpustných zlúčenín; prchavých a poloprchavých látok), s možnosťou sanácie reziduí málo prchavých a/alebo poloprchavých znečisťujúcich látok v pásme prevzdušnenia. Viacfázová extrakcia (MPE) sa tak môže použiť na extrakciu:

- Podzemnej vody obsahujúcej rozpustené zložky z pásma nasýtenia.
- Priesakovej vody obsahujúcej rozpustené zložky z pásma prevzdušnenia.
- Voľnej fázy látok ľahšej ako voda (LNAPL)⁶ plávajúcej na hladine podzemnej vody.
- Nečerpaceľnej voľnej fázy (LNAPL) rozptýlenej v zemine/horninovom prostredí.
- Pôdneho vzduchu obsahujúceho prchavé znečisťujúce látky a
- za určitých podmienok na extrakciu zhlukov ťažkej voľnej fázy (DNAPL)⁷.

⁶ voľná nevodná fáza (spravidla ropných uhľovodíkov) ľahšia ako voda - Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL)

⁷ voľná nevodná fáza (spravidla ropných uhľovodíkov) ťažšia ako voda - Dense Non-Aqueous Phase Liquid (DNAPL)

Viacfázová extrakcia má potenciál využitia aj nad rámec svojho priameho použitia (už opísaného), pretože nepriamo môže pomôcť aj pri:

- aeróbnej bioremediácii in-situ prostredníctvom zvýšenia toku kyslíka do znečistenej oblasti;
- pri extrakcii pôdneho vzduchu (Soil Vapor Extraction - SVE) prostredníctvom zníženia hladiny podzemnej vody a zväčšením zóny pôsobenia SVE;
- zlepšením prítokov pri čerpaní a čistení podzemnej vody v polohách s nízkou priepustnosťou s menej strmými gradientmi čerpania vody prostredníctvom vytvorenia podtlaku.

Za vhodných podmienok môže nasadenie viacfázovej extrakcie (MPE) výrazne znížiť množstvo a koncentráciu znečisťujúcich látok nákladovo efektívnym spôsobom. Môže sa použiť v zdrojovej oblasti a eliminovať následné environmentálne a zdravotné riziká vyplývajúce napr. z difúznej migrácie znečistenia. Obmedzenie celkového časového rámca prevádzky systému a účinné odstránenie širokého spektra znečisťujúcich látok tak môže znížiť alebo eliminovať potenciálne budúce škody na lokalite alebo mimo nej [1].

V kapitolách správy ďalej v texte sa uvádza súčasný stav využitia tejto techniky a jej aplikácií. Tento dokument sa zameriava na konkrétny typ in-situ techniky viacfázovej extrakcie (MPE), pričom sumarizuje hlavné princípy tejto techniky a rozoberá jej potenciál a problematické aspekty pri hľadaní jej čo širšieho využitia a zároveň zúžitkováva skúsenosti získané z terénnych prác. Táto správa nie je vyčerpávajúca, jej cieľom je poskytnúť základný prehľad o tejto technike na základe aktuálneho vývoja v Európe, na základe údajov a skúseností, o ktoré sa podelili viaceré zainteresované strany.

2 OPIS TECHNIKY

2.1 Všeobecný opis sanačnej techniky

Vo všeobecnosti viacfázová extrakcia (MPE) spočíva vo využití vysokého podtlaku (podobne ako v technike SVE⁸) do vrtu, ktorý pretína pásmo prevzdušnenia, kapilárny okraj a pásmo nasýtenia. V dôsledku tlakových rozdielov podzemná voda sa dvíha a je nasávaná do vrtu, môže sa odčerpať a upraviť (vyčistiť) nad zemou [1]. Viacfázová extrakcia, ako sanačná technika vyvinutá najmä pre lokality znečistené ropnými látkami, môže byť navrhnutá a realizovaná v rôznych konfiguráciách. V horninovom prostredí a pôde (zeminách) sa znečisťujúce látky môžu nachádzať vo forme pár v pórových priestoroch, ako kvapaliny sorbované na pevné látky, ako kvapaliny v pórových priestoroch (vo forme voľnej fázy - LNAPL) a v roztoku. Spôsob distribúcie ropných látok v rôznych fázach sa riadi predovšetkým fyzikálnymi vlastnosťami zložiek uhľovodíkových zmesí (napr. hustota, viskozita, tlak pár, rozpustnosť vo vode, parciálny tlak, ropná frakcia (uhlíkové číslo), alifatické vs. aromatické uhľovodíky) a vlastnosťami horninového prostredia a pôdy (napr. obsah organického uhlíka a/alebo ílu, pórovitosť) [2, 3].

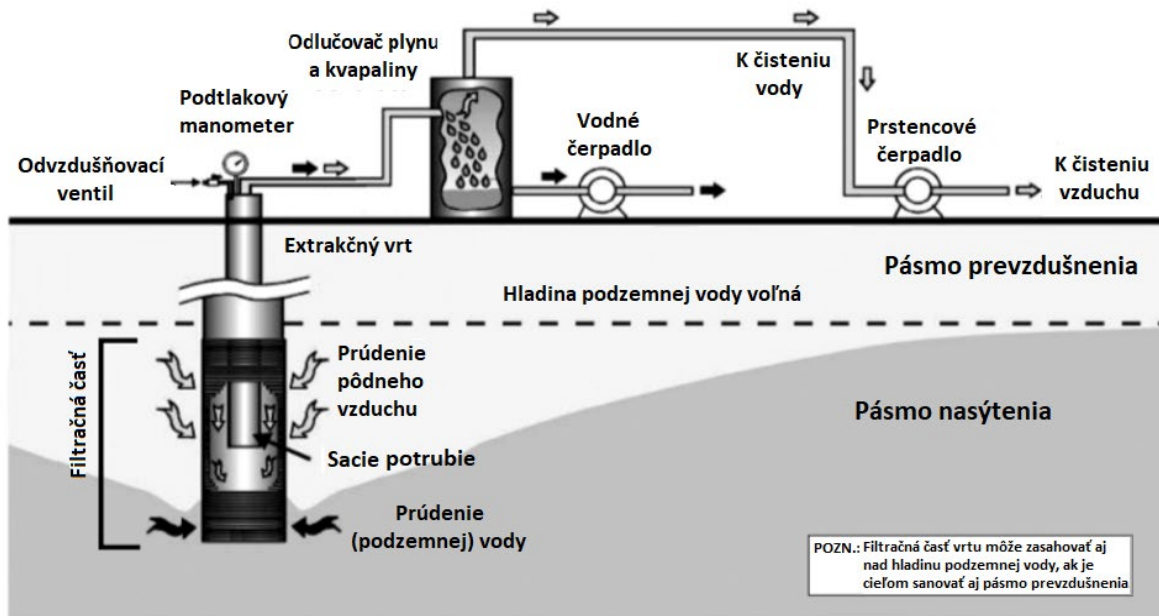
Známe sú tri hlavné konfigurácie viacfázovej extrakcie:

- dvojfázová extrakcia (Two-Phase Extraction - TPE) - extrahuje sa spoločne kvapalná a plynná fáza cez rovnaké potrubie (používa sa najmä na extrakciu chlórovaných rozpúšťadiel);
- duálna extrakcia (Dual-Phase Extraction - DPE) - keď sú oddelené potrubia pre plynnú a kvapalnú fázu;
- bioslurping - extrahuje sa spoločne kvapalná fáza, LNAPL (voľná fáza ropných uhľovodíkov ľahších ako voda) a plynná fáza tým istým potrubím (používa sa najmä na podtlakovú extrakciu LNAPL), podobne ako pri TPE, technika však zahŕňa aj biodegradáciu znečistenia.

2.2 Dvojfázová extrakcia (TPE)

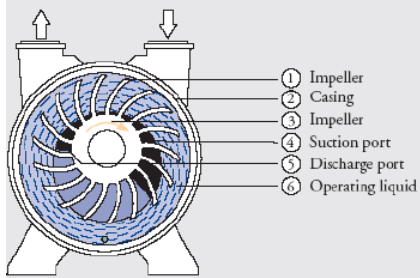
V konfigurácii TPE, ako je znázornené na obrázku 2.1 a 2.2, sa z vrtu extrahuje zmes kvapaliny a pary zapusteným potrubím. Čerpanie zmesi sa dosahuje podtlakovým čerpadlom (typické sú kvapalinokružné (prstencové) čerpadlá, prúdové čerpadlá a dúchadlá/vývevy). Teoreticky môže výveva zdvihnúť vodu len do výšky zodpovedajúcej atmosférickému tlaku. Preto sa na sanáciu podzemnej vody z plytkých zvodní (menej ako 10 m) používajú zostavy s jedným čerpadlom [4].

⁸ SVE - Soil Vapor Extraction - extrakcia pôdneho vzduchu



M980212

Obrázok 2.1.: Schéma systému dvojfázovej extrakcie TPE [1]



a) Kvapalinokružné (prstencové) čerpadlo



b) Stripovacia veža na odstraňovanie prchavých uhľovodíkov



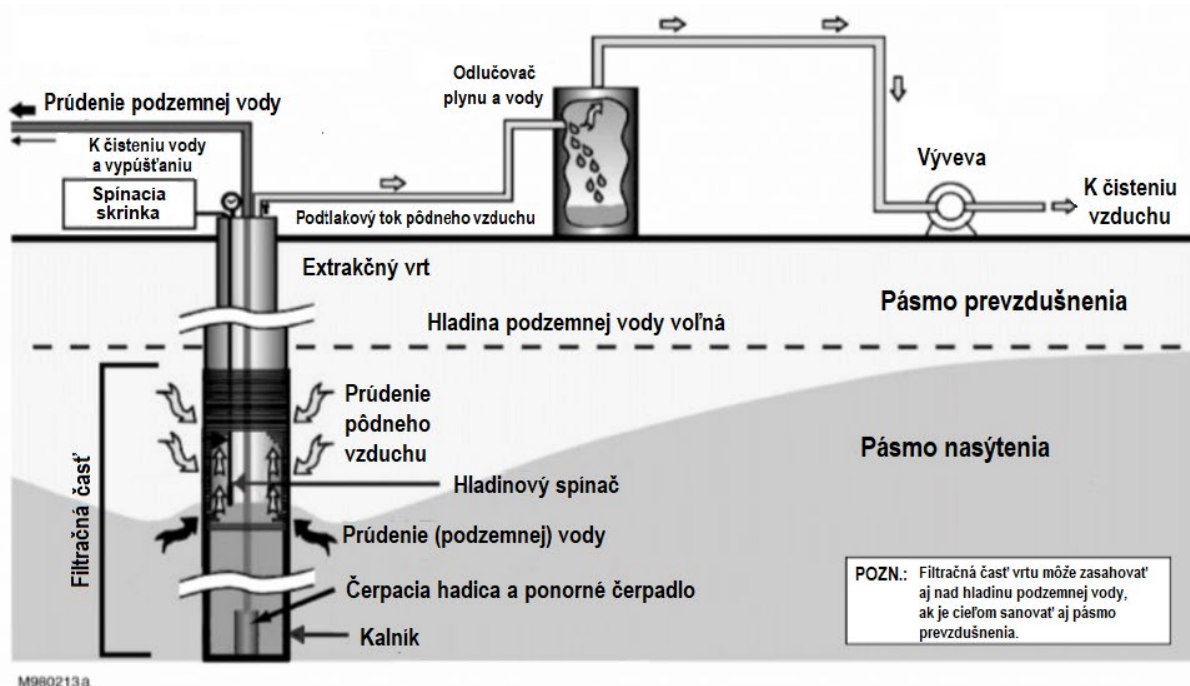
c) Chemické vyzrážanie a flokulácia/flotácia prevzdušňovaním

Obrázok 2.2.: Zariadenie použité na čistenie vody pri dvojfázovej extrakcii (TPE) [2]

Extrahovaná zmes by sa mala rozdeliť na plynnú a kvapalnú fázu v separátore. V závislosti od koncentrácie, sa plyny rôznym spôsobom čistia, ako napr. termálnou oxidáciou (spaľovaním), rekuperačnou oxidáciou, katalytickou oxidáciou alebo sorpciou na aktívne uhlie. Kvapalina sa môže upravovať viacerými existujúcimi spôsobmi - napr. sorpciou na aktivovaný sorbent, následne stripovaním a chemickým vyžrážaním a flokuláciou/flotáciou prevzdušňovaním a nakoniec sa odvedie do usadzovacej nádrže. Z nádrže môže byť čistá voda opätovne injektovaná do podložia alebo vypúšťaná do povrchovej vody.

