

Code van Goede Praktijk n° 3

***In Situ* Chemische Oxidatie**

Leefmilieu Brussel



Inhoud

1	Inleiding	4
2	Omschrijving van de techniek en de technische principes	5
2.1	Algemene omschrijving	5
2.2	Reactieve oxidantia	5
2.2.1	Waterstofperoxide en Fentons reagens	7
2.2.2	Natriumpercarbonaat ($2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$)	9
2.2.3	Kalium- en natriumpermanganaat.....	10
2.2.4	Natriumpersulfaat.....	12
2.2.5	Ozon.....	12
2.2.6	Ozon gecombineerd met waterstofperoxide	14
2.2.7	Algemene opmerkingen over oxidanten	14
2.2.8	Chemische oxidatie ten opzichte van andere behandelingstechnieken	15
2.3	Methodes van toediening van de oxidantia	15
2.3.1	Actieve infiltratie onder druk en directe injectie	16
2.3.2	Passieve infiltratie.....	18
2.3.3	Recirculatie of gedwongen circulatie	19
2.3.4	Grondmenging door in situ grondmixen.....	20
2.3.5	Injectie van ozon in de verzadigde zone (sparging).....	21
3	Beschrijving van de varianten	23
3.1	Chemische oxidatie gestimuleerd door toediening van oppervlakte-actieve stoffen	23
3.2	Chemische oxidatie gecombineerd met een opwarming van de bodem door stoominjectie	23
4	Nagestreefde doeleinden: pluim versus kern.....	24
5	Verontreinigingen en de meest gunstige omstandigheden (kwalitatieve overwegingen)	25
6	Voorafgaande controle op de haalbaarheid van de techniek	27
6.1	Keuze van het oxidans in relatie tot het type en de hoeveelheid verontreiniging.....	27
6.2	Bodemkarakteristieken van de te behandelen bodems	28
6.2.1	Fysische bodemkarakteristieken	28
6.2.2	Lokale hydrogeologie	29
6.2.3	Fysico-chemische eigenschappen van de bodem.....	29
6.3	Beperkende eigenschappen van de te saneren site	31
7	Specifieke controle op de haalbaarheid van de behandeling.....	32
7.1	Te meten parameters van de verontreiniging, van de bodem en van de site	32
7.2	Noodzaak aan voorafgaande labotesten	36
7.3	Noodzaak van piloottest en minimale eigenschappen van de test	40
8	Beschrijving van een standaard installatie	47
8.1	Actieve of passieve infiltratie	47
8.2	(Actieve of passieve) infiltratie + recirculatie	47
8.3	Directe injectie onder druk	48



8.4	Ozoninjectie in de verzadigde zone	48
8.5	In situ oxidatie + bodemopwarming (door stoominjectie)	49
9	Beschrijving van de installatie die geplaatst zal worden.....	50
10	Specifieke veiligheids- en stabiliteitsmaatregelen en maatregelen tegen overlast: geuren, lawaai, stof,	55
10.1	Punten om mee rekening te houden.....	55
10.2	Risico's verbonden met de gevaarlijke of toxische aard van de gebruikte reagentia	55
10.3	Hinder voor de luchtkwaliteit (in geval van een ozonbehandeling)	56
10.4	Risico's rond brandgevaar en explosies.....	56
10.5	Risico's op verspreiding van oxidantia	56
10.6	Geluidshinder.....	57
10.7	Risico's voor nabijgelegen grondwaterwinningen.....	57
10.8	Conformiteit met bestaande wetgeving.....	57
11	Begeleiding van de behandeling	59
11.1	Opvolgingsmaatregelen: type van de installatie	59
11.1.1	Actieve of passieve infiltratie	59
11.1.2	Actieve of passieve infiltratie + recirculatie	59
11.1.3	Directe injectie.....	59
11.1.4	Grondmixen.....	60
11.1.5	Ozoninjectie in de verzadigde zone + bodemluchtexttractie in de onverzadigde zone	60
11.1.6	ISCO + Variant bodemopwarming door stoominjectie	62
11.2	Opvolgingsmaatregelen: op te volgen parameters van de behandeling en frequentie.....	62
12	Rapportage, optimalisatie en corrigerende maatregelen	72
12.1	Rapportage	72
12.2	Corrigerende maatregelen en optimalisatie.....	74
13	Controlemetingen en beslisschema voor de stopzetting of verderzetting van de behandeling	76
14	Eventuele lange termijn opvolging: aard van de metingen	78
15	Aanbevelingen op vlak van veiligheid en stabiliteit.....	80
15.1	Korte checklist voor aannemers	80
15.2	Korte checklist voor de bodemverontreinigingsdeskundige	85
16	Sources bibliographiques	89



1 Inleiding

De voorliggende behandelingstechniek wordt In Situ Chemische Oxidatie genoemd. Deze techniek wordt in de literatuur vaak afgekort tot ISCO (In Situ Chemical Oxydation).

De techniek van ISCO beoogt om aan de hand van chemische oxidantia dewelke in staat zijn te reageren met de verontreinigende stoffen deze snel af te breken tot onschuldige eindproducten die van nature uit al aanwezig zijn in de bodem. De techniek van ISCO kan toegepast worden zowel in de verzadigde zone als in de onverzadigde zone. De techniek kan gebruikt worden om bronzones te behandelen waar de gehalten aan verontreiniging erg hoog zijn en ook in pluimzones waar de gehalten aan verontreiniging eerder laag zijn door verdunning.

Indirect wordt door de toepassing van deze techniek zuurstof ingebracht in de bodem die de natuurlijke aerobe afbraak van verontreiniging kan stimuleren via biologische weg (natuurlijke attenuatie).

In de aanwezigheid van belangrijke hoeveelheden puur product, als drijflaag (LNAPL) of als zaklaag (DNAPL) moet eerst deze fase van puur product weggenomen worden vooraleer ISCO kan worden toegepast. Anders dienen zeer grote hoeveelheden chemisch oxidans geïnjecteerd te worden hetgeen de financiële en technische haalbaarheid van ISCO benadeelt.

Opmerking

De ordonnantie van 5 maart 2009 met betrekking tot het beheer en de sanering van verontreinigde bodems en diens uitvoeringsbesluiten geven in verschillende artikels aan dat de codes van goede praktijk dienen nageleefd te worden. Wat de codes van goede praktijk met betrekking tot de sanering en het risicobeheer betreft, kan de erkende bodemverontreinigingsdeskundige in bepaalde gevallen mits een degelijk gefundeerde argumentatie, zoals bvb. op basis van een voorstel van de bodemsaneringsaannemer, afwijken van de bepalingen van de codes van goede praktijk. In dat geval behoudt Leefmilieu Brussel zich op elk moment het recht voor om bijkomende informatie of om bijkomend terreinwerk te vragen op basis van de bepalingen van de codes van goede praktijk, indien het noodzakelijk en pertinent wordt geacht.

We willen verduidelijken dat de code van goede praktijk van toepassing is voor alle werken die een behandeling door sanering of door risicobeheer omvatten, voor werken uitgevoerd in het kader van de minieme behandeling, voor werken van beperkte duur, follow-upmaatregelen en noodmaatregelen.



2 Omschrijving van de techniek en de technische principes

2.1 Algemene omschrijving

Deze behandelingstechniek behandelt een vlek van bodem- en/of grondwaterverontreiniging aan de hand van een chemische oxidatie van de verontreinigende stoffen door toevoeging van oxyderende reagentia.

Het nagestreefde doel is om de vuilvracht te verminderen – en in het beste geval te laten verdwijnen- in de verzadigde en/of onverzadigde zone van een verontreinigingszone. De te behandelen vuilvracht kan geadsorbeerd zijn aan de vaste bodemfase of aanwezig zijn in de vorm van puur product in de bodemporiën, of opgelost in het grondwater of als een vrije fase drijvend aan de oppervlakte van een grondwatertafel (LNAPL). Idealiter zijn de eindproducten van de chemische afbraak van verontreinigende stoffen zoals CO_2 , SO_4^{2-} , Cl^- , H_2O , onschuldig en zijn deze van nature uit aanwezig in de bodem.

Toch kunnen er tussenproducten in de bodem gevormd worden en er een tijd in blijven bestaan indien de oxidatiereactie niet volledig is verlopen (bv. door een gebrek aan oxidans). Over het algemeen zijn deze tussenproducten minder schadelijk dan de originele verontreiniging en zijn ze beter geschikt om via biologische weg te worden afgebroken. Een onvolledige afbraak van PCE leidt volgens de literatuur bijvoorbeeld tot volgende componenten:

PCE → Dichloorazijnzuur → mierenzuur.

Bij de toepassing van de techniek dienen volgende stappen te worden voorzien:

- Toediening van de reactieve oxidantia in de zone met bodemverontreiniging: toediening door grondmenging, actieve of passieve infiltratie, injectie in de bodem van vloeibare oplossingen of in gasvorm
- Controlemaatregelen en toezicht tijdens de behandeling laten toe om de verdeling van het agens in de bodem op te volgen evenals de progressie van de afbraak van verontreiniging
- Controlemaatregelen en toezicht tijdens de behandeling laten toe de risico's op ongelukken op te volgen: verspreiding en migratie van de reagentia naar gevoelige infrastructuur, risico's op explosie en brandgevaar,...
- In geval van toediening van het oxidans onder gasvorm (ozon), de plaatsing van een afvangsysteem voor bodemlucht. Een voorziening voor de behandeling van onttrokken gassen uit de bodem ingesteld op de verwachte debieten en op de te behandelen verontreinigingen. Eventueel ook een voorziening ter behandeling van het vloeibare condens.

2.2 Reactieve oxidantia

De oxidantia dewelke regelmatig gebruikt worden zijn:

- Zuurstofwater (of waterstofperoxide), gebruikt enkel of als Fenton's reagens
- Natrium- of kaliumpermanganaat
- Natriumpersulfaat of geactiveerd persulfaat
- Ozon



Peroxydes worden regelmatig gebruikt in vaste vorm (Ca peroxide of Mg peroxide). Deze producten worden gekarakteriseerd door een goede stabiliteit in de bodem en worden toegepast als constante en trage toedieningsbron van zuurstof in de bodem. Deze worden niet zozeer gebruikt met als doel chemische oxidatie maar wel om de natuurlijke afbraak te stimuleren dankzij de constante toediening van zuurstof die ze verzekeren. Het gebruik van deze producten vormt onderdeel van een andere Code van Goede Praktijk (nl. gestimuleerde biologische afbraak).

Andere oxidantia zijn opgenomen in onderstaande lijst met volgende reagentia:

- Natriumpercarbonaat
- Combinaties van oxidantia: waterstofperoxide met ozon ;
- Hexavalent ijzer (ferraat ion) brengt ettelijke voordelen met zich mee (weinig schadelijk voor het milieu, sterke oxidatiepotentiaal, lange verblijftijd en stabiliteit in de bodem) maar zijn hoge kostprijs beperkt een brede toepassing op dit ogenblik.

De oxido-reductie reactie kan zich op 2 manieren voordoen:

- Een directe reactie: het oxidans valt de chemische binding aan van de pollut die afgebroken wordt tot onschuldige eindproducten zoals CO_2 , H_2O , H^+ , Cl^- .
- Een reactie die vrije radicalen laat ontstaan: Vrije radicalen zijn zeer reactief omwille van de aanwezigheid van één of twee vrije elektronen in de elektronenwolk, zodanig dat hun verblijftijd in de bodem beperkt blijft tot enkele seconden. Hun verspreiding binnen de bodem is dus zeer beperkt.

De eigenschappen van deze reagentia zijn samengevat in volgende tabel (tabel 1).

Tabel 1 Eigenschappen van de belangrijkste gebruikte oxidantia bij ISCO

Oxidans	Waterstofperoxide	Kalium natrium permanganaat	of Natriumpersulfaat	Ozon	Perozon	Natriumpercarbonaat
Chemische formule	H_2O_2	$\text{KMnO}_4/\text{NaMnO}_4$	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$	O_3	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_3$	$2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Voorkomen	Vloeibaar	Vast/vloeibaar	Vast of vloeibaar	Gas	Gas	Vast of vloeibaar
Oxidatiepotentiaal (V)	1,8-2,8	1,7	2,1-2,6	2,1	2,1	1,7
Katalysator	Fe(II), Fe(III)	-	Fe(II), Fe(III), hitte en pH	-	O_3	Fe(II) en pH
Actieve stof	$\text{OH}^\cdot, \text{O}_2^\cdot, \text{HO}_2^\cdot, \text{HO}_2^\cdot$	$\text{MnO}_4^\cdot$	$\text{SO}_4^\cdot$	$\text{O}_3, \text{OH}^\cdot$	$\text{O}_3, \text{OH}^\cdot$	$\text{HO}_2^\cdot$
Verlies in de bodem (%/dag)	10 → 95	0,1 – 1	1 – 3	1 – 5	1 – 5	1 - 3
Verblijftijd in de bodem	Enkele minuten tot enkele uren	Enkele weken tot meerdere maanden	Enkele dagen tot meerdere weken	Enkele uren tot meerdere dagen	Enkele uren tot meerdere dagen	Enkele uren tot meerdere weken
Gebruikelijke toedieningsmethode	Infiltratie (actief of passief) via	Directe injectie	Infiltratie (actief of passief) via	Sparging	Sparging	Directe injectie



Oxidans	Waterstofperoxide Kalium natrium permanganaat	of Natriumpersulfaat Ozon	Perozon	Natriumpercarbonaat
	verticale filters	verticale filters		

(Uit de Code of Good Practice – In Situ Chemical oxydation, Citychlor, April 2013, INTERREG IVB)

Een meer gedetailleerde bespreking van elk van deze reagentia is opgenomen in de volgende secties.

2.2.1 Waterstofperoxide en Fentons reagens

Waterstofperoxide is in de handel beschikbaar in de vorm van een kleurloze oplossing in massapercentages van 30% tot 50%.

Waterstofperoxide wordt gekarakteriseerd door een relatief lage redoxpotentiaal en een korte halfwaardetijd waardoor het in vergelijking met andere oxidantia minder geschikt is voor toepassing van ISCO. Onder omgevingstemperatuur en druk is waterstofperoxide niet krachtig genoeg om tot een effectieve mineralisatie van koolwaterstoffen te komen.

Naast directe oxidatie heeft waterstofperoxide echter een potentieel tot het vormen van vrije radicalen. Dit vereist het toevoegen van een katalysator. Bijvoorbeeld in de aanwezigheid van ijzer, worden verschillende vrije radicalen gevormd waaronder het radicaal $\text{OH}^\bullet$, waardoor de redoxpotentiaal wordt verhoogd tot 2.80V. Dit hydroxylradicaal fungeert als een zeer krachtig en een α -selectief oxidans en verdwijnt snel uit de bodem. Sulfaat ionen spelen eveneens een rol als katalysator.

In toepassingen met chemische oxidatie wordt de katalysator ijzer vooral toegediend onder de vorm van Fe(II) als ijzersulfaat. Wanneer ijzer als katalysator aan de hydroxideoplossing wordt toegevoegd is sprake van Fentons reagens. De volumeverhouding van de waterstofperoxideoplossing is meestal tussen 5 à 10 %. De specifieke verhoudingen H_2O_2 en ijzerkationen worden bepaald aan de hand van laboratoriumtesten. De juiste verhouding is afhankelijk van (i) de pollutconcentraties, (ii) de fysico-chemische karakteristieken van de bodem en (iii) van de specifieke stoichiometrie van de oxidatiereactie, de bodemvochtigheid en van het poriënvolume van de bodem. Andere metalen zoals molybdeen en koper kunnen eveneens een rol spelen als katalysator maar ijzer wordt verkozen omwille van de kostprijs en omwille van de milieu-impact.

Om de oplosbaarheid van ijzer te optimaliseren, kunnen twee types van Fentons reagens worden toegediend.

- Klassiek Fentons reagens

Fe(II) wordt geïnjecteerd in de vorm van een oplossing van ijzersulfaat in een gehalte gaande van 20 tot 100 mg/l aan ijzer. Om een goede oplosbaarheid van het ijzer te bekomen, wordt de bodem aangezuurd door toevoeging van zuur (HCl of H_2SO_4) om zo een optimale pH te bekomen tussen 3,5 en 5. In functie van de buffercapaciteit is de pH-daling in de bodem tijdelijk en na 1 tot 3 dagen stijgt de pH terug tot zijn normale waarde.

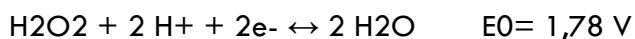


- Gemodificeerd Fentons reagens

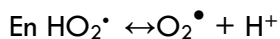
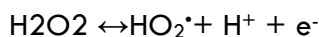
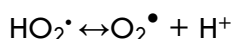
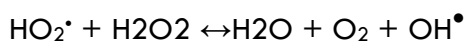
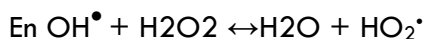
Om de verzuring van de bodem te vermijden evenals het risico op vrijzetting van zware metalen dat verbonden is met een pH-verlaging, wordt Fe(II) toegediend als een complex in de vorm van een chelaat: EDTA (moeilijk biodegradeerbaar), natrium trifosfaat of citroenzuur (minder schadelijk voor het milieu).

De reacties die plaatsgrijpen door de toevoeging van waterstofperoxide – soms complex- zijn de volgende:

Directe oxidatie



Reactie met vrije radicalen



De afbraakproducten van de reactie (O_2 , H_2O en CO_2) zijn onschadelijk en komen van nature voor in de ondergrond.

Het vrije hydroxylradicaal ($\text{OH}^\bullet$) is zeer reactief. Door deze hoge reactiviteit verloopt de chemische oxidatie zéér snel en α -selectief. Het Fenton's reagens kan bijgevolg voor veel verschillende types van verontreiniging worden gebruikt. Een ander gevolg van deze reactiviteit is dat grote hoeveelheden oxidans gebruikt moeten worden.

Het hydroxylradicaal wordt gekenmerkt door een lage halfwaardetijd waardoor de verblijftijd van het oxidans in de bodem zeer kort is evenals zijn mogelijkheid tot verspreiding. Dit heeft eveneens implicaties bij de keuze van de toedieningsmethode aangezien een korte verblijftijd vereist dat bij toediening van het oxidans deze onmiddellijk in contact treedt met de pollut. De volumes aan oxidantia ingebracht in de bodem moeten voldoende zijn om de verontreinigde zone in zijn totaliteit te behandelen. Dit oxidans wordt bijgevolg afgeraden in bodems met slechte doorlatendheid (de migratietijd naar de verontreinigende component is te groot) of in bodems met een te grote heterogeniteit. Over het algemeen is een tweede injectiecampagne nodig.

Rekening houdend met de hoge reactiesnelheid tussen het peroxide en het ijzer, tijdens de toepassing van het reagens, moet de injectie van waterstofperoxide en het ijzer gerealiseerd



worden in verschillende putten of alternerend in dezelfde putten. In bodems die van nature uit rijk zijn aan ijzer, is het mogelijk om de reactie van peroxide te stabiliseren door een injectie met fosfaat. Fosfaat bindt met het opgeloste ijzer waardoor het ijzer minder beschikbaar wordt.

Peroxide kan niet worden toegepast in geval van bodems die rijk zijn aan carbonaat, omdat dit vrije radicalen afvangt. De techniek is daarom vooral geschikt voor zure gronden.

Het gebruik van peroxides leidt ook tot neveneffecten waarmee rekening moet worden gehouden. De oxidatie door vrije radicalen is een sterk exotherme reactie. De vrijzetting van hitte samen met zuurstof (door decompositie) kan gevaarlijke situaties creëren (risico op ontploffing of brand). De reactiesnelheid van peroxides wordt hierom over het algemeen gecontroleerd door het gebruik van het reagens in kleine concentraties (< 11% vol/vol van H_2O_2).

De toevoeging van zuur aan het Fentons reagens kan eveneens voor gevolg hebben dat er zware metalen worden vrijgezet en dat hun mobiliteit verhoogt in de bodem. Dit gevolg kan het resultaat zijn van verschillende processen:

- Verhoging van de oxidatietrap, van de mobiliteit en van de toxiciteit van sommige metalen: bv. de transitie van Cr^{3+} naar Cr^{6+} , of omgekeerd de transitie van As^{3+} naar As^{5+} leidt tot een verlaging van de mobiliteit van arseen.
- Vrijzetting van metallische ionen door oxidatie van organische stof waarop deze geadsorbeerd waren
- Verhoging van de oplosbaarheid van sommige metalen ten gevolge van de pH-daling
- Oplossen van Fe- en Mn oxides en de vrijzetting van metalen die hierop gecoprecipiteerd waren: bv As.

In geval gecomplexeerde agentia (chelaten) gebruikt worden, kunnen deze de mobiliteit van metaalionen beïnvloeden.

Tijdens de oxidatiereactie wordt zuurstof vrijgezet in de bodem hetgeen kan leiden tot volgende effecten:

- Stimulatie van de aërobe biologische afbraak van organische polluenten
- Verplaatsing van vluchtige verontreinigingen in de bodemluchtfase en de verspreidingsrisico's die hieruit voortvloeien
- Verplaatsing van het grondwater en de opgeloste verontreiniging
- Daling van de hydraulische conductiviteit van de bodem ten gevolge van een daling van de relatieve permeabiliteit van de bodem voor water, waarschijnlijk veroorzaakt door structuurverlies van de bodem ten gevolge van de oxidatie van de organisch stof.

2.2.2 Natriumpercarbonaat ($2Na_2CO_3 \cdot 3H_2O_2$)

Zoals aangegeven in de chemische formule, draagt deze carbonaatverbinding waterstofperoxide moleculen.



Natriumpercarbonaat is stabiel in de bodem dan waterstofperoxide. Deze oxidant is verantwoordelijk voor het creëren van basische condities in de bodem. Het is dus niet nodig om –zoals voor Fentons reagens– om de bodem te verzuren om de reactie te bevorderen.

Onder de verhoogde pH- condities spelen verschillende radicalen een bepalende rol zoals perhydroxide radicalen ($\text{HO}_2^\cdot$).

2.2.3 Kalium- en natriumpermanganaat

Kaliumpermanganaat wordt als vast zout aangeleverd, terwijl natriumpermanganaat als een vloeistof met een massaverhouding van 40% wordt aangeleverd. De permanganaatzouten bevatten van nature uit onzuiverheden met belangrijke gehalten aan chroom en arseen. Vooraleer het te gebruiken als oxidans in de bodem, wordt er aangeraden om de samenstelling van het commerciële product te controleren.

Het gebruik van permanganaat als chemisch oxidans voor het saneren van bodemverontreinigingen met gechloreerde solventen (bvb. PCE, TCE) en andere organische componenten (bvb. naftaleen, fenantreen, pyreen en fenolen) is uitvoerig onderzocht.

Voor de oxidatie van bodems wordt kaliumpermanganaat gebruikt in oplossingen met massapercentages variërend tussen 0,5% en 2%, eerder zelden tot 4%. Bij hogere concentraties vormt kaliumpermanganaat neerslagen in reservoirs, in leidingen en in injectieputten. Tijdens zijn toepassing moet men rekening houden met een daling van de oplosbaarheid door temperatuursdaling. Door kaliumpermanganaat te injecteren in een grondwaterlaag op lage temperatuur kunnen zich neerslagen vormen die de bodempermeabiliteit verlagen.

Natriumpermanganaat dat veel meer oplosbaar is, kan geïnjecteerd worden in de bodem in de vorm van een vloeibare oplossing in concentraties tot 25 massapercent.

Permanganaat is een selectief oxidans specifiek reactief in de aanwezigheid van dubbele bindingen. Gegeven het grote aantal organische verontreinigingen in de bodem met een dubbele binding, kan permanganaat efficiënt toegepast worden bij dit soort van verontreinigingen. Een “bodemoxidansdemonstratie” van meer dan 2 (uitgedrukt in gram permanganaat/ kg vochtige bodem) wordt meestal beschouwd als de bovengrens om een economisch efficiënte behandeling te hebben.

Permanganaat is een oxidans met een matige oxidatiepotentiaal ($E_0 = 1,68 \text{ V}$) vergeleken met Fentons reagens. Permanganaat is daarentegen veel stabiel in de bodem (halfwaardetijd is veel langer). De dichtheid van permanganaatoplossingen is vergelijkbaar met deze van gechloreerde solventen en rekening houdend met zijn verblijftijd in de bodem (tot enkele maanden) heeft permanganaat de mogelijkheid om zich te verspreiden in het horizontale en verticale vlak. Dit oxidans is dus in het bijzonder geschikt voor bodems met een lage permeabiliteit waar het dankzij zijn hoge verblijftijd, kan migreren door diffusie doorheen slecht doorlatende lagen.

De reacties die kunnen plaatsgrijpen tijdens een toepassing met permanganaat zijn de volgende:





De eindproducten van deze reactie in de bodem zijn dus mangaandioxide, CO_2 en organische tussenverbindingen eventueel resulterend van een onvolledige oxidatie van de verontreiniging.

Sommige voorbeelden van stoichiometrische oxidatiereacties met polluenten worden in onderstaande tabel 2 gegeven.

