EKOSYSTEM

spol. s r.o.

ZPRÁVA Z PILOTNÍHO TESTU

Pilotní test a projektová dokumentace sanace ve společnosti AERO Vodochody a.s.

č.v.: 1000120010/2

Zpracoval: RNDr. Igor Tomek
odpovědný řešitel úkolu dle zák. č. 62/1988 Sb.

Spolupracovala: Jana Erdeová, p.g.

Přezkoumal a schválil: Ing. Pavel Salava
ředitel divize geologicko-průzkumných a sanačních prací, odpovědný řešitel úkolu dle zák. č. 62/1988 Sb.

Za statutární orgán: Ing. Petr Vučka
ředitel společnosti

Odborná způsobilost v hydrogeologii a sanační geologii č. 1696/2002 RNDr. Igor Tomek

duben 2013

EKOSYSTEM spol. s r.o.
výrobní, projektová
a konzultační organizace
Podkovářská 6, 190 00 Praha 9

IDENTIFIKAČNÍ LIST

Název zakázky:	**Pilotní test a projektová dokumentace sanace ve společnosti AERO Vodochody a.s.**
Stupeň zakázky:	**Zpráva z pilotního testu**
Ev. číslo výrobku:	**1000120010/2**

Dodavatel zakázky:

Obchodní firma:	**EKOSYSTEM, spol. s r. o.** *Zapsaná v OR u Městského soudu v Praze, oddíl C, vložka 6353*
Sídlo:	Podkovářská 6, 190 00 Praha 9
IČO:	44 85 18 04
DIČ:	CZ44851804
Statutární zástupce:	Ing. Petr Vučka, ředitel společnosti
Kontakty:	Telefon: 222 531 601, Fax: 222 531 639 e-mail: sekretariat@ekosystem.cz
Zpracovatelé:	RNDr. Igor Tomek, odpovědný řešitel úk. dle zák.č. 62/1988 Sb. Jana Erdeová, p.g., zpracování dat na PC, grafické výstupy
Schválil:	Ing. Pavel Salava, ředitel divize geologicko průzkumných a sanačních prací, odpovědný řešitel úkolu dle zák. č. 62/1988 Sb.

Zadavatel zakázky:

Název organizace:	**Ministerstvo financí** Odbor realizace privatizace majetku státu (č. 45) Oddělení ekologických škod
Sídlo:	Letenská 525/15, 118 10 Praha 1 - Malá Strana
Právní forma:	organizační složka státu
IČ:	00006947

V Praze dne 9. dubna 2013

Rozdělovník:	Výtisk č. 1	Ministerstvo financí
	Výtisk č. 2	AERO Vodochody a.s. (nabyvatel)
	Výtisk č. 3	supervize MF ČR
	Výtisk č. 4	MŽP ČR
	Výtisk č. 5	ČIŽP OI Praha
	Výtisk č. 6, 7,8	EKOSYSTEM, spol. s.r.o.

OBSAH:

1. ÚVOD 3
2. PODKLADOVÉ MATERIÁLY 3
3. POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ 3
3.1. GEOMORFOLOGICKÉ A KLIMATICKÉ POMĚRY 3
3.2. GEOLOGICKÉ POMĚRY 5
3.3. HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY 6
3.4. HYDROLOGICKÉ POMĚRY 7
3.5. SHRNUTÍ VÝCHOZÍHO STAVU KONTAMINACE 9
3.6. LEGISLATIVNÍ ZAJIŠTĚNÍ TECHNICKÝCH PRACÍ PILOTNÍHO POKUSU 11
4. REALIZOVANÉ TECHNICKÉ PRÁCE V RÁMCI PILOTNÍHO TESTU VE SPOLEČNOSTI AERO VODOCHODY A.S. 11
4.1. PŘÍPRAVNÉ TECHNICKÉ A LABORATORNÍ PRÁCE PRO REALIZACI PILOTNÍHO TESTU NA LOKALITĚ 12
4.1.1. VRTNÉ PRÁCE 12
4.1.2. REALIZACE LABORATORNÍCH ZKOUŠEK DEKONTAMINAČNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO LOKALITU AERO VODOCHODY A.S. 13
4.1.3. REŽIMNÍ MĚŘENÍ ÚROVNĚ HLADINY PODZEMNÍ VODY NA LOKALITĚ 28
4.2. REALIZAČNÍ PRÁCE NA LOKALITĚ - PILOTNÍ TEST REDUKCE KONTAMINANTŮ POMOCÍ NANOČÁSTIC ŽELEZA 29
4.2.1. METODIKA PILOTNÍHO TESTU REDUKCE KONTAMINANTŮ POMOCÍ NANOČÁSTI ŽELEZA 29
4.2.2. APLIKACE SUSPENZE NULAMOCNÉHO NANOŽELEZA DO HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ NA LOKALITĚ AERO VODOCHODY A.S. 30
4.2.3. VZORKOVACÍ PRÁCE 32
4.2.3.1. ZEMINY 32
4.2.3.2. VZORKOVÁNÍ PODZEMNÍ VODY NA LOKALITĚ A DOPORUČENÍ 33
4.2.4. STOPOVACÍ ZKOUŠKA 37
5. BEZPEČNOST A HYGIENA PRÁCE 39
6. ZÁKLADNÍ PRÁVNÍ REGULATIVY PRO PROVÁDĚNÍ PRACÍ 39
7. ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ SANACE 41
8. GEODETICKÉ PRÁCE 41
9. ZÁVĚR 42
9.1. SUMARIZACE PROVEDENÝCH PRACÍ 42
9.2. DOPORUČENÍ 43
9.3. ZÁVĚR 44

Přílohy:

Příloha č. 1: Situace širšího okolí zájmového území (1 : 100 000)

Příloha č. 2: Situace zájmového území s vyznačením lokality pilotního testu v areálu AERO Vodochody a.s.

Příloha č. 3: Geologická mapa lokality 1 : 50 000

Příloha č. 4: Situace zájmového území s vyznačením vyhloubených vrtů

Příloha č. 5: Izolinie hladin podzemní vody

Příloha č. 6: Petrografický popis vrtů

Příloha č. 7: Technická zpráva vrtných prací (Stavební geologie IGHG s.r.o.)

Příloha č. 8: Protokoly laboratorních analýz podzemní vody na lokalitě

Příloha č. 9: Fyzikálně chemické parametry podzemní vody včetně výsledků laboratorních analýz podzemní vody a grafů koncentrací CLU

Příloha č. 10: Geodetické zaměření vrtů

Příloha č. 11: Závěrečná zpráva laboratorních zkoušek (VŠCHT)

1. ÚVOD

Smyslem a cílem provedených prací předkládaného pilotního testu na lokalitě společnosti AERO Vodochody a.s. v rámci tohoto elaborátu je ověřit vhodnou metodu sanace na lokalitě, která zajistí odstranění neakceptovatelných rizik plynoucích ze zjištěného znečištění a dosažení cílových hodnot sanace stanovených v Rozhodnutí České inspekce životního prostředí, Oblastní inspektorát Praha vydané dne 6.4.2011 pod spisovou značkou ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999; č.j. ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999.033/11/RJC. Na základě realizovaného pilotního ověření bude zpracována projektová dokumentace sanace staré ekologické zátěže.

Předkládaná zpráva Pilotního testu ve společnosti AERO Vodochody a.s. byla vypracována na základě „realizační smlouvy č. 05 755 -2012- 452 –S – 0201/98 -01 – 005 –X 00599 ze dne 8.8.2012 uzavřená mezi Ministerstvem financí České republiky (objednatel) a společností EKOSYSTEM spol. s r.o. (zhotovitel).

Předmětem prací bylo:

1) Provedení pilotního testu vhodné metody sanace na lokalitě, která zajistí dosažení cílových hodnot sanace.

2. Metodické doporučení ke zpracování projektové dokumentace sanace (dále PD).

Uvedené práce byly realizovány tak, aby navrhly takový způsob řešení sanace horninového prostředí a podzemních vod, který je optimální ve vztahu k charakteru a rozsahu kontaminace, budoucímu využití zájmového území a povede k dosažení cílových parametrů sanace stanovených v Rozhodnutí České inspekce životního prostředí, Oblastní inspektorát Praha vydané dne 6.4.2011 pod spisovou značkou ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999; č.j. ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999.033/11/RJC a tím k odstranění rizik, která jsou svázaná se starou ekologickou zátěží v daném území.

Závěrečná zpráva z pilotního testu byla zpracována s ohledem na Směrnici FNM ČR a MŽP č. 3/2004 pro přípravu a realizaci zakázek řešících ekologické závazky vzniklé při privatizaci.

2. PODKLADOVÉ MATERIÁLY

Při zpracování tohoto projektu jsme vycházeli zejména z níže uvedených materiálů:

1. Aktualizovaná analýza rizika (RNDr. Miloš Mikolanda – GS geologická služba, září 2010).

2. Rozhodnutí České inspekce životního prostředí, Oblastní inspektorát Praha vydané dne 6.4.2011 pod spisovou značkou ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999; č.j. ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999.033/11/RJC

3. POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

3.1. Geomorfologické a klimatické poměry

Podle podrobného geomorfologického členění náleží zájmové území do provincie Česká vysočina, do Poberounské subprovincie, do Brdské oblasti, do podoblasti Pražská plošina.

Pražská plošina má parovinný nebo rovinný reliéf vzniklý denudací snížené úrovně středočeské paleogenní paroviny. Tento generelní reliéf zpestřuje hluboce zaříznutá údolí Vltavy a jejích přítoků.

Areál a.s. AERO Vodochody je vybudován na okraji ploché tabule s erozně akumulačním povrchem vyšší fluviální vltavské terasy. Terén areálu má rovinný charakter s neznatelným úklonem k severozápadu. Nadmořské výšky terénu při severozápadní hranici areálu dosahují hodnot 271-277 m.

Za severozápadní hranicí areálu dochází k výrazné změně sklonových poměrů. Terén se zde uklání k severozápadu do širšího a relativně hlubšího údolí Postřižínského potoka. Nadmořské výšky ve směru toku Postřižínského potoka dosahují hodnot od 257-231 m. Rozdíl nejvyšší nadmořské výšky v areálu a nejnižší výšky u koryta Postřižínského potoka činí více než 40 m.

Z klimatologického hlediska se zájmové území nachází v teplé oblasti klimatického okrsku T2 (Quitt, 1971). Tato oblast je charakterizována dlouhým, teplým a suchým létem, velmi krátkým přechodným obdobím, s teplým až mírně teplým jarem a podzimem a krátkou mírně teplou a suchou až velmi suchou zimou. Tento klimatický region lze charakterizovat průměrnou roční teplotou pohybující se v rozmezí 8-9 °C, s průměrnými teplotními extrémy v lednu -2 °C a v červenci + 19 °C.

Okrsek T 2 lze v číslech charakterizovat následovně:

léto:
- normální délka (50 - 60 letních dní)
- teplé (průměrná teplota v červenci 18 - 19 °C)
- suché (úhrn srážek ve vegetačním období 350 - 400 mm)

přechodné období:
- velmi krátké (100 - 110 počet dnů s mrazem)
- jaro teplé až mírně teplé (průměrná teplota v dubnu 8 - 9 °C)
- podzim teplý až mírně teplý (průměrná teplota v říjnu 7 - 9 °C)

zima:
- krátká (30 - 40 ledových dnů)
- mírně teplá (průměrná teplota v lednu -2 až -3 °C)
- suchá až velmi suchá (úhrn srážek v zimním období 200 - 300 mm)
- trvání sněhové pokrývky (40 - 50 dnů)

- průměrný počet dní v roce s teplotou ≥ 10 °C: 160 - 170
- průměrný počet dní v roce se srážkami > 1 mm: 90 - 100
- průměrný počet zatažených dní v roce: 120 - 140
- průměrný počet jasných dní v roce 40 – 50

Základní klimatické charakteristiky v meteorologických stanicích Kralupy nad Vltavou a Mělník jsou shrnuty v následujících tabulkách 1-2.

Tab. 1. Průměrná teplota vzduchu (°C) pro klimatologickou stanici Mělník (184 m n.m., severní šířka 50°21', východní délka 14°28) za období 1931 – 1960

Klimatologická stanice	Měsíc												Rok
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	

	Průměrná teplota vzduchu (°C) za období 1931 – 1960												
Mělník	-1,9	-0,8	3,4	8,8	14,1	17,4	19,0	18,3	14,4	8,7	4,0	-0,1	8,8

Tab. 2. Průměrný úhrn srážek (mm) pro klimatologickou stanici Kralupy nad Vltavou (220 m n.m., severní šířka 50°14', východní délka 14°17') za období 1931 – 1960

Klimatologická stanice	Měsíc												Rok
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
	Průměrný úhrn srážek (mm) za období 1931 – 1960												
Kralupy n. Vltavou	23	22	23	31	55	67	75	59	35	37	25	25	477

Průměrná roční rychlost větru se v zájmové oblasti pohybuje mezi 3 až 4 m/s.

Z větrné růžice (větrná růžice pro Kralupy nad Vltavou pro základní směry proudění, 3 třídy rychlosti větru a 5 tříd stability dle klasifikace ČHMÚ podle Bubníka a Koldovského) vyplývá, že posuzovaná lokalita je poměrně dobře provětrávána ze všech směrů s mírnou převahou západních, severozápadních a jihovýchodních směrů. Necelou třetinu roku jsou očekávány špatné rozptylové podmínky, doprovázené inverzními stavy. S tím souvisí i poměrně vysoká četnost výskytu bezvětří a větru do rychlosti 2,5 $m.s^{-1}$.

Dle Věstníku MŽP, částka 6/2009, spadá zájmové území mezi oblasti se zhoršenou kvalitou ovzduší.

3.2. Geologické poměry

Z geologického hlediska spadá zájmové území do jihozápadní části české křídové pánve, resp. k jejímu jihozápadnímu denudačnímu okraji, který je na území areálu AERO Vodochody tvořen elevací křídového fundamentu s transgredovaným spodnoturonským (jizerské-bělohorské souvrství, dle Zahálky pásmo IIIb, příbojová facie), resp. střednoturonským (?) souvrstvím a kvartérní terasou. Křídové sedimenty nasedají na proterozoické algonkické horniny, které vytvářejí výše uvedenou elevaci podloží. Proterozoické, resp. neoproterozoické horniny jsou zastoupeny tzv. kralupsko-zbraslavskou skupinou, která je zde tvořena střídáním prachovců, jílovců, křemitých a jílovitých břidlic a drob. Staršími a nově provedenými vrtnými pracemi na území areálu AERO Vodochody a v jeho těsném okolí (MV-60A, HV-60B, MV-61 a MV-62) nebyly neoproterozoické horniny zastiženy. Prokřemenělé šedočerné až šedomodré břidlice byly zastiženy nově vybudovanými vrty MV-63 a MV-66 v podloží turonských slínovců na úbočí svahu údolí Postřižínského potoka. Šedé až šedomodré středně zrnité tvrdé droby tvořily podloží turonských slínovců při úpatí uvedeného svahu ve vrtech MV-64 a MV-65.

V okolí Postřižína se vyskytují pod výrazně redukovanou mocností křídových slínovců výlevné magmatické horniny představované bazalty a andezitobazalty neoproterozoického stáří (vrtnými pracemi neověřeny).

Nadložní křídové sedimenty jsou zastoupeny, jak bylo výše uvedeno, subhorizontálně uloženými prachovitými slínovci v různém stupni zvětrávání. Svrchní vrstvy turonského souvrství jsou eluviálně rozložené a mají charakter jemně písčitých slínů a jílů se střípky mateční horniny. Mocnost křídových uloženin lze s přihlédnutím k výsledkům vrtných prací v okolí (např. Hoštice) odhadnout na max. 15-25 m.

Na křídovém podkladě je vyvinuta zdibská terasa pleistocénního stáří. Terasa je tvořena středně až hrubě písčitými zahliněnými štěrky, štěrkopísky a písky žlutých až rezavě hnědých barev. Terasa vystupuje na povrch mezi obcemi Klíčany, Panenské Břežany, Dolínek, Odolena Voda, Máslovice a Hoštice. Nepravidelně se místy v dobře propustných štěrkopískových vrstvách vyskytují jílovité až jílovitohlinité proplástky v mocnostech řádově v cm až dm. Nejsvrchnější vrstvy kvartérního souvrství jsou tvořeny na území areálu AERO Vodochody a.s. různorodými navážkami proměnlivé mocnosti. Mimo areál jsou svrchní vrstvy kvartéru převážně tvořeny prachovitými, prachovito-písčitými a písčitými hlínami deluviálního původu. Na svahu údolí Postřižínského potoka se pod výše uvedenými typy hlín vyskytují 1-2 m mocné vrstvy sprašových hlín eolického původu s obsahem výrazných vápnitých konkrecí a žilek.

3.3. Hydrogeologické poměry

Z hydrogeologického hlediska se zájmové území nachází v hydrogeologickém rajónu č. 451 – Křída severně od Prahy v těsné blízkosti rajónů č. 514 – Kladenská pánev a 625 – Proterozoikum a paleozoikum v povodí přítoků Vltavy. Rajón č. 451 zahrnuje plochu levostranných přítoků Labe od Čelákovic po Mělník a pravostranných přítoků Labe mezi tokem Labe a výchozy turonského kolektoru rajónu č. 452 mezi Starou Boleslaví a Mělníkem.

V zájmovém území, především na území areálu AERO Vodochody, jsou vyvinuty tři obzory podzemní vody. První kvartérní, který je nejzranitelnější z hlediska přestupu a rozšíření polutantů, je vázán na spojitý průlinový systém vyvinutý v štěrkopískových sedimentech zdibské terasy. Přestože terasové sedimenty jsou značně rozšířeny a mají výbornou propustnost (koeficient filtrace $k=10^{-3}$ až 10^{-5} $m.s^{-1}$), je terasa v některých svých částech téměř bezvodá, nebo obsahuje nepatrné množství vody. V areálu a v jeho nejbližším okolí (na náhorní plošině) mocnost terasových sedimentů kolísá od 6 do 12 m, směrem k hraně údolí Postřižínského potoka terasa vykliňuje a na jeho svazích, ale i v rovinné části údolí u Postřižína již zastižena nebyla. V generelu výška vodního sloupce kolísá mezi 0-5 m, horizont je dotován výhradně atmosférickými srážkami. Mocnost zvodnění na území areálu AERO Vodochody dosahuje po zhodnocení dříve provedených průzkumných prací cca 1-3 m, přičemž hladina podzemní vody se nachází nejčastěji v hloubce 7-9 m pod úrovní terénu. V propustných písčitých polohách může docházet v období zvýšené srážkové činnosti v místech, kde je v jejich podloží vyvinuta relativně méně propustná vrstva, ke vzniku tzv. zavěšených zvodní. Proudění podzemní vody v kvartérním kolektoru probíhá s volnou hladinou a jeho hlavní směr je od jihovýchodu k severozápadu, přičemž v detailu se vyskytují lokální odchylky od tohoto směru způsobené především výstavbou objektů (různé hloubkové úrovně založení) a inženýrských sítí v areálu či nehomogenitou navezených materiálů. Jímaná množství dosahují řádově hodnot prvních 0,x $l.s^{-1}$. K částečnému povrchovému odvodnění terasových sedimentů dochází vrstevními či přelivnými pramenními vývěry ve svrchní části svahu údolí Postřižínského potoka v místech vyklínění kvartérní terasy. V jiných částech údolí voda kvartérního kolektoru podpovrchově dotuje připovrchovou zónu zvětralin ostatních geologických formací, přičemž v místech jejich tektonického porušení dochází k zintenzívnění oběhu podzemní vody i transportu eventuálního kontaminantu.