2.3 Duálna extrakcia (DPE)

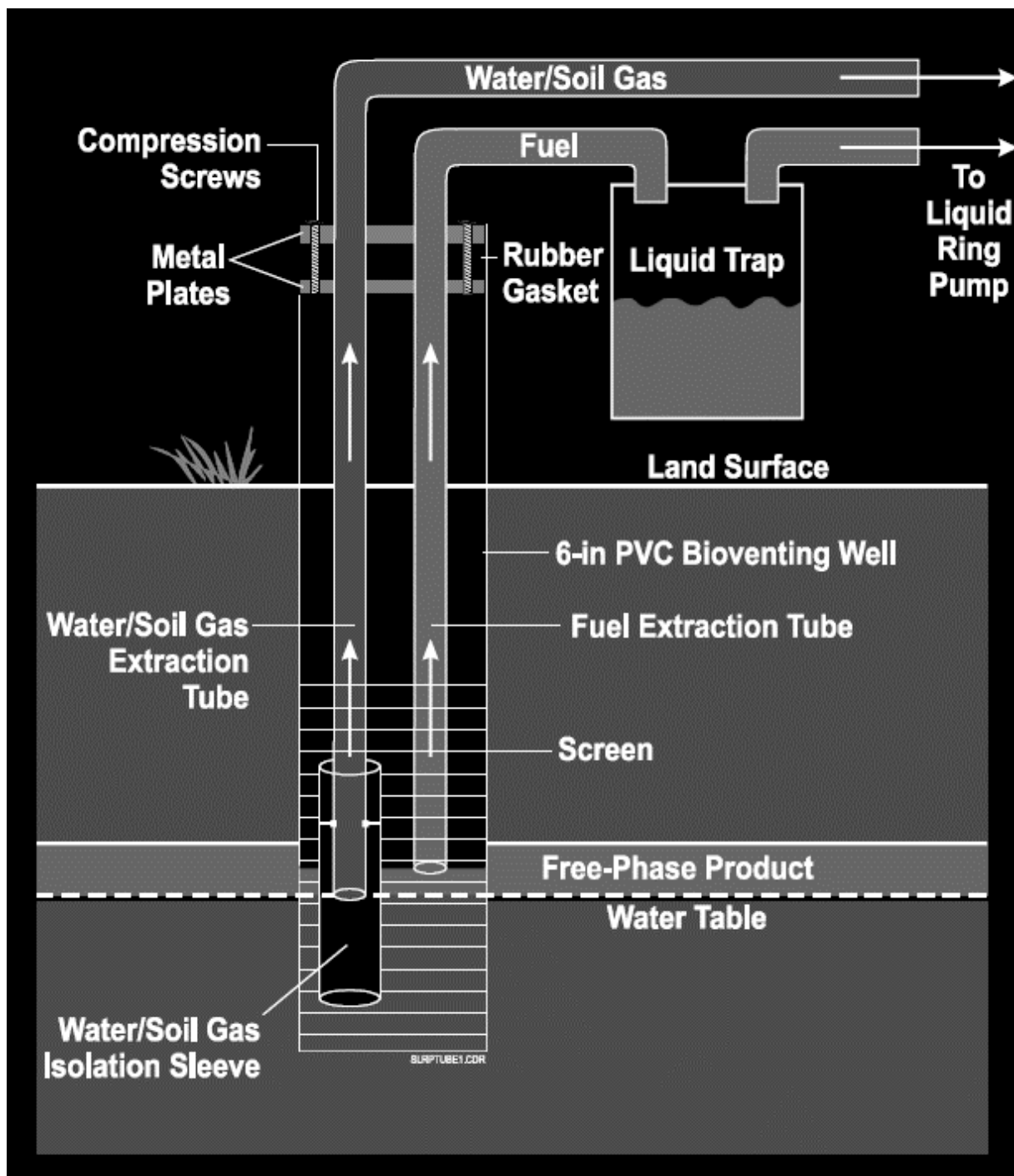
Vzhľadom na hĺbkové obmedzenia, ktoré má technika dvojfázovej extrakcie (TPE), bola vyvinutá technika duálnej extrakcie (DPE), ktorá je znázornená na obrázku 2.3. Táto konfigurácia predpokladá využitie ponorného čerpadla na odber podzemnej vody v spojení s podtlakom aplikovaným na utesenenom ústí vrtu. Preto sa prúdy kvapaliny a pôdneho vzduchu získavajú oddelene.



Obrázok 2.3.: Schéma systému duálnej extrakcie (DPE) [1]

Aby sa zabránilo tomu, že podtlak spôsobí stratu potrebnej sacej výšky vodného stĺpca čerpadla a kavitáciu, môže byť potrebná kontrola hladiny pomocou hladinových spínačov. Podtlak sa môže vyvolať pomocou systému s dvoma čerpadlami, ktoré využívajú elektrické alebo ponorné čerpadlá na čerpanie podzemnej vody a prstencové čerpadlá alebo dúchadlá na pôdny vzduch. V prípade vrtov duálnej extrakcie (DPE), ktoré používajú ponorné čerpadlo, by mal byť na dne vrtu kalník, aby sa zabránilo zavzdušneniu ponorného čerpadla. Pri podtlaku sa môže udržiavať primeraná sacia výška vodného stĺpca nad ponorným čerpadlom, aby sa zabránilo jeho kavitácii (zavzdušneniu). Pri vysokom podtlaku môže byť potrebná hĺbka kalníka až 6 m, aby sa dosiahla primeraná výška vodného stĺpca. Čerpadlo nasáva zmes vzduchu, vody a voľnej fázy (NAPL) z vodnej hladiny. Preto by sa tieto tri fázy mali oddeliť na povrchu v sérii odlučovačov, najprv s využitím odlučovačov kvapalina/vzduch a potom odlučovačov olej/voda, ak je to potrebné [1, 6].

Prax ukázala, že separácia oleja/vody sa môže vykonávať aj vo vrte (obrázok 2.4). Napriek zjavným výhodám (znižuje sa stupeň emulzie olej/voda; znižuje sa koncentrácia uhľovodíkov v plynoch), je však náročná na prevádzku a vyžaduje si náročnejšiu obsluhu.

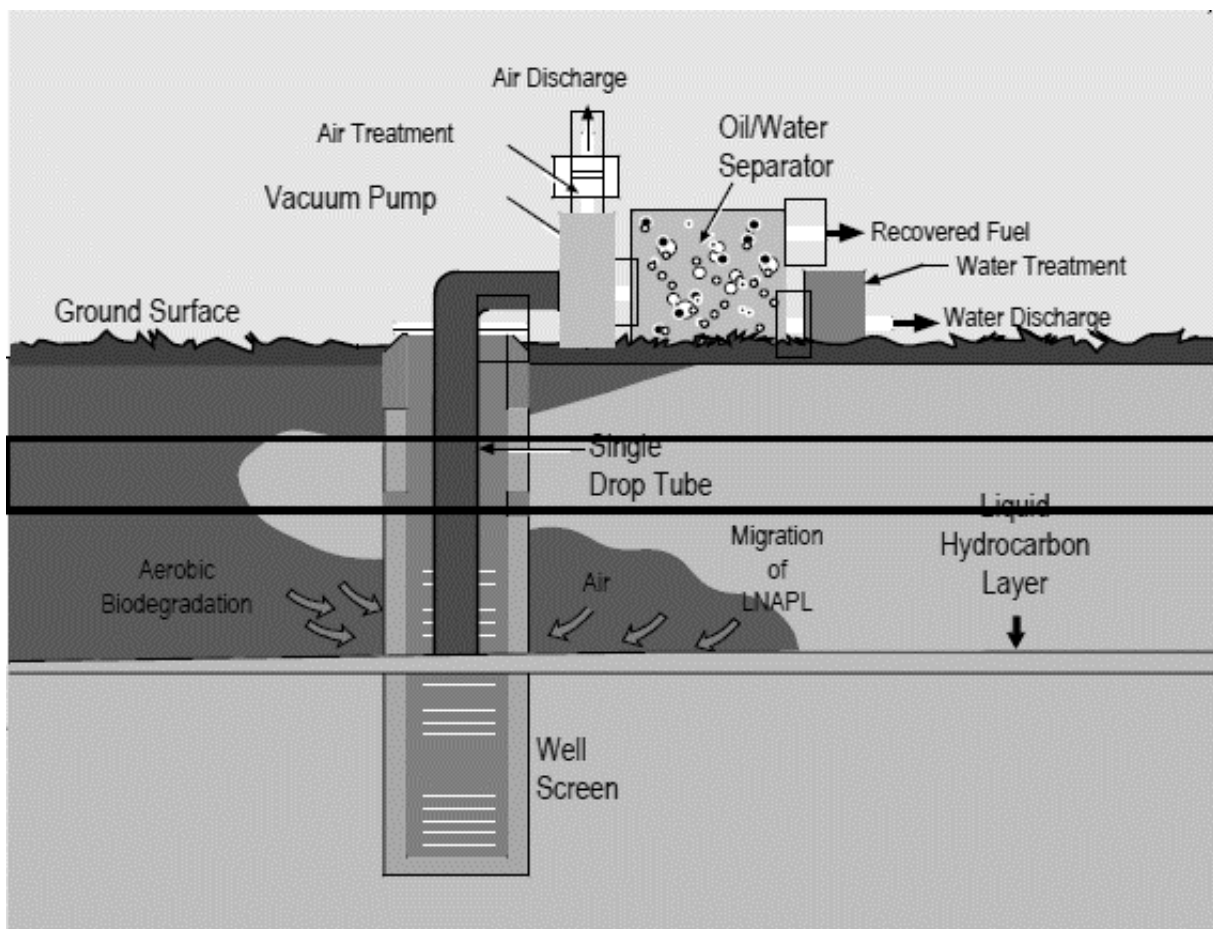


Water/Soil Gas - voda/pôdny vzduch, *Fuel* - voľná fáza ropných uhľovodíkov, *Liquid Trap* - odľučovač ropných látok, *To Liquid Ring Pump* - k prstencovému čerpadlu, *Metal Plates* - kovové krytky, *Compression Screws* - sťahovacie skrutky, *Rubber Gasket* - gumené tesnenie, *Land Surface* - povrch, *Water/Soil Gas Extracion Tube* - čerpacie potrubie na vodu a pôdny vzduch, *6-in Bioventing Well* - 6-palcová pažnica vrtu na bioventing, *Fuel Extraction Tube* - čerpacia hadica na voľnú fázu ropných uhľovodíkov, *Screen* - sito/filter, *Free-Phase Product* - vrstva voľnej fázy ropných uhľovodíkov na hladine podzemnej vody, *Water Table* - hladina podzemnej vody, *Water/Soil Gas Isolation Sleeve* - izolačný rukáv od vrstvy voľnej fázy ropných uhľovodíkov

Obrázok 2.4.: Schéma separácie voda/olej vo vrte [2]

2.4 Bioslurping

Bioslurping je vlastne technika dvojfázovej extrakcie (TPE), pri ktorej sa kladie dôraz na biodegradáciu. Kombinuje dve sanačné techniky - bioventing a techniky využívajúce podtlak na sanáciu lokalít znečistených ropnými uhľovodíkmi. Počas odsávania kvapaliny sa pôdny vzduch nasáva z okolitého horninového prostredia. Preto sa pásmo prevzdušnenia okolo vrtu prevzdušňuje. Úlohou bioventingu je stimulovať aeróbnu bioremediáciu zemín znečistených in-situ. Dôvodom je, že väčšina alifatických a aromatických uhľovodíkov degraduje v aeróbnych podmienkach. Na druhej strane, podtlakom sa extrahuje voľná fáza ropných uhľovodíkov z kapilárneho okraja a z hladiny podzemnej vody. Bioslurping je teda nákladovo efektívna technika sanácie in-situ, ktorá kombinuje odčerpávanie voľnej fázy, bioventing a bioremediáciu in-situ pri súčasnom odstránení voľnej fázy (LNAPL) z pásma prevzdušnenia [2, 6].



Ground Surface - zemský povrch, *Vacuum Pump* - podtlaková výveva, *Air Treatment* - čistenie vzduchu, *Air Discharge* - výdych, *Oil/Water Separator* - odlučovač ropných látok, *Recovered Fuel* - získané uhľovodíky (na recykláciu), *Water Treatment* - čistenie vody, *Water Discharge* - výpusť, *Single Drop Tube* - jednoduché extrakčné potrubie, *Aerobic Biodegradation* - aeróbná biodegradácia, *Air* - pôdny vzduch, *Migration of LNAPL* - prúdenie voľnej fázy ropných látok, *Liquid Hydrocarbon Layer* - vrstva voľnej fázy ropných látok na hladine podzemnej vody, *Well Screen* - filtračná časť (filtračný úsek vrtu)

Obrázok 2.5.: Schéma bioslurpingu



a) Technologické zariadenie na pilotnú skúšku bioslurpingu



b) Technológia bioslurpingu v plnej prevádzke

Obrázok 2.6.: Mobilná a stacionárna technológia bioslurpingu [5]

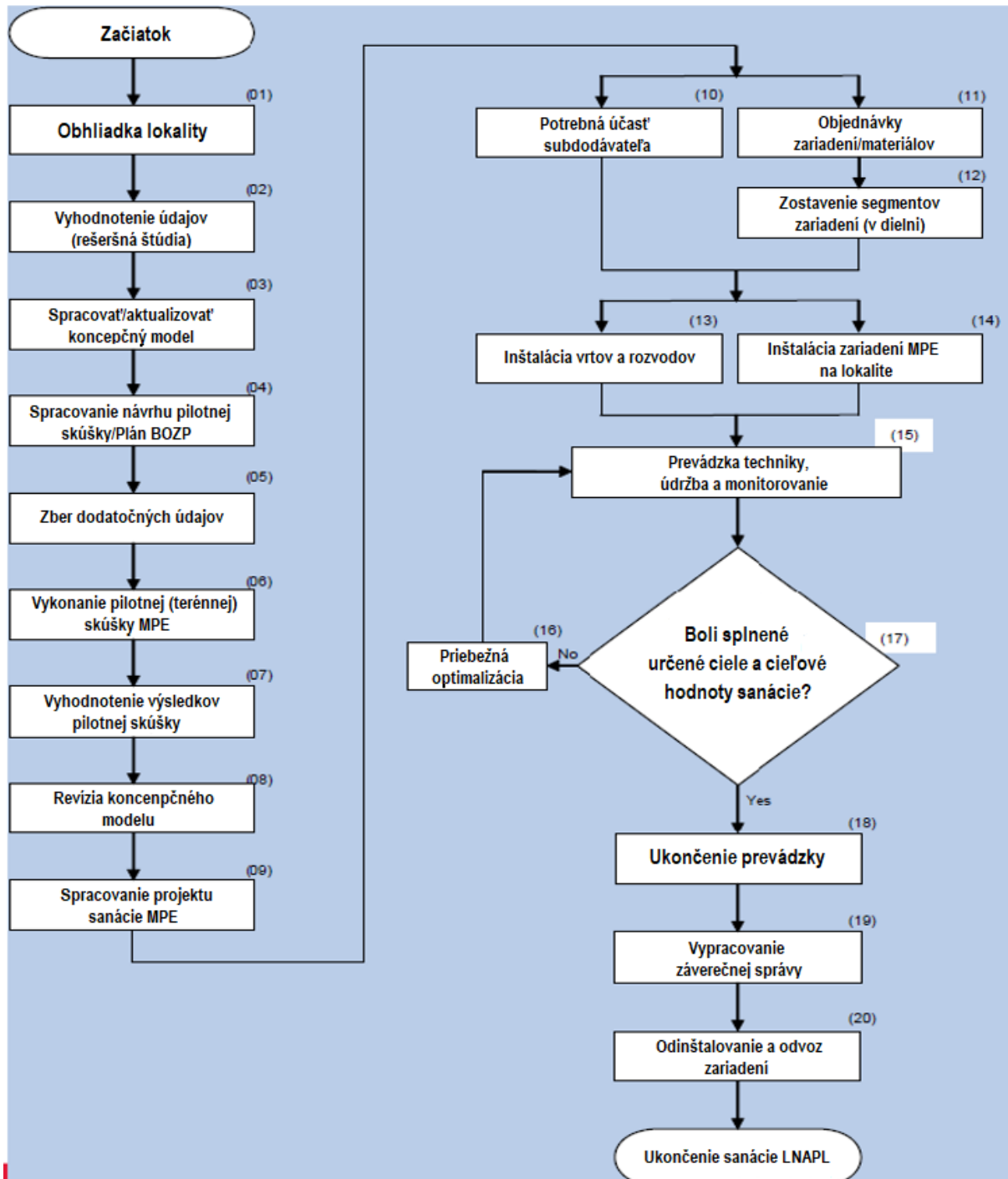
Keďže účinnosť bioslurpingu do veľkej miery závisí od veľkosti pórov v zemi (aby sa zabezpečilo prevzdušnenie), je možné ho použiť v stredne až vysoko priepustných zeminách s hladinou podzemnej vody do 10 m. Aby sa však dosiahol tlak potrebný na súčasný vzduchový zdvih (airlift) vody a voľnej fázy ropných látok, je potrebné komponenty systému prispôbiť, napr. výkon čerpadla, či priemer potrubia.