Tabel 2: Stoichiometrische oxidatiereacties van enkele polluenten

Polluent	Oxydatiereactie	Vraag naar oxydant*	Vorming van MnO_2 **
PCE	$3\text{C}_2\text{Cl}_4 + 4\text{MnO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 4\text{MnO}_2 + 6\text{CO}_2 + 12\text{Cl}^- + 8\text{H}^+$	0,96	0,7
TCE	$\text{C}_2\text{HCl}_3 + 2\text{MnO}_4 \leftrightarrow 2\text{MnO}_2 + 2\text{CO}_2 + 3\text{Cl}^- + \text{H}^+$	1,81	1,32
DCE	$3\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2 + 8\text{MnO}_4 \leftrightarrow 8\text{MnO}_2 + 6\text{CO}_2 + 6\text{Cl}^- + 2\text{OH}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	3,28	2,39
VC	$3\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl} + 10\text{MnO}_4 \leftrightarrow 10\text{MnO}_2 + 6\text{CO}_2 + 3\text{Cl}^- + 7\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}$	6,35	4,64
Fenol	$3\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} + 28 \text{MnO}_4 + 5\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 28\text{MnO}_2 + 18\text{CO}_2 + 28 \text{OH}^-$	11,8	8,62

*Oxydantvraag uitgedrukt in gram MnO_4 per gram pollut (zonder het organisch stofgehalte van de bodem in rekening te brengen)

** Hoeveelheid geproduceerd MnO_2 (gram) per gram geoxideerde pollut

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de hoeveelheid permanganaat die nodig is om chloorethenen te oxideren omgekeerd evenredig is met de graad van chlorering van de pollut. De eindproducten van chemische oxidatie zijn CO_2 , chlorides, H^+ of OH^- en MnO_2 terwijl bij anaerobe biologische afbraak, de afbraak van chloorverbindingen resulteert in de vorming van tussenproducten volgens de sequentie $\text{PCE} \rightarrow \text{TCE} \rightarrow \text{DCE} \rightarrow \text{VC} \rightarrow$ etheen.

De oxidatiereactie vormt MnO_2 dat van nature uit aanwezig is in bodems. In aanwezigheid van een te oxideren zaklaag, heeft het gevormde MnO_2 de neiging om een beschermlaag te vormen omheen het residuele puur product waardoor deze afgeschermd wordt van een latere aanval door het oxidans. Deze beschermlaag wordt minder efficiënt met de tijd waardoor na verloop van tijd terug hogere concentraties aan polluenten kunnen vrijkomen in het grondwater. Permanganaat wordt daarom niet als de beste technische keuze beschouwd voor de behandeling van een zaklaag.

Neerslag van MnO_2 , vooral dichtbij injectieputten kan een verlaagde hydraulische conductiviteit van de bodem veroorzaken door verstopping van de bodemporiën. Een verhoging van het injectiedebiet laat toe dit effect te verkleinen. Het gebruik van stabilisators zoals hexametafosfaat, die de hoeveelheid neergeslagen MnO_2 vermindert, kan hierop een antwoord bieden.



MnO₂-neerslag kan de adsorptiecapaciteit van de bodem voor zware metalen verhogen. Vooral arseen wordt door dit effect behandeld.

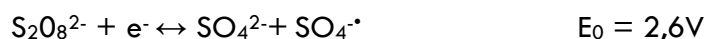
2.2.4 Natriumpersulfaat

Persulfaat wordt meestal geleverd in poedervorm. Het wordt toegepast in de bodem in de vorm van een vloeistofoplossing met een massapercentage aan persulfaat van ongeveer 5%. Dit oxidans wordt slechts sinds kort gebruikt voor toepassingen in de bodem. De ervaringen met dit oxidans zijn beperkt.

- Directe oxidatie



- Reactie met vrije radicalen (na activatie)



De producten van deze reacties zijn CO₂, H₂O en sulfaat, onschadelijke verbindingen die van nature uit aanwezig zijn in de bodem.

Persulfaat is een stabiel oxidans in de bodem met een relatief hoog oxiderend vermogen. Het is reactiever dan permanganaat en het is stabieler dan peroxyde.

Persulfaat reageert relatief traag maar eens geactiveerd met behulp van een katalysator, worden verschillende radicalen gevormd waaronder SO₄^{·-} en OH[·]. De reactie wordt dan sneller en minder selectief. Volgende katalysatoren worden gebruikt: ijzer (het meest gebruikte) of andere metalen, metallische chelaten, warmte (temperatuur van meer dan 30°C, stoominjectie), waterstofperoxide of een zeer basische pH van méér dan 11.

De toepassing van persulfaat in de bodem leidt tot 2 gevolgen:

- Een aanrijking van de sulfaatconcentratie. Dit effect kan geneutraliseerd worden in bodems rijk aan Ca²⁺ ionen in de vorm van een neerslag van calciumsulfaat (gips: CaSO₄·2H₂O). Sulfaat is van nature uit aanwezig in de bodem en is niet toxisch voor de gezondheid en voor het milieu.
- Een daling van de bodempH: één molecule aan gereduceerd persulfaat vormt één molecule natriumsulfaat en één molecule zwavelzuur. De impact van deze vrijzetting hangt af van het bufferend vermogen van de bodem (gehalte aan carbonaten en verwerende mineralen).

2.2.5 Ozon

Een mengsel van lucht en ozon wordt in de bodem geïnjecteerd. Vluchtige verbindingen aanwezig in de vloeibare fase van de bodem worden overgezet in de gasfase waar ze geoxideerd worden door het aanwezige ozon.

Rekening houdend met zijn korte halfwaardetijd, wordt ozon steeds op de site zelf geproduceerd aan de hand van ozongeneratoren. Deze laatste functioneren als volgt:



- UV bestraling
- Ladingen van het type corona (meest gebruikt)

Wanneer ozon geproduceerd wordt uit zuurstof, kan een mengsel geproduceerd worden met een maximaal gehalte van 8 à 10% (vol/vol) terwijl vertrekkend van atmosfeerlucht slechts een maximaal gehalte van 1 à 2 volumepercent wordt bereikt.

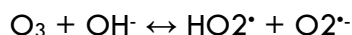
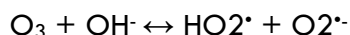
De reacties die plaatsgrijpen tijdens een toepassing met ozon zijn complex en gebeuren ofwel door een eenvoudige overdracht van een electron ofwel door vorming van radicalen zowel in de vloeibare fase als in de gasfase van de bodem. Volgende reacties treden op:

- Directe oxidatie:



Deze reactie is selectief en viseert vooral de dubbele C=C binding.

- Reactie met vrije radicalen:



Deze reacties zijn minder selectief.

Ozon is zeer reactief en oxideert de meeste organische verbindingen. Onder zure omstandigheden is het vooral de directe oxidatie die zal plaatsvinden eerder selectief in de zin dat niet alle organische verbindingen vernietigd zullen kunnen worden. In een neutraal en basisch milieu zullen reacties met radicalen plaatsvinden. De aanwezigheid van het hydroxyl-ion in het water vermindert de halfwaarde tijd van ozon in het grondwater (ongeveer 20 minuten) en in de bodemluchtfase (halfwaarde tijd van ongeveer 3 dagen).

Het gebruik van ozon, toxisch gas, brengt een aantal risico's met zich mee: verspreiding van ongebruikt ozon en vervluchtiging van reactieproducten buiten de bodem. Hierdoor dient een behandeling op basis van een ozoninjectie noodzakelijkerwijs gepaard te gaan met een bodemluchtexttractiesysteem. Dit is in het bijzonder vereist voor het dichtbevolkte Brussels Hoofdstedelijk Gewest waar de ondergrond bezaaid ligt met infrastructuur die als voorkeurskanaal kan dienen voor de circulatie van gassen.

Ozongas wordt ook niet geïnjecteerd onder ondoorlaatbare lagen die de ongecontroleerde verspreiding van ozon en van vluchtige verbindingen (resultierend van de reacties in de bodem) bewerkstelligen omwille van voorkeurskanalen.

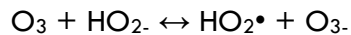
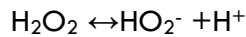
Omwille van zijn oxiderende werking kan ozon zeer corrosief zijn voor ondergrondse infrastructuur (kabels, leidingen, houders,...). Een minimale afstand (5 m) tussen gevoelige infrastructuur en de zones waar ozon toegepast wordt moet gerespecteerd worden.



Ozon reageert in de bodem waarbij zuurstof gevormd wordt hetgeen de biologische afbraak van organische verontreinigingen bevordert.

2.2.6 Ozon gecombineerd met waterstofperoxide

Het gebruik van deze combinatie berust op volgende chemische reacties:



In dit procédé worden waterstofperoxide en ozon geïnjecteerd aan de hand van een installatie dewelke een centrale cilinder, een hydrofobe filter en een poreuze filter met microporiën bevat. Het ozon aangerijkt met reactieve radicalen ten gevolge van zijn contact met het waterstofperoxide wordt verdeeld als belletjes in het grondwater nadat het gemigreerd is doorheen de poreuze filter.

2.2.7 Algemene opmerkingen over oxidanten

Zoals reeds vermeld verloopt het proces van chemische oxidatie volledig verschillend van natuurlijke afbraak. Dit laatste proces leidt tot de vorming en soms tot de accumulatie van tussenproducten die soms schadelijker zijn dan het initiële moederproduct (bv vorming van vinylchloride uit de afbraak van PCE). ISCO daarentegen leidt tot een volledige afbraak van de verontreinigende verbindingen tot verbindingen die van nature uit aanwezig zijn in de bodem (CO_2 , Cl^- ,...). Indien onder sommige omstandigheden, wegens bv. een gebrek aan reactief oxidans, tussenproducten gevormd worden, zijn deze weinig schadelijk voor het milieu en worden ze snel afgebroken in de bodem.

De vorming van oxiderende omstandigheden in de bodem kan leiden tot een verhoogde vrijzetting van zware metalen (bv chroom dewelke geoxideerd wordt van oxidatietrap III naar oxidatietrap VI). De vorming van minerale zouten (sulfaten, chlorides,...) resulterend van de oxidatie en van het gebruik van katalysatoren kan eveneens de beschikbaarheid van metalloïden verhogen. Deze metalloïden worden gedesorbeerd van de bodemmatrix door de verhoogde ionisatiepotentiaal. In functie van het bodemtype kan de verhoging van de gehalten aan metalloïden in de bodem terug verminderen door vastlegging en dit na 1 tot enkele maanden.

Na een behandeling van de bodem door chemische oxidatie, kunnen de gemeten gehalten in het grondwater terug snel stijgen ten gevolge van reboundeffecten. Dit fenomeen kan veroorzaakt worden door verschillende processen:

- Vrijzetting van verontreiniging in het grondwater vanuit residueel puur product dat voortkomt als drijfslaag of als zaklaag of gefixeerd in de bodemporiën
- Langzame diffusie van pollutanten uit slecht doorlatende bodemlagen
- Oxidatie van organische stof waarop verontreiniging geadsorbeerd was

Deze reboundeffecten kunnen optreden zelfs nadat een oxidatiecampagne een groot deel van de aanwezige vuilvracht vernietigd heeft (tot 84% volgens literatuurgegevens). Het optreden van reboundeffecten kan leiden tot de uitvoering van een tweede behandeling door chemische oxidatie eventueel gecombineerd met een andere behandelingstechniek.



2.2.8 Chemische oxidatie ten opzichte van andere behandelingstechnieken

Chemische oxidatie heeft aangetoond dat het op een snelle en belangrijke wijze de vuilvracht in een bodem kan verminderen. Toch heeft deze techniek ook zijn beperkingen om de vuilvracht volledig op een kostenefficiënte manier weg te nemen. Onder sommige omstandigheden worden door de chemische oxidatie reactieproducten gevormd die gemakkelijk biologisch afbreekbaar zijn in de bodem. Daarom wordt een chemische oxidatie dikwijls gevolgd door een stimulatie van de natuurlijke afbraak.

In dit opzicht verdient het de aandacht te vermelden dat het steriliseren van de bodem door een chemische oxidatie zoals soms in de literatuur wordt vermeld op basis van labotesten in het veld niet wordt vastgesteld. De bodem wordt reeds enkele maanden na een behandeling door chemische oxidatie opnieuw gekoloniseerd door bacteriën. Een stimulatie van de bacteriële activiteit wordt zelfs vastgesteld na een gedeeltelijke sterilisatie.

2.3 Methodes van toediening van de oxidantia

Deze methodes beogen een snel contact tussen de verontreiniging en de oxidantia. De tabellen **3A** en **3B** geven een overzicht van de belangrijkste toedieningsmethodes evenals van de respectievelijke voor- en nadelen.

Tabel 3a Voornaamste toedieningsmethodes van oxidantia in de bodem, voordelen en nadelen

Toedieningsmethode	Beschrijving	Nadelen	Voordelen
Actieve infiltratie via vaste putten	Injectie onder druk van oxidans in bestaande verticale putten (peilbuizen)	Hoge kost voor de injectieputten (materiaal moet resistent zijn aan het oxidans)	Eenvoudig en beperkte kost bij een tweede injectiecampagne
Passieve infiltratie	Passieve infiltratie (gravitair) van het oxidans in verticale putten of via horizontale infiltratie galerijen	Voor bodems met goede permeabiliteit	Het ontwerp van verticale putten kan aangepast worden aan de specifieke terreincondities. Horizontale galerijen zijn minder toepasbaar in heterogene bodems
Directe injectie in de bodem onder druk	Het oxidans wordt toegediend in de bodem door een directe injectie onder druk (geoprobe of andere). De maximale diepte is gelimiteerd tot ongeveer 20 m	In geval van een tweede injectiecampagne moet het injectiemateriaal opnieuw gemobiliseerd worden (hoge kost). De invloedstraal is iets kleiner dan voor vaste putten	Eenvoudige behandeling in specifieke zones op specifieke dieptes
Recirculatie	Combinatie van een actieve of passieve infiltratie met het verpompen van grondwater stroomafwaarts	Mogelijk in bodems met een goede permeabiliteit	Goede hydrogeologische controle en goede verdeling van het ingebrachte oxidans in beperkte hoeveelheden
Grondmisen	Mechanisch mixen van het oxidans met de bodem (bv door middel van een avegaar	Slechts toepasbaar op ondiepe dieptes (<2 m). Verlies van bodemstructuur	Een goed contact tussen de bodem en de verontreiniging is verzekerd

Toedieningsmethode	Beschrijving	Nadelen	Voordelen
	met grote diameter)		
Sparging	Injectie van gas (ozon) in de verzadigde zone	Beperkt tot ozon	Oxidatie van de verontreiniging in de verzadigde zone

Tabel 3B: Toedieningsmethode in functie van bodemeigenschappen

Bodemeigenschap	Actieve infiltratie onder druk	Directe injectie	Recirculatie	Passieve infiltratie (putten of drains)	Grondmixen
Hydraulische conductiviteit (m/s)					
$> 10^{-5}$	+++	+++	+++	+++	+++
Van 10^{-6} tot 10^{-5}	++	+++	+	++	+++
Van 10^{-7} tot 10^{-6}	+	++	--	-	+++
Van 10^{-8} tot 10^{-7}	-	+	--	-	+++
$< 10^{-8}$	--	--	--	--	+++
Te behandelen diepte in m					
< 5	+++	+++	+++	+++	+++
Van 5 tot 10	+++	+++	+++	-	+++
Van 10 tot 25	+++	++	+++	--	-
Van 25 tot 50	++	+	++	--	--
> 50	++	--	++	--	--

Legende: -- = niet toepasbaar, - = slecht, + = gemiddeld, ++ = goed, +++ = zeer goed

De gedetailleerde beschrijving van de verschillende methodes vormt onderdeel van volgende paragrafen.

2.3.1 Actieve infiltratie onder druk en directe injectie

Volgens deze methodes wordt het oxidans onder druk in de bodem geïnjecteerd ofwel vanuit een put ofwel direct met behulp van een injectiesonde.

Het succes van deze methode hangt van de invloedstraal van de injectie af en dus van het aantal putten/injectiepunten nodig om de te saneren zone af te dekken.

Het voordeel van deze methodes is dat zij een selectieve behandeling toelaten van te behandelen zones en dieptes.

injecties onder druk zijn begrensd tot dieptes van 20m omwille van het materiaal dat hiervoor momenteel beschikbaar is.

Tijdens een injectie onder druk, is het belangrijk rekening te houden met de bodemcohesie op een zodanige manier dat breuken in de behandelde formatie vermeden worden. Er dient rekening gehouden te worden met de heterogene behandeling van de bodem die hieruit kan voortvloeien. Hierbij wordt aangeraden dat de bodemexpert een grondmechanische controle uitvoert (de wet van Terzaghi).

De vorm en grootte van de invloedstraal van een injectiepunt hangt af van verschillende parameters zoals: de bodempermeabiliteit, de bodemheterogeniteit, debiet en injectiedruk

van het oxidans, verbruiksnelheid van het oxidans (stabiliteit van het oxidans in de bodem, bodemoxidansvraag, gehalte aan verontreiniging,...).

Om een ongecontroleerde verspreiding te vermijden van reagentia en van verontreiniging, wordt er aangeraden om de injectie te beginnen in de periferie van de te behandelen zone om vervolgens de behandeling door te zetten in de richting van het centrum van de verontreinigde zone.

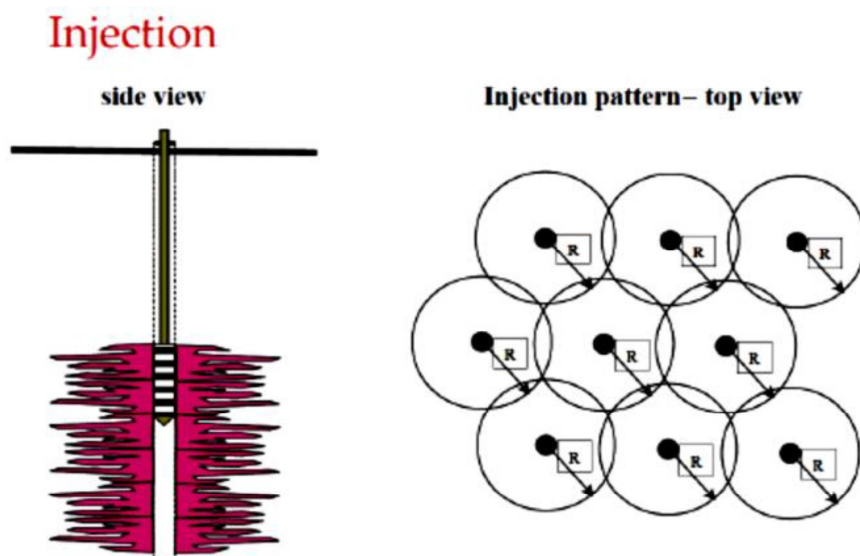
Tijdens een injectie onder druk, moet er steeds rekening gehouden worden met het risico op verspreiding van de reagentia en van de verontreiniging via preferentiële voorkeurskanalen (riolen, leidingen,...). en dit in de richting van het oppervlakte ter hoogte van peilbuizen.

In bodems met een heterogene samenstelling is de filterlengte van de injectieputten gelimiteerd op een zodanige manier dat een voorkeursverspreiding van reagentia in een goed doorlatende laag ten koste van een slecht doorlatende laag vermeden wordt.

Bij injectie in een verzadigde zone zijn de injectieputten/punten niet snijdend om voorkeursverspreiding in de onverzadigde (minder weerstandbiedende) zone te vermijden.

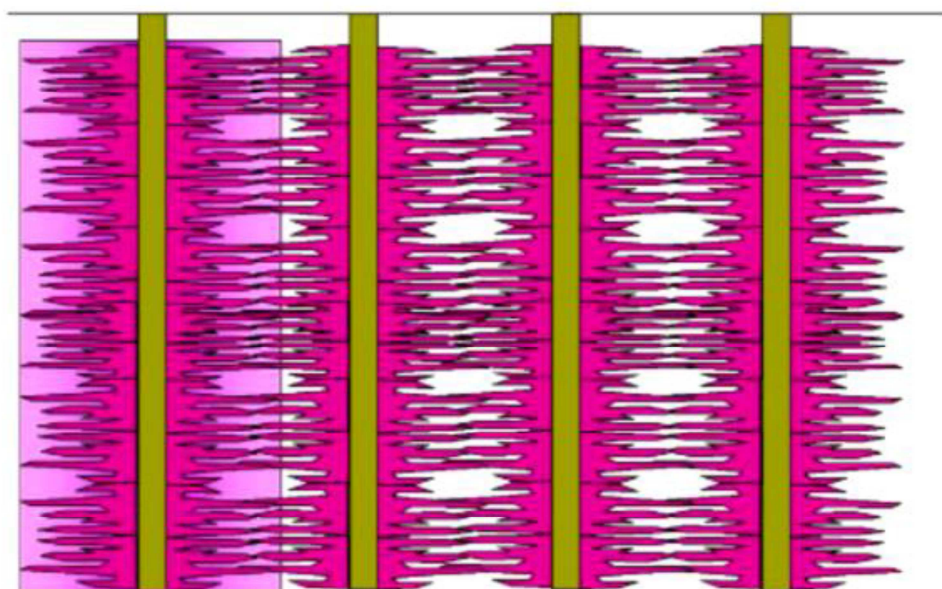
Onderstaande figuur 1 geeft een schematische weergave van de toediening van een reagens door directe injectie.

Figuur 1: Directe sequentiële injectie in de bodem (gekopieerd uit de Code van Goede Praktijk in situ chemische oxidatie, Citychlor project, 2013, INTERREG IVB)



Injection

Injection pattern - side view



2.3.2 Passieve infiltratie

Volgens deze methode wordt het reactieve oxidans toegediend via de zwaartekracht in verticale putten of via horizontale injectiedrains. De factoren die de efficiëntie van deze methode controleren zijn de infiltratiecapaciteit van de bodem, de voortplantingssnelheid van het grondwater en dus de snelheid waarmee het reagens zich verspreidt door advectie in het grondwater en de verblijftijd van het oxidans. Infiltratietesten in de bodem zijn dus nodig vooraleer deze techniek kan worden toegepast.

Ter informatie geeft de volgende tabel de infiltratiecapaciteit weer (uitgedrukt in laagdikte van water geïnfiltreerd per tijdseenheid) voor enkele bodemtextuurklassen.

Tabel 4: Infiltratiecapaciteit van enkele bodemtextuurklassen

Bodemtextuurklasse	Infiltratiecapaciteit (m/s)
Grof zand	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Fijn zand	$5,6 \cdot 10^{-6}$
Fijn lemig zand	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Leem	$5,8 \cdot 10^{-7}$
Lichte klei	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Matig zware klei	$1,4 \cdot 10^{-7}$

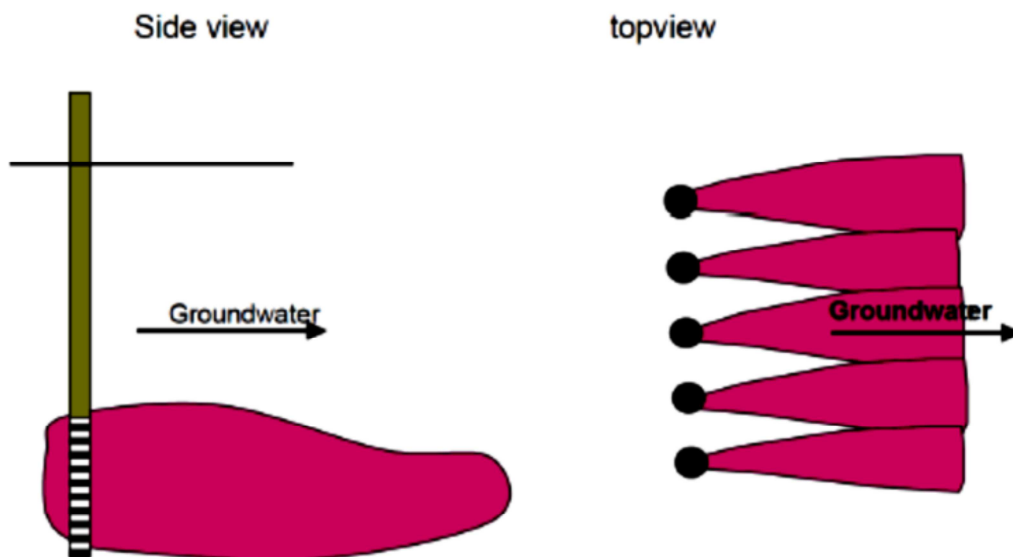
Om zich te verzekeren van een minimale verdeling van het reagens in de bodem beschouwt men dat de grondwaterstromingssnelheid in de bodem minimaal 0,05m/j moet zijn.

De toepassing van deze toedieningsmethode is mogelijk onder volgende omstandigheden:

- Het oxidans moet voldoende reactief blijven in de bodem om de vuilvracht te kunnen laten verdwijnen. Empirisch gezien beschouwt men dat de halfwaardetijd van het reagens in de bodem méér dan dubbel zo groot moet zijn dan zijn reactietijd
- Het oxidans moet in de bodem voldoende lang stabiel blijven om een voldoende grote invloedstraal te ontwikkelen. De invloedstraal zal toenemen met gelijk geïnjecteerde volumes bij toenemend injectiedebiet.
- Negatieve effecten voor de gezondheid en het milieu door een verlengd verblijf in de bodem en een langere injectietijd voor het reagens moeten op voorhand geëvalueerd worden en als verwaarloosbaar worden beschouwd.

Figuur 2 geeft een schematische weergave van deze toedieningsmethode in de bodem.

Infiltration



2.3.3 Recirculatie of gedwongen circulatie

Deze toedieningsmethode berust op een injectie van het reagens in 1 punt (actief of passief) gevolgd door het oppompen en zuiveren van het opgepompte grondwater in een ander punt. Het behandelde grondwater kan geloosd worden of geherinfiltrated worden in de bodem.