Kvartérní zvodeň je od spodní křídové oddělena jílovitým eluviem slínovců (charakter slínů různé konzistence a množství střípkovité složky), které má vzhledem k nestejné mocnosti, rozloze a homogenitě charakter polopropustného nespojitého izolátoru.

Druhá zvodeň, která je vyvinuta v podložních křídových slínovcích, disponuje s ohledem na litologický charakter (obsah prachovitých částic, pevná až tvrdá konzistence) pouze velmi

nízkou puklinovou propustností (koeficient transmisivity T v řádu 10^{-4} až 10^{-5} $m^2.s^{-1}$). Pouze v místech výraznějšího tektonického porušení může docházet k lokálnímu zvýšení propustnosti, a tím i k intenzivnějšímu oběhu podzemní vody, příp. rozšíření kontaminace na větší vzdálenosti. Vydatnosti jímacích objektů dosahují hodnot řádově 0,00x $l.s^{-1}$, méně často ve výrazněji tektonicky predisponovaných polohách řádově 0,x $l.s^{-1}$.

Generelní směr proudění podzemní vody v křídovém kolektoru probíhá s mírně tlakovou hladinou s negativní výtlačnou výškou ve směru úklonu vrstev (do středu pánevní struktury), tj. od jihu až jihozápadu k severu až severovýchodu. Hlavní směr proudění podzemní vody je však v okolí bývalé skládky tuhého průmyslového odpadu v severozápadní části areálu AERO Vodochody a.s. výrazně usměrněn drenážním účinkem Postřižínského potoka a lokálním sklonem křídového podloží, tj. proudění podzemní vody zde probíhá k severozápadu. Vzhledem k tomu, že vrtnými pracemi byla ověřena výrazně redukovaná mocnost křídových sedimentů na svazích údolí či v rovinné části údolí Postřižínského potoka (vrty MV-63 až MV-66 – 4 až 5 m), je zřejmé, že k odvodnění křídové zvodně dochází s ohledem na místní geologické podmínky skrytými přírony do koryta Postřižínského potoka, příp. svahovými pramenními vývěry.

Třetí zvodnění, resp. v údolí Postřižínského potoka druhá zvodeň (zde chybí kvartérní kolektor) je vázána na slabě rozpukané neoproterozoické horniny. Oběh podzemní vody je závislý na litologickém charakteru těchto hornin a jejich rozpukání. V případě jílovitých břidlic je pohyb podzemní vody omezen v důsledku vyplnění puklinového systému druhotnými produkty zvětrávání, v případě tvrdších hornin – křemité břidlice, droby, andezitobazalty – je oběh podzemní vody přímo závislý na stupni rozpukání případně obsahu písčité složky. Vertikální spojitost turonského a neoproterozoického kolektoru nelze zcela vyloučit, zvláště v místech proniku výlevných magmatických hornin (andezitobazaltů) turonským souvrstvím (obec Postřižín).

3.4. Hydrologické poměry

Hydrologicky spadá zájmová lokalita do povodí Labe, dílčího povodí říčky Černavky (povodí Postřižínského potoka charakterizovaného číslem hydrologického pořadí 1-05-04-058 a plochou 4,569 km^2), která se vlévá severovýchodně cca 6 km před Mělníkem do Labe jako jeho levostranný přítok. Řeka Labe tvoří hlavní erozní bázi dané oblasti.

Místní drenážní bázi tvoří koryto Postřižínského potoka, jehož počátek je tvořen výpustí areálové dešťové kanalizace (dílčí větve označené jako "Postřižínská") odvodňující část západní poloviny areálu AERO Vodochody v okrajové části svahu v těsné blízkosti ohraničeného prostoru areálové ČOV. Koryto Postřižínského potoka kopíruje severovýchodní hranici oploceného prostoru ČOV a dále protéká zájmovým územím od jihovýchodu k severozápadu. Postřižínský potok dlouhý cca 6 km protéká obcemi Postřižín, Kozomín a Úžice, na jejím severním okraji se vlévá jako pravostranný přítok do řeky Černavka (číslo hydrologického pořadí 1-05-04-057/0). Černavka pramení 0,5 km západně od Kozomína ve výšce 218 m n. m. a ústí do Labe 6 km před Mělníkem u Obříství v 157 m n. m. jako jeho levostranný přítok. Plocha povodí Černavky činí 74,2 km^2, celková délka toku 15,8 km. Jedná se o vodohospodářsky významný tok s mimopstruhovou vodou.

Postřižínský potok protéká přes několik návesních rybníčků (v Postřižíně, Kozomíně a Úžici), které jsou využívány ke koupání a částečně i k rybolovu.

V posuzované oblasti se na toku Postřižínského potoka cca 780 m severozápadním směrem od areálu AERO Vodochody a cca 50 m od zahrádkářské kolonie nachází rybníček o ploše do 100 m^2. V Postřižíně potok napájí jednu ze dvou požárních nádrží vybudovaných v obci (nádrž umístěnou na toku téměř v centrální části obce) a dále místní rybník, který se rozkládá ve středu obce.

Vyjma rybníků na Postřižínském potoce se v území zájmu nachází další plošně nepříliš rozsáhlá vodní plocha, kterou je lesní tůň (rybník) lokalizovaná jižně od podnikové vlečky cca 370 m západním směrem od areálu AERO Vodochody.

Podél Postřižínského potoka není na základě informací získaných z Povodňového plánu Středočeského kraje stanoveno zátopové území.

Podle nařízení vlády č. 103/2003 Sb. v platném znění, o stanovení zranitelných oblastí a o používání a skladování hnojiv a statkových hnojiv, střídání plodin a provádění protierozních opatření v těchto oblastech, náleží katastrální území Postřižín mezi vymezené zranitelné oblasti.

Na Postřižínském potoce nejsou umístěny žádné vodočty, vodoměrné ani limnigrafické stanice, ani hlásný profil povodňové služby.

Systematické sledování jakosti povrchové vody v Postřižínském potoce neprobíhá. Z tohoto důvodu byly pro účely AAR v rámci prováděných průzkumných prací (duben - září 2010) vícekolově ze čtyř profilů Postřižínského potoka (odběrná místa a vzorky označeny jako OB-1 až OB-4) a jednokolově na výtoku dešťové vody z areálové kanalizace (odběrné místo a vzorek označen jako Výtok DK) a z lesní tůně (odběrné místo a vzorek označený jako Rybník) odebrány vzorky povrchových vod na proměření vybraných ukazatelů znečištění. Vyjma vzorků povrchových vod byly z Postřižínského potoka a lesní tůně odebrány také vzorky potočního sedimentu. Místa odběrů potočních sedimentů se shodují s místy odběrů vzorků vod povrchových.

Opakovaným vzorkováním povrchové vody z Postřižínského potoka a lesní tůně v době průzkumných prací AAR bylo zjištěno znečištění povrchové vody jak v potoce, tak lesní tůni chlorovanými uhlovodíky, které výrazně (několikanásobně) překračuje imisní standardy přípustného znečištění povrchových vod uvedených v nařízení vlády č. 61/2003 Sb. Již v úvodu toku, v místě výtoku dešťových vod z areálu AERO do koryta Postřižínského potoka, voda vykazuje nadlimitní znečištění chlorovanými uhlovodíky; zejména cis1,2DCE, v menší míře též VC a TCE. Znečištění vody v místě vyústění areálové dešťové kanalizace do koryta Postřižínského potoka se s největší pravděpodobností způsobuje kontaminovaná podzemní voda, která drénuje do tělesa netěsné dešťové kanalizace v úseku mezi areálem AERO Vodochody a jejím vyústěním do toku.

Znečištění povrchové vody chlorovanými uhlovodíky vlivem ředění a vytěkání kontaminantů v průběhu proudění vody korytem Postřižínského potoka vyznívá v úseku jeho toku mezi rybníkem u zahrádkářské osady a odměrným profilem OB-4, který byl zvolen na nátoku povrchových vod do požární nádrže v obci Postřižín.

Výrazné znečištění sedimentů Postřižínského potoka ani lesní tůně nebylo průzkumnými pracemi AAR zjištěno.

3.5. Shrnutí výchozího stavu kontaminace

Jak vyplývá z výše uvedených údajů, došlo v důsledku činností provozovaných v areálu AERO Vodochody a spojených s nakládáním se závadnými látkami k negativnímu ovlivnění podzemní vody chlorovanými uhlovodíky a to jak v areálu samotném (v jeho západní polovině), tak v území mezi areálem a obcí Postřižín s částečným zasažením také jižní části obce. Vyjma znečištění chlorovanými uhlovodíky bylo v území zájmu zjištěno také lokální znečištění podzemní vody ropnými uhlovodíky frakce C10-C40, benzenem, toluenem a ethylbenzenem. Toto ropné znečištění se nachází v severozápadní části areálu na okraji podzemního úložiště leteckého petroleje a v okolí skladu hořlavin a dle výsledků aktuálních průzkumných prací vykazuje plošně omezený rozsah. Chlorované uhlovodíky podzemní vodou migrují z areálu AERO Vodochody do obce Postřižín a prostřednictvím podzemní vody též do povrchového toku, který tvoří součást zájmového území, a lesní tůně nacházející se západním směrem od areálu AERO Vodochody. Povrchovým tokem je Postřižínský potok, který teče od areálu AERO Vodochody severozápadním směrem napříč zájmovém územím k obci Postřižín, kterou protéká obdobně jako obcí Kozomím, na jejíž severní straně se stáčí k severovýchodu k toku Černavky, do níž se vlévá na severním okraji obce Úžice. Znečištění podzemní vody chlorovanými uhlovodíky způsobují převážně PCE, TCE a cis 1,2 DCE, lokálně byla také zjištěna přítomnost VC. V areálu je podzemní voda v jeho západní polovině kontaminována chlorovanými uhlovodíky téměř celoplošně s třemi ohnisky, které vykazují sumární koncentrace chlorovaných uhlovodíků v řádu tisíců až desetitisíců µg/l.

Jedno ohnisko se nachází v okolí skladu hořlavin
Jedná se o okolí vrtu HV 6 – přibližně vymezené vrty HV-7, HV-19, HV-20, HV-12, HV-26. Maximální koncentrace sumy ClU ve vrtu HV-6 činila 27 768 µg/l, ve zmíněných okolních vrtech se pohybovala v rozmezí 22 až 1853 µg/l.

Druhé ohnisko je situováno mezi výrobní budovou a halou kabin.
Jedná se o prostor vrtů HV-28, HV-23, HV-21 a HV-27. Zde se hodnoty sumy ClU pohybovaly v rozmezí 976 až 6 584 µg/l).

Třetí leží na západní hranici areálu, odkud se z plošného i koncentračního hlediska významně rozpíná až do jeho předpolí. Jedná se o okolí vrt MV-61. V tomto vrtu činila sumární koncentrace ClU 11 886 µg/l. Vysoké hodnoty 2 598 resp. 1 384 µg/l byly zastiženy v jeho okolí ve vrtech HV-25 a HV- 33.

Další ohnisko znečištění, v porovnání s výše zmíněnými třemi ohnisky plošně omezeného rozsahu, se nachází na pravém břehu Postřižínského potoka u severní hranice samostatně oploceného prostoru areálové ČOV. V tomto místě dosahují sumární koncentrace chlorovaných uhlovodíků hodnot vyšších stovek µg/l (až 660 µg/l). Jedná se o prostor reprezentovaný vrty PV-2,PV-3, a MV 56.

Ze západní části areálu AERO Vodochody v okolí vrtu MV-61 v současné době odtékají ve směru k obci Postřižín vody kontaminované chlorovanými uhlovodíky v řádu desetitisíců µg/l s dominantním kontaminantem v podobě PCE a vyrovnaným zastoupením TCE a cis1,2DCE. V důsledku dlouhodobé existence kontaminace podzemní vody a tektonické predisponovanosti území kontaminační mrak chlorovaných uhlovodíků v podzemních vodách zasahuje až do intravilánu obce Postřižín, kde byly v jeho jižní části zjištěny sumární koncentrace ClU v řádu desítek µg/l. Cca 150 m jižně od hranice zastavěného území obce na severním břehu Postřižínského potoka přesahují sumární koncentrace ClU v podzemních vodách hodnotu 200 µg/l.

Postřižínský potok tvoří ve vztahu k podzemním vodám v území zájmu částečný drenážní prvek. Infiltrace kontaminovaných podzemních vod do toku má za následek nadlimitní přítomnost DCE, TCE a PCE v povrchové vodě předmětného toku. Nadlimitní koncentrace DCE, TCE a PCE vykazuje též lesní tůň, která se nachází ve směru pravděpodobného šíření kontaminace podzemních vod z areálu AERO Vodochody.

S vysokou mírou pravděpodobnosti dosud dochází k sekundární dotaci kontaminantů do podzemních vod v místech původně působících zdrojů v areálu AERO Vodochody, nejspíše postupným desorpčním uvolňováním kontaminantů vázaných na horninové prostředí jak v saturované, tak i nesaturované zóně.

V zájmovém území nejsou, až na lokálně omezená místa, vytvořeny příznivé podmínky pro přirozenou degradaci chlorovaných uhlovodíků podzemní vody. Z tohoto důvodu není možné v predikci dalšího vývoje kontaminace lokality významnou přirozenou reduktivní dechloraci chlorovaných uhlovodíků a tím přirozené snižování jejich koncentrací v čase uvažovat.

Vývoj znečištění podzemní vody v parametru sumy chlorovaných uhlovodíků v rámci 30leté prognózy přináší numerický model proudění a transportu kontaminace zpracovaný v rámci Aktualizace analýzy rizik starých ekologických zátěží v areálu AERO Vodochody a.s. a okolí (M. Mikolanda 2010, GS – geologická služba, Poděbrady)

Jak je zřejmé z grafických příloh tohoto numerického modelu, současný stav rozšíření kontaminantů v podzemních vodách se relativně blíží ustálenému stavu a v průběhu mnoha budoucích desetiletí lze předpokládat jen relativně omezené další plošné rozšiřování kontaminace oproti současnému stavu. Z pohledu koncentračního rozložení kontaminantů v postižené ploše zájmového území však nelze v obci Postřižín v okolí Postřižínského potoka, tj. oblasti, která je již kontaminací částečně postižena, v průběhu příštích cca padesáti let vyloučit možnost nárůstu koncentrací kontaminantů v podzemních vodách až na několikanásobek současného stavu. V obci Postřižín lze předpokládat možnou kulminaci koncentrací kontaminantů na úrovni cca 160 µg/l v přibližném časovém horizontu roku 2055.

Na základě prostorové diskretizace použité v matematickém modelu proudění podzemních vod a transportu kontaminantů lze předpokládat, že v areálu AERO Vodochody a přilehlém okolí tvořeném kvartérními štěrkopísky je znečištěním sumárními chlorovanými uhlovodíky (ClU) zasaženo cca 1 050 000 m^3 horninového prostředí saturované zóny a cca 210 000 m^3 podzemních vod. Za hranicí kvartérních štěrkopísků v předpolí areálu AERO Vodochody směrem k obci Postřižín je znečištěno dalších cca 300 000 m^3 horninového prostředí saturované zóny a 45 000 m^3 podzemních vod.

Celkem je množství kontaminantů volně rozpuštěných v podzemních vodách odhadováno na 114 kg, z toho 105 kg je předpokládáno v kvartérních sedimentech a zbylých 9 kg v předpolí směrem k Postřižínu.

Rychlost transportu kontaminantů je vlivem retardačních procesů nejméně o řád zpomalena oproti advektivní rychlosti proudění a vedle kontaminantů volně rozpuštěných v podzemních vodách je dalších cca 2 200 kg ClU reverzibilně sorbováno v horninovém prostředí saturované zóny. Tyto sorbované kontaminanty se budou dlouhodobě do podzemních vod zpětně uvolňovat a spolu se sekundární dotací kontaminantů vymývaných srážkovou infiltrací z nesaturované zóny budou mít za následek dlouhodobost setrvávání ohnisek

kontaminantů a jen pozvolný pokles jejich koncentrací. Matematický model prostorovou distribuci kontaminantů v podzemních vodách opět zjednodušeně schematizuje a v reálné skutečnosti nepochybně existují značné odchylky způsobené například přítomností přírodních nehomogenit působících jako preferenční cesty proudění podzemních vod i transportu kontaminantů, **viz Aktualizace analýzy rizik starých ekologických zátěží v areálu AERO Vodochody a.s. a okolí (M. Mikolanda 2010, GS – geologická služba, Poděbrady)**

3.6. Legislativní zajištění technických prací pilotního pokusu

Na základě dostupných podkladů byl vypracován Projekt geologických prací „Pilotní test a projektová dokumentace sanace ve společnosti AERO Vodochody a.s." pod zakázkovým číslem naší společnosti EKOSYSTEM spol. s r.o. č.v. 1 000 120 110. Tento projekt byl schválen Ministerstvem financí ČR dne 12.11. pod č.j. MF – 111069/2012/45 a sloužil jako základní výchozí podklad pro realizaci pilotního pokusu na lokalitě.

Pro aplikaci technologie in situ na lokalitě pilotního testu v areálu společnosti AERO Vodochody a.s. bylo vydáno Krajským úřadem Středočeského kraje dne 23.10.2013 pod č.j. 141357/2012/KUSK rozhodnutí povolení výjimky podle § 39 odst. 7 písm. g) zákona 254/2001 Sb. Vodní zákon v platném znění k aplikaci nanočástic nanoželeza za účelem provedení pilotního testu redukce kontaminace podzemních vod chlorovanými uhlovodíky v rámci prací na odstraňování staré ekologické zátěže v areálu společnosti AERO Vodochody a.s.