2.5 Výber a implementácia viacfázovej extrakcie (MPE)

Viacfázová extrakcia (MPE) je intenzívne využívanou sanačnou technikou vďaka týmto výhodám: má vyššiu mieru výťažnosti voľných ropných uhľovodíkov (LNAPL) v porovnaní s inými čerpacími technikami; na rozdiel od iných techník čerpania je potrebné jediné nadzemné čerpadlo, v porovnaní s čerpadlom v každom vrte; môže vyvolať biodegradáciu uhľovodíkov v pásme prevzdušnenia; a tiež stripovanie prchavých uhľovodíkov (VOC) z pásma prevzdušnenia. Je však dôležité si uvedomiť, že nie je možné získať všetku voľnú fázu (LNAPL) obsiahnutú v zeminách, môžu sa objaviť preferované toky prúdenia v zeminách, alebo vytvoriť sekundárne zdroje znečisťujúcich látok, ktoré môžu byť nákladovo neúnosné na sanáciu.

Pred začatím pilotnej skúšky sa odporúča overiť splnenie požiadaviek, od ktorých závisí účinnosť sanácie:

1. Zhodnoťte, či priepustnosť vzduchu v zeminách na lokalite umožňuje extrakciu pôdneho vzduchu.
2. Charakterizujte pôdny vzduch a zhodnoťte, či je znečisťujúca látka prítomná v koncentráciách vhodných na viacfázovú extrakciu (MPE).
3. Vyhodnoťte mieru výťažnosti kvapalín a pôdneho vzduchu v závislosti od vytvoreného podtlaku.
4. Odhadnite oblasť vplyvu (dosah vplyvu podtlaku na zachytávanie podzemnej vody).
5. Odhadnite hmotnostné bilancie výťažnosti kvapalných a plyných znečisťujúcich látok [7].



Obrázok 2.7.: Schéma implementácie MPE

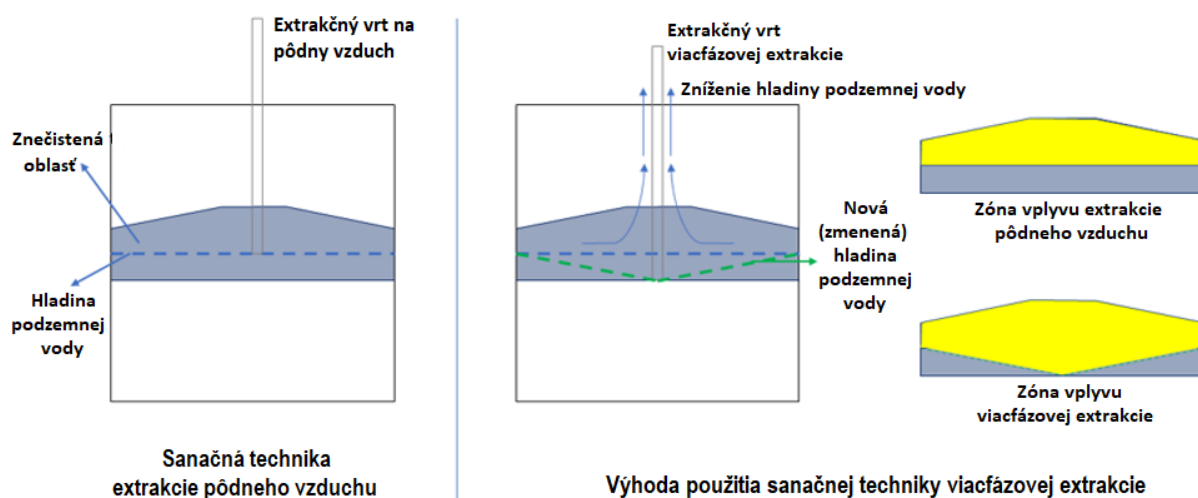
Po vyhodnotení údajov sa môže vypracovať konceptný model a návrh pilotnej skúšky. Je potrebné mať dobre štruktúrovaný plán pilotnej skúšky. Výsledky pilotnej skúšky budú hodnoverným podkladom pre ďalšiu revíziu koncepčného modelu, ktorý predstavuje základný návrh vykonávacieho projektu viacfázovej extrakcie (MPE).

3 CHARAKTERISTIKA LOKALITY, ZNEČISŤUJÚCE LÁTKY A LABORATÓRNE SKÚŠKY

Nasledujúce podkapitoly sa podrobnejšie zaoberajú charakteristikou lokality a znečisťujúcimi látkami, pre ktoré možno využiť metódu viacfázovej extrakcie (MPE). Ďalej sú spomínané laboratórne skúšky v kontexte prehľadu danej techniky.

3.1 Podmienky lokality a koncepčný model lokality

Systém viacfázovej extrakcie (MPE) je vo všeobecnosti dobrou alternatívou sanácie na lokalitách, ktoré si vyžadujú kombináciu a/alebo zvýšenú extrakciu pôdneho vzduchu (SVE) a čerpania a čistenia podzemnej vody pri sanácii prchavých znečisťujúcich látok, voľnej fázy ropných látok ľahších ako voda (LNAPL) a znečisťujúcich látok rozpustených v podzemnej vode priľahlej k zdrojovej oblasti/blízko nej (mimo mraku znečistenia). Ďalšou dôležitou vlastnosťou je schopnosť techniky znížiť hladinu podzemnej vody a vystaviť sanácii zemín väčšiu časť (obrázok 3.1).



Obrázok 3.1.: Výhody systému MPE (viacfázová extrakcia) oproti systému SVE (extrakcia pôdneho vzduchu) pri odstraňovaní prchavých znečisťujúcich látok

Vzhľadom na skutočnosť, že je možné použiť podtlak až niekoľko stoviek mbar, spevnený povrch môže zvýšiť účinnosť techniky viacfázovej extrakcie tým, že sa zabráni "úniku" tlaku.

Na posúdenie návrhu systému viacfázovej extrakcie je potrebné zhromaždiť tieto údaje:

- Hĺbka hladiny podzemnej vody, kolísanie, smer prúdenia (výber typu viacfázovej extrakcie, vlastnosti alebo spôsob použitia).
- Stratigrafia (výskyt potenciálne nevhodných ílovitých šošoviek, nerovnomerné prúdenie podzemnej vody).
- Distribúcia a povaha znečisťujúcich látok, nasýtenie voľnou fázou, rozpustnosť/tlak pary, poloha, biologická odbúrateľnosť (nízko alebo vysokotlakové sanačné techniky, zváženie bioslurpingu).
- Priepustnosť (typ, druh, spôsob aplikácie).
- Chemické zloženie podzemnej vody.
- Podmienky pre extrakciu pôdneho vzduchu (SVE), bakteriologické charakteristiky (zohľadnenie bioslurpingu).

Charakteristiky významné pre využiteľnosť sanačnej techniky viacfázovej extrakcie (MPE) sa rozoberajú v samostatných kapitolách nižšie.

3.2 Pohyby plynnej a kvapalnej fázy

V tejto časti sa budeme venovať pohybu kvapaliny a plynu.

V tabuľke 3.1 sú uvedené všeobecné usmernenia pre výber viacfázovej extrakcie pre sanáciu na mieste (on-site).

Tabuľka 3.1.: MPE Všeobecné usmernenia (EPA 1997)

Podmienky lokality	Usmernenie
Znečisťujúca látka	1. Halogénované prchavé uhľovodíky 2. Nehalogénované prchavé a/alebo ropné uhľovodíky (TPH)
Lokalizácia znečisťujúcej látky	1. Pod hladinou podzemnej vody 2. Nad aj pod hladinou podzemnej vody
Henryho konštanta dominantných znečisťujúcich látok	>0.01 pri 20° C (bezrozmerná) ^a
Tlak pár dominantných znečisťujúcich látok	>1.0 mm Hg pri 20° C
Geológia pod hladinou podzemnej vody	piesok až íl
Aplikácia MPE nad hladinou podzemnej vody	
Plynopriepustnosť zemín nad hladinou podzemnej vody	Zeminy so strednou a nízkou priepustnosťou (k)

^a Henryho konštanta v tvare (koncentrácia v plynnej fáze) / (koncentrácia v kvapalnej fáze)

^b Plynopriepustnosť pôdy (k): = 10^{-14} m^2 [8]

3.2.1 Hydraulická vodivosť (priepustnosť) a prietočnosť

MPE je vhodná pre lokality so strednou až nízkou priepustnosťou v rozmedzí rádov od 10^{-5} do 10^{-7} m/s [12]. Aplikácia viacfázovej extrakcie s využitím podtlaku zvyšuje výdatnosť čerpania a znižuje veľkosť hydraulickej depresie z čerpania podzemnej vody najmä v podmienkach, keď sanačné techniky čerpania a čistenia podzemnej vody začínajú byť menej účinné, alebo vedú k strmým depresným kuželom hladiny podzemnej vody v blízkosti čerpaceho vrtu. Vďaka tomu je viacfázová extrakcia obzvlášť užitočná aj pre oblasti s nízkou prietočnosťou, menšou ako $7,18 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.2.2 Plynopriepustnosť zemín v pásme prevzdušnenia

Plynopriepustnosť zemín je významná vzhľadom na aplikáciu viacfázovej extrakcie pre sanácie nad hladinou podzemnej vody. Duálna extrakcia s použitím nízkeho podtlaku (LVDPE - Low Vacuum Dual-Phase Extraction) si vyžaduje priepustnosť zemín aspoň 10^{-15} m^2 , aby bola realizovateľná, zatiaľ čo duálna extrakcia s vysokým podtlakom (HVDPE - High Vacuum Dual-Phase Extraction) a dvojfázová extrakcia (TPE - Two-Phase Extraction) môžu fungovať pri priepustnosti zemín nižšej ako 10^{-14} m^2 . Odhaduje sa, že extrakcia pôdneho vzduchu (SVE) je nerealizovateľná pri priepustnosti zemín nižšej ako 10^{-14} m^2 [13] alebo 10^{-2} [Darcy]⁹. Inými slovami, duálnu extrakciu s vysokým podtlakom (HVDPE) a dvojfázovú extrakciu (TPE) možno zvoliť tam, kde je extrakcia pôdneho vzduchu (SVE) nepoužiteľná z dôvodu nízkej plynopriepustnosti zemín.

Pri zohľadnení týchto dvoch súvisiacich charakteristík v štúdiu, ktorú uskutočnil U.S. Army Corps of Engineers [14], sa zistilo, že v lokalitách s:

- vysokou plynopriepustnosťou a nízkym podtlakom vzduchu (<0,25 cm kapilárnej obruby) boli zaplavené extrakčné vrtý viacfázovej extrakcie s odsávacími trúbkami,

⁹ Darcy - jednotka priepustnosti; 1 Darcy - 10^{-12} m^2

- strednou plynopriepustnosťou a mierne nízkym vstupným tlakom vzduchu (0,25 - 2,5 cm kapilárnej obruby); systém viacfázovej extrakcie sa považoval za úspešný a nákladovo efektívny.
- nízkou plynopriepustnosťou a vysokým vstupným tlakom vzduchu (>2,50 cm kapilárnej obruby); nedošlo k odvodneniu zemín, pričom prúdenie vzduchu bolo minimálne.

3.2.3 Geologické prostredie

Viacfázová extrakcia sa uplatňuje v rôznych geologických podmienkach, od pieskov po íly [15]. Je to možné vďaka rôznym spôsobom nastavenia techniky viacfázovej extrakcie. Napríklad nízkotlaková duálna extrakcia (LVDPE) je vhodná pre piesky až íly, zatiaľ čo pri dvojfázovej extrakcii (TPE) sú vhodným geologickým prostredím piesčité íly až íly s výdatnosťou podzemnej vody nižšou ako 3×10^{-4} m³/s. Systém vysokotlakovej duálnej extrakcie (HVDPE) je tiež vhodný pre piesčité íly až íly s väčšou produkciou podzemnej vody.

3.2.4 Charakteristika horninového prostredia

Rozsah použiteľnosti viacfázovej extrakcie (MPE) sa môže zvýšiť pri týchto geologických prostrediach: puklinové systémy, prepláskované polohy piesku a ílu, limitovaná hrúbka zvodnenca (v opačnom prípade by došlo k zaplaveniu vrtov dvojfázovej extrakcie (TPE) alebo k vysokým nákladom na sanáciu), hladina podzemnej vody plytko pod povrchom (použiteľnosť viacerých typov MPE), hrubá kapilárna zóna (podtlak ju môže narušiť), naakumulované vrstvy NAPL alebo polohy podzemnej vody.

3.2.5 Čerpanie/miera výťažnosti

Podstatná je aj výdatnosť čerpania podzemnej vody v sanačnom systéme [9]. Odborníci uvádzajú, že hodnoty výdatnosti podzemnej vody vyššie ako $3,33 \times 10^{-4}$ m³/s majú za následok zaplavenie vrtov a nadmerné čerpanie vody pri dvojfázovej extrakcii (TPE). Preto by si takéto lokality vyžadovali techniku duálnej extrakcie (DPE). Malo by sa nájsť optimálne riešenie bez toho, aby sa odčerpávalo príliš veľa podzemnej vody so zvyšujúcimi sa prevádzkovými nákladmi alebo aby sa značná časť podzemnej vody ponechala bez čistenia.

