

Code van Goede Praktijk 5

In situ behandeling van grondwaterverontreiniging met gechloreerde solventen aan de hand van reactieve ijzerwanden

Leefmilieu Brussel

1 Inleiding4

2	Beschrijving van de techniek en werkingprincipes	6
2.1	Algemeen werkingsprincipe van zerovalent ijzer.....	6
2.2	Componenten die afgebroken kunnen worden in de aanwezigheid van zerovalent ijzer	8
2.3	. Kinetische aspecten	9
2.4	Verschillende types van reactieve ijzerwanden.....	9
3	Beschrijving van varianten.....	11
4	Pluim tegenover kernbehandeling.....	12
5	Verontreinigingen en meest gunstige situaties (kwalitatieve overwegingen).....	13
6	Vooronderzoek naar de haalbaarheid van de techniek	14
6.1	Bodemkarakteristieken die de haalbaarheid van de techniek beperken	14
6.1.1	Fysische eigenschappen van de bodem	14
6.2	Fysico-chemische eigenschappen van het grondwater.....	14
6.3	Eigenschappen die de mogelijkheid tot saneren van de site beperken.....	14
7	Specifiek onderzoek naar de haalbaarheid van de behandelingstechniek.....	15
7.1	Te meten parameters op de site.....	15
7.2	Noodzaak van labotesten	20
7.2.1	Stap 1: Uitvoering van batch-testen	20
7.2.2	Stap 2: Kolomtesten	21
7.3	Noodzaak voor een piloottest.....	25
8	Beschrijving van het type wand.....	26
8.1	Continue wand.....	26
8.2	Funnel & Gate systeem	27
8.3	Vessels	27
9	Omschrijving van de installatie die geplaatst zal worden.....	28
10	Veiligheid- en specifieke stabiliteitsmaatregelen en beperking van overlast: geuren, geluid, stof,...	30
10.1	Punten om mee rekening te houden	30
10.2	Risico's verbonden met de verstoring van het doorstromingspatroon van het grondwater	30
10.3	Risico op vrijzetting van metaalverontreinigingen vanaf de ijzerbarrière en risico's gelegen aan de pH-stijging van het grondwater.....	30
10.4	Risico's voor nabijgelegen waterwinningen.....	31
10.5	Risico's op de stabiliteit van gebouwen en structuren aanwezig in de nabijheid van de werf tijdens de plaatsing van de behandelingsinfrastructuur	31
10.6	Conformiteit met de bestaande wetgeving	31
11	Begeleiding van de behandeling.....	32

11.1	Doelstelling van de begeleiding.....	32
11.2	Opvolgingsmaatregelen: type van ijzerwand.....	32
11.2.1	Continue wand.....	33
11.2.2	'Funnel - and – Gate configuratie	34
11.2.3	Vessel.....	36
11.2.4	Algemene opmerking.....	38
11.3	Wijze van opvolging: op te volgen parameters en frequentie.....	38
12	Rapportage, optimalisatie en corrigerende maatregelen	41
12.1	Rapportage.....	41
12.2	Corrigerende maatregelen en optimalisatie.....	42
13	Evaluatie van de behandeling en beslisschema rond stopzetting of verderzetting van de behandeling	44
14	Eventuele lange termijn opvolging: aard van de metingen.....	46
15	Aanbevelingen op vlak van veiligheid en stabiliteit.....	48
15.1	Korte checklist voor aannemers	48
15.2	Korte checklist voor de bodemverontreinigingsdeskundige	50
16	Bibliografie.....	53

1 Inleiding

De hierbij besproken behandelingstechniek noemt “De in situ behandeling van grondwaterverontreiniging met gechloreerde solventen aan de hand van reactieve ijzerwanden”.

Onder gechloreerde solventen verstaat men vluchtige organische alifatische chloorverbindingen:

- Chloorethenen: tetrachlooretheen (PCE), trichlooretheen (TCE), dichlooretheen (DCE) met de isomeren cis, trans en 1,1, vinylchloride (VC)
- Chloorethanen: trichloorethaan (TCA), dichloorethaan (DCA met de isomeren 1,1 en 1,2), chloorethaan (CA)
- Chloormethanen: tetrachloormethaan (CT of tetrachloorkoolstof), trichloormethaan (CF of chloroform), dichloormethaan (DCM) et chloormethaan (CM)

De besproken techniek omvat de in situ behandeling van een grondwaterverontreiniging met gechloreerde solventen dewelke doorheen een reactieve ijzerwand passeert. De reactieve ijzerwand is gevuld met ijzerpartikels met oxydatietrap 0 (zero valent iron (ZVI)). De reactieve ijzerwand kan bestaan enkel uit ijzer (0) partikels of uit bi-metallische mengsels van metalen met oxydatietrap 0 (Fe^0/Ni^0 of Fe^0/Pd^0 , Fe^0/Cu^0) of ook nog uit ijzerpartikels gemengd met metallische katalysatoren. Reactieve materialen samengesteld uit Fe^0 en de reductantia (Na_2S , FeS , FeS_2) worden eveneens gebruikt.

De reactieve wanden worden zodanig ontworpen dat na passage doorheen de wand de gechloreerde solventen zijn afgebroken tot Cl^- ionen en alifatische componenten (etheen, ethaan en methaan) dewelke van nature uit voorkomen in de bodem, gemakkelijk afbreekbaar zijn en weinig of niet toxische zijn.

Deze in situ behandelingsmethode heeft volgende voordelen:

- Lage operationele en onderhoudskost: de doorstroming van het grondwater doorheen de reactieve wand gebeurt uitsluitend door de natuurlijke hydraulische gradiënt aanwezig in de aquifer.
- Een versnelde afbraaksnelheid in vergelijking met natuurlijke afbraak (al dan niet gestimuleerd)
- Een lagere instandhoudingskost in vergelijking met andere behandelingsmethodes (chemische oxydatie, sparging en bodemluchtexttractie (BLE), pump and treat (P&T),...)
- Weinig hinder op de behandelde site gegeven het feit dat alle behandelingsinfrastructuur ondergronds wordt aangelegd
- Beperkte hoeveelheden grond- en grondwatervolumes die verzet moeten worden tijdens de installatie van de behandelingsinfrastructuur

De beperkingen van deze techniek zijn de volgende:

- De houdbaarheidsduur van een reactieve ijzerwand is nog niet volledig gekend aangezien het om een recente techniek gaat waarbij er nog weinig lange termijn ervaring over bestaat
- De installatie van deze techniek vereist een goede kennis van de te behandelen site (samenstelling van de bodem en de hydrogeologie)
- Een langdurige opvolging van de techniek over meerdere jaren is nodig



- Diepe verontreiniging is er moeilijk mee te behandelen. De behandeling van een diepe verontreiniging met deze techniek leidt zeer hoge kosten.