Technické práce na lokalitě byly obecně prováděny v souladu s legislativními normativy a výše uvedenými rozhodnutími orgánů státní správy, především těch, které se týkají ochrany životního prostředí, zdraví a bezpečnosti práce.

Nakládání s odpady vzniklými v průběhu pilotního testu se řídilo zákonem č. 185/2001 Sb. o odpadech v platném znění a jeho prováděcími vyhláškami.

4. REALIZOVANÉ TECHNICKÉ PRÁCE V RÁMCI PILOTNÍHO TESTU VE SPOLEČNOSTI AERO VODOCHODY A.S.

Realizované technické práce na lokalitě AERO Vodochody a.s. jsme z hlediska metodiky rozdělili na přípravné a realizační.

Přípravné práce zahrnují tyto činnosti:
1. Vrtné práce.
2. Laboratorní zkoušky inovativních IN SITU sanačních technologií pro lokalitu AERO Vodochody a.s.
3. Režimní měření úrovně hladiny podzemní vody na lokalitě.

Realizační práce jsou složeny z těchto činností:
1. Aplikace suspenze nulamocného nanoželeza do horninového prostředí na lokalitě AERO Vodochody a.s.
2. Vzorkovací práce
a) zeminy
b) podzemní voda

3. Stopovací zkouška

Popis jednotlivých segmentů výše uvedených činností je shrnut v následujících subkapitolách.

4.1. Přípravné technické a laboratorní práce pro realizaci pilotního testu na lokalitě

Pro realizaci pilotního pokusu na lokalitě byly provedeny tyto soubory prací:
1. Vrtné práce.
2. Realizace laboratorních zkoušek inovativních IN SITU sanačních technologií pro lokalitu AERO Vodochody a.s.
3. Režimní měření úrovně hladiny podzemní vody na lokalitě AERO Vodochody a.s.

ad. 1) Vrtné práce

Zde se jednalo o vybudování zkušebního polygonu pro aplikaci sanační metody IN SITU v ohnisku kontaminace situovaném mezi výrobní budovou č. 59 a halou kabin č. 120 výrobního areálu AERO Vodochody a.s. Jednalo se celkem o 5 hydrogeologických vrtů situovaných lineárně po směru proudění podzemní vody s těmito funkcemi:

a) HV- 22
– referenční bod poskytující informace ohledně kvality podzemní vody vstupující do zkušebního pole.

b) ZW-1
- aplikační vrt pro dávkování příslušné látky v rámci metody IN SITU.

c) MW-1, MW-2, HV-23
- monitorovací vrty poskytující informace o změnách kvality podzemní vody na lokalitě po aplikaci příslušné látky v rámci metody IN SITU.

ad. 2) Realizace laboratorních zkoušek dekontaminačních technologií pro lokalitu AERO Vodochody a.s.
Cílem těchto laboratorních zkoušek bylo zjištění aplikovatelnosti jednotlivých sanačních technologií na vybraných vzorcích vrtného jádra ze zájmové lokality, viz výše.

ad. 3) Režimní měření úrovně hladiny podzemní vody na lokalitě
Účelem režimního měření úrovně hladiny podzemní vody na lokalitě je zjištění směru proudění podzemní vody v době konání pilotního pokusu sanačních technologií IN SITU včetně zjištění lokálních odchylek od generálního směru proudění podzemní vody.

4.1.1. Vrtné práce

Pro provedení pilotního testu technologie IN SITU metody v rámci pilotního testu byly vyhloubeny tři hydrogeologické vrty ZW 1, MW 1 a MW 2 v tomto technologickém složení:

1. Aplikační vrt ZW-1
- výstroj průměr 160mm
- materiál PEHD
- hloubka vrtu 11,5 m p.t.

- tlakový uzávěr.

2. Monitorovací vrt MW-1
- výstroj průměr 160mm
- materiál PEHD
- hloubka vrtu 11,5 m p.t.
- převlečný uzávěr.

3. Monitorovací vrt MW-2
- výstroj průměr 160mm
- materiál PEHD
- hloubka vrtu 11,.5 m.p.t.
- převlečný uzávěr.

Každý z výše uvedených vrtů byl vystrojen PEHD tlakovou výpažnicí průměr 160/9,5 mm/Js 141,0 mm, PE 100 SDR 17, výrobce GWE Pumpenboese, SNR. Jednotlivé díly výstroje jsou spojeny trapézovým závitem. Perforace výstroje je příčně řezaná. Js řezů je 2,0 mm, plochy perforace je 10 %. Perforovaná část výstroje vrtu je obsypána praným kačírkem zrnitosti 4 – 8 mm. Plná část výstroje je těsněna zásypem granulovaným bentonitem TSB. Zhlaví vrtů tvoří ocelová chránička průměr 194 mm, zasazená do hloubky 1,5 m v betonovém límci s vrchním okrajem cca 0,5 m nad terén. Ústí chrániček je uzavřeno snímatelnou ocelovou krytkou. Další informace ohledně výstroje vrtů jsou obsaženy v příloze č. 7.

Vrty ZW-1, MW-1 a MW-2 byly vyhloubeny v **ohnisku kontaminace situovaném mezi výrobní budovou č. 59 a halou kabin č. 120.** Jedná se o prostor mezi stávajícími vrty HV-24, HV-23, HV-22, HV-21, HV-27 a HV-28, kde se hodnoty sumy ClU pohybovaly v rozmezí 976 až 6 584 µg/l. **Situace s umístěním projektovaných vrtů je uvedena v příloze č. 4.**

Stávající vrt HV-22 sloužil jako referenční vrt pro zjištění kvality podzemní vody vstupující do zkušebního pole pilotního pokusu s nanoželezem. Stávající vrt HV-23 byl použit jako referenční vrt pro výstup ze zkušebního pole pilotního pokusu.

4.1.2. Realizace laboratorních zkoušek dekontaminačních technologií pro lokalitu AERO Vodochody a.s.

Cílem těchto laboratorních zkoušek bylo zjištění aplikovatelnosti jednotlivých sanačních technologií na vybraných vzorcích vrtného jádra ze zájmové lokality v rámci pilotního testu, viz výše.

V rámci laboratorních testů byla ověřena technologie ISCO (manganistan draselný), dále použitelnost aplikace nulamocného nanoželeza a metoda BRD (aplikace kyseliny mléčné).

V rámci testování technologie ISCO byla měřena maximální spotřeba zvoleného oxidačního činidla při jeho kontaktu s daným vzorkem zeminy. Dále byla stanovena kinetika rozkladu definovaného oxidačního činidla. Jako oxidační činidlo byl použit manganistan draselný.

Při testování použitelnosti suspenze nulamocného nanoželeza Nanofer 25S byl pomocí kolonových testů popsán prostup tohoto materiálu vrstvou dodané zeminy, její kolmatace (zpomalení průtoku) a možnosti jejího obohacení železem.

Testováním aplikovatelnosti kyseliny mléčné byl pomocí kolonových testů popsán prostup tohoto činidla vrstvou dodané zeminy, její kolmatace (zpomalení průtoku) a možnosti jejího obohacení organickým uhlíkem.

Testování výše uvedených metod bylo realizováno na vzorku zeminy z aplikačního vrtu ZW1 pocházejícího z lokality AERO Vodochody a.s. v ohnisku kontaminace situovaném mezi výrobní budovou č. 59 a halou kabin č. 120, v testovacím polygonu pilotního testu lokality AERO Vodochody a.s..

Laboratorní práce byly realizovány na části vrtného jádra odebraného z hloubky 8,0 m – 9,0 m pod terénem. Je to zvodněná poloha zdibské terasy tvořená kvarterními zvodněnými písčitými štěrky , Tyto písčité štěrky jsou charakterizovány polozaoblenými valouny o průměru 60 až 90 mm. Jejich mezimezerní výplň tvoří hrubý písek.

Obecné principy zvažovaných sanačních metod na lokalitě (metoda ISCO, aplikace suspenze nanoželeza, biologická reduktivní dechlorace) jsou popsány dále v textu.

In situ chemická oxidace

Metoda in situ chemické oxidace (dále jen ISCO) je jednou z novějších sanačních technik. Princip této technologie spočívá v infiltraci vodného roztoku oxidačního činidla (dále jen oxidantu) do horninového prostředí tak, aby došlo k destrukci přítomných kontaminujících látek. Metoda ISCO je v zásadě určena pro sanaci zemin kontaminovaných organickými látkami, kde finálními produkty oxidační reakce jsou oxid uhličitý a další pro životní prostředí neškodné látky v přírodě zcela běžné. Oxidační činidla se do zemin zasakují pomocí injektážních vrtů a infiltračních systémů. Nejčastější používané oxidanty jsou: Manganistan alkalického kovu, peroxid vodíku, ozon.

Obecné principy ISCO

Pro ISCO aplikaci se používají dvě formy manganistanu – manganistan sodný ($NaMnO_4$) a manganistan draselný ($KMnO_4$), jehož použití je častější. Reakcí manganistanu draselného s organickými sloučeninami lze principiálně zapsat následujícím způsobem, kde R představuje organický kontaminant:

$$R + KMnO_4 \rightarrow MnO_2 + CO_2 \qquad (1)$$

Metoda ISCO bývá nejčastěji zmiňována v souvislosti se sanací chlorovaných organických kontaminantů. Příkladem těchto látek může být tetrachlorethen (perchlorethylen – PCE), popřípadě trichlorethylen, kde destrukční reakce (1) probíhá následovně:

$$4KMnO_4 + 3C_2Cl_4 + 4H_2O \rightarrow 6CO_2 + 4MnO_2 + 4K^+ + 8H^+ + 12Cl^- \qquad (2)$$

$$2KMnO_4 + C_2HCl_3 \rightarrow 2CO_2 + 2MnO_2 + 2K^+ + H^+ + 3Cl^- \qquad (3)$$

Manganistan draselný může potom obecně být použit pro destrukci dalších organických látek jako například alkenů, aromátů, fenolů, pesticidů a organických kyselin. Mezi výhody užití manganistanu draselného patří zejména jednoduchá skladovatelnost, manipulace, snadná příprava oxidačních roztoků a v neposlední řadě také vysoký stupeň odstranění kontaminantů. Mezi další výhody bezpochyby patří relativně rychlý a nevratný průběh reakcí.

In situ chemická oxidace ve světě

Chemická oxidace se již dlouhá léta používá k destrukci kontaminantů přítomných v odpadních vodách. Příkladem používaných oxidačních činidel jsou například fluor, hydroxylový radikál, manganistan, ozon, chlor či jód.

Následně se pak začala studovat aplikace manganistanu draselného, peroxidu vodíku a Fentonova činidla ve vztahu k zeminám. Později byly studovány i další oxidanty jako je ozon. Chemická oxidace byla do dnešní doby aplikována na široké spektrum organických látek v zeminách a podzemních vodách. Kontaminanty pak byly úspěšně destruovány použitím manganistanu draselného, peroxidu vodíku (včetně Fentonova činidla), a ozonu jak ukazuje Tab. 3.

Tab. 3: Přehled aplikací a organických látek úspěšně odstraněných chemickou oxidací

Organický kontaminant	Čištěné médium	Oxidant
Trichlorethylen	Zemina-kontaminovaná	$KMnO_4$
	Písek & jíl - nakontaminovaný	H_2O_2 a $KMnO_4$
	Naplavené jílové zeminy – provozní aplikace	$KMnO_4$
	Voda-nakontaminovaná	H_2O_2
	Podzemní voda – provozní aplikace	$NaMnO_4$
Tetrachlorethylen	Zemina-	$KMnO_4$
	Křemenný písek- nakontaminováno	H_2O_2
	Podzemní voda - provozní aplikace	$KMnO_4$
Trans-1,2-DCE	Voda - nakontaminováno	H_2O_2
Pentachlorfenol	Křemenný písek- nakontaminováno	H_2O_2
	Přirozená zemina	H_2O_2
2,4-dichlorfenol	Voda-nakontaminovaná	H_2O_2
Morový olej	Zemina - provozní aplikace	H_2O_2
BTEX	Zemina - provozní aplikace	Ozon
Naftalen, fenantren, pyren	Jíl, písčitá zemina - nakontaminováno	H_2O_2 nebo $KMnO_4$

Přirozená spotřeba oxidantu

Přirozená spotřeba oxidantu (NOD – natural oxidant demand) představuje množství manganistanu nebo jiného oxidantu, které je spotřebováno reakcemi, které se nevztahují k destrukci cílových kontaminantů. V půdě nebo podzemní vodě se přirozeně vyskytuje NOM (natural organic matter) nebo další reduktanty. NOM může způsobit paralelní potřebu manganistanu, která bude konkurovat potřebě tvořené kontaminantem. Tato přirozená spotřeba manganistanu je velmi důležitá, protože může změnit kinetiku nebo prodloužit reakci oxidantu s cílovým kontaminantem.

Spotřeba oxidantu pro NOM může snížit účinnost degradace (rychlost a míru) pro cílový kontaminant, jestliže dávka oxidantu není dostatečná, aby splnila všechny požadavky v systému.

Tab. 4: Souhrn dat z lokalit sanovaných chemickou oxidací s použitím manganistanu

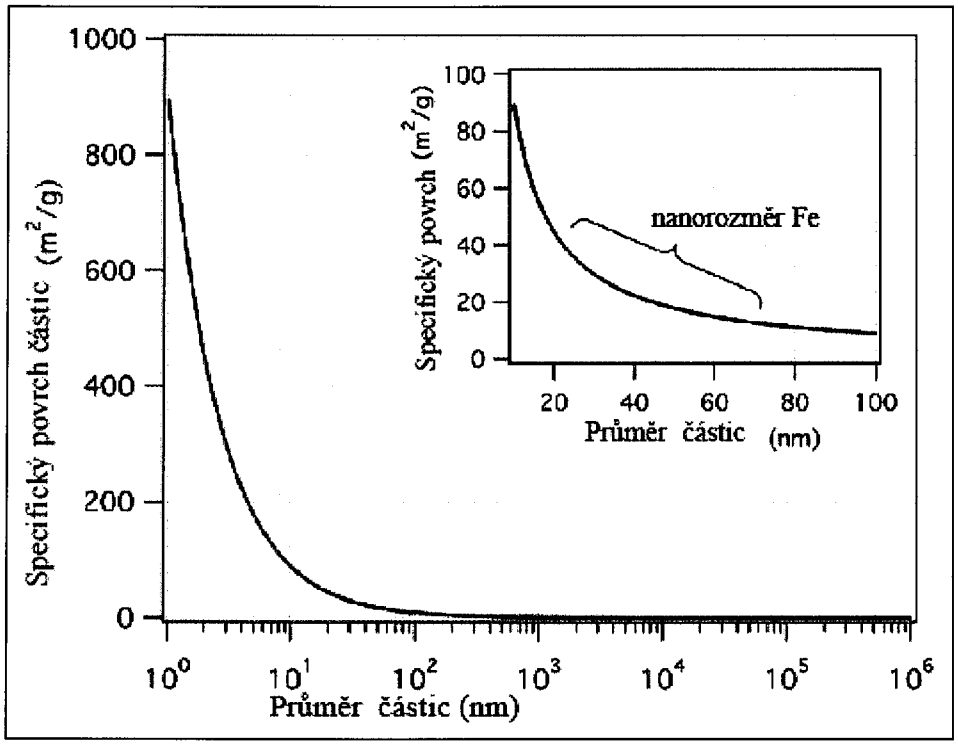
Vzorek	Podmínky	Spotřeba MnO_4^-	pozn.
Podzemní voda (simulovaná)	MnO_4^- = 450 mg/l TOC = 50 mg/l t = 20°C čas = 1h	6,0 mg/mg TOC	zůstatkový poměr MnO_4^-/TOC byl 12:1 mg/l : mg/l
	MnO_4^- = 900 mg/l TOC = 550 mg/l t = 20°C čas = 1h	2,3 mg/mg TOC	MnO_4^- byl vyčerpán, zůstatkový poměr MnO_4^-/TOC byl < 1:1
Podzemní voda	MnO_4^- = 500 mg/l TOC = 20 mg/l t = 20°C čas = 15,7 dní	9,8 mg/mg TOC	MnO_4^- nebyl vyčerpán, koncentrace Cl^- iontů byla ~ 6 g/l

	MnO_4^- = 5 000 mg/l TOC = 20 mg/l t = 20°C čas = 15,7 dní	146 mg/mg TOC	MnO_4^- nebyl vyčerpán, koncentrace Cl^- iontů byla ~ 6 g/l
Zemina (lokalita v Ohiu)	MnO_4^- = 500 mg/l TOC = 0,9 mg/g zem. t = 20°C čas = 14 dní	3,3 mg/mg TOC	
	MnO_4^- = 5000 mg/l TOC = 0,9 mg/g zem. t = 20°C čas = 14 dní	12,4 mg/mg TOC	
Čedič drcený Sedimentovaný čedič	MnO_4^- = 0,01% čas = 1 den	50 mg/g čediče 200 mg/g drceného čediče	
zemina ze zvodně	MnO_4^- = 500 mg/l TOC = neuved. t = 20°C čas = do 10 dní	≥ 0,5 mg/g zeminy	MnO_4^- vyčerpán během 10 dnů
zemina (sediment, jíl, písek)	MnO_4^- = 10 mg/l TOC = neuvedena t = neuvedena čas = 1den, 14 dní	sediment 4,27 mg/g (1d) 7,61 mg/g (14d) jíl 4,34 mg/g (1d) 7,16 mg/g (14d) písek 2,19 mg/g (1d) 4,49 mg/g (14d)	rychlý počáteční úbytek MnO_4^- (0-1d) následován pomalejším (1-14d) NOD mnohem větší (10x) než by spotřebovaly cílové kontaminanty

A) OBECNÉ PRINCIPY APLIKACE NANOŽELEZA PRO REMEDIACI PODLOŽÍ

Základní obecný popis nanočástic železa

Tento text podává širší přehled o stavu vývoje nanoželeza pro jeho aplikace v oblasti životního prostředí, kde může efektivně redukovat obtížně rozložitelné organické kontaminanty (v našem případě chlorované alifatické uhlovodíky TCE, DCE, PCE apod.), toxické kovy a jiné polutanty. Jsou zde zmíněny fyzikálně chemické vlastnosti nanočástic Fe (v oxidačním stavu 0), velikost částic a chování nanoželeza v životním prostředí.



