



**B2(008)/Bratislava – Ružinov – Na paši č.4 – chemická čistiareň
(SK/EZ/B2/124)**

Štúdia uskutočniteľnosti sanácie

Bratislava, september 2023

**B2(008)/Bratislava – Ružinov – Na paši č.4 – chemická čistiareň
(SK/EZ/B2/124)**

Štúdia uskutočniteľnosti sanácie

Zodpovedný riešiteľ: RNDr. Katarína Kminiaková, PhD.

Vypracovali: RNDr. Slavomír Mikita, PhD.
Ing. Marek Kováčik
RNDr. Jan Bartoň

Bratislava, september 2023

Výtlačok č. 1

Rozdeľovník

Výtlačok č. 1: objednávatel' prác - Metrostav Slovakia a.s., Mlynské Nivy 68, 824 77 Bratislava
Výtlačok č. 2: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Oddelenie Geofondu a informačných systémov,
Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11
Výtlačok č. 3: zhotoviteľ prác – AQUIFER, s.r.o., Bleduľová 66, 841 08 Bratislava

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. Charakteristika lokality	5
2.1 Všeobecné údaje o území.....	5
2.1.1 Vymedzenie skúmaného územia.....	5
2.1.2 Údaje o činnosti, ktorá viedla ku vzniku environmentálnej záťaže.....	6
2.2 Prírodné pomery.....	7
2.2.1 Geomorfologické pomery	7
2.2.2 Geologické pomery	7
2.2.3 Hydrogeologické pomery	8
2.2.4 Klimatické pomery.....	9
2.2.5 Hydrologické pomery.....	10
2.3 Výsledky prieskumných prác znečistenia životného prostredia.....	12
2.3.1 Výsledky doplnkového geologického prieskumu a aktualizovanej analýzy rizika.....	14
3. Základné koncepčné varianty nápravných opatrení.....	19
4. Identifikácia vhodných sanačných techník a technológií	23
4.1 Metódy sanácie horninového prostredia znečisteného alifatickými chlórovanými uhľovodíkmi.....	23
4.1.1 Sanácia za účelom dosiahnutia cieľa sanácie a cieľových hodnôt sanácie	28
4.1.1.1. Metóda biologickej reduktívnej dehalogenizácie (BRD).....	28
4.1.1.2. Metóda chemickej oxidácie in situ (ISCO).....	29
4.1.1.3. Metóda chemickej redukcie in situ (ISCR) pomocou nZVI.....	31
4.1.1.4. Sanačné čerpanie a čistenie podzemnej vody s využitím air strippingu a adsorpcie.....	34
4.1.1.5. Airsparging + venting.....	35
5. Multikriteriálne vyhodnotenie a výber optimálneho variantu sanácie.....	37
6. Rámcové riešenie návrhu sanácie metódou chemickej oxidácie in-situ (ISCO) v kombinácii s metódou airsparging + venting a sanačné čerpanie a čistenie	40
6.1 Predsanačná etapa.....	45
6.2 Sanačná etapa	46
6.3 Posanačná etapa.....	49
7. Záver.....	49
8. Zoznam použitej literatúry	51

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Potenciálne zdroje znečistenia v areáli čistiarní (spracované na základe prieskumných prác Polák, R., 1992; Urban, O., et al. 2015)	6
Obrázok 2: Priemerné teploty a úhrn zrážok pre Bratislavu (www.meteoblue.com).....	10
Obrázok 3: Diagram zrážok pre Bratislavu s počtom dní v mesiaci, v ktorých spadne isté množstvo zrážok (www.meteoblue.com).....	10
Obrázok 4: Potenciálne zdroje znečistenia v hodnotenom areáli s pozíciou všetkých prieskumných diel – súčasná a minulé etapa (Kminiaková et al., 2023).....	15
Obrázok 5: Schéma fungovania systému chemickej oxidácie pri zapojení vo forme kontinuálnej recirkulácie (US EPA, 2000).....	41

Obrázok 6: Aeračný systém s extrakciou pôdneho vzduchu (Reddy, 2006)	43
Obrázok 7: Vplyv hydraulického clony na hladinu podzemnej vody a kontaminačný mrak - vertikálny a horizontálny rez (Cohen et al, 1997).....	44
Obrázok 8: Schematické vyjadrenie usporiadania sanačných technológií v reze v smere prúdenia podzemnej vody	46

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Identifikačné údaje o záujmovom území.....	5
Tabuľka 2: Sumárne vyjadrenie znečistenia v podzemnej vode	16
Tabuľka 3: Materiálová bilancia znečistených zemín - nad ID a nad IT hodnotu (Urban et.al., 2015). 17	
Tabuľka 4: Materiálová bilancia znečistených zemín - nad IT hodnotu (Urban et.al., 2015).....	18
Tabuľka 5: Množstvo znečisťujúcej látky PCE v podzemnej vode	18
Tabuľka 6: Matica sanačných metód a postupov realizovaných pri dekontaminácii prostredia znečisteného halogénovanými prchavými organickými látkami (FRTR, 2008)	25
Tabuľka 7: Multikriteriálne hodnotenie identifikovaných sanačných metód	37

Zoznam skratiek

AR	<i>analýza rizika znečisteného územia</i>
AOX	<i>adsorbovateľné organicky viazané halogény</i>
BOZP	<i>bezpečnosť a ochrany zdravia pri práci</i>
BRD	<i>metóda biologickej reduktívnej dehalogenácie</i>
BTEX	<i>skupina prchavých organických zlúčenín – benzén, toluén, etylbenzén, xylény</i>
BVS	<i>Bratislavská vodárenská spoločnosť, a.s.</i>
CHS	<i>cieľová hodnota sanácie</i>
CIU	<i>chlórované uhľovodíky</i>
DCE	<i>dichlóretén</i>
ISCO	<i>metóda chemickej oxidácie in situ</i>
ISCR	<i>metóda chemickej redukcie in situ</i>
nZVI	<i>nulavalentné nanoželezo</i>
PAU	<i>polycyklické aromatické uhľovodíky</i>
PCB	<i>polychlórované bifenylly</i>
PCE	<i>tetrachlóretylén</i>
VF-PCE	<i>voľná fáza PCE</i>
ŠU	<i>štúdiá uskutočniteľnosti</i>
TCE	<i>trichlóretylén</i>
TOC	<i>celkový organický uhlík</i>
VC	<i>vinylchlorid</i>

1. ÚVOD

Predložená štúdia uskutočniteľnosti je súčasťou záverečnej správy z doplnkového geologického prieskumu životného prostredia potvrdenej environmentálnej záťaže „B2 (008) / Bratislava – Ružinov – Na paši č. 4 – chemická čistiareň (SK/EZ/B2/124)“.

Cieľom štúdie uskutočniteľnosti je návrh a zhodnotenie variantov sanácie znečisteného územia, vrátane odhadu finančných nákladov nápravných opatrení. Podkladom pre vypracovanie štúdie uskutočniteľnosti sú najmä výsledky uvedené v záverečnej správe s analýzou rizika z doplnkového geologického prieskumu životného prostredia potvrdenej environmentálnej záťaže „B2 (008) / Bratislava – Ružinov – Na paši č. 4 – chemická čistiareň (SK/EZ/B2/124)“ a ďalej archívne geologické prieskumné práce súvisiace s predmetnou lokalitou. Štúdia bola vypracovaná v spolupráci s fy GEOTest, a.s. oz Bratislava.

2. Charakteristika lokality

2.1 Všeobecné údaje o území

2.1.1 Vymedzenie skúmaného územia

Záujmové územie – areál bývalých čistiarní sa nachádza v intraviláne mesta Bratislava, mestskej časti Bratislava II. – Ružinov, v katastrálnom území Ružinov. Územie je situované v obytnej zóne v blízkosti Štrkoveckého jazera, v bloku medzi ulicami Na paši, Prešovská, Brestová a Teslova.

Na lokalite sa v minulosti prevádzkovala chemická a priemyselná čistiareň odevov. V súčasnosti prebieha čistenie odevov už len v južnej časti objektu bývalej pracovne.

Vymedzenie riešeného územia na podklade mapy 1:50 000 je znázornené v grafickej prílohe č.1A, v mierke M 1:10 000 v prílohe č.1B. Identifikačné údaje o skúmanom území zobrazuje Tabuľka 1.

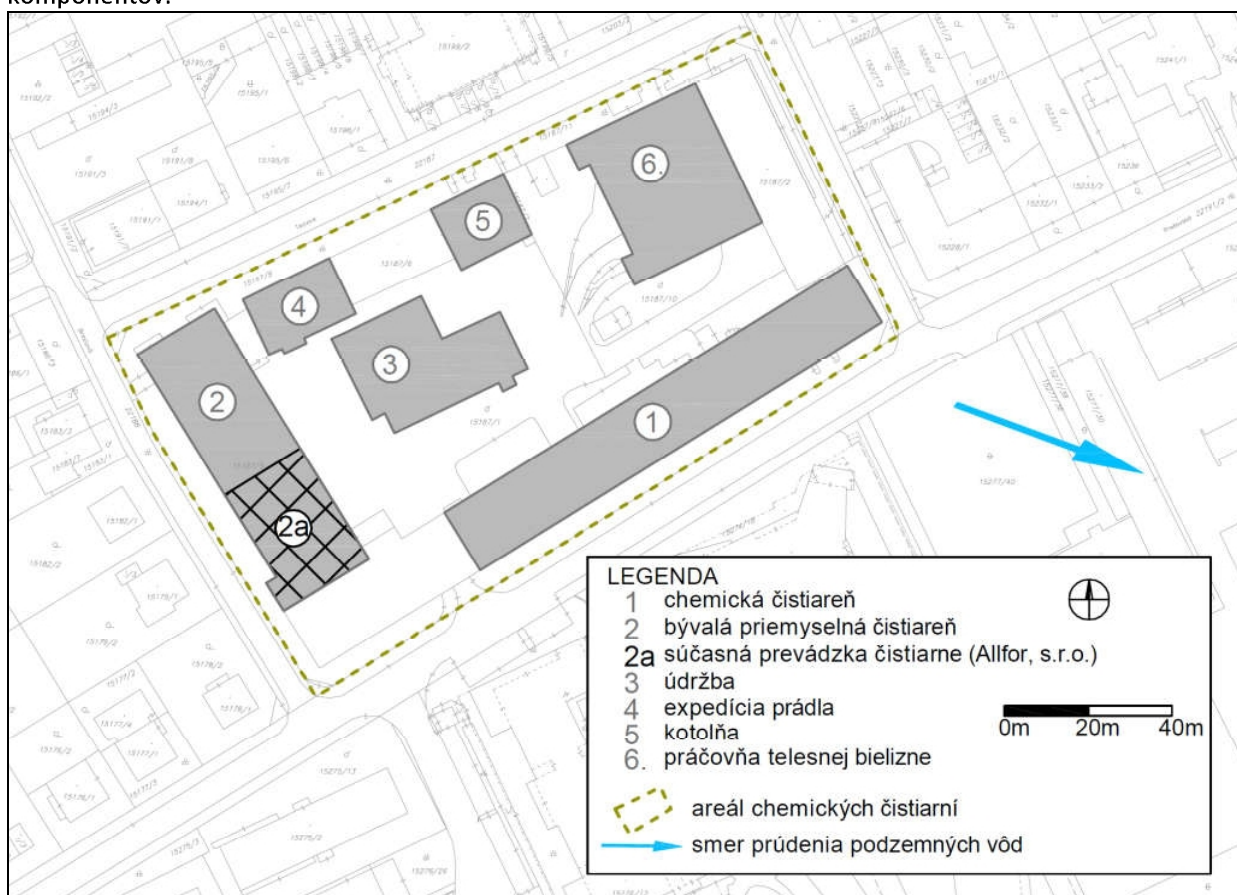
Tabuľka 1: Identifikačné údaje o záujmovom území

Názov kraja	Bratislavský
Číselný kód kraja	1
Názov okresu	Bratislava
Číselný kód okresu	102
Názov obce	Bratislava – Ružinov
Číselný kód obce	529320
Názov katastrálneho územia	Ružinov
Kód katastra	805556
Dotknuté parcely č.	15187/1,15187/4,15187/5, 15187/6,15187/8,15187/9 15187/2, 15187/3, 15187/7,15187/10,15187/11
List vlastníctva	621, 5969
Názov potvrdenej environmentálnej záťaže (podľa ISEZ)	B2(008)/Bratislava – Ružinov – Na paši č.4 – chemická čistiareň
Identifikátor potvrdenej environmentálnej záťaže (podľa ISEZ)	SK/EZ/B2/124

2.1.2 Údaje o činnosti, ktorá viedla ku vzniku environmentálnej záťaže

Za zdroj znečistenia bola archívnymi prieskumnými prácami vyhodnotená činnosť bývalej chemickej a priemyselnej čistiareň (Polák, 1992; Urban, et al. 2015). Čistiareň bola prevádzkovaná od roku 1959 pre účely chemického a priemyselného čistenia odevov. Pri čistení odevov sa používal technický benzín a chlórované uhľovodíky – tetrachlóretylén (PCE). Chemikálie používané na čistenie boli zároveň skladované v priestoroch areálu. Čistiaca látka na báze tetrachlóretylénu sa skladovala v oceľových sudoch na odizolovanej skladovacej ploche. Ročne sa na čistenie odevov použilo cca 20 až 22 m³ PCE. Odpad vznikajúci pri čistení bol skladovaný taktiež v oceľových kontajneroch. Pri neodbornej manipulácii s uvedenými látkami mohlo dochádzať k nekontrolovateľným únikom do okolitého prostredia.

Za potenciálne zdroje znečistenia (Obrázok 1) sú na základe výsledkov archívnych a súčasných prieskumných prác, ako i dodaných podkladov od súčasného majiteľa považované: samotný objekt chemickej čistiareň (č.1), bývalej pracovne (č.2), v tejto prebieha v súčasnosti terajšia prevádzka priemyselnej čistiareň (č.2a). Vylúčiť nemožno ani manipuláciu s týmito látkami počas prevádzky objektov údržby (č. 3) a kotolne (č. 5), kde sa používali chemikálie na odmastenie zaolejovaných komponentov.



zdroj mapového podkladu: katastrálna mapa

Obrázok 1: Potenciálne zdroje znečistenia v areáli čistiarní (spracované na základe dodaných podkladov od majiteľa areálu).

Ako už bolo vyššie uvedené, v súčasnosti je čistiareň odevov prevádzkovaná v južnej časti bývalého objektu pracovne. V ďalších objektoch sa nachádzajú prevádzky rôznych spoločností (bližšie

viď kapit. 4.2.1 v AR). V budúcnosti je plánované ich ukončenie a výstavba polyfunkčného komplexu s funkciou bývania.

2.2 Prírodné pomery

2.2.1 Geomorfologické pomery

Záujmové územie sa v zmysle geomorfologického členenia na geomorfologické jednotky (Mazúr, Lukniš, 1980) začleňujeme do:

- sústavy: Alpsko-himalájskej
 - podsústavy: Panónskej panvy
 - provincie: Západopanónska panva
 - subprovincie: Malá dunajská kotlina
 - oblasti: Podunajská nížina
 - celku: Podunajská rovina

Morfologicko-morfometrický typ reliéfu vlastného riešeného územia tvorí nerozčlenená rovina. Sklonitosť územia je zaradená do kategórie $<1^\circ$. Z hľadiska typologického členenia reliéfu predstavuje dotknuté územie akumulčný fluviálny reliéf, konkrétne fluviálnu rovinu s nepatrným uplatnením litológie. Územie je v súčasnosti rovinaté, s kótou terénu cca 134 m n. m.

Základnou morfoštruktúrou riešeného územia v širšom priestorovom kontexte je negatívna morfoštruktúra Panónskej panvy a to mladé poklesávajúce morfoštruktúry s agradáciou. Základným typom eróznno-denudačného reliéfu je v celom riešenom území i v jeho okolí reliéf rovín a nív.

2.2.2 Geologické pomery

Po geotektonickej stránke patrí záujmové územie k Podunajskej neogénnej panvy, ktorej podložie v tejto časti tvorí malokarpatské kryštalinikum (paleozoikum). Kryštalinikum je prevažne tvorené dvojsľudným granitom až granodioritom bratislavského masívu, bohatého na pegmatitové žily.

Samotná výplň panvy je tvorená **neogénnym súvrstvím** v ílovito-piesčitom vývoji. Patrí tortónu, sarmatu, panónu – pontu, pričom jednotlivé vrstvy monoklinálne upadajú smerom SZ–JV do stredu panvy.

Ílovitý komplex je reprezentovaný pestrou škálou nízkoplastických až vysokoplastických ílov tuhej až pevnej konzistencie prestúpených tenkými medzivrstvami a šošovkami piesku. Hrúbka ílovitých vrstiev sa pohybuje od 1,9 – 13,0 m. Rozhranie medzi súdržnými zeminami a hlbšie ležiacimi pieskami nemá kontinuálny priebeh, ale vzájomné prstovité prekrývanie a vykľňovanie, z čoho vyplýva i uvedený rozdiel hrúbky ílovitých polôh.

Piesky majú v neogénnom komplexe dominantné postavenie. Miestami bola v pieskoch zistená aj priebežnejšia ílovitá medzipoloha tuhej až pevnej konzistencie.

Kvartérne sedimenty sú budované náplavami Dunaja – štrky, piesčité štrky, štrky s prímiesou piesku, piesky, piesky so štrkom s charakteristickým striedaním polôh, prevahou piesčitej zložky vo vrchných partiách a zväčšovaním valúnov štrku smerom k bazálnej časti.

Fluviálne sedimenty Dunaja sú litologicky veľmi premenlivé. Zodpovedajú údolnej akumuláčnej terase Dunaja (würm). Siahajú do hĺbky 12,0 – 18,0 m, lokálne i viac-do 19,0 – 21,0 m, čo je spôsobené erozívnou činnosťou starého Dunaja v pleistocéne do neogénneho podložia. Všeobecne sú fluviálne

sedimenty reprezentované povodňovými pieskami, povodňovými súdržnými zeminami a fluviálnymi štrkami.

Povodňové piesky spolu s povodňovými súdržnými zeminami tvoria najvrchnejšiu vrstvu fluviálnych sedimentov, zodpovedajúcu fácií údolnej nivy Dunaja. Piesky tvoria nesúvislú polohu, z časti nahradenú už antropogénnymi uloženiami. Hrúbka piesčitej polohy (hlinité piesky) sa pohybuje v rozmedzí 0,8 – 2,5 m. Spravidla sú kypré, svetlohnedej, sivohnedej a hnedosivej farby.

Povodňové jemnozrnné zeminy boli zistené iba v podobe reliktov. Majú charakter prevažne piesčitých ílov, ojedinele piesčitých hlin až ílov so strednou a vysokou plasticitou, tuhej až pevnej konzistencie.

Fluviálne štrky sú dominujúcimi sedimentami náplavov Dunaja. Tvoria súvislú vrstvu, hrubú prevažne v rozmedzí 8,7 – 12,5 m, s hĺbkovým dosahom 12,0 – 18,0 m. Štrková vrstva nevystupuje priamo na povrch. Je prekrytá komplexom povodňových, vyššie charakterizovaných sedimentov. Valúnový materiál štrkov je dobre opracovaný, zložený z granitoidných hornín, vápencov, kremencov, kremeňa a kryštálických bridlíc. Veľkosť valúnov sa pohybuje prevažne do 10 – 30 mm, menej 50 – 100 mm, no s hĺbkou a najmä na styku s neogénnym podložíom bola zistená poloha štrkov s balvanmi veľkosti 250 – 500 mm (Blažo E., 2006).

2.2.3 Hydrogeologické pomery

V zmysle hydrogeologickej rajonizácie SR (Šuba a kol. 1984) patrí lokalita rajónu Q 051 Kvartér západného okraja Podunajskej roviny, ktorý je rozhodujúcim spôsobom ovplyvňovaný Dunajom. Hydrogeologické pomery územia skúmanej lokality taktiež úzko súvisia s geologickými pomermi samotnej lokality, geologickou stavbou širšieho územia a morfológiou terénu.

Neogénne sedimenty sú z hydrogeologického hľadiska málo priepustné. Ich zvodnenie je viazané na polohy jemnozrnných pieskov a pieskovcov. Podzemná voda v týchto horninách tvorí samostatný horizont a jej hladina má väčšinou napätý charakter.

Kvartérne štrkopiesčité náplavy Dunaja, ktoré vytvárajú plošne rozsiahlu nádrž podzemných vôd s voľnou alebo čiastočne napätou hladinou, v hydrodynamickej spojitosti s hladinou vody v povrchovom toku Dunaja, majú z hľadiska možnosti vodohospodárskeho využívania najväčší význam. Priaznivost' zvodnenia týchto sedimentov je podmienená tiež ich hrúbkou, granulometrickým zložením a stupňom zahlinenia. Hrúbka zvodne sa mení v závislosti od hrúbky priepustných náplavov a úrovne hladiny podzemnej vody, jej časové zmeny sú podmienené hladinovým režimom podzemných vôd. Hodnoty koeficientu filtrácie sa pohybujú v medziach rádov 10^{-3} až 10^{-4} m.s⁻¹.

Výdatnosti vrtov v okolí lokality sa pohybovali v širokom rozmedzí 7,0 – 40,0 l.s⁻¹ (v závislosti od umiestnenia, hĺbky a spôsobu vystrojenia vrtu, vodných stavov Dunaja a možnosti dosahu vplyvu ďalších odberných zariadení). Celkové zvýšenie vodných stavov na Dunaji vplyvom vodného diela Gabčíkovo sa premietlo v priemernom zvýšení hladín podzemnej vody cca o 1,0 m. Hladina podzemnej vody sa v záujmovej lokalite pohybuje v hĺbkach cca 3,20 – 5,00 m pod terénom (130,70 – 128,90 m n. m.). Maximálne hladiny možno predpokladať na kóte 131,3–131,5, m n. m.

Smer prúdenia podzemných vôd je SZ-JV, resp. Z-V (Némethyová, 2010), pričom vody Dunaja infiltrujú do podzemných vôd.

Bezprostredne v záujmovom území nie sú registrované ani evidované zdroje minerálnych, alebo termálnych vôd. Záujmové územie nezasahuje do hygienického pásma ochrany podzemných vôd.

Hydrogeochemické pomery

Podľa Rámcovej smernice o vodách (2000/60/EC) patrí podzemná voda v záujmovom území a znečistením zasiahnutého zvodnenca do kvartérneho útvaru: SK1000300P Medzizrnné podzemné vody kvartérnych náplavov centrálnej časti Podunajskej panvy. Ako kolektorské horniny zastúpené najmä fluviálne štrky, piesčité štrky, piesky stratigrafického zaradenia holocén. Podľa hodnotenia

kvality podzemných vôd na Slovensku za rok 2020 (Ľuptáková, A. et al., 2021) chemické zloženie podzemných vôd v tomto útvare vykazuje značnú variabilitu so známami antropogénneho ovplyvnenia. Z katiónov a aniónov sa najviac prejavuje Ca^{2+} a HCO_3^- . Vyššie obsahy SO_4^{2-} , Cl^- a Na^+ sa prejavujú najmä v husto osídlených častiach útvaru v Bratislave a okolí Bratislavy. Podľa Palmer-Gazdovej klasifikácie sú podzemné vody najčastejšie základného výrazného až nevýrazného Ca-Mg- HCO_3 typu. V roku 2020 sa hodnoty mineralizácie podzemnej vody v útvare pohybovali v rozmedzí 188,98 mg.l⁻¹ až 1 888,86 mg.l⁻¹.