Gechloreerde solventen zijn over het algemeen slecht oplosbaar in water en wanneer ze aanwezig zijn in hoge concentraties kunnen ze een vrije fase vormen. Rekening houdend met de hoge dichtheid, vormt deze vrije fase een zaklaag (DNAPL) die in de diepte verdwijnt tot op de eerste ondoorlatende laag. De vrije fase komt slechts langzaam in oplossing in het grondwater en vormt een blijvende secundaire bronzone van gechloreerde solventen die zich verspreidt in de richting van de grondwaterstroming.

Het wegnemen van dergelijke DNAPL's (door ontgraving, bodemluchtextractie, ...) is een noodzakelijke voorwaarde in de behandeling van een grondwaterverontreiniging met gechloreerde solventen. Deze noodzakelijke stap van wegname van bronzone kan nochtans moeilijk uitvoerbaar zijn aangezien dergelijke zones van DNAPL moeilijk opspoorbaar en moeilijk bereikbaar zijn.

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. Beschrijving van de techniek en werkingprincipes

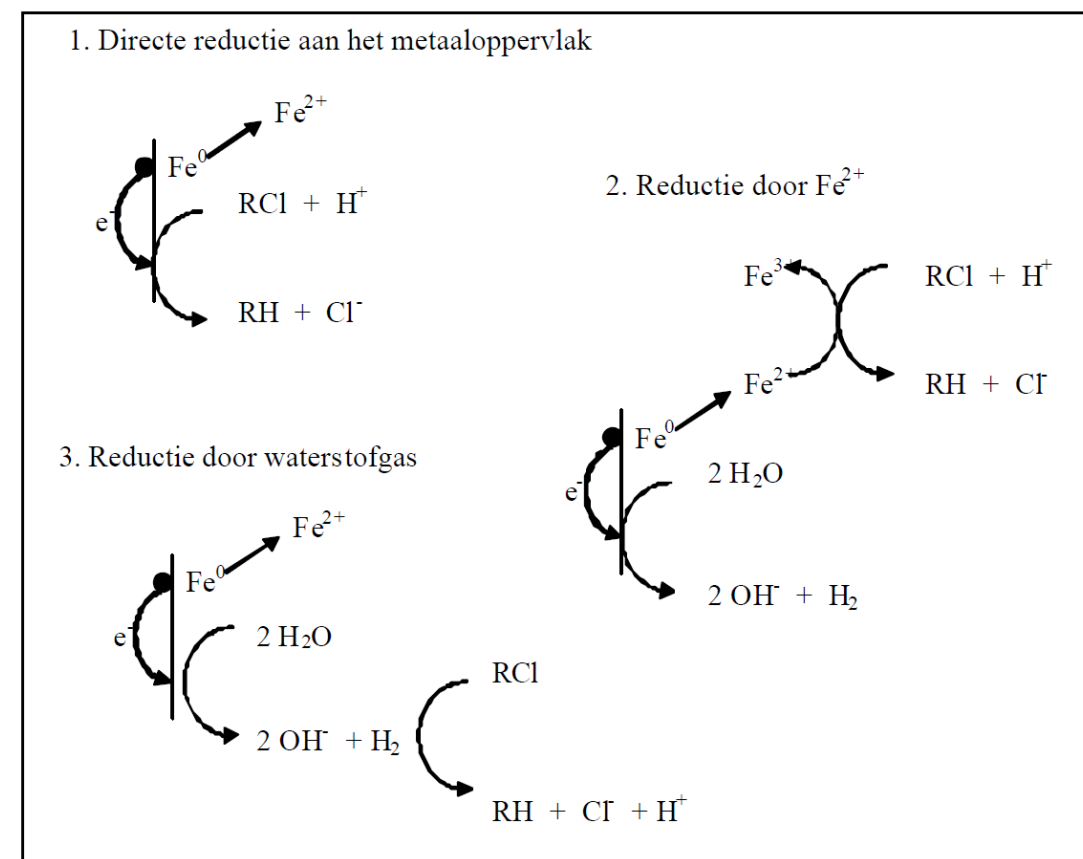
2.1 Algemeen werkingsprincipe van zerovalent ijzer

Er zijn nog heelsaneinwat vragen rond de juiste werking van reductieve dechlorering van gechloreerde solventen in het grondwater in de aanwezigheid van zerovalent ijzer. Dit mechanisme omvat een aantal oxydo-reductie reacties waarvan de meest gekende devolgende zijn:

- Onder aerobe omstandigheden, reageert het opgeloste zuurstof snel met het ijzer waarbij het roest en waarbij ijzerhydroxide gevormd wordt.
- $2 \text{Fe}^0 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4 \text{OH}^-$ (reactie 1)
- Onder anaerobe omstandigheden kan water optreden als oxidant en het ijzer corroderen met de vorming van waterstofgas volgens volgende reactie:
- $\text{Fe}^0 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$ (reactie 2)

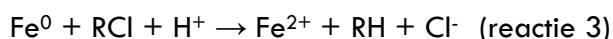
In beide bovenstaande reacties worden hydroxylionen geproduceerd die leiden tot een pH-stijging van het grondwater.

De organochloor verbindingen in het grondwater kunnen in de aanwezigheid van zerovalent ijzer onder bepaalde voorwaarden abiotisch gedechloriseerd worden volgens verschillende reactiemechanismes zoals beschreven in figuur 1.



Figuur 1: Mogelijke reactiewegen voor reductieve dechlorinatie van VOCs door zerovalent ijzer

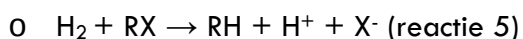
- Een eerste reactiemechanisme: gechloreerde verbindingen kunnen direct aan het metaaloppervlak gereduceerd worden door middel van een elektronenoverdracht en volgens volgend reactieprincipe:



- Een tweede mogelijke afbraakweg is via verdere oxidatie van Fe²⁺ dat een corrosieproduct is van reacties 1 en reactie 2. Fe²⁺ wordt hierbij verder geoxideerd tot Fe³⁺.



- Ten derde kan waterstofgas dat geproduceerd wordt bij de corrosiereactie van water met het zerovalent ijzer (reactie 2), betrokken zijn bij de dechlorinatie van gechloreerde solventen.



Het relatieve belang van elk van de bovenstaande 3 reactiemechanismen in de reductieve dechlorering is tot op heden nog niet vastgelegd.

2.2 Componenten die afgebroken kunnen worden in de aanwezigheid van zerovalent ijzer

Tabel 1 geeft een lijst van gehalogeneerde verbindingen waarop de afbraak door middel van zerovalent ijzer getest werd. Voor de meeste van deze componenten werd afbraak vastgesteld. Anderzijds moet er rekening gehouden worden met het feit dat een beperkt aantal componenten slechts zeer traag tot niet gedehalogeneerd worden onder invloed van het ijzer.