Obr. 1: Velikost povrchu částice vypočtená z jejího průměru za předpokladu kulového tvaru a hustoty 6,7 g/cm^3. (výpočet založen na průměrné hustotě čistých látek Fe^0 a Fe_3O_4).

V environmentálních aplikacích se nanočástice železa ukazují být pozoruhodnými nástroji pro čištění kontaminované zeminy a podzemní vody. Nanočástice Fe mohou degradovat chlorované uhlovodíky trichlorethen TCE, tetrachlorethen PCE, tetrachlormethan a řadu dalších polutantů jako jsou NO_3^-, toxické kovy – Cr^{VI}, Ni, Hg, Pb a také As a U. V přítomnosti O_2 mohou nanočástice Fe produkovat hydroxylové radikály (obdoba Fentonovy reakce), které pak dokáží degradovat mnoho organických látek jako jsou herbicidy, kyselina benzoová a další. Na rozdíl od tradičního železného prášku (pilin) používaného pro redukci kontaminantů v propustných reaktivních bariérách PRB, jsou nanočástice Fe mnohem efektivnější při podstatně menší spotřebě materiálu, které mohou být ve formě suspenze transportovány přímo do kontaminačního mraku. Své uplatnění nacházejí různé druhy nanočástic pro čištění vody od anorganické či organické kontaminace. Fotocitlivé nanočástice oxidů zinku a titanu jsou použitelné k odstranění chlorovaných uhlovodíků fotokatalytickou reakcí, trubičky nanorozměrů jsou testovány pro odstranění dioxinů, nebo lze nanočástice využívat jako nosič pro podporu mikrobiálních nárostů odstraňujících organickou kontaminaci.

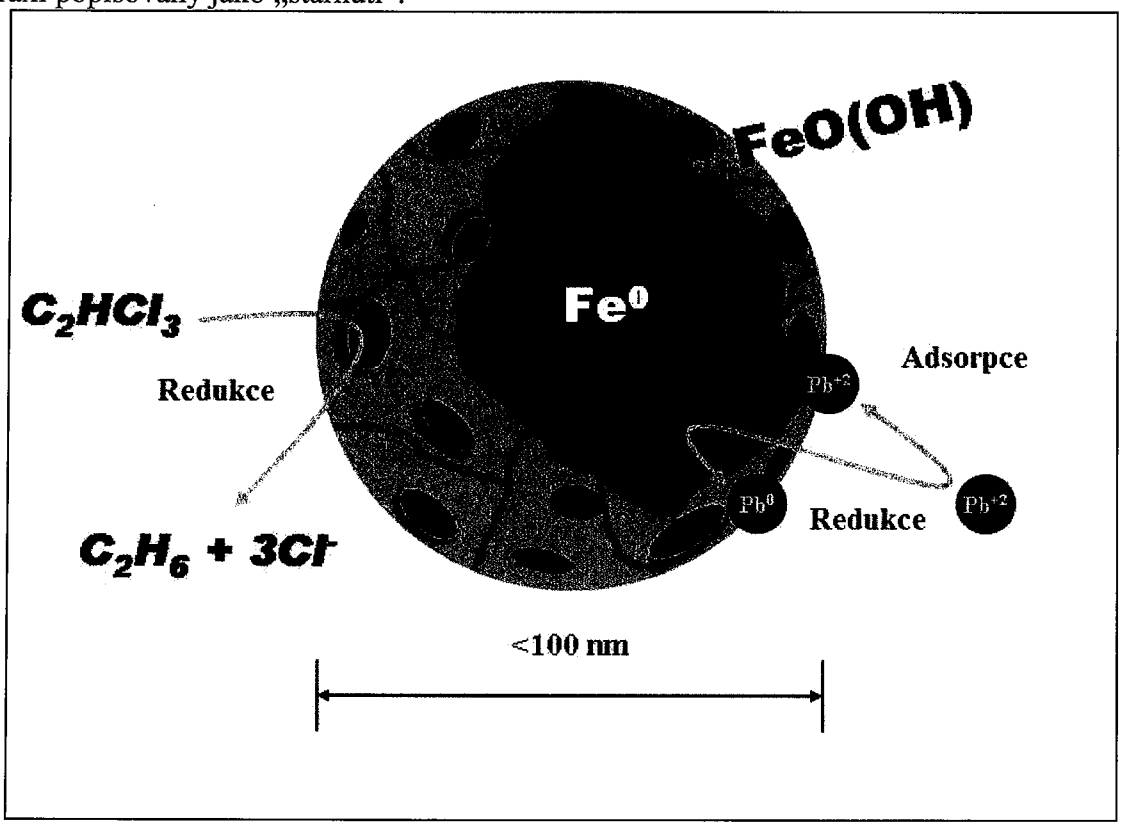
Vlastnosti a chování nulamocných nanočástic železa

Nanočástice Fe si lze představit jako sférické útvary, s typickou vrstevnatou strukturou jádro – obal, jejichž velikost bývá menší než 100 nm. Podle modelu „jádro – obal" (core – shell) je povrchová vrstva (obal) viz Obr. 2 složená z oxidů železa o různém oxidačním stupni většinou nerozpustná v prostředí o neutrálním pH a může tak chránit jádro před rychlou oxidací. Jádro se sestává primárně z elementárního nebo kovového železa, které představuje donor elektronů pro reakce s kontaminanty životního prostředí. Předpokládá se, že reaktivita nanočástic Fe je určena mírou oxidace Fe^0 jádra. Z hodnoty standardního redukčního potenciálu nanočástic železa $E^0(Fe^{2+}/Fe) = -0{,}44$ V vyplývá, že tyto mohou redukovat ostatní ušlechtilejší kovy jako např. Pb, Cd, Ni a Cr stejně jako mnoho derivátů organických sloučenin zejména chlorované uhlovodíky. Vyšší obsah Fe^0 je sice potřebný jako donor

elektronů pro redukci kontaminantů, ale současně ovšem zvyšuje rychlost agregace nanočástic Fe.

Pokud jde o podrobný popis fyzikálních vlastností nanočástic železa, existuje pouze omezený počet prací, které charakterizují jejich povrch. Podrobné poznatky o povrchových vlastnostech jsou nezbytné pro pochopení jak důležitých reakčních mechanismů a kinetiky, tak i pro popis nejen reakčních meziproduktů, ale i konečných produktů. Detekce povrchové struktury geometrických útvarů produkovaných nanočástic Fe se zjišťuje transmisní elektronovou mikroskopií. Vlastní kvalitativní analýzu obsahu Fe a dalších oxidovaných speciací v tuhé nanočástici poskytuje RTG difrakce paprsky X. Při tom je třeba si uvědomit, že vzhledem k tomu, že se nanočástice získávají různými postupy a mohou tudíž vykazovat rozdílné vlastnosti, není příliš praktické definovat jejich průměr nebo popisovat typickou nanočástici Fe. Ovšem z makroskopického hlediska pro vyjádření mobility nanočástic Fe v pórovitém prostředí nebo jejich stability v suspenzi je tento údaj velmi důležitý.

Fyzikálně-chemické vlastnosti nanočástic Fe jako např. jejich reaktivita, mobilita v prostředí, stabilita v suspenzi a povrchové vlastnosti jsou značně závislé na čase. Z fyzikálních vlastností nelze opominout účinky přitažlivých magnetických sil (jde o feromagnetický materiál), které také přispívají k jejich vzájemné agregaci. Kromě toho podléhají změnám jak ve vodném, tak i remediačním (sanovaném) prostředí. Tyto změny jsou v praxi popisovány jako „stárnutí".



Obr. 2: Typická struktura nanočástice kovového železa, tzv. struktura jádro – obal.

Definovat reálný povrch oxidu je vzhledem, k proměnlivosti jeho chemického složení a jeho amorfní struktury velice složité. Složení vrstvy oxidu totiž závisí na způsobu přípravy nanočástic a také na vlivu prostředí. Kupříkladu vrstva oxidu nanočástic α Fe získaných vakuovým rozprášením metodou top-down sestává hlavně buď γ-Fe_2O_3 nebo z částečně oxidovaného magnetitu (Fe_3O_4). Nanočástice o menší velikosti vzniklé nukleací kovových par obsahují na povrchu převážně oxid γ-Fe_2O_3. Je to způsobeno větším poměrem povrchu k jeho objemu a rychlou oxidací. Naproti tomu částice vzniklé redukcí goethitu a hematitu vodíkem

obsahují pouze obalovou vrstvu složenou z Fe_3O_4. Z literatury není známo, zda změny ve struktuře obalu a jeho složení mají jakýkoliv vliv na reaktivitu, agregaci a transport nanočástic Fe.

Z detailních výsledků fotoelektronové spektroskopie vyplývá, že obalová vrstva nanočástice je složena převážně z hydroxidů a hydroxid-oxidů železa vzniklých oxidací kovového Fe, které je silným redukčním činidlem a tudíž snadno podléhá oxidaci rozpuštěným O_2 a také vodou za vzniku iontů Fe^{2+} :

$$2\,Fe + O_2 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,Fe^{2+} + 4\,OH^- \qquad (4)$$

$$2\,Fe + 4\,H^+ + O_2 \rightarrow 2\,Fe^{2+} + 2\,H_2O \qquad (5)$$

$$Fe + 2H_2O \rightarrow Fe^{2+} + H_2 + 2\,OH^- \qquad (6)$$

Vzniklé kationty Fe^{2+} mohou dále podlehnout oxidaci na Fe^{3+}:

$$4\,Fe^{2+} + 4\,H^+ + O_2 \rightarrow 4\,Fe^{3+} + 2\,H_2O \qquad (7)$$

Tyto reakce jsou základem konceptu modelu nanočástic struktury core – shell podle Obr. 2. kationty Fe^{3+} podléhají dalším reakcím s hydroxidovými anionty nebo s vodou za vzniku hydroxidu nebo hydroxid-oxidu železitého:

$$Fe^{3+} + 3\,OH^- \rightarrow Fe(OH)_3 \qquad (8)$$

$$Fe^{3+} + 2\,H_2O \rightarrow FeO(OH) + 3\,H^+ \qquad (9)$$

Nanofer

Nanofer je skupinový název jednotlivých komerčních produktů nanočástic Fe vyráběných tuzemskou společností NANO IRON s.r.o. Vlastní nanočástice se skládají ze dvou koexistujících tuhých fází – jádro tvoří modifikace α-Fe a obal pokrývá především vrstvička magnetitu Fe_3O_4, která chrání jádro před další oxidací. Produkty jsou podle účelu aplikace dodávány buď ve formě vodné suspenze (což bývá nejobvyklejší), nebo v podobě prášku. Vodná suspenze nanočástic Fe se vyznačuje značnou reaktivitou, ovšem na úkor vyšší míry agregace a rychlejší sedimentace částic. Přestože je tato suspenze stabilizována vhodným anorganickým modifikátorem (bližší specifikace podléhá patentové ochraně), provedené testy prokázaly, že po dvou měsících, jsou prakticky všechny nanočástice Fe přeměněny na Fe_3O_4. Produkované nanočástice železa se vyznačují úzkou velikostní distribucí (20-100 nm) s mediánem 50 nm, průměrnou hodnotou specifického povrchu 20 – 25 m^2/g, mimořádně vysokou reaktivitou a vynikajícími migračními vlastnostmi. Relativní obsah Fe v pevné fázi bývá 70-90 %.

Použitelnost nanoželeza v sanačních technologiích

Redukční účinky nanočástic Fe:

Z nabídky možných kovových nanočástic jsou k dekontaminacím v životním prostředí nejvhodnější a nejpoužívanější nanočástice elementárního železa, které fungují jako silné redukční činidlo. Laboratorní studie demonstrují, že nanočástice Fe mohou redukovat široké spektrum organických látek, jak chlorované alifatické organické uhlovodíky, jejichž typickým zástupcem je trichlorethen TCE, tak i složitější aromatické struktury jako např. HCH (hexachlorcyklohexan), PCB (polychlorované bifenyly), azobarviva a další.

Níže uvedená rovnice (10) vystihuje transformaci nejobvyklejšího zástupce chlorovaných uhlovodíků PCE pomocí suspenze nanočástic Fe:

$$C_2Cl_4 + 5\,Fe + 6\,H^+ \rightarrow C_2H_6 + 5\,Fe^{2+} + 4\,Cl^- \qquad (10)$$

Kovové železo Fe v jádru nanočástice slouží jako donor elektronů, které okamžitě přijímá molekula TCE a redukuje se na základní uhlovodík ethan. Ten může snadno vystripovat z podzemní vody skrz póry zeminy do ovzduší, nebo podlehnout dalšímu mikrobiálnímu rozkladu v procesu přirozené atenuace. Z termodynamického hlediska bývá uvedená oxidačně redukční reakce energeticky velice příznivá.

Je na místě zdůraznit, že nanočástice Fe tvoří vodnou suspenzi a redukce polutantů tedy může probíhat jen na površích nanočástic viz Obr. 2. Celý reakční mechanismus přenosu elektronů se pravděpodobně sestává ze tří hlavních kroků, ovšem přímý důkaz zatím neexistuje:

- Přímý přenos elektronů z atomů Fe prostřednictvím různých defektů, jakými jsou póry, kde však povrchová vrstva oxidu působí jako fyzikální bariéra.
- Nepřímý přenos elektronů z Fe probíhající obalovou vrstvou oxidu přes jeho vodivostní a ostatní pásy.
- Přenos elektronů od kationtů Fe^{2+} viz rovnice (7) přítomných na povrchu krystalové mřížky.

Povrchová vrstva oxidů železa se může chovat jako polovodič typu *n*. Významu donorů elektronů pro redukci chlorovaných uhlovodíků je v mnoha výzkumech věnována velká pozornost. Vlastního dehalogenačního procesu se pochopitelně nejvíce zúčastňují atomy Fe na povrchu nanočástice, určitý podíl mohou nést také kationty Fe^{2+} a v některých případech může hrát roli také příspěvek vznikajícího H_2.

V současné době se kromě jednodruhových nanočástic Fe vyvíjejí také tzv. bimetalické nanočástice Fe, které mají na svém povrchu nanesenou tenkou nesouvislou vrstvičku velmi ušlechtilého kovu. Existuje mnoho kombinací bimetalických nanočástic (Fe/Pd, Fe/Pt, Fe/Ag, Fe/Ni). Jejich hlavní výhodou je zejména vyšší reakční rychlost až o několik řádů vůči chlorovaným uhlovodíkům, neboť vnesený kov vykazuje značné katalytické účinky a ještě se celá nanočástice chová jako galvanický článek, který urychluje oxidaci atomů Fe a tudíž redukci kontaminantů.

Přednosti a nedostatky suspenze nanoželeza v environmentálních aplikacích

In-situ zasakování nanočástic Fe představuje jednu z nejvíce inovativních technologií pro sanaci saturované zóny půdního (horninového) prostředí a podzemní vody kontaminované zejména fází nepolárních kapalných uhlovodíků (NAPL), toxickými kovovými ionty nebo mnoha dalšími nebezpečnými sloučeninami. Obvyklé konkurenční technologie pro odstraňování uvedených polutantů z půdy a vody bývají v některých případech málo účinné (např. venting) nebo vyžadují značná množství aplikovaných sanačních činidel (např. oxidace fáze uhlovodíků NAPL pomocí $KMnO_4$), či výraznější zásahy do lokality a charakteru krajiny (např. sanace ex-situ).

Hlavními výhodami je malý „nano“ rozměr suspenze Fe, její vysoká flexibilita v nasyceném půdním prostředí a velký specifický povrch (řádově desítky m^2/g), který umožňuje účinnější reakce s výše uvedenými kontaminanty. Železo je navíc přirozenou složkou životního prostředí, kde se vyskytuje ve formě nejrůznějších sloučenin (např. hematit, goethit, bornit, magnetovec, coquimbit atd.), a je také významným biogenním prvkem. Při jeho použití při in-situ sanacích tak nedochází ke vnášení cizorodé, nebo toxické látky do prostředí (na rozdíl například od aplikace $KMnO_4$ při in-situ chemické oxidaci).

Na základě nedávného výzkumu trhu prováděného firmou BCC Research objem celosvětového využití finančních prostředků sloužících k využití nanotechnologií pro sanační aplikace vyjádřený v dolarech činil v roce 2003 pouze 2,8 milionů, zatímco v roce 2004 vzrostl na 4,8 milionů a v roce 2005 představoval 11,2 milionů. Není proto divu, že vzrůstající zájem o zkvalitnění životního prostředí by mohl způsobit vzrůst produkce nanomateriálů v roce 2010 až na 2,4 miliardy dolarů. Je ovšem třeba zdůraznit, že dosud je hlavním limitujícím faktorem výrobní cena nanočástic Fe. Ekonomicky přijatelná bude tato technologie při nákladech 10 -25 dolarů za libru (0,454 kg) vyrobené suspenze nanočástic Fe,

zatímco dnes jsou průměrné výrobní náklady přibližně dvojnásobné. Pokles ceny bude souviset s rozšířením výrobní kapacity.

Zásadní nevýhodu aplikace suspenze nanočástic Fe in-situ přináší značně omezená mobilita částic Fe v saturovaném půdním prostředí. Ta je způsobena především vzájemnou agregací částic v průběhu „stárnutí" preparátu suspenze Fe, za vzniku větších geometrických útvarů, které mohou být snadno zachyceny přirozenými koloidními částicemi zemin. Tak dochází k jejich účinné filtraci a zakolmatování jednotlivých pórů v nasyceném půdním prostředí. Získaná data z řady provedených poloprovozních testů ukazují, že nanočástice Fe obvykle migrují do průměrné vzdálenosti pouhých několika desítek centimetrů od zasakovacího vrtu.

Vlastnosti porózního média a jejich vliv na transport částic

Tato kapitola podává výklad o fyzikálně chemických a mechanických vlastnostech horninového prostředí a o jeho vlivu a migraci nanočástic Fe a šíření kontaminantů (zejména DNAPL). Horninové (půdní) prostředí se zde uvažuje od povrchu terénu k hranici nepropustného izolátoru.