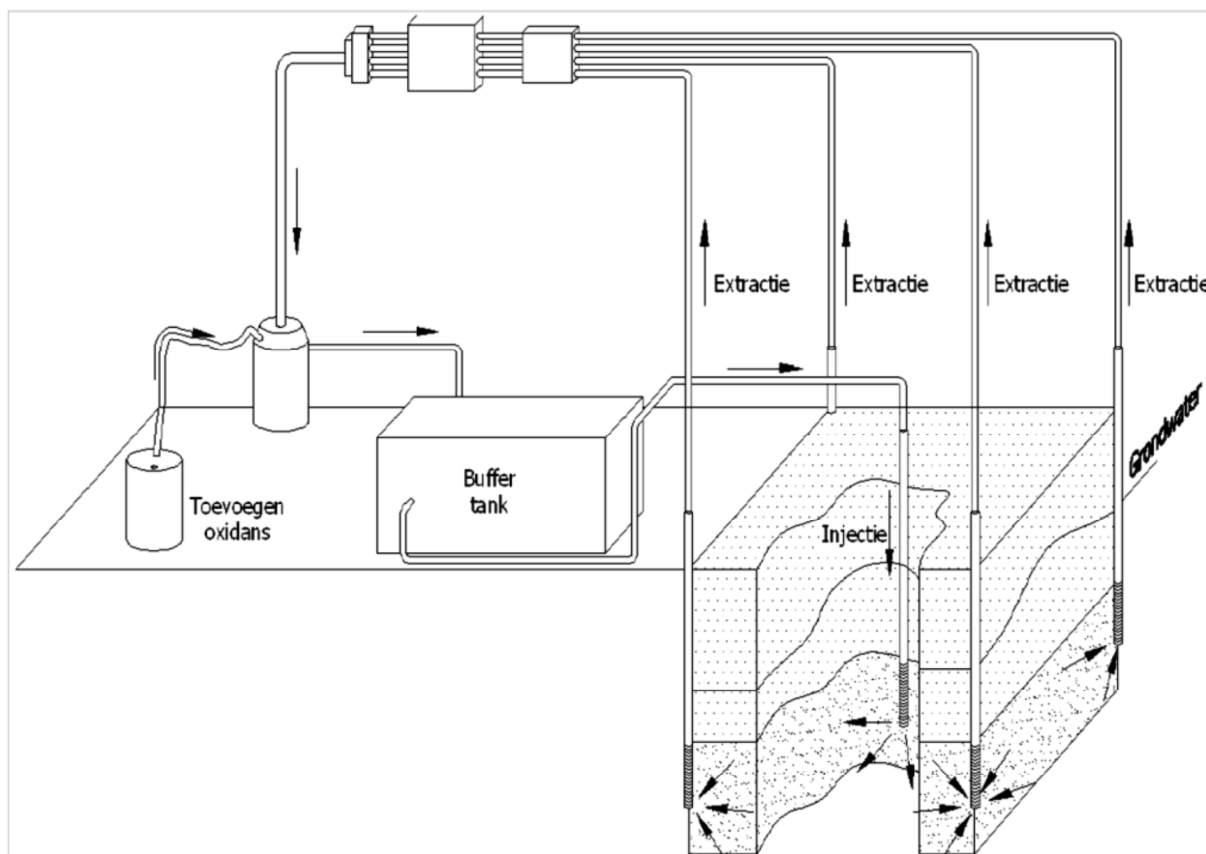
Deze methode brengt volgende voordelen mee:

- Een verbeterde hydraulische gradiënt en dus een versnelde circulatie in de bodem dan wanneer er enkel geïnjecteerd of geïnfiltrated wordt
- De invloedstraal van het geïnjecteerde reagens wordt vergroot
- Een betere controle op de verspreiding van de reagentia en van de verontreiniging in de bodem in de richting van gevoelige receptoren.

Figuur 3 geeft een schematische weergave van de toedieningsmethode door recirculatie

De aspecten rond grondwateronttrekking en –zuivering vormen onderdeel van de code van Goede Praktijk n°1 (Onttrekking van grondwater in de verzadigde zone van de bodem)

Figuur 3: schematisch overzicht van de toedieningsmethode door recirculatie (gekopieerd uit “ de Code van Goede Praktijk In Situ Chemische Oxidatie, draft 2014 OVAM)



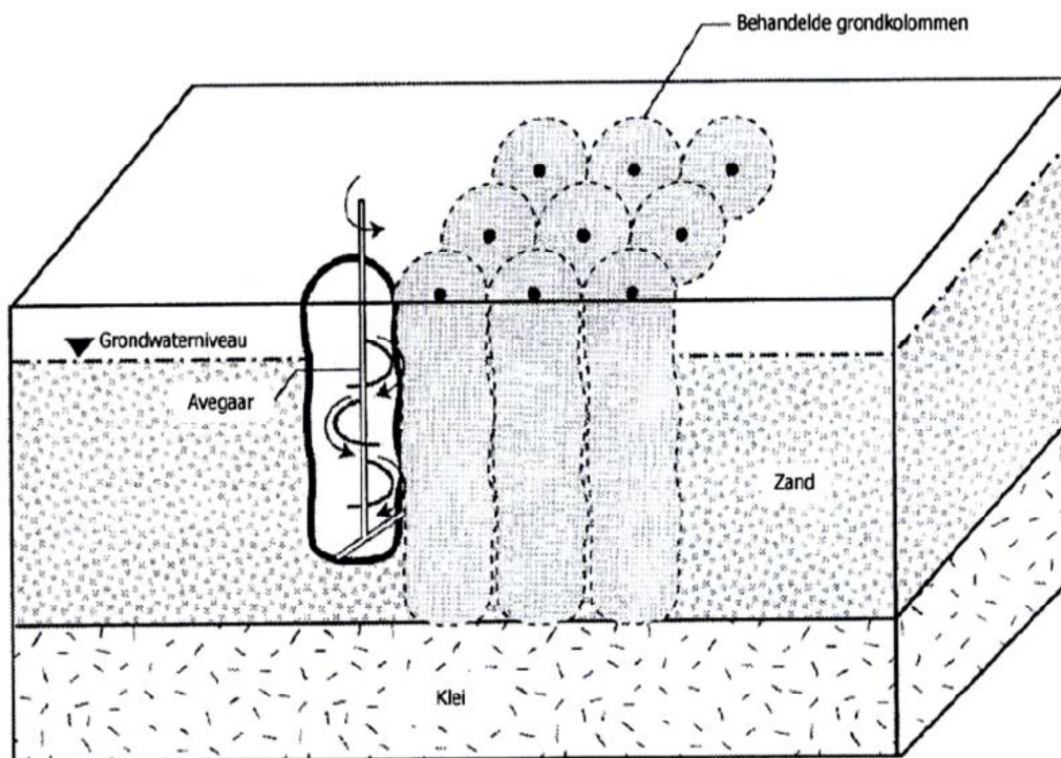
2.3.4 Grondmenging door in situ grondmixen

Het inbrengen van een reagens in de bodem gebeurt aan de hand van een avegaar met grote diameter (1 tot 3,5 m) werkend langsheen opeenvolgende bodemkolommen zoals aangetoond in het schema van **figuur 4**.

Met deze techniek wordt een optimaal contact bekomen tussen het oxidans en de te behandelen bodem. Deze techniek is niet toepasbaar tenzij op oppervlakkige verontreinigingen die niet dieper gaan dan 2 m diepte.

Op grotere dieptes verhogen de kosten van deze toedieningsmethode exponentieel. Een andere nadeel is dat er een totaal verlies aan bodemstructuur optreedt na mixing hetgeen een negatieve invloed heeft op de grondmechanische eigenschappen van de bodem.

Figuur 4: Schematische illustratie van toediening van oxidans door grondmixing (gekopieerd uit de Code van Goede Praktijk in situ chemische oxidatie, draft 2014 OVAM).



2.3.5 Injectie van ozon in de verzadigde zone (sparging)

Deze methode wordt uitgevoerd zoals een klassieke luchtinjectie in de verzadigde zone van de bodem. Dit wordt besproken in de code van goede praktijk (persluchtinjectie in de verzadigde zone van de bodem).

In tegenstelling tot een klassieke sparging, vereist een ozoninjectie dat er specifieke voorzorgen worden genomen:

- Gebruik van niet corrosieve materialen (staal uit inox, teflon,...) over het algemeen duur
- Koppeling van de installatie met een bodemluchtexttractiesysteem

Het ozon wordt over het algemeen continu geproduceerd door een generator.

De invloedstraal van de ozoninjectie en van de bodemluchtexttractiefilters wordt bepaald door piloottesten.

Verschiede ozoninjectiemethodes kunnen toegepast worden

- Injectieputten eenvoudig uitgerust met een filter bestaande uit microporiën. Het ozon wordt in de bodem geïnjecteerd als fijne belletjes die zich relatief ver rond het injectiepunt verspreiden.
- Injectieputten gekoppeld met grondwateronttrekkingsputten. Deze opstelling versnelt de circulatie van het grondwater en verhoogt op deze manier de invloedstraal van het geïnjecteerde ozon

- Perozon: gezamenlijke injectie van ozon en waterstofperoxide in een injectiefilter bestaande uit een mantel van glazen bollen en microporiën. Deze opstelling beoogt de verspreiding van microbellen aangerijkt met reactieve radicalen.

3 Beschrijving van de varianten

De verschillende types van gebruikte oxidantia en de verschillende toedieningsmethodes bepalen evenveel mogelijke varianten van de techniek.

Twee specifieke technieken, enkele keren beschreven en gebruikt, verdienen vermeld te worden.

3.1 Chemische oxidatie gestimuleerd door toediening van oppervlakte-actieve stoffen

Deze methode wordt gebruikt wanneer de oxidatie zones van puur product moet bereiken (drijf laag, zak laag of vastgelegd in bodemporiën). Het succes van de behandeling van deze zones door oxidatie hangt af van het belang van het contactoppervlak tussen de verontreiniging en het reagens en van de hoeveelheden aanwezig puur product.

Om aan deze beperking een oplossing te bieden, wordt het oxidans geïnjecteerd met co-solventen (alcoholen) en/of oppervlakte actieve stoffen. Na deze toediening worden de verontreinigende verbindingen beter oplosbaar en zijn ze dus beter beschikbaar voor een chemische reactie. Het type en de hoeveelheden van te injecteren oppervlakte-actieve stoffen dienen bepaald te worden via labotests.

De uit te voeren labotests voor oppervlakteactieve stoffen zijn beschreven in de code van goede praktijk 1 (Grondwateronttrekking in de verzadigde zone).

3.2 Chemische oxidatie gecombineerd met een opwarming van de bodem door stoominjectie

Opwarming van de bodem streeft volgende doeleinden na: verhoging van de oplosbaarheid en verlaging van de viscositeit van verontreinigende verbindingen aanwezig in de vorm van puur product met een verhoogde mobiliteit en toegankelijkheid van het reactieve oxidans tot gevolg. De diffusiesnelheid van de verontreinigingen doorheen slecht doorlatende lagen wordt eveneens verhoogd.

De verhoogde bodemtemperatuur dient ook als activatie van het persulfaat in de bodem.

De aspecten verbonden aan stoominjectie in de bodem zijn beschreven in de code van goede praktijk 2 (pompen van gassen in de onverzadigde bodemlaag).



4 Nagestreefde doeleinden: pluim versus kern

De behandeling van bodemverontreiniging door chemische oxidatie kan verschillende doeleinden nastreven, afhankelijk van het type gebruikt oxidans.

Ter hoogte van de kern waar belangrijke gehalten verontreiniging gemeten worden en waar mogelijks puur product aanwezig kan zijn, zijn oxidantia met een sterke reactiviteit en een hoog oxiderend vermogen de meest aangewezen om te voldoen aan een verhoogde oxidansvraag

Daarentegen binnen een pluimverontreiniging waar zich stroomafwaarts van de kern lagere gehalten bevinden, zal men een oxidans kiezen met grotere stabiliteit in de bodem capabel om zich te verspreiden om zo een betere kans te maken om in contact te treden met de verontreiniging.

Tabel 5 geeft de relatie weer tussen de gehalten aan verontreiniging (op kwalitatieve schaal) in de bodem en het type van oxidans geschikt voor de behandeling.

Tabel 5: Relatie tussen de aanwezige gehalten en het geschikte type van oxidans (gekopieerd uit de "Code van goede praktijk in situ chemische oxidatie, Project Citychlor, 2013, INTERREG, IVB)

Intensiteit van de verontreiniging	MnO_4^-	H_2O_2	$2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$	O_3
Zeer lage concentratie	++	+++	+++	++	+++
Lage concentratie	+++	+++	+++	+++	+++
Matige concentratie	+++	+++	+++	+++	+++
Hoge concentratie	++	++	++	++	+
Zeer hoge concentratie	++	+	+	++	-

Legende: - = slecht, + = matig, ++ = goed, +++ = heel goed

5 Verontreinigingen en de meest gunstige omstandigheden (kwalitatieve overwegingen)

De techniek van een in situ behandeling door chemische oxidatie kan succesvol toegepast worden voor de behandeling van een grond- en grondwaterverontreiniging als aan volgende voorwaarden wordt voldaan:

- De te behandelen verontreiniging kan gemakkelijk vernietigd worden door een chemische oxidatie. Metaalverontreinigingen bv kunnen niet vernietigd worden door ISCO. Sommige organische verbindingen (zoals lindaan bv) zijn moeilijk oxideerbaar in de bodem.
- De verontreiniging is mobiliseerbaar en beschikbaar voor het in contact komen met het oxidans en is dus niet al te sterk geadsorbeerd aan de vaste fase van de bodem. PCB's bv. kunnen uitgesloten worden van chemische oxidatie want hun beperkte beschikbaarheid in de bodem beperkt een efficiënte behandeling.
- De bron van de verontreiniging is weggenomen op een zodanige manier dat er geen nieuwe nalevering meer is van verontreiniging in de bodem
- De bodem beschikt over een goede doorlatendheid en over een goede infiltratiecapaciteit
- Homogene samenstelling van de bodem: afwezigheid van verschillende textuurlagen of lenzen, afwezigheid van voorkeurskanalen veroorzaakt door ondergrondse kabels en leidingen (zeker indien de injectie van ozon weerhouden wordt)
- Lage gehalten aan organische stof, afwezigheid van veenlenzen of veenlagen met een te hoge adsorptiecapaciteit voor organische verbindingen hetgeen leidt tot een te hoge bodemoxidansvraag.
- Lage gehalten in de bodem aan carbonaten en fosfaten
- Beperkte gehalten aan zware metalen die gevoelig zijn om gemobiliseerd en vrijgezet te worden ten gevolge van de nieuwe bodemcondities die gecreëerd worden: verhoogde redoxpotentiaal, zure pH en het in oplossing gaan van ijzer- en mangaanoxides.
- Snelle grondwaterstromingssnelheid in de bodem
- Voldoende en volledige gegevens verkregen tijdens het karakteriserend bodemonderzoek
- De vuilvracht is homogeen verdeeld, afwezigheid van een belangrijke vrije fase, drijfslag of zaklaag of vastgelegd in holtes, zodanig dat rebound na stopzetting van de behandeling beperkt zal zijn.
- Afwezigheid in de bodem van kabels en leidingen gevoelig voor chemische oxidatie of verwerking ten gevolge van het oxidatieve reagens of omwille van pH schommelingen in de bodem veroorzaakt door de behandeling
- Beperkte diepte van de te behandelen verontreiniging waardoor de budgetten voor injectie riskeren te verhogen

In geval een behandeling de plaatsing vereist van de variant in situ oxidatie + opwarming van de bodem door stoominjectie, moeten volgende gunstige aspecten bijkomend in rekening worden gebracht:

- De thermische conductiviteit van de bodem is goed en homogeen



- Afwezigheid van ondergrondse elementen die aangetast kunnen worden door de temperatuursverhoging: optische vezels, leidingen in PE, leidingen bedekt met isolerende lagen

In geval een behandeling de plaatsing vereist van de variant in situ oxidatie + toevoeging van een oppervlakteactief agens en/of cosolventen, moeten volgende gunstige aspecten bijkomend in rekening worden gebracht:

- Afwezigheid van ondergrondse elementen die aangetast kunnen worden door deze additieven: leidingen, kelders en funderingen bedekt met een isolatie in PE, leidingen bedekt met isolerende lagen....



6 Voorafgaande controle op de haalbaarheid van de techniek

6.1 Keuze van het oxidans in relatie tot het type en de hoeveelheid verontreiniging

De keuze van het oxidans wordt bepaald door meerdere factoren. Men kan de volgende opsommen:

- Het type van de verontreiniging en de hoeveelheid
- De geschatte, benodigde hoeveelheden van het reagens en de prijs van het reagens
- De dichtheid van het reagens
- De te behalen doelstellingen
- De bodemkarakterisatie: pH, gehalten aan zware metalen, gehalten aan organische stof
- De lokale hydrogeologie en geologie

De volgende **tabel 6** geeft een kwalitatieve inschatting van de mogelijkheid om verschillende type bodemverontreiniging te behandelen door in situ chemische oxidatie.

Tabel 6 Kwalitatieve inschatting van de mogelijkheid van vernietiging van verschillende types van verontreiniging door ISCO

Verontreiniging die gemakkelijk vernietigd kan worden door chemische oxidatie	Verontreiniging die vernietigd kan worden door chemische oxidatie maar de efficiëntie is onzeker, dikwijls omwille van bodemkarakteristieken (sterke adsorptie)	Verontreiniging die niet vernietigd kan worden door chemische oxidatie
Chloorethenen BTEX Minerale olie PAK Chloorbenzeen Fenolen MTBE Alcoholen Vrije cyanides	Chloorethanen TNT Pesticides (lindaan)/herbicides PCB Dioxines	Metalen Zouten Voedingsstoffen: nitraten, fosfaten,....

(Bron: "Code van goede Praktijk in situ chemische oxidatie, Draft, 2014 OVAM)

Op een meer precieze manier is het mogelijk een eerste kwalitatieve indicatie te geven over de verwachte efficiëntie van een oxidans voor de behandeling van een specifiek type van verontreiniging. Een dergelijke matrix wordt voorgesteld in onderstaande **tabel 7**.

Tabel 7: Efficiëntie van verschillende oxidantia voor de behandeling van verschillende soorten van verontreiniging

Verontreiniging	MnO ₄ ⁻	H ₂ O ₂	2Na ₂ CO ₃ ·3H ₂ O ₂	Na ₂ S ₂ O ₈	O ₃
Lichte minerale oliën	+	++	++	+++	++
Zware minerale oliën	-	+	+	-/++	+
Benzeen	--	+++	+++	+++	+++
Tolueen, Ethylbenzeen en Xylenen	++	+++	+++	+++	+++
MTBE	-	++	++	+++	++
TBA (tertiair- butyl-alcohol)	--	+	+	+ / ++	+
PAK	++	++	++	++	++
Chloro-ethenen	+++	+++	+++	+++	+++
Chloro-ethanen	--	+ / ++	+	+ / ++	++
PCB's	--	+	+	+	--
Chlorobenzenen	-	+	+	++ / +++	+
Dioxines	--	++	++	+	--
Pentachlorofenol	++	++	++	++	++
Vrije cyanides	++	+++	+++	++	+++
Ftalaten	+	-	-	++	+++

Legende: -- = niet bruikbaar, - = weinig efficiënt, + = matig efficiënt, ++ = efficiënt, +++ = zeer efficiënt

Over het algemeen verkiest men een oxidatief reagens te injecteren waarvan de densiteit dichtbij de verontreiniging aansluit. Deze keuze laat toe dat de kans verhoogt dat het reagens dezelfde verspreidingswegen zal kiezen als de verontreiniging.

6.2 Bodemkarakteristieken van de te behandelen bodems

6.2.1 Fysische bodemkarakteristieken

De samenstelling van de bodem bepaalt de mogelijkheid van verspreiding van het reactieve oxidans. In de verzadigde zone neemt het transport van het reagens vooral plaats via advectie ten gevolge van de beweging van het grondwater. De migratie door diffusie is van belang in slecht doorlatende lagen en bij het in oplossing gaan van verontreiniging vertrekend vanaf puur product.

Drie grote bodemtypes kunnen onderscheiden worden voor het transport van het reagens:

- Formaties met een goede doorlatendheid: zanden en grind (hydraulische conductiviteit > 5x 10⁻⁶ m/s). De dispersie van het reagens wordt vergemakkelijkt en vooral gerealiseerd door advectie. Zowel stabiele als onstabiele oxidantia zouden goede resultaten kunnen geven. Rekening houdend met de hoge verspreidingsnelheid moet er rekening gehouden worden met het verspreidingsrisico van oxidantia buiten de perceelsgrenzen.
- Formaties met een slechte doorlatendheid: leem en klei (hydraulische conductiviteit < 5x 10⁻⁷ m/s). Diffusie neemt een belangrijk deel in het verspreidingsproces van de reagentia.



Rekening houdend met de traagheid van deze wijze van verspreiding, zijn alleen stabiele oxidantia (permanganaat) aangewezen. Onder deze omstandigheden is de behandeling van een verontreiniging door chemische oxidatie minder aangewezen.

- Formaties met een matige tot slechte doorlatendheid: lemig zand en kleiig zand,...In deze formaties hangt de verspreiding van het reagens af van advectie en van diffusie. De keuze van het meest geschikte oxidans hangt af van de heersende condities op de site getest tijdens een pilootproef.

Onderstaande **tabel 8** stelt een kwalitatieve appreciatie voor van de gebruiksmogelijkheden van de verschillende reactieve oxidantia in functie van de doorlatendheid van de te behandelen bodem.

Tabel 8: Keuze van het reactieve oxidans in functie van de doorlatendheid van de te behandelen bodem

Bodemeigenschap	MnO ₄ ⁻	H ₂ O ₂	2Na ₂ CO ₃ ·3H ₂ O ₂	Na ₂ S ₂ O ₈	O ₃
Goede doorlatendheid	+++	+++	+++	+++	+++
Slechte doorlatendheid	++	-	-/+	++	-
Zwakke tot matige doorlatendheid	++/+++	-	+ / ++	++/+++	-

Legende: - = weinig efficiënt, + = matig efficiënt, ++ = efficiënt, +++ = zeer efficiënt

6.2.2 Lokale hydrogeologie

De reactieve oxidantia worden voor het grootste deel toegediend in oplossing of in suspensie. Deze wijze is goed geschikt voor de behandeling van het verzadigde deel van de bodem. Indien de behandeling van de bodem ook de onverzadigde zone van de bodem omvat, verdienen de contacttijd en de omvang van de contactzone met het reagens specifieke aandacht. Het gebruik van een reagens in gasvorm (ozon) kan een antwoord geven op de behandeling van de onverzadigde de zones.

Men herinnert zich dat voor een passieve infiltratie aan de hand van een put, een minimale voortplantingssnelheid van het grondwater van 0,05 m/d nodig is om een voldoende verspreiding van het reagens te verzekeren.

Opm: bij labotesten/pilootproeven dient rekening gehouden te worden met lokale hydrogeologie -> per geologische laag een bodemoxidansvraag bepalen

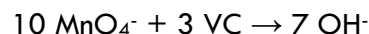
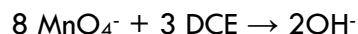
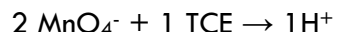
6.2.3 Fysico-chemische eigenschappen van de bodem

De bodem pH:

In situ chemische oxidatie beïnvloedt de bodempH hetzij door het gebruik van zuren dewelke het reactieve oxidans vergezellen hetzij door de productie van protonen en hydroxylionen als resultaat van de oxidatiereactie.

Bijvoorbeeld het gebruik van permanganaat kan de bodempH beïnvloeden volgens het type te oxyderen verbinding zoals volgende reacties aantonen (uitgedrukt in mol).





De impact van deze reacties op de bodemzuurtegraad hangt af van zijn buffercapaciteit, vooral door carbonaten. Carbonaten spelen eveneens een rol als scavenger voor radicalen. Zij beïnvloeden sterk de reactiekinetiek van de oxidatie en wegen op de bodemoxidansvraag van de bodem.

Volgende tabel 9 stelt de mate van efficiëntie voor van de verschillende reactieve oxidantia in functie van de bodempH.

Tabel 9: Efficiëntie van de verschillende oxidantia in functie van de zuurtegraad van de bodem

BodempH	MnO_4^-	H_2O_2	$2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$	O_3
<5	+++	+++	--	+++	+++
5 – 6	+++	+++	+	+++	+++
6 – 7	+++	++	++	+++	+++
7 – 8	+++	++	+++	++	++
8 - 9	+++	-	+++	+ / ++	++
>9	++	--	+++	-	+

Legende: -- = niet bruikbaar, - = weinig efficiënt, + = matig efficiënt, ++ = efficiënt, +++ = zeer efficiënt

Het gehalte aan organische stof

Eén keer toegevoegd aan de bodem, reageren de verschillende oxidantia met de organische stof van de bodem en niet alleen met verontreiniging. Tussen de oxidantia, onderscheidt zich permanganaat met een grote affiniteit voor organische stof. Daarentegenover vertoont persulfaat het minste affiniteit voor organische stof.