Tabel 1 : Lijst van gehalogeneerde verbindingen getest op hun afbraak door middel van zerovalent ijzer

Parameter	Afbraak van component Ja	Afbraak van component Nee
Tetrachloorkoolstof	Ja	
Trichloormethaan (TCM)	Ja	
Dichloormethaan (DCM)		Nee
Chloormethaan (MCM)		Nee
Tribromomethaan	Ja	
Hexachloorethaan	Ja	
1,1,2,2- Tetrachloorethaan	Ja	
1,1,1,2- Tetrachloorethaan	Ja	
1,1,1-Trichloorethaan	Ja	
1,1,2-Trichloorethaan	Ja	
1,1-Dichloorethaan (1,1 DCA)	Ja	
1,2-Dichloorethaan (1,2 DCA)		Nee
Chloorethaan (MCA)		Nee
1,2 Dibromoethaan	Ja	
Freon 113 (Trichloortrifluoroethaan)	Ja	
Freon 11 (Trichloorfluoroethaan)	Ja	
Tetrachlooretheen (PCE = Per)	Ja	
Trichlooretheen (TCE = Tri)	Ja	
Cis- 1,2-Dichlooretheen (cDCE)	Ja	
Trans- 1,2,- Dichlooretheen (tDCE)	Ja	
1,1 Dichlooretheen (1,1 DCE)	Ja	
Vinylchloride (VC)	Ja	
1,2,3-Trichloorpropaan	Ja	
1,2 Dichloorpropaan	Ja	
1,3 Dichloorpropaan	Ja	
Hexachloorbutadieen	Ja	

2.3 Kinetische aspecten

Volgens verschillende labo-experimenten volgt de reductieve dehalogenatie van VOC's door zerovalent ijzer een eerste orde afbraak kinetiek zoals beschreven in de volgende vergelijking:

$$dC/dt = -k C \quad (\text{eq. 1})$$

Met C = pollutantconcentratie in het grondwater

t = tijd

k = eerste orde afbraaksnelheidsconstante (h^{-1})

De oplossing van deze differentiaal vergelijking geeft het volgende:

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (\text{eq. 2})$$

$$\ln(C/C_0) = -kt \quad (\text{eq. 3})$$

Met C_0 = pollutantconcentratie bij start ($t = t_0$)

C = pollutantconcentratie op tijdstip t

k = eerste orde afbraaksnelheidsconstante (h^{-1})

Bij een eerste orde reactie wordt een halfwaardetijd gedefinieerd als de tijd die nodig is om een bepaalde beginconcentratie aan pollutanten (C_0) te reduceren tot de helft van deze concentratie ($C = C_0/2$). De halfwaardetijd is dan als volgt met de k -waarde gecorreleerd:

$$t_{1/2} = 0.693/k \quad (\text{eq. 4})$$

Experimentele halfwaardetijden zoals gerapporteerd in de literatuur voor verschillende VOC's-verbindingen kunnen sterk variëren en zijn afhankelijk van volgende factoren:

- De pH: Een pH-stijging heeft een daling van de k -waarden als resultaat
- Een stijging van de aanwezige ijzermassa, i.e. van het specifiek ijzeroppervlak, heeft een stijging van de k -waarden tot gevolg
- Een betere menging van het water-ijzermengsel heeft een hogere k -waarde tot gevolg
- De chemische samenstelling van het grondwater kan ook een invloed hebben op de reactiviteit van zerovalent ijzer. De aanwezigheid van Cl^- en van $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ verhoogden de reactiviteit van zerovalent ijzer. Daarentegen bleek dat de aanwezigheid PO_4^{3-} , SO_4^{2-} en NH_4^+ een negatief effect had op de afbraaksnelheid. De invloed van deze parameters varieert echter van het gebruikte type zerovalent ijzer. Wel wordt algemeen gesteld dat NO_3^- , CrO_4^{2-} en SO_4^{2-} , net zoals zuurstof en water, mogelijk als competitor kunnen optreden en het afbraakproces kunnen vertragen.
- Het soort ijzer en het aanwezige specifieke ijzeroppervlak beïnvloeden eveneens de afbraaksnelheid.

2.4 Verschillende types van reactieve ijzerwanden

Verschillende types van ijzerwanden kunnen geïnstalleerd worden:

- Continue reactieve ijzerwand: Hierbij wordt de permeabele ijzerwand ingepland over de hele breedte van de verontreinigingspluim. De hydraulische conductiviteit van de ijzerwand is groter dan deze van het omliggende aquifer, zodat er slechts een minimale verstoring is van de grondwaterstroming.
- 'Funnel & gate': De wand is opgebouwd uit enerzijds ondoorlatende wanddelen die het grondwater leiden naar een aantal permeabele wanddelen die opgebouwd zijn met reactief ijzer. De aangeraden verhouding tussen de lengte van de ondoorlatende wand en de lengte van reactieve barrière is 5/1. Dit is vooral aangewezen in geval van traag stromend grondwater en in geval van een lage polluentenbelading
- 'Vessels' . Kunnen gezien worden als een speciaal soort van funnel-and gate systeem. Het water wordt door middel van ondoorlaatbare wanden naar één of meerdere in situ reactoren geleid gevuld met reactief materiaal. In de reactor kan het grondwater vertikaal stromen. Deze reactoren kunnen vervangen worden van zodra een verminderde reactiviteit wordt waargenomen.

3. Beschrijving van varianten

De techniek van in situ reactieve wanden wordt gebruikt voor de behandeling van een groot aantal types van grondwaterverontreiniging. Het agens dat gebruikt wordt in een reactieve barrière kan bv bestaan bestaan uit volgende types:

- Behandeling van koolwaterstoffen door adsorptie op actief kool, door chemische oxidatie
- Behandeling van zware metalen door neerslag op basis van pH-verhoging of door toevoeging van sulfaten
- Behandeling van vluchtige verbindingen door de persluchtinjectie en bodemluchtextractie (stripping)
- Gestimuleerde natuurlijke afbraak onder anaerobe en aerobe omstandigheden
-

Elk van deze types van reactieve barrières vereist karakteristieken en specifieke eigenschappen, aangepast aan de reacties die er plaatsvinden. Dit overstijgt het doel van deze code. Het doel van deze code van Goede praktijk beperkt zich tot het gebruik van een reactieve ijzerwand voor de behandeling van gechloreerde solventen.

4. Pluim tegenover kernbehandeling

De behandeling van grondwater doorheen een reactieve ijzerwand is vooral gericht op de behandeling van pluimzones. Zelfs al kunnen met deze techniek hoge verontreinigingsconcentraties worden aangepakt tot 300.000 µg/l in opgeloste fase (op basis van een rapport van USEPA, 1998), toch is de techniek niet geschikt voor de behandeling van grondverontreiniging, voor zaklagen (DNAPL) of voor grondwaterverontreiniging dewelke vastzit in microporiën.