Charakteristika, vlastnosti a složení půdních horizontů

Struktura zemin, velikost částic: Zjednodušeně si lze zeminu představit jako pórovitý materiál, který je tvořen složitým systémem pevných částic, převážně minerálních zrn, prostoupených vzájemně propojenými póry. Můžeme rozlišit 3 hlavní zrnitostní anorganické frakce podle klesající velikosti částic: písek > silt > jíl. Geometrie pórů je velmi obtížně popsatelná. Velikost poloměrů zrn a jejich poměrné zastoupení ve zkoumaném celku určuje zrnitostní složení popsané zrnitostní čárou. Granulometrickou analýzou se stanoví procentuální zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí zemin, ze získaných výsledků lze určit hodnoty pórovitosti a hydraulické vodivosti zemin. Částice jílu a siltu svými rozměry patří mezi koloidy (jejich velikost bývá menší než 10 μm). Jílová frakce se vyznačuje malou velikostí částic, nízkou propustností a velkým specifickým povrchem umožňujícím iontovou výměnu a adsorpci látek.

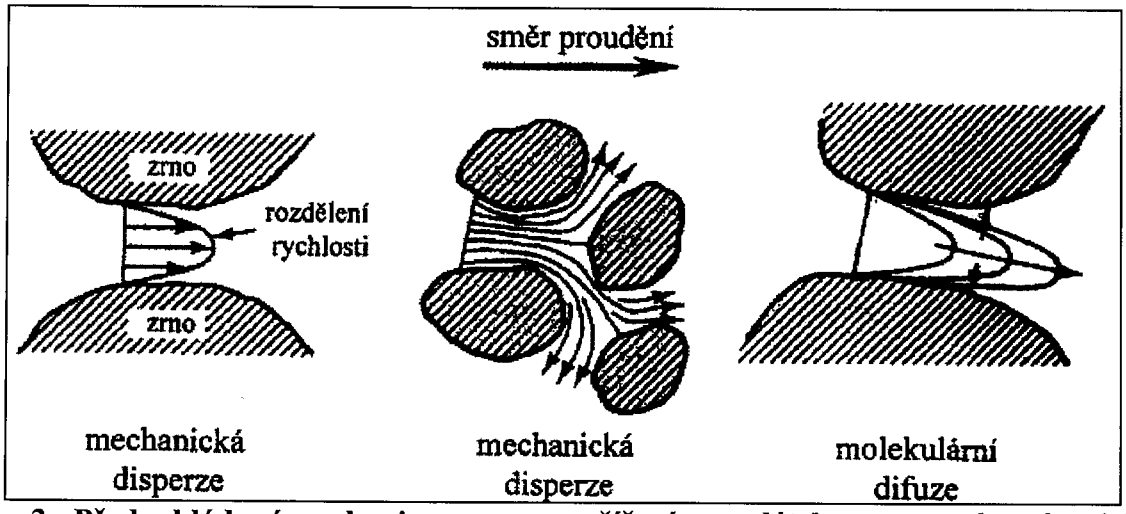
Mezi důležité veličiny charakterizující pevnou fázi patří pórovitost p [%] (udávající podíl pórů v celkovém objemu) a propustnost k [cm^2] , hustota a zrnitost.. Pórovitost se mění v závislosti na typu prostředí a horninovém profilu viz, vybrané hodnoty pórovitosti některých frakcí zemin jsou uvedeny v tab.1. Propustnost vyjadřuje schopnost hornin přijímat a propouštět vodu, její hodnota obvykle klesá s rostoucí hloubkou zeminy, ale změny bývají nesouvislé a nepravidelné. Propustnost je nezávislá na vlastnostech infiltrované tekutiny, ale dobře koreluje s velikostí měrného povrchu pevné fáze. Pórovitost a propustnost jsou prvotním ukazatelem zeminy pro posouzení možnosti zasakování suspenze nanočástic Fe in situ do vrtu.

Hustota je dalším parametrem vyjadřujícím mechanicko-fyzikální vlastnosti zeminy. V praxi se rozlišuje tzv. sypná hustota udávající hmotnost definovaného objemu volně ložených částic zeminy včetně vzduchových pórů a měrná hustota vyjadřující hmotnost pouze vlastních částic zeminy v dané objemové jednotce. Měrná hustota bude mít tedy vždy vyšší hodnotu než sypná. Běžné minerální zeminy mají měrnou hustotu v rozsahu 2,5 – 2,8 g/cm^3 a sypnou hustotu v intervalu 1,2 – 1,8 g/cm^3.

Tab. 5: Orientační hodnoty pórovitosti p některých materiálů zemin a jim odpovídající koeficient nasycené hydraulické vodivosti Ks.

Materiál	Pórovitost [%]	Ks [m/s]
štěrk hrubý	24 - 36	$(1\text{-}5).10^{-3}$
štěrkopísek	25 – 38	$(2\text{-}10).10^{-4}$

hrubozrnný písek	31 – 46	$(1\text{-}5).10^{-4}$
jemnozrnný písek	26 – 53	$(1\text{-}5).10^{-5}$
písek s příměsí jílu	34 - 61	$(1\text{-}2).10^{-6}$
Jíl	34 - 60	$< 10^{-8}$
vápenec, dolomit	0 – 20	NA
zvětralá žula	34 - 57	NA

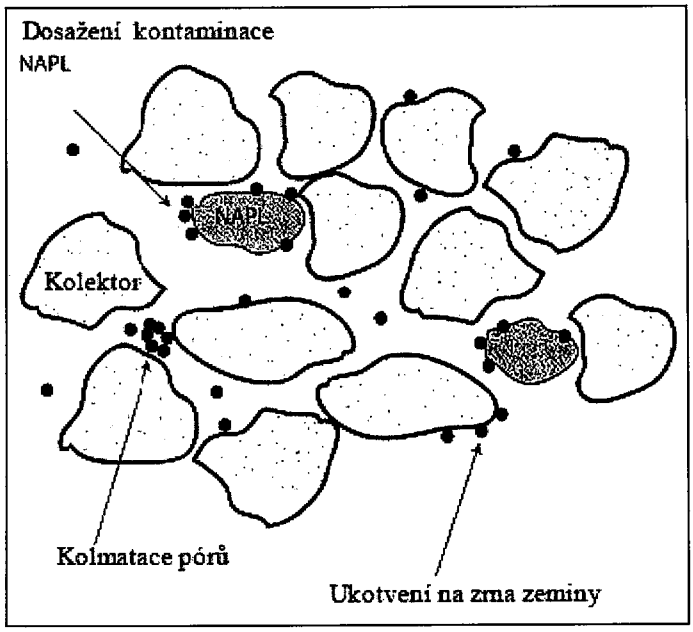


Obr. 3: Předpokládaný mechanismus procesu šíření rozp. látek v nasyceném pórovitém prostředí.

Migrace nanočástic železa v pórovitém prostředí

Jak již bylo zmíněno v kapitole 0, představují nanočástice Fe svými vlastnostmi (malé rozměry, velký specifický povrch a vysoká redukční schopnost) slibnou a flexibilní technologii pro sanace kontaminantů, které podléhají redukci pomocí Fe^0 v podzemních vodách horninového prostředí. Hlavním těžištěm aplikace nanočástic Fe v sanačních technologiích se předpokládá jejich in-situ vtláčení do vrtu a následný transport půdním prostředím do vlastního kontaminačního mraku

Mobilita nanočástic Fe představuje jeden ze stěžejních kroků vedoucích k úspěšné dekontaminaci dané lokality. Ta závisí jak na vlastnostech zasakované suspenze (velikost nanočástic Fe, pH a agregátní stabilita suspenze), tak na složení zeminy, její pórovitosti a propustnosti a také na vlastnostech podzemní vody (rychlosti proudění, celkové mineralizaci apod.). Při transportu nanočástic Fe nasyceným pórovitým prostředím obsahujícím nespojitou vrstvu DNAPL, dochází k různým jevům: částice mohou vzájemně agregovat, mohou se zachytit na půdních zrnech nebo na molekulách DNAPL viz Obr. 4, což vede k ucpávání pórů mezi částicemi zeminy a omezení mobility suspenze Fe. V praxi je ovšem žádoucí, aby se nanočástice Fe účinně zachytily na povrchu fáze DNAPL Částice zeminy se chovají jako účinné filtry, které významně omezují mobilitu injektované suspenze nanočástic Fe. Těchto filtračních vlastností se s úspěchem využívá při úpravě surové vody, kde vrstva písku o tloušťce 1 m efektivně odstraňuje přirozeně působící koloidy.



Obr. 4: Model transportu suspenze nanočástic Fe ukazující jejich filtraci, adhezi na zrna zeminy a přichycení na molekuly DNAPL.

Na filtraci koloidních roztoků zasakovaných do pórovitého prostředí se podílejí následující tři hlavní mechanismy:

- Brownův pohyb či molekulární difůze, které způsobují nepravidelný pohyb koloidních částic vyvolaný tepelnými efekty
- konvekční pohyb částic v proudu podzemní vody
- gravitační pohyb způsobující vertikální klesání částic

Brownův pohyb se uplatní především pro velmi malé částice < 100 nm a gravitační sedimentace naopak působí převážně na částice > 1000 nm. Mezi uvedenými velikostními hranicemi existuje oblast, kde se koloidní částice budou pohybovat převážně ve směru proudu podzemní vody a příspěvek Brownova pohybu a gravitační sedimentace bude možné zanedbat. Tento optimální interval ovšem nelze považovat za konstantní, protože závisí na typu a velikostní distribuci částic horninového prostředí, na vlastnostech suspendovaných částic, rychlosti proudění podzemní vody, teplotě apod.

Kolonové experimenty

Celá řada vědeckých týmů se zabývá studiem kolonových systémů. Experimentální uspořádání většinou dodržuje níže uvedené ověřené principy. Základní aparaturu představuje válcová vertikální kolona, jejíž dno je opatřeno vhodnou filtrační přepážkou, v případě skleněné kolony to bývá frita nebo skleněná tkanina s asi 1 cm silnou vrstvou skleněných kuliček o průměru cca 5 mm. Rozměry i materiál kolon se liší podle způsobu aplikace suspenze nanočástic Fe, nejčastější bývá gravitační zasakování popsané v pracích, které se provádí ve skleněných kolonách o průměru 1 – 5 cm. Výška kolony závisí zejména na požadovaném hydraulickém gradientu (výšce hladiny vody nad rozhranním tuhé fáze) a tloušťce vrstvy pórovitého materiálu. Landa a Sequensová prováděli všechny experimenty za konstantního piezometrického napětí tak, že byla udržována konstantní výška hladiny (40 cm) nad povrchem náplně vzorku v koloně a tím byl vytvořen co nejstabilnější hydraulický režim v systému. Po založení vrstvy vzorku v koloně je vhodné nechat nejprve kolonou cirkulovat vodu pro zajištění ustáleného režimu proudění (konstantního průtoku).

Průtok vody kolonou zpočátku klesá v důsledku nového přeuspořádání zrn částic zeminy. Průtoková rychlost vody závisí jak na druhu zeminy a zastoupení jejích jednotlivých zrnitostních frakcí jako jsou písek, jíl, silt a organická matrice, tak i na dalších hlavně mechanických vlastnostech jako jsou pórovitost, propustnost a také stáří náplně zeminy.

Příklady některých aplikací nanoželeza v sanačních technologiích

Do současné doby byla provedena řada převážně pilotních aplikací suspenze nanoželeza in-situ, při nichž bylo dosaženo rychlého odstranění kontaminantů, které tvořily převážně chlorované uhlovodíky, zejména TCE.

Ukázkovým příkladem může být sanace lokality v Research Triangle Park, North Carolina která byla kontaminována převážně těkavými chlorovanými uhlovodíky VOCs, jejichž celková koncentrace v podzemní vodě vyjádřená ekvivalentem TCE byla přibližně 14 000 µg/l. Po instalaci vrtů byl před vlastním provedením pilotního testu proveden podrobný monitoring, který přinesl reprezentativní data o geochemii podzemní vody a o obsahu a distribuci jednotlivých kontaminantů. Hydraulická vodivost daného prostředí měla hodnotu 10^{-3} cm/s ovšem klesala s hloubkou.

Během vlastního pilotního testu byla nepřetržitě po dva dny čerpadlem vtláčena suspenze nanočástic Fe do injektážního vrtu průměrnou rychlostí 2,27 l/min. Celkově bylo zasáknuto 6056 l suspenze o průměrné koncentraci 1,9 g/l, která byla připravena přímo na lokalitě v míchaném tanku, aby se zabránilo sedimentaci. Autor článku Zhang bohužel neuvádí původ použitého preparátu suspenze nanočástic Fe, jen přibližnou velikost nanočástic 10 – 100 nm. V průběhu testu byly kontinuálně měřeny následující parametry: ORP, obsah rozpuštěného O_2 (DO), pH, konduktivita a teplota. Rovněž byla elektronicky snímána průtoková rychlost zasakované suspenze a pohyb hladiny podzemní vody ve vrtu. Za několik dní po aplikaci nanočástic Fe byl zaznamenán až 90%ní úbytek koncentrace TCE v podzemní vodě v injektážním a v monitorovacích vrtech. Výsledky také ukazují významný vliv suspenze nanoželeza v okruhu až 6 – 10 m od injektážního vrtu. Během 6 týdnů byly koncentrace PCE, TCE a DCE sníženy na hodnoty blízké standardu kvality podzemní vody (nebo nižší).

B) OBECNÉ PRINCIPY APLIKACE KYSELINY MLÉČNÉ PRO REMEDIACI PODLOŽÍ

Aplikace kyseliny mléčné, nebo laktátu in situ, je sanační metoda využívající principu takzvané biologické reduktivní dehalogenace, kdy jsou podpořeny mikrobiologické procesy v podloží, které ve svém závěru vedou k odstranění, nebo snížení, přítomné kontaminace.

Biologická reduktivní dehalogenace

Biologická reduktivní dechlorace (BRD) je sanační metoda založená na anaerobní biodegradaci chlorovaných organických látek. Používá se pro sanaci chlorovaných alifatických uhlovodíků – chlorethanů, chlormethanů a zejména chlorovaných ethylenů. Chlorované uhlovodíky jsou vysoce oxidované látky, které je řada anaerobních mikroorganismů schopna využívat jako akceptor elektronu při metabolických procesech a postupně je transformovat až na netoxické látky.

Základním principem BRD je aplikací organického substrátu do kontaminované zvodně vytvořit reaktivní zónu (bioreaktor in-situ), kdy organický substrát slouží jako zdroj uhlíku pro přítomnou mikroflóru. Rozkladem aplikovaného substrátu dojde k vyčerpání kyslíku z prostředí a tím k vytvoření optimálních anaerobních podmínek pro průběh reduktivní anaerobní mikrobiální dechlorace. Pro aplikaci substrátu se využívá buď tlaková či gravitační infiltrace do sítě vystrojených vrtů nebo konstrukce biobariér.

Látky používané pro podporu dehalogenace jsou buď vedlejší produkty potravinářského průmyslu, a nebo „čistě“ chemické látky, výrobky chemického průmyslu. Do první kategorie

patří rychle biologicky rozložitelné látky, jako je syrovátka, melasa, silážní šťáva a kvasničný extrakt Tab. 6 a nebo látky s pomalejším rozkladem, jako je sušená syrovátka, chitin a organické mulče. Druhá kategorie zahrnuje například laktát, propionát, vodík, ethanol, methanol a emulgované jedlé oleje. Substráty se tedy dělí dle několika kritérií. Prvním je způsob výroby či získání substrátu. Dalším kritériem je typ substrátu, tj. zda se jedná o snadno rozpustné látky, které jsou v kolektoru rychle odbourávány či o pomalu rozpustné, dlouhodobě působící substráty. Typ zvoleného substrátu určuje techniku aplikace, při výběru substrátu je také vhodné zohlednit, do jaké míry je daný substrát ověřen. Doba transformace chlorovaných uhlovodíků závisí na propustnosti kolektoru, rychlosti rozvoje dechlorující mikroflóry a intenzitě kontaminace (zejména na objemu ClU, které jsou vázány na zeminu, popř. přítomny v kolektoru ve formě DNAPL). Doba, za kterou proběhne kompletní dechlorace se pohybuje od 16 do 48 měsíců. Hlavními kritérii při projektování sanace jsou hydrogeologické, geochemické a biologické podmínky na lokalitě. To znamená jaká je rychlost proudění podzemní vody, mocnost kolektoru, vzdálenost k recipientu, oxické podmínky, vstupní zátěž organickými látkami, mikrobiální oživení a probíhající procesy. Dále je důležité zvážit způsob aplikace substrátu, jaká je dostupnost a obslužnost lokality a ekonomické možnosti investora.

Tab. 6. Přehled rychle rozpustných substrátů a způsobů jejich aplikace

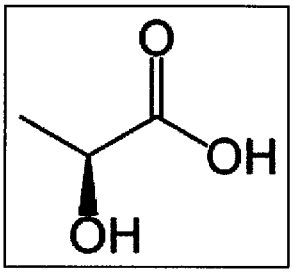
Substrát	Frekvence aplikací	Počet sanovaných lokalit	Doba setrvání ve zvodni	Způsob aplikace - injektáž do sítě vrtů
Laktáty, butyrát	Kontinuální 1x za 2 měsíce	laktát >20 butyrát <10	7-60 dnů	3-30 % vodný roztok
Ethanol, methanol	Kontinuální 1x za týden	<10	1-7 dnů	3-30 % vodný roztok
Melasa	Denní až kvartální	>100	7-90 dnů	1-10% vodný roztok
Syrovátka	Měsíční až roční	<10 (experimentální)	1-12 měsíců	Přímo / 5-50% vodný roztok
Vodík	Kontinuální	<5 (experimentální)	1-7 dnů	Air sparging – přímo / směs s dusíkem

Výhody a nevýhody metody

Biologická reduktivní dechlorace může být za určitých podmínek ekonomicky výhodnější a technologicky méně náročná než jiné sanační metody (např. sanační čerpání). V současnosti se jedná o již prověřenou sanační technologii, aplikovanou ve světě na více než 500 lokalitách, která má při dodržení technologických postupů dobrou sanační účinnost. Nevýhodou této sanační technologie je, že je relativně náročnější na dobu sanace, minimální doba je dva roky. Také z hlediska monitoringu se jedná o náročnější technologii, protože je třeba sledovat širší řadu parametrů. Při výběru heterotrofního substrátu pro úpravu redoxních podmínek v podzemní vodě je třeba pečlivě zvažovat jejich vlastnosti a nejenom cenu, aby jejich aplikace nepřinesla více problémů, než jich dokáže vyřešit. Například syrovátka může mít vysoký obsah fosfátů, vápníku, síranů a dalších organických solí, což může způsobit dodatečné zatížení podzemní vody. Látky používané ke stimulaci BRD jsou z pohledu vodního zákona tzv. závadné a pro jejich aplikaci do kolektoru je nutno získat výjimku příslušného vodohospodářského úřadu.