3.2.6 Miesto výskytu znečisťujúcej látky

Miesto výskytu znečistenia má významný vplyv na úspešnosť konkrétnej sanačnej techniky. Tá istá znečisťujúca látka sa môže v jednej časti čistiť ľahko a v inej ťažko. Ak sa znečisťujúca látka nachádza v pásme prevzdušnenia, mala by byť pred nasatím do sanačného vrtu v prchavej forme. Preto sú systémy sanácie pásma prevzdušnenia užitočnejšie, keď sú znečisťujúce látky prchavé [12].

Ďalším hľadiskom, najmä vo vzťahu k nákladovej efektívnosti, je skutočnosť, že metóda viacfázovej extrakcie je príliš agresívna na to, aby sa dala použiť pri úprave znečistenia rozpusteného v podzemnej vode. V dôsledku toho sa odporúča aplikovať ju na zdrojové zóny [16]. Keď koncentrácia znečisťujúcej látky dosiahne asymptotické úrovne, namiesto viacfázovej extrakcie sa môžu použiť iné, relatívne lacnejšie, techniky.

3.2.7 Charakteristika znečisťujúcich látok

Keďže viacfázová extrakcia (MPE) pozostáva z dvoch hlavných typov činností - odsávania pôdneho vzduchu a čerpania, rozlišuje sa aj typ znečisťujúcich látok, ktoré možno odstrániť. Ak je hlavnou činnosťou odstraňovanie pôdneho vzduchu, je sanačná technika viacfázovej extrakcie vhodná

na sanáciu ropných uhľovodíkov (napr. BTEX¹⁰), chlórovaných rozpúšťadiel a odmasťovacích látok (pozri tiež obrázok 3.1). Na druhej strane, ak sa majú kvapaliny z kapilárnej zóny odstrániť pomocou čerpania a použitia podtlaku, takto môže byť sanovaná technikou viacfázovej extrakcie voľná fáza ľahšia ako voda (LNAPL)[12]. Napokon, účinkom viacfázovej extrakcie môže byť tiež zvýšený prietok kyslíka sanovanou polohou, a teda stimulácia rozkladu biologicky odbúrateľných neprchavých znečisťujúcich látok [17]. Tento prístup sa uplatnil v prípade využitia bioslurpingu/bioventingu na leteckej základni Tinker so širším spektrom uhľovodíkov (t. j. znečistenia ropnými uhľovodíkmi; TPH¹¹) [18]. Pri odvodňovaní a prevzdušňovaní systému sa dosiahli uspokojivé výsledky v rôznych geologických podmienkach vrátane ílovitých vrstiev, kde sa na konci pozorovalo aj primerané odvodnenie.

Viacfázovou extrakciou (MPE) sa môžu tiež odčerpávať znečisťujúce látky rozpustené v podzemnej vode. Je to však možné len v prípade, že čerpanie vzduchu s použitím podtlaku pri viacfázovej extrakcii umožňuje aj takúto aplikáciu. V opačnom prípade by sa mohlo uvažovať o lacnejšom spôsobe čerpania a čistenia podzemnej vody.

Existuje mnoho nákladovo efektívnych prípadových štúdií o odstraňovaní chlórovaných eténov [dichlóretylén (DCE), trichlóretylén (TCE), perchlóretylén (PCE)]; aromatických uhľovodíkov (benzén), fluórovaných alifatických organických zlúčenín (freóny), leteckých palív a ropných látok v územiach s rôznou hĺbkou podzemnej vody, litológiou, koncentráciou znečisťujúcej látky a použitým podtlakom [12, 15, 19]. Prchavé, vo vode rozpustné, ako aj vo vode nemiešateľné (LNAPL) znečisťujúce látky možno spracovať technikami viacfázovej extrakcie [20].

V Tabuľke 3.2 sú zhrnuté znečisťujúce látky a možnosti ich sanácie pomocou viacfázovej extrakcie v rôznych konfiguráciách (spracované podľa [12, 15, 21]).

Tabuľka 3.2.: Zhrnutie účinnosti rôznych modifikácií techniky viacfázovej extrakcie (MPE) pre konkrétne skupiny znečisťujúcich látok*

Konfigurácia	Skupina znečisťujúcich látok						
	VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Anorganické látky	LNAPL	DNAPL
Jedno čerpadlo (dvojfázová extrakcia)	√√	√√	√	√	-	√√	-
nízkotlaková duálna extrakcia	√√	√√	√√	√√	-	√√	√
vysokotlaková duálna extrakcia	√√	√√	√√	√√	-	√√	√
Bioslurping**	√	√	√√	√√	-	√√	-

*Vo všeobecnosti sa MPE aplikovala na VOC a LNAPL a v niektorých prípadoch aj na DNAPL; naopak pri sanácii lokalít znečistených anorganickými látkami nebola zistená žiadna aplikácia.

**Väčšinou konfigurácia s jedným čerpadlom, ktorá sa aplikuje priamo medzi rozhranie vzduch – voda alebo v jeho tesnej blízkosti

Legenda: √ - obmedzená účinnosť; √√ - preukázaná účinnosť

VOC - Volatile Organic Compounds - prchavé organické látky, HVOC - Halogenated Volatile Organic Compounds - halogénované prchavé organické látky, SVOC - Semi-Volatile Organic Compounds - poloprchavé organické látky, HSVOC - Halogenated Semi-Volatile Organic Compounds - halogénované poloprchavé organické látky, LNAPL - Light Non-Aqueous Phase Liquid - voľná fáza látok ľahších ako voda, DNAPL - Dense Non-Aqueous Phase Liquid - voľná fáza látok ťažších ako voda

¹⁰ BTEX - skupina prchavých aromatických uhľovodíkov benzén, toluén, etylbenzén, xylény)

¹¹ TPH - Total Petroleum Hydrocarbons, celkové ropné uhľovodíky

3.3 Poznámky k laboratórnym analýzám a skúškam pri navrhovaní viacfázovej extrakcie

Hlavným problémom pri laboratórných analýzách a skúškach pri navrhovaní viacfázovej extrakcie (MPE) je to, že nereprezentujú uspokojivo podmienky v teréne. Aj keď [22] uvádza užitočnosť vykonávania laboratórných skúšok, ako je napríklad simulácia prúdenia vzduchu v zeminách na skúšobných valcoch (kolónach), pri terénnych pilotných skúškach je ešte potrebné vyriešiť významné problémy týkajúce sa rozsahu a veľkosti sanačného zásahu.

Jednou z relevantných tém je preferenčné prúdenie. Na rýchlosť extrakcie kvapalnej fázy má vplyv priepustnosť, ktorá je zase ovplyvnená prítomnosťou/nepriťomnosťou preferenčných tokov. To môže mať za následok o 2 rády nižšie hodnoty priepustnosti namerané pri laboratórných skúškach. V laboratóriu sa zvyčajne testuje len vertikálne, jednosmerné prúdenie; naopak, rýchlosť prúdenia podzemnej vody v teréne bude mať pravdepodobne horizontálnu aj vertikálnu zložku [9].

3.4 Uskutočiteľnosť viacfázovej extrakcie (MPE) – základný prehľad

Viacfázová extrakcia (MPE) sa už niekoľko rokov úspešne uplatňuje v rôznych situáciách a scenároch. Dôležitým faktorom jej úspešného použitia je potenciál súčasného odstraňovania rôznych skupín znečisťujúcich látok, ktoré migrujú/presakujú zeminou a niektoré sa dostávajú do podzemnej vody.

Možnosť riešiť tri problémové oblasti - podzemnú vodu, voľnú fázu a pôdny vzduch - dáva tejto technike obrovskú flexibilitu. Hoci existujú spoločné charakteristiky lokalít, kde sa dá technika aplikovať, a znečistenie, ktoré sa má odstrániť (vo vode rozpustná frakcia, s vodou nemiešateľná fáza - LNAPL, pôdny vzduch s prchavými látkami), existuje veľký potenciál na rozšírenie rozsahu MPE na ďalšie skupiny znečisťujúcich látok a environmentálne riešenia nad rámec tradičných aplikácií. Okrem toho aplikácia viacfázovej extrakcie podporuje jednosmerné prúdenie pri odstraňovaní znečisťujúcich látok, čo prirodzene obmedzuje rozptyl (šírenie sa) mraku znečistenia. Ďalšou výhodou je jej kombinácia s inými sanačnými technikami. Okrem extrakcie pôdneho vzduchu (SVE) určenej na odstraňovanie prchavých organických zlúčenín má bioventing potenciál podporovať aeróbnu degradáciu do hĺbky, čím sa zvýhodní biodegradácia znečisťujúcich látok, ktoré neboli odstránené pomocou viacfázovej extrakcie (napr. znečisťujúce látky viazané na pevné častice zemín).

4 TERÉNNE/LABORATÓRNE SKÚŠKY

Ako už bolo spomenuté, na návrh pilotnej skúšky inštalácie sanačnej techniky viacfázovej extrakcie (MPE) v prevádzkovom rozsahu je potrebné mať už dobre štruktúrovaný koncepčný model lokality a ďalšie predbežné informácie získané v predchádzajúcich krokoch. Pilotná skúška viacfázovej extrakcie by mala poskytnúť spoľahlivé údaje pre konečný návrh sanačnej techniky v týchto bodoch:

- vymedzenie zóny sanácie;
- rýchlosť odstraňovania znečistenia;
- zóna vplyvu sanačnej techniky;
- vlastnosti a parametre zemín v zóne sanácie;
- technológia čistenia odpadových vôd;
- odhad nákladov.

Okrem poskytnutia údajov pre projekt sanácie v plnom rozsahu by mala správne vykonaná pilotná skúška pomôcť konzultantovi určiť, či je možné dodržať stanovené termíny na ukončenie sanácie projektu pri dosahovanej rýchlosti odstraňovania znečisťujúcich látok.

4.1 Zariadenie na terénne (pilotné) skúšky

Na vykonanie pilotnej skúšky systému duálnej extrakcie (DPE) sú potrebné tieto komponenty:

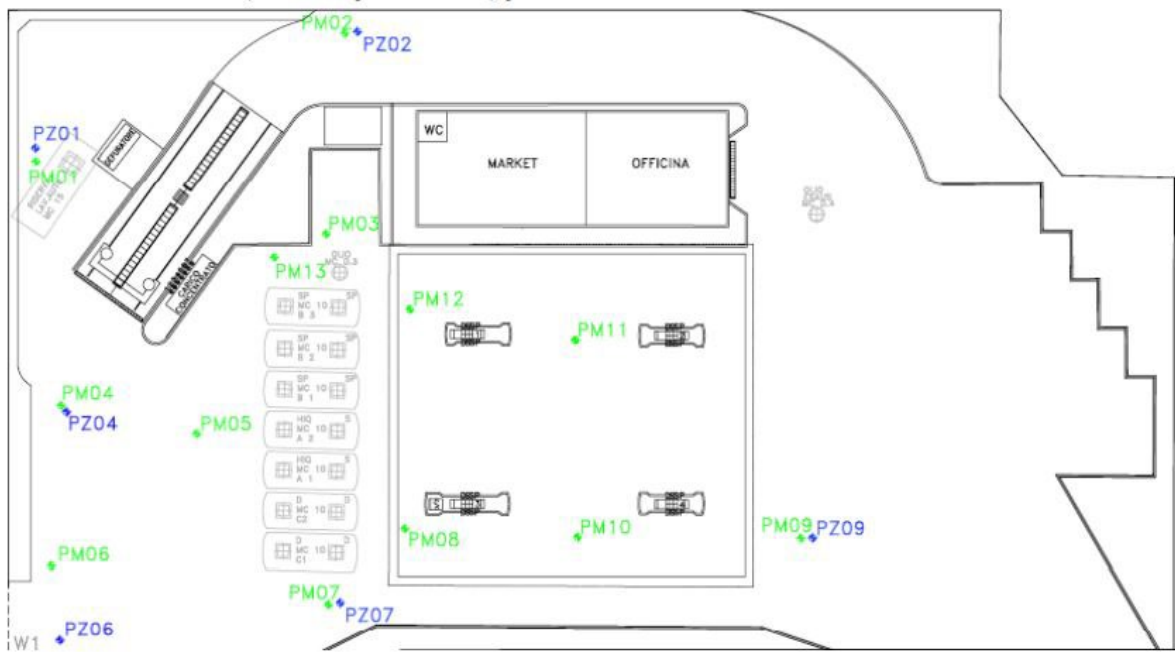
- 2 ponorné čerpadlá inštalované v extrakčných vrtoch, umiestnené približne 1 m od dna studne. V závislosti od geológie je potrebné zvoliť čerpadlo s primeraným výkonom (napr. 12V čerpadlo s maximálnym prietokom 12 l/min). Toto čerpadlo je napojené na rozvodnú hadicu/potrubié, za ktorým nasleduje filter s aktívnym uhlím;
- 2 utesnené záhlavia vrtu vybavené tlakomerom na meranie podtlaku vo vrte a ventilom na odber vzoriek / vykonávanie meraní pomocou prenosných prístrojov;
- dúchadlo/vývevu s bočným kanálom (napr. s prietokom 100 m³/h a podtlakom 150 mbar);
- prípadne (v závislosti od obsahu železa) separátor železa zo zmesi vzduch/voda medzi vrtom a vývevou, aby sa zabránilo mechanickému poškodeniu vývevy;
- vzduchové potrubie s filtermi s aktívnym uhlím na čistenie odsávaného pôdneho vzduchu pred jeho vypustením do atmosféry cez výdych;
- filtračný box s aktívnym uhlím na čistenie kvapalnej fázy pred vypustením napr. do kanalizácie.

V prípade systému dvojfázovej extrakcie (TPE) sú na vykonanie pilotnej skúšky tejto sanačnej techniky potrebné nižšie uvedené komponenty. Na tento účel bol použitý opis konkrétneho zariadenia na vykonanie pilotnej skúšky, a teda sú uvedené technické charakteristiky jednotlivých komponentov: maximálny prietok, elektrické napätie je potrebné zvoliť podľa údajov v koncepčnom modeli lokality.