5. Verontreinigingen en meest gunstige situaties (kwalitatieve overwegingen)

De techniek van reactieve ijzerwand op een grondwaterverontreiniging met gechloreerde solventen kan succesvol worden toegepast indien volgende omstandigheden aanwezig zijn:

- De verontreiniging van gechloreerde solventen is niet in de kern aanwezig onder de vorm van vrij product (DNAPL). Rekening houdend met het geleidelijk vrijkomen van gechloreerde solventen in oplossing vanuit de DNAPL, wordt de tijd nodig om tot biodegradatie te komen veel te lang waardoor complementaire technieken dienen toegepast te worden (bv ontgraving van de kern)
- De bron van de verontreiniging wordt zodanig weggenomen dat verspreiding van de verontreiniging in de bodem definitief onderbroken wordt
- De chloorverbinding is afbreekbaar (binnen een redelijke tijdsperiode) door contact met het oppervlakte van het Fe^0 deeltje (zie ook de lijst van tabel 1)
- De hydrogeologische karakteristieken van de site en de wijze waarop het grondwater zich beweegt zijn goed gekend
- De watervoerende laag is goed doorlatend
- De bodem heeft een homogene samenstelling: Afwezigheid van bodemlagen of bodemlenzen met verschillende textuur . Afwezigheid van voorkeurskanalen veroorzaakt door kabels en leidingen en ondergrondse structuren
- De diepte van de pluim is beperkt. De plaatsing van een reactieve wand dieper dan 10 m wordt geplaatst leidt tot te hoge kosten
- De aanwezigheid van een ondoorlaatbare laag op een beperkte diepte wordt als voordelig beschouwd. De installatie van een reactieve wand op een ondoorlaatbare laag garandeert dat de verontreiniging niet onder de wand door zal migreren ondanks zijn hoge dichtheid.
- De snelheid waarmee het grondwater zich verspreidt mag niet te hoog zijn. De dikte van de reactieve wand moet voldoende groot moet zijn om een voldoende lange verblijftijd te garanderen van de pollutant in de reactieve wand
- De chemische samenstelling van het grondwater moet gunstig zijn: de gehalten aan carbonaten moet beperkt zijn om het dichtslibben van de reactieve wand te vermijden en dit omwille van neerslagen van metaalcarbonaten.
- De site moet toegankelijk zijn voor machines en de uitrusting noodzakelijk voor de plaatsing van de reactieve wand. Eén keer dat de reactieve wand is geplaatst leidt dit niet meer tot hinder aan bovengrondse activiteiten. Monitoringspeilbuizen dienen echter wel toegankelijk te blijven voor de noodzakelijke monitoringcampagnes. Men dient tevens rekening te houden dat bepaalde delen van de reactieve wand hernieuwd moeten worden na 15 à 20 jaar werking ten gevolge van verstoppingen door neerslagen of uitreageren van de Fe^0 partikels.
- Afwezigheid van kabels en leidingen gevoelig voor pH-stijging en de vorming van reductieve voorwaarden in het grondwater ten gevolge van de behandeling.



6. Vooronderzoek naar de haalbaarheid van de techniek

6.1 Bodemkarakteristieken die de haalbaarheid van de techniek beperken

6.1.1 Fysische eigenschappen van de bodem

De samenstelling van de bodem beïnvloedt de mogelijkheid tot verspreiding van de pollutant naar de reactieve wand toe. De bodemformaties met een slechte doorlatendheid: leem en klei (hydraulische conductiviteit $< 5 \times 10^{-7}$ m/s) waar de verspreidingssnelheid van het grondwater traag is, zijn weinig aangewezen voor een in situ behandeling met een reactieve wand.

6.2 Fysico-chemische eigenschappen van het grondwater

Tijdens het doorstromen van het grondwater doorheen een reactieve wand kan de pH van het grondwater verhogen met 2 à 3 eenheden. Dit houdt het risico in op vorming van neerslagen in de reactieve wand hetgeen kan leiden tot een gedeeltelijke dichtslibbing van de wand of tot een verminderde werking van de Fe^0 partikels door afscherming van het contactoppervlakte met als gevolg een ernstige daling van de efficiëntie en levensduur van de barrière.

Op basis van de gemeten fysico-chemische en chemische eigenschappen van het grondwater, is het mogelijk de hoeveelheid materie die kan neerslaan te berekenen ten gevolge van een pH-verhoging. Geochemische modellen kunnen gebruikt worden bij deze berekening op basis van volgende gemeten parameters: pH, Eh, elektrische conductiviteit, opgelost zuurstof, temperatuur en chemische parameters zoals TOC, DOC, zwevende stof, opgeloste anorganische koolstof (alkaliniteit), Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , S^{2-} , ijzer totaal, Mn, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , K^+ , Na^+ .

6.3 Eigenschappen die de mogelijkheid tot saneren van de site beperken

- Toegankelijkheid van de site: De te saneren site dient toegankelijk te zijn voor de uitrusting en de machines noodzakelijk voor de plaatsing van de reactieve wand. Monitoringspeilbuizen dienen echter wel toegankelijk te blijven voor de noodzakelijke monitoringcampagnes.
- Hinder voor de omgeving: Er zijn op de site en in de onmiddellijke omgeving van de site geen personen of lopende activiteiten die nadeel kunnen ondervinden van de plaatsing van de reactieve wand: geluidshinder, stankhinder, vrijzetting van schadelijke dampen tijdens de ontgraving
- Toestand van de ondergrond: Weinig of geen aanwezigheid op de site of in de onmiddellijke nabijheid van de site van ondergrondse structuren, die kunnen leiden tot voorkeurskanalen voor het verspreidende grondwater en de pollutanten: netwerk van gasleidingen, waterleidingen, elektriciteit, optische vezels, riolering
- Afwezigheid van ondergrondse infrastructuur gevoelig aan hoge pH en de vorming van reducerende omstandigheden in het grondwater als resultaat van de behandeling.

7. Specifiek onderzoek naar de haalbaarheid van de behandelingstechniek

7.1 Te meten parameters op de site

In onderstaande tabellen worden parameters weergegeven die gemeten en/of gekwantificeerd moeten worden alvorens begonnen kan worden met het ontwerp van een reactieve ijzerwand voor de behandeling van een grondwaterverontreiniging met gechloreerde solventen. Deze tabellen vormen een checklist van te verwerven gegevens die ofwel reeds tijdens de lopende bodemonderzoeken (verkennend bodemonderzoek, gedetailleerd bodemonderzoek, risico-onderzoek), ofwel tijdens de opstelling van het saneringsvoorstel of risicobeheersvoorstel, ofwel voor de aanvang van de werken die geen voorstel vereisen, worden vergaard maar voordat er begonnen wordt met labotesten en met een pilootproef. In de tabellen wordt onderscheid gemaakt tussen 2 niveaus van vereisten:

- Parameters die standaard nodig zijn
- Parameters die nuttig kunnen zijn

Tabel 2 : Te meten parameters voordat een ijzerwand wordt overwogen

Parameters	Onderzoeksmethode	Opmerkingen
Kern van de verontreiniging nog aanwezig of weggenomen	Onderzoek naar de historie, terreinbezoek	Ter beschikking na het verkennend bodemonderzoek
Grondconcentraties		
Grondconcentraties zijn afgeperkt in het verticale en horizontale vlak	Boringen, staalname en analyses, afperking (bvb. 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
Grondwaterconcentraties		
Grondwaterconcentraties zijn afgeperkt in het verticale en horizontale vlak	Plaatsing van monitoringpeilputten staalname en analyses, afperking (bvb. krigging)	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het gedetailleerd onderzoek
Schatting van de restverontreiniging	Op basis van geraamde volumes en gemiddelde concentraties	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het gedetailleerd onderzoek
Retardatiefactor	Kd-waarden en effectieve bodemporositeit	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het gedetailleerd onderzoek
Longitudinale verspreidingssnelheid van de verontreiniging (verspreiding van de pluim volgens de grondwaterstromingsrichting)	Modelmatige berekening: Domenico vergelijkingen met invoer van dispersiecoëfficiënten (longitudinaal, lateraal en verticaal ... of het gebruik van numerische modellen zoals MODFLOW	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het risico 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 zoals MODFLOW	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het risico