Kyselina mléčná

Kyselina mléčná je kysele chutnající, lehce rozpustná, bezbarvé krystaly tvořící látka s chemickým vzorcem CH_3–CHOH–COOH. Tato kyselina vzniká mléčným kvašením cukrů, např. v mléce, sýrech, kyselém zelí. Používá se proto v pekařství, pivovarnictví (E270), koželužství, k přípravě limonád a při barvení a zušlechťování textilií. Většinou je opticky neaktivní. Používá se také kvůli svým antiseptickým vlastnostem v mastech, ústních vodách a jako prostředek k ošetřování vlasů. Její L-enantiomer je koncovým produktem mléčného kvašení cukrů, a proto je přítomen v kyselém mléku a zelí. Sůl kyseliny mléčné (a i její anion a estery) se nazývá laktát CH_3-CHOH-COO-. Polymer kyseliny mléčné (PLGA) má využití jako médium pro růst kmenových buněk.



Zahraniční zkušenosti

Biologickou reduktivní dechloraci lze aplikovat i na jiné druhy kontaminantů než na chlorované uhlovodíky. Například v rámci bioremediačního projektu v Emerville v Kalifornii byla využita syrovátka k čištění podzemní vody znečištěné šestimocným chromem. Cílem bylo snížit koncentrace Cr(VI) na limity pro pitnou vodu. Tento přístup měl podpořit mikroorganismy k přeměně Cr(VI) na Cr(II). Zatímco Cr(VI) je rozpustný ve vodě a mobilní, Cr(III) je špatně rozpustný a za normálního pH se vysráží. Syrovátka sloužila jako levný zdroj živin (obzvláště uhlíku) pro mikroorganismy. Uhlík podpořil větší populace organismů, což vedlo k rychlejší a větší redukci Cr(VI). Na lokalitě byla provedena instalace injektážního vrtu a aplikace syrovátky. Během pilotního testu se ukázalo, že koncentrace Cr(VI) poklesly (v monitorovacích vrtech) o 99% za 2 měsíce.

Zkušenosti z ČR

Provozní testování metody podporované reduktivní dehalogenace bylo v ČR poprvé zahájeno okolo roku 2000. Technologie byla použita například na těchto lokalitách: Monroe Hodkovice, ABB Jablonec, Technolen Lomnice, Autodíly Jablonec a Polygraph Blatná. Na dvou z uvedených lokalit byla již sanace a postsanační monitoring úspěšně ukončeny.

Praktické výsledky provedených laboratorních prací na zeminách odebraných na lokalitě AERO Vodochody a.s.

a) Metoda ISCO, aplikace manganistanu draselného.

Analýza dodané matrice ZW1 prokázala **neměřitelný obsah přirozeného organického uhlíku (pod 0,2%)**, což je **pozitivní zjištění z hlediska necílové spotřeby oxidantu**, která je většinou způsobována právě přítomným organickým uhlíkem. Zjištěný podlimitní obsah přirozeného organického uhlíku tedy předznamenává možnost účinné a efektivní aplikace manganistanu draselného.

Vsádkové testování manganistanu draselného prokázalo nízkou necílovou spotřebu oxidantu (pod 5 g/l) a **studovaná matrice ZW1 je tedy VELMI VHODNÁ pro aplikaci In situ chemické oxidace manganistanem draselným.** Pro **aplikaci** lze doporučit koncentrace **20 g/l až 25 g/l.**

b) Vhodnost aplikace suspenze nulamocného nanoželeza

Kolonové testy aplikovatelnosti suspenze **Nanofer 25S** prokázaly, že **testovaný materiál ZW1 je VHODNÝ** pro **aplikaci** této aktivní suspenze Nanofer 25S o koncentracích **0,5 g/l až 1 g/l.**

Získané výsledky naznačily i možné komplikace při zásaku a to především **riziko zvýšené tlakové ztráty** u vrtu reprezentovaného matricí ZW1.

c) Metoda BRD, aplikace kyseliny mléčné

Kolonové testy aplikovatelnosti roztoku **kyseliny mléčné** prokázaly, že **materiál ZW1** z hlediska testovaných hydrogeologických parametrů **VHODNÝ** především díky dobré možnosti jeho obohacení organickým uhlíkem o více než 6 g/kg. Pro aplikaci tohoto remediačního činidla lze **doporučit koncentrace 5 g/l až 15 g/l** s následnou biologickou reduktivní dehalogenací.

Tab. 7. Shrnutí vhodnosti testovaných vzorků pro aplikaci vybraných remediačních činidel

IN SITU sanační metoda	ISCO, manganistan draselný	Nanofer 25 S	BRD, kyselina mléčná
doporučená koncentrace pro aplikaci na lokalitě AERO Vodochody a.s.	20 g/l až 25 g/l	0,5 g/l až 1,0 g/l	5 g/l až 15 g/l
vhodnost aplikace sanační metody	velmi vhodný	vhodný, tlaková ztráta	vhodný

Na základě shromážděných výsledků shrnutých ve výše uvedené tabulce se testovaný materiál ZW1 jeví jako **velmi vhodný pro aplikaci manganistanu draselného** jako primárního remediačního činidla. Aplikace **reduktivní technologie na bázi nanoželeza** (Nanofer 25S) se na základě provedených testů jeví jako **proveditelná**, až na jisté problémy se snížením propustnosti. Na lokalitě bude tedy **nezbytné použít** pro tuto suspenzi **tlakové zasakování** a instalovat vrty k tomu uzpůsobené – **tlakové zhlaví a výstroj odolávající tlaku alespoň 10 bar.** Pro zásak bude nezbytné **použít čerpadlo odolávající účinkům zasakované suspenze** Nanofer 25S. **Aplikace roztoku kyseliny mléčné** by také měla na studovaném materiálu proběhnout **bez větších problémů.** Shrneme-li získané poznatky o testovaném vzorku, jeví se z aplikačního hlediska pro zájmovou lokalitu vhodná aplikace manganistanu draselného v ohniscích kontaminantu. Dále je proveditelná aplikace nanoželeza i kyseliny mléčné, případně i kombinovaná metoda postupné aplikace kyseliny mléčné a Nanofer 25S tak, aby byl využit synergický efekt obou činidel a zároveň bylo možné snížit spotřebu finančně nákladného Nanofer 25S.

Výsledky prezentované v rámci této studie se vztahují pouze k dodanému vzorku zeminy ZW1 pocházejícímu z lokality AERO Vodochody a.s. a dodaným vzorkům remediačních činidel. Je obvyklé, že zemina na zájmové lokalitě nemusí mít stejné parametry v celém objemu sanované oblasti, proto komplexní interpretace získaných výsledků směrem k provozní aplikaci není součástí této studie a je nezbytné, aby takovýto upscaling získaných výsledků pro zájmovou lokalitu prováděl zkušený hydrogeolog znalý vlastností podloží na zájmové lokalitě.

Po zhodnocení celkové situace na lokalitě je možno doporučit koncepci použití sanační metody IN SITU v ohniscích aplikace suspenze nulamockého nanoželeza a metody BRD aplikací kyseliny mléčné. Aplikace metody ISCO přes její dobré laboratorní výsledky

nepokládáme za vhodné vzhledem k možné mobilizaci těžkých kovů ze starých zátěží v areálu AERO Vodochody a.s. a možnému transportu prouděním podzemní vody do jímacího území Postřižín a do vodních zdrojů zásobujících areál AERO Vodochody a.s.

4.1.3. Režimní měření úrovně hladiny podzemní vody na lokalitě

Dne 26.11.2013 bylo před zahájením pilotního pokusu sanačních technologií IN SITU v rámci vstupního monitoringu realizováno plošné režimní měření úrovně hladiny podzemní vody v 16 starších hydrogeologických vrtech v západní části závodu AERO Vodochody a.s. Jednalo o objekty HV- 6, VH-10, HV-11,HV-12, HV-13, HV-17, HV-18, HV-19, HV-20, HV-21, HV-23, VH-24, HV-25, HV-26, VH-27 a HV-28.

Ve všech výše uvedených vrtech byla měřena úroveň hladiny podzemní vody elektrickým hladinoměrem typ G 20, výrobce NPK Europe Mfg s.r.o. Uhřínov a mocnost volné fáze ropných látek na hladině podzemní vody ve vrtech produktoměrem typ EKOSYSTEM.

Účelem tohoto režimního měření na lokalitě bylo zjištění směru proudění podzemní vody v době konání pilotního pokusu sanačních technologií IN SITU včetně zjištění lokálních odchylek od generálního směru proudění podzemní vody v zájmovém území.

Výsledky režimního měření jsme shrnuli v následující tabulce.

Tab. 8. AERO Vodochody a.s. – režimní měření dne 26.11.2012

objekt	nadmořská výška odměrného bodu (B.p.v.)	úroveň hladiny od odměrného bodu	úroveň hladiny podzemní vody (m.n.m. B.p.v.)	poznámka
HV 6	279,57	8,65	270.92	
HV 10	277,59	8,55	269,04	
HV 11	275,40	5,19	270,21	NAPL 2 mm
HV 12	276,34	5,90	270,44	
HV 13	278,35	9,37	268,98	
HV 17	278,25	9.21	269,04	
HV 18	278,08	9,27	268,81	
HV 19	279,38	8,50	270,88	
HV 20	279,57	8,74	270,83	
HV 21	279,66	8,53	271,13	
HV 23	279,75	8,66	271,09	
HV 24	279,37	8,28	271,09	
HV 25	279,12	8,33	270,79	
HV 26	279,50	8,76	270,74	
HV 27	279,19	8,09	271,10	
HV 28	279,58	8.32	271,26	

Na základě zjištěných dat byly do mapy zakresleny hydroizohypsy společně se směrem proudění podzemní vody na lokalitě. Z provedených prací je patrné, že podzemní voda na lokalitě proudí ve směru JV – SZ směrem od západní části závodu AERO Vodochody a.s. k prameništi Postřižínského potoka. Místní odchylky byly zjištěny ve vrtech HV-10, HV-11, HV-12 a VH-17. V této oblasti je úroveň hladiny podzemní vody vzduta až o cca 1, 44 m nad standartní úroveň hladiny podzemní vody v zájmovém území. Tato anomálie je evidentně

způsobena podzemními zásobníky na letecké PHM. Toto jen potvrzuje nález 2 mm mocné vrstvy ropných látek na hladině podzemní vody ve vrtu HV-10. Pro pořádek uvádíme, že toto byl jediný nález NAPL z celého režimního měření. Místní odchylky byly dále zjištěny ve vrtech ZW 1 a MW 1, kde se projevuje vliv blízké rozvodnice, která je umístěna jižně od místa pilotního testu.

Jak již bylo konstatováno v předchozích kapitolách, zdibská kvarterní terasa, na které leží areál AERA Vodochody, je dotována dešťovými srážkami v rozvodnicovém režimu. Podzemní voda je potom drénována Postřižinským potokem, který odtéká po tektonicky predisponované linii ve směru SV - JZ ze zájmového území.

4.2. Realizační práce na lokalitě - pilotní test redukce kontaminantů pomocí nanočástic železa

4.2.1. Metodika pilotního testu redukce kontaminantů pomocí nanočásti železa

Přestože je metoda redukce kontaminantů s využitím nanoželeza ve světě poměrně intenzivně studována a na řadě kontaminovaných lokalit již byla zkušebním i komerčním způsobem použita, je velmi obtížné generalizovat na základě publikovaných údajů, jaké množství je potřeba aplikovat. Zkušenosti z již provedených aplikací nanočástic železa nejsou tedy automaticky a v plné míře přenosné na další lokality. Z těchto důvodů je zapotřebí provést laboratorní zkoušky a zejména pilotní test, který ověří účinnost metody v daných geologických a hydrogeologických podmínkách. Na základě výsledku pilotního testu je potom upřesněn a doplněn projekt sanace.

Pilotní test redukce kontaminantů pomoci nanočástic železa byl realizován v areálu společnosti AERO Vodochody a.s. v tzv. **druhém ohnisku kontaminace podle AAR situovaném mezi výrobní budovou a halou kabin.** Jedná se o prostor vrtů HV-28, HV-23, HV-21 a HV-27. Zde se hodnoty sumy ClU pohybovaly v rozmezí 976 až 6 584 µg/l. Pilotní test zde proběhl v délce 5 měsíců.

Jeho hlavním cílem bylo co nejlépe popsat a interpretovat chování nanočástic železa při jejich aplikaci na zájmové lokalitě kolektoru tvořeného fluviálními štěrkopísky zdibské terasy.

V rámci pilotního testu se zejména ověřovalo:

- účinnost v daném prostředí a výběr nejvhodnějšího nanomateriálu,
- spotřeba nanočásti železa,
- kinetika úbytku kontaminace,
- ovlivnění vlastností horninového prostředí,
- rychlost vtláčení,
- dosah vlivu suspenze nanoželeza do aplikačního vrtu.

Před vlastní aplikací NanoFe do horninového prostředí byly provedeny laboratorní zkoušky zasakování suspenze NanoFe, tj. série kolonových laboratorních experimentů, viz předchozí kapitoly. Cílem těchto kolonových experimentů bylo zjištění změn propustnosti dodaných vzorků zeminy při kontaktu se suspenzí nanoFe, dále množství železa procházející vrstvou zeminy a v neposlední řadě zhodnocení možnosti obohacení zeminy o zasakované železo - tj. určení množství železa, které se zachytí v zemině po protečení definovaného množství suspenze NanoFe. Kolonové laboratorní experimenty upřesnilo koncentraci NanoFe v suspenzi pro realizaci vlastního pilotního testu.

Pro účely ověření sanační technologie se tlakově-gravitačním způsobem injektovalo celkem 75 kg nanočástic železa o velikosti částic do 100 nm do aplikačního vrtu ZW-1. Tento vrt byl vyhlouben do 11,5 m pod terén a vystrojen zárubnicí PEHD průměr 160 mm.

Pro realizaci pilotního testu byl vytvořen zkušební polygon ve složení:
a) HV-22
– referenční bod poskytující informace ohledně kvality podzemní vody vstupující do zkušebního pole.

b) ZW-1
- aplikační vrt pro dávkování příslušné látky v rámci metody IN SITU.

c) MW-1, MW-2 HV-23
- monitorovací vrty poskytující informace o změnách kvality podzemní vody na lokalitě po aplikaci příslušné látky v rámci metody IN SITU.

Před zahájením, v průběhu a po ukončení injektáže byl prováděn monitoring fyzikálně-chemických parametrů. Kontinuálně vzorkař měřil tyto parametry: ORP, obsah rozpuštěného O_2, pH, vodivost a teplotu. Rovněž byla měřena rychlost zasakované suspenze a rozkyv hladiny podzemní vody. V průběhu testu vzorkař odebíral vzorky podzemní vody, které byly analyzovány na koncentraci chlorovaných uhlovodíků a to v celé rozpadové řadě (PCE, TCE, 1,2-cis-DCE, 1,2-trans-DCE, 1,1-DCE, VC, ethen, ethan), Dále byl monitorován DOC, Fe_{celk} a Cl^- a parametry úplného chemického rozboru. Odběry vzorků podzemní vody byly provedeny v dynamickém režimu.

Tab. 9. Rozsah monitoringu při pilotním testu

Parametr	Monitorovací objekt	Počet monitorovaných objektů	Frekvence	Celkový počet
Sledování ClU v podzemní vodě	Aplikační a vybrané monitorovací vrty	5	Před + 1x za 14 dní	25
Sledování (DOC, Fe, Cl^-) v podzemní vodě	Aplikační a vybrané monitorovací vrty	5	Před + 1x za 14 dní	25
Měření ORP, O_2, pH, vodivost, teplota	Aplikační a monitorovací vrty	5	Před + týdně	45
Sledování parametrů hydrochemických poměrů (UCHR)	Vybrané monitorovací vrty v ohnisku a okolí	5	Před + měsíčně	15
Měř. hladiny podzemní vody	Aplikační a monitorovací vrty	5	průběžně	-
Sledování dávkovaného množství nanočástic železa	Míchaci tank	1	průběžně	-
Sledování rychlosti zasakování suspenze	Aplikační vrty	1	průběžně	-

4.2.2. Aplikace suspenze nulamocného nanoželeza do horninového prostředí na lokalitě AERO Vodochody a.s.

V rámci pilotního testu na lokalitě bylo 5.12., 6.12., 7.12. a 10.12.2012 do horninového prostředí vtlačeno celkem 75 kg suspenze NANOFER 25 S, výrobce NANO IRON s.r.o.

Suspenze byla od výrobce dopravena v 20- litrových barelech. Na lokalitě AERO Vodochody a.s. byla v mobilním míchacím centru tato suspenze rozředěna na 7 m^3 o koncentraci 1 g/l a na 4 m^3 koncentraci 2 g/l.

Kinetika zatláčení nulamocného nanoželeza je uvedena v následující tabulce:

Tab. 10. Kinetika zatláčení nulamocného nanoželeza na lokalitě AERO Vodochody do horninového prostředí.

Pořadí aplikačního cyklu	Den Aplikace	Množství aplikované suspenze nulamocného nanoželeza	Koncentrace aplikovaného roztoku nanoželeza	Celkový čas aplikace (minuty)	poznámka
1	5.12.2013	1 000 l	1 g/l	15	tlaková aplikace
2	5.12.2012	1 000 l	1 g/l	15	tlaková aplikace
3	5.12.2012	1 000 l	1 g/l	20	tlaková aplikace
4	5.12.2012	1 000 l	1 g/l	20	tlaková aplikace
5	6.12.2012	1 000 l	1 g/l	35	tlak.-gravitač. aplikace
6	6.12.2012	1 000 l	1 g/l	52	tlak.-gravitač. aplikace
7	6.12.2012	1000 l	1 g/l	65	tlak.-gravitač. aplikace
8	7.12.2012	1 000 l	2 g/l	150	tlak.-gravitač. aplikace
9	7.12.2012	1 000 l	2 g/l	180	tlak.-gravitač. aplikace
10	10.12.2012	1 000 l	2 g/l	155	tlak.-gravitač. aplikace aplikace stopovače
11	10.12.2012	1 000 l	2 g/l	235	- tlak.-gravitač. aplikace - aplikace stopovače

V aplikačním cyklu č. 1 až č. 4 byla suspenze naloželeza zatláčena tlakově pod pracovním tlakem 2,6 bar. Aplikační cyklus č. 5 až č. 11 byl řešen tlakově-gravitačně. Jak je patrné z předchozí tabulky, na počátku zatláčení suspenze do horninového prostředí celý cyklus aplikace 1000 l preparátu nanoželeza trval 15 minut (tlaková aplikace 2,6 bar). Po postupném nasycení horninového prostředí aplikačním vrtem ZW 1 doba aplikace jednotlivých cyklů vzrůstala postupně až na 235 minut (aplikační cyklus č. 11).