De oxidatie van de organische stof vertaalt zich in een verhoging van de bodemoxidansvraag en kan nefaste gevolgen met zich meebrengen zoals:

- Verlies van bodemstructuur en dus van permeabiliteit
- Risico's op brand (in aanwezigheid van veenlagen)
- Vrijzetting van verontreiniging

Met betrekking hiermee, is het mogelijk, zoals aangeduid in onderstaande tabel om voor elk van de oxidantia, een range van organische stof gehalten te onderscheiden die bevorderlijk zijn voor de toepassing van het oxidans.



Tabel 10: Efficiëntie van de verschillende oxidantia in functie van het koolstofgehalte van de bodem

Koolstofgehalte f_{oc} in %	MnO_4^-	H_2O_2	$2Na_2CO_3 \cdot 3H_2O_2$	$Na_2S_2O_8$	O_3
>3	--	--	--	+	--
1-3	-	-	-	++	-
0,3-1	++	++	++	+++	++
0,1-0,3	+++	+++	+++	+++	+++
<0,1	+++	+++	+++	+++	+++

Legende: -- = niet bruikbaar, - = weinig efficiënt, + = matig efficiënt, ++ = efficiënt, +++ = zeer efficiënt

6.3 Beperkende eigenschappen van de te saneren site

- Grootte van de site: De site moet voldoende groot zijn om te voorzien in een stockageplaats en een menginstallatie ter voorbereiding van de reagentia, in een injectie-installatie, pompinstallatie en recuperatie van bodemlucht (in geval van een behandeling met ozon) en vloeistoffen (in geval van een behandeling met recirculatie) evenals een eventuele installatie voor de zuivering van de onttrokken bodemlucht en van opgepompte vloeistoffen en eventueel een installatie voor de aanmaak van stoom.
- Gevoelige omgeving: Op de site en in de omgeving zijn er geen personen of activiteiten die hinder kunnen ondervinden door de injecties en het eventuele pompen: Lawaai van compressoren, pompen en zuiveringsinstallatie, geuren, risico's op emissies van dampen, lekken van ozon,....
- Hindernissen in de ondergrond: Aanwezigheid op de site of in de omgeving van ondergrondse infrastructuur die voorkeurskanalen vormen voor de verspreiding van de reagentia in vloeistof- of in gasvorm: verdeelnetwerk van gas, water , elektriciteit, optische vezels, riolering,...of die net een hindernis vormen voor deze verspreiding (metro of trein)
- Afwezigheid/aanwezigheid van ondergrondse infrastructuur gevoelig voor corrosie door de toepassing van oxidantia of van zuren, van oppervlakte-actieve stoffen of door verhoging van de bodemtemperatuur: tanks, leidingen, metalen platen of gewapend beton.
- Afwezigheid/aanwezigheid van ondergrondse infrastructuur gevoelig voor brand veroorzaakt door het oxidans, door vrijzetting van O_2 , door de verhoging van de temperatuur: houten kisten,....

7 Specifieke controle op de haalbaarheid van de behandeling

7.1 Te meten parameters van de verontreiniging, van de bodem en van de site

Volgende **tabellen 11a, 11b en 11c** stellen de parameters voor die gemeten moeten worden en/of gekwantificeerd voordat een behandeling van de bodemverontreiniging gelanceerd kan worden aan de hand van chemische oxidatie. Deze tabellen geven een checklist weer van gegevens die verkregen moeten worden ofwel tijdens de opeenvolgende studiefases (verkennd onderzoek, gedetailleerd onderzoek, risico-onderzoek) ofwel tijdens het opstellen van een saneringsvoorstel of een risicobeheersvoorstel alvorens er labotesten of pilootproeven kunnen begonnen worden, of voor de behandeling indien deze geen voorstel vereist.

In deze tabellen wordt onderscheid gemaakt tussen 2 niveau's van vereisten:

- Parameters die per definitie verkregen moeten worden door meting of inschatting (grijze markerings)
- Parameters die nuttig geacht worden als ze verkregen worden door meting of inschatting

Tabel 11a: Verontreinigingsparameters die gemeten moeten worden vooraleer een in situ chemische oxidatie begonnen kan worden

Parameters	Onderzoeksmethode	Opmerkingen
Kern van de verontreiniging nog aanwezig of weggenomen	Onderzoek naar de historiek, terreinbezoek	Ter beschikking na het verkennd bodemonderzoek
Grondconcentraties		
Grondconcentraties zijn afgeperkt in het verticale en horizontale vlak	Boringen, staalname en grondanalyses, afperking (krigging)	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist. Ter beschikking na het gedetailleerd onderzoek
Schatting van de restverontreiniging	Op basis van geschatte volumes en gemiddelde concentraties	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het gedetailleerd onderzoek
Grondconcentraties van andere verontreinigingen	Boringen, grondstaalname en analyses van de grondstalen	Voor andere verontreinigingen die gevoelig zijn voor vrijzetting door oxidatie van organische stof, oxiderende of zure omstandigheden. Beschikbaar op basis van het verkennd bodemonderzoek
Grondwaterconcentraties		
Grondwaterconcentraties zijn afgeperkt in het verticale en horizontale vlak	Plaatsing van monitoringpeilputten staalname en analyses, afperking (krigging)	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het gedetailleerd onderzoek
Longitudinale verspreidingssnelheid van de verontreiniging (verspreiding van de pluim volgens de	Modelmatige berekening: Domenico vergelijkingen met invoer van dispersiecoëfficiënten (longitudinaal,	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het risico

Parameters	Onderzoeksmethode	Opmerkingen
grondwaterstromingsrichting)	lateraal en verticaal ... of het gebruik van numerische modellen	onderzoek
Longitudinale verspreidingssnelheid van de verontreiniging (verspreiding van de pluim volgens de grondwaterstromingsrichting)	Opeenvolgende meetcampagnes op een netwerk van monitoringpeilbuizen	
Laterale verspreidingssnelheid in de bodem (laterale verspreiding van de pluim tijdens het migreren)	Modelmatige berekening: Domenico vergelijkingen met invoer van dispersiecoëfficiënten (longitudinaal, lateraal en verticaal ... of het gebruik van numerische modellen	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het risico onderzoek
Laterale verspreidingssnelheid in de bodem (laterale verspreiding van de pluim tijdens het migreren)	Opeenvolgende meetcampagnes op een netwerk van monitoringpeilbuizen	
Verticale verspreidingssnelheid in de bodem (laterale verspreiding van de pluim tijdens het migreren)	Modelmatige berekening: Domenico vergelijkingen met invoer van dispersiecoëfficiënten (longitudinaal, lateraal en verticaal ... of het gebruik van numerische modellen	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het risico onderzoek
Verticale verspreidingssnelheid in de bodem (laterale verspreiding van de pluim tijdens het migreren)	Opeenvolgende meetcampagnes op een netwerk van monitoringpeilbuizen	
Gehaltes in de bodemluchtfase		
Verontreinigingsconcentraties in de bodemluchtfase	Staalname en analyse van de samenstelling van de gasfase	In geval van een ozoninjectie en een bodemluchtexttractie nodig is
In geval van aanwezigheid van vrije fase, residueel (weinig belangrijk)		
Chemische aard van het vrij product	Staalname en analyse van ten minste 3 monsters van het vrij product (drijfslaag of zaklaag)	
Laterale afperking van het vrij product	Detectie van het vrij product aan de hand van peilbuizen/ sondeercampagnes met behulp van MIP sondes (geoprobe) of bodemluchtmetingen in de bodem	
Diktemetingen van de DNAPL	Metingen van de dikte van de DNAPL in een netwerk van peilbuizen of sonderingen	
	=Parameters waarvoor de meting of inschatting standaard nodig zijn	
	=Parameters waarvoor de meting of inschatting nuttig kunnen zijn	



Tabel 10b: Bodemparameters die gemeten moeten worden vooraleer een in situ chemische oxidatie begonnen kan worden

Parameter	Meetmethode	Opmerkingen
Bodemstratigrafie (heterogeniteit en texturele variaties): watervoerende lagen (diepte en vermogen), aquitard, aquicludes	Geologische kaarten en bodemmechanische en sonderingen en beschrijving, analyse van de verschillende bodemlagen	Beschikbaar vanaf het gedetailleerd onderzoek
Stijghoogte van de watervoerende l(a)g(en), hydraulische gradiënt, voortbewegingssnelheid van het grondwater, stromingsrichting, gespannen of semi-gespannen waterlaag	Geologische en geotechnische kaarten, sonderingen en beschrijving van het bodemprofiel, plaatsing van peilbuizen, stijghoogtemetingen en hoogtemeting	Beschikbaar na het gedetailleerd bodemonderzoek
Fysico-chemische parameters: pH, organisch stof gehaltes, ijzergehaltes en andere natuurlijke katalysatoren, carbonaatgehaltes	Boringen, staalnames en analyses van bodemstalen	
Seizoenale variaties van de stijghoogtes	Opvolging van de stijghoogtes tijdens opeenvolgende campagnes	
Grondwateronttrekking in geval een recirculatie overwogen wordt		
Hydraulische conductiviteit	Pomptesten op de aquifer	
Invloedstraal van de onttrekkingsput	Pomptesten op de aquifer	
Fysico-chemische parameters van het op te pompen grondwater: gehaltes aan ijzer, mangaan, arseen, carbonates, zwevende stoffen, pH, Eh en sulfaten		
Bodempluchttrekking indien een ozoninjectie overwogen wordt		
Permeabiliteit voor lucht	Testen rond bodempluchttrekking	
Invloedstraal van een bodempluchttrekkingsput	Testen rond bodempluchttrekking	
Voor een spargingvariant (ozoninjectie)		
Grondwaterkarakteristieken: pH, redoxpotentiaal, Opgeloste ijzer- en mangaangehaltes, carbonaatgehaltes	Plaatsing van peilbuizen, staalnames en analyses	
	=Parameters waarvoor de meting of inschatting standaard nodig zijn	
	=Parameters waarvoor de inschatting of meting nuttig kunnen zijn	



Tabel 10c: Siteparameters die in rekening moeten gebracht worden vooraleer een in situ chemische oxidatie begonnen kan worden

Parameter	Onderzoek en observatiemethode	Opmerkingen
Aanwezigheid van kabels in de bodem ter hoogte van de site en in de onmiddellijke omgeving	Bevraging van de nutsbedrijven, de gemeente	Beschikbaar na het verkennend en gedetailleerd bodemonderzoek
	Detectie op het terrein: trekken van sleuven, CAT-scanner	Beschikbaar na het verkennend en gedetailleerd bodemonderzoek
Aanwezigheid van structuren gevoelig voor chemische oxidatie of bodemverzuring	Inventaris van infrastructuur gevoelig voor corrosie: leidingen, tanks, ijzerwapening van ondergronds beton	
Toegang tot de site voor het nodige materieel en voldoende oppervlakte	Inventaris	
Aanwezigheid van bovengrondse receptoren gevoelig voor geluid, geuren, dampen,... Op de site en in de onmiddellijke omgeving	Inventaris	
In geval van een variant met toevoeging van oppervlakte-actieve stoffen		
Aanwezigheid van structuren gevoelig voor oppervlakte-actieve stoffen	Inventaris van infrastructuur gevoelig voor oppervlakte-actieve stoffen: leidingen omhuld met teer, optische vezels	
In geval van een variant met bodemopwarming		
Aanwezigheid van structuren gevoelig voor de verhoging van de bodemtemperatuur	Inventaris van infrastructuur gevoelig voor de verhoging van bodemtemperatuur: leidingen omhuld met teer, optische vezels	
	Parameters waarvoor de meting of inschatting standaard nodig zijn	
	Parameters waarvoor de meting of inschatting nuttig kunnen zijn	

Volgende opmerkingen kunnen gegeven worden op de tabellen

- Verontreinigingsbron werd weggenomen of niet: zekerheid moet bekomen worden of de residuele verontreinigingsbron al dan niet weg is vooraleer met chemische oxidatie begonnen kan worden
- Zoals reeds eerder vermeld dient in geval een belangrijke hoeveelheid puur product wordt aangetroffen deze vooraf verwijderd te worden vooraleer een chemische oxidatie kan worden opgestart zonder dewelke de hoeveelheden reagens die geïnjecteerd moeten worden en de behandelingstijd die nodig zal zijn vanuit technisch en economisch standpunt niet aanvaardbaar zijn. De voorafgaandelijke verwijdering van puur product kan gebeuren door een andere behandelingsmethode: ontgraving, thermische behandeling, driefase onttrekking. Enkel de aanwezigheid van een weinig belangrijke residuele vrije fase valt onder deze code.

- Chemische aard van de vrije fase indien aanwezig: Er wordt aangeraden om ten minste 3 stalen van deze fase te nemen en te analyseren aan het migratiefront, in het centrum en aan de staart van de pluimverontreiniging. Voor de verontreinigingen die bestaan uit een mengsel van koolwaterstoffen, omwille van verschillende migratiesnelheden van de verschillende verbindingen, zal de samenstelling van de vrije fase verschillen naargelang zijn positie in de migratiepluim. Meerdere analyses geven ook inzicht in de aanwezigheid van gemengde pluimen resulterend van meerdere verontreinigingen, zoals regelmatig vastgesteld op tankstations: diesel+ benzine + smeeroliën.
- Gehaltes aan verontreiniging in de bodemluchtfase: Voor het nemen van bodemluchtstalen wordt verwezen naar de code van goede praktijk n° van Leefmilieu Brussel betreffende grond-, grondwater-, sediment- en bodemluchtstalen. Deze staalnamecampagne moet de gehaltes aan verontreiniging schatten die aanwezig in onttrokken bodemlucht in geval van een behandeling door ozoninjectie en bodemluchtexttractie in het onverzadigde deel van de bodem. Het aantal te nemen en te analyseren stalen hangt af van het voorstel van de expert.
- Voor pomptesten in geval van grondwateronttrekking nodig in geval van een behandeling met ozoninjectie + recirculatie, wordt gerefereerd naar de code van goede praktijk n°1 (oppompen van vloeistoffen in de verzadigde zone).
- Voor pomptesten in geval van bodemluchtexttractie, wordt verwezen naar de code van goede praktijk n°2 (oppompen van gasen in de onverzadigde zone).
- Betreffende de meting van grondconcentraties van verontreinigingen die gevoelig zijn voor vrijzetting en migratie naar de grondwatertafel ten gevolge van de oxidatie van organische stof, verzuring van de bodem en het creëren van oxiderende omstandigheden, wordt het aan de expert overgelaten om op basis van de verkregen analytische resultaten van het verkennend onderzoek of van het gedetailleerd onderzoek te oordelen of deze voldoende zijn om het risico op een kwalitatieve manier in te schatten en of er bijkomende gegevens verworven moeten worden: minimale gehaltes, maximale, gemiddeldes, ruimtelijke verdeling,... vooraleer er labotesten of pilootproeven worden uitgevoerd.

7.2 Noodzaak aan voorafgaande labotesten

Rekening houdend met het belangrijk aantal factoren die tussenkomen in de technische (en financiële) haalbaarheid van de behandelingstechniek chemische oxidatie (bodemtype, verontreinigingstype, adequaatheid tussen het type van reagens en de verontreiniging, de toedieningsmethode van het reagens, de hoeveelheden die moeten toegediend worden,...) is een labotest als eerste etappe in de screening onontbeerlijk.

De te meten parameters en de te rapporteren gegevens tijdens deze fase zijn opgelijst in volgende tabel.

Tabel 12: Labotest over de haalbaarheid van in situ chemische oxidatie: te meten parameters en te rapporteren gegevens

Te meten parameters	Uit te voeren testen	Te rapporteren gegevens
Karakteristieken van het te testen bodemmateriaal	Na homogenisatie ,drogen en eventueel breken, analyse van de fysico-chemische en chemische eigenschappen: pH,	Analysemethodes, grootte van het staal en analyseresultaten: pH, TOC,....

Te meten parameters	Uit te voeren testen	Te rapporteren gegevens
	TOC, te behandelen verontreinigingsconcentraties, gehalten aan verontreiniging gevoelig voor vrijzetting, ijzergehalten en andere katalyserende elementen, carbonaatgehalten	
Karakteristieken van het te testen grondwater	Analyse van de fysico-chemische en chemische eigenschappen: pH, TOC, te behandelen verontreinigingsconcentraties, ijzergehalten en andere katalyserende elementen, carbonaatgehalten	Analysemethodes, grootte van het staal en analyseresultaten: pH, TOC,....
Buffercapaciteit van de bodem	Titratietesten met behulp van verdunde zuren en basen	Titratiecurve en buffercapaciteit (zuur/ en base hoeveelheid toe te voegen per eenheid bodemmassa en per pH eenheid
Buffercapaciteit van het grondwater	Titratietesten met behulp van verdunde zuren en basen	Titratiecurve en buffercapaciteit (zuur/ en base hoeveelheid toe te voegen per eenheid bodemmassa en per pH eenheid
Bodemoxidansvraag	Bodemoxidansverbruik en afwezigheid van verontreiniging: batchtesten	Verhouding bodem/ oxyderende bodemoplossing, gehalte van het oxidans in de oplossing, duurtijd van de behandeling, oxidatietype, pH tijdens de behandeling
Oxidantvraag van het grondwater	Bodemoxidansverbruik en afwezigheid van verontreiniging: batchtesten	Verhouding grondwater/ oxyderende bodemoplossing, gehalte van het oxidans in de oplossing, duurtijd van de behandeling, oxidatietype, pH tijdens de behandeling
Oxidatie efficiëntie voor verwijdering van de verontreiniging in de bodem	Residuele bodemgehalten na behandeling, verbruikte hoeveelheden oxidans, effecten op de pH, productie van tussenproducten, gehalte aan reactieproducten (Cl^- en SO_4^{2-}): Batchtesten	Finale gehalten aan verontreiniging, verhouding bodem/oxidatieoplossing, gehalten aan oxidant in de oplossing, vertrekpH, gehalten aan katalysator, finale pH, gehalten aan eventuele tussenproducten, gehalte reactieproducten, duurtijd en voorwaarden (t) van de test. Bodemoxidansvraag. Vergelijking met een "blanco"
Oxidatie efficiëntie voor	Residuele bodemgehalten na	Finale gehalten aan



Te meten parameters	Uit te voeren testen	Te rapporteren gegevens
verwijdering van de verontreiniging in het grondwater	behandeling, verbruikte hoeveelheden oxidans, effecten op de pH, productie van tussenproducten, gehalte aan reactieproducten (Cl^- en SO_4^{2-}): Batchtesten	verontreiniging, verhouding water/oxidatieoplossing, gehalten aan oxidant in de oplossing, vertrekpH, gehalten aan katalysator, finale pH, gehalten aan eventuele tussenproducten, gehalte reactieproducten, duurtijd en voorwaarden (t) van de test. Bodemoxidansvraag. Vergelijking met een "blanco"
Gevolgen van de verhoogde mobiliteit van andere polluenten	Niet overwogen verontreinigingen die een interventie vragen ten gevolge van de behandeling (Cr, As, organische verbindingen)	Finale gehalten in de oplossing in contact met de bodem wat betreft metalen (Cr, As,...) en in organische verbindingen die mogelijks problematisch kunnen worden na behandeling. Vergelijking met een "Blanco"
Gevolgen van de behandeling voor de hydrogeologische eigenschappen van de bodem	Kolomtesten: Metingen van de hydraulische conductiviteit voor en na passage van een oplossing met oxidantia	Evolutie van de hydraulische conductiviteit en vergelijking met een blanco test. Dimensionering van de kolomtest, debieten (initieel en finaal), hydraulische druk, duur van de behandeling, hoeveelheden en gehalten aan oxidantia, pH initieel en finaal
Specifiek geval in geval van een behandeling met ozon	Ozonbehandeling (5%) en verontreinigd grondwater en behandeling met ozon (5%) op een mengsel van vochtige bodem met gedemineraliseerd water en behandeling met ozon (5%) op een mengsel van droge bodem met gedemineraliseerd water en een zuurstof behandeling op een mengsel van vochtige bodem met gedemineraliseerd water	Ozondosering in het grondwater, Ozondosering in de bodem, belang van de degradatie van het ozon, massabalans: chemische degradatie, vervluchting en biodegradatie
In geval van een toediening van een oppervlakte-actieve stof		
Optimale hoeveelheden toe te voegen	Tijdens de oxydatietest op bodem en grondwater, wordt een bijkomende variabele getest: de hoeveelheid toegevoegd oppervlakte-actief agens	Finale gehalten aan verontreiniging, verhouding bodem (+ grondwater)/ oxyderende oplossing, gehalten aan oxidans in de oplossing, vertrekpH, gehalte aan katalysator, finale pH, gehalten aan eventuele tussenproducten, gehalten aan reactieproducten,



Te meten parameters	Uit te voeren testen	Te rapporteren gegevens
		duur en voorwaarden (t) van de test. Oxidansvraag van het verontreinigde water. Vergelijking met een "blanco". Initiële en finale hoeveelheden van de surfactants.

Bovenstaande tabel roept volgende opmerkingen op:

- Het is zeer zelden dat een behandeling met chemische oxidatie enkel de opgeloste verontreinigingen saneert. Over het algemeen is het de verzadigde zone (vaste bodemmatrix + grondwater) die door de behandeling gevisieerd wordt. De onderverdeling die in bovenstaande tabel gemaakt werd tussen een behandeling van de bodem en van het grondwater is bijgevolg volledig theoretisch. In de praktijk is het bodem + grondwatermengsel (in variërende verhoudingen te rapporteren) dat getest wordt.
- Volgende opmerkingen worden onder de aandacht gebracht:
 - Verbruik van oxidant = (Hoeveelheid van het ingebrachte oxidans – de hoeveelheid overblijvend oxidans)/ per eenheid van bodemmassa
 - Algemene bodemoxidansvraag = (Verbruik van het oxidans – verlies aan oxidans door decompositie)/ per eenheid van bodemmassa. Het verlies aan oxidans door decompositie, vervluchtiging ...wordt geschat door een behandeling "blanco", waarbij dezelfde hoeveelheid oxidans wordt ingebracht en waarbij dezelfde experimentele condities op worden toegepast maar in afwezigheid van bodem
 - De algemene bodemoxidansvraag wordt onderverdeeld in 2 grootheden: de bodemoxidansvraag (zoals ingeschat door inbreng van een bodemstaal zonder verontreiniging) en de oxidansvraag door de verontreiniging.
- Titratietesten op bodem en grondwater of op een mengsel van deze 2 geven een aanduiding van de hoeveelheden zuur en base die moeten toegepast worden op de bodem om zure voorwaarden te verkrijgen die optimaal worden geacht voor de uitvoering van een oxidatie
- Tijdens de inschatting van de efficiëntie van een oxidatie, is er de mogelijkheid om de verkregen resultaten te vergelijken met "blanco" testen waar bij deze laatste de verontreinigde bodem (met of zonder grondwater) onderworpen wordt aan dezelfde experimentele voorwaarden maar in afwezigheid van oxidans. Enkel deze reële efficiëntie laat toe het belang te beoordelen om een behandeling uit te voeren met chemische oxidatie en dit in vergelijking met bv een gestimuleerde natuurlijke afbraak
- Het onderzoek naar en de analyse van tussenproducten van een chemische reactie moet gebaseerd zijn op beschikbare gegevens uit de literatuur. De expert zal de keuze en weerhouden opties verantwoorden.
- Over het algemeen kiest men experimentele condities die de condities van de te behandelen bodem benaderen: voorwaarden van temperatuur, duurtijd van de sanering die overeenkomt met de verblijftijd van de verontreiniging in de bodem,... Bijvoorbeeld de bodemvraag naar permanganaat inschatten op basis van een bodembehandeling van 2 à 3 dagen zal weinig representatieve resultaten opleveren voor de werkelijkheid op het terrein. In geval van toepassing van een bodemopwarming door stoominjectie, dient de experimentele bodemtemperatuur de verwachte bodemtemperatuur tijdens de behandeling te benaderen.
- Het belang van kolomtesten die de daling van hydraulische conductiviteit moeten inschatten als resultaat van de behandeling (structuurverlies, neerslag van MnO_2 ,...) wordt

overgelaten aan de beoordeling van de expert rekening houdend met de variabele representativiteit van dit type van test en in functie van het bodemtype en van de experimentele voorwaarden.

7.3 Noodzaak van piloottest en minimale eigenschappen van de test

In de mate dat de resultaten verkregen tijdens de fase van de labotest veelbelovend zijn, is het noodzakelijk om een fase van piloottest op het terrein uit te voeren om een meer betrouwbare inschatting te krijgen van de resultaten dan degene die verkregen werden tijdens de labtest.

In geval van de aanwezigheid van een belangrijke drijfslag dient deze vooraf behandeld te worden vóór de uitvoering van een piloottest.

De parameters die tijdens de uitvoering van een piloottest moeten bepaald worden, worden in de hiernavolgende tabel weergegeven.