Parameters	Onderzoeksmethode	Opmerkingen
		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 zoals MODFLOW	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	
Aanwezigheid van vrij product (DNAPL)		
Chemische aard van het vrij product	Staalname en analyse van ten minste 3 monsters van het vrij product	
Laterale afperking van het vrij product	Detectie van het vrij product aan de hand van peilbuizen/ sondeercampagnes met behulp van MIP sondes of bodemluchtmetingen in de bodem	
Diktemetingen van de DNAPL	Metingen van de dikte van de DNAPL in een netwerk van peilbuizen of sonderingen	
Schatting van het volume DNAPL	Metingen van de DNAPL in een netwerk van peilbuizen of sonderingen	
Mobiliteit van het vrij product	Recuperatietesten op site schattingen op basis van berekeningen of door gebruik van modellen	
Algemene parameters		
Schatting van restverontreiniging	Op basis van geraamde volumes en gemiddelde concentraties	Voor elke verontreiniging die een interventie vereist Ter beschikking na het risico onderzoek
	Parameters waarvoor de meting of inschatting standaard nodig is	
	Parameters waarvoor de meting of inschatting nuttig kan zijn	

Tabel 3 : Te meten parameters voordat een ijzerwand wordt overwogen

Parameter	Meetmethode	Opmerkingen
Hydrodynamische bodemparameters		
Bodemstratigrafie: watervoerende lagen, aquitard, aquicludes	Geologische en geotechnische kaarten, sonderingen en beschrijving van het bodemprofiel	Beschikbaar na het gedetailleerd bodemonderzoek
Stijghoogte van de watervoerende l(a)ag(en), hydraulische gradiënt,	Geologische en geotechnische kaarten, sonderingen en beschrijving van het bodemprofiel, plaatsing van peilbuizen, stijghoogtemeting en waterpassing	Beschikbaar na het gedetailleerd bodemonderzoek



Parameter	Meetmethode	Opmerkingen
voortbewegingssnelheid van het grondwater, stromingsrichting, gespannen of semi-gespannen waterlaag		
Watervoerend vermogen van de aquifer(s)	Geologische en geotechnische kaarten, sonderingen en beschrijving van het bodemprofiel	Beschikbaar na het gedetailleerd bodemonderzoek
Seizoensale variaties van de stijghoogtes	Opvolging van de stijghoogtes tijdens opeenvolgende campagnes	
Grondwaterkarakteristieken		
Fysico-chemische parameters van het grondwater: pH, Eh, elektrische conductiviteit, opgeloste O ₂ , T°	Terreinmetingen	Beschikbaar na het gedetailleerd bodemonderzoek
Chemische parameters: TOC, DOC, zwevende stof, DIC (alkaliniteit), Cl ⁻ , Br ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , S ²⁻ , ijzer totaal, Mn, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Ba ²⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Na ⁺ .	Staalnames en laboratoriumanalyses	OVAM 2008: Risico op vorming van neerslagen
	Parameters waarvoor de meting of inschatting standaard nodig is	
	Parameters waarvoor de meting of inschatting nuttig kan zijn	

Tabel 4 : Te meten parameters voordat een ijzerwand wordt overwogen

Parameter	Onderzoek en observatiemethode	Opmerkingen
Aanwezigheid van kabels en leidingen 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 van de leidingen op het terrein: sleuven, CAT-scanner	Beschikbaar na het verkennend en gedetailleerd bodemonderzoek
Aanwezigheid van bovengrondse receptoren voor geluidsoverlast, stankhinder, dampen, ... op de site en in de onmiddellijke omgeving	Inventaris	Mogelijke hinder tijdens de plaatsing van de ijzerwand
Aanwezigheid van receptoren op vlak van de gesaneerde grondwaterlaag en onderliggende grondwaterlagen	Inventaris van nabijgelegen grondwaterwinningen en een hydrogeologische studie	Beschikbaar na het gedetailleerd bodemonderzoek
Toegang tot de site voor het nodige materieel en voldoende oppervlakte	Inventaris	

Aanwezigheid van infrastructuur die beschadigd kunnen worden ten gevolge van pH-verhoging veroorzaakt door de afbraak van verontreiniging in de ijzerwand	Inventaris	
	Parameters waarvoor de meting of inschatting standaard nodig is	
	Parameters waarvoor de meting of inschatting nuttig kan zijn	

Volgende opmerkingen horen bij de tabellen:

- Bronverontreiniging: weggenomen of niet: Er dient zekerheid te bestaan over de afwezigheid van een potentiële residuele bronzone voordat de ijzer wordt opgestart
- Verontreinigende parameters in de bodemluchtfase: gebruikt voor de afperking van vrij product in de bodem: Voor het nemen van bodemluchtstalen wordt verwezen naar de Code van Goede Praktijk n° 3 van Leefmilieu Brussel betreffende het nemen van grond-, grondwater-, sediment- en bodemluchtstalen
- Het risico op vorming van neerslagen in de reactieve ijzerwand kan ingeschat worden op basis van gemeten gehalten, pH waarden, met behulp van geochemische modellen



7.2 Noodzaak van labotesten

Vooraleer wordt overgegaan tot een “full scale” implementatie van de ijzerwand wordt in een eerste fase een labotest uitgevoerd om de haalbaarheid van de techniek na te gaan en om de noodzakelijke behandelingsparameters op punt te stellen.

7.2.1 Stap 1: Uitvoering van batch-testen

In een eerste stap wordt het type van Fe^0 getest dat in de ijzerwand gebruikt kan worden. De verschillende geteste materialen verschillen in:

- Hun oorsprong: te kiezen in functie van hun nabijheid ten opzichte van de site waar ze gebruikt zullen worden, de aankoopprijs en het transport
- De granulometrie en het specifieke oppervlakte van de granulaten (gemeten volgens de stikstof adsorptie/desorptie isotherm). Volgens Gavaskar (et al. 2000), situeert de optimale granulometrie zich tussen 0,3 en 2,38 mm diameter (8 tot 50 mesh)
- Homogeniteit van de voorgestelde batches
- Hun chemische samenstelling en hun potentieel tot vrijzetting van metallische verontreinigingen

Deze labotesten worden uitgevoerd aan de hand van hermetisch afgesloten flessen gevuld met verontreinigd grondwater en met Fe^0 partikels. Het mengsel wordt zachtjes geschud (trage rotatie van 5 toeren per minuut) en bemonsterd op regelmatige tijdstippen. De flessen worden op een constante temperatuur gehouden zo dicht mogelijk bij de temperatuur van het grondwater (8 tot 12°C). Het verontreinigd grondwater gebruikt in de test is ofwel verontreinigd grondwater afkomstig van de te saneren site ofwel water dat kunstmatig is aangerijkt met verontreiniging (bv zuiver water gebufferd met CaCO_3 waar een vooraf bepaalde hoeveelheid gechloreerde solventen aan is toegevoegd).