- výveva ATEX, ktorá dokáže vytvoriť tlak vyšší ako 900 mbar;
- odsávacia rúrka z 1" HDPE potrubia priamo pripojená k záhlaviu vrtu;
- záhlavie vrtu vybavené tlakomerom na meranie podtlaku vyvolaného vo vrte a ventilom na odber vzoriek / vykonávanie meraní pomocou prenosných prístrojov;
- odlučovač kondenzátu pripojený k čerpadlu, ktorý umožňuje oddelenie podzemnej vody a sedimentov od odsávaného pôdneho vzduchu;
- vzduchové potrubie s filtermi s aktívnym uhlím na čistenie odsávaného pôdneho vzduchu pred jeho vypustením do atmosféry cez výdych;
- filtračný box s aktívnym uhlím na čistenie kvapalnej fázy pred vypustením napr. do kanalizácie.

Na sledovanie vplyvu čerpania by sa mali zriadiť monitorovacie vrty. Tieto vrty musia mať filtračnú časť v úrovni hladiny podzemnej vody; záhlavie vrtu musí byť vybavené tlakomerom na meranie podtlaku

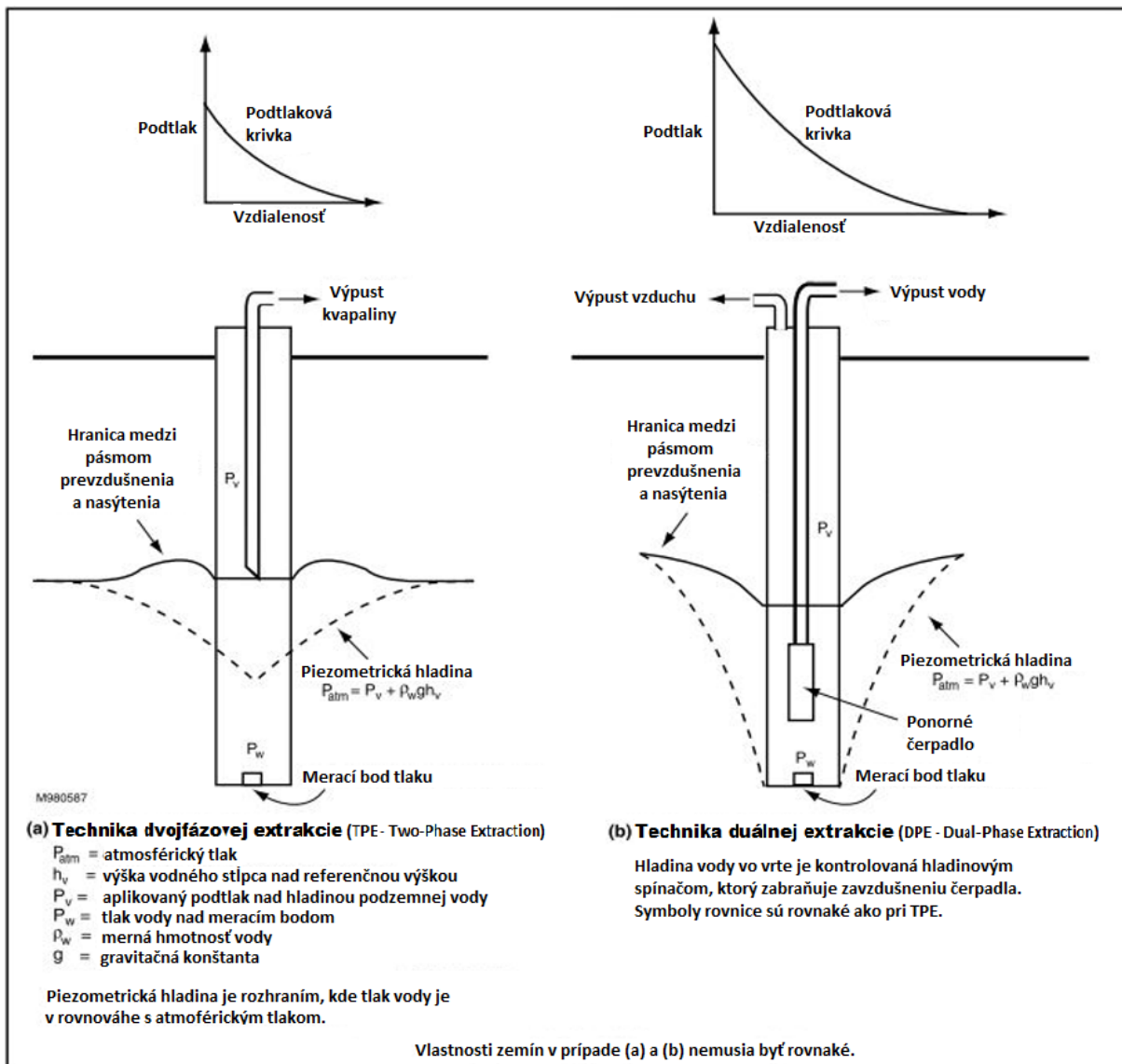
a ventilom na odber vzoriek. Monitorovacie piezometre (vrty) možno rozmiestniť "špirálovito" okolo ťažobného vrtu, t. j. približne pod uhlom 120° a s narastajúcou vzdialenosťou PM13 (2,9 m), PM12 (5,8 m) a PM02 (10,4 m), ako je naznačené na obrázku nižšie (obrázok 4.1). Skúška sa vykonala použitím 3 rôznych stupňov prietoku (30, 45 a 50 Nm³/h) v PM03, pričom sa analyzovala relatívna odozva horninového prostredia (v monitorovacích vrtoch); zapustená rúrka bola umiestnená v blízkosti dna vrtu.



Obrázok 4.1.: Mapa lokality a rozmiestnenie monitorovacích vrtov (so súhlasom Ing. Caldera F., Mares Italia)

Keďže ide o sanačnú techniku z viacerých techník, pilotné skúška, ktoré sa majú vykonať, by mali priamo súvisieť so zvolenou modifikáciou techniky (dvojfázová extrakcia – TPE alebo duálna extrakcia DPE) a typom prístrojového vybavenia prispôbeného na dosiahnutie požadovaných cieľov (extrakcia pôdneho vzduchu – SVE, sanačné čerpanie a čistenie podzemnej vody - P&T, bioslurping).

V sanačnej technike duálnej extrakcie (DPE) čerpanie vody vo vrte vytvára veľký podtlak vo vodnom stĺpci a nasáva novú vodu; tento efekt v kombinácii s podtlakom vytvoreným dúchadlom vytvára väčšiu zónu vplyvu ako v systéme dvojfázovej extrakcie (TPE) (obrázok 4.2).

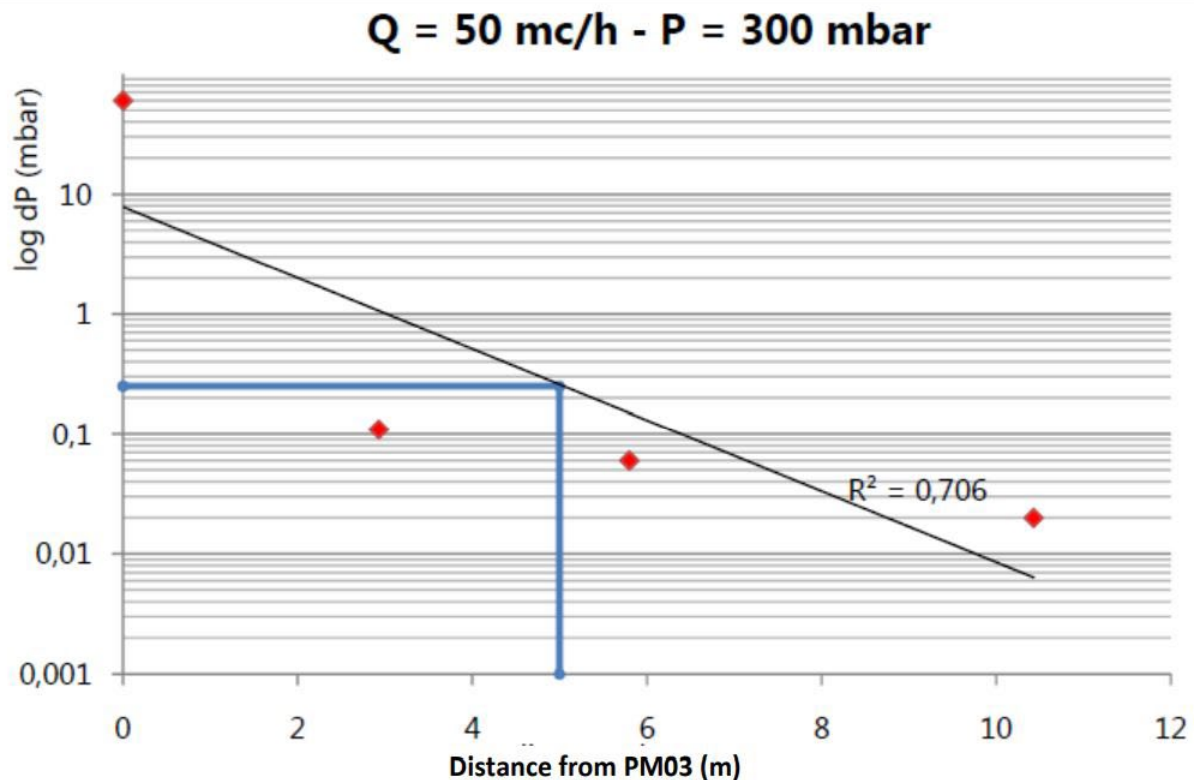


Obrázok 4.2.: Schéma hydraulickej depresie a jej vplyvu na pásmo prevzdušnenia v systéme TPE vs. DPE [25]

Okrem dvoch vyššie uvedených modifikácií sanačnej techniky je potrebné venovať osobitnú pozornosť štúdiu a pochopeniu javov, ktoré vznikajú v horninovom prostredí po spustení pilotnej skúšky viacfázovej extrakcie:

- účinok znižovania množstva znečisťujúcej látky - treba očakávať, že účinnosť znižovania koncentrácií znečisťujúcich látok prítomných v horninovom prostredí a znižovanie ich množstva, bude s plynutím času prudko klesať. Tento efekt je podmienený vyčerpaním najľahšie extrahovateľnej frakcie, ktorá sa z podložia odstraňuje advekciou (prostým prúdením vzduchu), po ktorej dochádza k odstraňovaniu znečistenia už len difúziou;
- odber podzemnej vody - údaje získané počas extrakcie budú užitočné na výpočet hydrostatických odoziev, špecifickej výdatnosti, rýchlosti extrakcie a priepustnosti;
- extrakcia pôdneho vzduchu - údaje zozbierané počas extrakcie budú užitočné na výpočet rýchlosti extrakcie znečistenia a vzduchu;
- polomer vplyvu (Radius of Influence - ROI) - na výpočet polomeru vplyvu sanačnej techniky viacfázovej extrakcie je potrebné zohľadniť podtlak na hlave vrtu aj hĺbku hladiny podzemnej vody vo vrte ako funkciu vzdialenosti a miery extrakcie pôdneho vzduchu. Ako je znázornené na nasledujúcom obrázku (obrázok 4.3), výsledkom vyššie opísanej prípadovej štúdie je určenie

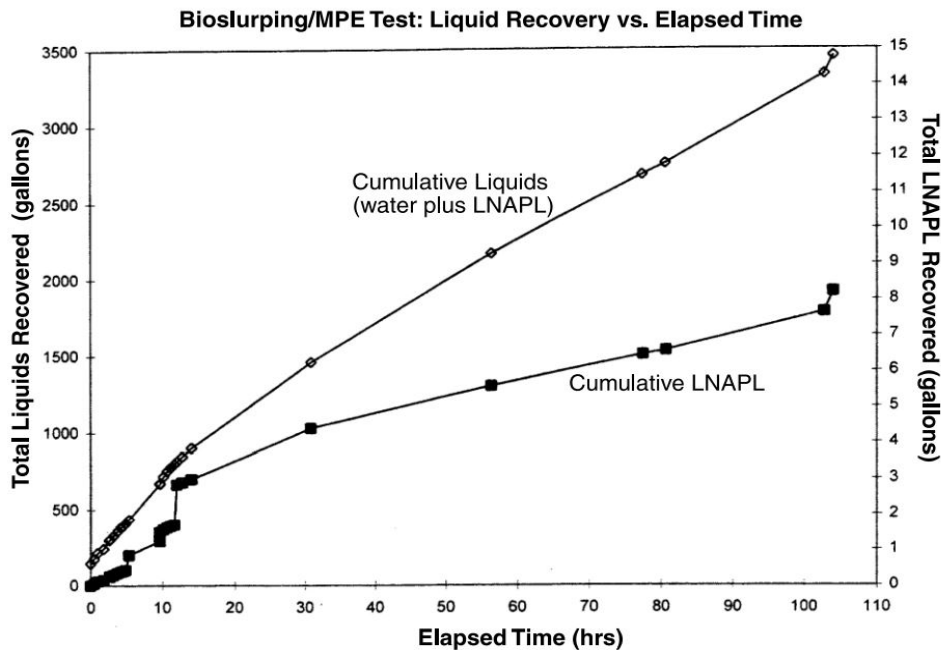
polomeru vplyvu extrakcie (so stredom v piezometri PM03) 6,5 m pri prietoku vzduchu 30 Nm³/h a 26 – 500 mbar; resp. 4,5 m s prietokom vzduchu 45 Nm³/h a podtlakom na čerpadle -300 mbar; 5 m pri prietoku vzduchu 50 Nm³/h a podtlakom na čerpadle -15 mbar.