2.2.4 Klimatické pomery

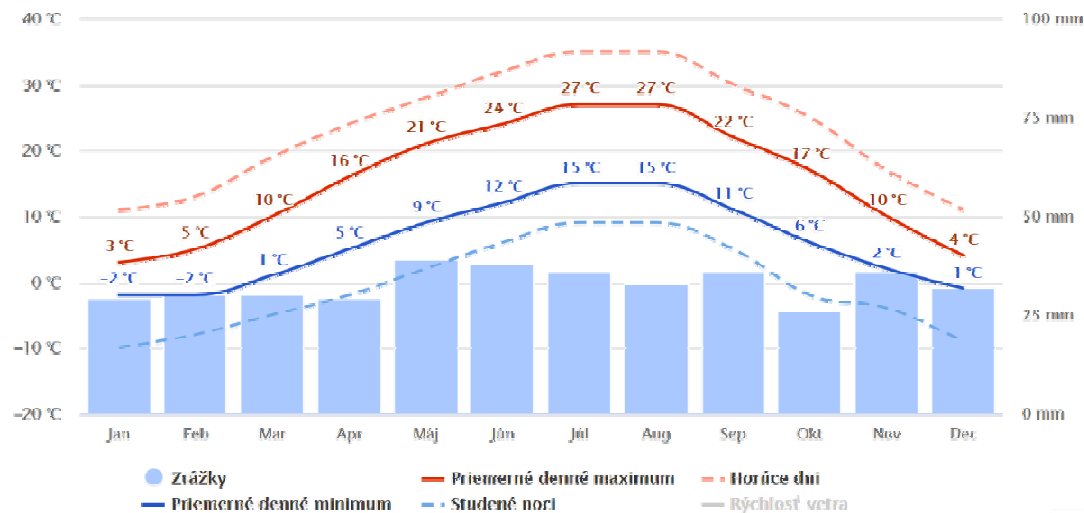
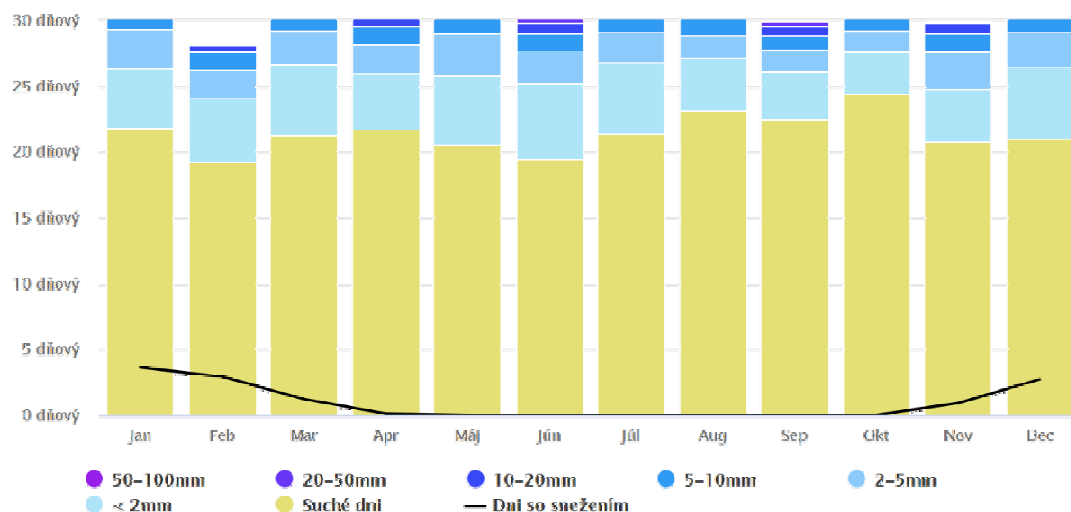
Podľa mapy klimatických oblastí Atlasu krajiny SR záujmové územie je začlenené do okrsku teplého s miernou zimou s januárovými teplotami nad -3 °C, letné dni nad 50.

Podľa mapy klimatických oblastí (E. Quitt, 1979) je záujmové územie začlenené do teplej klimatickej oblasti (T-2).

Klimatická oblasť T-2 je charakterizovaná:

- počet letných dní 50 – 60
- počet dní s priemernou teplotou nad 10 °C 160 – 170
- počet dní so snehovou prikrývkou 40 – 50
- počet mrazových dní 100 – 110
- priemerná teplota v januári -2 °C až -3 °C
- priemerná teplota v júli 18 °C až 19 °C
- zrážkový úhrn vo vegetačnom období 350 – 400 mm
- zrážkový úhrn v zimnom období 200 – 350 mm
- počet zamračených dní 120 – 140
- počet jasných dní 40 – 50.

Obrázok 2 graficky vyjadruje priemerné teploty a úhrn zrážok podľa hodinových simulácií za ostatných 30 rokov pre Bratislavu podľa www.meteoblue.com. Diagram zrážok pre Bratislavu zobrazujúci počet dní v mesiaci, v ktorých spadne isté množstvo zrážok vyobrazuje Obrázok 3.

Obrázok 2: Priemerné teploty a úhrn zrážok pre Bratislavu (www.meteoblue.com)Obrázok 3: Diagram zrážok pre Bratislavu s počtom dní v mesiaci, v ktorých spadne isté množstvo zrážok (www.meteoblue.com)

2.2.5 Hydrologické pomery

Lokalita sa nachádza v meste Bratislava, kde podľa údajov štatistického úradu zaberajú vodné plochy na území mesta 1 854 ha (5,04 %). Vodohospodársky významné vodné toky s plavebným a vodárenským využitím predstavujú rieky Dunaj a Morava. Medzi vodné toky, ktoré pretekajú územím mesta, patria: Malý Dunaj, Vydrica, Malá Vydrica, Drieňovka, Lamačský potok, Banský potok, Pieskový potok, Račiansky potok, Vajnorský potok.

Vodné toky, nachádzajúce sa na území mesta, odvádzajú spolu s kanalizačnými systémami väčšiu časť povrchových vôd ďalej do rieky Dunaj. Z hydrologického hľadiska sa vodné toky na území mesta delia do troch čiastkových povodí, a to:

- Povodie rieky Dunaj – hlavným tokom je rieka Dunaj, do ktorej sa postupne napájajú nasledovné prítoky: Morava, Mokrá Jarok, Karloveské rameno, Čierny potok, Vydrica, Chorvátske

„Doplňkový geologický prieskum potvrdenej environmentálnej záťaže B2(008)/Bratislava - Ružinov – Na paši č.4 – chemická čistiareň“ – štúdia uskutočniteľnosti sanácie“

rameno, Rusovský kanál, Mošonské rameno a Biskupické rameno. Najvýznamnejším prítokom je potok Vydrica. Ide o ľavostranný prítok, ktorý odvádza povrchové vody z lesného prostredia Malých Karpát pomocou hlavných prítokov Uhliarka, Bystrička a niekoľko desiatok bezmenných prítokov. Ďalším významným prítokom je Rusovský kanál, ktorý je mimo územia Slovenskej republiky vyústený do Mošonského kanála, ktorý je prítokom rieky Dunaj v jej maďarskej časti.

- Povodie rieky Váh – hlavným tokom je rieka Malý Dunaj. Tento tok má regulovaný prietok prostredníctvom nápuštných (zátvorových) objektov v mieste jeho odbočenia z hlavného toku Dunaja. Významnejšími tokmi tohto povodia sú Račiansky potok s prítokmi Gaštanový kanál, Pieskový potok, tok Na Pántoch a niekoľko bezmenných prítokov. Tieto toky zaústujú do Šúrskeho kanála, ktorý sa nachádza za hranicami katastra mesta a jeho prostredníctvom do Malého Dunaja. Vajnorský potok s prítokmi Struha, Kratina a Vajnorský kanál ústi do Čiernej vody za hranicami mesta, ktorá zaústuje do Malého Dunaja. Niekoľko bezmenných prítokov je zaústených do verejnej kanalizácie mesta, ktorá je v správe Bratislavskej vodárenskej spoločnosti, a.s. (BVS).
- Povodie rieky Morava – hlavným tokom je rieka Morava, ktorá sa vlieva do Dunaja pri hrade Devín. Najvýznamnejším prítokom je potok Mláka, ktorý odvádza povrchové vody zo záhorskej časti Malých Karpát. Do Mláky sú vejárovite zaústené nasledovné významné prítoky: Rakyta, Dúbravčický potok, Vápenický potok a Mariánsky potok. Do Dúbravčického potoka sa postupne zaústujú Veľkolúcky potok a Antošov kanál. Do Vápenického potoka sú zaústené Lamačský potok a niekoľko bezmenných prítokov. Do Mariánskeho potoka sa postupne zaústujú Bystrický potok, Mástsky potok a niekoľko bezmenných prítokov.

Predmetné územia sa nachádza v povodí rieky Malý Dunaj č. hydrologického povodia 4-21-15-001, ktorý spadá do čiastkového povodia Váhu. Prietok vody je daný novým nápuštným objektom z rieky Dunaj, kde je ho možné regulovať medzi 10,0 až 90,0 m³.s⁻¹, podľa manipulačného poriadku a ročného obdobia.

Malý Dunaj bol v minulosti jedným z ramien Dunaja, využívaným aj na protiprúdnu plavbu, bol vyrovnaný a má upravené koryto do tvaru dvojitého lichobežníka. Tok v Bratislave začína Starým nápuštným objektom z rieky Dunaj, ktorý pri povodňovej situácii slúži ako norná stena. Množstvo vody vypúšťanej do Malého Dunaja je regulované Novým nápuštným objektom. Vodný tok slúži ako recipient vyčistených odpadových vôd (napr. ÚČOV Vrakuňa a 4-21-15-955 čo je odtok vody zo Slovnaftu).

Vodné plochy na území mesta tvoria viaceré rybníky, bývalé bagroviská, resp. materiálové jamy po ťažbe štrkopieskov, hospodárske vodné nádrže a jazierka v bývalých mŕtvych ramenách vodných tokov. K nim sa pridružujú aj mokrade. V blízkosti predmetného územia sa nachádzajú nasledujúce vodné plochy: Štrkovecké jazero, Ružinovské jazero (Rohlík) a Kuchajda.

Podľa režimu odtoku patria toky riešeného územia do vrchovinno-nížinskej oblasti s dažďovo-snehovým typom odtoku. Pre túto oblasť je charakteristická akumulácia vôd v mesiacoch december až január, vysoká vodnosť vo februári až apríli, najvyššie prietoky recipienty dosahujú v marci (IV < II), najnižšie sa vyskytujú v septembri, podružné zvýšenie vodnosti koncom jesene a začiatkom zimy je výrazné minimum. Vlastný tok rieky Dunaj je silno ovplyvnený vysokohorskou oblasťou, v riešenom území predstavuje recipient svojim charakterom odtoku typ režimu odtoku prechodne snehový, pre ktorý je charakteristická akumulácia vôd v mesiacoch október až marec (resp. až apríl), vysoká vodnosť v apríli až júli, najvyššie prietoky recipient dosahuje v máji až júni (VII > IV), najnižšie sa vyskytujú v januári až februári, podružné zvýšenie vodnosti toku koncom jesene a začiatkom zimy je nevýrazné.

Na základe zhodnotenia zrážkovo-odtokových vzťahov v období rokov 1931 až 1980 sa priemerný ročný špecifický odtok v oblasti pohybuje v rozmedzí 1,0-5,0 l.s⁻¹ na km², maximálny špecifický odtok

v úrovni $0,2-0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ a minimálny špecifický odtok sa pohybuje v rozmedzí $0,1-0,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Lešková, Majerčáková in Atlas krajiny SR, 2002).

2.3 Výsledky prieskumných prác znečistenia životného prostredia

V riešenom území a jeho okolí bolo vykonaných viacero prieskumných prác za účelom zistenia inžinierskogeologických, hydrogeologických pomerov, ako aj kvality vybraných zložiek životného prostredia. Tieto práce sú uvedené a popísané v záverečnej správe z predmetnej geologickej úlohy (Kminiaková et al., 2023).

Prieskumné a monitorovacie geologické práce zamerané na zhodnotenie znečistenia životného prostredia, ktoré boli vykonané priamo v areáli sú:

Polák, 1992 – orientačný prieskum na zistenie obsahu chlórovaných uhľovodíkov v zeminách a podzemných vodách.

Odber podzemnej vody bol zabezpečený z jedného miesta situovaného približne v strede areálu. V podzemnej vode bolo zistené znečistenie tetrachlóretylénom (PCE) $110 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ (IT limit = $20 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). Koncentrácia trichlóretylénu (TCE) dosiahla $7,0 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ (ID limit = $25 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$), a teda nepreukazovala známky závažného znečistenia. Vyšší obsah PCE sa overil aj v pôdnom vzduchu ($10,51$ až $43,49 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Vzorky zeminy boli odobrané z dvoch miest situovaných medzi objektmi chemickej čistiarne a práčovne bielizne. Vo vzorkách zeminy bol zistený PCE od $8,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ do $18,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{IT}_{\text{priemysel}} = 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Urban et al., 2015 – podrobný geologický prieskum životného prostredia s analýzou rizika pravdepodobnej environmentálnej záťaže

Prieskumom v rokoch 2014–2015 bolo potvrdené znečistenie zemín a podzemnej vody najmä tetrachlóreténom. Zároveň v rámci riešenia prieskumu bola realizovaná aj analýza rizika zo znečistenia zemín a podzemných vôd.

Znečistenie horninového prostredia nad IT kritériá bolo zistené v ukazovateľoch tetrachlóretén, uhľovodíkový index a benzo(a)pyrén. Kritériá ID boli v zeminách prekročené v ukazovateľoch tetrachlóretylén, uhľovodíkový index, benzo(a)pyrén a benzo(b)flourantén. Najvýznamnejšie znečistenie bolo identifikované PCE látkami, pričom najvyššie a najpočetnejšie (v 5 miestach) prekročenie IT limitu bolo zaznamenané v biologickej kontaktnej zóne (do 1,5 m pod terénom). V pásme prevzdušnenia koncentrácie nepresiahli IT kritérium. V pásme nasýtenia boli v 2 miestach overené vyššie hodnoty PCE ako IT limit.

Znečistenie podzemnej vody nad IT kritériá (aj ID) boli prekročené iba v prípade PCE. Vrty a studňa, v ktorých boli zaznamenané zvýšené koncentrácie nad ID a IT sa nachádzajú v areáli chemickej čistiarne a J až JV smerom od areálu po smere prúdenia podzemnej vody. Prekročenie intervenčného limitu bolo maximálne 66-násobné a to vo vrte HGV-4. Koncentrácia látky v danom vrte s hĺbkou klesala a teda jej najvyššie koncentrácie boli pod hladinou podzemnej vody.

Dosiahnuté koncentrácie sa za uplynulý čas (Polák, 1992) vo väčšine vrtov znížili, okrem vrtu HGV-4, kde koncentrácia stúpila 12-násobne ($1992 = 0,11 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, $2015 = 1,33 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Dosiahnuté výsledky preukázali vyššiu migráciu vymapovaného bodového znečistenia v smere generálneho prúdenia podzemnej vody SZ-JV až Z-V.

Atmogeochemické merania (PID-VOC a CIU, TP, CH_4 , CO_2 a O_2) preukázali mierne zvýšenie ukazovateľa PID predovšetkým v južnej a juhovýchodnej časti areálu.

Hodnotenie AR ukázalo, že na lokalite je environmentálne a potenciálne zdravotné riziko spôsobené látkami PCE. Riziko bolo hodnotené pre šírenie sa znečisťujúcej látky z primárneho zdroja znečistenia

– areál čistiarne a zo sekundárneho zdroja znečistenia – areál BVS. Na lokalite bolo odporúčené realizovať sanáciu pre eliminovanie environmentálneho rizika.

Ako najvhodnejší sanačný variant bola prostredníctvom štúdie uskutočniteľnosti vyhodnotená sanácia podzemnej vody metódou sanačného čerpania s ventingom a air-spargingom. Čistenie na povrchu sa malo zabezpečovať v odlučovacích filtroch, stripovaním a sorbciou na aktívnom uhlí. Odhadovaná doba sanácie bola 36 mesiacov, vrátane posanačného monitorovania. Cieľovou koncentráciou PCE na základe hodnotenia environmentálnych rizík v podzemnej vode v centre znečistenia bola určená hodnota $< 150 \mu\text{g.l}^{-1}$ vo vrte HGV-4. Uvedený sanačný limit bol stanovený Rozhodnutím MŽP, ev.č. 17026/2016 zo dňa 22.3.2016, ktorým bola schválená záverečná správa s analýzou rizika znečisteného územia predmetnej geologickej úlohy (pozri textová príloha č.6 k ZS).

Kordík et al., 2022: Zabezpečenie monitorovania environmentálnych záťaží Slovenska – 1. časť

Od roku 2016 do roku 2022 bolo na predmetnej lokalite vykonávané monitorovanie podzemných vôd pracovníkmi ŠGÚDŠ Bratislava. V rámci monitorovania sa preukázalo pretrvávajúce znečistenie podzemnej vody v okolí EZ tetrachlóréténom. V zdrojovej oblasti (areál chemickej čistiarne) boli v sledovanom období 2016 – 2022 v podzemnej vode zaznamenané zvýšené koncentrácie nad ID, resp. IT kritériá v ukazovateli PCE. Dosiahnuté koncentrácie PCE sa v jednotlivých vrtoch v zdrojovej oblasti pohybovali nasledovne:

- VN258-1 (HGP-1): 7,5 až 24,8 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (priemer za sledované obdobie 14,41 $\mu\text{g.l}^{-1}$)
- VN258-2 (HGP-2): 2,9 až 28,5 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (priemer za sledované obdobie 17,60 $\mu\text{g.l}^{-1}$)
- VO258-3 (studňa S-1): 6,2 až 16,60 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (priemer za sledované obdobie 11,44 $\mu\text{g.l}^{-1}$).

Lokálne boli zaznamenané koncentrácie nad ID v ukazovateli vinylchlorid vo vrte VN258-1/HGV-1 v snímke z obdobia 09/2021 (s koncentráciou 5,90 $\mu\text{g.l}^{-1}$) a vo vrte VN258-2/HGP-2 v snímke z obdobia 10/2018 (s koncentráciou 5,50 $\mu\text{g.l}^{-1}$).

V indikačnej oblasti reprezentovanej vrtmi VN258-3,4,5/HGV-3,4,5 a vrtom VO258-/HGP-2 situovanými juhovýchodne, lokálne JJV od riešeného územia boli zaznamenané taktiež prevažne zvýšené koncentrácie nad ID, resp. IT kritériá v ukazovateli PCE.

Dosiahnuté koncentrácie PCE sa v jednotlivých vrtoch v indikačnej oblasti pohybovali nasledovne:

- VN258-3 (HGV-3): 1,3 až 39,4 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (priemer za sledované obdobie 10,44 $\mu\text{g.l}^{-1}$)
- VN258-4 (HGV-4): 46,3 až 385 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (priemer za sledované obdobie 207,61 $\mu\text{g.l}^{-1}$)
- VN258-5 (HGV-5): 2,4 až 10,6 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (priemer za sledované obdobie 7,29 $\mu\text{g.l}^{-1}$)
- VO258-2 (HGP-2): 2,7 až 3,8 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (priemer za sledované obdobie 3,25 $\mu\text{g.l}^{-1}$).

Občasne boli zaznamenané koncentrácie nad ID v ukazovateli chloridy vo vrte VN258-4 (HGV-4) v snímke z obdobia 04/2018 (s koncentráciou 170 $\mu\text{g.l}^{-1}$). V tom istom vrte (HGV-4 v areáli BVS) boli v monitorovacej snímke z obdobia 09/2020 zaznamenané zvýšené koncentrácie aj v ukazovateli polycyklických aromatických uhľovodíkov (PAU) ($>ID$), konkrétne vo formách benzo(k)fluorantén a benzo(g,h,i)perylén, s koncentraciami 0,17 $\mu\text{g.l}^{-1}$ a nad IT kritériá vo formách benzo(a)pyrén (0,27 $\mu\text{g.l}^{-1}$) a ideno(1,2,3-c,d)pyrén (0,26 $\mu\text{g.l}^{-1}$). Následné vzorkovania v rokoch 2021 a 2022 už uvedené nárasty PAU nepotvrdili.

2.3.1 Výsledky doplnkového geologického prieskumu a aktualizovanej analýzy rizika

Kompletné výsledky sú uvedené v záverečnej správe s AAR: *Kminiaková et al., 2023: Doplnkový geologický prieskum životného prostredia potvrdenej environmentálnej záťaže „B2 (008)/ Bratislava – Ružinov – Na paši č. 4 – chemická čistiareň (SK/EZ/B2/124)“*. V ďalšom texte uvádzame iba vybrané časti textu pre účely tejto ŠU.

Znečistenie CIU v zeminách výsledky súčasnej etapy prieskumu nepotvrdili. Mimo foriem cis-1,2-DCE a TCE boli v odobratých vzorkách namerané koncentrácie pod medzu stanovenia použitých analytických metód ($< 0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ v sušine). Prioritný kontaminant overený v podzemnej vode (forma PCE) v zeminách taktiež úplne absentoval. Relatívny nárast v úrovni desiatín až jednotiek mg.kg^{-1} (avšak hlboko pod ID kritériá) bol potvrdený vo vrtoch ST-2, ST-4 (pre cis-1,2-DCE a TCE) a ST-5 a ST-6 (pre TCE). Znečistenie zemín sa neprejavilo ani v ostatných overovaných ukazovateľoch: NEL, BTEX, PAU, stopové prvky. Skutočnosť, že aktuálnymi prieskumnými prácami nebolo znečistenie zemín overené, nevylučuje prítomnosť znečistenia PCE v horninovom prostredí v danom území zistenom počas predchádzajúcich prieskumov Urban et al. (2015) a Polák (1992). Súvisí to pravdepodobne s obmedzenými možnosťami situovania vrtných prác bližšie k predpokladaným zdrojom znečistenia v realizovanej doplnkovej etape.

Znečistenie v pôdnom vzduchu atmogeochemickými meraniami (prístrojom Ecoprobe 5), ani exaktne stanovenými obsahmi organických látok laboratórnou analýzou nebolo zistené. Pre sledované látky BTEX, CIU a celkové uhľovodíky boli namerané obsahy pod úrovňou detekcie použitých metód stanovenia. V zmysle pokynu Ministerstva pre správu a privatizáciu národného majetku SR a MŽP SR č. 1617/97-min. z roku 1997 boli zistené hodnoty spadajúce do kategórie A – „fónové hodnoty, charakterizujúce približne ich prírodné obsahy, prípadne dohodnuté hodnoty požadovanej medze citlivosti analytického stanovenia“.

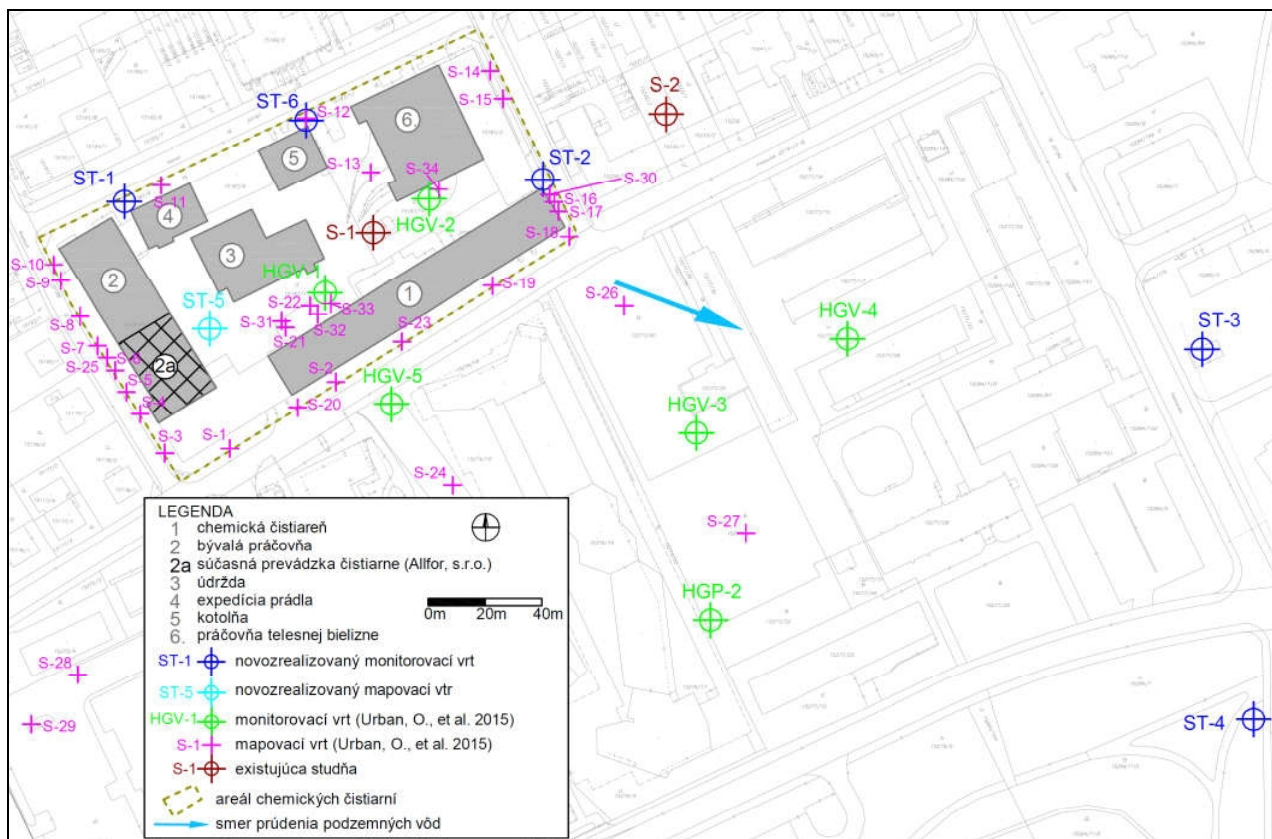
Znečistenie podzemnej vody CIU bolo potvrdené predovšetkým látkami PCE, ktoré v záujmovom území predstavujú primárne znečisťujúce látky. Nadlimitné obsahy PCE boli zistené výraznejšie v JV časti areálu, v okolí hlavných predpokladaných zdrojov znečistenia, za ktoré sa považujú objekty bývalej chemickej a priemyselnej čistiarene, pracovne telesného prádla a údržby.