Tabel 13: Te bepalen parameters tijdens piloottesten voor in situ chemische oxidatie

Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
In geval van infiltratie (passief of actief)		
Beschrijving van de installatie	Beschrijving van de installatie: infiltratieputten (aantal, ligging, diameter, diepte, lengte van het filter, kleistop in de annulaire ruimte, kop), monitoringpeilbuizen: (aantal, situering, diameter, diepte, lengte van het filter, filteromstorting, annulaire opvulling, top), opvolgingsinstallatie van geïnfiltreerde debieten (type, situering), opvolgingsinstallatie voor de stijghoogtes nabij de infiltratiefilter	De ligging van de verschillende opvolgingspeilputten worden toegevoegd op een tekening als onderdeel van het voorstel
Behandelingsparameters	Type van het oxidans, samenstelling van de geïnjecteerde vloeistof: gehalten aan oxidant, aan katalysator, aan zuur, aan base, eventueel aan oppervlakte-actieve stof. Infiltratiedebieten en drukken	
Te meten parameters	Debieten en gecumuleerde infiltratievolumes, stijghoogteniveau's nabij de injectieputten. Te meten parameters nabij monitoringpeilputten: zuurstofgehalten, gehalten aan oxidans, aan eventuele	

Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
	oppervlakte-actieve stoffen, katalysatoren en te saneren verontreiniging, reactieproducten (Cl^- , SO_4^{2-} , ...), tussenproducten, andere verontreinigingen, pH, Eh, T° . Staalname en analyses van restverontreiniging in de bodem	
Te berekenen parameters	Invloedstraal van de injectieputten. Verbruik van oxidans in de bodem (en grondwater). Massabalans: verlaging van de vuilvracht in het bodemvolume beïnvloed door het oxidans, benodigde hoeveelheid oxidans om de totale vuilvracht te verwijderen, te injecteren vloeistofvolumes, aantal infiltratieputten en optimaal infiltratiedebiet. Schatting van de behandelingsduur	
In geval van infiltratie (passief of actief) + recirculatie		
Beschrijving van de installatie	Beschrijving van de installatie: infiltratieputten en onttrekkingsputten (aantal, ligging, diameter, diepte, lengte van het filter, kleistop in de annulaire ruimte, kop), monitoringpeilbuizen: (aantal, situering, diameter, diepte, lengte van het filter, filteromstorting, annulaire opvulling, top), opvolgingsinstallatie van geïnfilterde en opgepompte debieten (type, situering), opvolgingsinstallatie voor de stijghoogtes in de behandelingszone, persleidingen van het opgepompte water (type en ligging), zuiveringsinstallatie van het opgepompte water (ligging, beschrijving, behandelde debieten), ligging van het lozingspunt van het gezuiverde water	De ligging van de verschillende opvolgingspeilputten worden toegevoegd op een tekening als onderdeel van het voorstel
Behandelingsparameters	Type van het oxidans, samenstelling van de geïnjecteerde vloeistof: gehalten aan oxidant, aan katalysator, aan zuur, aan base, eventueel aan oppervlakte-actieve	



Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
	stof. Infiltratie- en onttrekkingsdebieten	
Te meten parameters	Debieten en gecumuleerde infiltratievolumes, debieten en gecumuleerde onttrekkingsvolumes, stijghoogteniveau's nabij de behandelingszone. Te meten parameters in het grondwater nabij monitoringpeilputten en onttrekkingsputten: zuurstofgehaltes, gehalten aan oxidans, aan eventuele oppervlakte-actieve stoffen, katalysatoren en te saneren verontreiniging, reactieproducten (Cl^-, SO_4^{2-}, ...), tussenproducten, andere verontreinigingen, pH, Eh, T°. Staalname en analyses van restverontreiniging in de bodem. Verontreinigingsgehalten in het geloosde water	
Te berekenen parameters	Invloedstraal van de injectieputten en de onttrekkingsputten. Circulatiesnelheid van het grondwater en van het oxidans. Verbruik van oxidans in de bodem (en grondwater). Massabalans: verlaging van de vuilvracht in het bodemvolume beïnvloed door het oxidans, benodigde hoeveelheid oxidans om de totale vuilvracht te verwijderen, te injecteren vloeistofvolumes, aantal infiltratieputten en optimaal infiltratiedebiet. Aantal extractieputten en optimaal onttrekkingsdebet. Schatting van de behandelingsduur	Opstellen van isohypsen in de pilootzone
In geval van een directe injectie in de bodem onder druk (verzadigde zone)		
Beschrijving van de installatie	Beschrijving van de installatie: monitoringpeilbuizen: (aantal, situering, diameter, diepte, lengte van het filter, filteromstorting, annulaire opvulling, top), opvolgingsinstallatie van geïnfilterde debieten (type,	De ligging van de verschillende opvolgingspeilputten worden toegevoegd op een tekening als onderdeel van het voorstel



Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
	situering), opvolgingsinstallatie voor de stijghoogtes nabij de infiltratiefilter	
Behandelingsparameters	Type van het oxidans, samenstelling van de geïnjecteerde vloeistof: gehalten aan oxidant, aan katalysator, aan zuur, aan base, eventueel aan oppervlakte-actieve stof. Infiltratiedebieten en drukken	
Te meten parameters	Debieten en gecumuleerde infiltratievolumes, stijghoogteniveau's nabij de injectieputten. Te meten parameters nabij monitoringpeilputten: zuurstofgehalten, gehalten aan oxidans, aan eventuele oppervlakte-actieve stoffen, katalysatoren en te saneren verontreiniging, reactieproducten (Cl^- , SO_4^{2-} , ...), tussenproducten, andere verontreinigingen, pH, Eh, T°. Staalname en analyses van restverontreiniging in de bodem	Rapportage van incidenten: terugvloeien van de geïnjecteerde vloeistof naar het oppervlakte, verstopping van de bodemporiën nabij de injectiepunten of omgekeerd fracturatie van de formatie of voorkeursstromingskanalen
Te berekenen parameters	Invloedstraal van de injectieputten. Verbruik van oxidans in de bodem (en grondwater). Massabalans: verlaging van de vuilvracht in het bodemvolume beïnvloed door het oxidans, benodigde hoeveelheid oxidans om de totale vuilvracht te verwijderen, te injecteren vloeistofvolumes, aantal infiltratieputten en optimaal infiltratiedebiet. Schatting van de behandelingsduur	
In geval van een injectie met ozon in de verzadigde zone van de bodem (sparging)		
Beschrijving van de installatie	Beschrijving van de installatie: ozoninjectieputten in de verzadigde zone en bodemluchtonttrekkingsfilters (aantal, ligging, diameter, diepte, lengte van het filter, kleistop in de annulaire ruimte, kop), monitoringpeilbuizen: (aantal, situering, diameter, uitrusting en diepte, manometers,	De ligging van de verschillende elementen worden toegevoegd op een tekening als onderdeel van het voorstel



Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
	stijghoogtesondes, staalnamepunten en temperatuursondes), installatie om het geïnjecteerde gasdebiet te meten alsook de onttrokken gasdebieten (type, ligging), persleiding voor het onttrokken gas (type en ligging), zuiveringsinstallatie van de onttrokken bodemlucht (ligging, beschrijving, behandelde bodemlucht en condens, ligging van het lozingspunt voor de gezuiverde lucht	
Behandelingsparameters	Gehalte aan geïnjecteerd ozongas, injectiedebieten en drukken. Onderdruk in de extractieputten en onttrekkingsdebieten. Eventuele toevoeging van waterstofperoxide (perozon)	
Te meten parameters	Debieten en gecumuleerde injectievolumes aan ozon, debieten en cumulatief onttrokken volumes bodemlucht, (onder)drukkniveau's, stijghoogteniveau's in de behandelingszone. Te meten parameters nabij monitoringpeilputten: zuurstofgehaltes, gehalten aan te saneren verontreiniging, aan reactieproducten (Cl^- , SO_4^{2-} , ...), aan tussenproducten, andere verontreinigingen, pH, Eh, T° . Staalname en analyses van restverontreiniging in de bodem. Gehaltes aan verontreiniging in de onttrokken bodemlucht geloosd na zuivering. Hoeveelheden en gehalten aan verontreiniging in het condens	In geval van gevoelige receptoren nabij de testzone, meting van ozongehaltes en vluchtige verontreinigingen in de atmosfeer
Te berekenen parameters	Invloedstraal van de spargingputten en bodemluchtonttrekkingsfilters. Verbruik van oxidans in de bodem (en grondwater). Massabalans: verlaging van de vuilvracht in het bodemvolume beïnvloed door het oxidans, benodigde hoeveelheid	

Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
	oxidans om de totale vuilvracht te verwijderen, gasvolumes verrijkt met ozon om te injecteren, aantal spargingputten en optimaal injectiedebiet en druk. Aantal onttrekkingsfilters en optimaal onttrekkingsdebieten en onderdruk. Schatting van de behandelingsduur	
Variant: bodemopwarming door stoominjectie		
Beschrijving van de installatie	Beschrijving van de stoominjectieputten: ligging en diepte van de injectiefilter	
Bijkomend te meten parameters	Temperatuur van de geïnjecteerde stoom, injectiedruk, debieten en cumulatieve volumes van geïnjecteerde stoom	
Conclusies van de piloottest		
	Haalbaarheid van de behandelingstechniek: aantal infiltratieputten, onttrekkingsputten, injectieputten, behandelingsduur, volumes onttrokken vloeistof en bodemlucht, condens, te verwijderen puur product, volumes oxidatievloeistof, te injecteren ozon en of stoom, benodigd energieverbruik	
	Ontwerp van de installatie full scale: aantal en afstand tussen de injectieputten, infiltratieputten en extractieputten voor vloeistoffen en voor bodemlucht, debiet aan oxidansvloeistof of ozon om te injecteren, debiet aan oxidansvloeistof of ozon om uit de bodem te onttrekken, te behalen (onder)druk en eventueel temperatuur, geraamde behandelingsduur, dimensionering van de zuiveringsinstallatie, hoeveelheden vloeistof te zuiveren en te lozen, ... Definiëring van op te volgen parameters	
	Massabalans en te verwachten resultaten: massa aan geoxideerde verontreiniging, massa en gehalte	



Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
	aan residuele verontreiniging	

Bovenstaande tabel roept volgende commentaren op:

- De tabel omvat een checklist van parameters die a priori in rekening moeten gebracht worden, gemeten en gerapporteerd moeten worden tijdens de uitvoering van een piloottest. Het is aan de expert om de modaliteiten te definiëren en te verantwoorden van de uitvoering van de piloottest op basis van de in de bovenstaande tabel gepresenteerde checklist.
- De duur van de piloottest varieert in functie van de levensduur van het in de bodem geïnjecteerde oxidans en van de migratiesnelheid van het reagens
- De frequentie van de te meten parameters tijdens deze piloottesten zal het onderwerp zijn van een voorstel van de expert
- Tijdens de opvolging van de piloottest zal de berekening van de cumulatief geïnjecteerde en onttrokken gasvolumes en van de gehalten aan oxidans en verontreinigingen in de gassen systematisch uitgevoerd worden na correctie van de gegevens tegenover standaardomstandigheden van druk en volume.

8 Beschrijving van een standaard installatie

Een installatie voor een in situ chemische oxidatie omvat typische volgende elementen:

8.1 Actieve of passieve infiltratie

Een installatie waar de te injecteren oplossing met oxidantia voorbereid en geconditioneerd wordt met eventueel een stockage eenheid voor de reagentia.

- Eén of meerdere infiltratieputten (of eerder zelden infiltratiedrains), gesitueerd stroomopwaarts van of in de kern van de verontreiniging. De putten zijn uitgerust met filters die een toediening van het oxidans garanderen over de volledige vlek. De afstanden tussen de infiltratieputten om het oxidatief reagens in te brengen wordt berekend voor de volledige vlek.
- In geval van injectie onder druk wordt een eenheid aangebracht (pomp of compressor) uitgerust met manometer en een inregelsysteem voor drukken en voor de detectie van lekken.
- Een inregelinstallatie voor infiltratie kan gevarieerd worden uitgevoerd: elektrische sensoren (max. niveau – min niveau) in infiltratieputten verbonden met een elektronische box voor de inregeling van pompen, timers, sequentiële systemen die de een seriële aansturing garanderen over de verschillende infiltratiezones,.....

8.2 (Actieve of passieve) infiltratie + recirculatie

Aanvullend bij de infrastructuur hierboven beschreven, omvat de installatie:

- Eén of meerdere interceptieputten of drains, stroomafwaarts van de pluim gelegen tussen deze en een eventuele gevoelige receptor. De putten moeten een voldoende diepte hebben om de volledige te behandelen pluim te kunnen capteren. De afstand tussen deze onderscheppingsinstallaties en de uitbreiding ervan worden zodanig berekend dat de volledige pluim in zijn breedte afgevangen wordt.
- Een pompinstallatie voor het opvangen water: pomp in pompputten, vacuümpomp verbonden met 1 of meerdere putten,.... Een manier om geluidshinder te verminderen is om bovengrondse pompen te monteren in geluidgeïsoleerde containers of kasten.
- Een inregelinstallatie voor het regelen van het pompen kan gevarieerd worden uitgevoerd: vlotters voor pompinstallaties, elektrische sensoren (max. niveau – min niveau) in de putten, sensoren voor de verschillende elementen van de zuiveringsinstallatie, verbonden met een elektronische box voor de inregeling van pompen, timers, sequentiële systemen die de een seriële aansturing garanderen over de verschillende infiltratiezones,.....
- Collectoren en persleidingen van het opgepompte water zijn verbonden met een pomp en zijn uitgerust met terugslagkleppen en debietmeters die toelaten het instantaan debiet en het cumulatief opgepompt volume op te volgen op het niveau van individuele putten of rechtstreeks op de pompen.
- Staalnamepunten voor het opgepompte water, geplaatst op individuele putten, persleidingen, aan de ingang van de zuivering en op het niveau van het lozingspunt (of stroomopwaarts van een re-infiltratieinstallatie).
- Een zuiveringsinstallatie voor het opgepompte water



N.B. Een aparte code van goede praktijk behandelt de zuivering van oppervlaktewaters en andere vloeistoffen opgepompt uit de bodem.

8.3 Directe injectie onder druk

- Een installatie waar de te injecteren oplossing met oxidantia voorbereid en geconditioneerd wordt met eventueel een stockage eenheid voor de reagentia
- Een mobiele machine die de directe injectie garandeert van het reagens in de bodem of evenwaardig) over een grid van injectiepunten door het inbrengen van een gefilterde injectiebuis die een injectie onder druk toelaat over een gewenst bodeminterval. De injectie kan gerealiseerd worden in 1 keer (éénmalige injectie over gans het te behandelen bodeminterval) of sequentieel (injectie over verschillende opeenvolgende bodemlagen door het regelmatig uitnemen van de injectiebuis).
- Een inregelinstallatie voor de geïnjecteerde debieten en injectiedruk en een noodstop in geval van reflux van de reactieve oplossing naar het oppervlakte of in geval van een daling van de druk (injectie in een voorkeurskanaal)
- De grootte van het grid van het netwerk van injectiepunten wordt bepaald op basis van de resultaten van de pillootest.

8.4 Ozoninjectie in de verzadigde zone

- Een eenheid voor de aanmaak van gas aangerijkt met ozon (procedé UV of corona ontlading)
- Eén of meerdere injectieputten van het oxydatiegas in de verzadigde deel van de bodem en een drukinstallatie uitgerust met manometers, debietmeters en temperatuursondes. De druk en de injectiedebieten wordt bepaald op basis van de resultaten van de pillootest. De constructie van injectieputten veronderstelt het gebruik van corrosieresistente materialen: staal uit inox, teflon,....
- Eén of meerdere bodemluchtextractieputten in de onverzadigde zone van de bodem. De afstanden tussen de extractieputten worden berekend om al de gassen van de ozoninjectie te capteren (niet gereduceerd ozon, oxidatieproducten in de gasfase, andere gassen die vrijkomen als resultaat van de injectie).
- Een bodemluchtexttractie-installatie: vacuümpomp, ventilatoren, verbonden met één of meerdere bodemluchtexttractieputten. Een manier om geluidshinder te verminderen is om bovengrondse pompen te monteren in geluidgeïsoleerde containers of kasten.
- De inregelinstallatie voor de ozoninjectie en de bodemluchtexttractie kan gevarieerd worden uitgevoerd: elektrische sensoren (max. niveau – min niveau) in peilputten die de grondwaterstandsverhoging opvolgen, sensoren verbonden met manometers op verschillende onderdelen van de installatie, sensoren voor de verschillende elementen van de zuiveringsinstallatie, verbonden met een elektronische box voor de inregeling van pompen, timers, sequentiële systemen die de een seriële aansturing garanderen over de verschillende onttrekkingszones en injectiezones.....
- Collectoren en leidingen van de onttrokken bodemlucht zijn verbonden met de bodemluchtexttractie-eenheid, met de extractieputten en met de bodemluchtzuivering. Deze bij voorkeur ondergronds aangelegde leidingen zijn uitgerust met terugslagkleppen. Tijdens hun plaatsing wordt aandacht besteed aan het vermijden van bochten of verbuigingen waar condens zich zou kunnen ophopen. Debietmeters worden voorzien die toelaten het instantaan debiet en het cumulatief opgepompt volume op te volgen op het niveau van individuele putten of rechtstreeks op de pompen. Manometers worden ook geïnstalleerd op het niveau van de onttrekkingseenheid, de putten en op verschillende punten op de installatie om de efficiënte werking van de onttrekkingseenheid te



controleren en lekken van inkomende lucht te detecteren. Eén of meerdere explosiemeters worden voorzien aan de ingang van de bodemluchtextractie-eenheid. Vooraleer ze door de bodemluchtextractie-eenheid doorgaan, passeren de gassen een lucht/water afscheider voor de opvang van het condens of passeren ze een vochtafscheider.

- Bodemluchtzuivering: meestal wordt gebruik gemaakt van een luchtactiefkool filter voor de zuivering van de onttrokken bodemlucht alvorens deze in de atmosfeer wordt geloosd. In geval van hoge concentraties kunnen andere zuiveringsmethodes gebruikt worden: catalytische verbranding, thermische oxidatie, biofiltratie, adsorptie op harsen,....
- Staalnamepunten voor de bodemlucht op verschillende individuele putten of verschillende pompen worden voorzien evenals op het niveau van de bodemluchtzuivering voordat de bodemlucht in de atmosfeer geloosd wordt. De zuivering is uitgerust met inregelapparatuur, alarm en automatische stop in geval van defecten.
- Een opvolgingssysteem

8.5 In situ oxidatie + bodemopwarming (door stoominjectie)

Aanvullend bij de infrastructuur voorzien voor de toevoeging van oxidantia in de verzadigde zone van de bodem:

- Een voorbereidende installatie om stoom te injecteren in de onverzadigde of verzadigde zones van de bodem
- Een netwerk van injectieputten volgens een grid. Uit de resultaten van de piloottest worden de injectiedebieten van stoom en de onderlinge afstand tussen de individuele putten vastgelegd. De injectieputten zijn uitgerust met sondes om de temperatuur van de geïnjecteerde stoom te meten, met debietmeters en met manometers.

Het opvolgingssysteem van de behandeling bevat onder meer temperatuursondes op het niveau van controlepunten in de bodem en op het niveau van extractieputten.

Algemene opmerking:

Over het algemeen is de gebruikte uitrusting in de installaties standaard: putten, pompen, debietmeters, LEL meters, manometers, luchtactiefkoolfilterszijn beschikbaar in de handel in alle maten waarbij een zeer groot performantiegamma wordt aangeboden. Geen enkele beperking moet in rekening gebracht worden op vlak van dimensionering van de uitrusting tijdens het uitwerken van de behandeling en bestekken.

Voor directe injectie daarentegen zijn uitrustingen beschikbaar volgens vastgelegde maten: diameters van de boorkoppen, lengte van individuele elementen, injectiepomp (druk en debieten), vermogen van luchthamers,.... De maximale injectiediepte die technisch en economisch realiseerbaar is hangt af van het bodemtype: aanwezigheid van harde lagen, compacte lagen. In slappe grond, wordt de haalbaarheid van de techniek onzeker op dieptes groter dan 25m.

Voor de injectie van ozon door sparging, beschikken de productie-eenheden van ozon over een vooraf gedefinieerde capaciteit. De dimensionering van de uitrusting moet met deze beperking rekening houden.



9 Beschrijving van de installatie die geplaatst zal worden

De installatie die geplaatst zal worden in het kader van de behandeling wordt beschreven waarbij tenminste volgende elementen geleverd worden, weergegeven in onderstaande tabel. De installatie zal beschreven worden door de expert met behulp van een technisch schema .

Tabel 14: Aan te leveren gegevens betreffende het te plaatsen behandelingssysteem

Onderdeel van de installatie	Element	Gegevens over de installatie	
Te gebruiken oxidans	Oxidant type	Type van het oxidans en gehalte in het geïnjecteerde reagens, Voorziene hoeveelheden van het oxidans op basis van de bodemoxidansvraag en de vuilvracht	
	Additieven	Type van het additief: katalysator, zuur, base gehalten in de toegediende oplossing	
	Installatie om de reagentia in voor te bereiden	Ligging en omschrijving	
	Ozon	Toestel dat ozon aanmaakt. Gehalte in het geïnjecteerde gas. Met of zonder waterstofperoxide (perozon)	
Toedieningsmethode	Passieve of actieve infiltratie	Ligging en afstand tussen de verschillende putten, diepte van de blinde stukken en filters, diameter en type van de buis, dimensies van de openingen van de filter, type en positie van de grindomstorting, type en positie van de kleistop (bentoniet), type van putdeksel (vloeiستofdicht in geval van een infiltratie onder druk), bescherming van de put (wachtkamer, koker met slot,...). Plaats van de manometers, debietmeters. Infiltratie en opgepompte debieten. Infiltratiedruk	

Onderdeel van de installatie	Element	Gegevens over de installatie	
	Infiltratie en recirculatie	Ligging en afstand tussen de verschillende putten, diepte van de blinde stukken en filters, diameter en type van de buis, dimensies van de openingen van de filter, type en positie van de grindomstorting, type en positie van de kleistop (bentoniet), type van putdeksel (vloeistofdicht in geval van een infiltratie onder druk), bescherming van de put (wachtkamer, koker met slot,...). Plaats van de manometers, debietmeters. Infiltratie en opgepompte debieten. Infiltratiedruk	
	Directie injectie	Ligging en afstand tussen de verschillende putten Diepte van de injectie. Beschrijving van de uitrusting (verbuizing, filter,...), injectiemethode (in 1 stuk of sequentieel). Infiltratiedruk en injectiedebiet. Infiltratiedruk. Geïnjecteerde hoeveelheid per punt.	
	Ozoninjectie	Ligging en afstand tussen de verschillende infiltratieputten en bodemluchtexttractiefilters. Voor al de putten: diepte van de blinde stukken en filters, diameter en type van de buis, dimensies van de openingen van de filter, type en positie van de grindomstorting, type en positie van de kleistop (bentoniet), type van putdeksel (vloeistofdicht in geval van een infiltratie onder druk), bescherming van de put (wachtkamer,	

Onderdeel van de installatie	Element	Gegevens over de installatie	
		koker met slot,...). Plaats van de manometers, debietmeters en temperatuursondes. Debieten en injectiedruk. Debieten en onderdruk in de bodemluchtexttractiefilters. Permanente of intermitterende methode.	
	Grondmixing	Beschrijving van de menginstallatie (avegaar,...) diameter van individuele voerbuizen, diepte van het mengsel, hoeveelheden ingebracht per m ³ bodem	
Pompen	Pompen voor actieve infiltratie, directie injectie, recirculatie, bodemluchtexttractie en ozonsparging	Type en ligging van de pompen: vacuumpompen, ventilators,...verbonden met 1 of meerdere putten,water/luchtafscheider, vochtafscheider. (Onder)druk niveau. Operationele modus: continu - intermitterend	Het pompvermogen moet berekend worden in functie van het injectie- of extractiedebiet, van de behandelingsduur en van de toegestane verlaging
Inregelsysteem	Inregeling van de behandeling	Pompsystemen werken continue of in periodes (verlaging van het grondwaterniveau), gelijktijdig of sequentieel pompen in de verschillende secties van de installatie. Aan- en uitslaan volgens het niveau in de putten en volgens de gemeten drukken	
Nagestreefd doel	Behandeling van de onverzadigde zone	Te bereiken behandelingsdoelstelling in de bodem op een duurzame manier, huidige omvang van de verontreiniging. Voorziene duur	
	Behandeling van de verzadigde zone	Te bereiken behandelingsdoelstelling in het grondwater en eventueel in de bodem op een duurzame manier, huidige	



Onderdeel van de installatie	Element	Gegevens over de installatie	
		omvang van de verontreiniging. Voorziene duur	
Variant bodemopwarming	Stoominjectie	Ligging van de injectiepunten en beschrijving (diameters, dieptes, afstanden,...). Temperatuur van de geïnjecteerde stoom, drukken en injectiedebieten	
Installatie voor de opvang van opgepompte vloeistoffen	Persleidingen voor onttrokken vloeistof of bodemlucht	Type, afmetingen en ligging van de persleidingen, anti-vries installatie, anti-vandalisme installatie. Ligging van de controlestaalnamepunten; Ligging van de debietmeters, de manometers en van de temperatuursonde	
Zuiveringsinstallatie van opgepompte vloeistoffen		Deze rubriek valt onder een andere code van goede praktijk	
Lozingsnorm	Condens en gezuiverd water	De lozingsnormen voor het lozen van gezuiverd water in de riolering of op oppervlaktewaters komt overeen met de saneringsnormen van de AGRBC van 29/03/2018 hetgeen de interventienormen en saneringsnormen bepaalt	
	Pure fases worden gescheiden	Overname volgens de geldende wetgeving: overname van het afval, gevaarlijke afval, energetische waarde	
	Gezuiverde bodemlucht	Volgens de code van goede praktijk 'lozingsnormen in het kader van saneringswerken en risicobeheerswerken'	
Installatie tegen geluidsoverlast	Maatregelen tegen geluidsoverlast	Type van de voorziene maatregel: anti-cavities in pompen, geluidisolatie van	



Onderdeel van de installatie	Element	Gegevens over de installatie	
		de pompen	
	Maatregelen tegen geur	Eventueel voor vluchtige verbindingen (aceton, aromaten,...)	