Vzhledem k tomu, že na lokalitě není vyvinut nad průlinově propustnými písčitými štěrky zdibské terasy a stropní izolátor, čas jednotlivých aplikačních cyklů vzrostl až na 235 minut u posledního, 11. cyklu. I přes tuto nepříznivou skutečnost je horninové prostředí pro aplikaci suspenze velmi vhodné. O této skutečnosti svědčí i to, že při posledním 11 aplikačním cyklu při tlakově–gravitačním režimu byl pokles úrovně hladiny podzemní vody o 10 cm za 25 sekund.

Vzhledem k zjištěným skutečnostem doporučujeme aplikaci v tlakově - gravitačním režimu v tomto složení:

a) úvodní tlaková aplikace suspenze, min. tlak 2,6 bar.
b) gravitační aplikace
c) tlaková aplikace suspenze, střední, min. tlak 2,6 bar.
d) gravitační aplikace
e) tlaková aplikace, závěrečná, min. tlak 2,6 bar.

Při uvedených pracích doporučujeme sledovat úroveň hladiny podzemní vody v nejbližším okolí aplikačních vrtů tak, aby bylo možno efektivně řídit celý proces.

4.2.3. Vzorkovací práce

Veškeré vzorkovací práce provedené na lokalitě vychází z interních příruček zhotovitele odrážejících požadavky právních a jiných předpisů, zejména Metodického pokynu MŽP – Vzorkovací práce v sanační geologii – MŽP, prosinec 2006, Věstník MŽP č. 2/2007.

V rámci pilotního testu byly odebrány vzorky zemin a podzemní vody, viz dále v textu.

4.2.3.1. Zeminy

Vzorky zemin byly odebrány v průběhu vrtných prací ihned po vytěžení vrtného jádra. Při odběru vzorků zemin z vrtného nářadí (jádrovky) byl brán zřetel na to, aby nebyla odebrána zemina z vnitřní a vnější části vrtného nářadí z důvodu možné vzájemné kontaminace vzorků. Vzorky pevného materiálu (zemin) byly odebrány ze středové části vyneseného jádra za použití lopatky do skleněných vzorkovnic se šroubovatelným uzávěrem o objemu 250 ml opatřených identifikačním štítkem s označením lokality, odběrového místa, hloubky odběru, data odběru a požadované analýzy. Odběrová zařízení byla po každém odběru z jednotlivých odběrových míst mechanicky vyčištěna.

Vzorky zemin byly odebrány z aplikačního vrtu ZW 1 v průběhu vrtných prací na laboratorní analýzy na 1,2 – DCE, TCE, PCE, VC, C_{10} – C_{40}. Vzorky byly odebrány z metráže 0,8 – 2,3 m, 2,5 m a 8,5 m z tohoto vrtu. Vrtné jádro v hloubkovém intervalu 8,0 – 9,0 m vykazovalo senzorický zápach po chlorovaných uhlovodících. Laboratorní analýzy zemin z aplikačního vrtu ZW 1 jsou uvedeny v tabulce č 11.

Tab. 11. Aplikační vrt ZW 1, laboratorní analýzy zemin

chemický ukazatel	ZW1 0,8 – 2,3 m p.t. zemina (mg/kg)	ZW1 2,5 m p.t. zemina (mg/kg)	ZW1 8,5 m p.t. zemina (mg/kg)	vyhl. 294/2005 Sb., příloha č. 10 (mg/kg)	indikátory znečištění -metodic. pokyn MŽP ČR 2011 průmyslově využívané území (mg/kg)
$C_{10} - C_{40}$	‹100	‹100	‹100	300	
vinylchlorid	‹0,05	‹0,05	‹0,05		1,7
trans 1,2 – dichloreten	‹0,05	‹0,05	‹0,05		690
cis 1,2 - dichloreten	‹0,05	‹0,05	‹0,05		2 000
tetrachloreten	‹0,05	‹0,05	0,41		2,6
trichloreten	‹0,05	‹0,05	‹0,05		14

Chemické ukazatele odebrané zeminy byly porovnány s vyhláškou č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu v platném znění a s metodickým pokynem MŽP ČR z roku 2011 – indikátory znečištění. Toto srovnání ukázalo, že u všech sledovaných chemických ukazatelů v zeminách nebyly překročeny limitní hodnoty podle vyhlášky 294/2005 Sb. a ani indikátory znečištění podle metodického pokynu MŽP ČR z roku 2011 – indikátory znečištění.

4.2.3.2. Vzorkování podzemní vody na lokalitě a doporučení

V rámci pilotního testu na lokalitě AERO Vodochody a.s. bylo realizováno vzorkování podzemních vod. Účelem tohoto vzorkování bylo ověření kvality podzemní vody na lokalitě před aplikací suspenze nanoželeza do podzemní vody na lokalitě a dále potom vliv této suspenze na kontaminanty v místě aplikace včetně postupu odbourání kontaminantů v tomto místě.

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, pro pilotní test redukce kontaminantů pomoci nanočástic železa bylo vybráno tzv. **druhé ohnisko kontaminace podle AAR situované mezi výrobní budovou a halou kabin.** Jedná se o prostor vrtů HV-28, HV-23, HV-21 a HV-27. Zde se hodnoty sumy ClU pohybovaly v rozmezí 976 až 6 584 µg/l.

Vzorkovány byly vrty HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2 a HV-23. Jednalo se o „zkušební polygon“ s touto funkcí:

a) HV-22
– referenční bod poskytující informace ohledně kvality podzemní vody vstupující do zkušebního pole.

b) ZW-1
- aplikační vrt pro dávkování příslušné látky v rámci metody IN SITU.

c) MW-1, MW-2, HV-23

- monitorovací vrty poskytující informace o změnách kvality podzemní vody na lokalitě po aplikaci příslušné látky v rámci metody IN SITU.

Vzorkař odebíral podzemní vodu z výše uvedených objektů v dynamickém stavu. Před vlastním odběrem vzorků změřil ve všech objektech možnou přítomnost produktu ropných látek na hladině pomocí měřiče fáze (výrobce GEOSPOL Uhřínov s.r.o.) a úroveň hladiny podzemní vody.

Dynamické vzorkování podzemní vody proběhlo v následujících krocích:
- zaměření hladiny podzemní vody a hloubky vrtu, výpočet objemu vody ve vrtu;
- spuštění čerpadla do vrtu, s umístěním sacího koše do zvolené hloubkové úrovně;
- čerpání do ustálení fyzikálně-chemických parametrů podzemní vody (pH, teploty, vodivosti, O_2, a ORP);
- odběr vzorků podzemní vody na konci čerpání (po ustálení pH, teploty, vodivosti, O_2, a ORP).

Odběrová zařízení vzorkař po každém odběru z jednotlivých odběrových míst pročistil a řádně vypláchnul. Každou vzorkovnici zaplněnou vzorkem opatřil visačkou s uvedením lokality, názvu vzorku, data odběru a požadované analýzy. Do předání laboratoři vzorkař uchoval vzorky v chladu a temnu v mobilním termoboxu.

Vzorkování ve vybraných objektech „zkušebního polygonu" proběhlo podle níže uvedeného plánu vzorkování:

1) 3.12.2012
Vstupní monitoring lokality před aplikací nanočástic železa
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV- 23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV- 23
- vzorkování objektů HV-22, ZW-1, MW-1, MW- 2, HV-23 (CLU, Fe, DOC, Chloridy , úplný chemický rozbor vody).

2) 5.12 - 7.12.2012, 9.12.2012
aplikace preparátu nanoFe do hydrogeologického objektu ZW-1

3) 7.12. 21.12.2012
- stopovací zkouška,
- aplikace stopavače a sledování jeho migrace v podzemní vodě

4) *monitoring lokality po aplikaci nanočástic železa*

7.12.2012
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW- 1, MW-1, MW-2, HV 23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-, MW-2, HV-23

14.12.2012
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV- 22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23

- vzorkování objektů HV-22, ZW-1, MW-1, MW- 2, HV- 23 (CLU, Fe, DOC, Chloridy)

21.12.2013
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV- 22, ZW- 1, MW-1, MW-2, HV-23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-1,MW- 2, HV-23

2.1.2013
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23
- vzorkování objektů HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23 (CLU, Fe, DOC, Chloridy , úplný chemický rozbor vody)

4.1.2013
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV- 23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW- 2, HV-23

11.1.2013
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV- 23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-1. MW-2, HV-23
- vzorkování objektů HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23 (CLU, Fe, DOC, Chloridy)

18.1.2013
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23

25.1.2013
- měření fyzikálně – chemických parametrů v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23
- měření úrovně hladiny podzemní vody v objektech HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23
- vzorkování objektů HV-22, ZW-1, MW-1, MW-2, HV-23 (CLU, Fe, DOC, Chloridy , úplný chemický rozbor vody)

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, **majoritním kontaminantem na lokalitě jsou chlorované alifatické uhlovodíky.** Proto příslušné rozhodnutí České inspekce životního prostředí, Oblastní inspektorát Praha vydané dne 6.4.2011 pod spisovou značkou ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999; č.j. ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999.033/11/RJC. **stanovilo tyto cílové limity sanace:**

A) V ohniscích znečištění ve vlastním areálu společnosti AERO Vodochody a.s. U Letiště 374, Odolena Voda:

   - PCE 200 ug/l, Suma ClU 400 ug/l, VC 20 ug/l, odstranění volné fáze ropných uhlovodíků z hladiny podzemní vody.

B) Linie na výstupu podzemní vody z areálu společnosti AERO Vodochody a.s. U Letiště 374, Odolena Voda ve směru proudění podzemní vody k obci Postřižín vymezeném vrty MV43; MV61; MV50; HV29, HV30; MV60-A; MV60-B:

- PCE 200 ug/l, Suma 400 ug/l, VC 20 ug/l

C) Obec Postřižín – jižní okraj zastavěné části, která bude upřesněna v PD sanace:

- PCE 10,0 ug/l, TCE 10,0 ug/l, VC 0,5 ug/l.

Dále pro pořádek uvádíme, že u chlorovaných ethylenů, které jsou majoritními kontaminanty na lokalitě, dochází působením suspenze nanoželeza k sekvenčnímu rozkladu a vzniku meziproduktů v této „rozpadové řadě“:
PCE (tetrachlorethylen) → TCE (trichlorethylen) → cis-1,2–DCE (cis-1,2 dichlorethan) → VC (vinylchlorid) → ethen →ethan.

Výsledky vzorkování na lokalitě jsou uvedeny v příloze č. 9.

Z výše uvedených tabulek je patrné, že v aplikačním vrtu ZW 1 byl obsah PCE dne 3.12.2012 1 100 µg/l a ke konci aplikace 11.1.2013 40 µg/l a 25.1.2013 1 000 µg/l. V prvním pozorovacím vrtu MW-1 na počátku aplikace 3.12.2012 byl obsah PCE 1 700 µg/l a na konci aplikace 11.1.2013 540 µg/l a 25.1.2013 1 000 µg/l. Jak je patrné z výše uvedené přílohy č. 9, došlo za dobu aplikace suspenze nanoželeza k odbourání PCE hluboce pod stanovený limit 200 µg/l ČIŽP v aplikačním vrtu ZW 1 a výraznému poklesu PCE v prvním pozorovacím vrtu MW 1 vzdáleného 3,40 m od vrtu aplikačního dne 11.1.2013 a postupnému nárůstu na hodnotu až 1000 µg/l dne 25.1.2013.

Dále došlo k výraznému zvýšení koncentrací TCE (42 µg/l – 3.12.2013; 130 µg/l - 11.1.2013; 44 µg/l - 25.1.2013) a cis-1,2 – DCE (81 µg/l – 3.12.2013; 380 µg/l - 11.1.2013; 76 µg/l) v aplikačním vrtu ZW 1 tj. ke zvýšení koncentrace u druhého a třetího členu „rozpadové řady“ chlorovaných ethylenů na lokalitě a dále k jich snížení.

Také výrazně vzrostla koncentrace ethanu a ethenu ve aplikačním vrtu ZW 1; etan (‹0,5 µg/l – 3.12.2013; 11 µg/l - 11.1.2013; 7,6 µg/l – 25.1.2013) a ethen (‹5µg/l – 3.12.2013; 25 µg/l - 11.1.2013; 35 µg/l – 25.1.2013); které jsou koncové členy „rozpadové řady“ chlorovaných ethylenů.

Obdobný trend můžeme také vysledovat u prvního pozorovacího vrtu MW 1 vzdáleného 3,4 m od vrtu aplikačního. Jistý vliv aplikované suspenze nanoželeza je patrný také na pozorovacím vrtu MW 2 vzdáleném 9,43 m od aplikačního vrtu ZW 1 na také na pozorovacím vrtu HV 23 22,03 m vzdáleném od vrtu aplikačního, jedná se parametr TCE. Obdobný trend je také patrný z měření fyzikálně chemických parametrů podzemní vody ve „zkušebním polygonu“ na lokalitě, viz příloha č. 9.

K výše uvedeným skutečnostem musíme uvést, že zpětný nárůst koncentrace polutantů je při pilotním testu běžný jev. Jedná se o *reboulding,* **tj. zvyšování koncentrace po zastavení aktivního zákroku. Zde se jedná o vyčerpání reakční kapacity injektované suspenze nanoželeza a o zpětnou migraci okolní kontaminované podzemní vody do místa pilotního testu. Pro názornost a jednoduchost, můžeme při jisté schematizaci uvést, že aplikací suspenze nanoželeza vrtem ZW 1 do horninového prostředí došlo ve zvodněné části horninového prostředí, v hydrogeologickém kolektoru, k vytvoření reakční zóny,**

tzv. „zemního reaktoru". V tomto „zemním reaktoru" proběhla dekontaminace primárního polutantu „rozpadové řady" chlorovaných alifatických uhlovodíků, viz výše. Po vyčerpání reakční kapacity aplikované suspenze nanoželeza vrtem ZW 1 došlo ke zrušení funkce „zemního reaktoru". Tím také vlivem nátoku podzemní vody s původní kontaminací došlo ke zvýšení koncentrace polutantů rozpadové řady chlorovaných uhlovodíků na lokalitě.

Proto je nutno při projekčních pracích sanace na lokalitě uvažovat s opakovaným zásakem k eliminaci zpětného nárůstu koncentrace polutantů. Dále na základě výše uvedených faktů konstatujeme, že chemické reduktivní metody s využitím nanoželeza prokázaly dostatečnou účinnost k eliminaci kontaminace na lokalitě AERO Vodochody a.s.

Z výše uvedených skutečností vyplývají tyto závěry:

1. Reálný dosah zatláčené suspenze nanoželeza na lokalitě je 3,40 m od aplikačního vrtu.

2. Účinek aplikace suspenze nanoželeza je tak razantní, že po prvním aplikačním kole odbourá první člen „rozpadové řady" chlorovaných ethylenů PCE hluboko pod sanační limit s velmi výrazným vlivem na druhý člen rozpadové řady TCE a také třetí člen rozpadové řady cis 1,2 DCE s postupným nárůstem hodnot těchto kontaminantů. Dále také první kolo aplikace suspenze nanoželeza na lokalitě má výrazný vliv na koncové členy „rozpadové řady" chlorovaných ethylenů (eten, etan).

3. Vzhledem k výše uvedeným zjištěním, viz bod 1 a 2, doporučujeme aplikovat nanoželezo přímo do vymapovaných ohnisek znečistění chlorovanými uhlovodíky v síti s rozponou 7 m mezi jednotlivými aplikačními vrty. Aplikaci doporučujeme ve více aplikačních cyklech tak, aby byla plně odbourána kontaminace na lokalitě. Dále je zřejmé, že dosah aplikace suspenze nanoželeza 3,4 m od aplikačního vrtu zabrání migraci toxických meziproduktů degradace majoritního kontaminantu PCE na lokalitě SZ směrem k Postřižínu do Postřižínského potoka a dále potom do obce Postřižín.

4.2.4. Stopovací zkouška

V závěru aplikace suspenze nanoželeza vrtem ZW-1 dne 10.12.2012 byl do kvarterní zvodně na lokalitě nadávkován stopovač. Účelem této stopovací zkoušky bylo ověření možnosti dotace kontaminace z prostoru tzv. druhého ohniska kontaminace podle AAR situované mezi výrobní budovou a halou kabin (prostor vrtů HV-28, HV-23, HV-21 a HV-27) do povrchového toku, Postřižínského potoka, který drénuje zájmové území.

Princip stopovací zkoušky spočíval v aplikaci stopovače a následném sledování jeho přítomnosti v pozorovacích vrtech situovaných v jejich okolí, zejména ve směru proudění podzemní vody.

Jako stopovač byl použit fluorescein. Jedná se o netoxickou a zdravotně nezávadnou sloučeninu běžně používanou pro tyto účely. Její přítomnost lze ověřit pouhým okem, udávané zjistitelné mezní zředění je koncentrace 1 mg fluoresceinu v 1 l vody (= 1 g v

1.000.000 g vody). Fluorescein se také relativně málo (pokud je pH 6 a vyšší) sorbuje na organickou hmotu a jílové minerály.

Postup stopovací látky kolektorem při stopovací zkoušce je uveden v následující tabulce:.

Tab. 12. AERO Vodochody a.s. postup stopovače horninovým kolektorem

objekt	**Výskyt stopovací látky (dny po aplikaci v ZW 1)**	**Migrační vzdálenost od ZW 1 (m)**	**Migrační rychlost stopovače (m/den)**	**Poznámka**	
	7.12.2013 aplikace stopovače				
HV-23, MW-1, MW-2, HV- 22	7 dní- 14.12.2013	22 m	3,14 m/den	oblast zkušebního polygonu metody IN SITU	lineární rozsah
MV- 42	42 dní 25.1.2013	120 m	2,8 m/den		lineární rozsah
MV-43, HV-25, HV-28, HV-27, HV-21	51 dní - 1.2.2013	222 m	11,3 m/den		větší plošný rozsah, eliptického tvaru
MV-61, MV- 62	58 dní - 8.2.2013	422 m	28 m/den	západní hranice oplocení areálu AERO Vodochody a.s.a západní část tohoto areálu	plošný výskyt typu "plum"
OB-2, MV- 48, MV-64, MV-65, MV- 63	65 dní - 15.2.2013	1072 m	162,5/den	Postřižínský potok a západní část extravilánu areálu AERO Vodochody a.s.	plošný výskyt velkého rozsahu

Jak je patrné z výše uvedené tabulky, stopovací látka prokazatelně domigrovala z objektu ZW-1 do Postřižínského potoka po 65 dnech od aplikace do kolektoru. Migrační rychlost stopovače se pohybovala v kvarterních sedimentech v blízkosti aplikace, objekt ZW-1, 3,14 m/den. V západních uloženinách křídy naopak byla zdánlivá rychlost migrace stopovače až 162 m/den. Tak výrazný rozdíl v migračních rychlostech je možno vysvětlit geologickou a morfologickou stavbou zájmového území. Na kvarterní terase, která leží na rozvodnici, je

rychlost migrace 3,14 m/den, naopak za západním oplocení průmyslového areálu AERO Vodochody a.s. je zdánlivá rychlost migrace stopovače 162 m/den.