Znečistenie v areáli čistiarní

V území bývalého areálu chemickej čistiarene boli súčasne realizovanými prieskumnými prácami potvrdené zdroje znečistenia podzemnej vody indikované už v minulosti (Polák, 1992 a Urban et al., 2015). Dominantným kontaminantom v území je látka tetrachlóretylén (PCE). Jej výskyt je viazaný na viaceré lokálne oblasti znečistenia.

Za hlavné zdroje znečistenia sa považujú: objekt bývalej chemickej čistiarene (obj. 1) a pracovne telesnej bielizne (obj. 6), v ktorých dochádzalo k manipulácii so základnými surovinami a používanými chemikáliami v prevádzke čistiarene. Ako potenciálny zdroj nemožno vylúčiť ani objekt údržby, kotolne a areálovú kanalizáciu priemyselných vôd, ako aj ďalšie iné bližšie nedefinované podzemné objekty/nádrže v území.

Koncentračné maximá ($> IT$) boli preukázané v sonde **ST-2**, (PCE v rozpätí $98,3 - 486 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$, s priemernou koncentráciou PCE $293,8 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$) v JV cípe areálu, v tesnej blízkosti objektu chemickej čistiarene. Táto oblasť je považovaná za hlavný zdroj znečistenia (zdroj 1: Obrázok 1). Tento poznatok je v rozpore s pôvodnou interpretáciou o posune centra znečistenia PCE mimo hodnotený areál, v smere prúdenia podzemnej vody JV smerom. Podľa doterajších prác v území – podrobného prieskumu ŽP z roku 2015 (Urban et al., 2015) a následného monitorovania v období 2016 – 2022 (Kordík et al., 2022) sa predpokladalo, že centrum znečistenia sa nachádza už mimo areálu čistiarene, v okolí sondy HGV-4 v areáli BVS.



Obrázok 4: Potenciálne zdroje znečistenia v hodnotenom areáli s pozíciou všetkých prieskumných diel – súčasná a minulé etapa (Kminiaková et al., 2023)

Mierne zvýšenie obsahov PCE v úrovni ID kritérií bolo zistené v ďalších sondách v areáli bývalej chemickej čistiarene ešte :

- HGV-1, PCE v rozpätí 1,65 až 15,6 $\mu\text{g.l}^{-1}$, (pri priemernej koncentrácii 10,72 $\mu\text{g.l}^{-1}$)
- HGV-2, PCE v rozpätí 13,3 až 16,6 $\mu\text{g.l}^{-1}$, (pri priemernej koncentrácii 14,75 $\mu\text{g.l}^{-1}$)
- ST-5, PCE 10,99 $\mu\text{g.l}^{-1}$,
- S-1, PCE v rozpätí 12,54-12,62 $\mu\text{g.l}^{-1}$, (pri priemernej koncentrácii 12,58 $\mu\text{g.l}^{-1}$)

Oblasť vymedzená uvedenými vrtmi je považovaná za ďalšiu zdrojovú oblasť znečistenia (zdroj č. 2: okolie objektu priemyselnej čistiarene, objektu údržby a telesného prádla – viď Obrázok 1).

V danom stave poznania presná špecifikácia zdrojov znečistenia pre zistený kontaminant (PCE), ako i doba úniku nie je možná.

Na základe získaných informácií z poslednej etapy prieskumu (Kminiaková et al., 2023) sa predpokladá, že v niektorých častiach skúmaného územia látky PCE migrujú z pásma prevzdušnenia do pásma nasýtenia. V prípade identifikovaných prchavých látok tento proces prebieha aj opačne. V prípade podzemných zdrojov znečistenia (zásobníky, resp. objekt kanalizácie) možno uvažovať s migráciou znečisťujúcich látok priamo do zvodnenca. Procesmi vylúhovania (prednostne zrážkovými vodami) dochádzalo v minulosti k postupnému uvoľňovaniu kontaminantov z prostredia navážky do horninového podlažia. Tento proces v určitej miere pretrváva i v súčasnosti. Ďalšou transportnou cestou je podzemná voda, ktorej prúdením dochádza k rozširovaniu znečistenia do okolia.

Znečistenie mimo areálu čistiarní

Za hodnoteným areálom sa znečistenie nad ID kritériá prejavilo v týchto objektoch:

- S-2 (v obytno-polyfunkčnej zóne, cca 45 m za areálom), PCE v rozpätí 16,6 – 16,88 µg.l⁻¹, pri priemernej koncentrácii 16,74 µg.l⁻¹.

Nadlimitné obsahy (> IT) boli vo všetkých kolách vzorkovania zistené za hranicou areálu v smere prúdenia podzemnej vody (prednostne v smere JV) v sondách:

- HGV-4 v areáli BVS (vo vzdialenosti cca 100 m od hranice areálu), PCE počas monitorovania v rozpätí 146 – 270 µg.l⁻¹, s priemernou koncentraciou 231,8 µg.l⁻¹,
- ST-3 (vo vzdialenosti 225 m od hranice areálu), PCE počas monitorovania v rozpätí 39,6 – 234 µg.l⁻¹, s priemernou koncentraciou 168,12 µg.l⁻¹,
- HGP-1 (vo vzdialenosti cca 550 m od hranice areálu), PCE počas monitorovania v rozpätí 127 – 231,9 µg.l⁻¹, s priemernou koncentraciou 190,3 µg.l⁻¹ (rekapitulácia znečistenia v podzemnej vode) (Tabuľka 2).

K rozširovaniu znečistenia (> IT) dochádza nielen v generálnom smere prúdenia podzemnej vody, ale aj v opačnom smere (na SZ až S), pravdepodobne v dôsledku sklonu neogénneho podložia. Konkrétne boli nadlimitné obsahy potvrdené monitorovaním v sondách:

- ST-1 (v SZ cípe areálu), PCE v rozpätí 24,94-60,3 µg.l⁻¹, pri priemernej koncentrácii 41,51 µg.l⁻¹,
- ST-6 (v S časti areálu), PCE v rozpätí 28,76-34,6 µg.l⁻¹, pri priemernej koncentrácii 30,75 µg.l⁻¹.

Pri ostatných overovaných ukazovateľoch (NEL, BTEX, PAU, TOC) sa znečistenie neprejavilo, resp. boli dosiahnuté iba nízke, podlimitné koncentrácie. Bodový prejav znečistenia bol zistený ešte pri látkach NH₄⁺ (nad ID) a NO₂⁻ (nad IT).

Sumárne vyjadrenie znečistenia v podzemnej vode prezentuje Tabuľka 2.

Tabuľka 2: Sumárne vyjadrenie znečistenia v podzemnej vode

Areál bývalých chemických čistiarní			Indikačná oblasť (za hranicou areálu)		
objekt	kontaminant	priemerná koncentrácia	objekt	kontaminant	priemerná koncentrácia
S-1	PCE	12,58 µg/l	S-2	PCE	16,74 µg/l
ST-1	PCE	41,51 µg/l	ST-3	PCE	168,12 µg/l
ST-2	PCE	293,8 µg/l	HGV-4	PCE	231,8 µg/l
ST-5	PCE	10,99 µg/l	HGP-1	PCE	190,3 µg/l
	NO ₂	0,66 mg/l			
	NH ₄	1,36 mg/l			
	Mn	1,014 mg/l*			
ST-6	PCE	30,75 µg/l			

Vysvetlivky: * - prekročenie limitu – vyhláška č. 247/2017 Z. z., modrá – prekročenie ID kritérií, červená. – prekročenie IT kritérií

Látka PCE v podzemnej vode postupuje zo zdrojov znečistenia v areáli čistiarní v smere prúdenia podzemnej vody. Aktuálnym prieskumom boli v podzemnej vode zistené nadlimitné obsahy (> IT) až po vrt HGP-1 (vo vzdialenosti cca 550 m). Za hranicou areálu bol prejav znečistenia zistený v generálnom smere prúdenia u sond HGV-4 (vo vzdialenosti cca 100 m), ST-3 (vo vzdialenosti cca 225 m) a vo vyššie uvedenom vrte HGP-1.

Znečistená látka rozpustená v podzemnej vode sa šíri v dôsledku prúdenia vody (konvekčný transport). V dôsledku disperzie pri pohybe znečistenia v pórovom prostredí sa kontaminačný mrak rozširuje laterálne. Samotná znečisťujúca látka sa počas transportu môže vratne, alebo nevratne sorbovať na horninové prostredie, čo transport spomaľuje. Rozkladné procesy a premena PCE na iné látky, (resp. úbytok znečisťujúcej látky a prípadne prírastok inej formy znečisťujúcej látky v modeli) sa vzhľadom na preukázané oxické podmienky v území nepreukázali. Z prejavu plošnej distribúcie PCE v podzemnej vode generálnym smerom (JV smer) ide o pomerne úzky koridor, v ktorom sa znečistenie zo zdroja šíri na pomerne veľké vzdialenosti. Poukazuje to na dobré zvodnenie kvartérneho kolektora a vysokú rozpustnosť CIU.

Aktuálnym prieskumom neboli v podzemnej vode zistené produkty premeny PCE (TCE, DCE a VC) v areáli, ani jeho okolí – až po vrt HGP-1. To znamená, že minimálne po vrt HGP-1 (na Zálužickej ulici) sa látka PCE transportuje v podzemnej vode bez premien (bez úbytku) a môže byť transportovaná do veľkých vzdialeností.

K rozširovaniu znečistenia dochádza nielen v generálnom smere prúdenia podzemnej vody (smerom na JV až VJV), ale ako už bolo vyššie uvedené aj v dôsledku sklonu neogénneho podložia a vlastností CIU aj v opačnom smere (na SZ až S). Plošný rozsah v tomto sekundárnom smere rozširovania však nie je výraznejší (prejav znečistenia s miernym presahom IT limitu overený u sond ST-1 a ST-6, v sonde SHMU 1343, vo vzdialenosti cca 290 m SZ od hranice areálu bez známk znečistenia).

Koncentračné úrovne látky PCE za ulicou Zálužická sú stanovené len na základe modelového riešenia (viď bližšie AR). Ďalšie prieskumné diela v tejto časti územia už realizované neboli, nakoľko v nej dochádza ku synergickému účinku viacerých ďalších možných zdrojov znečistenia. Konkrétne ide o zdroje z bývalej Bratislavskej cvernovnej továrne, z bývalej Chemiky, bývalého areálu Istrochem a.s., a Žabieho majera, kde boli taktiež indikované ako kontaminant chlórované uhľovodíky.

Z priebehu znečistenia PCE možno predpokladať jeho úniky v zóne prevzdušnenia, z ktorej vplyvom zrážkovej činnosti dochádza k ich postupnému vyplavovaniu do horninového podložia. Vylúčiť nemožno ani zdroje podzemného charakteru (zásobníky chemikálií, kanalizácia atď.).

Na základe výsledkov z prieskumu Kminiaková et al. (2023) možno v poslednom období rokov 2015-2023 usudzovať o kvázi ustálenom stave vývoja znečistenia na lokalite. V jednotlivých monitorovaných objektoch dochádzalo počas sledovania kvality podzemnej vody k osciláciám koncentrácií PCE bez zjavných vzostupných trendov, vo všeobecnosti išlo skôr o pokles koncentrácií (napr. u S-1, HGV-2 z úrovne IT na ID – pozri tab. 57 v ZS). Výraznejšie zvyšovanie koncentrácií znečisťujúcich látok sa do budúcnosti nepredpokladá, avšak určitú mobilizáciu kontaminantu nemožno vylúčiť počas asanácie existujúcej objektovej sústavy.

Materiálová bilancia

Materiálová bilancia znečistených zemín

Vzhľadom na skutočnosť, že znečistenie v zeminách nebolo v súčasnej etape prieskumu overené (dôvody sú diskutované v texte vyššie), aktuálne výpočet materiálovej bilancie zemín nebol aktualizovaný. Materiálová bilancia je prezentovaná z archívnych výsledkov prieskumu Urban et al. (2015), hmotnosti znečistených zemín pre jednotlivé kontaminanty sumarizuje Tabuľka 3 a Tabuľka 4.

Tabuľka 3: Materiálová bilancia znečistených zemín - nad ID a nad IT hodnotu (Urban et.al., 2015)

kontaminant	priem. hr. vrstvy/priem.konc.	rozloha znečist. plochy (m ²)	hmotnosť zneč. zeminy (t)	hmotnosť znečist. látky (t)
C ₁₀ -C ₄₀	1m / 5300 mg/kg	1369,45	2588,3	13,72
NEL+R	1m / 5330 mg/kg	1395,3	2637,1	14,06
PCE (0-1.0mpt)	1m / 14,39 mg/kg	3474	6565,9	0,094
PCE (1-4 mpt)	3m / 1,69 mg/kg	18,48	104,8	0,00018
PCE (4-8.2mpt)	4.2m / 2,15 mg/kg	723,6	5743,8	0,012

„Doplňkový geologický prieskum potvrdenej environmentálnej záťaže B2(008)/Bratislava - Ružinov – Na paši č.4 – chemická čistiareň“ – štúdia uskutočniteľnosti sanácie“

<i>kontaminant</i>	<i>priem. hr. vrstvy/priem.konc.</i>	<i>rozloha znečist. plochy (m²)</i>	<i>hmotnosť zneč. zeminy (t)</i>	<i>hmotnosť znečist. látky (t)</i>
PCE celkom				0,107
benzo(a)pyrén	1m / 3,18 mg/kg	135,6	512,5	0,0017
benzo(b)fluorantén	1m / 4,05 mg/kg	127,2	480,7	0,0019

Tabuľka 4: Materiálová bilancia znečistených zemín - nad IT hodnotu (Urban et.al., 2015)

<i>kontaminant</i>	<i>priem. hr. vrstvy/priem.konc.</i>	<i>rozloha zneč. plochy (m²)</i>	<i>hmotnosť zneč. zeminy (t)</i>	<i>hmotnosť znečist. látky (t)</i>
C₁₀-C₄₀	1m / 5300 mg/kg	1262,6	2386,3	12,65
NEL-HR	1m / 5 330 mg/kg	1190,4	22549,9	11,99
PCE (0-1.0mpt)	1m / 14,39 mg/kg	3027,2	5721,4	0,082
PCE (4-8.2mpt)	4.2m / 2,59 mg/kg	104,2	826,9	0,0021
PCE celkom				0,085
benzo(a)pyrén	1m / 3,18 mg/kg	44,5	168	0,00053

Materiálová bilancia znečistenej podzemnej vody

Materiálová bilancia v podzemnej vode bola spracovaná pre dominantnú znečisťujúcu látku PCE, ktorá prekračovala limitné kritériá ID aj IT uvedené v smernici MŽP SR č. 1/2015-7 (Tabuľka 5).

Tabuľka 5: Množstvo znečisťujúcej látky PCE v podzemnej vode

Územie	Limit (µg.l ⁻¹)	Priemerná hrúbka vrstvy (m)	Priemerná koncentrácia znečisťujúcej látky (µg.l ⁻¹)	Rozloha znečistenej plochy (m ²)	Objem znečistenej zvodnenej vrstvy (m ³)	Objem znečistenej vody (m ³)	Hmotnosť znečisťujúcej látky (kg)
Areál čistiarní	>ID 10	8,5	41,85	11 676,0	99 246,0	29 773,8	1,25
Územie mimo areálu			102,96	132 362,0	1 125 077,0	337 523,1	34,75
Spolu			97,80	144 038,0	1 224 323,0	367 296,9	36,00
Areál čistiarní	>IT 20	8,5	49,46	9 036,0	76 806,0	23 041,8	1,14
Územie mimo areálu			111,89	120 198,0	1 021 683,0	306 504,9	34,29
Spolu			107,34	129 234,0	1 098 489,0	329 546,7	35,43

Spôsob spracovania vstupov do materiálovej bilancie je uvedený v aktualizovanej analýze rizika Kminiaková et al. (2023).

Výsledky aktualizovanej analýzy rizika

Zo získaných výsledkov v rámci podrobného geologického prieskumu životného prostredia bola vypracovaná aktualizovaná analýza rizika, ktorá potvrdila, že **zdroje znečistenia v priemyselnom areáli (EZ) predstavujú riziko zo šírenia sa znečistenia v podzemnej vode.**

Zdravotné riziko na lokalite v zmysle dosiahnutých výsledkov preukázané nebolo. Podmienkou je, aby sanační pracovníci, prípadne stavební pracovníci vykonávajúci asanáciu objektov používali náležité

osobné ochranné pracovné prostriedky (OOPP) a riadili sa pokynmi zodpovednej osoby pre ochranu a bezpečnosť pri práci.

Cieľové hodnoty sanácie pre znečistenie v podzemnej vode (CHS)

Cieľová hodnota pre kvalitu podzemnej vody, ktorú je potrebné sanáciou dosiahnuť sa vzťahuje pre okraj areálu zdroja znečistenia. CHS bola určená na základe spätného výpočtu podľa požiadavky dosiahnutia zníženia koncentrácie PCE pod IT limit v referenčnom mieste R2/vo vrte HGV-4 (v susednom areáli). Tento limit pre PCE bude v podzemnej vode u vrtu HGV-4 dosiahnutý, ak sa sanáciou zníži koncentrácia v zdroji znečistenia (na hranici areálu u vrtu ST-2) na **25 µg.l⁻¹**.

Cieľové hodnoty pre sanáciu zemín budú v prípade overenia znečistenia zemín doplnkovým prieskumom po asanácii budov v areáli čistiarní určené na základe vyhodnotenia výsledkov v aktualizovanej analýze rizika tohoto prieskumu.

Cieľom sanácie environmentálnej záťaže je:

- odstránenie príčin vzniku environmentálnej záťaže – špecifikuje sa v rámci vyhodnotenia výsledkov v AAR z doplnkového prieskumu po asanácii budov v areáli čistiarní,
 - obmedzenie plošného a priestorového šírenia znečisťujúcich látok v podzemnej vode, pôde a horninovom prostredí,
 - odstránenie alebo zníženie koncentrácie znečisťujúcich látok zo znečistenej podzemnej vody na úroveň CHS.

3. Základné koncepčné varianty nápravných opatrení

Výber variantov sanácie je vykonaný na základe realizovateľnosti dosiahnutia definovaných cieľov sanácie v závislosti od všeobecných požiadaviek na ochranu životného prostredia a základných možností realizácie v daných podmienkach.

Pre výber vhodných variantov platia všeobecne tieto zásady:

- preferencia dlhodobej bezpečnosti riešenia a absolútneho znižovania environmentálnej záťaže – pokiaľ je to s vynaložením primeraného úsilia reálne, pre škodliviny s vysokou ekotoxicitou, mobilitou, perzistenciou je preferovaným koncepčným prístupom,
- zamedzenie ďalšieho šírenia znečisťujúcich látok,
- obmedzovanie migračného potenciálu znečisťujúcich látok,
- izolácia znečistenia je jednoduchší a nákladovo výhodnejší prístup najmä pre prípady vyšších objemov znečistenia s menším rizikovým potenciálom. Všeobecne by mala byť izolácia znečistenia považovaná za prechodné opatrenie, jeho funkčnosť je nutné trvalo kontrolovať a udržiavať (monitoring),
- pokiaľ je to pri primeranom úsilí reálne, považujú sa za výhodnejšie také riešenia, ktoré nevyžadujú dlhodobú prevádzku technológií, dlhodobú kontrolu, údržbu a periodické rekonštrukcie rôznych objektov a inštalácií,
- monitorovaná atenuácia je ako základný koncepčný prístup využiteľná vtedy, pokiaľ po dobu jej priebehu nebudú v znečistenej oblasti pretrvávať aktuálne neakceptovateľné riziká pre ľudské zdravie,
- musí byť monitorovaný vývoj znečistenia v priestore a čase,

- inštitucionálna kontrola sa sama o sebe nepovažuje za vhodné trvalé riešenie, lebo obmedzuje funkčné využívanie lokality, resp. zložiek životného prostredia v dosahu vplyvu, neznižuje bilanciu znečistenia životného prostredia,
- za nevhodné riešenie sa považuje odťaženie znečistených zemín a ich odvoz kuloženiu (skládkovanie) na inej lokalite bez akejkoľvek úpravy a zaistenia (iba premiestnenie škodlivín).

Pre potreby rozhodovacieho procesu sa odporúča porovnanie 4 sanačných variantov:

- nulový variant – bez sanačného zásahu, len monitorovanie lokality,
- prvý variant – maximálny variant, t. j. úplné odstránenie znečistenia (sanačné metódy ex situ – odstránenie všetkých zdrojov znečistenia, vyťaženie znečisteného horninového prostredia, odčerpanie znečistenej podzemnej vody),
- druhý variant – izolácia územia, t. j. zamedzenie šírenia znečisťujúcich látok (variant vhodný najmä v prípade, ak sa predpokladá pretrvávajúca aktivita zdrojov znečistenia, prípadne na lokalite je zvýšené riziko havarijných únikov alebo zdroj znečistenia nemožno odstrániť),
- tretí variant – sanácia po sanačné limity, väčšinou kombinácia sanačných metód (sanačné metódy in situ – biologické a fyzikálno-chemické metódy alebo kombinácia sanačných metód in situ a ex situ).

Nulový variant

Všeobecne nulový variant predstavuje zachovanie existujúceho/súčasného stavu, t. j. pôsobenie rizikových faktorov spojených so zisteným znečistením v horninovom prostredí a v podzemnej vode. V rámci tohto scenára nie sú aplikované žiadne aktívne opatrenia, záujmové územie sa ponechá v existujúcom stave. K postupnému znižovaniu úrovne znečistenia dochádza v dlhodobom časovom horizonte v dôsledku pôsobenia prirodzene prebiehajúcich prírodných procesov (prirodzená biodegradácia, riadenie, sorpcia, vyprchávanie, atď.)

Z reálne aplikovateľných inštitucionálnych riešení ako (napr. zákaz vstupu ľudí do záujmového územia, zákaz výstavby, zákaz využívania podzemnej vody k zavlažovaniu, účinné vetranie priestorov, atď.) by nevedlo k eliminácii hlavných identifikovaných rizík. Na predmetnej lokalite a v jej okolí je dlhodobo evidované znečistenie PCE v podzemnej vode nad intervenčné kritériá (Polák, 1992, Urban et al., 2015, Kminiaková et al., 2023) bez zjavných trendov poklesu. Čiastočné zníženie koncentrácií PCE v podzemnej vode sa prejavilo iba lokálne.