10 Specifieke veiligheids- en stabiliteitsmaatregelen en maatregelen tegen overlast: geuren, lawaai, stof,

10.1 Punten om mee rekening te houden

In functie van het huidige en toekomstige landgebruik van de site en van de onmiddellijke omgeving dienen volgende punten in rekening te worden gebracht:

- Risico's verbonden met de toxische/gevaarlijke aard van de gebruikte reagentia
- Hinder voor de luchtkwaliteit op niveau van de werf en zijn onmiddellijke omgeving: gehalten aan schadelijke gassen en geuren, stoffen
- Brand en explosiegevaar
- Risico's op verspreiding van de oxidantia
- Geluidshinder
- Risico's voor nabijgelegen grondwaterwinningen

10.2 Risico's verbonden met de gevaarlijke of toxische aard van de gebruikte reagentia

De risico's waarmee rekening moet gehouden worden spruiten voort uit de stockage, de manipulatie en het gebruik van gevaarlijke en/of toxische verbindingen. Deze risico's moeten geïdentificeerd en geëvalueerd worden tijdens de voorbereiding van de behandeling.

De risico's verbonden met de aard van de gebruikte substantie kunnen afgeleid worden uit de Engelse MSDS (Material Safety Data Sheets) . Deze fiches waarvan de inhoud opgesteld werd door de Europese reglementering REACH, geeft fysische eigenschappen, gegevens over toxiciteit, ecotoxiciteit, risico's verbonden met de stockage, gegevens rond reactiviteit,..... individuele substantia evenals de vooraf te nemen beschermingsmaatregelen en de te nemen corrigerende maatregelen in geval van een ongeluk.

De risico- en veiligheidszinnen op de verpakking van de reagentia geven eveneens aanwijzingen over de risico's verbonden aan de formulering van de substantia aanwezig op de werf.

Specifiek te nemen maatregelen tijdens de uitvoering van een werf moeten beschreven worden saneringsvoorstel of het risicobeheersvoorstel of dienen voor een behandeling die geen voorstel vereist in de daaropvolgende rapporten worden toegelicht. Deze maatregelen moeten onder andere betrekking hebben op:

- De stockage en de manipulatie van gevaarlijke of toxische substantia: verspreidingsrisico, lekken,...
- Neutralisering van de substanties die de werf verlaten
- Blootstellingsrisico's voor personen: ademhaling, huidcontact
- Persoonlijke beschermingsmaatregelen: PBM, meetapparatuur voor de omgevingslucht
- Informatie en vorming van personen die nabij of met deze gevaarlijke of toxische substantia moeten werken



10.3 Hinder voor de luchtkwaliteit (in geval van een ozonbehandeling)

De lucht die in direct contact staat met installaties voor de productie en de injectie van ozon kunnen verontreinigd zijn met dit gas dat irritaties en permanente verwondingen kan veroorzaken aan de longen en aan de ogen vanaf gehalten van 2 ppm (vol/vol).

De onttrokken bodemlucht – in geval van een behandeling met ozon- kan zich ook verspreiden indien de onttrekkingsinstallatie niet luchtdicht is of tijdens het transport naar de bodemluchtzuivering. De installaties moeten getest worden op hun lekdichtheid om het risico op verspreiding van schadelijke dampen of geuren naar receptoren aanwezig op de site en onmiddellijke omgeving tegen te gaan.

Zoals gepreciseerd zal worden in de sectie rond opvolging, zal tijdens de opstart van de behandeling, en 2 weken nadien, de luchtkwaliteit nabij de bodemluchtzuiveringinstallaties gecontroleerd worden indien gevoelige receptoren aanwezig zijn op de werf (woonzones, scholen,...). In geval van herhaalde klachten van buurtbewoners betreffende de aanwezigheid van geurhinder bij de zuivering, moet een meetcampagne rond luchtkwaliteit opgestart worden.

De geloosde lucht vanuit de bodemluchtzuivering moet regelmatig gemeten worden.

Stofhinder wordt niet verwacht tijdens een bodemluchtonttrekking of ozoninjectie.

10.4 Risico's rond brandgevaar en explosies

Oxidatiereacties, vooral in de aanwezigheid van katalysatoren, kunnen hitte genereren. De vrijzetting van zuurstof die samengaat met deze reacties kan leiden tot brand in aanwezigheid van brandbare materialen in de bodem: infrastructuur in plastic, houten panelen, teerverhardingen, puin met kooldeeltjes,....

De bodemluchtextractie die samengaat met de ozoninjectie kan leiden tot het creëren van explosieve condities in de leidingen en ophoping van opgepompte gassen (dampen van vluchtige verbindingen aangerijkt met zuurstof). Explosiemeters moeten op verschillende plaatsen geïnstalleerd worden: ter hoogte van de collectoren van de onttrokken bodemlucht vooraleer ze de blower passeren, ter hoogte van de zuiveringsinstallatie.... Deze explosiemeters moeten verbonden zijn met een alarmsysteem, automatische opening en luchttoevoer en indien nodig een stop in geval de LEL-waarde van 10% wordt overschreden.

De uitvoering van ozoninjecties zonder bodemluchtextractie in de onverzadigde zone van de bodem, worden a priori uitgesloten in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Het risico op explosies van ontvlambaar bodemgas in potentiële accumulatiezones: kelders, holtes,...kan niet onderschat worden.

10.5 Risico's op verspreiding van oxidantia

Er moet rekening gehouden worden met ongecontroleerde verspreiding van geïnfilterde of geïnjecteerde oxidantia langsheen voorkeurskanalen (leidingen, riolen,...). De oxidantia



kunnen schade toebrengen aan ondergrondse infrastructuur gevoelig voor corrosie (metalen leidingen, houders,...). In geval van toevoeging van surfactanten moeten de risico's in acht genomen worden voor teeromhullingen. Het risico op het onverwacht verschijnen van ozon in accumulatiezones, waar personen kunnen komen en waar geen bodemluchtexttractie is voorzien, moet eveneens voorzien worden.

10.6 Geluidshinder

Geluidshinder kan ontstaan voor personen die in de nabijheid wonen van de werf tengevolge van draaiende pompen en elektriciteitsgenerator in zones die niet met het net verbonden zijn. Geschikte maatregelen moeten genomen worden om de geluidshinder te minimaliseren:

- Plaatsing van de installaties op een redelijke afstand van woonzones
- Regeling van debieten om cavitatiefenomenen te vermijden ter hoogte van de pompen
- Plaatsing van lawaaiërige installaties in geluidsgeïsoleerde kisten of containers
- Regeling van de uren waarop de installatie draait ten einde nachtlawaai te vermijden in geval van een intermitterend onttrekkingsregime

10.7 Risico's voor nabijgelegen grondwaterwinningen

Installaties van drinkwaterwinning worden beschouwd als prioritaire receptoren. Andere installaties gebruikt voor privédoeleinden moeten ook in rekening gebracht worden als ze dreigen te worden beschadigd ten gevolge van een behandeling door in situ chemische oxidatie.

Deze installaties zijn gevoelig om beschadigd te worden indien de behandeling van het grondwater onvoldoende is ter hoogte van de verontreinigingskern en/of een migrerende pluim in de richting van de winningen. Het risico op migratie van reactieve oxydantia (oxidans, katalysator, zuren, oppervlakte-actieve agentia) buiten de interventiezone moet ook in rekening gebracht worden.

De controle van de grondwaterkwaliteit stroomafwaarts van de interventiezone moet ook uitgevoerd worden.

10.8 Conformiteit met bestaande wetgeving

Betreffende de emissie in de atmosfeer, worden de lozingsnormen voor uitgestoten gassen weergegeven in de code van goede praktijk 'lozingsnormen in het kader van saneringswerken risicobeheerswerken'.

Luchtkwaliteitsnormen voor emissies in de buitenlucht resulterend van een injectie-installatie van ozon en een bodemluchtexttractie-eenheid zijn niet beschikbaar in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Als eerste benadering kunnen de gemeten concentraties van vluchtige verontreiniging vergeleken worden met de waarden die beschikbaar zijn op het S-RISK platform © (Substance data sheets, <https://s-risk/be/documents>). In geval van een overschrijding van deze normen moet de lektheid van de installatie getest worden. In zones met hoge luchtverontreiniging (intensief verkeer, industriezones,...) zal een controlecampagne gestart worden indien de luchtverontreiniging nabij de installaties de achtergrondluchtverontreiniging overstijgt over een periode van 24u.

Betreffende geurhinder bestaat er in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest geen wettelijke geurdrempel voor de verschillende verbindingen. De lekdichtheid van de installatie zal gecontroleerd worden in geval van klachten van de omwonenden.

Betreffende geluidsoverlast wordt het toegelaten geluidsniveau op werven die het grondwater behandelen door middel van pompen gereguleerd door de Ordonnantie van 17.07.1997 en door zijn uitvoeringsarrest van 24 november 2002 betreffende de strijd tegen lawaaihinder en tegen trillingen veroorzaakt door installaties. In zones met een te hoog omgevingslawaai (wegen, actieve industriële zones,...) volstaat het om de gemeten waarde afkomstig van de impact van de installaties te vergelijken met het omgevingslawaai.



11 Begeleiding van de behandeling

11.1 Opvolgingsmaatregelen: type van de installatie

11.1.1 Actieve of passieve infiltratie

De opvolging berust op volgende elementen:

- Een netwerk van peilputten om de evolutie op te volgen van stijghoogtes en grondwaterparameters tijdens de behandeling. Binnen verontreinigingsvlek, stroomopwaarts en stroomafwaarts ervan. In elk geval zullen er –in geval van gevoelige receptoren- alarmpeilputten geplaatst worden tussen de verontreinigingsvlek en de receptor.
- Een apparaat om de debieten en de cumulatieve volumes van de geïnfiltreerde reagentia te meten
- Een installatie om de infiltratiedrukken van de reagentia te controleren (in geval van een actieve infiltratie)
- In geval van een injectie van reagentia met katalysator die hitte kan veroorzaken (bv. Fenton's reagens), temperatuursondes om de bodemtemperatuur op te volgen: in de injectieputten en opvolgingspeilputten.

11.1.2 Actieve of passieve infiltratie + recirculatie

- Een netwerk van peilputten om de evolutie op te volgen van stijghoogtes en grondwaterparameters tijdens de behandeling. Binnen verontreinigingsvlek, stroomopwaarts en stroomafwaarts ervan. In elk geval zullen er –in geval van gevoelige receptoren- alarmpeilputten geplaatst worden tussen de verontreinigingsvlek en de receptor.
- Een apparaat om de debieten en de cumulatieve volumes van de geïnfiltreerde reagentia te meten
- Een installatie om de infiltratiedrukken van de reagentia te controleren (in geval van een actieve infiltratie)
- Een apparaat om de debieten en de cumulatieve volumes van het opgepompte grondwater te meten ter hoogte van individuele putten of groepen van putten (indien verbonden met dezelfde pomp)
- Staalnamepunten voor het opgepompte water gemonteerd op de uitgang van de individuele putten of groepen van putten (indien verbonden met dezelfde pomp), aan de ingang van de zuivering en aan de uitgang ervan.
- In geval van een injectie van reagentia met katalysator die hitte kan veroorzaken (bv. Fenton's reagens), temperatuursondes om de bodemtemperatuur op te volgen: in de injectieputten en opvolgingspeilputten.

11.1.3 Directe injectie

- Een netwerk van peilputten om de evolutie op te volgen van stijghoogtes en grondwaterparameters tijdens de behandeling. Binnen verontreinigingsvlek, stroomopwaarts en stroomafwaarts ervan. In elk geval zullen er –in geval van gevoelige receptoren- alarmpeilputten geplaatst worden tussen de verontreinigingsvlek en de receptor.



- Een apparaat om de debieten en de cumulatieve volumes van de geïnjecteerde reagentia te meten in elk injectiepunt
- In geval van een injectie van reagentia met katalysator die hitte kan veroorzaken (bv. Fenton's reagens), temperatuursondes om de bodemtemperatuur op te volgen: in de injectieputten en opvolgingspeilputten.

11.1.4 Grondmixen

- Een apparaat om de geïncorporeerde hoeveelheden oxidans te meten in elke mengcilinder.

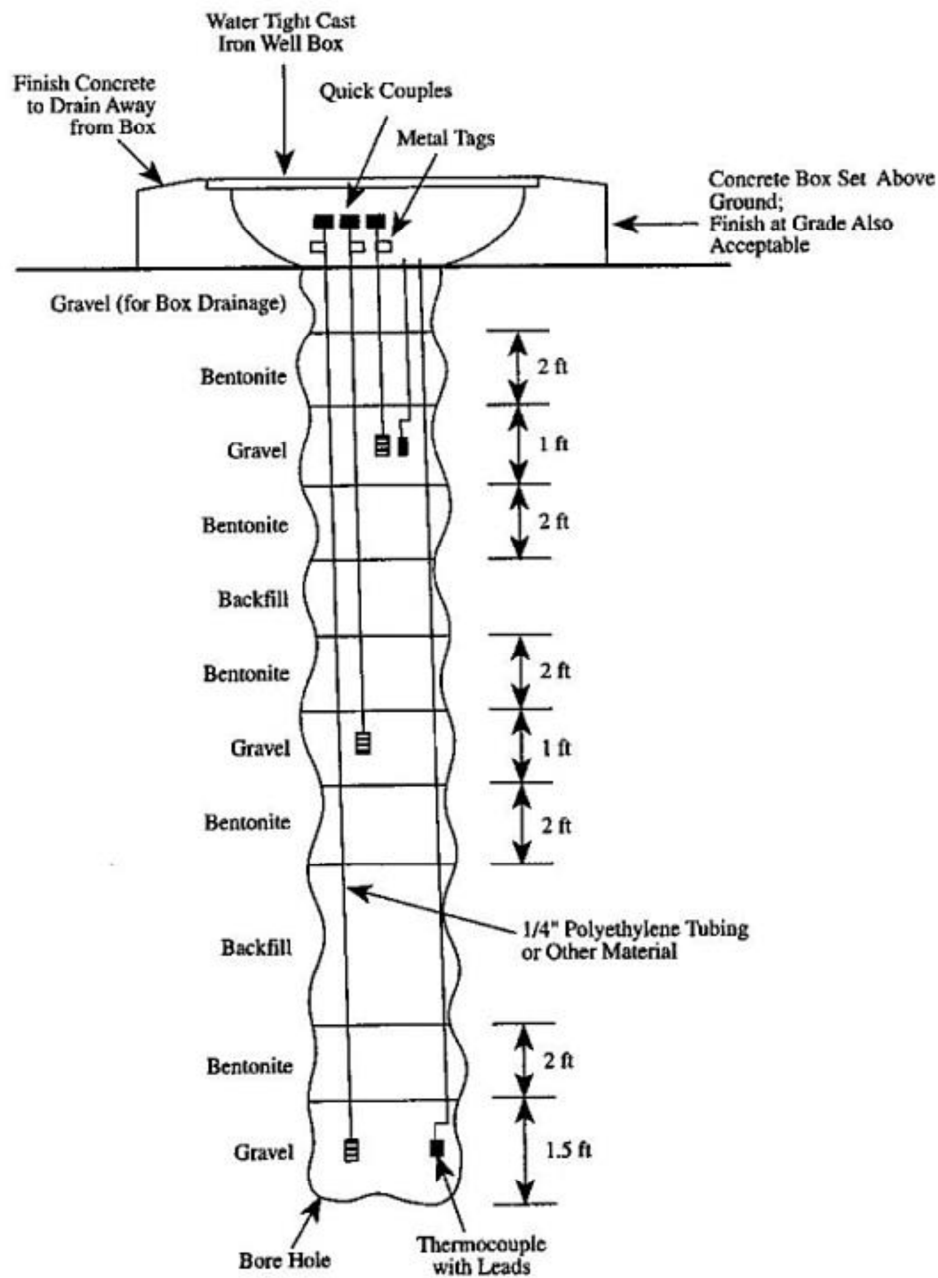
11.1.5 Ozoninjectie in de verzadigde zone + bodemluchtextractie in de onverzadigde zone

- Ter hoogte van de injectieputten, debietmeters die de debieten van geïnjecteerd ozon meten evenals cumulatieve volumes, manometers die de injectiedruk aanduiden net als temperatuursondes.
- Nabij injectieputten, zijn er observatiepunten uitgerust met manometers met gasmeetsondes die toelaten om de evolutie te meten van de invloed van de injectie in termen van druk en zuurstofgehaltes op verschillende afstanden van de injectieputten
- Een netwerk van observatieputten verdeeld over de verontreinigde zone om de evolutie van volgende parameters op te volgen: drukken, concentraties in de bodemlucht en eventueel temperatuur. Een voorbeeld van een meetpunt is weergegeven in onderstaande figuur (uittreksel uit "Vacuum Vapor Extraction", Springer, 1994)



Figuur 1: Voorbeeld van de uitrusting van een meetpunt

Typical Vapor Extraction Monitoring Point Construction Detail



- In geval van een belangrijke verontreinigingsvlek laten deze meetpunten toe de parameters op te volgen op verschillende dieptes, de sondes worden geplaatst op verschillende dieptes in hetzelfde boorgat of in nabijgelegen boorgaten. Het aantal, de densiteit en de ligging van de meetpunten vormen onderwerp van een voorstel opgesteld door een expert.
- Peilputten gesitueerd nabij extractieputten en nabij hermetisch gesloten injectieputten, om de stijging van de grondwatertafel te controleren tengevolge van een onderdruk.
- Een meetinstallatie om onttrokken gasdebieten te meten. Deze metingen zijn vergezeld van druk- en temperatuurmetingen om de resultaten uit te drukken tegen normale temperatuur en drukwaarden.
- Een staalnamepunt voor de onttrokken gassen uit elk van de onttrekkingsputten (of groep van putten) dat toelaat de hoeveelheid onttrokken vuilvracht te meten
- Een staalnamepunt voor gezuiverde gassen voor lozing in de atmosfeer
- Een staalnamepunt voor condenswater voor de zuivering op site of verwerking ex situ

11.1.6 ISCO + Variant bodemopwarming door stoominjectie

Bovenop de elementen zoals beschreven in voorgaande secties betreffende de verschillende toedieningsmethodes van reagentia, de opvolgingsinstallatie zullen volgende elementen worden ingesloten:

- Ter hoogte van injectieputten, debietmeters voor het meten van debieten en van cumulatieve volumes van geïnjecteerde stoom, manometers die de injectiedruk weergeven evenals temperatuursondes
- Verschillende meetpunten voor de opvolging van de bodemtemperatuur

11.2 Opvolgingsmaatregelen: op te volgen parameters van de behandeling en frequentie

De op te volgen parameters tijdens de behandeling en de frequentie van de metingen zijn weergegeven in de volgende tabel:

Tabel 15: Frequentie en op te volgen parameters van de behandeling

Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
Infiltratie actief en passief				
Geïnfilteerd debiet van reagens door de infiltratieputten	Debietmeter ter hoogte van de putten	Debiet (m ³ /s) en cumulatief volume	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	In geval van infiltratie van lange duur
Opvolging stijghoogtes	Meting van het grondwaterniveau ter hoogte van de controlepeilputten	Stijghoogte (m)	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Opstellen van een kaart met isohypsen en grondwaterstromingsrichting

Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
Parameters van het grondwater	Staalname en analyse van het grondwater	Gehaltes aan verontreiniging die onderwerp vormden van de interventie, reactieproducten van een gedeeltelijke oxidatie, residuele oxidantia, katalysatoren en andere stimulantia/stabilisatoren, pH, Eh, O ₂ opgelost, elektrische conductiviteit, T°, TOC, Metalen waarvan de mobiliteit beïnvloed wordt door de redoxvoorwaarden, reactieproducten: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Parameters en frequentie afhankelijk van gebruikte oxidans
Bodemtemperatuur in de opvolgingspeilputten	Temperatuursondes in de controlepunten	T° in C°	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Indien bodemopwarming een belangrijk risico is (Fentons reagens)
Restconcentraties in de bodem	Boringen en grondstaalnames en analyses op verontreiniging die een interventie vereisen	Gehaltes aan verontreiniging die een interventie vereisen (kg/kg of kg/m ³)	Bij opstart van de behandeling en daarna elke 3 maanden	
Schatting van de hoeveelheid vuilvracht weggenomen door de oxidatie	Residuele gehaltes in de bodem en in het grondwater in de interventiezone	Massabalans: initiële hoeveelheden aan verontreiniging, residuele hoeveelheden, vernietigde hoeveelheden (Kg)	Alle 3 maanden	
Directe injectie onder druk				
Hoeveelheid reagens geïnfiltrerd per	Debietmeter ter hoogte van de injectieinstallatie	Hoeveelheid per injectiepunt	Tijdens de injectie	



Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
injectiepunt				
Parameters van het grondwater	Staalname en analyse van het grondwater	Gehaltes aan verontreiniging die onderwerp vormden van de interventie, reactieproducten van een gedeeltelijke oxidatie, residuele oxidantia, katalysatoren en andere stimulantia/stabilisatoren, pH, Eh, O ₂ opgelost, elektrische conductiviteit, T°, TOC, Metalen waarvan de mobiliteit beïnvloed wordt door de redoxvoorwaarden, reactieproducten: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Parameters en frequentie afhankelijk van gebruikte oxidans
Bodemtemperatuur in de opvolgingspeilputten	Temperatuursondes in de controlepunten	T° in C°	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Indien bodemopwarming een belangrijk risico is (Fentons reagens)
Restconcentraties in de bodem	Boringen en grondstaalnames en analyses op verontreiniging die een interventie vereisen	Gehaltes aan verontreiniging die een interventie vereisen (kg/kg of kg/m ³)	Bij opstart van de behandeling en daarna elke 2 maanden	
Schatting van de hoeveelheid vuilvracht weggenomen door de oxidatie	Residuele gehaltes in de bodem en in het grondwater in de interventiezone	Massabalans: initiële hoeveelheden aan verontreiniging, residuele hoeveelheden, vernietigde hoeveelheden (Kg)	Bij opstart van de behandeling en daarna elke 2 maanden	Schatting van de behandelingsduur
Infiltratie actief en passief + recirculatie				
Geïnfiltreerd debiet van reagens door	Debietmeter ter hoogte van de putten	Debiet (m ³ /s) en cumulatief volume	De 2 eerste maanden	In geval van infiltratie van lange



Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
de infiltratieputten			(startfase): wekelijks, daarna maandelijks	duur
Opvolging stijghoogtes	Meting van het grondwaterniveau ter hoogte van de controlepeilputten	Stijghoogte (m)	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Opstellen van een kaart met isohypsen en grondwaterstromingsrichting
Parameters van het grondwater	Staalname en analyse van het grondwater	Gehaltes aan verontreiniging die onderwerp vormden van de interventie, reactieproducten van een gedeeltelijke oxidatie, residuele oxidantia, katalysatoren en andere stimulantia/stabilisatoren, pH, Eh, O ₂ opgelost, elektrische conductiviteit, T°, TOC, Metalen waarvan de mobiliteit beïnvloed wordt door de redoxvoorwaarden, reactieproducten: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Parameters en frequentie afhankelijk van gebruikte oxidans
Bodemtemperatuur in de opvolgingspeilputten	Temperatuursondes in de controlepunten	T° in C°	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Indien bodemopwarming een belangrijk risico is (Fentons reagens)
Restconcentraties in de bodem	Boringen en grondstaalnames en analyses op verontreiniging die een interventie vereisen	Gehaltes aan verontreiniging die een interventie vereisen (kg/kg of kg/m ³)	Bij opstart van de behandeling en daarna elke 3 maanden	
Schatting van de hoeveelheid	Residuele gehaltes in de bodem en in het	Massabalans: initiële	Alle 3 maanden	



Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
vuilvracht weggenomen door de oxidatie	grondwater in de interventiezone	hoeveelheden aan verontreiniging, residuele hoeveelheden, vernietigde hoeveelheden (Kg)		
Onttrokken debiet per pompput	Debietmeter ter hoogte van de put	Debiet (m³/s) en cumulatief volume	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Gemeten gehalten in het opgepompte water	Staalname van het opgepompte grondwater	Gehalten aan verontreiniging die onderwerp vormden van de interventie, reactieproducten van een gedeeltelijke oxidatie, residuele oxidantia, katalysatoren en andere stimulantia/stabilisatoren, pH, Eh, O ₂ opgelost, elektrische conductiviteit, T°, TOC, Metalen waarvan de mobiliteit beïnvloed wordt door de redoxvoorwaarden, reactieproducten: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Parameters en frequentie afhankelijk van gebruikte oxidans
Gehalten gemeten in het geloosde water	Staalname aan de uitgang van de zuiveringsinstallatie	Gehalten aan verontreiniging die onderwerp vormden van de interventie, reactieproducten van een gedeeltelijke oxidatie, residuele oxidantia, Metalen waarvan de mobiliteit beïnvloed wordt door de	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	



Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
		redoxvoorwaarden, reactieproducten: Cl^- , SO_4^{2-}		
Grondmischen				
Hoeveelheden ingebracht in de bodem	Toedieningsfilter	Hoeveelheid ingebracht oxidans (kg/m^3 bodem)	Tijdens het mixen	
Residuele gehalten in de bodem	Boringen en grondstaalnames en analyses op verontreiniging die een interventie vereisen	Gehaltes aan verontreiniging die een interventie vereisen (kg/kg of kg/m^3)	Bij opstart van de behandeling en daarna 2 maanden na toediening	
Schatting van hoeveelheden verontreiniging vernietigd door de oxidatie	Residuele gehalten in de bodem en in het grondwater in de interventiezone	Massabalans: initiële hoeveelheden aan verontreiniging, residuele hoeveelheden, vernietigde hoeveelheden (Kg)	2 maanden na toediening	
Grondwaterparameters	Staalname en analyse van het grondwater	Gehaltes aan verontreiniging die onderwerp vormen van de interventie, reactieproducten van een gedeeltelijke oxidatie, residuele oxidantia, katalysatoren en andere stimulantia/stabilisatoren, pH, Eh, O_2 opgelost, elektrische conductiviteit, T° , TOC, Metalen waarvan de mobiliteit beïnvloed wordt door de redoxvoorwaarden, reactieproducten: Cl^- , SO_4^{2-}	Bij opstart van de behandeling en daarna 2 maanden na toediening	Parameters en frequentie afhankelijk van gebruikte oxidans Indien grondwater wordt tegengekomen ondiep onder de mixingzone
Ozonsparging en bodemluchtextractie				
Meting van de geïnjecteerde	Debietmeters en manometers ter	Debiet (m^3/s) en cumulatief volume	De 2 eerste maanden	



Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
gasdebieten en injectiedrukken ter hoogte van de injectieputten	hoogte van de putten	geïnjecteerd ozon	(startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Meting van drukken in de controleputten geplaatst dichtbij de injectieputten	Manometers ter hoogte van de controleputten	Druk in de verzadigde zone en controle van de invloedstraal	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Opvolging van de efficiëntie van de sparging
Meting van O ₂ in de controleputten geplaatst dichtbij de injectieputten	Staalname en analyse op O ₂	Gehalte aan O ₂ en controle van de luchtcirculatie in de verzadigde zone	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Opvolging van de efficiëntie van de sparging
Opvolging van de stijghoogtes	Meting van het grondwaterniveau ter hoogte van de controlepeilputten	Stijghoogte (m)	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Opstellen van een kaart met isohypsen en grondwaterstromingsrichting
Grondwaterparameters	Staalname en analyse van het grondwater	Gehaltes aan verontreiniging die onderwerp vormen van de interventie, reactieproducten van een gedeeltelijke oxidatie, residuele oxidantia, katalysatoren en andere stimulantia/stabilisatoren, pH, Eh, O ₂ opgelost, elektrische conductiviteit, T°, TOC, Metalen waarvan de mobiliteit beïnvloed wordt door de redoxvoorwaarden, reactieproducten: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Parameters en frequentie afhankelijk van gebruikte oxidans
Bodemtemperatuur in de	Temperatuursondes in de controlepunten	T° in C°	De 2 eerste maanden	



Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
monitoringspeilputten			(startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Residuele gehalten in de bodem	Boringen en grondstaalnames en analyses op verontreiniging die een interventie vereisen	Gehalten aan verontreiniging die een interventie vereisen (kg/kg of kg/m ³)	Bij opstart van de behandeling en daarna alle 3 maanden	
Schatting van de hoeveelheden verontreiniging vernietigd door de oxidatie	Residuele gehalten in de bodem en in het grondwater in de interventiezone	Massabalans: initiële hoeveelheden aan verontreiniging, residuele hoeveelheden, vernietigde hoeveelheden (Kg)	Alle 3 maanden	Schatting van de behandelingsduur
Onttrokken debieten uit de extractieputten	Debietmeter ter hoogte van de putten	Debiet (m ³ /s) en cumulatief volume	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Onderdruk en temperatuur ter hoogte van de extractieputten	Manometer en temperatuursondeter hoogte van de controleputten	Onderdruk (Pa) en temperatuur (°C)	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Voor de berekening van de onttrokken volumes en genormaliseerde eenheden (standaardT° en standaarddruk)
Gehalte aan verontreiniging in de gassen onttrokken door elk van de putten	Staalname ter hoogte van de extractieput en analyse van de stalen. Actief kool staalnamebuisje, Drägerbuisje, PID, FID	Gehalten aan verontreiniging die een interventie vereisen	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Schatting van de hoeveelheid verontreiniging onttrokken per put en in totaal	Som van de gemeten hoeveelheden voor de verschillende controle periodes	Massabalans: onttrokken hoeveelheden aan verontreiniging en residuele hoeveelheid aan verontreiniging	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	



Op te volgen parameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
Gehaltes in de geloosde gassen	Staalname ter hoogte van de ingang en de uitgang van de zuiveringsinstallatie en analyse op de verontreinigingsgehalten. Actief kool staalnamebuisje, Drägerbuisje, PID, FID	Gehaltes aan verontreiniging die een interventie vereisen (kg/m ³)	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Hoeveelheid verbruikt actief kool	Hoeveelheden actief kool gebruikt in de filter	Kg	Volgens levering en de verwerkingsbonnen	
Hoeveelheid en gehalte aan verontreiniging in het condens	Hoeveelheid gerecupereerde vloeistof en de gehalten aan verontreiniging	m ³ en kg/m ³	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	Bepalen van verwerkingsstroom op of buiten de site
Bodemluchtextractie + bodemopwarming: Bijkomende parameters				
Debiten en injectiedrukken van stoom in de injectiepunten	Debietmeter en manometer ter hoogte van de injectiepunten	Geïnjekteerde debieten (m ³ /s) en injectiedruk (Pa)	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Temperatuursmeting ter hoogte van de stoominjectieputten	Temperatuursondes op de injectieputten	T° in C°	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	
Meting van de bodemtemperatuur in de monitoringsputten	Temperatuursondes op de controleputten	T° in C°	De 2 eerste maanden (startfase): wekelijks, daarna maandelijks	

Deze tabel roept volgende overwegingen op:

- De analyse van de verontreinigingsgehalten op de bodemlucht zal uitgevoerd worden in het labo nadat de stalen genomen werden op actiefkoolbuisjes of in zakjes. De expert kan toch voorstellen om directe metingen uit te voeren op de gehalten door middel van een FID, PID of Drägerbuisjes, als hij kan aantonen dat er goede



overeenkomst bestaat tussen de directe metingen en de labo-analyses. Voor verontreinigingen die voorkomen als mengsels zoals koolwaterstoffen - rekening houdend met de evolutie van de samenstelling tijdens de voortgang van de behandeling dient de overeenkomst tussen directe metingen en labo-analyses periodiek te worden bijgesteld volgens een door de expert voorgestelde frequentie. De metingen naar de gehalten O_2 , CO_2 in de bodemlucht kunnen gedaan worden door directe metingen.

- Controlestalen genomen van de bodem en van het grondwater kunnen nog reactieve oxidantia bevatten die de oxidatie van de verbindingen kunnen verder zetten gedurende de periode van stockage en transport naar het labo. Om deze te neutraliseren, dient men een reductans toe te voegen aan het staal op het ogenblik van de staalname (bv. natriumthiosulfaat).
- Niet zelden meet men een lichte stijging in de verontreinigingsgehalten bij de start van een in situ oxidatie. De oxidatie van organische stof - soms sneller dan deze van de verontreinigingen - verklaart deze waarneming omwille van desorptie van geadsorbeerde verontreinigingen.
- De frequentie van staalnamecampagne en bodem- en grondwateranalyses kan aangepast worden op voorstel van de expert, op basis van de duur en de reactiviteit van het oxidans in de bodem.

Voor de staalname van bodem, grondwater en bodemlucht, wordt verwezen naar de code van goede praktijk n° 3 van Leefmilieu Brussel "Staalname van de bodem, het grondwater, slib en bodemlucht". Voor de analyse van deze stalen wordt verwezen naar de code van goede praktijk n° 4 van Leefmilieu Brussel "Code van goede praktijk voor analysemethoden....".

De opvolgingsparameters tijdens de behandeling met betrekking tot hinder zijn opgenomen in de volgende tabel.

Tabel 16: Frequentie en opvolgingsparameters tijdens de behandeling met betrekking tot hinder

Opvolgingsparameters	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Opmerkingen
Gehalten aan O_3 en verontreinigingen in de atmosfeer	Luchtstaalname nabij de zuivering of in gevoelige zones en analyse van de stalen via actiefkoolaadsorptiebuisjes, Drägerbuisjes, PID en FID	Gehalten aan verontreinigingen die een interventie vereisen (kg/m^3)	Tijdens de startfase, daarna na 2 weken en vervolgens alle 3 maanden	
Geluidsmeting	Installatie van een meetnet	lawaainiveau	In geval van klachten van omwonenden	
Geurmeting-	Installatie van een meetnet	Geurniveau	In geval van klachten van omwonenden	

12 Rapportage, optimalisatie en corrigerende maatregelen

12.1 Rapportage

Conform het voorschrift van het [besluit van de Brusselse Hoofdstedelijke Regering van 29/03/2018 tot vaststelling van de type-inhoud van het risicobeheersvoorstel, van het saneringsvoorstel, de aangifte voorafgaand aan de behandeling van beperkte duur en de modaliteiten van de bekendmaking door aanplakking van de behandeling van beperkte duur](#), impliceert de plaatsing van een in situ oxidatie de indiening bij Leefmilieu Brussel van één of meerdere tussentijdse rapporten:

- Een tussentijds rapport dat de opstartfase afsluit. Men neemt aan dat een periode van 2 maanden normaal is voor de uitvoering van een opstartfase. Op voorstel van de expert kan deze worden aangepast.
- Andere tussentijdse rapporten indien de behandeling zich uitspreidt over meerdere jaren (weinig voorkomend voor een in situ chemische oxidatie). De frequentie van deze tussentijdse rapporten wordt niet gepreciseerd in het Arrest. Deze frequentie wordt geargumenteed door de expert. Een tussentijds rapport zal worden opgemaakt en worden voorgelegd aan Leefmilieu Brussel wanneer – op basis van de verzamelde gegevens tijdens de verschillende monitoringcampagnes- belangrijke aanpassingen aan de installatie nodig worden geacht. Deze aanpassingen worden onderworpen aan de goedkeuring van Leefmilieu Brussel: plaatsing van nieuwe onttrekkingsputten of infiltratieputten, uitgebruikname van putten, uitbreiding van het netwerk aan waarnemingspeilputten als resultaat van een uitbreiding van de pluim, installatie van andere technieken.

De inhoud van het eerste tussentijdse rapport zal minstens volgende info omvatten zoals weergegeven in volgende tabel.

Tabel 17: Aan te leveren informatie in het eerste tussentijdse rapport

Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
Beschrijving van de geïnstalleerde maatregel (as built), voor de eerste fase, alle toedieningsmethodes van oxidantia en alle types van oxidans	Type van het oxidans, katalysator en/of gebruikte stabilisator (gehalten en eigenschappen van het reagens). Beschrijving van de installatie: infiltratie- en/of extractieputten (aantal, ligging, diameter, diepte, lengte van het filterend gedeelte, kleistop, top), directe injectiepunten (aantal, ligging, dieptes), monitoringpeilputten (aantal, ligging, beschrijving, diepte, omstorting, lengte van het filterend gedeelte, kleistop, top, temp.sonde), debietmeter voor de infiltratie en/of extractie (reagentia, grondwater, bodemlucht), onderdrukmeter (in geval van ozon), persleidingen van de onttrokken vloeistoffen, zuiveringsinstallatie voor onttrokken grondwater en bodemlucht, staalnamepunten voor onttrokken water en bodemlucht (ligging), bodemstaalnamepunten (ligging en diepte)	De ligging van de verschillende elementen van de installatie moet ingetekend worden op een kaart in annex van het tussentijds rapport

Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
Beschrijving van toegevoegde installaties aan de uitgevoerde variant	Beschrijving van de bijkomende elementen: stoominjectieputten (aantal, ligging, diameter, diepte, verfilterd gedeelte, grindomstorting, bentonietstoppen, top), debietmeter voor geïnjecteerde debieten, bodemtemperatuurmeter (ligging van de sondes). Indien de variant is toevoeging van oppervlakte-actieve stoffen: type en toegediende hoeveelheid en ligging van de toedieningspunten	
Te rapporteren parameters bij toediening door middel van actieve of passieve infiltratie	Geïnfiltreerde debieten en toegepaste drukken in de verschillende putten, controle op de invloedzone van de infiltratie. Stijghoogteniveau's en isohypsenkaart (stromingsrichting). Gemeten gehalten in het grondwater ter hoogte van de controlepeilputten: verontreinigingen, reactieproducten (tussenproducten en eindproducten), residuele oxidantia, katalysatoren, pH, Eh, Opgeloste zuurstof, elektrische conductiviteit, metalen reagerend op de redoxomstandigheid. Residuele gehalten in de bodem en massabalans aan te behandelen verontreiniging en residuele vuilvracht (; hoeveelheden, residuele hoeveelheden en vernietigde hoeveelheid). Controle van de bodemoxidansvraag. Verwachte behandelingsduur op basis van de verworven gegevens. Haalbaarheid van de techniek. Te rapporteren correctieve maatregelen	
Bijkomend te rapporteren parameters in geval van infiltratie en recirculatie	Opgepompte grondwaterdebieten. Invloedstraal en capteringszone van de pompputten. gehalten aan verontreiniging (verontreiniging die een interventie vereist + tussenproducten van de reactie + zware metalen) in het onttrokken grondwater. gehalten aan verontreiniging in het gezuiverde water voor lozing.	
Te rapporteren parameters bij toediening door middel van directe injectie	Injectiedruk en hoeveelheid geïnjecteerde reagentia in de verschillende punten. Invloedstraal van de injectiepunten. Gemeten gehalten in het grondwater ter hoogte van de monitoringpeilputten: verontreiniging, reactieproducten (intermediair of eindproduct), residuele oxidantia, katalysatoren, pH, Eh, Opgeloste zuurstof, elektrische conductiviteit, metalen reagerend op de redoxcondities. Residuele gehalten in de bodem en massabalans aan te behandelen verontreiniging en residuele vuilvracht (initiële hoeveelheden, residuele hoeveelheden en vernietigde hoeveelheid). Controle van de bodemoxidansvraag. Verwachte behandelingsduur op basis van de verworven gegevens. Haalbaarheid van de techniek. Te rapporteren correctieve maatregelen	
Te rapporteren parameters in geval van ozoninjectie +	Debieten en injectiedrukken voor ozon, gehalte aan ozon in het geïnjecteerde gas, controle van de	



Rubriek	Te meten parameters en hoeveelheid	Opmerkingen
bodemluchtexttractie	invloedstraal van de putten. Stijghoogteniveau's en isohypsenkaart (stromingsrichting). Gemeten gehalten in het grondwater ter hoogte van de controlepeilputten: verontreinigingen, reactieproducten (tussenproducten en eindproducten), residuele oxidantia, katalysatoren, pH, Eh, Opgeloste zuurstof, elektrische conductiviteit, metalen reagerend op de redoxomstandigheid. Onderdruk en debieten in de extractieputten. Controle van de invloedstraal van de extractieputten. Gehaltes aan verontreiniging (verontreinigingen die een interventie vereisen + andere verontreinigingen), O ₂ en CO ₂ in de onttrokken bodemlucht. Residuele gehalten in de bodem en massabalans aan te behandelen verontreiniging en residuele vuilvracht (initiële hoeveelheden, residuele hoeveelheden en vernietigde hoeveelheid). Gehaltes aan verontreiniging in de bodemlucht voor lozing. Controle van de bodemoxidansvraag. Verwachte behandelingsduur op basis van de verworven gegevens. Haalbaarheid van de techniek. Te rapporteren correctieve maatregelen	
Te rapporteren parameters in geval van grondmixen	Hoeveelheden reagens geïncorporeerd in de bodem. Gehaltes aan residuele verontreiniging in de bodem (verontreiniging die een interventie vereist + tussenproducten van de reactie + eindproducten). Residuele gehalten aan oxidans. pH, Eh van de bodem. In geval van de aanwezigheid van grondwater ondiep, gehalten van het oxidans in het grondwater, katalysatoren, verontreinigingen, reactieproducten, metalen reagerend op de redoxcondities: pH, Eh en opgeloste zuurstof in het grondwater	
Bijkomend te rapporteren parameters in geval van stoominjectie	Debieten, t° en druk van de stoominjectie: Geïnjecteerde hoeveelheden. Gemeten bodemtemperaturen	
Bijkomend te rapporteren parameters in geval van een injectie met oppervlakte actieve stoffen	Geïnjecteerde hoeveelheden aan oppervlakte-actieve stoffen, Gehaltes aan oppervlakte-actieve stoffen in het grondwater van de controlepeilputten	

12.2 Corrigerende maatregelen en optimalisatie

De belangrijkste moeilijkheden tijdens de toepassing van een in situ chemische oxidatie komen voort uit:

- Het gebrek aan efficiëntie van het oxidatieve reagens en onderschatting van de bodemoxidansvraag. De corrigerende maatregel gebeurt door de verhoging van de



toe te passen hoeveelheden oxidans binnen aanvaardbare technische en economische limieten

- Het gebrek aan efficiëntie van het oxidatieve reagens houdt rekening met de heersende condities in de bodem. De aanpassing van deze parameters kan de werking van het oxidans gunstig beïnvloeden: pH, T° , opgeloste ijzer- en mangaangehaltes (toevoeging van een complexerend agens),
- Het gebrek aan mobiliteit van het reagens omwille van de slechte hydraulische conductiviteit van de bodem. De circulatie van het oxidans bevordert worden door verhoging van de infiltratiedruk, de creatie van een hydraulische gradiënt (recirculatie), verhoging van de densiteit van infiltratie/injectieputten.
- De daling in hydraulische conductiviteit tijdens de behandeling door oxidatie kan toegeschreven worden aan een verlies van bodemstructuur (verlies van organische stof) of door neerslag van MnO_2 . Het behoud van bodemstructuur kan bevordert worden door het gebruik van een goede verhouding tussen divalente kationen en monovalente en door een voldoende ionische sterkte in de bodemoplossing. Het effect van MnO_2 opgelost worden door toevoeging van een stabiliserend agens (hexametafosfaat).



13 Controlemetingen en beslisschema voor de stopzetting of verderzetting van de behandeling

De evaluatie dient om na te gaan of de doelstellingen van de behandeling op een duurzame manier bereikt werden zodat de behandeling beëindigd kan worden.

Deze evaluatie bestaat uit een laatste meet- en analysecampagne van de verontreinigde bodemlagen en van het grondwater. Deze analysecampagne zal alle verontreinigingen betreffen waarvoor een interventie nodig was, hun eventuele tussenafbraakproducten en andere verontreinigingen die mogelijks worden vrijgezet door het verlies aan organische stof en door de wijziging van de redoxcondities van de bodem (Cr, As,...).

Op het ogenblik dat de doelstellingen bereikt worden binnen de verontreinigingsvlek kunnen de behandeling gestopt worden. Twee bijkomende en opeenvolgende staalnamecampagnes van het grondwater worden uitgevoerd respectievelijk 3 maanden en 6 maanden te rekenen vanaf het einde van de verwachte efficiëntie van de laatst geïnjecteerde reagentia om op deze manier de stabiliteit van de verworven resultaten te controleren.

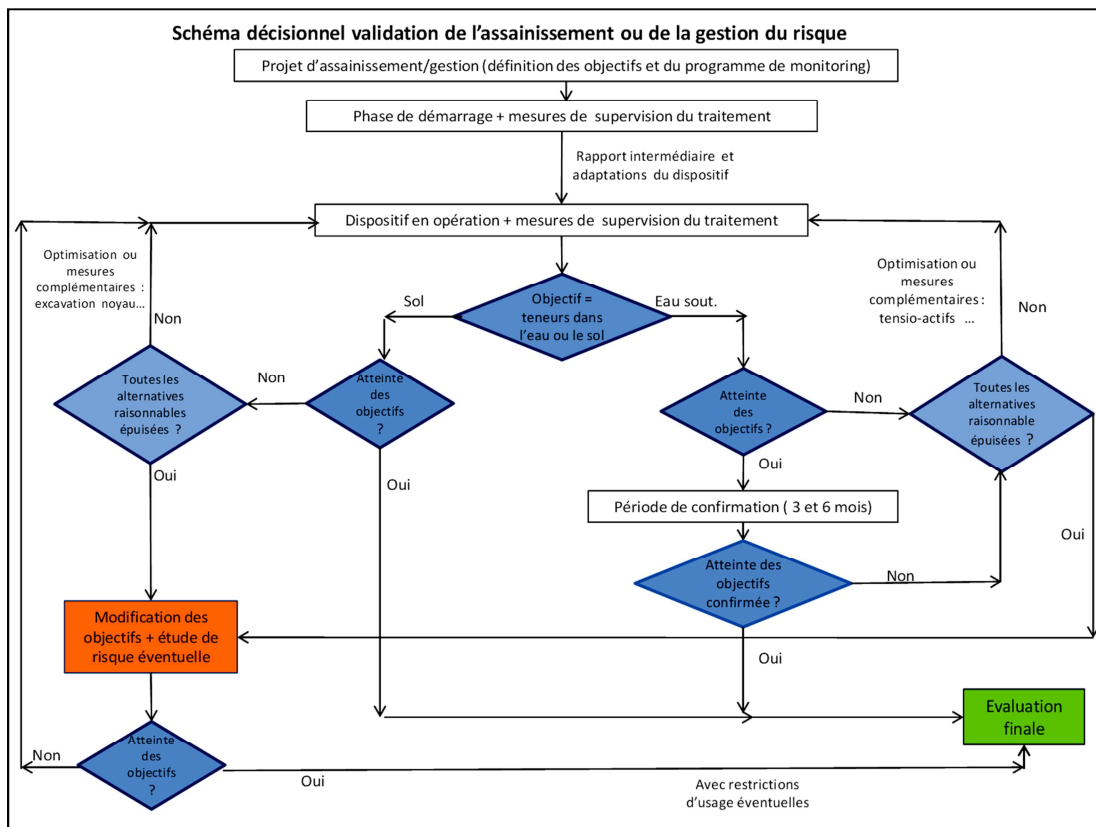
In geval de waargenomen concentraties onder evenwicht onder de doelstellingen blijven, kan de behandeling als voltooid worden beschouwd. De installatie kan ontmanteld worden en een indevaluatierapport wordt ingediend.

In geval de doelstellingen niet bereikt worden, wordt de behandeling door chemische oxidatie verder in stand gehouden of hernieuwd (bv. nieuwe injectiecampagne) met – eventueel – de installatie van corrigerende maatregelen: toevoeging van infiltratieputten/ bijkomende injecties, manipulatie van de bodemcondities pH, t° , toevoeging van katalysator, surfactants,... en/of na uitvoering van bijkomende maatregelen: ontgraving van de kern, ...

Indien tijdens de volgende meetcampagne de doelstellingen nog altijd niet bereikt worden, moet er een aanpassing van de doelstellingen worden voorgesteld door de expert tegelijkertijd met een risicostudie (met eventueel een voorstel tot gebruiksbeperking).

Na goedkeuring van deze aanpassing door Leefmilieu Brussel kunnen er zich 2 gevallen voordoen: op basis van de nieuwe doelstellingen kan de behandeling als beëindigd worden beschouwd of in het andere geval dient de behandeling opnieuw te worden opgestart met toevoeging van bijkomende corrigerende maatregelen of door installatie van bijkomende maatregelen (gestimuleerde natuurlijke afbraak kan hierbij een mogelijkheid zijn).

Het beslisschema tijdens de evaluatie van de behandeling is de volgende:



14 Eventuele lange termijn opvolging: aard van de metingen

Op aangeven van de expert en/of op vraag van Leefmilieu Brussel, kunnen er opvolgingsmaatregelen (evaluatie op lange termijn of nazorg) gevraagd worden aan de behandelingsplichtige na stopzetting van de werken. Deze maatregelen streven naar een bevestiging van de resultaten van de werken en meer bepaald of de doelstellingen werden behaald op een duurzame manier op de lange termijn.

Deze lange termijn opvolging verantwoordt zich indien er onzekerheid bestaat over de duurzaamheid van de verkregen resultaten: belangrijke schommelingen in de gemeten concentraties in de controlepeilbuizen, gehalten die zich stabiliseren nabij de doelstellingen, specifieke ongunstige omstandigheden....

In de mate dat de doelstellingen betrekking hebben op de grondwaterkwaliteit, kan de lange termijn opvolging van toepassing zijn op de instandhouding van bepaalde monitoringspeilbuizen dewelke gesitueerd zijn in de kern van de verontreinigde zone en stroomafwaarts ervan.

In tegenstelling tot de opvolging die van toepassing is tijdens de behandeling en tijdens de evaluatie ervan, is het voor de lange termijn opvolging niet nodig alle monitoringspeilputten te bemonsteren en te analyseren maar enkel een representatief aantal in de verontreinigde zone en in de zone stroomafwaarts.

In elk geval dient 1 of meerdere peilbuizen gesitueerd stroomopwaarts van gevoelige receptoren mee ingesloten te worden in de staalname- en analysecampagnes.