Q / výdatnosť [m³/h] - P / tlak [mbar]; Distance from PM03 (m) - vzdialenosť od vrtu PM03 [m]

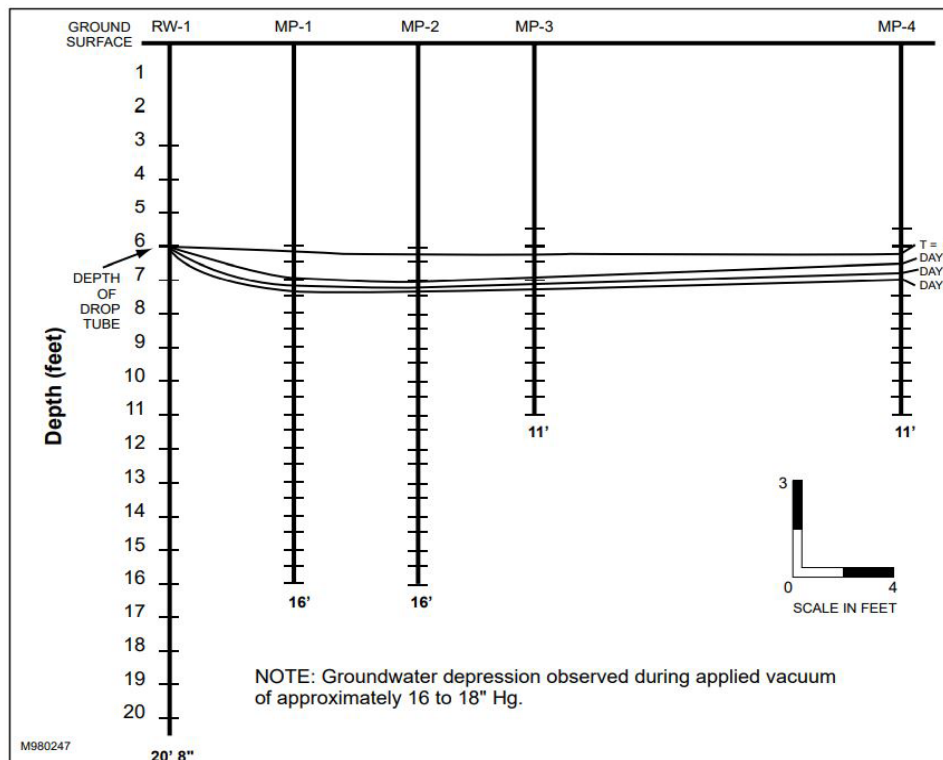
Obrázok 4.3.: Graf testu výpočtu polomeru vplyv (ROI) (so súhlasom Ing. Caldera F., Mares Italia)

V prípade bioslurpingu pôsobí slurping cyklicky, kde sa strieda extrakcia kvapaliny (plávajúcej voľnej fázy a/alebo podzemnej vody) a extrakcia pôdneho vzduchu, pričom podtlaková extrakcia (120 až 500 mm Hg) vytvára tlakový gradient (depresný kužeľ), ktorý núti k pohybu plávajúcu voľnú fázu smerom k vrtu, čo vyvoláva mierne zníženie piezometrickej hladiny vodonosnej vrstvy a zabraňuje horizontálnemu šíreniu voľnej fázy (NAPL).



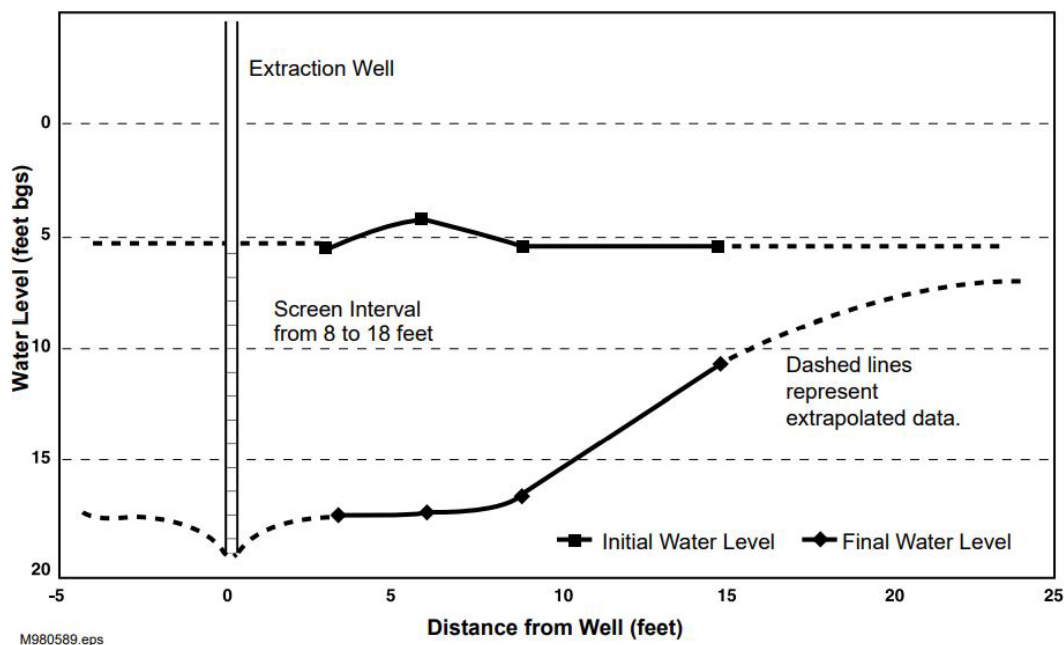
Total Liquids Recovered (gallons) - celkové množstvo získanej kvapaliny (v galónoch), *Total LNAPL Recovered (gallons)* - celkové množstvo získanej voľnej fázy látok ľahších ako voda (v galónoch), *Cummulative Liquids (water plus LNAPL)* - kumulatívne množstvo získanej kvapaliny (voda + voľná fáza látok ľahších ako voda), *Cummulative LNAPL* - kumulatívne množstvo látok ľahších ako voda, *Elapsed Time (hrs)* - Uplynutý čas (hod)

Obrázok 4.4.: Výťažnosť kvapaliny v závislosti od uplynulého času [25]



GROUND SURFACE - povrch zeme, *Depth (feet)* - hĺbka (v stopách), *DEPTH OF DROP TUBE* - hĺbka zaústenia sacieho potrubia, *DAY 1, 2, 3* - deň 1, 2, 3, *Scale in feet* - pomerná mierka v stopách, *NOTE: Groundwater depression observed during applied vacuum of approximately 16 to 18" Hg* - Depresný kužel pozorovaný pri podtlaku okolo 16 - 18" Hg.

Obrázok 4.5.: Hydraulická depresia počas pilotnej skúšky bioslurpingu [25]



Water Level (feet bgs) - hladina podzemnej vody (stopy pod povrchom), Extraction Well - extrakčný vrt, Screen Interval from 8 - 19 feet - filtračná časť vrtu od 8 - 19 stôp, Dashed lines represent extrapolated data - čiarkované čiary reprezentujú extrapolované hodnoty, Initial Water Level - pôvodná hladina podzemnej vody, Final Water Level - konečná hladina podzemnej vody

Obrázok 4.6.: Depresný kužel plytkého vrtu pri pilotnej skúške [25]

4.2 Technológia čistenia extrahovanej zmesi

Keďže systém viacfázovej extrakcie (MPE) je komplexný systém na čerpanie a čistenie rôznych fáz rôznorodých znečisťujúcich látok, zahŕňa širokú škálu možností čistenia extrahovanej zmesi po jej vyťažení z horninového prostredia.

Preto prípad k prípadu môže byť potrebná inštalácia:

- zariadenia na čistenie podzemných vôd, pričom sa nevylučujú špecifické komponenty systému, ako sú špirálové prevzdušňovače, chemické zmiešavacie nádrže, stripovacie kolóny, pieskové a uhlíkové filtre a iné;
- fázový separátor a aspoň jeden filter s aktívnym uhlím na čistenie pôdneho vzduchu;
- dvojplášťová nádrž alebo nádrž nad záchytnou nádržou na skladovanie voľnej fázy ropných látok ľahších ako voda (LNAPL).

V závislosti od vnútroštátnych a miestnych predpisov platných v mieste inštalácie sanačnej techniky viacfázovej extrakcie a pri dodržaní zákonných koncentračných limitov prítomných znečisťujúcich látok bude možné vypúšťať odpadové vody priamo do vodného toku alebo kanála alebo ich odvádzať do kanalizačného systému až po možnosť v niektorých špecifických prípadoch infiltrovať ich do horninového prostredia nad sanovaným zdrojom.

4.3 Kontrolné parametre

Pred začiatkom a počas pilotnej skúšky sa majú sledovať tieto parametre:

- voda/voľná fáza;
- podtlak, teplota a prietok extrahovaných plynov (na vysokotlakom a nízkotlakom potrubí pred odberovým čerpadlom);

- objem extrahovanej zmesi (vody a voľnej fázy);
- zníženie hladiny vo vrte;
- koncentrácie prchavých uhľovodíkov (VOC), CO₂, O₂ a CH₄ na vysokotlakých a nízkotlakých potrubíach;

Vzorky pôdneho vzduchu sa odoberajú aj na vysokotlakých a nízkotlakých potrubíach; pomocou vzorkovacieho čerpadla a vialiek s aktívnym uhlím pred začatím pilotnej skúšky a na jej konci (60 minút). Pred začatím skúšky a na jej konci (60 minút po začatí) každej skúšky MPE sa stanovujú znečisťujúce látky, ktoré sú predmetom záujmu.

Údaje, ktoré sa majú zozbierať v závislosti na modifikácii sanačnej techniky viacfázovej extrakcie (duálna - DPE alebo dvojfázová - TPE) a na cieľoch sanácie, ktorý sa majú dosiahnuť (LNAPL, SVE/BV alebo podzemná voda), sú pre lepšiu orientáciu zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 4.1.: Zber údajov a dosiahnutie cieľov [25]

PARAMETRE	DVOJFÁZOVÁ EXTRAKCIA			DUÁLNA EXTRAKCIA			Pripomienky
	LNAPL sanácia	SVE/BV	GW sanácia	LNAPL sanácia	SVE/BV	GW sanácia	
Pomer extrahovanej voľnej fázy (LNAPL) a vody	X			X			Zvyšujúca sa veľkosť podtlaku podporuje účinok
Miera odberu podzemnej vody	(X)	(X)	X	(X)	(X)	X	Zvýšenie výdatnosti čerpania by mohlo zvýšiť podtlak
Nastavenie hĺbky ústia sacieho potrubia	X	X	X				Skontrolujte rýchlosť odsávania podľa dosiahnutej hĺbky
Zmeny výšky hladiny podzemnej vody	X		X	X		X	Zmeny sú indikátorom vplyvu čerpania, väčšie zníženie, väčšie množstvo pritiahnutej voľnej fázy (LNAPL)
Zmeny tlaku v pásme prevzdušnenia		X			X		Tieto zmeny sú indikátorom vplyvu podtlaku
Odstránené množstvo podzemnej vody	X		X	X		X	Zvýšenie extrahovaného množstva môže znamenať, že je priťahované znečistenie zo zdrojovej oblasti
O ₂ , CO ₂ , CH ₄ v pôdnom vzduchu	X		X	X		X	V bioslurpingu môžu byť indikátormi biologickej aktivity
Odstránenie znečistenia v plynnej fáze		X			X		Zvyšujúca sa úroveň aplikovaného podtlaku podporuje účinok odstraňovania
X - parametre (X) - voliteľné parametre							

LNAPL - voľná fáza ropných látok ľahších ako voda, SVE/BV - extrakcia pôdneho vzduchu/bioventing, GW - podzemná voda

5 MONITOROVANIE ÚČINNOSTI

Monitorovanie sa vykonáva počas prevádzky sanačnej techniky s cieľom priebežne hodnotiť postup sanácie a overiť dosiahnutie cieľov sanácie pred ukončením sanácie. Cieľom monitorovania na lokalite je predovšetkým odhad celkového množstva odstránených ropných látok vo voľnej fáze (LNAPL), vo vodnej fáze (rozpustených v podzemnej vode) a v plynnej fáze. Plán monitorovania by mal zahŕňať častejšie odbery vzoriek na začiatku sanácie a pred jej ukončením na potvrdenie dosiahnutie cieľov sanácie. V čase prevádzky sanačnej techniky, keď systém pracuje v optimálnom režime, sa môže frekvencia a intenzita odberu vzoriek znížiť [26].

Ďalej je uvedený stručný opis hlavných parametrov, ktoré je potrebné zohľadniť počas bežného monitorovania.

5.1.1 Chemické parametre

Chemické monitorovanie kvality pôdneho vzduchu je potrebné na vyhodnotenie účinnosti sanácie. Pôdny vzduch by sa mal odoberať z jednotlivých odberových vrtov a sond. Počas prevádzkovej fázy sa na časté alebo nepretržité merania celkových prchavých uhľovodíkov (Volatile Organic Compounds - VOC) často používajú terénne prístroje, ako sú plameňové alebo fotoionizačné detektory. Merania vykonávané pomocou uvedených prístrojov by sa mali považovať za skrínigové (orientačné) metódy z dôvodu ich nešpecifických prejavov a nasledujúcich ďalších obmedzení [27]:

- Vysoký ionizačný potenciál mnohých bežných prchavých organických zlúčenín spôsobí, že sa bežnou lampou fotoionizačného detektora (PID) nedetekujú.
- Charakteristiky zmesi plynov, ako je vlhkosť, oxid uhličitý prítomnosť alkénov (najmä metánu), môžu znížiť odozvu fotoionizačného detektora (PID). Ak je však relatívna vlhkosť veľmi vysoká, takmer 100 %, vodná para môže kondenzovať na senzore, čo spôsobuje falošne pozitívnu odozvu. Tento signál je spôsobený únikom prúdu medzi elektródami v senzore [28].
- Vysoký obsah halogénov v mnohých bežných prchavých uhľovodíkoch (VOC) spôsobí podhodnotenie alebo nezistenie VOC pomocou plameňového detektora (FID).

Merania prchavých uhľovodíkov (VOC) a prietoku v prírodnej hadici do technológie viacfázovej extrakcie a prípadne v jednotlivých extrakčných vrtoch by sa mali použiť na výpočet hmotnostnej bilancie odstránenia znečisťujúcich látok z nenasurovanej pôdy.

Koncentrácie znečisťujúcich látok sa zvyčajne merajú na vstupe a výstupe z čističky odpadových plynov (pred a za uhlíkovými filtrami) na posúdenie účinnosti systému čistenia emisií pred ich vypustením do ovzdušia.