Zdroj znečistenia v zeminách nebol posledným prieskumom – Kminiaková et al., 2023 overený ale nie je vylúčené, že je na lokalite stále prítomný (napr. pod budovami a spevnenými plochami). Poukazujú na to stále pomerne vysoké koncentrácie PCE v blízkosti areálu prácovní, a tiež to, že najvyššie hodnoty PCE boli vo všeobecnosti identifikované tesne pod hladinou podzemnej vody a nie na báze zvodnenca. Ďalším faktorom nepodporujúcim nulový variant je, že na lokalite a v smere šírenia znečisťujúcich látok, nedochádza k rozpadu PCE na jeho dcérske produkty (TCE, DCE, VC).

Nulový variant nie je vhodný, nakoľko je znečistenie v prostredí stále prítomné bez podstatných prejavov trendov poklesu poukazujúcich na potrebnú elimináciu znečistenia prirodzenými procesmi. Je potrebné zamedziť šíreniu potenciálne toxických látok z lokality do podzemnej vody (AAR potvrdila riziko šírenia sa znečisťujúcich látok podzemnou vodou). Ďalším aspektom prítomnosti EZ by bola limitovaná možnosť využitia územia a potreba zabezpečenia dlhodobého monitorovania lokality. Preto aj vzhľadom na súčasné a plánované budúce využitie územia je nulový variant nevhodný.

Maximálny variant

Maximálny variant znamená úplné odstránenie znečistenia. Je reálny v špecifických prípadoch, keď znečistenie je viazané na výrazne ohraničené teleso. Tento variant je ďalej opodstatnený v zraniteľných územiach, ako sú ochranné pásma vodných zdrojov, citlivé obytné zóny, chránené oblasti podľa zvláštnych predpisov, kde je potrebné úplné odstránenie znečisťujúcich látok v celom zasiahnutom území.

Z výsledkov prieskumných prác nebolo identifikované riziko bezprostredného ohrozenia významných vodohospodárskych zdrojov, alebo iných dôležitých receptorov. Preukázané bolo „iba“ riziko šírenia sa znečisťujúcich látok podzemnou vodou. Analýzou rizika nebolo preukázané zdravotné riziko pre potenciálne receptory.

Realizácia tohto variantu na predmetnej lokalite by znamenala odťaženie všetkých znečistených návažok a zemín (nielen tých, kde je potenciálna tvorba výluhov znečisťujúcich látok). Nakladanie s odťaženým znečisteným materiálom by nemalo spočívať iba v odvezení na skládku (premiestnenie znečistenia), ale mala by existovať efektívna možnosť odstránenia znečisťujúcej látky z matrice, zníženie obsahu znečisťujúcej látky (napr. chemická extrakcia, vymytie, biodegradácia až po úplnú utilizáciu), resp. imobilizácia znečisťujúcej látky (napr. solidifikáciou). Tiež by museli byť znížené koncentrácie PCE v podzemnej vode na koncentrácie nižšie ako sú CHS.

Z analýzy rizík vyplýva, že v prípade úspešnej realizácie aktívneho sanačného zásahu a dosiahnutia navrhovaných sanačných limitov dôjde k zníženiu environmentálnych rizík na úroveň, ktorá je bezpečná ako z hľadiska budúceho využitia záujmového územia, tak aj z hľadiska ochrany zásob podzemnej vody.

Z dôvodu vyššie uvádzaných zásad a neprimeranej potrebe takého prístupu vzhľadom k charakteru a miere znečistenia tento variant sanácie neodporúčame.

Izolácia znečisteného územia

Izolácia územia predstavuje pasívny sanačný zásah, ktorého cieľom je zamedzenie šírenia sa znečistenia zo znečistených zemín do podzemnej vody. Tento prístup je založený na aplikácii technických opatrení, ktorých cieľom je buď minimalizovať možnosť kontaktu verejnosti so znečisteným prostredím (prekrytím znečistenej zeminy vrstvou inertného materiálu a pod.) alebo obmedziť ďalšie rozširovanie znečistenia (napr. enkapsuláciou ohnisk znečistenia, výstavbou podzemných tesniacich stien, prevádzkovaním hydraulickéj bariéry a pod.). Izolácia je vhodná najmä v prípade, že sa predpokladá pretrvávajúca aktivita zdrojov znečistenia, resp. v lokalite je zvýšené riziko havarijných únikov. Izolácia povrchu zakrytím sa vo všeobecnosti používa pri sanácii zemín znečistených zmesou znečisťujúcich látok, alebo ako opatrenie na minimalizáciu vyplavovania znečisťujúcich látok (Frankovská et al., 2010). Výlučné zakrytie je opodstatnené použiť iba pri malých znečisteniach a v podmienkach, kde je preukázaná nemožnosť úniku znečistenia do strán alebo smerom k hladine podzemnej vody (znečistenie musí byť v dostatočnej výške nad hladinou podzemnej vody).

V rámci skúmaného územia je dotknutým médiom podzemná voda. Kvalita podzemnej vody je výrazne ovplyvnená prítomnosťou PCE. Samotná izolácia prítomného zdroja znečistenia je technicky a nákladovo náročná, s nutnosťou zabrániť prúdeniu podzemnej vody do znečistenej oblasti, ale aj odtoku znečistenej podzemnej vody tesniacimi bariérami alebo podzemnými tesniacimi stenami. Vzhľadom na nemožnosť prekrytia celého skúmaného územia, takéto riešenie tiež vyžaduje po infiltrácii zrážok potrebu odľahčovania tesniacich stien čerpaním vôd, t.j. potreba dlhodobého znížovania hladiny podzemnej vody v izolovanej oblasti.

Ako výhody prístupov založených na izolácii znečistenia sa zvyčajne uvádzajú tieto:

- možnosť realizácie opatrenia bez nutnosti odťažby kontaminovaných zemín (napr. pod existujúcimi stavebnými objektmi),
 - nižšie náklady pri malom rozsahu znečistenia (v porovnaní s aktívnou sanáciou),
 - rýchlosť.

Hlavné nevýhody izolácie znečistenia:

- znečistenie ostáva v záujmovom území,
- nejedná sa o definitívne riešenie (v kratšom alebo dlhšom časovom horizonte sa bude nutné k riešeniu kontaminačného problému znovu vrátiť),
- vybudovaný izolačný systém môže dlhodobo vyžadovať náklady na prevádzku (napr. hydraulická bariéra) a monitoring,
- vybudovanie účinných podzemných tesniacich prvkov môže byť problematické (napr. v území, kde sa nachádzajú podzemné stavebné konštrukcie a vedenia),
 - vysoké finančné náklady pri väčšom rozsahu znečistenia.

Potenciálne pretrvávajúce znečistenie v horninovom prostredí v areáli by limitovalo plánovanú zmenu využitia územia. Hĺbka relatívne nepriepustného podložia je pomerne hlboko (približne 15 – 18 m), čo by predstavovalo pomerne vysoké náklady na vybudovanie tesnenia. Vplyvom izolácie by nastala zmena režimu a smeru prúdenia podzemnej vody, čo by mohlo zásadne ovplyvniť podmienky vo zvodnení a mať dopad na šírenie sa znečisťujúcich látok v okolí lokality. Z vyššie uvedených dôvodov neodporúčame variant izolácie územia k ďalšiemu hodnoteniu.

Sanácia po navrhované sanačné limity

Sanácia po navrhované sanačné limity je aktívnym sanačným zásahom. Účelom aktívneho sanačného zásahu je trvalé zníženie znečistenia v území na akceptovateľnú úroveň, t.j. takú, ktorá nepredstavuje zdravotné ani environmentálne riziká pre súčasné alebo budúce využitie tohto územia a jeho okolia.

Pri sanácii znečistených zemín a podzemných vôd sa uplatňuje široká škála fyzikálnych, chemických a biologických metód. Konkrétne sanačné postupy sú volené s ohľadom na charakter a rozsah znečistenia, úroveň cieľových sanačných limitov, miestne podmienky, relevantné legislatívne a administratívne obmedzenia, predpokladanú dobu sanácie, prípadne požiadavky majiteľa záujmového územia.

Podľa miesta, na ktorom prebieha vlastná sanácia znečistených zemín alebo podzemnej vody sa rozlišujú „in situ“ a „ex situ“ sanačné postupy. V prípade sanácie „in situ“ dochádza k dekontaminácii priamo v horninovom prostredí – bez vynášania zeminou alebo podzemnej vody na povrch (napr. venting, chemická oxidácia, a pod.). Ak je sanácia založená na vyťažení znečistenej zeminou z miesta jej pôvodného výskytu, alebo na odčerpávaní podzemnej vody z pásma nasýtenia, ide o postupy „ex situ“.

Podľa spôsobu nakladania s odťaženou zeminou, vyčerpanou podzemnou vodou sa postupy „ex situ“ delia na dve podskupiny:

- metódy „off-site“: kodstráneniu, alebo spracovaniu odťažených zemín, príp. vyčerpaných vôd sa využíva zariadenie nachádzajúce sa mimo záujmového územia (napr. skládka, spaľovňa, čistiareň odpadových vôd a pod.),
- metódy „on-site“: sanácia odťaženej zeminou alebo spracovanie vyčerpanej vody prebieha na zariadení, ktoré je za týmto účelom inštalované priamo v záujmovom území (napr. mobilné zariadenie na termickú desorpciu zemín, kontajnerová stanica na čistenie znečistenej vody a pod.). V

prípade „on-site“ sanácie zemín sa dekontaminovaný materiál obvykle využíva pre terénne úpravy a závoz výkopov po odťažení nadlimitne znečistených polôh horninového prostredia. V prípade „on-site“ sanácie podzemnej vody sa voda vyčistená na úroveň požadovaných limitov buď injektuje späť do horninového prostredia, alebo sa vypúšťa do kanalizácie, či prípadne do povrchového toku.

V prípade skúmanej lokality navrhujeme sanáciu po navrhované sanačné limity pre podzemnú vodu, resp. znečistené zvodnené horninové prostredie. Vzhľadom k podmienkam na lokalite a potrebe splnenia sanačného cieľa a dosiahnutia sanačných limitov považujeme koncepciu aktívnej sanácie podzemnej vody na lokalite za potenciálne vhodnú. Dôležitým aspektom efektívnej a dostatočnej sanácie je vhodný výber jednotlivých sanačných metód a ich správne aplikovanie na lokalite. Predpokladom pre úspešné aplikovanie sanácie znečisteného zvodnenca je eliminácia prípadného znečistenia v pásme prevzdušnenia overeného v rámci doplnkového prieskumu po asanácii budov.

4. Identifikácia vhodných sanačných techník a technológií

4.1 Metódy sanácie horninového prostredia znečisteného alifatickými chlórovanými uhľovodíkmi

Na lokalite bolo viacerými geologickými prieskumami životného prostredia (Polák, 1992; Urban et al. 2015, Kminiaková et al., 2023) a monitorovaním podzemnej vody (Kordík et al., 2022) identifikované dominantné znečistenie tetrachlóretylénom (PCE). Z hľadiska členenia na základe príbuznej chemickej štruktúry PCE patria do skupiny alifatických chlórovaných uhľovodíkov. Do tejto skupiny ďalej patria: bromoform, chloroform, 1,1,2-trichlóretán, chlórdibrommetán, hexachlóretán, 1,1-dichlóretán, tetrachlóretán, 1,1-dichlóretylén, trichlóretylén, tetrachlóretylén, vinylchlorid, perchlóretylén, dichlóretán, fluorotrichlóretán (freón 11) a ďalšie.

Alifatické chlórované uhľovodíky sa vyznačujú špecifickými fyzikálno-chemickými vlastnosťami, ku ktorým patria:

- *Vysoká merná hmotnosť* – alifatické chlórované uhľovodíky sú ťažšie ako voda, preto pri zasiahnutí zvodne klesajú ku báze zvodne. Tu sa môžu vyskytovať vo forme vysokých koncentrácií vo vode alebo vo forme ťažkej nevodnej voľnej fázy (DNAPLs – dense non-aqueous phase liquids – organické látky ťažšie ako voda). Vzhľadom na túto vlastnosť sa zvýšená pozornosť venuje prieskumu znečistenia pri báze zvodne a vyhľadávaniu depresii nepriepustného podlažia, kde sa znečistenie môže hromadiť a šíriť sa v smere sklonu bázy, i proti smeru prúdenia podzemnej vody. V prípade vytvorenia voľnej fázy na dne dochádza k dlhodobému uvoľňovaniu znečistenia do ostatných častí zvodne.
- *Tvorba rozpadových produktov* – na technologické účely pri odmasťovaní sa používa predovšetkým 1,1,2,2-tetrachlóretén, 1,1,2-trichlóretén. Po úniku do okolitého prostredia dochádza k ich rozkladu a degradácii v dôsledku odštiepenia Cl⁻, alebo štiepenia uhlíkového reťazca. Preto je potrebné pri prieskumných prácach sledovať prítomnosť všetkých možných rozpadových produktov.
- *Rozpustnosť* – nie je zanedbateľná a všeobecne platí, že s nárastom počtu atómov chlóru v molekule chlórovaných uhľovodíkov ich rozpustnosť klesá.
- *Terénna identifikácia a analýzy* – ťažko ich detegovať priamo v teréne. Sú bez farby. Väčšina alifatických chlórovaných uhľovodíkov sa vyznačuje zápachom po chloroforme. Jednou z možností identifikácie alifatických chlórovaných uhľovodíkov v zeminách priamo v teréne je ich identifikácia v UV svetle.
- Jediný spôsob ako ich identifikovať vo vzorkách podzemných vôd je laboratórny rozbor.

Uvedené vlastnosti determinujú spôsob šírenia sa znečistenia a vystupovanie chlórovaných uhľovodíkov v prírode. Chlórované uhľovodíky po ich uvoľnení do prírodného prostredia – zvodne pozvoľne klesajú ku dnu zvodne. Pohybom podzemnej vody sú postupne unášané v smere prúdenia podzemnej vody, ale vzhľadom na vyššiu mernú hmotnosť často tvoria sekundárne zdroje znečistenia v depresiách nepriepustného podložia. Pre identifikáciu zdrojov znečistenia je preto dôležitejšie ako poznanie primárneho zdroja (od ktorého môže byť kontaminačný mrak úplne odtrhnutý a „odplávaný“ po smere prúdenia podzemnej vody na značnú vzdialenosť) poznanie práve sekundárnych zdrojov a akumulácií.

Chlórované uhľovodíky majú pôvod predovšetkým vo výrobných procesoch, komunálnych čistiarňach, strojárnských opravárňach a v niektorých prípravkoch používaných v domácnosti. V prírode sa prakticky netvoria žiadne organické zlúčeniny obsahujúce chlór, a preto sa prítomnosť chlórovaných organických látok vo vode považuje za neklamný indikátor priemyselnej činnosti.

Medzi najčastejšie sa vyskytujúce kontaminanty zo skupiny chlórovaných zlúčenín patria: 1,1,2-trichlóretén, tetrachlóretylén, dichlórmétán a tetrachlórmétán. Základný rozpadový rad tetrachlóretylénu ako zlúčeniny s najvyšším stupňom chlorácie z tejto skupiny je: tetrachlóretylén – trichlóretylén – cis- a trans-dichlóretylén – vinylchlorid.

Tieto látky sú vo všeobecnosti relatívne rezistentné voči procesom prirodzenej degradácie a ich pretrvávanie v horninovom prostredí je toho priamym dôsledkom. Intenzita procesov prirodzenej biodegradácie závisí od špecifických vlastností prostredia ako je koncentrácia kyslíka v podzemnej vode, špecifické oxidačno-redukčné podmienky a iné. Chlórované uhľovodíky sa pre svoju relatívne vysokú hustotu vyskytujú zväčša na báze zvodnených vrstiev, ktoré sú zospodu ohraničené menej priepustným horninovým prostredím. Vzhľadom na schopnosť rozpúšťať nepolárne uhľovodíky ich možno v prírodnom prostredí často nájsť extrahované prítomnými ropnými látkami, z ktorých sa môžu za priaznivých podmienok vyparovať do pôdneho vzduchu.

Tetrachlóretylén (PCE)

Tetrachlóretylén je výborné rozpúšťadlo organických látok. Je prchavý, veľmi stabilný a nie horľavý. Preto sa široko používa pre suché čistenie. Väčšinou v zmesi s ďalšími chlórovanými uhľovodíkmi sa používa na odmasťovanie kovových častí v automobilovom a inom hutníckom priemysle. Je obsiahnutý v niektorých spotrebiteľských výrobkoch, napríklad odstraňovačoch náterov. Tetrachlóretén je pravdepodobný karcinogén pre človeka. Podobne ako mnoho ďalších chlórovaných uhľovodíkov pôsobí tetrachlóretylén tlmivo na centrálny nervový systém a môže vstupovať do tela cez dýchacie ústrojenstvo, alebo kožu. Rozpúšťa tuky v koži a môže ju dráždiť. Vzhľadom k jeho mobilite v podzemnej vode, nízkoúrovňovej toxicite a vysokej hustote (vyššia ako hustota vody) je jeho odstraňovanie oveľa zložitejšie ako odstraňovanie únikov ropy.

K najbežnejšie používaným sanačným postupom realizovaným pri dekontaminácii prostredia znečisteného týmito látkami sa podľa FRTR (2008) zaraďujú:

- horninové prostredie a pevné materiály – vákuová extrakcia, termická desorpcia, spaľovanie, bioextrakcia (bioventing),
- voda – ISCO, ISCR, BRD, sanačné čerpanie a čistenie (striping a adsorpcia,), airsparging + venting,
- pôdny vzduch a plyny – adsorpcia, fotokatalytická oxidácia a termálna oxidácia.

Maticu sanačných metód a postupov realizovaných pri dekontaminácii prostredia znečisteného halogénovanými prchavými organickými látkami uvádza Tabuľka 6.

Tabuľka 6: Matica sanačných metód a postupov realizovaných pri dekontaminácii prostredia znečisteného halogénovanými prchavými organickými látkami (Frankovská et al., 2010)

Technológia	Stav vývoja metódy	Uplatnenie metódy	Aplikovateľnosť	Spoľahlivosť	Čas čistenia	Účinok technológie na kontaminant
Horninové prostredie a pevné materiály						
<i>Biologické metódy in situ</i>						
Bioventing	●	○	→	→	→	deštrukcia
Podporovaná biosanácia	●	○	●	→	→	deštrukcia
Fytosanácia	●	○	●	●	○	deštrukcia
<i>Fyzikálne a chemické postupy in situ</i>						
Chemická oxidácia	●	○	→	●	●	deštrukcia
Elektrokinetická sanácia	●	○	●	●	●	deštrukcia
Narušovanie štruktúry, štiepenie	●	○	→	→	→	extrakcia
Vymývanie pôdy	●	○	●	●	●	extrakcia
Vákuová extrakcia	●	●	●	●	●	extrakcia
Solidifikácia a stabilizácia	●	○	●	●	●	extrakcia/ deštrukcia
Termicky podporované odparovanie	●	○	●	●	●	extrakcia
<i>Biologické metódy ex situ</i>						
Kompostovanie	●	○	●	●	●	deštrukcia
Obrábanie pôdy (landfarming)	●	○	●	●	●	deštrukcia

Vývetlivky pre Tabuľku 6:

„Doplňkový geologický prieskum potvrdenej environmentálnej záťaže B2(008)/Bratislava - Ružinov – Na paši č.4 – chemická čistiareň“ – štúdia uskutočniteľnosti sanácie“

Faktory a definície	Označenie v matici			
	○	◐	●	→
Stav vývoja metódy	pilotný (metóda je vo vývoji)		úplný (metóda úspešne realizovaná a overená v praxi)	
Uplatnenie metódy	limitované (účinnosť metódy nebola zatiaľ dostatočne overená v praxi)		široké (účinnosť metódy bola overená na mnohých lokalitách)	-
Aplikovateľnosť metódy	limitovaná	priemerná	dobrá	
Spôľahlivosť/udržateľnosť sanačného systému	nízka spoľahlivosť a zložitá udržateľnosť	priemerná spoľahlivosť a udržateľnosť	vysoká spoľahlivosť a jednoduchosť udržateľnosti	
Trvanie sanácie poukazuje na efektivnosť sanačnej metódy. Za štandardnú lokalitu sa považuje znečistenie 20 000 ton zeminy a 3 785 000 litrov podzemnej vody.	dlhá: viac ako 3 roky v prípade pôdy (in situ, pevné materiály)	stredná: 1 – 3 roky	krátka: menej ako 1 rok	pozri profil metódy: zaradenie nie je jednoznačné (potrebné pozrieť detailnejšie profil sanačnej metódy v kap. 4)
	viac ako 1 rok v prípade pôdy (ex situ, pevné materiály)	0,5 – 1 rok	menej ako 0,5 roka	
	viac ako 10 rokov v prípade vody	3 – 10 rokov	menej ako 3 roky	
NA = údaj nie je k dispozícii				

Technológia	Stav vývoja metódy	Uplatnenie metódy	Aplikovateľnosť	Spoľahlivosť	Čas čistenia	Účinok technológie na kontaminant
<i>Fyzikálne a chemické postupy ex situ</i>						
Chemická extrakcia	●	○	◐	◐	◐	extrakcia/deštrukcia
Chemická oxidácia alebo redukcia	●	○	◐	●	●	deštrukcia
Dehalogenácia	●	○	●	NA	NA	deštrukcia
Separácia	●	○	◐	●	●	extrakcia
Pranie pôdy	●	○	◐	●	●	extrakcia
Solidifikácia a stabilizácia	●	○	◐	●	●	imobilizácia
Spaľovanie	●	●	●	◐	●	deštrukcia
Pyrolýza	●	○	◐	○	●	deštrukcia
Otvorené spaľovanie a detonácie	●	○	○	●	●	deštrukcia
Termická desorpcia	●	●	●	◐	●	extrakcia
Ťažba materiálu a sanácia na dekontaminačnej ploche	NA	○	◐	◐	●	extrakcia/imobilizácia
Voda						
<i>Biologické metódy in situ</i>						
Podporovaná biosanácia	●	○	→	→	→	deštrukcia
Prirodzená atenuácia	●	○	→	→	→	deštrukcia
Bioslurping	●	○	◐	◐	◐	deštrukcia
Fytosanácia	●	○	◐	◐	○	extrakcia/deštrukcia
<i>Fyzikálne a chemické postupy in situ</i>						
Aerácia (prevzdušňovanie)	●	○	◐	●	●	extrakcia
Chemická oxidácia	●	○	◐	◐	●	deštrukcia
Horizontálne vrty	●	○	→	→	→	extrakcia/deštrukcia
Metódy tepelnej podpory	●	○	●	◐	●	extrakcia
Rozvoľňovanie horninového prostredia	●	○	→	→	→	→
Striping vo vrte	●	○	◐	◐	○	extrakcia
Hĺbková injeckcia	●	●	◐	◐	NA	imobilizácia
Fyzikálne bariéry	●	○	●	●	○	imobilizácia
<i>Biologické metódy ex situ</i>						
Bioreaktory	●	○	●	◐	◐	deštrukcia
Umelé mokrade	●	○	●	◐	◐	imobilizácia/deštrukcia
<i>Fyzikálne a chemické postupy ex situ</i>						
Striping	●	●	●	●	○	extrakcia
Adsorpcia a absorpcia	●	○	◐	◐	○	extrakcia
Oxidačné procesy	●	○	●	◐	○	deštrukcia
Sanačné čerpanie a čistenie	●	○	●	◐	○	extrakcia
Ionovýmena	●	○	○	●	○	extrakcia
Zrážanie, koagulácia, flokulácia	●	○	○	●	○	extrakcia
Separácia	●	○	●	●	●	extrakcia
<i>Pôdny vzduch a plyny</i>						
Biofiltrácia	●	○	→	→	●	extrakcia/deštrukcia
Vysokoenergetická deštrukcia	○	○	●	○	NA	deštrukcia
Membránová separácia	○	○	●	○	NA	extrakcia
Oxidácia	●	●	●	●	NA	deštrukcia
Vypieranie a absorpcia	●	●	●	●	NA	extrakcia

„Doplňkový geologický prieskum potvrdenej environmentálnej záťaže B2(008)/Bratislava - Ružinov – Na paši č.4 – chemická čistiareň“ – štúdia uskutočniteľnosti sanácie“

4.1.1 Sanácia za účelom dosiahnutia cieľa sanácie a cieľových hodnôt sanácie

Na základe výsledkov realizovaného geologického prieskumu a analýzy rizika boli pre sanáciu ekosystémov horninové prostredie – podzemná voda vybrané do ďalšieho posudzovania nasledujúce sanačné metódy: **biologická reduktívna dehalogenizácia, chemická oxidácia, airsparging + venting, chemická redukcia pomocou nanoželeza, čerpanie a čistenie s využitím airstripingu a adsorpcie.** Vybrané metódy predstavujú potenciálne vhodné sanačné technológie pre dosiahnutie cieľa sanácie a cieľovej hodnoty sanácie.