De parameters die onderzocht zullen worden zijn:

- de residuele gehalten van verontreinigingen in het grondwater (verontreinigingen die de behandeling veroorzaakt hebben en hun tussentijdse afbraakproducten schadelijk voor de gezondheid en voor het milieu, metalen en andere verontreinigingen gevoelig voor de redox- en pH- condities van de bodem).
- De parameters die de natuurlijke attenuatie van de verontreiniging beïnvloeden indien met deze natuurlijke attenuatie rekening werd gehouden in de analyse van de mogelijke risico's van de residuele gehalten: pH, O₂, CO₂, methaan, nitraat, sulfaat, voedingsstoffen, Fe, Mn,..... volgens de processen die verantwoordelijk zijn voor natuurlijke attenuatie

Voor de grondwaterstaalnames, volstaat het te verwijzen naar de codes van goed praktijk n°3 van Leefmilieu Brussel " Staalnames van bodem, grondwater, slib en bodemlucht". Voor de analyse van de grondwaterstalen volstaat het deze uit te voeren volgens de code van goede praktijk n°4 " Code van goede praktijk voor analysemethodes" van Leefmilieu Brussel.

De duurtijd en de frequentie van de lange termijn opvolging (nazorg) hangt af van de situatie: de mate van onzekerheid en het niveau van de residuele concentraties, de aard van de aanwezige verontreinigingen en het risicogehalte dat hun aanwezigheid induceert,



aanwezigheid van en de afstand tot gevoelige receptoren, de stromingssnelheid van de verontreiniging.

Het opvolgingsprogramma dat het duurzaam behalen van de finale behandelingsdoelstellingen beoogt, dient representatief en redelijk te zijn zowel wat de frequentie als de duurtijd van de gehele opvolging betreft, zodat een uitspraak kan gedaan worden (1) over de stabiliteit van het finale resultaat van de behandeling of (2) over een eventuele stijgende trend. Zonder specifieke motivatie dient de opvolging de termijn van 2 jaar niet te overschrijden.

De rapportage van de monitoringcampagnes en de overdracht van de rapporten aan Leefmilieu Brussel gebeurt op jaarlijkse basis of -eerder uitzonderlijk-na elke monitoringcampagne.

De gemeten concentraties worden vergeleken met de doelstellingen. De interpretatie van de gehalten gebeurt als volgt:

- Alle meetresultaten blijven systematisch onder de doelstellingen: de duurzaamheid van het resultaat is bekomen en het dossier wordt afgesloten
- De gehalten van sommige verontreinigingen in sommige peilbuizen variëren met de tijd met lichte overschrijdingen van de doelstelling: verder zetting van de nazorg indien een neerwaartse tendens kan worden verwacht.
- De concentraties van sommige verontreinigingen overschrijden de doelstellingen herhaaldelijk zelfs na een verlenging van de periode van nazorg of de gehalten van sommige verontreinigingen overschrijden de doelstellingen op een duidelijke en blijvende manier en/of een laag van vrij product (her)verschijnt: In deze situatie kan er op 3 manieren gereageerd worden:
 - De verontreiniging heeft andere eigenschappen dan degene die tijdens het gedetailleerd bodemonderzoek werd onderzocht: een nieuwe bron, een nieuw geval van verontreiniging, nieuwe omstandigheden, Een nieuw gedetailleerd bodemonderzoek is nodig dewelke zal leiden tot een nieuwe behandeling. De behandelingsplichtige kan dezelfde zijn of een ander persoon.
 - Bijkomende werken zijn nodig om tot de eerder opgelegde doelstellingen te komen. Natuurlijke attenuatie of gestimuleerde natuurlijke attenuatie kan een mogelijkheid bieden.
 - Het is niet mogelijk om de saneringsdoelstellingen te bereiken op een duurzame manier binnen een redelijke termijn en volgens een realistische begroting: de doelstellingen van de behandeling worden aangepast (interventienorm of risicogebaseerde terugsaneerwaarden)



15 Aanbevelingen op vlak van veiligheid en stabiliteit

15.1 Korte checklist voor aannemers

De checklist bedoeld voor de aannemers is opgenomen in onderstaande tabel. Deze checklist heeft als doel de aannemers te helpen bij het opstellen van hun offertes als antwoord op de bestekken opgesteld door de experts. Rekening houdend met de grote verscheidenheid van situaties die kunnen voorkomen, is deze checklist niet limiterend.

Tabel 18: Checklist voor aannemers

Rubriek	Controle
Voorafgaande informatie compleet en voldoende (bestek, omschrijving der werken)	
Nutsleidingen	Aanvraag bij de nutsmaatschappijen en adequaat antwoord ontvangen
Karakterisering van de infrastructuur op de site en in de onmiddellijke omgeving	Inventaris en op plan aanduiden van gebouwen en bovengrondse infrastructuur. Inventaris en op plan aanduiden van ondergrondse infrastructuur en van nutsleidingen
Gevoeligheid van de ingegraven infrastructuur aan oxidantia, zuren op een verhoging van t°	Adequate stabiliteitsstudie coherent met de uit te voeren werken
Stabiliteitsstudie van bovengrondse installaties	Degelijke stabiliteitsstudie coherent met de uit te voeren werken: ontgraving (in geval de watertafel in belangrijke mate wordt neergeslagen)
Gevoelige receptoren	Gevoelige receptoren aanwezig op en in de omgeving van de werf
Technische aspecten van het bestek of van de omschrijving der werken)	Omschrijving van de infiltratie infrastructuur of pompinstallatie (putten, ligging, dimensies,...) en eventueel van injectieputten: gebruikte hoeveelheden, debieten, drukken, onderdrukken, type van pompen
Vaststelling van de benodigde toelatingen en van het normatieve kader dat gerespecteerd moet worden	Controle of de noodzakelijke toelatingen bekomen werden door de opdrachtgever. Controle of de gevraagde inspanning coherent is met het normatieve kader
Vaststelling van specifieke toelatingen die gerespecteerd moeten worden	Vaststelling van specifieke procedures en controle of er in het bestek of in de werkomschrijving mee rekening is gehouden: Stockage en overname van gevaarlijke en/of toxische producten, gasemissies
Lozingspunten	Lozingspunten voor het gezuiverde water en bodemlucht en overeenkomstig de karakteristieken van de site. Gevraagde en verkregen toelating
Definiëring van de communicatielijnen	Identiteit en coördinaten van de toezichthouder, de opdrachtgever, de BIM inspecteur, het bevoegd gezag
Vorming en kwalificaties van het personeel	Vorming en/of kwalificatie met betrekking tot de manipulatie van de chemische producten voor werknemers aanwezig op het terrein
Informatie die beschikbaar moet zijn in het veiligheids- en gezondheidsplan van de aannemer	
Vaststelling en aard van de risico's	Veiligheidsfiches,risicozinnen, veiligheid van de gebruikte producten. Risico's tijdens de stockage, manipulatie en gebruik van de verschillende producten: risico's voor het personeel (ademhaling, huidcontact), brandgevaar, verspreidingsrisico
	Explosierisico in de gascollectoren rekening houdend met de brandbaarheid van de onttrokken verbindingen
	Risico op brand in de bodem door een verhoogde bodemtemperatuur en verhoogde O ₂ gehalten
	Risico op verstuiven en verspreiding van stofdeeltjes
	Risico-analyse van ondergrondse infrastructuur indien in contact met oxidantia, zuren en in geval van bodemopwarming door stoominjectie
	Electrisch risico : respect van de AREI, de conformiteit van de installaties en de controlerapporten
	Explosierisico's in geval van creatie van pockets met vluchtige en brandbare verbindingen

Rubriek	Controle
	Risico's op bodem- en grondwaterverontreiniging ten gevolge van stockage van gevaarlijke producten en/of verontreinigingen
	Risico's op bodem- en grondwaterverontreiniging ten gevolge van stockage van verontreinigde gronden op de site tijdens het boren van putten of graven van grachten
	Risico's voor het personeel in geval van reflux van het reagens tijdens injectie of infiltratie
	Risico's voor de gezondheid van het personeel door de aanwezigheid van vluchtige, gevaarlijke en toxische producten op de site. Risico's op ontsnapping van gassen (ozon) naar de atmosfeer tijdens de injectie. Risico op de aanwezigheid van gevaarlijke, vluchtige verbindingen naar de atmosfeer tijdens het oppompen en zuivering van de bodemlucht
	Risico op ongevallen: val, brand, elektrocutie
	Risico op het betreden van de werf door onbevoegde personen: diefstal, vandalisme en risico voor de gezondheid
	Risico op werken in besloten ruimtes (kelders, putten,) omwille van slechte luchtkwaliteit
	Klimatologische risico's: bevriezen van leidingen in geval van condens en indien discontinue werking van de installatie
Preventieve maatregelen	Risico's voor het verkeer bij werken op de openbare weg Voor elk van de vastgestelde risico's, vaststelling en uitvoering van preventieve maatregelen inbegrepen opleiding van het personeel
Corrigerende maatregelen en interventie maatregelen	Voor elk van de vastgestelde risico's, voorbereiding van correctieve maatregelen en interventie maatregelen (met spoed indien nodig)
Te contacteren personen en diensten in geval van een probleem	Voor elk van de vastgestelde risico's, identiteit en coördinaten van te contacteren personen en diensten: brandweer, gemeente, civiele bescherming, nutsbedrijf,...
Vaststelling van mogelijke hinder	Geuren en gevaarlijke dampen voor de omgeving in geval van lekken of verliezen aan de installaties Lawaai van de installaties: pompen, generatoren Opstopping van de toegangswegen Vervuiling van de toegangswegen
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde hindergevallen, vaststelling en omschrijving van de preventieve maatregelen, bv plaatsing van explosiometers, alarmsystemen (noodstop en waarschuwingssystemen (toevoer van lucht in de leidingen)
Correctieve maatregelen en interventie maatregelen	Voor elk van de vastgestelde hindergevallen, voorbereiding van correctieve maatregelen en interventie maatregelen (in spoed indien nodig)
Planning van de interventies	
Monitoringsplan en onderhoud	Planning van controlebezoeken: minimaal maandelijks Planning van onderhoud
Vaststelling van defecten en technische problemen	Defecten aan de uitrusting en aan de installatie: lek dichtheid



Rubriek	Controle
Correctieve maatregelen en interventie maatregelen	Voor elk van de mogelijke problemen: voorbereiding van correctieve maatregelen en van interventie maatregelen (in spoed indien nodig)
Toezichtrapportage van de expert	Rekening houdend met de opvolgingsrapporten van de expert, uitvoering van correctieve en optimalisatie maatregelen
Specifieke aandachtspunten voor de geïmplementeerde techniek	
Controle van de dimensionering rekening houdende met het specifiek materiaal en de ervaring van de aannemer	Bevestiging van de invloedstraal (incl. de geïnjecteerde volumes), de filters en de boringen Analyse van de informatie mbt de pilootproeven of voorafgaand onderzoek uitgevoerd door de bodemverontreinigingsdeskundige
Stabiliteit	Gelijkvormigheid van het terrein met de verwachte lithologie
Controle van de kwaliteit van het gebruikte (injectie)materiaal	Voor de implementering van de filters : PEHD/PVC : adequate certificering, resistent zijn tegen de aanwezige verontreiniging en de gebruikte oxydanten. Het gebruikte filterend zand, de klei en de 'grout' dienen adequaat gecertificeerd te zijn. De componenten voldoen aan de specifieke vereisten. Alle gebruikte materialen die in contact komen met de pollutanten, dienen hiertegen bestand te zijn. De lektheid van de leidingen dient te worden getest
Nutsleidingen	Desbetreffend via een geofysische prospectie de eventuele lokalisatie van de nutsleidingen aanvullen. Voorafgaande manuele uitgraving in de nabijheid van de nutsleidingen of in de buurt van potentiële risicozones
Overstroming (reflux) en kruisverontreinigingen tijdens de directe injectie	Bij de injectie kan puur product, verontreinigd water en slib uit de injectieput komen. Eveneens bestaat de mogelijkheid dat een kwantiteit aan puur product het grondwater verontreinigt of dat de verontreiniging zich verspreidt. Deze verspreiding van de verontreiniging van het grondwater kan versneld worden onder invloed van het geïnjecteerde debiet. Bijgevolg dient geïnjecteerd te worden met een voldoende laag debiet zodat kruisverontreiniging en/of reflux wordt vermeden.
Pompen, leidingen en houders	Op elk ogenblik dienen lekken aan pompen, leidingen en houders worden gemeld. De lekken dienen te worden opgevangen. De aanhechtingspunten en afsluiters mogen niet lekken. De voorafgaande inspectie aan de indienststelling dient lekken ter hoogte van de leidingen en eventueel drukverlies aan de pompen te controleren. Na de plaatsing van de filter en bij de eerste inspectie wordt de filter gepeild. Pompen op basis van onderdruk zijn vaak voorzien van een luchtfilter. De pompen zijn bestand tegen overbelasting en tegen droog gebruik. Bij onverwacht stilvallen van de pompen dient een



Rubriek	Controle
	alarmsysteem in werking worden gesteld. Een teller/meter dient het moment van de onderbreking te kunnen bepalen. Het pompsysteem dient te worden voorzien van en gekalibreerde cumulerende debietmeter. Het pompsysteem dient te worden voorzien van een teller die de gepresteerde tijd opmeet. Automatische controle en opvolging in continu van de pertinente process-parameters (druk, debiet, gepresteerde tijd, etc.) om tijdig onderbrekingen of een slecht werkende installaties op te sporen. De 'flexibles' zijn bestand tegen de atmosferische condities en het grootste deel van de polluenten en zijn geschikt voor het transport van lucht, water en puur product.
Emissie van vluchtige substanties en explosieven	Installatie ter plaatse van de geschikte meetapparatuur Continue opmeting tijdens de boorwerkzaamheden Zolang de (boor)put open is, blijft de apparatuur ter plaatse en wordt een opmeting gedaan elke 6 uur. De opmetingen worden gedaan met een explosiemeter en indien mogelijk met een meettoestel die de afzonderlijke componenten kan opmeten. Dragen van geschikte kledij (chemisch pak, veiligheidsschoenen, mondmasker, veiligheidsbril en handschoenen). Indien de opgemeten concentraties de veiligheidslimiet overschrijden (ARAB), is het dragen van een masker verplicht.
Verontreiniging door niet-vluchtige chelmissche substanties (actieve substanties : persulfaat, ozon, etc.)	Dragen van individuele adequate kledij
Verhinderen van het dichtslibben van de filter en leidingen	Regelmatige controle van de substanties die het dichtslibben kunnen veroorzaken (frequentie aan te passen in functie van de noodzaak). In geval van dichtslibbing, kunnen volgende oplossingen worden geboden : - Herstel - Behandeling met zuur - Vervanging van een deel van de installatie De bodemverontreinigingsdeskundige dient voor Fe, Mn, koolstofbalans, Ca, etc. en voor mogelijke andere obstruerende factoren (organisch gehalte, onzuiverheden) de meetgegevens evalueren

Volgende opmerkingen kunnen worden gemaakt:

- Voor de VCA gecertificeerde aannemers (of op gelijkaardig wijze bekomen) zijn de in de hierboven tabel opgesomde maatregelen met betrekking tot veiligheid systematisch van toepassing.



- De checklist van bovenstaande tabel is geldig voor de aannemers en hun onderaannemers in hun respectievelijke interventiedomeinen
- Over het algemeen dienen de inspectiebezoeken op de werf te gebeuren op tweemaandelijks basis
- Voor collectoren en zuigleidingen voor bodemlucht en voor opgepompte vloeistoffen geeft men de voorkeur aan ondergrondse leidingen om schade te vermijden door vorst (condenswater) of door vandalisme
- In geval van werfinstallaties (infiltratieputten, extractieputten en zuivering) die dicht bij gebouwen staan, zullen luchtmetingen worden uitgevoerd in de gebouwen om de graad van vluchtige verbindingen te meten. Deze metingen zullen uitgevoerd worden bij het begin van de werf, 1 keer na 2 weken behandeling en vervolgens met een frequentie van 3 maanden
- In geval van een risico op explosies ter hoogte van pompputten, leidingen of de zuivering, zal het explosierisico (LEL) continu gemeten worden en zal het systeem on hold worden gezet vanaf dat de 10%LEL overschreden wordt (luchtingang en alarm)
- In het geval van stockage op site van verontreinigde gronden opgeboord tijdens de plaatsing van putten moeten er maatregelen genomen worden om bodem- en grondwaterverontreiniging te voorkomen: afscherming van de bodem met HDPE-folie, recuperatie en behandeling van drainagewater, bescherming tegen neerslag door middel van een bovenafdek, recuperatie van hemelwater en verwerking ervan op of buiten de site indien nodig (na contact met verontreinigd materiaal). Dezelfde maatregelen zullen genomen worden in geval van stockage op de site van gevaarlijke of verontreinigende producten.

15.2 Korte checklist voor de bodemverontreinigingsdeskundige

De checklist bedoeld voor de experts is opgenomen in onderstaande tabel. Deze checklist heeft als doel de experts te helpen bij het opstellen van hun werkomschrijvingen, kostenramingen en de uitwerking van bestekken voor de aannemers.

Tabel 19: Checklist voor experts

Rubriek	Controle
Voorafgaande informatie compleet en voldoende (voorafgaande studie, bestek, omschrijving der werken)	
Karakteristieken van de te saneren bodem(onverzadigde en verzadigde lagen)	Samenstelling van de bodem: opeenvolging en karakterisatie van de bodemlagen, aanwezigheid van verschillende doorlatendheden, adsorptiecapaciteit, homogeniteit,voldoende informatie beschikbaar?
	Permeabiliteit van lucht en grondwater pomptesten, stijghoogtemetingen, stromingsrichting, seizoenale schommelingen, vermogen van de watervoerende laag, afscherming van de verschillende watervoerende lagen, . Voldoende gedetailleerde gegevens?
Aanwezige verontreinigingen en/of te behandelen	Aard van de aanwezige (al dan niet te behandelen) verontreinigingen, verdeling van de concentraties, nog actieve bronzone? Evaluatie van de vuilvracht in de verschillende bodemfases, verspreidingspotentieel

Rubriek	Controle
	(retardatiefactor), aanwezigheid van vrij product als drijfslaag of als zaklaag, verwachte natuurlijke evolutie van de gehalten (gemeten evolutie, potentiaal van de natuurlijke afbraak)
Eigenschappen van de infrastructuur op de site en in de onmiddellijke nabijheid	Inventaris en op plan aanduiden van gebouwen en bovengrondse infrastructuur. Inventaris en op plan aanduiden van ondergrondse infrastructuur en nutsleidingen
Gevoelige receptoren	Gevoelige receptoren aanwezig op en in de omgeving van de werf
Technische aspecten van de interventie en technische omschrijving van de werken	Omschrijving van de infiltratie-, injectie of grondmixinginfrastructuur. Beschrijving van de pomp en/of bodemluchtexttractie-opstelling (putten, ligging en dimensies, ...). Schatting van de hoeveelheden: debieten, drukken, onderdrukken en type van pompen
	Wijze van functioneren van de installatie: continu of intermitterend. Verstoppingsproblemen. Corrigerende acties en mogelijke oplossingen
	Voorafgaande controle van de werking van de behandelingsinfrastructuur: Vermogen van het reagens om de verontreiniging te degraderen. Bodemparameters gunstig voor de reactie, reactietijd, Voldoende reagens voor de bodemoxidansvraag, en om de vuilvracht te vernielen. Richting en wijze van de grondwaterstroming en bodemluchtstroming, invloedzone van de infiltratieputten en van de injectieputten, captatiezone van de onttrekkingsfilters voor grondwater en bodemlucht.
	De doelstellingen worden duidelijk vastgelegd voor bodem en grondwater
	Inschatting van de behandelingsduur, noodzaak tot uitvoering van bijkomende acties : opwarming van de bodem door stoominjectie of injectie van oppervlakteactieve stoffen
	Controleren of de beschrijving van de zuivering voldoende is. De fysische grootheden van de installaties (volume, grootte, performantie,...) zijn deze coherent met de werfparameters (debieten, voorziene gehalten, condens,...)?
Lozingspunten	Lozingspunten voor gezuiverd water en bodemlucht compatibel met de eigenschappen van de site. Autorisaties gevraagd en bekomen
Vaststelling van de benodigde toelatingen en van het normatieve kader dat gerespecteerd moet worden	Controle of de noodzakelijke toelatingen aangevraagd werden door de opdrachtgever. Controle of de uitgevoerde inspanningen coherent zijn met het normatieve kader. De voorziene procedures zijn deze conform met de codes van goede praktijk en andere aanbevelingen van Leefmilieu Brussel



Rubriek	Controle
Vaststelling van specifieke procedures die gerespecteerd moeten worden	Vaststelling van specifieke procedures en controle of er in het bestek of in de werkomschrijving mee rekening is gehouden: stockage, manipulatie en transport van gevaarlijke/toxische stoffen, emissies van gassen
Definiëring van de communicatielijnen	Identiteit en coördinaten van de toezichthouder, de opdrachtgever, de BIM inspecteur, het bevoegd gezag
Vaststelling en aard van de risico's	Risico's op explosies in collectoren van gassen rekening houdend met de ontvlambaarheid van de onttrokken verbindingen
	Risico's voor de ondergrondse infrastructuur ten gevolge van opwarming van de bodem door exotherme reacties
	Risico op brand in de bodem door een verhoogde bodemtemperatuur en verhoogde O ₂ gehalten
	Explosierisico's in geval van creatie van pockets met vluchtige en brandbare verbindingen
	Risico's voor het personeel, de omwonenden en bezoekers aan de site omwille van de aanwezigheid en de manipulatie van gevaarlijke en toxische stoffen, mogelijke reflux van de reagentia naar de oppervlakte tijdens de injectie, vrijzetting van gassen en gevaarlijke/toxische dampen naar de atmosfeer (ozon, vluchtige verontreinigingen)
	Risico's op bodem- en grondwaterverontreiniging ten gevolge van stockage van gevaarlijke/toxische producten en/of verontreinigingen. Risico van uitstroming over de bodem van reagentia tijdens de infiltratie
	Risico's op bodem- en grondwaterverontreiniging ten gevolge van stockage van verontreinigde gronden op de site tijdens het boren van putten
	Klimatologische risico's: bevroren van leidingen in geval van condens
	Risico's voor het verkeer bij werken op de openbare weg
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde risico's, identificatie en installatie van preventieve maatregelen inbegrepen de opleiding van het personeel
Te contacteren personen en diensten in geval van een probleem	Voor elk van de vastgestelde risico's, identiteit en coördinaten van te contacteren personen en diensten: brandweer, gemeente, civiele bescherming, nutsbedrijf,...
Vaststelling van mogelijke hinder	Geuren en gevaarlijke dampen voor de omgeving in geval van lekken of verliezen aan de installaties
	Lawaai van de installaties: pompen, generatoren
	Opstopping van de toegangswegen
	Vervuiling van de toegangswegen
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde hindergevallen, vaststelling en omschrijving van de preventieve maatregelen
Planning en inhoud van het toezicht, van de evaluatie en van de evaluatie op lange termijn (nazorg)	



Rubriek	Controle
Toezichtsmaatregel bij de behandeling	Omschrijving, situering en aanduiding op plan van de toezichtsmaatregel: Debietmeters, manometers en t° sondes ter hoogte van de extractieputten, de infiltratieputten en de injectiepunten, controlepeilputten, observatiepunten in de bodem en staalnamepunten voor bodemlucht en onttrokken en gezuiverde bodemlucht, staalname van de omgevingslucht... Rekening houdend met gevoelige en te beschermen receptoren
Op te volgen parameters tijdens het toezicht	Metingen van infiltratie- injectiedebieten en drukken , onderdrukken en bodemluchtonttrekkingsdebieten, waterdebieten, meting van onderdrukken in de bodem, stijghoogte metingen, gehalten in het onttrokken water en bodemlucht, massabalans van de vuilvracht, residuele gehalten aan verontreiniging en afbraakproducten, zware metalen(reagerend op de redoxpotential) in de bodem en in het grondwater en herverdeling, berekening van de invloedstraal van de putten en infiltratie/injectiepunten, captatiezone van grondwater en bodemlucht, gehalten in het grondwater en onttrokken bodemlucht aan de ingang en uitgang van de zuivering, aanwezigheid van een vrije fase, T° van geïnjecteerde vloeistoffen in de bodem, verspreiding van verontreiniging via het grondwater naar gevoelige receptoren.
Optimaliseren parameters	Wijziging van bodemcondities: (pH, T°), pompen en injectie intermitterend, recirculatie van grondwater, bodemopwarming, injectie van oppervlakte-actieve stoffen, plaatsing van nieuwe extractie- of injectieputten (stagnatiezones), aanpassing van de dieptes van de filterende gedeeltes
Rapportage	Planning voor de indiening van het eerste tussentijdse rapport en voor de indiening van volgende tussentijdse rapporten
	De verzamelde gegevens zijn voldoende voor de opstelling van deze rapporten?
Fase van evaluatie van de resultaten	De verzamelde gegevens zijn voldoende voor de realisatie van deze fase: residuele gehalten in de bodem en in het grondwater, reboundconcentraties, balans van de vuilvracht
Risicostudie in geval van wijziging van de doelstellingen	De verzamelde gegevens zijn voldoende voor de realisatie van deze fase?
Evaluatie op de lange termijn (nazorg)	Toezichtsmaatregel: controlepeilputten
	Opvolgingsparameters: gehalten aan verontreiniging en hun afbraakproducten, parameters die toelaten de natuurlijke attenuatie op te volgen indien deze laatste overwogen wordt



16 Sources bibliographiques

Volgende bronnen werden geraadpleegd bij de redactie van dit document :

- Code van goede praktijk : in-situ chemische oxidatie – Draft , OVAM, 2014
- Code of Good Practice : In-situ Chemical Oxidation, CityChlor, April 2013, Interreg IVB
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001.
- Standaardprocedure Bodemsaneringwerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazog-versie oktober 2011, OVAM