Monitorovanie chemických látok v podzemných vodách je potrebné na vyhodnotenie postupu ich sanácie sanačnou technikou. Kvalita odoberanej podzemnej vody sa môže časom meniť, preto je monitorovanie koncentrácií znečisťujúcich látok potrebné na výpočet trendu znižovania obsahu rozpustených znečisťujúcich látok [9]. Okrem toho by sa mala sledovať aj (ak je prítomná) hrúbka voľnej fázy (LNAPL). Extrahovaná podzemná voda by sa mala z času na čas analyzovať aj na parametre, ktoré môžu ovplyvniť účinnosť čistiacej jednotky (napr. Fe, uhličitany....).

Koncentrácie znečisťujúcich látok by sa mali merať na vstupe do čistiarne podzemnej vody, v medzibode čistenia a na výstupe, aby sa vypočítala hmotnostná bilancia odstránenia znečisťujúcich látok z podzemnej vody, odhadol čas opotrebovania filtrov s aktívnym uhlím a skontrolovalo dodržiavanie limitov vypúšťania.

5.1.2 Fyzikálne parametre

Meranie teploty horninového prostredia, pôdy a pôdneho vzduchu: údaje o teplote pôdneho vzduchu môžu pomôcť vyhodnotiť účinnosť systému odsávania pôdneho vzduchu a umožniť normalizáciu

údajov o prietoku. Teplota pôdy by mohla byť indikátorom biodegradačných procesov prebiehajúcich v pásme prevzdušnenia: v prípade silnej biodegradácie možno namerať zvýšenie teploty podzemnej vody o niekoľko stupňov.

Relatívna vlhkosť: obsah vlhkosti znižuje objem pórov, ktorý vplýva na prúdenie kvapaliny. Preto môže vysoká vlhkosť znížiť priepustnosť zemín pásma prevzdušnenia pre pôdny vzduch; z rovnakého dôvodu môže ovplyvniť výsledky monitorovania pôdneho vzduchu. Okrem toho, relatívnu vlhkosť odsávaného pôdneho vzduchu možno znižovať na ochranu dúchadla a na podporu účinnosti systému čistenia emisií (adsorpčná kapacita aktívneho uhlia sa výrazne znižuje, keď je relatívna vlhkosť vyššia ako 50 %). Relatívnu vlhkosť toku pôdneho vzduchu možno zvyčajne znížiť pomocou systému ohrevu vzduchu [26]. Potrebné teplo často dodáva nainštalované dúchadlo. Ohrev toku pôdneho vzduchu je limitovaný najvyššou prípustnou teplotou, ak sa používa aktívne uhlie.

Hladina vody: je potrebné venovať osobitnú pozornosť kolísaniu hladiny podzemnej vody, pretože by to mohlo ovplyvniť fázovú rovnováhu znečisťujúcich látok medzi pevnou, kvapalnou a plynnou fázou. Okrem toho môže stúpanie hladiny spôsobiť nadbytok vlhkosti v sanovanej zóne a môže tiež znížiť sorpčnú kapacitu aktívneho uhlia pri čistení pôdneho vzduchu. Tento problém možno zmierniť zlepšením separácie kvapalín z extrahovaného média a/alebo aktívnym čerpaním podzemnej vody, aby sa pôsobilo proti zdvihu hladiny podzemnej vody v okolí extrakčného vrtu [26]. Použitie podtlaku vo vrte spôsobí, že vodný stĺpec sa pri použití podtlaku v sanačnom vrte zvýši. V prípade viacfázovej extrakcie je však zvyčajne k dispozícii odsávacie potrubie, alebo samostatné čerpadlo na čerpanie podzemnej vody a/alebo voľnej fázy v sanovanom úseku. Preto tento zdvih nepredstavuje rovnaké problémy, aké sa vyskytujú pri systémoch extrakcie pôdneho vzduchu/bioventingu (SVE/BV), keď sa dvíha horná hranica pásma nasýtenia [9]. Monitorovanie hladiny vody umožňuje aj vyhodnocovanie účinnosti systému viacfázovej extrakcie z hľadiska hydraulického zadržiavania (šírenia sa) znečistenia. Pri sanačnej technike viacfázovej extrakcie sa pozoruje nižšia hladina podzemnej vody v extrakčnom vrte (vrtoch). Hladina vodného stĺpca nameraná v extrakčnom vrte je zvyčajne nižšia ako hladina vody v príľahlej vodonosnej vrstve v dôsledku menšej prietočnosti vrtom a strát [29]. Ďalšie straty vo vrte môžu vzniknúť v dôsledku turbulentného prúdenia vo vnútri vrtu a cez štrbiny filtra vrtu [30]. Použitie údajov o hladinách podzemnej vody z extrakčných vrtov môže skresliť interpretáciu extrakcie, pretože hladiny vody v extrakčných vrtoch môžu byť oveľa nižšie ako hladiny vody vo zvodnenci tesne za vrtom. Zóna extrakcie sa tak môže interpretovať ako väčšia, ako v skutočnosti je, keď sa na interpretáciu použijú hladiny vody z extrakčných vrtov. Aby sa predišlo týmto problémom, EPA odporúča inštalovať piezometer (monitorovací vrt hladiny podzemnej vody) v blízkosti každého extrakčného vrtu. Piezometre je možné inštalovať aj vo filtračnom obsype extrakčných vrtov. Tento prístup však neodstráni niektoré príčiny neefektívnosti vrtov (napr. poškodenie tvaru vrtu v dôsledku zlej konštrukcie vrtu) [30].

Prietok vody: Rýchlosť čerpania podzemnej vody sa môže merať pomocou meračov na aktuálny a kumulatívny prietok (prietokomerov), alebo meraním akumulácie v záchytnej nádrži v danom čase po oddelení od voľnej fázy (NAPL). Počiatočné prietoky budú veľmi dôležité pre vyhodnotenie podmienok extrakcie vo vrte (vrtoch) a mali by sa merať často, dokonca každý deň, každú hodinu. Po separácii sa prietok voľnej fázy (NAPL) môže vo všeobecnosti merať podobne ako v prípade podzemnej vody. Prietokomery na meranie voľnej fázy (NAPL) však musia byť kalibrované na špecifickú hmotnosť voľnej fázy (NAPL) [9].

Meranie prietoku vzduchu: Údaje o prietoku z každého vrtu v spojení s príslušným aplikovaným podtlakom môžu poskytnúť informácie o priepustnosti zemín pásma prevzdušnenia pre vzduch. Odporúča sa normalizovať prietoky na štandardnú teplotu a tlak, aby sa údaje získané pri rôznych prieskumoch dali ľahko porovnať.

Meranie podtlaku/tlaku: meranie vyvolaných podtlakov na rôznych miestach a v rôznych hĺbkach poskytuje informácie o cestách prúdenia vzduchu. Tlakové gradienty určené na základe meraní

podtlaku by sa mali spojiť s odhadmi horizontálnej a vertikálnej vodivosti zemín pre vzduch, aby bolo možné posúdiť dobu prúdenia alebo jeho rýchlosť [31].

Hrúbka voľnej fázy (NAPL) a jej pokles v extrakčných a monitorovacích vrtoch by sa mali monitorovať za účelom nastavenia systému viacfázovej extrakcie (MPE) (regulácia prietoku v každom extrakčnom vrte, nastavenie vertikálnej polohy sacích potrubí, odhad naplnenia zásobníka voľnej fázy) a na vyhodnotenie postupu sanácie podzemnej vody.

5.1.3 Meteorologické údaje

Meteorologické údaje (napr. zrážky, barometrický tlak, teplota vzduchu) by sa mali zaznamenávať a zohľadňovať pre správne vyhodnotenie výsledkov monitorovania.

Zrážky: Zrážky obmedzujúce transport prchavých znečisťujúcich látok v pásme prevzdušnenia môžu významne ovplyvniť výkonnosť viacfázovej extrakcie a výsledky monitorovania pôdneho vzduchu. Preto by sa odber vzoriek pôdneho vzduchu nemal uskutočniť po výraznom daždi (12 mm alebo viac zrážok počas 24 hodín). Čakacia doba by mala vychádzať z kriviek odvodnenia pôdy [32]. Zrážky by mohli ovplyvniť aj kolísanie hladiny podzemnej vody v prípade plytkých, neuzavretých vodonosných vrstiev (s voľnou hladinou).

Barometrický tlak: Kolísanie atmosférického tlaku vyvoláva výmenu plynov medzi atmosférou a horninovým prostredím/pôdou. Pohyb pôdneho vzduchu v pásme prevzdušnenia vyvolaný prirodzeným kolísaním atmosférického tlaku predstavuje barometrické čerpanie. Keď atmosférický tlak klesá, plyny sa z pôdy (zemín) dostávajú nahor do atmosféry. A naopak, pri vysokom tlaku je čerstvý vzduch tlačенý smerom nadol do pôdnych vrstiev [33]. Vplyv kolísania barometrického tlaku na transport atmosférických plynov sa preto môže výraznejšie prejavovať v období odstávky.

5.2 Potvrdenie dosiahnutia cieľov sanácie a ukončenie sanácie

Cieľom sanácie je vo všeobecnosti dosiahnutie vopred stanovených cieľových hodnôt pre rôzne zložky životného prostredia a znečisťujúce látky. Kritériá pre ukončenie prevádzky viacfázovej extrakcie sú zvyčajne založené na dosiahnutí nejakého legislatívneho limitu alebo cieľovej hodnoty sanácie založenej na výpočte rizika pre horninové prostredie, pôdu a podzemnú vodu, v niektorých prípadoch na hrúbke voľnej fázy (LNAPL) alebo na dosiahnutí asymptoty koncentrácií. Odber vzoriek zemín je však nákladný a potenciálne deštruktívny. Okrem toho si presné sledovanie zvyškového znečistenia vyžaduje analýzu veľkého počtu vzoriek, pretože zemina ako nerovnorodé prostredie je heterogénna [26]. Preto sa pred začatím rozsiahleho posačného geologického prieskumu na znečistenie zemín môže zväziť/monitorovanie iných parametrov (dôkazných línií) na posúdenie pokroku v sanácii a vyhodnotenie, či sa potencionálne dosiahli ciele sanácie.

5.2.1 Možné dôkazné línie, ktoré sa zväžia na potvrdenie dosiahnutia cieľov sanácie

Odber vzoriek zemín: pri použití vzoriek zemín na potvrdenie dosiahnutia cieľov sanácie a jej ukončenia sa musí starostlivo zväziť heterogénna distribúcia znečisťujúcich látok na lokalite a neistoty spojené s odberom vzoriek zemín, najmä v prípade prchavých uhľovodíkov (VOC) [26].

Trend znižujúcej sa koncentrácie znečisťujúcich látok v extrahovanej vode a pôdnom vzduchu: koncentrácia znečisťujúcich látok v extrakčných vrtoch môže poskytnúť ukazovateľ stupňa odstránenia znečisťujúcich látok a indikovať pokrok v sanácii. Zvyčajne po niekoľkých mesiacoch prevádzky trend údajov vykazuje rýchly pokles, po ktorom sa koncentrácie približujú k asymptotickým¹² úrovňam (pozri obr. 5.1 a obr. 5.2). V mnohých prípadoch sa dosiahnutie asymptotického stavu považuje za rozhodujúce pri stanovení limitov výkonnosti techniky a ukončenia sanácie viacfázovou extrakciou.

¹² asymptotický - limitne sa približujúci

Pozorovanie nízkych asymptotických koncentrácií znečisťujúcich plynov v odsávanom pôdnom vzduchu je však nevyhnutnou, ale nie vždy postačujúcou podmienkou na preukázanie pokroku v odstraňovaní znečistenia pôdneho vzduchu. Asymptota na výstupe môže rovnako dobre súvisieť s konštrukciou sanačného systému (napr. vzdialenosťou medzi vrtmi) alebo prevádzkovými podmienkami (napr. rýchlosťou prúdenia), ktoré každé zvlášť, alebo spolu môže viesť k obmedzenej prenosovej rýchlosti [34]. Extrakcia pôdneho vzduchu je účinnejšia v častiach zeminy v blízkosti vrtov alebo medzi nimi, ktoré sú dôkladne premyté. Preto môžu koncentrácie znečisťujúcich látok v pôdnom vzduchu dosiahnuť veľmi nízke asymptotické úrovne, zatiaľ čo v zemine zostáva značné množstvo znečisťujúcich látok, najmä v zónach stagnácie prúdenia vzduchu. Dosiahnutie asymptotických úrovní koncentrácie znečisťujúcich látok v extrahovanej vode/vzduchu môže znamenať, že počas prevádzkovej fázy dochádza k prenosu znečistenia s obmedzenou rýchlosťou. Predpokladajme, že rýchlosť extrakcie prevyšuje rýchlosť difúzneho prenosu znečistenia medzi fázami (tuhou, kvapalnou a plynnou) v horninovom prostredí. V takom prípade sa koncentrácie znečisťujúcich látok môžu znížiť bez toho, aby sa znečistenie z horninového prostredia (zemín), či podzemnej vody odstránilo [26].

Monitorovanie pôdneho vzduchu: odber vzoriek pôdneho vzduchu je menej nákladný a keďže vzduch je zmiešané médium, vo všeobecnosti predstavuje integrovanejšie údaje (t. j. reprezentujúce väčšiu oblasť). Preto je monitorovanie prchavých uhľovodíkov (VOC) v pôdnych sondách pravdepodobne účinnejšou a efektívnejšou metódou na hodnotenie pokroku v sanácii ako metódy predtým opísané v predchádzajúcich bodoch. Odber vzoriek pôdneho vzduchu by sa však mal vykonávať štandardným postupom, ktorý zohľadňuje vplyv terénnych podmienok (napr. litológia, vlhkosť) a parametrov odberu vzoriek (napr. rýchlosť odberu, objem vzorky) na výsledky monitorovania. Pôdne sondy by sa mali inštalovať aj v oblastiach vzdialených od extrakčných vrtov, ktoré je ťažšie sanovať, na sledovanie zvyškového znečistenia.