Uvedené sanačné technológie predstavujú in-situ metódy určené primárne pre čistenie podzemnej vody a sčasti aj horninového prostredia. S ich aplikovaním sa uvažuje až po asanácii budov a odťažení znečistenej zeminy, v prípade preukázania jej znečistenia doplnkovým geologickým prieskumom.

Podklad pre spracovanie jednotlivých metód uvedených v texte nižšie predstavuje najmä Atlas sanačných metód (Frankovská et al., 2010).

4.1.1.1 Metóda biologickej reduktívnej dehalogenizácie (BRD)

Princíp: hlavným procesom biodegradácie je redukčná dechlorácia, pri ktorej sú atómy chlóru postupne nahradzované vodíkom. Tieto procesy prebiehajú výhradne v anaeróbnom prostredí. Hlavným mechanizmom biodegradačného procesu, ktorým sú ClU pri sanácii transformované, je tzv. dehalorespirácia. Chlorované uhľovodíky sú vysoko oxidované látky, ktoré je množstvo anaeróbných mikroorganizmov schopná využívať ako akceptor elektrónu pri metabolických procesoch a sekvenčne ich transformovať až na netoxické látky. Ide o postupný rozklad PCE cez TCE, DCE a VC až na etén. (Suthersan et. al 2002, Henry et al. 2004). Základným princípom reduktívnej dehalogenácie ako sanačnej metódy je aplikáciou organického substrátu (obyčajne kyselina mliečna, srvátka, melasa, chitín, atď) do kontaminovaného zvodnenca vytvoriť reaktívnu zónu, kedy organický substrát slúži ako zdroj uhlíka pre prítomnú mikroflóru. Rozkladom aplikovaného substrátu dôjde k vyčerpaniu kyslíka z prostredia, rozvoju anaeróbného mikrobiálneho konzorcia, a tým k vytvoreniu optimálnych anaeróbných podmienok pre priebeh reduktívnej dehalogenácie. Dehalorespirujúce mikroorganizmy následne využívajú ako zdroj energie vodík a niektoré jednoduché organické látky, ktoré vznikajú pri fermentácii aplikovaného substrátu.

Použitelnosť: metóda je použiteľná na elimináciu chlórovaných etylénov, BTEX, niektorých kovových iónov, leteckého paliva, organických rozpúšťadiel atď.

Obmedzenia: táto metóda nie je samostatne použiteľná na miestach, kde neexistujú vhodné podmienky na prirodzenú atenuáciu, najmä tam, kde toxicita znečisťujúcich látok spôsobuje potlačanie atenuačných procesov. Nie je použiteľná tam, kde je rýchlosť rozkladu znečisťujúcej látky pomalšia ako je rýchlosť jej dotácie do prostredia a šírenia v ňom, prípadne ak tento proces trval príliš dlho. Vo vysoko heterogénnom prostredí môže byť problém zabezpečiť rovnomerné rozloženie podporných látok v celom objeme upravovanej podzemnej vody, čo môže spôsobiť výrazne obmedzenú účinnosť. Ďalším obmedzením je absencia prítomnosti potrebných dehalogenačných baktérií.

Opis technológie: technológia je založená na infiltrovaní substrátu na podporu a urýchlenie degradačných procesov v redukčnom prostredí a tiež na infiltráciu základných živín. Súčasťou použitia technológie je tiež monitorovanie (koncentrácia znečisťujúcej látky, SO₄, pH, Eh, O₂, koncentrácie heterotrofných a degradačných mikroorganizmov, základných živín, respiračné testy aktivity).

Overenosť technológie: technológia je overená.

Kapacita: závisí od koncentrácie znečisťujúcej látky, objemu znečisteného prostredia, priepustnosti horninového prostredia, hustoty injektáže (prípadne čerpacích zariadení) v použitom substráte.

Prevádzkové požiadavky: prevádzku musí vykonávať špeciálne vyškolený personál.

Vznik odpadu: výhodou tejto technológie je, že prakticky nevzniká žiadny odpad.

Vplyv na životné prostredie: táto *in situ* biotechnológia využíva prítomnosť prirodzene sa vyskytujúcich mikroorganizmov na lokalite, a preto je jej vplyv na životné prostredie minimálny. Určité ovplyvnenie môžu spôsobiť podporné látky, ktoré sa dostávajú do horninového prostredia na podporu procesu prirodzenej biodegradácie. Vo všeobecnosti tieto organické látky nepredstavujú významnú záťaž pre životné prostredie a závisia od povahy jednotlivých použitých látok. V mieste aplikácie a v okolí dočasne pôsobia na prirodzené chemické zloženie vody – zmenu oxidačno-redukčných vlastností podmienok, pH, EC, tvorbou mastných kyselín. V prípade, že proces dechlorácie neprebehne až po vznik eténu, môžu sa generovať nižšie chlórované členy radu chlórovaných etylénov s karcinogénnymi účinkami.

Vplyv na využívanú oblasť: iba čiastočný vplyv v rámci sanovanej oblasti v dôsledku vybudovania infiltračných vrtov a zariadenia staveniska (najmä pri full-scale verzii).

BOZP: prevádzka technológie na lokalite nepredstavuje riziko za predpokladu jej dostatočného technického zabezpečenia (vodotesnosť, opatrenia proti zamrznutiu). Predpokladom je dodržiavanie pravidiel BOZP vrátane používania predpísaných osobných ochranných pracovných prostriedkov.

Časová požiadavka: v prípade samostatného použitia ide o dlhšie trvajúcu sanačnú metódu, s dobou trvania v podmienkach záujmového územia približne 5 až 7 rokov.

Náklady: v porovnaní s inými sanačnými metódami ide o metódu nízko až stredne nákladnú.

Riziká: postupná akumulácia DCE a VC – nežiaducich medziproduktov rozkladu uvedených chlórovaných etylénov. Platí aj pre ostatné sanačné metódy umožňujúce deštrukciu CIU.

Vhodnosť pre lokalitu: prirodzený proces atenuácie nebol predchádzajúcimi prieskumnými prácami na lokalite preukázaný. V prípade vytvorenia redukčných podmienok na lokalite môže predmetná metóda slúžiť ako podporná metóda pre udržiavanie požadovaných redukčných podmienok v sanovanom horninovom prostredí. **Pre záujmovú lokalitu je táto metóda podmienene vhodná ako doplnujúca metóda pre sanáciu založenú na reduktívnej dechlorácii (napr. chemická redukcia nanoželezom).**

4.1.1.2 Metóda chemickej oxidácie *in situ* (ISCO)

Princíp: ide o sanačnú technológiu, pri ktorej sa do znečisteného horninového prostredia dodáva silný oxidant vo forme vodného roztoku, aby v dôsledku chemických interakcií nastala deštrukcia znečisťujúcich látok rozpustených v podzemnej vode alebo sorbovaných v horninovom prostredí.

Použitelnosť: vo všeobecnosti je táto metóda uplatniteľná pre sanáciu akýchkoľvek oxidovateľných znečisťujúcich látok. Metóda sa často uplatňuje na organické kontaminanty s vyššou rozpustnosťou. Najčastejšie sa používa na sanáciu znečistenia chlórovanými etylénmi, fenolmi, aldehydmi a amínmi. Metóda sa dá použiť predovšetkým na sanáciu znečistenej podzemnej vody s vyššou koncentráciou organických látok, ktoré sú oxidovateľné za vzniku netoxických, alebo menej toxických produktov a kde je použitie ostatných sanačných techník vylúčené. Technológia sa používa predovšetkým na elimináciu znečistenia menšieho rozsahu, resp. v centrálnej oblasti znečistenia v rámci pásma nasýtenia a tiež v dosahu kapilárnej obruby.

Overenie technológie: technológia je overená.

Obmedzenia: náklady limitujú jej využitie pri rozsiahlych znečisteniach a nízkej koncentrácii kontaminantov. Ak znečistenie tvorí zmes kontaminantov, nebudú podliehať chemickým reakciám s oxidantmi rovnomerne, ale časť menej reaktívnych kontaminantov (napr. frakcie DNAPL) môže ostať nevyčistená, s koncentráciou prevyšujúcou limitné hodnoty (možné riešenie napr. aplikovaním

ďalších sanačných techník). Existuje potenciál na tvorbu procesov spôsobujúcich škodlivé účinky na organizmy (potreba dodržiavať pomerne prísne bezpečnostné pravidlá vzťahujúce sa na nakladanie s oxidačnými činidlami). Pred samotnou aplikáciou je potrebné realizovať laboratórne a pilotné testy, získať potrebné povolenia a zabezpečiť detailný monitoring na sledovanie prebiehajúcich procesov. Oxidant musí byť rovnomerne rozptýlený do medzizrnového priestoru iba v rámci kontaminovanej oblasti (málo homogénne a málo priepustné horninové prostredie a slabo rozpustné oxidačné činidlá môžu výrazne limitovať použitie metódy). Pri aplikovaní oxidantov na znečistenie obsahujúce prchavé látky sa zvyšuje možnosť ich nekontrolovateľného uvoľňovania do ovzdušia; je to spôsobené zvýšením tepla, ktoré vzniká pri reakciách oxidantov s kontaminantmi (vzhľadom na takéto situácie sa opisovaná metóda často kombinuje s inými sanačnými metódami, napr. ventingom).

Opis technológie: prostredníctvom siete infiltračných vrtov (vertikálnych, horizontálnych) prípadne drenáží sa aplikuje presné množstvo oxidačného činidla do pásma nasýtenia. Najviac používaným činidlom býva vodný roztok KMnO_4 (koncentrácia blízka nasýtenému roztoku) a Fentonovo činidlo ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$), H_2O_2 alebo persíran sodný či vápenatý atď. Hlavnými konečnými produktmi prebiehajúcich reakcií sú CO_2 , H_2O , zlúčeniny železa a oxidy mangánu (v závislosti od použitého činidla). V priebehu infiltrácie je potrebné monitorovať zvyškovú koncentráciu oxidačného činidla (KMnO_4 , H_2O_2), Cl^- iónov ako indikátorov rýchlosti degradácie chlórovaného etylénu a fyzikálno-chemické parametre, predovšetkým oxidačno-redukčný potenciál, rozpustený kyslík, vodivosť a v niektorých prípadoch tiež pH.

Kapacita: závisí od hustoty infiltračných vrtov, hydraulických parametrov horninového prostredia, homogenity prostredia, úrovne znečistenia, množstva použitého činidla, rýchlosti infiltrácie činidla.

Prevádzkové požiadavky: prevádzku musí vykonávať špeciálne vyškolený personál.

Vznik odpadu: nevzniká žiadny odpad.

Vplyv na životné prostredie: pri aplikovaní metódy sa väčšinou radikálne zmenia podmienky v horninovom prostredí na výrazne oxidačné. Týmto spôsobom sa môžu ovplyvniť ďalšie vlastnosti horninového prostredia či správanie niektorých súčasne sa vyskytujúcich kontaminantov (zmena mobility stopových prvkov, zmena priepustnosti, zmena prirodzenej mikrobiálnej aktivity, výskyt toxických medziproduktov a pod.). Preto by sa malo vykonať podrobné posúdenie potenciálnych rizík pre danú lokalitu. Pri použití manganistanu draselného ako oxidačného činidla sa v podzemnej vode vytvára fialové zafarbenie, ktoré v prípade jeho šírenia mimo sanované územie môže vzhľadom ku kvalitatívnym požiadavkám spôsobovať senzorické znehodnotenie podzemnej vody.

Vplyv na využívané územie: čiastočný vplyv na sanovanú oblasť v dôsledku vybudovania infiltračných vrtov a vybudovania manipulačnej stanice.

BOZP: V niektorých prípadoch môže ísť o relatívne búrlivé reakcie pri vyšších koncentráciách infiltrovaných oxidačných činidiel. Je preto dôležité optimalizovať proces, t. j. množstvo a postupnosť aplikovaných reakčných činidiel. Predpokladom je dodržiavanie pravidiel BOZP vrátane používania predpísaných osobných ochranných pracovných prostriedkov a riadne preškolenie osôb vykonávajúcich aplikačné práce.

Časová náročnosť: ide o relatívne rýchlu metódu, ktorá vždy závisí od miestnych podmienkach (priepustnosť prostredia, homogenita atď.). Obyčajne netrvá dlhšie ako niekoľko dní až mesiacov. Metóda ISCO umožňuje vo všeobecnosti vysokú účinnosť pri dosahovaní požadovaných limitov (viacej ako 90 %) s veľmi rýchlo prebiehajúcimi reakciami (90 % deštrukcie kontaminantov prebehne v niekoľkých minútach. Na predmetnej lokalite pri optimálnom aplikovaní je predpoklad dosiahnutia sanačného limitu približne 1 rok.

Náklady: technológia je mierne nákladná. Metóda oproti iným sanačným metódam je cenovo výhodná, najmä ak treba sanovať zdrojovú oblasť alebo menší rozsah znečistenia za krátky čas. Jej účinnosť podmieňujú podmienky na lokalite. Cenu ovplyvňuje aj výber oxidačných činidiel, lebo

okrem ich účinnosti a rýchlosti je potrebné zvážiť aj spotrebu jednotlivých oxidantov pri reakciách s kontaminantmi. Vplyv na celkovú cenu má aj počet infiltračných a extrakčných vrtov a prevádzkovanie systému ISCO. Výhodnejšie je mať uzavretý cyklus iniektáže a reiniektáže oproti viacnásobnej iniektáži bez extrakcie, resp. systému s extrakciou s následným dočistením na povrchu.

Riziká: hlavné riziko súvisí s možným predávkovaním oxidačným činidlom, kedy dochádza k napr. vyzrážaniu oxidov mangánu a kolmatácii nasýtenej zóny. Riziko predstavujú aj prípadné úniky oxidačného činidla mimo sanovanú oblasť (napr. do blízkosti obývaných miest a pod.). Eliminovanie tohto rizika je možné správnym nastavením dávkovania oxidačného činidla a spôsobu jeho aplikácie. Na to slúžia laboratórne testy a pilotné skúšky na lokalite, ktorými sa získajú informácie pre optimálne aplikovanie technológie. Ďalším spôsobom kontroly situácie na lokalite je pravidelné monitorovanie a vyhodnocovanie relevantných parametrov vo zvodnení.

Vhodnosť pre lokalitu: metóda je vhodná z hľadiska dobrej priepustnosti zvodnenca. Vzhľadom k pomerne priaznivým oxickým podmienkam vo zvodnení bude stačiť pre aplikovanie menšie množstvo oxidačného činidla. Ohnisko znečistenia v areáli by touto metódou mohlo byť relatívne rýchlo eliminované, čo by malo za následok limitovanie šírenia znečisťujúcich látok v smere prúdenia podzemnej vody. Potrebné zvažovať potenciálne invazívny charakter metódy a náročnejšiu kontrolu riadenia sanačného zásahu – riziko kolmatácie pásma nasýtenia, potenciálne riziká pre životné prostredie a obývanú časť okolia. Pre obmedzenie uvádzaných rizík je vhodné overiť účinnosť a funkčnosť aplikovania ISCO experimentálne v laboratóriu alebo aj priamo na lokalite. Ďalej je sanáciu ISCO možné vhodne skombinovať s inými metódami, napr. ventingom pre zachytávanie produkovaných znečistených prchavých zložiek alebo sanačným čerpaním a čistením pre lepšiu kontrolu pohybu čistenej vody na lokalite a jej okolí.

Metódu ISCO je pre účely eliminácie znečistenia zdroji znečistenia a podmienkam na lokalite možné považovať za vhodnú metódu.

4.1.1.3 Metóda chemickej redukcie in situ (ISCR) pomocou nZVI

Princíp: metóda je založená na aplikácii nanočastíc nulavalentného Fe (nZVI) in situ do horninového prostredia, pričom sa využívajú redukčné vlastnosti týchto častíc. Dekontaminácia sa odohráva na rozhraní pevnej (alebo voľnej kvapalnej organickej) fázy a vody. Okrem výrazných redukčných vlastností nZVI, ktoré môžu byť navyše podporené vytvorením tenkého filmu na povrchu týchto častíc napr. Pd (vznik bimetalického systému), je ďalšou významnou vlastnosťou tohoto materiálu jeho veľmi veľký špecifický povrch (cca 30 m²/g) a „atomárne“ rozmery, ktoré mimoriadne zvyšujú účinnosť reakcií v porovnaní s aplikáciou napr. mikroskopických častíc, alebo železných pilín o rozmeroch niekoľko mm. Nulavalentné nanoželezo funguje vo vodnom prostredí ako výborný elektrón donor a chlórované etény ako elektrón akceptor. Po aplikácii nZVI do vodného prostredia dochádza v prvom rade k reakcii s vodou, čím dochádza k zvýšeniu pH v dôsledku tvorby OH⁻ iónov a uvoľneného plynného H₂. Elektróny, ktoré sa v rámci tejto reakcie uvoľnia následne vstupujú do reakcií s prítomnými organickými látkami, pri ktorých dochádza k redukčnej degradácii – v prípade PCE dochádza k postupnej redukčnej dehalogenácii cez TCE, DCE a VC až na konečné produkty, ktorými sú spravidla etén, etán a metán. Výhodou technológie je obmedzenie vzniku iných halogénovaných organických látok, tzv. AOX.

Použitelnosť: proces chemickej redukcie je možné využiť na sanáciu kontaminantov citlivých na zmenu redoxných podmienok, a to najmä takých, ktorých redukované formy nevykazujú nebezpečný vplyv na prostredie, resp. sú preň menej škodlivé. Podľa laboratórnych pokusov a pilotných terénnych pokusov realizovaných v SR i v zahraničí je metóda s aplikáciou nanočastíc nulavalentného Fe úspešne aplikovateľná na vybrané alifatické i aromatické chlorované uhľovodíky, PCB a potenciálne toxické prvky. Úspešné využitie chemickej redukcie in situ je pravdepodobné až po

podrobnom prieskume lokálnych podmienok, zameranom najmä na charakter a množstvo cieľového kontaminantu, ako aj na celkové geochemické a hydrogeologické podmienky v prostredí. Využitie procesov chemickej redukcie na sanáciu kontaminantov in situ sa odporúča najmä vo forme vytvárania reaktívnych zón, prípadne sanácie menších zdrojových oblastí, menej na komplexnú sanáciu rozsiahlych oblastí.

Vo všeobecnosti sa pri chemickej redukcii in situ predpokladá aplikovanie redukčných činidiel priamo do pásma nasýtenia. Redukčné činidlá sa môžu aplikovať najmä prostredníctvom hydrogeologických vsakovacích vrtov, či už za normálnych podmienok, alebo pod tlakom. Je možné využiť aj vsakovacie drény, resp. využiť princíp reaktívnych bariér. S aplikáciou redukčného činidla je potrebné zabezpečiť zároveň aj požadované fyzikálno-chemické podmienky v nasýtenej zóne, ktoré spolu s dobrým kontaktom redukčného činidla s kontaminantom zabezpečia požadovaný priebeh a rozsah redoxných reakcií a tým zredukovanie kontaminantu na požadovanú formu.

Popis technológie: nanočastice Fe sa vo forme vodnej suspenzie infiltrujú do horninového prostredia prostredníctvom vrtov, prípadne drénmi či ryhami. Počas reakčnej fázy (rádovo prvé desiatky hodín až dni) nastáva reakcia činidla s prostredím. Celková redukčná kapacita závisí najmä od aplikovaného množstva činidla a chemických podmienok v zvodnení. Uplatnením predchádzajúcich krokov sa vytvorí reakčná zóna, ktorá je schopná v prírodných podmienkach prúdenia znečistenej vody imobilizovať, alebo deštruovať kontaminant. Vytvorená redukčná bariéra s obsahom dvojmocného železa deštruuje pri prechode znečistenej vody znečisťujúcu látku. Ak nie je redukčná kapacita bariéry dostatočná, je možné do prostredia znovu aplikovať redukčné činidlo. Technológia pozostáva z predúpravy technologickej vody (odstránenie sedimentu, znečistenia a rozpusteného kyslíka), prípravy suspenzie nanočastíc (dispergátor, miešacia zásobná nádrž, dávkovacia a zmiešavacia jednotka). Pre zvýšenie polomeru dosahu aplikčných objektov je vhodné infiltrovať suspenziu pod tlakom a pre usmernenie prúdenia reaktívnej látky horninovým prostredím je odporúčané počas aplikácie prevádzkovať zároveň systém podporného sanačného čerpania.

Obmedzenie: aplikácia redukčných činidiel pomocou vrtov je limitujúca v nízko priepustnom prostredí, ktoré neumožňuje dostatočnú migráciu redukčného činidla, a tak nie je možné sanovať širšie oblasti bez rozsiahlejších vrtných prác. Ďalej ak sa nejedná o prostredie, ktoré je prirodzene reduktívne, nemá nízke koncentrácie síranov a dusičnanov a má zvýšenú prirodzenú pufrovanú kapacitu stabilizujúcu pH. Potrebné je vykonávať sanačné monitorovanie a kontrolu účinnosti metódy (podobne ako pri ostatných metódach in situ). V niektorých prípadoch môže nastať remobilizácia znečisťujúcich látok pri obnovení oxidačných podmienok, resp. vzniku toxických/nebezpečných (medzi)produktov pri nedostatočnej degradácii. Výrazná zmena redoxných podmienok môže spôsobiť zmenu formy výskytu prvkov rozpustených vo vode a tým aj zmenu ich mobility – aplikácia metódy vyžaduje dobrú znalosť lokálnych geochemických podmienok na zamedzenie potenciálnych nežiaducich reakcií s prostredím.

Overenosť technológie: metóda je pre dekontamináciu prostredia znečisteného chlórovanými etylénmi v SR i vo svete odskúšaná.

Kapacita: závisí od hydraulických parametroch zvodnenca, hustoty infiltračných objektov, intenzity znečistenia, kvality a množstva infiltrovaného materiálu, prípadne aplikácie ďalších aditív (detergentov).

Náročnosť na obsluhu: obsluhu musia realizovať kvalifikovaní pracovníci.

Vznik odpadov: dochádza k minimálnej produkcii odpadov. Vznik odpadov môže súvisieť s predúpravou technologickej vody.

Vplyv na ŽP: v prípade aplikácie čistého nanoželeza bez kovovej vrstvy je vplyv na ŽP minimálny. Toxicita kovových nanočastíc nebola preukázaná, látky obdobného charakteru sa v prírode bežne vyskytujú. V priebehu aplikácie do vodného prostredia dochádza jednak k agregácii nanočastíc a zároveň v priebehu reakcií k postupnej oxidácii nulavalentného železa na klasické oxyhydroxidy

železa. Železo je jedným z mikrobiogénnych prvkov, ktoré tvoria súčasť organizmov, jeho zvýšené koncentrácie vo vode sa prejavujú iba zmenou farby, chuti a prípadne zápachom. Pozitívnym aspektom tejto technológie je skutočnosť, že vznik toxických či inak nebezpečných produktov je značne obmedzený. Treba počítať s lokálnym ovplyvnením senzorických vlastností vody, pH a oxidačno-redukčných podmienok.