Volgende parameters worden periodiek opgevolgd:

- De begingehaltes aan gechloreerde solventen en een eerste schatting van de eerste orde constante k en de halfwaardetijd ($t_{1/2}$) van de polluenten.
- De gehaltes aan afbraakproducten van de initieel aanwezig gechloreerde solventen
- pH
- Redoxpotentiaal (E_h)

Op basis van deze testen is het mogelijk om het juiste type en de juiste vorm van Fe^0 partikels te selecteren in functie van de behandelingstechniek en om een uitspraak te doen over de haalbaarheid van de techniek. Er wordt aangeraden om de k - en $t_{1/2}$ waardes bekomen uit de labotest niet te gebruiken voor het ontwerp van de reactieve ijzerwand aangezien de testomstandigheden van de batchtest sterk kunnen verschillen van de werkelijkheid.

Het type Fe^0 dat overwogen wordt om gebruikt te worden dient verder onderzocht te worden op zijn vermogen tot afbraak van de verontreiniging. Hiervoor wordt een uitloogtest (kolomtest) uitgevoerd volgens de norm NEN7443 ($L/S = 10$). De gehaltes aan zware metalen gemeten in het eluaat mogen de interventienormen van grondwater in geen geval niet overstijgen.

Indien het gebruikte ijzer afkomstig is van bijproducten uit de staalindustrie, dient bijkomend het gehalte koolwaterstoffen onderzocht te worden.

7.2.2 Stap 2: Kolomtesten

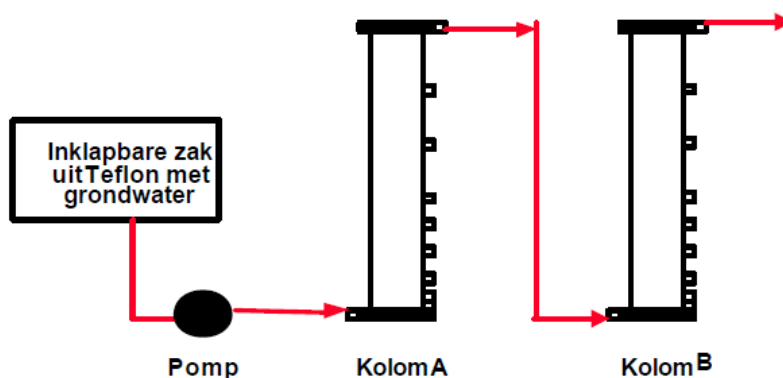
De kolomtesten hebben als doel volgende zaken vast te stellen:

- Afbraaksnelheden van gechloreerde solventen aanwezig in het grondwater en van de gevormde tussenproducten tijdens het afbraakproces
- De nodige verblijftijd in de reactieve ijzerwand om de afbraak van gechloreerde solventen te laten verlopen tot het gewenste niveau
- De invloed van neerslag op het verloop van het proces

De testopzet wordt schematisch weergegeven in onderstaande figuur:

- Een inklapbare zak uit Teflon gevuld met grondwater afkomstig van de verontreinigde site
- Eén of meerdere kolommen opgesteld in serie en gemaakt van Plexiglas met een interne diameter van 4 cm en een lengte van 50 cm. Deze kolommen worden gevuld met het materiaal dat gebruikt zal worden in de reactieve ijzerwand: een mengsel van ijzergranulaat en zand of enkel ijzergranulaat. Meerdere kolommen worden in serie geplaatst. Rekening houdend met de doorstroomsnelheid van het water wordt 1 kolom niet als voldoende beschouwd om een voldoende verblijftijd te garanderen.
- Verschillende meetpunten worden voorzien aan de ingang en de uitgang van de kolom evenals langsheen de kolom op volgende hoogtes (bv 3, 5, 10, 15, 20, 30 en 40 cm).
- Volgende fysische parameters worden met de kolomtest gemeten:
 - Specifiek oppervlak van het ijzergranulaat
 - Bulkdensiteit van het gebruikte aanvulmateriaal
 - Volume van het aanvulmateriaal en gewicht van het ijzer (ml en kg)
 - Porositeit van het materiaal (%)
 - Poriënvolume van het aanvulmateriaal (ml)

Figuur 7-1 Schematische weergave (niet op schaal van de testopstelling)



Er wordt aangeraden om de bemonstering over meerdere punten uit te voeren tot een steady state wordt bekomen van concentratieprofielen in functie van de doorlopen afstanden in de kolom. Meestal is dit na een 40-tal poriënvolumes grondwater.

Volgende parameters dienen gemeten te worden:

- De doorstroomsnelheid van het water
- De gehalten aan gechloreerde solventen: initieel aanwezige producten en tussenproducten (bv. Per, Tri, cis-DCE, trans-DCE, 1,1 DCE, VC, 1,1,1-TCA, 1,1-DCA, PCM, TCM, DCM) op 9 tot 16 representatieve staalnamepunten
- Eh en pH ter hoogte van de staalnamepunten
- Anorganische analyse aan de ingang en uitgang van de testopstelling: kationen: Ba^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} en Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , NH_4^{+} , Anionen: Cl^{-} , SO_4^{2-} , Br^{-} , NO_3^{-} , NO_2^{-} , PO_4^{3-} , S^{2-}
- Andere parameters: Alkaliniteit (gehalte aan anorganische koolstof, gehalte in CO_2 en in HCO_3^{-} , buffercapaciteit (met pH tussen 4,3 en 8,3), TOC en droogresidu.

De interpretatie van de gegevens focust zich op 3 zaken:

De bepaling van de halfwaarde tijd van de polluenten en van de noodzakelijke verblijftijd.

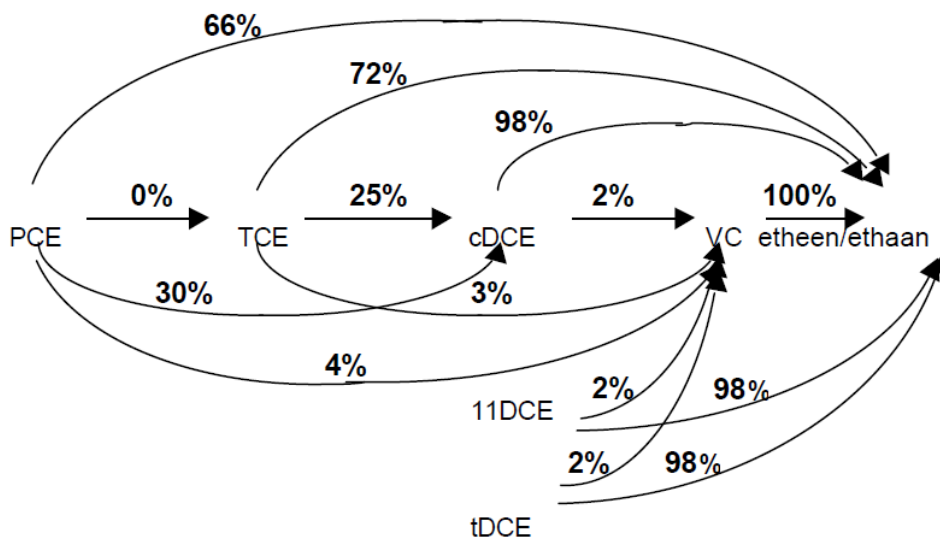
Het onderzoek naar het verloop van de concentraties van de verschillende gechloreerde verbindingen in functie van hun afstand die in de testopstelling doorlopen werd en dus van hun verblijftijd (rekening houdend met de doorstroomsnelheid van het water) laat voor elk van deze verbindingen toe een inschatting te maken van hun eerste orde afbraakconstante (k) en van hun halfwaardetijd ($t_{1/2}$).