Monitorovanie podzemných vôd: sanácia pásma prevzdušnenia by sa nemala vykonávať nezávisle od stavu podzemných vôd. Pásmo prevzdušnenia môže byť opätovne znečistené kapilárnym pôsobením a kolísaním hladiny podzemnej vody. Koncentrácie znečisťujúcich látok v podzemnej vode by sa mali monitorovať aj s cieľom vyhodnotiť prenos znečistenia z vodnej fázy do pôdneho vzduchu. Najmä v prípade prítomnosti voľnej fázy látok ľahších ako voda (LNAPL) by sa sanačné úsilie malo zamerať na tzv. zónu rozptylu. Akumulácie voľnej fázy ľahšej ako voda (LNAPL) na hladine podzemnej vody alebo v jej blízkosti sú náchylné na "rozptyl" v dôsledku zmien výšky hladiny podzemnej vody, napríklad v dôsledku sezónnych zmien, vplyvu prílivu a odlivu v pobrežnom prostredí, odvodňovania spôsobeného čerpaním. Voľná fáza (LNAPL) sa pri stúpaní alebo klesaní hladiny podzemnej vody zadržiava v póroch zeminy a zanecháva za sebou zvyškovú "zónu rozptylu" voľnej fázy (LNAPL). Ak dôjde k rozptylu počas poklesu hladiny podzemnej vody, zvyšky voľnej fázy (LNAPL) sa môžu rozpustiť a znovu znečistiť podzemnú vodu, keď sa hladina podzemnej vody opäť zvýši [35]. V prípade úniku voľnej fázy ľahšej ako voda, keď sú koncentrácie podzemnej vody v zóne "rozptylu" na oveľa vyšších úrovniach ako pod touto zónou, by sa malo zvážiť agresívnejšie odvodnenie a aplikácia ventingu [27].

Spätná rekontaminácia (rebound): počas prevádzky sanačnej techniky sa spravidla pozoruje pokles koncentrácií znečisťujúcich látok v podzemnej vode a v zeminách ako dôsledok odstraňovania znečistenia limitovanou rýchlosťou (starvation effect - efekt nedostatčnosti). Preto po vypnutí techniky viacfázovej extrakcie môžu koncentrácie znečisťujúcich látok opätovne vzrásť v dôsledku difúzie medzi rôznymi fázami horninového prostredia, čím vzniká jav, ktorý sa zvyčajne opisuje ako spätná rekontaminácia (rebound effect). Okrem toho, ak je prítomná voľná fáza (NAPL), heterogenity, ako sú vrstvy alebo šošovky málo priepustného horninového materiálu, potrebujú dlhší čas na to, aby sa vyplavili prostredníctvom vyvolaného prúdenia vzduchu alebo vody. Tiež sa znečisťujúce látky mohli rozšíriť do takýchto (málo priepustných) polôh, sorbovať sa na povrch častíc alebo byť prítomné ako voľná fáza pri zvyškovom nasýtení. Preto v týchto prípadoch môže byť spätná rekontaminácia spôsobená rozpúšťaním voľnej fázy (NAPL), desorpciou znečisťujúcich látok a spätnou difúziou z nízko priepustných do vysoko priepustných polôh horninového prostredia [36]. Z uvedených dôvodov možno spätnú rekontamináciu považovať za spoľahlivý ukazovateľ účinnosti čistenia, minimálna miera spätnej

rekontaminácie alebo jej absencia aj v stagnujúcich zónach po určitom období od ukončenia sanácie naznačuje, že dostupné znečistenie bolo pravdepodobne odstránené. Časové obdobie potrebné na dosiahnutie rovnováhy je špecifické pre znečisťujúcu látku a typ pôdy. Piesočnaté zeminy vo všeobecnosti dosiahnu rovnováhu za niekoľko týždňov, zatiaľ čo v prípade viac vrstevnatých zemín môže byť potrebných niekoľko mesiacov. Odporúča sa každoročné testovanie dosiahnutia rovnováhy (spätnej rekontaminácie) [37]. Ak sa pozoruje výrazná rekontaminácia znečisťujúcou látkou, možno zvážiť tieto prevádzkové riešenia: inštalovať ďalšie vrty, vykonať pulznú viacfázovú extrakciu a znížiť prietoky.

5.2.2 Navrhovaný spôsob monitorovania po ukončení sanácie

Kritériá konečného odstavenia systému viacfázovej extrakcie (MPE) sú zvyčajne založené na dosiahnutí stanovených cieľových hodnôt sanácie v zeminách, pôdnom vzduchu a podzemnej vode. Ako však už bolo uvedené, keďže odber vzoriek zemín je nákladný a deštruktívny, pred začatím rozsiahleho posanačného geologického prieskumu s odberom vzoriek zemín sa sledujú iné parametre (dôkazné línie), aby sa vyhodnotilo, či sa pravdepodobne dosiahli ciele sanácie. Preto sa navrhuje nasledujúci postup na potvrdenie dosiahnutia cieľov sanácie založený na trojstupňovom overovacom procese.

- Dosiahnutie cieľových hodnôt sanácie podzemnej vody a pôdneho vzduchu počas prevádzkovej fázy.
- Dosiahnutie cieľových hodnôt sanácie podzemnej vody a pôdneho vzduchu po dočasnom odstavení sanačnej techniky.
- Porovnanie výsledkov odobraných vzoriek zemín s cieľovými hodnotami sanácie.

6 ZÁVER

Viacfázová extrakcia (Multi-Phase Extraction - MPE) je jednou z preferovaných sanačných techník v prípade prítomnosti voľnej fázy látok ľahších ako voda (LNAPL) a v prípade znečistenia prchavými/poloprchavými látkami v pásme prevzdušnenia a pásme nasýtenia horninového prostredia. Na sanáciu je často potrebné len jedno nadzemné čerpadlo na rozdiel od potreby umiestnenia čerpadla v každom vrte. Okrem týchto výhod aplikácia sanačnej techniky môže spôsobiť biodegradáciu uhľovodíkov v pásme prevzdušnenia a stripovanie (odstránenie prevzdušením) prchavých uhľovodíkov (Volatile Organic Compound - VOC) z pásma prevzdušnenia.

Existujú dva najčastejšie spôsoby aplikácie sanačnej techniky: systém duálnej extrakcie (Dual-Phase Extraction - DPE) s jedným čerpadlom (väčšinou kvapalinokružným - prstencovým čerpadlom na vytvorenie dostatočnej depresie), na ktoré je napojený separačný systém (odlučovače) na vodu, plyn a voľnú fázu; systém dvojfázovej extrakcie (Two-Phase Extraction - TPE) s dvoma čerpadlami (jedno na zníženie hladiny podzemnej vody, druhé na voľnú fázu a pásma prevzdušnenia, na ktoré je napojený tiež systém odlučovačov).

Pred realizáciou sanácie je potrebné dobre pochopiť koncepčný model lokality (geológia, hydrogeológia, typ znečisťujúcich látok, ...). V prípade väčších sanácií sa odporúča vykonať terénnu (pilotnú) skúšku. V každom prípade je potrebné dobré monitorovanie účinkov sanačnej techniky; toto monitorovanie bude musieť pokračovať aj po ukončení sanácie, aby sa zachytila potenciálna spätná rekontaminácia.

Úspech viacfázovej extrakcie závisí od (hydro)geológie (heterogenita, priepustnosť) a typu znečisťujúcej látky (voľnej fázy). Vo všeobecnosti možno väčšiu časť znečistenia odstrániť, ale zníženie znečistenia o viac ako 1 až 2 rády je sotva možné. Cieľové hodnoty sanácie môžu byť založené na hrúbke voľnej fázy ľahšej ako voda (Light Non-Aqueous Phase Liquid - LNAPL), koncentráciách znečistenia v podzemnej vode a pôdnom vzduchu; cieľové hodnoty sanácie môžu byť definované ako absolútne hodnoty alebo môžu dosiahnuť asymptótu (stav blízky limitnému).

ZDROJE

- [1] AFCEE, 2001. *United States Air Force Environmental Restoration Program: Guidance on Soil Vapour Extraction Optimization*. Air Force Centre for Environmental Excellence, Brooks Air Force Base, Texas. Last accessed July 17, 2012, at <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA392205>;
- [2] Berglund S., Cvetkovic V., 1995: "Pump-and-Treat Remediation of Heterogeneous Aquifers: Effects of Rate-Limited Mass Transfer", *groundwater* vol. 33 - n.4
- [3] Cal/EPA, 2015: California Environmental Protection Agency, *Advisory – Active Soil Gas Investigations*, Department of Toxic Substances Control.
- [4] Kuang et al., 2013 *Review on airflow in unsaturated zones induced by natural forcings*. *Water Resour. Res.*, 49 (2013), pp. 6137-6165
- [5] 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.
- [6] Newell, C. J., S. D. Acree, R R. Ross, AND S G. Huling, 1995. "Light Nonaqueous Phase Liquids". U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/540/S-95/500 (NTIS 95-267738), 1995.
- [7] RAE System, 2013 *The PID handbook. Theory and Applications of Direct-Reading Photoionization Detectors*, ISBN: 0-9768162-1-0
- [8] USACE. 2002. *Engineering and Design: Soil Vapour 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
- [9] USACE, 1999. *Engineering and Design Multi-Phase Extraction, Engineer Manual 1110-1-4010*, June 1999. from:
https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-1-4010.pdf
- [10] USEPA, 2008. *A Systematic Approach for Evaluation of Capture Zones at Pump and Treat Systems – Final Project Report*, January 2008, EPA 600/R-08/003.
- [11] Truex, M. J., D. J. Becker, M. A. Simon, M. Oostrom, A. K. Rice, AND C. D. Johnson. "Soil Vapour Extraction System Optimization, Transition, and Closure Guidance", PNNL-21843. U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2013.
- [12] USEPA. (1999). Multi-Phase Extraction: State-of-the-Practice. Retrieved in June 15, 2022 from:
<https://www.epa.gov/remedytech/multi-phase-extraction-state-practice>
- [13] USEPA. (1993). Presumptive Remedies Site Characterisation and Technology Selection for CERCLA Sites with VOCs in Soils. EPA/540/F-93/048. Retrieved in June 15, 2022 from:
<https://semspub.epa.gov/work/02/65012.pdf>
- [14] Baker, R., Groher, D, Becker, D. (1999). Minimal desaturation found during multi-phase extraction of low permeability soils. *Ground Water Currents*. 33. Retrieved in June 19, 2022 from: <https://clu-in.org/products/newsletters/gwc/gwc0999.htm#minimal>
- [15] USEPA. (1997). Presumptive Remedy: Supplemental Bulletin Multiphase Extraction (MPE) Technology for VOCs in Soil and Groundwater. Retrieved in June 15, 2022 from:
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000L29B.PDF?Dockkey=2000L29B.PDF>
- [16] FRTR. (2020). FRTR technology screening matrix: multi-phase extraction. Retrieved In June 21, 2022 from: https://frtr.gov/matrix/pdf/Multi-Phase_Extraction.pdf
- [17] USEPA. (1997b). Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction. EPA-542-R-97-007. Retrieved in June 16, 2022 from: <https://clu-in.org/download/remed/sveenhmt.pdf>

- [18] Peyton, Leeson, and Gibbs. (1996). Bioslurping/Bioventing Demonstration in Tight Soils at Tinker AFB Southwest Tanks Site. Report No. AL/EQ-TR-1996-0046. Retrieved in June 19, 2022 from: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA332738.pdf>
- [19] USEPA. (n.d.). MULTI-PHASE EXTRACTION AND PRODUCT RECOVERY. Air-Based Remediation Technologies. Retrieved in June 21, 2022 from: <https://clu-in.org/download/techfocus/mpe/abr09-5-mpe.pdf>
- [20] ITRC. (2009). Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals. Retrieved in June 21, 2022 from: <https://frtr.gov/matrix/documents/Multiphase-Extraction/2009-Evaluating-LNAPL-Recovery-Technologies-for-Achieving-Project-Goals.pdf>
- [21] FRTR. (2020). Table 3-2. Treatment Technology Screening Matrix. Retrieved in June 26, 2022 from: https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf
- [22] Ji, W., Dahmani, A., Ahlfeld, D. P., Lin, J. D., and Hill, E., III (1993). Laboratory study of air sparging: air flow visualisation. *Ground Water Monitoring Rev.*, 13(4), 115–126.
- [23] Baker, R.S., Groher, D.M. (1998). Does multi-phase extraction require soil desaturation to remediate chlorinated sites? In: Wickramanayake, G.B., and Hincsee, R.B. (Eds.) *Physical, Chemical and Thermal Technologies: Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*. pp. 175-180. Battelle Press, Columbus, OH.
- [24] [Fact sheet - presumptive remedy: supplemental bulletin multi-phase extraction \(mpe\) technology for vocs in soil and groundwater EPA](https://semsub.epa.gov/work/HQ/174624.pdf), April 1997 directive No. 9355.0-68FS, EPA 540-F-97-004 PB97-963501, freely downloadable at <https://semsub.epa.gov/work/HQ/174624.pdf>
- [25] [Multi-phase extraction - Engineer Manual 1110-1-4010, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000 Engineer Manual 1110-1-4010](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-1-4010.pdf?ver=2013-09-04-161049-977), July 1999, freely downloadable at https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-1-4010.pdf?ver=2013-09-04-161049-977
- [26] USACE. 2002. *Engineering and Design: Soil Vapour 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
- [27] 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.
- [28] RAE System, 2013 *The PID handbook. Theory and Applications of Direct-Reading Photoionization Detectors*, ISBN: 0-9768162-1-0
- [29] [30] USEPA, 2008. *A Systematic Approach for Evaluation of Capture Zones at Pump and Treat Systems* – Final Project Report, January 2008, EPA 600/R-08/003.
- [31] Truex, M. J., D. J. Becker, M. A. Simon, M. Oostrom, A. K. Rice, AND C. D. Johnson. “Soil Vapour Extraction System Optimization, Transition, and Closure Guidance”, PNNL-21843. U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2013.
- [32] Cal/EPA, 2015: California Environmental Protection Agency, *Advisory – Active Soil Gas Investigations*, Department of Toxic Substances Control.
- [33] Kuang et al., 2013 *Review on airflow in unsaturated zones induced by natural forcings*. *Water Resour. Res.*, 49 (2013), pp. 6137-6165
- [35] 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.

- [35] Newell, C. J., S. D. Acree, R R. Ross, AND S G. Huling, 1995. "Light Nonaqueous Phase Liquids". U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/540/S-95/500 (NTIS 95-267738), 1995.
- [36] Berglund S., Cvetkovic V., 1995: "Pump-and-Treat Remediation of Heterogeneous Aquifers: Effects of Rate-Limited Mass Transfer", groundwater vol. 33 - n.4