Vplyv na využívané územie: priestor aplikácie by bol ovplyvnený v dôsledku inštalácie sanačných vrtov a zariadenia staveniska (predovšetkým pri full-scale verzii).

BOZP: prevádzka technológie na lokalite nepredstavuje riziko za predpokladu jej dostatočného technického zabezpečenia (vodotesnosť, opatrenie proti premrzaniu). Základnou podmienkou je rešpektovanie pravidiel BOZP vrátane používania predpísaných osobných ochranných pracovných pomôcok.

Časová náročnosť: časová náročnosť je v porovnaní s inými sanačnými metódami strednodobá. Reduktívne reakcie prebiehajú okamžite po aplikácii do horninového prostredia ale ich pôsobenie v horninovom prostredí je všeobecne oveľa zdĺhavejšie ako rýchla radikálová oxidácia. Napr. pri aplikovaní nZVI sa počíta rádovo s mesiacmi, ideálne rokmi. Aplikovanie nZVI sa obvyčajne uskutočňuje opakovane cca v 2 – 4 cykloch, v závislosti od konkrétnych podmienok. Na predmetnej lokalite pri optimálnom aplikovaní tejto sanačnej metódy, bez kombinácie s inými metódami, je predpoklad dosiahnutia sanačného limitu približne 2 až 4 roky.

Cena: je závislá od ceny a množstva potrebnej aplikovanej suroviny, a tiež od zabezpečenia systému infiltračných, čerpacích a monitorovacích vrtov. Ide o stredne až viac nákladnú metódu. Oproti iným in-situ sanačným metódam je potrebné vynaložiť nižšie náklady na prevádzku, tá má dlhodobý efekt znižovania obsahu kontaminantu bez výraznejších dodatočných nákladov. V praxi je najviac nákladná inštalácia systému a z toho najmä náklady na sanačné monitorovanie.

Riziká: minimálne riziká sú spojené s nízkou prevádzkovou overiteľnosťou tejto technológie. Informácie o vplyve na sanované prostredie je možné zistiť nepriamo na základe pravidelného monitorovania relevantných parametrov vo zvodnenci.

Vhodnosť pre danú lokalitu: horninové prostredie je pomerne priepustné, čo vytvára vhodné predpoklady pre rovnomernú distribúciu a dosah pôsobenia roztoku v prostredí. Zdroj znečistenia je predpokladaný v areáli čistiarní, čo predstavuje priestorovo nenáročné požiadavky na uplatniteľnosť predmetnej metódy. Priaznivé kyslíkové pomery zvodnenca môžu limitovať efektívnosť použitia tejto metódy z pohľadu potreby dodávania väčšieho množstva redukčného činidla na vytvorenie vhodných redukčných podmienok pre požadovanú degradáciu PCE. Metódu je možné skombinovať s metódou BRD, ktorá pri nižších nákladoch umožní udržiavať vytvorené anoxické podmienky v sanovanom zvodnenci. Rýchlosť dosiahnutia sanačného limitu pri optimálnej aplikácii metódy sa dá predpokladať na 2 a viac rokov čo môže byť limitujúca pre investora.

V záujmovej lokalite je vzhľadom k vyššie uvádzaným aspektom túto metódu možné považovať za podmienenčne vhodnú.

4.1.1.4 Sanačné čerpanie a čistenie podzemnej vody s využitím air strippingu a adsorpcie

Princíp: pri aplikácii tejto metódy dochádza k čerpaniu podzemnej vody z pásma nasýtenia za rôznym účelom, napr. vytvorenie hydraulického bariéry alebo zrýchlenie prítoku podzemnej vody (voľná fáza). Znečistená podzemná voda býva obvyčajne následne dekontaminovaná v inštalovanej sanačnej stanici na povrchu. Ide o základnú sanačnú hydraulickú metódu, ktorá je používaná najmä ako podporná metóda.

Použitelnosť: metóda je použiteľná pre odstraňovanie kvapalných a rozpustených znečisťujúcich látok v podzemnej vode. Pre zvýšenie efektivity tejto metódy je vhodné ju kombinovať s inými intenzifikačnými opatreniami, napríklad: ventingom, infiltráciou vody do nenasaturovanej zóny.

Obmedzenie: pre realizáciu sanačného čerpania, prípadne aj zasakovania prečistenej vody je potrebné získať vodohospodárske rozhodnutie. Ďalším všeobecne platným obmedzením je fakt, že dlhodobým čerpaním dochádza ku kolmatácii sanačných vrtov, ktoré sa musia pravidelne čistiť.

Popis technológie: s využitím vhodne zvolenej siete sanačných vrtov dochádza k odčerpávaniu podzemnej vody s obsahom kontaminantu (prípadne aj voľnej fázy DNAPL z dna zvodnenca). Pre túto metódu je kľúčová znalosť hydrogeologických a hydraulických parametrov na danej lokalite. Ide predovšetkým o skutočnú rýchlosť prúdenia, maximálne možné zníženie hladiny, dosah vplyvu depresie. Dôležitá je tiež znalosť rozsahu a intenzity znečistenia, smeru šírenia a postupný vývoj v kontaminačnom mraku. K odsávaniu znečisťujúcej látky dochádza pomocou jedného jednofázového čerpania alebo dvoch čerpadel (dvojfázové čerpanie), kedy je zvlášť odsávaná voľná fáza CIU z dna zvodnenca a podzemná voda s obsahom znečisťujúcich látok oddelenými čerpadlami. Z horninového prostredia sa postupne uvoľňujú znečisťujúce látky v rozpustenej forme, ktoré sú následne čerpané do dekontaminačnej stanice. V prípade záujmovej lokality prichádza v úvahu dekontaminácia za použitia kombinácie gravitačného odlučovača a stripovacej jednotky, kedy vplyvom odlišnej špecifickej hmotnosti vody a znečisťujúcej látky (PCE, TCE) príde k odlúčeniu voľnej kvapalnej fázy, znečistená voda je následne stripovaná vo veži protiprúdom vzduchu, čím dochádza k uvoľňovaniu prchavých organických látok do vzduchu, ktorý je následne vedený cez filter so sorpčným materiálom (aktívne uhlie). V prípade nutnosti je pre dokončenie čistiaceho procesu treba použiť ďalšie zariadenie využívajúce iné fyzikálne, chemické či biologické princípy.

Overenosť technológie: sanačné čerpanie je jednou z najstarších metód pre odstraňovanie znečisťujúcich látok z podzemnej vody a je preto dobre implementovanou metódou.

Kapacita: technológia je obmedzená parametrami sanačných vrtov, hydrogeologickými a hydraulickými parametrami zvodnenca.

Náročnosť na obsluhu: obsluhu musí realizovať špeciálne vyškolený personál.

Vznik odpadov: súvisí so sanačnou jednotkou, vzniká pevný odpad, ktorým je použitý sorbent s obsahom znečisťujúcej látky.

Vplyv na ŽP: čerpaním dôjde k ovplyvneniu hydrogeologických podmienok na lokalite a v jej okolí.

Vplyv na využívanie územia: pri dlhodobom a intenzívnom čerpaní v rámci full-scale aplikácie môže dochádzať ku zníženiu dynamických zásob podzemnej vody a zníženiu výdatnosti pre zásobovanie pitnou vodou, resp. porušeniu stability objektov či možnému úhynu rastlín a stromov (ako možnosť náhradného riešenia sa tiež javí použitie kombinácie s infiltráciou).

BOZP: prevádzka technológie na lokalite nepredstavuje riziko za predpokladu jeho dostatočného technického zabezpečenia (vodotesnosť, opatrenie proti premrzaniu). Základným predpokladom je rešpektovanie pravidiel BOZP vrátane používania predpísaných osobných ochranných pracovných prostriedkov.

Časová náročnosť: sanačné čerpanie je pri samostatnom použití, resp. bez použitia ďalších intenzifikačných opatrení a podporných technológií na predmetnej lokalite dlhodobá metóda s trvaním 4 až 7 rokov.

Cena: všeobecne patrí k drahším metódam, predovšetkým z dôvodu nutnosti dlhodobej prevádzky. Závisí od hustoty siete sanačných vrtov, od trvania prevádzky (závisí od použitia ďalších podporných a intenzifikačných metód) a od použitej sanačnej technológie pre odstránenie znečistenia z podzemnej vody. V prípade podporného čerpania sú náklady prijateľné.

Riziká: teoreticky môže vplyvom nesprávneho čerpania podzemnej vody prísť k „pritiahnutiu“ iného znečistenia z okolia. Obmedzenie tohto rizika sa dá správnym nastavením čerpaného množstva na základe poznatkov hydraulických parametrov zvodneného prostredia, prípadne interpretáciou z hydraulického modelovania.

Vhodnosť pre danú lokalitu: metóda v kombinácii s čistením vody air strippingom umožňuje eliminovať koncentrácie CIU v podzemnej vode. V prípade potreby ešte väčšie zníženia koncentrácií je možnosť využiť napr. adsorpčné filtre na báze aktívneho uhlíka. V záujmovom území sa táto metóda môže dobre uplatniť aj ako podporná sanačná metóda vzhľadom k cielenému usmerňovaniu vytvorených redukčných alebo oxidačných podmienok do požadovanej oblasti v rámci znečisteného zvodnenca a kontrole zamedzovania prípadného unášania vznikajúcich medziproduktov mimo sanovaných oblastí. Táto metóda nie je z hľadiska jej pôsobenia v horninovom prostredí deštruktívna, teda nedegraduje CIU na dcérske produkty ale je iba extrakčná, tzn., že extrahuje znečisťujúce látky z horninového prostredia. Z opisovaných dôvodov nie je preto vhodná na konečné eliminovanie znečistenia v zdrojovej oblasti a pre prípadné znečistenie v horninovom prostredí. Vzhľadom na charakter znečistenia sa nedá vylúčiť problém tzv. reboundingu, kedy po ukončení sanačného čerpania dochádza k výraznému nárastu koncentrácie CIU vplyvom zmeny rovnovážneho stavu v systéme podzemná voda – kontaminant – horninové prostredie v dynamickom a prirodzenom stave. Reboundingu sa dá zabrániť napr. kombináciou s inými in-situ sanačnými technológiami umožňujúcimi radikálne deštruovanie CIU priamo v ohnisku znečistenia (napr. ISCO, ISCR).

V záujmovej lokalite je túto metódu ako samostatnú metódu možné považovať za podmiennečne vhodnú, a v prípade kombinácie s inými vhodnými sanačnými technológiami za vhodnú.

4.1.1.5 Airsparging + venting

Princíp: spočíva v odstraňovaní prchavých organických látok (rozpustených i vo voľnej fáze) z pásma nasýtenia i pásma prevzdušnenia pomocou vháňania stlačeného vzduchu pod hladinu podzemnej vody. Vzduch, ktorý prestupuje pásom nasýtenia, uvoľňuje prchavé znečisťujúce látky, a tie sa ďalej dostávajú do pásma prevzdušnenia, z ktorého sú odsávané spoločne s pôdnym vzduchom pomocou ventingových vrtov. Tento vzduch je potom prečistený na povrchu v sanačnej jednotke pomocou sorpcie na aktívnom uhlí a katalytickým spaľovaním.

Použitelnosť: táto metóda je použiteľná pre sanáciu znečistenia palivami, riedidlami, chlórovanými uhľovodíkmi a inými prchavými látkami. Najľahšie sa touto metódou odstraňujú vysoko prchavé látky s malou rozpustnosťou vo vode. Airsparging je použiteľný pre prípady, kedy je znečisťujúca látka rozpustená v podzemnej vode, ale tiež v podobe voľnej fázy uzavretej v póroch. Metódu je možné používať k sanácii v ohnisku znečistenia, ale tiež ako podpornú metódu napr. pre aeróbnu biodegradáciu.

Obmedzenie:

- metódu možno aplikovať na vysoko prchavé znečisťujúce látky (Henryho konštanta $\sim n \cdot 10^{-2}$), ktoré sú charakterizované relatívne nízkou rozpustnosťou.
- priepustnosť pásma nasýtenia by nemala byť menšia než cca $n \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$,
- metóda je nepoužiteľná pri napätej hladine podzemnej vody, alebo v prostredí s voľnou hladinou podzemnej vody, v ktorej sa často striedajú vrstvy so slabou a silnou priepustnosťou,
- v oblastiach s vybudovanou sieťou podzemného vedenia inžinierskych sietí hrozí nebezpečenstvo akumulácie výbušných plynov,

- ako základné kritériá hodnotenia použiteľnosti ventingu sa v odbornej literatúre uvádzajú minimálna hodnota Henryho konštanty a parciálny tlak pár kontaminantov. Henryho konštanty by mala byť vyššia ako $0,1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ a parciálny tlak pár kontaminantov by mal byť vyšší ako 66 Pa pri teplote 25 °C (Atlas sanačných metód, 2010).

Popis technológie: do podzemnej vody je periodicky vháňaný stlačený vzduch sieťou spargingových vrtov. Hustota siete závisí od priepustnosti a homogenity horninového prostredia. Všeobecne platí, že pomer polomeru vplyvu vrtu k výške stĺpca vody nad filtrom, ktorý je umiestnený pod úrovňou najhlbšieho výskytu znečistenia, sa pohybuje od 0,5 do 1,0. Perforovaná časť výstroja vrtu (filter) musí horným koncom zasahovať pod zistený dosah znečistenia. Bublínky vzduchu prenikajú vertikálne hore, pričom zásadný význam pre úspešnosť metódy má homogenita priepustnosti prostredia. Aplikovanie technológie vyžaduje vysoké nároky na kvalitu realizácie spargingových vrtov, ktoré musia byť odolné voči zapieskovaniu. Zmes vzduchu a znečisťujúcej látky je odsávaná sieťou ventingových vrtov, ktoré ju zachycujú a odvádzajú k povrchu a ďalej do čistiacej stanice.

Overenosť technológie: technológia je vo svete aj SR zavedená.

Kapacita: je premenlivá a závisí od intenzity a rozsahu znečistenia, priepustnosti a homogenity prostredia, hustoty spargingových vrtov.

Náročnosť na obsluhu: obsluhu musí realizovať špeciálne vyškolený personál.

Vznik odpadov: odpady vznikajú iba pri čistení vzduchu znečisteného prchavými organickými zlúčeninami, vznikajú pevné odpady (sorbent).

Vplyv na ŽP: vháňaním vzduchu do horninového prostredia pomocou airspargingových vrtov môže mať za následok krátkodobé zvýšenie oxidačných podmienok na lokalite. Dochádza k miernemu vzdutiu hladiny podzemnej vody vplyvom vháňania vzduchu a v prípade, že sa na lokalite vyskytuje voľná fáza NAPL môže dochádzať k následnému šíreniu fázy znečisťujúcej látky mimo ohniska. Z dlhodobého hľadiska nemá metóda trvalý negatívny vplyv na životné prostredie.

Vplyv na využívanie územia: v súvislosti s inštaláciou a prevádzkou airspargingových a ventingových vrtov dochádza k čiastočnému obmedzeniu priestoru lokality (najmä pri full-scale metóde). Lokálne bude dochádzať k časovo obmedzenému ovplyvneniu hladiny podzemnej vody.

BOZP: vplyv prevádzky technológie nepredstavuje na sanovanej lokalite riziko za predpokladu jeho dostatočného technického zabezpečenia (vodotesnosť, opatrenia proti premrzaniu). Základnou podmienkou je rešpektovanie pravidiel BOZP vrátane používania predpísaných osobných ochranných pracovných prostriedkov. Pri potenciálnom vzniku väčšieho množstva prchavých zložiek je potrebné zabezpečiť vhodný ventingový systém na ich odvádzanie z horninového prostredia.

Časová náročnosť: rýchlosť sanácie je závislá najmä od priepustnosti horninového prostredia, rozsahu znečistenia, hustoty airspargingových a ventingových vrtov a intenzity vháňania alebo odsávania (pri ventingu) vzduchu do (z) horninového prostredia. Trvanie sanácie touto metódou sa na predmetnej lokalite, pri jej samostatnom použití, dá odhadnúť v rozmedzí 4 až 7 rokov (v prípade full-scale prístupu).

Cena: všeobecne táto metóda patrí k lacnejším. Cena závisí od viacerých faktorov, ako je koncentrácia znečisťujúcej látky, priepustnosť horninového prostredia, počet a rozmiestnenie spargingových vrtov a spôsob spracovania znečisťujúcej látky v plynnej podobe.

Riziká: pri nesprávnej manipulácii a prevádzke hrozí v miestach s výskytom inžinierskych sietí (plyn, elektrina) hromadenie nebezpečných plynov a nebezpečenstvo výbuchu. Toto riziko sa dá eliminovať správnym nastavením technológie a priebežného monitorovania podmienok v horninovom prostredí.

Vhodnosť pre záujmovú lokalitu: v podmienkach záujmovej lokality ide o vhodnú metódu – znečistenie CIU sa predpokladá v blízkosti kolísania hladiny podzemnej vody, zvodenenec je pomerne

homogénny s vysokou priepustnosťou. Z pohľadu efektivity ide skôr o menej efektívnu metódu, ktorá však v kombinácii s inými sanačnými metódami predstavuje vhodnú podpornú metódu (napr. pri bioremediácii za oxických podmienok alebo ako súčasť sanačného čerpania a čistenia).

V záujmovej lokalite je túto metódu ako samostatnú metódu možné považovať za podmiennečne vhodnú, a v prípade kombinácie s inými vhodnými sanačnými technológiami za vhodnú.

5. Multikriteriálne vyhodnotenie a výber optimálneho variantu sanácie

V predchádzajúcich kapitolách štúdie uskutočniteľnosti boli identifikované a špecifikované potenciálne vhodné sanačné metódy. Pre výber najvhodnejšej sanačnej metódy je použité multikriteriálne hodnotenie. Hodnotenie pozostáva z posúdenia navrhovaných sanačných metód podľa viacerých kritérií:

- technická náročnosť (požiadavka na špeciálne technické zabezpečenie, energie + logistika): jednoduché riešenie = 1, zložitejšie riešenie = 2, veľmi zložité (komplikované) = 3
- účinnosť (pravdepodobnosť dosiahnutia cieľových hodnôt): vysoká pravdepodobnosť dosiahnutia cieľových hodnôt = 1, stredná pravdepodobnosť dosiahnutia cieľových hodnôt = 2, nižšia pravdepodobnosť dosiahnutia cieľových hodnôt = 3
- časové hľadisko (trvanie sanácie): krátke = 1, prijateľné = 2, dlhé = 3
- finančné hľadisko (investičné + prevádzkové náklady): relatívne nízke = 1, primerané = 2, vysoké = 3.

Multikriteriálne hodnotenie bolo spracované formou hodnotiacej tabuľky č.7, systémom skórovania od 1 do 3. V každom riadku sú podľa jednotlivých kritérií porovnané navrhované metódy, pričom je im pridelené príslušné číslo. Celkové hodnotenie pozostáva zo súčtu získaných bodov. Poradie vhodnosti použitia sanačnej metódy je určené na základe najnižšieho počtu získaných bodov a to tak, že najnižší počet získaných bodov = najvhodnejšia metóda (najúčinnnejšia metóda – dosiahnutie najvyššieho efektu, relatívne najjednoduchšie riešenie a finančne najmenej náročné).

Tabuľka 7: Multikriteriálne hodnotenie identifikovaných sanačných metód

Kritérium	Sanačná metóda				
	Podzemná voda				
	BRD	ISCO	ISCR	Čerpanie a čistenie	Airsparging + venting
Technická náročnosť	1	3	3	1	2
Účinnosť	3	1	1	3	2
Časové hľadisko	3	1	2	3	2
Finančné hľadisko	1	2	2	1	1
Celkové hodnotenie	8	7	8	8	7
Poradie vhodnosti	2	1	3	3	2

Hodnotenú sanačnú metódu boli zvolené na základe posúdenia špecifických podmienok na lokalite. Ide najmä o výraznejšie oxické podmienky vo zvodnení, absenciu dcérskych produktov rozkladu CIU, väčšiu hrúbku zvodnenca a pomerne vysokú priepustnosť. Z hľadiska predpokladanej prítomnosti

primárneho zdroja znečistenia, alebo sekundárneho znečistenia v podobe voľnej fázy majú vyššiu účinnosť sanačné metódy umožňujúce deštrukciu, resp. rozklad znečisťujúcich látok na menej toxické formy. Ďalším podmieňujúcim faktorom výberu predmetných sanačných technológií je to, že lokalita sa nachádza v husto zastavanom území mesta Bratislava. Do budúcnosti sa plánuje zmena využívania územia, kde sa počíta s výstavbou bytového komplexu s podzemnými garážami.

Metóda BRD ako samostatná sanačná metóda v podmienkach záujmového územia nemá potenciál dosiahnuť požadovaný cieľ sanácie a sanačné limity. Je to predovšetkým tým, že na lokalite neboli prieskumnými prácami identifikované vhodné podmienky pre prirodzene prebiehajúcu biodegradáciu. **Táto metóda ale môže byť veľmi vhodná ako podporná sanačná metóda, napr. za podmienok, keď na lokalite bude potrebné udržať redukčné podmienky vytvorené pri intenzívnejšej sanačnej technológii (ISCR).**

Metóda ISCO je pomerne intenzívna sanačná metóda, ktorej vhodná aplikácia umožňuje rýchlu elimináciu znečistenia pre dosiahnutie sanačných limitov v zdroji znečistenia. Avšak ide o pomerne finančne náročnú metódu z pohľadu potreby vytvorenia dlhšie trvajúcich extrémne oxických podmienok v pásme nasýtenia súvisiacich s obmedzením šírenia PCE vo forme kontaminačného mraku. Pre podporu udržania oxických podmienok vo zvodnenci ekonomicky menej náročným spôsobom by sa dalo uvažovať s kombináciou metódy aisparging + venting. Vzhľadom k pomerne hustej zastavanosti okolia lokality a jeho využitiu aj na obytné účely sú tieto metódy rizikové z hľadiska potrebnej kontroly pôsobenia ISCO v horninovom prostredí a zachytávania unikajúcich prchavých zložiek, a tiež vzhľadom k možnému neukončeniu degradačného rozkladu po neškodné produkty. Možným riešením eliminácie tohto rizika je zapojenie metódy sanačného čerpania a čistenia vody, ktorým by bolo možné kontrolovať prítok znečistenej vody a obmedzenie nevychystenej vody mimo sanované územie. **Vzhľadom k existujúcim priaznivým oxidačným podmienkam na lokalite a potrebe pomerne rýchleho dosiahnutia sanačného cieľa a CHS je metóda vhodná pre riešenie situácie na lokalite.**

Metóda ISCR je pri vhodnej aplikácii v blízkosti zdroja znečistenia pomerne intenzívna sanačná metóda umožňujúca deštrukciu látok CIU na jednoduchšie formy rozkladu v redukčných podmienkach. Oproti metóde ISCO je výhoda v tom, že sa po aplikácii vytvorí v zvodnenci dlhodobejšie pôsobiaca redukčná zóna, ktorá bude po prestupe podzemnou vodou cez ňu vytvárať v podzemnej vode v smere prúdenia redukčné podmienky spôsobujúce rozklad CIU. Na druhej strane je čas potrebný na degradačné procesy dlhší. Použitie tejto metódy predstavuje tiež menšie riziko vzhľadom ku kontrole interakcií medzi aplikovaným redukčným činidlom a zvodneným horninovým prostredím. Limitujúcimi faktormi pri tejto metóde sú čas dosiahnutia CHS a výraznejšie oxické podmienky v zvodnenci, ktoré zvyšujú spotrebu redukčného činidla na dosiahnutie redukčných podmienok. **Vzhľadom k situácii a okolnostiam na lokalite predmetnú metódu možno považovať za podmienenčne vhodnú.** Pre dlhodobejšie udržanie redukčných podmienok v zvodnenci finančne menej náročným spôsobom je možné spolu s ňou využiť ako podpornú sanačnú metódu napr. BRD.