De verblijftijd van het grondwater in de reactieve barrière kan dus ingeschat worden op basis van deze constante k , de maximaal te verwachten concentraties aan de ingang van de reactieve wand tijdens de behandeling en het beoogde objectief tijdens de behandeling.

Om rekening te houden met de vorming van afbraakproducten dewelke zelf ook gekarakteriseerd worden door een specifieke afbraaksnelheid, kan het nuttig zijn om op basis van de gemeten ingangconcentraties aan gechloreerde solventen over gans de lengte van de testopstelling een molair conversiemodel toe te passen. Een molair conversie model preciseert voor elke verbinding de verschillende mogelijke afbraakwegen en voor elk van deze verbindingen de verhouding (uitgedrukt in molaire fractie) waarin ze voorkomen.

Deze conversiemodellen waarvan een voorbeeld is opgenomen in onderstaande figuur laten toe de maximale concentraties in te schatten van alle verbindingen die mogelijks aanwezig kunnen zijn in de behandelingsopstelling (vanaf de ingang en de nadien gevormde verbindingen) op basis van de maximale concentraties verwacht aan de ingang van de ijzerwand.

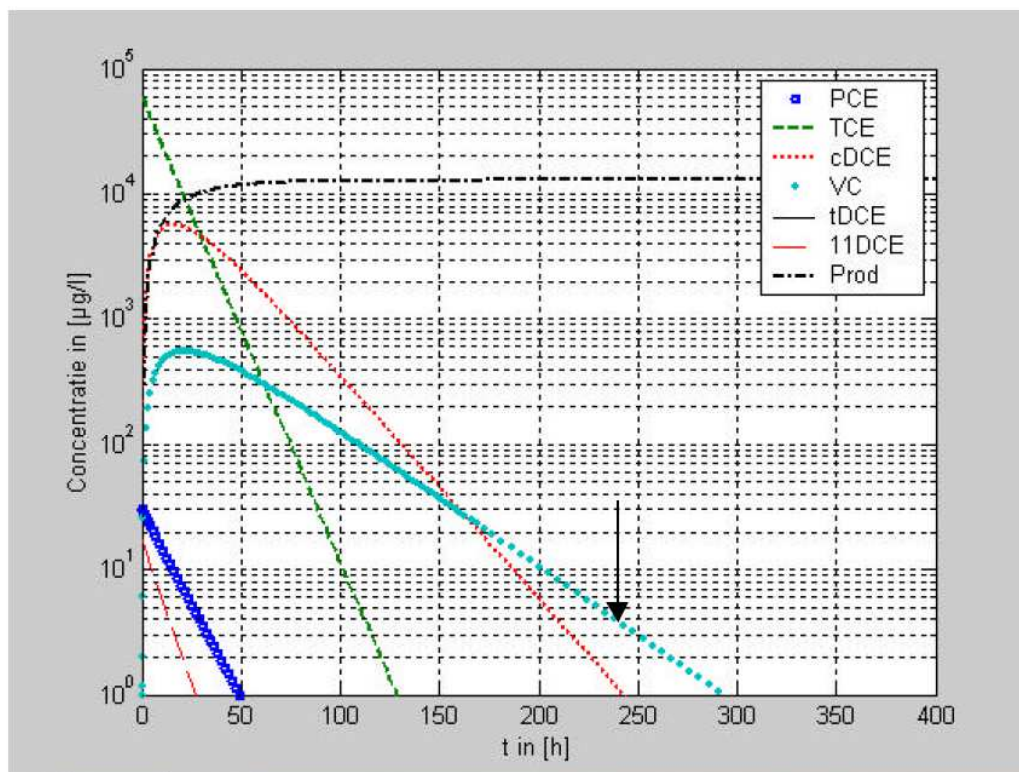
Figuur 7-2 Voorbeeld van een molair conversiemodel (uit de “Reactieve ijzerwanden, Code van Goede Praktijk, OVAM 2008)



Met behulp van de maximaal verwachte ingangconcentraties aan de barrière, het conversiemodel, de afbraakconstanten van de verschillende gechloreerde verbindingen (dewelke voorkomen aan de ingang van de barrière of erin gevormd worden) en de doelstellingen, is het mogelijk om de minimale verblijftijd van het grondwater in de reactieve ijzerwand in te schatten.

Een voorbeeld van grafische inschatting van de verblijftijd aan de hand van een semi-logaritmisch diagramma ($\ln C$ vs t) is weergegeven in onderstaande figuur.

Figuur 7-3 Voorbeeld van een grafische inschatting van de minimale verblijftijd van grondwater op basis van verwachte gehalten, geschatte gehalten (met het conversiemodel) en eerste orde afbraakconstanten in functie van de doelstellingen (Uit de Reactieve ijzerwanden, Code van Goede Praktijk, OVAM 2008)



Tijdens de berekening van de dikte van actieve barrière op basis van minimale verblijftijd en op basis van de doorstroomsnelheid van het grondwater, dienen volgende voorzorgen genomen te worden:

- Correctie van de afbraaksnelheid indien de kolomtesten uitgevoerd zijn op T° hoger dan deze van de bodem. De afbraaksnelheden dalen met een factor 2 tot 2,5 indien de temperatuur waarop het labo-experiment werd uitgevoerd 20 tot 25 °C bedraagt in vergelijking met een bodemtemperatuur van 8° tot 12°C.
- Er dient rekening gehouden te worden met een veiligheidsfactor die corrigeert voor de onzekerheden die kunnen ontstaan tijdens de eigenlijke plaatsing van de reactieve wand op het terrein. Voor de berekening van de dikte van de barrière wordt een veiligheidsfactor van 2 tot 3 aanbevolen.

Impact van de behandeling op de pH en de redoxpotentiaal van het grondwater

Na doorstroming doorheen de actieve barrière neemt de pH van het grondwater gevoelig toe terwijl de redoxpotentiaal sterk daalt. Deze fenomenen kunnen kwantitatief geanticipeerd worden op basis van de resultaten van de kolomtesten.