Z geologické mapy lokality, příloha č. 3, je patrné, že při západním vyklínění kvarterní zdibské terasy na ni navazují podložní vápnito-jílovité pískovce křídy. Z celkové situace vyplývá, že v horním toku Postřižinského potoka dochází k dotaci podzemní vody ze svahů příbřežní dotací podzemní vody do tohoto povrchového toku. Naopak v dolní části toku, v oblasti křídových sedimentů s vyšším „hydraulickým odporem" než v sedimentech zdibské trasy, dochází k dotaci z toku do příbřežních sedimentů. Vzhledem k tomu, že rychlost proudění v toku je podstatně vyšší než v sedimentech pravého i levého břehu, dochází k výše uvedené dotaci vody z povrchového toku do sedimentů pravého i levého břehu v oblasti dolního toku Postřižinského potoka.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem pokládáme rychlost 3 m/den migrace stopovače v sedimentech zdibské terasy za korektní údaj.

5. BEZPEČNOST A HYGIENA PRÁCE

Před zahájením pilotního testu, tj. v okamžiku předání staveniště, byli všichni pracovníci zhotovitele a subdodavatelé řádně a prokazatelně proškoleni z provozních, bezpečnostních a požárních předpisů a také byli pravidelně přezkušováni z jejich znalostí. Školitel před zahájením technických prací na lokalitě odborně zaměřil školení bezpečnosti a hygieny práce na tyto oblasti:

- seznámení se základními předpisy z oblasti bezpečnosti práce
- prokazatelné seznámení se zásadami bezpečnosti, hygieny práce a požární ochrany
- zásady ochrany zdraví a první pomoci v případě zasažení kontaminací
- způsoby používání ochranných prostředků a pomůcek
- způsoby použití protipožárních prostředků.

Při provádění prací všichni pracovníci dodržovali provozní, požární, bezpečnostní a hygienické předpisy pro práci platné v areálu AERO Vodochody, a.s.

Veškeré činnosti realizované v průběhu projektovaných prací byly prováděny v souladu s příslušnými právními předpisy.

<u>Všichni pracovníci používali předepsané osobní ochranné pomůckami v tomto rozsahu:</u>

1. Pracovní oděv a pracovní obuv.

2.Ochranné brýle, ochranný obličejový štít, pryžové rukavice, pryžové holínky a respirátor.

Používání ochranných pracovních pomůcek pravidelně kontroloval řešitel akce.

6. ZÁKLADNÍ PRÁVNÍ REGULATIVY PRO PROVÁDĚNÍ PRACÍ

Akce byla realizovaná v souladu s platnou legislativou. Jednalo se především o tyto zákony a prováděcí vyhlášky:
- zákon č. 254/2001 Sb. vodní zákon v platném znění,

- zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech v platném znění,

- zákon č. 86/2001 Sb. o ochraně ovzduší v platném znění,

- zákon č.. 17/1992 Sb. o životním prostředí v platném znění,

- zákon č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí v platném znění včetně, příslušných prováděcích vyhlášek,

- zákon č. 500/2004 Sb. správní řád v platném znění,

- zákon č. 513/1991 Sb. obchodní zákoník v platném znění,

- zákon č. 61/1988 Sb. o hornické činnosti, o výbušninách a o státní báňské správě v platném znění včetně příslušných prováděcích vyhlášek,

- zákon č. 62/1988 Sb. o geologických pracích a o Českém geologickém úřadu v platném znění včetně příslušných prováděcích vyhlášek,

- zákon č. 183/2006 Sb. o územním o plánování a stavebním řádu v platném znění včetně příslušných prováděcích vyhlášek,

- zákon č. 111/1994 Sb. o silniční dopravě v platném znění včetně příslušných prováděcích vyhlášek,

- zákon č. 133/1985 Sb. o požární ochraně v platném znění, normy a další právní předpisy vztahující se k předmětu plnění zhotovitele.

Práce byly řízeny ve smyslu platných metodických pokynů a směrnic MŽP ČR a MF ČR:

- Metodický pokyn MŽP č. 13/2005 pro průzkum kontaminovaného území – Věstník MŽP č. 9/2005,

- Metodický pokyn MŽP pro analýzu rizik kontaminovaného území - Věstník MŽP č. 3/2011,

- Metodický pokyn MŽP – Vzorkovací práce v sanační geologii MŽP, prosinec 2006, Věstník MŽP č. 2/2007;

- Metodický pokyn MŽP k závaznému formátu záznamu do databáze „Systém evidence kontaminovaných míst“ – Věstník MŽP č. 3/2011,

- Metodický pokyn odboru ekologických škod MŽP k řešení problematiky stanovení indikátoru možného znečistění ropnými látkami při sanaci kontaminovaných míst – Věstník MŽP č. 3/2008,

- Směrnice FNM ČR a MŽP č. 3/2004 pro přípravu a realizaci zakázek řešících ekologické závazky vzniklé při privatizaci.

7. ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ SANACE

V průběhu hloubení hydrogeologických monitorovacích vrtů ZW-1, MW- 1 a MW-2 vzniklo vrtné jádro, které bylo ukládáno do dřevěných typových bedniček a následně deponováno na lokalitě. Po odběru a laboratorním rozboru směsného vzorku bylo vytěžené vrtné jádro předáno pod kódem 17 05 04 zemina a kamení neuvedené pod číslem 17 05 03 k odstranění společnosti AVE CZ odpadové hospodářství, s.r.o. do provozovny v Benátkách nad Jizerou, disponující souhlasem k provozu zařízení vydaným ve smyslu § 14 zákona č. 185/2001 Sb. Výsledky laboratorního rozboru odebraného směsného vzorku vrtného jádra, odpadu, jsou uvedeny v příloze č. 8.

Tab. 13. AERO Vodochody a.s., vodní výluh třídy vyluhovatelnosti IIb podle vyhlášky č. 294/2005 Sb. směsného vzorku vrtného odpadu.

Ukazatel	Jednotka	Koncentrace ve vodném výluhu
Ztráta žíháním	%	1,4
pH při 25 ° C		8,0
Sírany	mg/l	37
Chloridy	mg/l	2,8
Fluoridy	mg/l	0,50
Rozpuštěné látky (RL)	mg/l	100
DOC	mg/l	27
Arsen	mg/l	‹ 0,002
Baryum	mg/l	0,10
Kadmium	mg/l	‹ 0,01
Chrom	mg/l	‹ 0,05
měď	mg/l	‹ 0,02
Rtuť	mg/l	‹ 0,0003
Molybden	mg/l	‹ 0,005
Nikl	mg/l	‹ 0,03
Olovo	mg/l	‹ 0,10
Antimon	mg/l	‹ 0,003
Selen	mg/l	‹ 0,003
zinek	mg/l	‹ 0,02

Poznámka:
vodný výluh připraven podle ČSN EN 12 457 – 4.

Z pohledu vyhlášky č. 294/2005 Sb. směsný vzorek vrtného jádra, odpadu, splňoval limitní hodnoty třídy vyluhovatelnosti IIb.

8. GEODETICKÉ PRÁCE

Nově vyhloubené hydrogeologické vrty na lokalitě ZW 1, MW 1 a MW 2 byly polohově a výškově zaměřeny. Geodetické práce provedla v subdodávce společnost AREA, GK, s.r.o. Praha. Zaměření bylo provedeno v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém Bpv. Technická zpráva z tohoto zaměření tvoří přílohu č. 10.

9. ZÁVĚR

Cílem provedených prací předkládaného pilotního testu na lokalitě společnosti AERO Vodochody a.s. bylo ověřit vhodnou metodu sanace na lokalitě, která zajistí odstranění neakceptovatelných rizik plynoucích ze zjištěného znečištění a dosažení cílových hodnot sanace stanovených v Rozhodnutí České inspekce životního prostředí, Oblastní inspektorát Praha vydané dne 6.4.2011 pod spisovou značkou ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999; č.j. ČIŽP/41/OOV/SR02/0635999.033/11/RJC. Na základě realizovaného pilotního ověření bude zpracována projektová dokumentace sanace staré ekologické zátěže.

Předkládaná zpráva Pilotního testu a projektové dokumentace sanace ve společnosti AERO Vodochody a.s. byla vypracována na základě „realizační smlouvy č. 05 755 -2012- 452 –S – 0201/98 -01 – 005 –X 00599" ze dne 8.8.2012 uzavřené mezi Ministerstvem financí České republiky (objednatel) a společností EKOSYSTEM spol. s r.o. (zhotovitel).

9.1. Sumarizace provedených prací

Předmětem prací bylo:

1) Provedení pilotního testu vhodné metody sanace na lokalitě, která zajistí dosažení cílových parametrů sanace.

2. Metodické doporučení ke zpracování projektové dokumentace sanace (dále PD).

Lokalitou posuzovanou předkládanou zprávou je areál AERO Vodochody a.s. a území přiléhající k jeho západní hranici a zasahující až do obce Postřižín. Zájmové území je situováno ve Středočeském kraji, na rozhraní okresů Mělník a Praha-východ, na katastrech obcí Odolena Voda, Dolínek, Hoštice u Vodochod, Postřižín a Vodochody u Prahy (nepatrné zasažení katastru této obce).

Areál AERO Vodochody je od počátku svého provozu datovaného do roku 1953 až do současnosti zaměřen na výrobu, zkoušení, opravy, údržbu a modernizaci cvičných a bojových vojenských letadel, leteckých dílů a přípravků a výrobu víceúčelových dopravních letounů. Areál je zasazen do průmyslových zón katastrů dotčených obcí. Zájmové území navazující ze západu na areál AERO Vodochody je zejména zemědělsky a lesnicky obhospodařováno, po cca 900 m severozápadním směrem od areálu AERO je tvořeno zástavbou obce Postřižín venkovského charakteru, v severní části obce přecházející do průmyslové zóny.

Kontaminace podzemní vody chlorovanými uhlovodíky postihuje téměř celoplošně západní polovinu areálu AERO Vodochody, v níž byly zjištěny sumární koncentrace ClU až v řádu desítek tisíc µg/l. Ze západní poloviny areálu znečištění migruje severozápadním směrem k obci Postřižín. Dle aktuálních výsledků odtékají přes západní hranici areálu AERO Vodochody ve směru k obci Postřižín podzemní vody kontaminované chlorovanými uhlovodíky s koncentracemi až v řádu desetitisíců µg/l. V důsledku dlouhodobých a nepochybně masivních dotací chlorovaných uhlovodíků do horninového prostředí v areálu AERO Vodochody a existence preferenčních cest migrace kontaminace (v podobě tektonických poruch) došlo k transportu znečištění podzemní vodou až do zastavěného území obce Postřižín. V rámci předchozích průzkumných prací (AAR starých ekologických zátěží v areálu AERO Vodochody a.s. a okolí, M. Mikolanda, 2010) byly v domovních studních v

jihovýchodní části obce potvrzeny koncentrace sumy chlorovaných uhlovodíků v řádu desítek µg/l.

Na základě výše uvedeného závadného stavu, jeho odstranění a zjištění správných metodických postupů pro sanaci lokality AERO Vodochody a.s. byl realizován na lokalitě pilotního pokus._

V jeho rámci byly provedeny tyto soubory prací:

Přípravné práce :
1. Vrtné práce
2. Realizace laboratorních zkoušek inovativních IN SITU sanačních technologií pro lokalitu AERO Vodochody a.s.
3. Režimní měření úrovně hladiny podzemní vody na lokalitě AERO Vodochody a.s.

Realizační práce:
1.Realizace pilotního testu na lokalitě AERO Vodochody a.s.
2, Vzorkování podzemní vody na lokalitě a sanační monitoring.
3. Stopovací zkouška.

V rámci vrtných prací byly vyhloubeny tři hydrogeologické vrty ZW-1, MW-1 a MW-2 v celkové metráži 34,5 bm.

Laboratorními zkouškami inovativních IN SITU sanačních technologií pro lokalitu AERO Vodochody a.s. byla ověřována metoda ISCO (chemická oxidace s využitím manganistanu draselného), aplikace suspenze nulamockého nanoželeza a metoda BRD (biologická reduktivní dechlorace s využitím kyseliny mléčné).

9.2. Doporučení

Po zhodnocení celkové situace na lokalitě je možno doporučit **použití sanační metody IN SITU v ohniscích kontaminace aplikací suspenze nulamockého nanoželeza a metody BRD (aplikací kyseliny mléčné). Aplikace metody ISCO přes její dobré laboratorní výsledky nepokládáme za vhodné vzhledem k možné mobilizaci těžkých kovů ze starých zátěží v areálu AERO Vodochody a.s. a možnému transportu této kontaminace prouděním podzemní vody do oblasti Postřižína.**

Na základě výše zjištěných informací byl realizován pilotní test se zásakem suspenze nanoželeza do saturované zóny, hydrogeologického kolektoru, na lokalitě.

V rámci těchto provedených prací bylo zjištěno:

1. Reálný dosah zatláčené suspenze nanoželeza na lokalitě je 3,40 m od aplikačního vrtu.

2. Účinek aplikace suspenze nanoželeza je tak razantní, že po prvním aplikačním kole odbourá první člen „rozpadové řady" chlorovaných ethylenů PCE hluboko pod sanační limit s velmi výrazným vlivem na druhý člen rozpadové řady TCE a také třetí člen rozpadové řady cis 1,2 DCE s postupným nárůstem hodnot těchto kontaminantů

(reboulding). Dále také první kolo aplikace suspenze nanoželeza na lokalitě má výrazný vliv na koncové členy „rozpadové řady" chlorovaných ethylenů (eten, etan).

3. Vzhledem k výše uvedeným zjištěním, viz bod 1 a 2, doporučujeme aplikovat nanoželezo přímo do vymapovaných ohnisek znečistění chlorovanými uhlovodíky v síti s rozponou 7 m mezi jednotlivými aplikačními vrty. Aplikaci doporučujeme ve více aplikačních cyklech tak, aby byla plně odbourána kontaminace na lokalitě. Dále je zřejmé, že dosah aplikace suspenze nanoželeza 3,4 m od aplikačního vrtu zabrání migraci toxických meziproduktů degradace majoritního kontaminantu PCE na lokalitě SZ směrem k Postřižínu do Postřižínského potoka a dále potom do obce Postřižín.

Provedená stopovací zkouška v zájmovém území spolu s režimním měřením na lokalitě jednoznačně prokázala komunikaci mezi ohnisky znečistění v areálu AERO Vodochody a.s. a Postřižínským potokem, který je hlavní drenážní bází zájmového území.

Na základě zjištěných skutečností shrnutých v závěru této zprávy jednoznačně doporučujeme jako nevhodnější sanační metodu pro lokalitu AERO Vodochody a.s. inovativní metodu nanoželeza IN SITU v kombinací s dalšími sanačními metodami, a to především metodu sanační čerpání.

Aplikaci nanoželeza doporučujeme především proto, že zabrání mobilizaci další kontaminace na lokalitě, a to především těžkých kovů. Jedná se například o objekt „chemické provozy". Vzhledem k tomu, že stopovací zkouška prokázala komunikaci podzemní zvodně na lokalitě s Postřižinským potokem, který potom dotuje soukromé studny v Postřižíně, **je inovativní metoda chemické redukce kontaminace s využitím nanočástic železa v kombinaci s metodou BRD (kyselina mléčná) základní sanační technologií pro realizaci nápravných opatření pro vyřešení závadného stavu ekosystému vzniklých před privatizací společnosti AERO Vodochody a.s.**

9.3. Závěr

Na základě výše uvedených skutečností můžeme závěrem shrnout, že na lokalitě doporučujeme realizovat **kombinovanou sanační metodu** založenou na těchto sanačních technologiích:

1.Sanační čerpání s technologií vybavenou stripovacím stupněm k odstranění ClU.

2. IN SITU inovativní sanační technologie:

a) aplikace suspenze nanoželeza do *ohnisek* s nejvyšší nadlimitní koncentrací kontaminace typu ClU;

b*) použití metody BRD (kyselina mléčná)* v *ostatních* vymapovaných nadlimitně kontaminovaných plochách na lokalitě.

Uvedený sanační model doporučujeme proto, že ačkoliv aplikace suspenze nanoželeza vykazovala velmi dobré výsledky v rámci pilotního testu, doporučujeme nanoželezo použít pouze do nejvíce kontaminovaných míst lokality z důvodu jeho poměrně vysoké pořizovaní ceny oproti kyselině mléčné (metoda BRD). Proto další oblasti kontaminačního mraku doporučujeme řešit metodou BRD (kyselina mléčná).

Jiné metody sanace nedoporučujeme, protože by k poměrně nepříznivým podmínkám na lokalitě pravděpodobně vykazovaly nižší účinnost a delší časovou náročnost, než námi

doporučené řešení. Kontaminovaný půdní horizont, zdibská terasa, je dotovaný atmosférickými srážkami v rozvodnicovém režimu. Vzhledem k neexistujícímu souvislému stropnímu izolátoru se zde vyskytují místní zavěšené zvodně i vícenásobně nad sebou. Samotná kontaminace je potom v důsledku dlouhodobého vymývání atmosférickými srážkami vázána na kvarterní zvodeň zdibské terasy v oblasti průmyslového areálu AERO a.s. Tato terasa je pak v některých svých částech téměř bezvodá, nebo obsahuje nepatrné množství vody.

Na základě získaných informací z pilotního testu odhadujeme náklady na provedení nápravných opatření v areálu AERO Vodochody a.s. a okolí ve výši 285 mil. Kč, tj. v souladu s odhadem finančních nákladů uvedeným v maximální variantě nápravných opatření v AAR starých ekologických zátěží v areálu AERO Vodochody a.s. a okolí (M Mikolanda, 2010).