Metóda sanačné čerpanie a čistenie podzemnej vody s využitím air stripingu a adsorpcie je v prípade neodstránenia zdroja znečistenia, alebo pri full scale aplikácii, pre elimináciu koncentrácie PCE v rámci vymapovaného kontaminačného mraku, málo efektívna, respektíve finančne náročná vzhľadom k zabezpečeniu prečistenia požadovaného množstva znečistenia. Avšak v príp

ade jej použitia ako podpornej metódy v ohnisku znečistenia umožňuje jednoduchým a overeným spôsobom prečistiť pomerne veľké objemy znečistenej vody. Zároveň sa vytvorí depresný kužel na hladine podzemnej vody, ktorý stiahne znečistenie aj zo širšieho okolia čerpaného vrtu. Zefektívni to pôsobenie ostatných sanačných metód sústredených v ohnisku znečistenia, a tiež zabráni ďalšiemu šíreniu znečistenia mimo sanovanú oblasť. Ide o extrakčnú metódu neumožňujúcu degradáciu alifatických chlórovaných uhľovodíkov priamo v horninovom prostredí. Čistenie prebieha na povrchu (on-site) v sanačnej jednotke, ktorá pozostáva zo sanačnej technológie určenej na eliminácie predmetného znečistenia (gravitačné odlučovanie, stripovanie, adsorpcia a i.). Po ukončení

sanačného čerpania, bez použitia iných „deštrukčných“ metód, môže dochádzať k opätovnému nárastu koncentrácie CIU (tzv. rebounding efekt). **Predmetná metóda má opodstatnenie najmä v kombinácii s inými sanačnými metódami ako podporná metóda. Okrem eliminácie rozpustenej zložky CIU, umožňuje metóda sanačného čerpania pri jeho vhodnom nastavení, kontrolovať pohyb znečistenej podzemnej vody v sanovanom území.**

Metóda airsparging + venting má potenciál na pre vytváranie podmienok umožňujúcich vyprchávanie znečisťujúcich látok z kvapalnej fázy do plynnej fázy v rámci ohniska znečistenia. Menej efektívna je pri full scale aplikácii v prípade eliminácie znečistenia v podobe kontaminačného mraku. Výhodou metódy je prestup a pôsobenie aj v rámci pásma prevzdušnenia. Na druhej strane takéto pôsobenie predstavuje riziko pri kontrole metódy v prípade nežiadúceho vplyvu na zastavané okolie s možným hromadením znečisťujúcich látok mimo očakávanú oblasť (pod budovami, komunikáciami a pod.). Pre obmedzenie tohto rizika je vhodná kombinácia s metódou ventingu, ktorá umožňuje odsávanie prchajúcich znečisťujúcich látok v rámci pásma prevzdušnenia. Problematickým pri tomto type sanačnej technológie a sanovanej znečisťujúcej látky je aj schopnosť dosiahnutia konečných netoxických produktov pri degradácii znečisťujúcej látky. Z uvedených dôvodov nie je táto vhodná ako samostatná metóda ale skôr ako podporná. **Metóda môže dobre slúžiť ako podporná metóda pri sanácii pomocou ISCO pre dlhodobejšie udržanie vytvorených oxických podmienok, alebo na dočistenie znečistenia s nižšími koncentraciami. V kombinácii so sanačným čerpaním a čistením sa môže vytvoriť efektívnejší spôsob distribúcie znečisťujúcich látok vzhľadom k ich fázovým rozhraniám a tiež cirkulácie čistenej vody v širšej sanovanej oblasti.**

Za najvhodnejšie sanačné riešenie bola zvolená kombinácia sanačných in-situ metód ISCO a airsparging + venting, a tiež sanačné čerpanie a čistenie. ISCO ako hlavná metóda predstavuje vysoko účinnú metódu pre pomerne rýchlu elimináciu najväčšieho znečistenia CIU priamo v ohnisku znečistenia v zvodnenom horninovom prostredí. Keďže ide o pomerne finančne náročné riešenie, na udržanie oxických podmienok vo zvodnení pre potrebu úplnej degradácie látok CIU navrhujeme aplikovanie podpornej metódy airspargingu, a tiež zapojenie metódy čerpania a čistenia podzemnej vody. Navrhovaný spôsob sanácie má potenciál na dosiahnutie CHS s možnosťou riadenia a kontroly prebiehajúcej sanácie a dostatočným obmedzením možného rizika.

Predmetné riešenie je detailnejšie a vzhľadom k podmienkam na lokalite spracované v nadväzujúcich kapitolách.

Metóda ISCR s BRD má na lokalite tiež potenciál na dosiahnutie CHS ale v porovnaní s vyššie navrhovanou kombináciou sanačných metód (oxidačný prístup) je pre vytvorenie náležitých redukčných podmienok v rámci lokálnych pomerov časovo zdĺhavejšie a finančne nákladnejšie.

6. Rámcové riešenie návrhu sanácie metódou chemickej oxidácie in-situ (ISCO) v kombinácii s metódou airsparging + venting a sanačné čerpanie a čistenie

Špecifiká a postup aplikovania sanačnej metódy ISCO

Aplikovanie metódy ISCO je zamerané na elimináciu znečistenia v ohnisku znečistenia, na deštrukciu CIU v horninovom prostredí. Použitie tejto metódy má vhodné predpoklady vzhľadom k dobrej priepustnosti horninového prostredia, jeho relatívnej homogenosti, ustálenému prúdeniu podzemnej vody s dominantným advekčným prúdením, nižším zastúpením celkového organického uhlíka (TOC) v podzemnej vode a neprítomnosti väčšieho množstva karbonatických zložiek. Realizovať ISCO je navrhované formou aplikácie vhodného oxidačného činidla do znečisteného horninového prostredia. Ako oxidačné činidlá pre sanáciu chlórovaných uhľovodíkov sa používajú manganistan draselný, manganistan sodný, Fentonovo činidlo, ozón, alebo špeciálne komerčné produkty (ORC, RegenOX, Persulfox a iné). Ide o zaužívanú účinnú sanačnú metódu pre sanáciu chlórovaných uhľovodíkov v podzemnej vode. Aj napriek úvodným vysokým finančným nákladom na vybudovanie zariadení na aplikáciu oxidačného roztoku do horninového prostredia ide v mnohých prípadoch o výhodnú sanačnú techniku.

Najviac používané oxidačné činidlá :

Manganistan draselný oxiduje organické látky obsahujúce dvojitú väzbu, aldehydové či hydroxylové skupiny (teda aj chlórretény). Manganistan draselný je najčastejšie používané oxidačné činidlo. Narušuje dvojitú väzbu tým, že vytvára kyslíkový mostík v cyklickom manganistanovom estere. Táto zlúčenina je nestabilná a rozpadá sa na karboxylové skupiny, ktoré sú manganistanom oxidované na oxid uhličitý. V priebehu reakcie vznikajú netoxické produkty. Používa sa vo forme vodného roztoku, ktorého koncentrácia sa spravidla pohybuje v rozmedzí 20 – 30 g/l. Roztok je potrebné pripravovať priamo na lokalite. Manganistan draselný je preferovaným výberom z ekonomického hľadiska, ale aj z hľadiska jeho poznania a odskúšania na sanovaných lokalitách chlórovaných uhľovodíkov v podmienkach SR a relatívne jednoduchý spôsob prípravy roztoku.

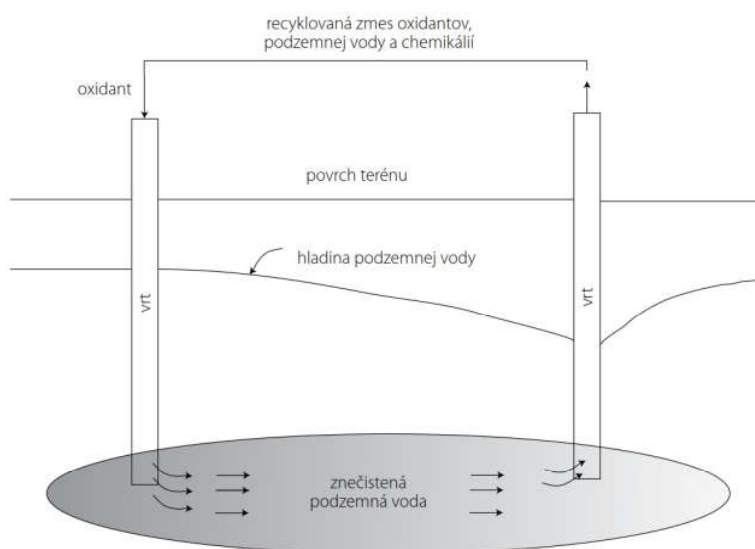
Fentonovo činidlo – peroxid vodíka zmiešaný s kovovým katalyzátorom (najčastejšie so železom). Pri použití Fentonovho činidla železnaté ióny katalyzujú rozklad peroxidu na voľné hydroxylové radikály, ktoré patria medzi veľmi silné oxidačné činidlá. Hydroxylový radikál oxiduje chlórovaný uhľovodík za vzniku vody, oxidu uhličitého a chloridových iónov. Fentonov proces je relatívne rýchly a dĺžka trvania je niekoľko dní až týždňov. Alternatívne je možná oxidácia ozónom, čo je obdobný proces ako v prípade predchádzajúcich oxidačných činidiel. Oxidácia ozónom (aj Fentonovým činidlom) prebieha len v kyslom prostredí, v silne alkalickom prostredí nie je ozón použiteľný. Pre tieto účely sa do aplikovaného roztoku pridávajú potrebné aditíva.

Persíran sodný alebo vápenatý ide o najsilnejší oxidant v rámci skupiny peroxygénov. Peroxid vodíka, ktorý sa pomaly rozkladá na kyslík a vodu, poskytuje dlhodobý zdroj kyslíka na následnú bioremediáciu ropných uhľovodíkov. Aktivácia sulfátového radikálu sa dosahuje s použitím peroxidu vápenatého pri zvýšenom pH.

Aplikovanie oxidačného činidla sa predpokladá uskutočniť vo forme vodného roztoku pomocou vrtov a vo všeobecnosti by malo pozostávať z nasledujúcich krokov (podľa ASM, 2010):

- pred aplikáciou ISCO sa predpokladá, že už bude na lokalite prevádzkované sanačné čerpanie a čistenie a tiež airsparging s ventingom,

- počas fázy vsakovania sa aplikuje potrebné množstvo oxidačného činidla do kontaminovanej zvodne. Celková oxidačná kapacita závisí najmä od aplikovaného množstva činidla, ďalej od zastúpenia a obsahu rozpustených látok a kyslíkových pomerov v prostredí,
- oxidanty vo forme roztoku sa budú dávkovať prostredníctvom na to určených vrtov, konkrétna aktívna časť vrtu, cez ktorú sa bude realizovať aplikácia sa špecifikuje v projekte sanácie,
- aplikácia môže byť vo forme otvoreného alebo uzavretého systému (s čerpaním a opätovným injektovaním podzemnej vody) (Obrázok 5). Odporúčame zvážiť použitie uzavretého systému s kontinuálnou injektážou a recirkuláciou upravenej vody (umožňuje to zlepšiť miešanie oxidantu so znečisťujúcimi látkami, čím sa zabezpečí úspornejšie využitie, ako aj kontrola pôsobenia oxidantu v horninovom prostredí),



Obrázok 5: Schéma fungovania systému chemickej oxidácie pri zapojení vo forme kontinuálnej recirkulácie (US EPA, 2000)

- kombinácia ISCO s airspargingom a sanačným čerpaním má potenciál na lepšiu distribúciu dodávaných oxidantov do väčšieho priestoru okolo aplikačného vrtu, a tiež zabezpečenie lepšieho kontaktu s príslušným kontaminantom ako aj účinnejší priebeh požadovaných reakcií,
 - pre vyprchávané znečistené plynné zložky bude slúžiť ich zachytávanie pomocou systému ventingu v pásme prevzdušnenia, pričom následne budú odvádzané do sanačnej jednotky na prečistenie,
 - na monitorovanie a riadenie prebiehajúcich procesov sa zabezpečí na to vhodný monitoring,
- účinnosť a dosah ISCO pri degradácii PCE bude v prípade potreby intenzifikovaný opakovaním aplikácie, alebo rozšírením aplikovania oxidačného činidla do ďalších vrtov v okolí. Pri riadení sanácie sa tiež bude potrebné vyvarovať remobilizácii znečisťujúcich látok pri obnovení pôvodných (prirodzených) podmienok, resp. vzniku toxických/nebezpečných (medzi)produktov v dôsledku nedostatočnej degradácie CIU,
- aplikovanie oxidačného činidla je v prípade potreby možné zmeniť na aplikovanie redukčného činidla (napr. nulamocné Fe) nakoľko je známe, že proces degradácie niektorých medziproduktov CIU prebieha dobre aj v redukčných podmienkach,

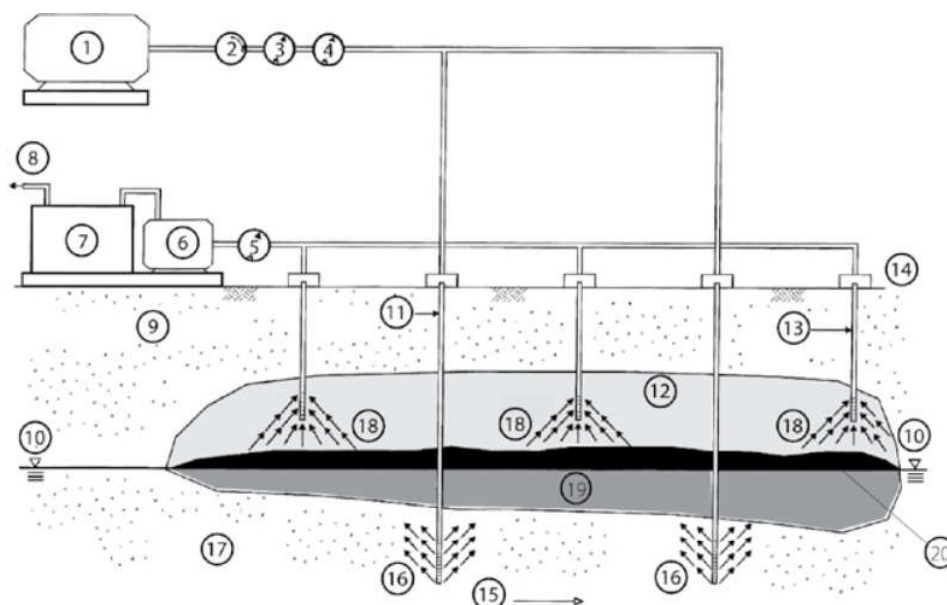
- pred sanáciou je vhodné realizovať laboratórne testovanie a pilotné skúšky na lokalite pre overenie priebehu procesov v rámci technológie ISCO a pre optimálne nastavenie množstiev oxidačného činidla, ako aj ostatných parametrov dôležitých pre riadenie a kontrolu aplikácie ISCO.

Špecifiká a postup aplikovania sanačnej metódy airsparging + venting

Metóda air spargingu s ventingom je pre sanáciu in-situ koncepčne navrhovaná v kombinácii s ostatnými metódami, najmä ako podporná metóda pre ISCO. Účelom airspargingu bude udržiavať efektívnejším a hospodárnejším spôsobom oxidačné podmienky vo zvodnenci, a tiež distribuovať pôsobenie Fentonových reakcií do širšieho prostredia v okolí aplikačných sanačných vrtov pre ISCO. Zároveň pomocou systému ventingu sa vytvoria podmienky pre zachytávanie vyprchávajúcich znečistených plyných zložiek s následným čistením v sanačnej jednotke na povrchu.

Postup aplikovania airspargingu s ventingom je koncepčne navrhovaný nasledovne:

- inštalácia aeračného systému je zvažovaná najmä v ohnisku znečistenia (okolie vrtu ST-2), počet vrtov a ich finálne umiestnenie bude predmetom projektu sanácie,
 - hĺbku airspargingových vrtov, resp. aktívnu časť vrtov je vzhľadom k potrebnej účinnosti metódy vhodné voliť tesne pod úroveň detekovaného znečistenia v horninovom prostredí. Overovanie znečistenia v horninovom prostredí sa vykoná v rámci doplnkového prieskumu po asanácii budov. Následne sa v projekte sanácie špecifikuje hĺbka a aktívna časť AS vrtov,
- dodávanie vzduchu do pásma nasýtenia je odporúčané v určitých intervaloch (pulzoch), čo vo všeobecnosti poskytuje lepšiu distribúciu a miešanie vzduchu v znečistenom pásme nasýtenia. Umožňuje to väčší povrchový kontakt s rozpustenou fázou znečisťujúcej látky,
- pri aplikovaní technológie airspargingu je dôležitá potreba vhodného nastavenia tlaku vzduchu a intenzity prúdenia vzduchu pre to, aby sa v horninovom prostredí nevytvárali preferenčné cesty prúdenia vzduchu a aby nebola doba zdržania vzduchu príliš krátka,
- činnosť injektovania vzduchu je vhodné regulovať tak, aby sa prevzdušňovanie neodklonilo mimo sanovanej zóny,
- na lepšie odstránenie zvyškového znečistenia z horninového prostredia sa môžu spolu s vŕšaným vzduchom pridávať aj detergenty,
- pre optimalizovanie a kontrolu procesov prebiehajúcich počas aerácie je vhodné pred aplikáciou technológie uskutočniť laboratórne a pilotné testy, prípadne tiež realizovať výpočtové simulácie na modelovanie priebehu funkčnosti aerácie,
- airsparging je na lokalite potrebné kombinovať s odsávaním pôdneho vzduchu – ventingom, vrtý budú napojené na odsávanie (venting) a vŕhanie (airsparging) vzduchu dúchadlami pomocou prírodných potrubí (Obrázok 6),
- inštaláciu ventingu je potrebné zohľadniť vzhľadom k povrchu terénu, a či dôjde k odstráneniu betónových konštrukcií alebo nie,
- na lokalite sa vyhlási systém vertikálnych odsávacích vrtov z pásma prevzdušnenia (ventingové vrtý). Z nich sa bude odčerpávať vzduch viac alebo menej nasýtený kontaminujúcimi látkami,
- odsatý vzduch je na povrchu potrebné vyčistiť tak, aby jeho následné vypúšťanie do atmosféry bolo v súlade s príslušnými limitmi. Bežnými spôsobmi čistenia na povrchu sú sorpcia na aktívnom uhlí (pri nízkom obsahu kontaminantov) a katalytické spaľovanie (pri vysokom obsahu kontaminantov), v prípade aktívneho uhlia sa na výstupe z kolóny periodicky sleduje kvalita vyčisteného vzduchu a tým aj funkčnosť sorbentu,
- množstvo odsávaného/vháňaného vzduchu sa na jednotlivých vetvách zvykne merať prietokomerom, kde sa zaznamenáva max. prietok vzduchu (výkon stanice).



Vysvetlivky: 1 – kompresor vzduchu; 2 – regulátor; 3 – tlakomer; 4 – prietokomer; 5 – vákuometer; 6 – vákuová pumpa; 7 – plynová čistiaca jednotka; 8 – uvoľňovanie; 9 – pásmo prevzdušnenia; 10 – hladina podzemnej vody; 11 – injektážny vrt vzduchu; 12 – znečistená zemina; 13 – vrt na extrakciu vzduchu; 14 – povrch terénu; 15 – prúdenie podzemnej vody; 16 – rozprašovaný vzduch; 17 – pásmo nasýtenia; 18 – smer prúdenia vzduchu; 19 – rozpustené prechavé organické látky; 20 – prechavé organické látky (voľná fáza).

Obrázok 6: Aeračný systém s extrakciou pôdneho vzduchu (Reddy K.R., Adams J.A. (2002)).

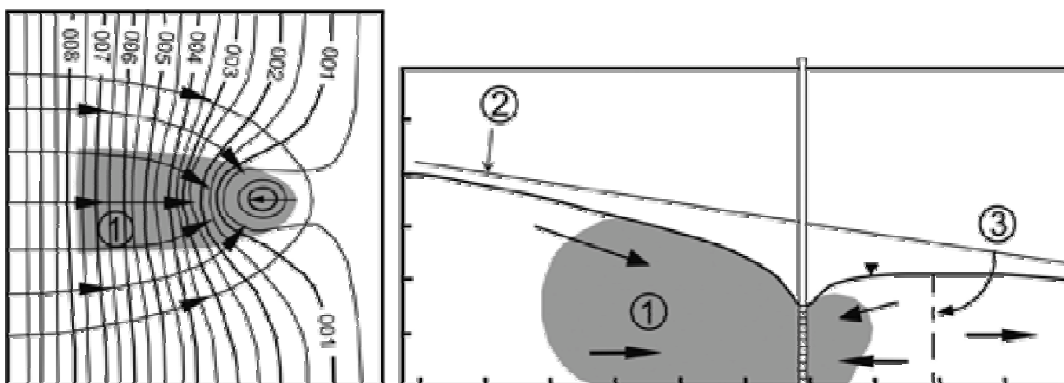
Špecifiká a postup aplikovania sanačnej metódy sanačné čerpanie a čistenie

Metóda sanačného čerpania a čistenia je koncepcne navrhnutá v kombinácii s metódami ISCO a airsparging s ventingom. Ide o kombinovanú stratégiu umožňujúcu elimináciu znečistenia v rozpustenej aj nerozpustenej forme. Účelom samotnej sanačnej metódy čerpanie a čistenie je vytvorenie požadovaného prúdenia podzemnej vody kvrtom, čo umožní zachytávať znečistenú vodu zo širšieho okolia, a tiež vytvorenie podmienok pre kontrolu vyprchávajúcich znečisťujúcich látok z okrajov pôsobenia technológií ISCO a airsparging. V zmysle navrhovanej koncepcie sa uvažuje s vytvorením hydraulického clony (pomocou systému čerpacích vrtov) na spodnom okraji v smere prúdenia podzemnej vody, ktorá bude slúžiť na zabránenie ďalšieho šírenia znečistenia mimo sanovanú oblasť (Obrázok 7).

Aplikovanie sanačného čerpania a čistenia je na lokalite navrhované nasledovne:

- čerpanie znečistenej podzemnej vody je predpokladané pomocou sanačných vrtov z ohniska znečistenia (okolie ST-2), finálny počet a rozmiestnenie sanačných vrtov bude špecifikované v projekte sanácie, zapojenie sanačných čerpacích vrtov do systému bude vyhodnotené riešiteľom na základe aktuálnych údajov o úrovni znečistenia a dosahu hydraulického depresie. Celkové čerpané množstvo podzemnej vody bude takisto upresnené v projekte sanácie.
- stupeň čistenia je navrhovaný zabezpečiť na povrchu tak, aby kvalita vody použitej po prečistení na spätnú infiltráciu do horninového podložia vyhovovala podmienkam daným príslušným povolením OÚ OSŽP v Bratislave na nakladanie s vodami. Princíp technológie čistenia pozostáva z odlučovania a zachytávania znečisťujúcich látok. Okrem stupňa gravitačného odlučovania sa predpokladá zapojenie stripovania na stripovacej kolóne a v prípade potreby dosiahnutia nižších koncentrácií znečisťujúcich látok, je ako sorpčný materiál možné použiť napr. aktívne uhlie.

- čistiacu sanačnú technológiu navrhujeme umiestniť do mobilného kontajnera a situovať v blízkosti sanačných vrtov. Presné miesto umiestnenia sanačnej stanice sa určí v projekte sanácie. Pre prevádzku bude potrebné technológiu pripojiť na rozvod elektrickej energie. Miesto pripojenia bude bližšie špecifikované v projekte sanácie. Na sanačných vrtoch budú osadené elektrické ponorné čerpadlá (výtláčná výška a minimálny prietok budú taktiež špecifikované v projekte sanácie). Súčasťou čerpadiel bude časovač, ktorým bude možné nastaviť pri každom čerpadle dobu čerpania a oneskorenia. Voda z vrtov bude vedená výtláčným potrubím do sanačnej stanice, kde bude prečistená.
- prečistená voda v sanačnej jednotke bude zasakovaná (infiltrovaná) späť do horninového prostredia nad ohniskom znečistenia proti smeru prúdenia podzemnej vody prostredníctvom injekčných vrtov tak, aby sa vytvoril vyšší gravitačný gradient smerom k jednotlivým sanačným technológiám,
- intenzifikovanie čerpania znečisťujúcich látok je možné vykonať napr. pomocou pridávania detergentu do injekčného vrtu spolu s vyčistenou vodou,
- počas aplikovania sanačného čerpania a čistenia je potrebné priebežne vyhodnocovať účinnosť zvoleného postupu a nastavenia technológie a následne ich optimalizovať.



Výsvetlivky: 1 – kontaminačný mrak; 2 – statická hladina podzemnej vody; 3 – hranica záchytnej zóny;

Obrázok 7: Vplyv hydraulickej clony na hladinu podzemnej vody a kontaminačný mrak - vertikálny a horizontálny rez (Cohen et al., 1997)

Technické riešenie sanácie je navrhované uskutočniť v troch etapách:

- Predsanačná etapa
- Sanačná etapa
- Posanačná etapa

6.1 Predsanačná etapa

V čase spracovania tejto štúdie boli známe výsledky geologického prieskumu Kminiaková et al., 2023. Pred samotným sanačným zásahom sa plánuje asanácia budov areálu chemických a priemyselných čistiární. Vznikne tak príležitosť overiť prítomnosť znečistenia v horninovom prostredí priamo pod budovami a spevnenými plochami. Za týmto účelom na lokalite navrhujeme realizáciu doplňkového geologického prieskumu životného prostredia. V prípade, že sa overí závažné znečistenie v zeminách pod budovami/spevnenými plochami sa vypracuje aktualizovaná AR, pomocou ktorej sa vyhodnotí rozsah a spôsob eliminácie detegovaného znečistenia. Spresnia a aktualizujú sa tiež informácie o situácii na lokalite vzhľadom k aktuálnemu rozsahu a miere znečistenia a predmetnému sanačnému riešeniu znečistenia v podzemnej vode. Laboratórnymi a pilotnými skúškami sa overia vybrané sanačné technológie vzhľadom k ich účinnosti v podmienkach na lokalite, čím sa získajú informácie o optimálnom sanačnom dizajne a zabezpečí sa aj lepšia kontrola sanácie lokality.

Predsanačná etapa bude pozostávať z nasledujúcich krokov:

Vypracovanie projektu sanácie s predsanačným doplnkovým prieskumom horninového prostredia/zemín

- vstupy, strety záujmov, inžinierske siete (prasknutá kanalizácia?), povoľovacia činnosť (napr. vodohospodári), havarijný plán a plán bezpečnosti na lokalite, a podobne.

Doplňkový geologický prieskum životného prostredia

- overenie znečistenia zeminy a stavebných podzemných prvkov pod budovami v areáli čistiární po ich asanácii,
- v prípade preukázania závažného znečistenia sa na základe výsledkov aktualizovanej analýzy rizika (AAR) navrhne rozsah spôsob odstránenie/zhodnotenie/zneškodnenie znečistených zemín a podzemných stavebných prvkov. Pre tieto účely bude vypracovaný samostatný projekt.
- aktualizácia informácií o situácii súvisiacej so šírením znečisťujúcich látok v území (bude zároveň slúžiť ako predsanačný monitoring),
- získanie špecifických informácií o podmienkach v horninovom prostredí potrebných pre konkretizáciu/optimalizáciu navrhovaného sanačného riešenia (realizácia vybraných laboratórných testov a pilotných skúšok),
- vypracovanie záverečnej správy z doplnkového prieskumu s AAR.

6.2 Sanačná etapa

Prípravné práce (stavebná príprava)

V rámci prípravy technickej infraštruktúry pre navrhované sanačné riešenia sa zriadi pracovisko, napojí sa na miestne siete (elektrina, voda, a iné), zabezpečia sa sociálne zariadenia, oplotenie, skladovací priestor pre náradie, prístup k objektom s cisternou, a pod.

Sanácia znečistenej zeminy a stavebných podzemných prvkov sa realizuje v prípade, že sa v doplnkovom geologickom prieskume preukáže ich závažné znečistenie (navrhne sa v samostatnom vyhodnotení po doplnkovom prieskume).

Inštaluje sa sanačná technika / technológia – doprava vrtných súprav, mechanizmov, inštalácia sanačných zariadení a sietí na čistenie horninového prostredia a podzemnej vody, vybudovanie sanačných objektov a pod.

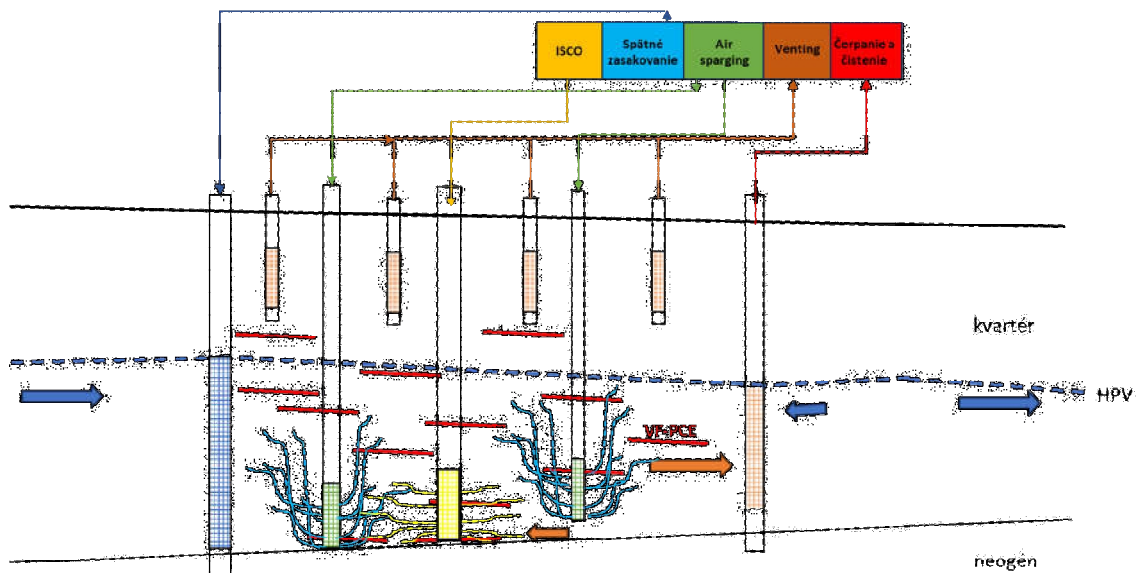
Vykoná sa skúšobná prevádzka sanačnej technológie pre potreby optimalizácie jej účinnosti a efektívnosti.

Realizácia sanácie – technológia sanácie podzemnej vody

Sanácia podzemnej vody pre dosiahnutie sanačného cieľa a sanačného limitu sa realizuje pomocou navrhovaného sanačného riešenia kombináciou metód ISCO a airsparging s ventingom, sanačné čerpanie a čistenie.

Účelom aplikovania sanačných metód je vytvorenie v pásme nasýtenia pod ohniskom znečistenia silné oxidačné prostredie, ktoré umožní rozklad chlórovaných uhľovodíkov na neškodné produkty rozkladu.

Podpornými metódami airsparging + venting a sanačné čerpanie a čistenie sa okrem spolupodieľania sa na eliminácii znečistenia bude optimalizovať a kontrolovať pôsobenie rozkladných procesov, aby sa zabezpečila efektívna a hospodárna sanácia vzhľadom k cieľom geologickej úlohy. Schematickú predstavu usporiadania jednotlivých sanačných technológií znázorňuje obr. 8.



Obrázok 8: Schematické vyjadrenie usporiadania sanačných technológií v reze v smere prúdenia podzemnej vody (Vysvetlivky: HPV – hladina podzemnej vody, VF-PCE – voľná fáza PCE)

Počet, rozmiestnenie a inštalácia jednotlivých prvkov sanačných technológií, ako aj aplikovanie účinných látok budú špecifikované v sanačnom projekte geologickej úlohy.

Prevádzku jednotlivých sanačných technológií je vhodné spúšťať postupne, aby bolo možné efektívne riadiť a kontrolovať jednotlivé sanačné procesy. Najskôr sa spustí sanačné čerpanie a čistenie, ktorým sa vytvorí osobitý režim prúdenia podzemnej vody na lokalite. Následne sa zapojí air-sparging s ventingom a optimalizuje sa tak, aby sa vytvorili podmienky na tvorbu a zachytávanie vyprchávajúcich znečisťujúcich látok. Nakoniec sa aplikuje ISCO v množstve a priestorovom rozsahu potrebnom na požadované zníženie znečistenia vo zvodnenci. Celková dĺžka sanácie je odhadovaná na 1 až 1,5 roka.

Sanačné čerpanie a čistenie

Metóda sanačného čerpania a čistenia je navrhovaná tak, aby okrem eliminácie objemu rozpusteného znečistenia slúžila aj na recirkuláciu prečistenej vody jej spätným zasakovaním nad sanovanú zónu proti smeru prúdenia. Zabezpečí sa tým jednak zvýšenie gradientu prečisťovaného priestoru na nátokovej strane a obmedzí nekontrolované šírenie znečistenia na výtokovej strane (v smere prúdenia podzemnej vody). Pre vytvorenie vhodných podmienok čerpania podzemnej vody je potrebné špecifikovať počet vrtov, ich situovanie na lokalite, zabudovanie vrtov (do úrovne nepriepustného podlažia), čerpané množstvá (vytvorenie potrebných depresných kužeľov), režim čerpania (kontinuálny, pulzný a pod.). Čerpacie vrtby by mali byť situované pod aplikačnými vrtmi ISCO v smere prúdenia podzemnej vody. Infiltračné vrtby pre zasakovanie prečistenej vody by mali byť situované nad ohniskom znečistenia, resp. nad aplikačnými vrtmi pre ISCO proti smeru prúdenia podzemnej vody. Počas prevádzky sanačného čerpania a čistenia sa predpokladá postupný pokles výnosu znečistenia z horninového prostredia, ten je možné intenzifikovať napr. vymývaním horninového prostredia detergentom prostredníctvom infiltračných vrtov. Čistenie čerpanej podzemnej vody je navrhované on-site predovšetkým prostredníctvom stripovania (odvetranie na kolóne). Parametre pre metódu čistenia air strippingom budú špecifikované v realizačnom projekte na základe výsledkov skúšobných testov prevádzky sanačného čerpania. Čerpané množstvo podzemnej vody je možno odhadnúť sumárne v rozsahu 5 l/s až 10 l/s. Pre obmedzenie rebounding efektu (opätovný nárast koncentráciu sanovanej znečisťujúcej látky po ukončení sanačného čerpania) je navrhnuté aplikovať komparatívnu sanačnú metódu ISCO.

Airsparging s ventingom

Pre dlhodobé udržanie oxidačných podmienok vo zvodnenci, atiež pre priestorové rozšírenie pôsobenia prevzdušnenia horninového prostredia, je na lokalite navrhnutý systém airspargingu + ventingu. Jeho inštalovanie je plánované v okolí aplikačných vrtov ISCO, koncepčne podľa schémy na Obr. 8. Konkrétny počet airspargingových a ventovacích vrtov, ako aj ich umiestnenie, zabudovanie či nastavenie množstiev vháňaného a odsávaného vzduchu, bude špecifikované v projekte sanácie. Čistenie odsávaného vzduchu sa predpokladá na povrchu vsanačnej jednotke na to určenou technológiou.

Chemická oxidácia ISCO

Metódu je navrhované aplikovať predovšetkým v ohnisku znečistenia vo východnej a JV časti areálu (okolie vrtov ST-2, HGV-2). Konkrétne počty aplikačných vrtov, ich situovanie a zabudovanie bude špecifikované v rámci projektu sanácie. Konkrétne množstvá oxidačného činidla a spôsob jeho aplikovania budú predmetom projektovania sanácie. Doba pôsobenia jednej aplikácie v horninovom prostredí sa odhaduje na dni až týždne. Počet a rozsah aplikácií oxidačného činidla bude prispôbený podmienkam na lokalite a plneniu požadovaných cieľov. V prípade kolmatácie aplikačných vrtov bude potrebná ich regenerácia pomocou air-liftu alebo biologickými rozpúšťadlami.

Sanačný monitoring

• V priebehu sanácie bude potrebné pre účely kontroly a riadenia sanácie realizovať sanačný monitoring pre sledovanie a vyhodnocovanie informácií o vývoji znečistenia v záujmovom území a v jeho okolí. Hlavnými ukazovateľmi v rozboroch podzemnej vody budú látky CIU a ukazovatele poukazujúce na kyslíkové pomery v podzemnej vode. Súčasťou monitorovania bude aj sledovanie vývoja pôdneho vzduchu – etán, etén a chloreten (vinylchlorid), ktoré sú konečnými degradačnými produktami rozkladu CIU. Na mieste sa budú merať terénne parametre ako EC, T, pH, Eh, O₂. Vo vybraných vrtoch i parametre pre posúdenie prirodzenej biologickej degradácie/atenuácie chlórovaných uhľovodíkov: NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻, Cl⁻, Fe_{celk}, Fe²⁺, Mn, sulfidy, KNK_{4,5}, CHSK_{Mn}.

Monitorovanie zahŕňa aj režimové meranie hladiny podzemnej vody a senzorické skúšky pri odbere vzoriek. Konkrétny rozsah sledovaných ukazovateľov, miesta a spôsob odberov vzoriek ako aj interval vzorkovania bude špecifikovaný v projekte sanácie.

Sanácia bude ukončená záverečnou správou s posanačnou (aktualizovanou) AR.

Po splnení cieľových hodnôt sanácie a dosiahnutia sanačného cieľa sa uskutoční likvidácia pracoviska a jeho rekultivácia. Ponechané budú vybrané vrty pre posanačné monitorovanie.

Neistoty, obmedzenia

- presná lokalizácia zdrojov znečistenia (overenie výskytu prípadnej voľnej fázy PCE),
- znečistenie v pásme prevzdušnenia v areáli čistiarní nie je dostatočne overené (bude predmetom doplnkového prieskumu po asanácii budov),
- možná existencia privilegovaných ciest pre šírenie znečisťujúcich látok vzhľadom k pomerne úzkemu kontaminačnému mraku (špecifické geologické pomery ?, čerpanie vody pre závlahu ?, sklon neogénneho podlažia ?),
- výraznejšie kolísanie koncentrácií PCE bez jednoznačnej interpretácie, v niektorých vrtoch boli overené vyššie koncentrácie PCE v hornej úrovni vodného stĺpca, ako v dolnej časti,
- iné zdroje znečistenia PCE v širšom okolí záujmovej lokality s možným synergickým účinkom od určitej vzdialenosti od hodnoteného areálu,

doterajšími prieskumnými prácami neboli overované špecifické podmienky horninového prostredia pre účely sanácie (obsah foc, počet heterotrofných a degradujúcich baktérií, migračné skúšky, a podobne).

Sanácia znečistených zemín

V prípade potvrdenia znečistenia zemín v doplnkovej etape v budúcom období bude spôsob ich sanácie upresnený podľa zisteného rozsahu a charakteru znečistenia. Vzhľadom na skutočnosť, že v území sa uvažuje pre účely výstavby podzemných garáží (-1PP) celoplošne odkop zemín do hĺbkovej úrovne cca 4,0-4,5m p.t. a ich odvoz z lokality možno orientačne uvažovať s metódami ex-situ, konkrétne **odťahbou a uložením zemín**

- a) na dekontaminačnej ploche, kde budú aplikované biologické metódy (land-farming, kompostovanie..atď (v zmysle dosiahnutých výsledkov kvality zemín)
- b) na skládke nebezpečného odpadu resp. nie nebezpečného odpadu (v zmysle dosiahnutých výsledkov kvality odpadu a inštrukcií environmentálneho dozoru počas výkopových a likvidačných prác)

V prípade, že navážka bude z predmetného územia odstránená, stáva sa pre stavebníka/investora odpadom. Za účelom stanovenia kvalitatívnych vlastností vzniknutého odpadu, pre upresnenie podmienok jeho ďalšej manipulácie a nakladania s ním odporúčame odber viacerých

zmesných vzoriek odpadu a ich vyhodnotenie v zmysle prílohy č.1 Vyhlášky č.382/2018 Z.z. („KRITÉRIA NA PRIJÍMANIE ODPADOV NA SKLÁDKY ODPADOV“). Metodiku odberu vzoriek bude riadiť environmentálny dozor (odporúča sa odber vzoriek z telesa výkopu, ako aj jeho dna a bočných stien na ohraničenie rozsahu znečistenia a preukázania efektívnosti odťažby kontaminovaných zemín).

6.3 Posanačná etapa

Posanačné monitorovanie sanovaného územia a jeho blízkeho okolia (odbery vzoriek a ich analýzy, terénne merania) je potrebné navrhnuť s cieľom deklarovania úspešnosti aplikovaných sanačných postupov a garancie jej výsledkov vzhľadom k cieľu sanácie. Posanačné monitorovanie sanovaného územia je potrebné nadimenzovať v súlade s návrhom v posanačnej analýze rizika, ktorá bude súčasťou záverečnej správy zo sanačných prác (vyhodnotenie etapy SEZ).

Posanačné monitorovanie by sa malo zamerať na sledovanie kvality podzemnej vody, ako aj pôdneho vzduchu. Monitorovanie podzemnej vody by sa malo vykonávať periodicky – kvartálne po dobu 24 mesiacov.

7. Záver

Predložená štúdia uskutočniteľnosti je súčasťou záverečnej správy z doplnkového geologického prieskumu životného prostredia potvrdenej environmentálnej záťaže „B2 (008) / Bratislava – Ružinov – Na paši č. 4 – chemická čistiareň (SK/EZ/B2/124)“.

Cieľom štúdie uskutočniteľnosti bolo navrhnuť a zhodnotiť varianty sanácie znečisteného územia vrátane odhadu finančných nákladov nápravných opatrení. Podkladom pre vypracovanie štúdie uskutočniteľnosti boli najmä výsledky uvedené v záverečnej správe s analýzou rizika z doplnkového geologického prieskumu životného prostredia potvrdenej environmentálnej záťaže „B2 (008) / Bratislava – Ružinov – Na paši č. 4 – chemická čistiareň (SK/EZ/B2/124)“ (Kminiaková et al., 2023). Ďalej to boli archívne geologické prieskumné práce súvisiace s predmetnou lokalitou.

Štúdia uskutočniteľnosti sumarizuje hlavné výsledky doterajších geologických prieskumov životného prostredia. Uvádza cieľ sanácie a sanačný limit vyplývajúci z AAR, ktorý je potrebné sanáciou dosiahnuť. Opisuje a hodnotí základné koncepčné varianty nápravných opatrení. Identifikuje vhodné sanačné techniky a technológie. Analyzuje a vyhodnocuje výber optimálneho variantu sanácie. **Prezentuje rámcové riešenie vybraného variantu sanácie, ktorým je kombinácia sanačných metód: chemická oxidácia (ISCO), airsparging s ventingom, sanačné čerpanie a čistenie.**

V danom návrhu aktívnej sanácie sa uvažuje s odstránením samotných zdrojov znečistenia (pôvodnej objektovej sústavy a znečistených zemín) a aplikovaním sanačnej technológie v území hodnoteného areálu na akceptovateľnú úroveň, ktorá nepredstavuje environmentálne, ani zdravotné riziká pre súčasné a budúce využitie územia ani jeho okolia (t.j. pri dosiahnutí cieľovej hodnoty sanácie pre PCE v území areálu $<25 \mu\text{g.l}^{-1}$). Celková dĺžka sanačného zásahu je odhadovaná na 1 až 1,5 roka.

Návrh sanačného monitorovania pre zabezpečenie optimálneho a efektívneho riadenia a kontroly sanácie, ako aj overenie dosiahnutia splnenia cieľových hodnôt sanácie je v predmetnej štúdii uskutočniteľnosti vyjadrený iba koncepčne. Špecifikovaný bude aj s návrhom posanačného monitorovania v projekte sanácie.

Na základe poznatkov o situácii na lokalite a výberu relevantných sanačných metód bola navrhnutá predbežná kalkulácia sanačných prác pre dosiahnutie sanačného cieľa. Súčasťou návrhu rozpočtu je aj doplnkový prieskum pred sanáciou a tiež predpokladané náklady na posanačný monitoring. Rozpočet je súčasťou výťažku pre objednávateľa prác.

Konkrétna špecifikácia vybraného sanačného riešenia, ako aj detailné spracovanie sanačných postupov na lokalite budú spracované v rámci realizačného projektu sanácie. Projekt sanácie bude tiež zohľadňovať výsledky predsanačného doplnkového prieskumu na lokalite po asanácii budov a nové poznatky získané pre účely overenia podmienok súvisiacich s aplikovaním vybraných sanačných metód.

8. Zoznam použitej literatúry

- Atlas krajiny Slovenskej republiky, I. vyd. 2002. Bratislava. Ministerstvo životného prostredia, Banská Bystrica: Slovenská agentúra životného prostredia. 344 s.
- Blažo, E.: Blue city center, Bratislava. DRILL, s.r.o., 2006
- Frankovská, J., Kordík, J., Slaninka I., Jurkovič, Ľ, Greif, V., Šottník, P., Dananaj, I., Mikita, S., Dercová, K., Jánová, V., 2010. Atlas sanačných metód environmentálnych záťaží. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava. 360 s. ISBN 978-80-89343- 39-3.
- Kminaková, K., Kminiak, M., Porubský, M., Kováč, T., 2023: Záverečná správa s analýzou rizika z doplnkového geologického prieskumu environmentálnej záťaže: B2 (008) / Bratislava – Ružinov – Na paši č. 4 – chemická čistiareň (SK/EZ/B2/124). Aquifer, s.r.o.
- Kordík, J. et al.: Lokalita č. 258: Bratislava – Ružinov – Na Paši č.4 – chemická čistiareň. ŠGÚDŠ Bratislava, 2022.
- Ľuptáková, A., et al.: Kvalita podzemných vôd na Slovensku 2020. Slovenský hydrometeorologický ústav Bratislava, 2021.
- Némethyová, M.: Administratívno-bytový komplex Prešovská, časť Administratívna budova – hydrogeologický prieskum pre zdroj technologickej vody – I. etapa. Vodné zdroje Slovakia s.r.o. 2010.
- Paluchová K., Vengrinová, A., Schwarz, J. 2020: Záverečná správa In situ chemická oxidácia (ISCO) z angl. In situ Chemical Oxidation, SAŽP.
- Polák, R.,: Bratislava – Komunálne služby – prieskum obsahu chlórovaných uhľovodíkov v zeminách a podzemných vodách. HYDROPOL Bratislava, 1992
- Pokyn Ministerstva pre správu a privatizáciu národného majetku Slovenskej republiky a Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky z 15. decembra 1997 č. 1617/97-min. na postup pri vyhodnocovaní záväzkov podniku z hľadiska ochrany životného prostredia v privatizačnom projekte predkladanom podnikom v rámci privatizácie.
- Reddy K.R. and Adams J.A., 2002: Cleanup of chemical spills using airsparging. The handbook of hazardous materials spills technology. M. Fingas, Editor, McGraw-Hill, New York, New York, U.S.A., Chapter 14.
- Suthersan, S. S., Lutes, C. C., Palmer, P. L., Lenzo, F., Payne, F. C., Liles, D. S., & Burdick, J., 2002: Technical protocol for using soluble carbohydrates to enhance reductive dechlorination of chlorinated aliphatic hydrocarbons. *Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP)*, 173.
- Šuba J., Bujalka, P., Cibulka, Ľ., Frankovič, J., Hanzel, V., Kullman, E., Porubský, A., Pospíšil, P., Škvarka, L., Šubová, A., Tkáčik, P., Zakovič, M.,: Hydrogeologická rajonizácia Slovenska. 2.vydanie. SHMÚ Bratislava, 1984
- Urban, O. et al.: Prieskum pravdepodobnej environmentálnej záťaže B2(008)/BA – Ružinov – Na Paši č.4 – chemická čistiareň – SK/EZ/B2/124. DEKONTA Slovensko, spol. s.r.o., DEKONTA a.s., 2015.
- US EPA, 2000
- <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2004.07.002>
- <https://www.meteoblue.com>