Impact op de anorganische parameters van het grondwater en inschatting van neerslagen

Tijdens de passage doorheen de actieve barrière verandert de grondwaterkwaliteit als volgt:

- Aanrijking met Cl^- (afbraakproduct van de reductieve degradatie van chloorverbindingen) en NH_4^+ (reductie van nitraten en nitrieten)
- Afname van Ca^{2+} , Mg^{2+} en DIC omwille van neerslag van hydroxides en carbonaten door de pH-verhoging

Op basis van analytische gegevens is het mogelijk om de hoeveelheid neerslagen die in de reactieve barrière gevormd zullen worden in te schatten tijdens de grondwaterbehandeling en om het risico op verstopping van de behandelingsinfrastructuur te anticiperen.

7.3 Noodzaak voor een piloottest

De uitvoering van een piloottest wordt niet als verantwoord beschouwd voor grote behandelingsprojecten of beheersprojecten, gegeven de hoge kosten die gepaard gaan met de installatie van een wand (mobilisatie van machines, ...).

In de meerderheid van de gevallen zal de expert over voldoende resultaten beschikken op basis van de 2 fases van de labtest om een uitspraak te kunnen doen over de haalbaarheid van de techniek (technisch en financieel) en om de ontwerpparameters op punt te stellen: doorstroomsnelheid van het grondwater, verblijftijd, dikte van de wand, type van het ijzer,

Een voorwaarde blijft een betrouwbare en gedetailleerde kennis van de hydrogeologische karakteristieken van de site.

8. Beschrijving van het type wand

Een reactieve ijzerwand voor de behandeling van gechloreerde verbindingen bestaat uit volgende types.

8.1 Continue wand

Een reactieve wand, opgesteld in de te behandelen watervoerende lagen. Deze barrière bestaat uit:

- Hetzij een sleuf gevuld met enkel granulaten van Fe^0 (of granulaten van Fe^0 + een ander metaal) of gemengd met zand dewelke geplaatst is tussen 2 sleuven gevuld met drainerende materialen (gecalibreerd grind, ...) stroomopwaarts en stroomafwaarts van de eerste
- Hetzij één enkele sleuf met ijzergranulaten meteen geplaatst in de te behandelen watervoerende laag.

De breedte en het vermogen van deze barrière dient voldoende te zijn om gans de pluimzone af te vangen. De hydraulische conductiviteit van de barrière dient gelijk of lager te zijn dan deze van de watervoerende laag.

De barrière kan ofwel rusten op een onderliggende ondoordringbare laag (aquitard) ofwel van het type "hanging" zijn.

Het dak van de actieve barrière moet in staat zijn om de verontreinigingspluim af te vangen ook in geval van belangrijke fluctuaties (seizoensgebonden of andere) in piëzometrische stijghoogtes. Het bovenste deel van de reactieve wand dient zolang mogelijk in de verzadigde zone van de bodem te blijven om corrosie van de ijzergranulaten te vermijden omwille van indringende O_2 vanuit de onverzadigde zone.

Er bestaan verschillende methodes van plaatsing (zie het werk van Gavaskar A. et al, Batelle, maart 2000). Volgende methodes kunnen onderscheiden worden:

- Ontgraving met kraan uitgerust met kraanbak, met of zonder beschoeiing (stalen damwand, verplaatsbare kisten,...) en met directe plaatsing van het reactieve materiaal
- Ontgraving met kraan uitgerust met kraanbak, met of zonder beschoeiing en gebruik van een tijdelijke isolatiewand (stalen damwand,...) om sleuven te plaatsen dewelke drainerend en reactief materiaal bevatten
- Ontgraving met behulp van een kraan met lepelbak
- Ontgraving voor de plaatsing van metalen cilinders in de grond gevuld met reactief materiaal (eventueel ook gevuld met drainerend materiaal) en achteraf terugtrekken van de metalen cilinders
- Ontgraving van de bodem en onmiddellijke plaatsing van het reactief materiaal met behulp van een "trencher"
- Ontgraving en stabilisatie van de sleuf met behulp van een biodegradeerbare gel en plaatsing van reactief materiaal

- Ontgraving van de bodem en plaatsing van het reactief materiaal met behulp van avegaarboringen
- Hydraulisch “fracturing” van de watervoerende laag gevolgd door een injectie van het reactief materiaal (een mengsel van reactief ijzer en een biodegradeerbare gel)
- Directe injectie onder druk van een biodegradeerbare gel die het reactieve ijzer bevat (Jetting)
- Injectie van een biodegradeerbare gel dewelke het ijzer bevat (H-beam of “vibrated I-beam”)
-

8.2 Funnel & Gate systeem

Deze behandelingsinfrastructuur bestaat uit een ondoorlatende wand dewelke geplaatst wordt op het traject van de verontreinigingspluim (Funnel) en doorlaatbare cellen waarin het grondwater circuleert en behandeld wordt. De aangeraden verhouding tussen beide types van infrastructuur, uitgedrukt in lengte bedraagt 5/1.

De installatietechnieken van ondoorlaatbare wanden (hydraulische conductiviteit van $< 10^{-9}$ m/s) variëren:

- Stalen damplanken met vloeistofdichte verbindingen
- Slibwanden: met behulp van slurries gemaakt van uitgegraven gronden + bentoniet, van cement – bentoniet, van beton (cement en aggregaten), + bentoniet, of met behulp van composieten (bentoniet – bodem, bentoniet of cement bentoniet – geomembraan uit HDPE).

De plaatsingstechnieken voor doorlaatbare barrières staan beschreven in paragraaf 8.1.

8.3 Vessels

Dit systeem is een variant op het voorgaande. Het water wordt door middel van ondoorlaatbare wanden naar een gate geleid die eigenlijk een in-situ (of on-site) reactor is, gevuld met reactief materiaal. In de reactor kan het grondwater vertikaal stromen. Deze “vessels” blijven bereikbaar na installatie en kunnen vervangen worden als hun werkingsgraad vermindert.

9. Omschrijving van de installatie die geplaatst zal worden

De uiteindelijke installatie die geplaatst zal worden voor de behandeling zal beschreven worden door tenminste volgende parameters zoals opgenomen in onderstaande tabel.

De installatie zal beschreven worden door de expert volgens een technisch schema.

Tabel 5 : Aan te leveren gegevens betreffende het te plaatsen systeem

Type van wand	Parameter	Omschrijving	Opmerkingen
Actieve barrière	Dimensies	Breedte, diepte en dikte. Verantwoording van de parameters: doorstroomsnelheid, noodzakelijke verblijftijd, veiligheidsparameters	Op basis van de labtesten (batch en kolom)
	Ontwerp van de barrière	Sleuf enkel gevuld met ijzer Meerdere sleuven gevuld met ijzer en grind). Toegang indien een interventie noodzakelijk is	
	Type van het ijzer	Oorsprong, samenstelling en verwacht rendement, mogelijkheid tot vrijzetting van metalen	Op basis van de labtesten (batch en uitloogtest)
	Plaatsingsmethode	Omschrijving van de plaatsingsmethode, omschrijving van het depot voor opslag van ontgraven gronden. Het centrum dat de verontreinigde gronden zal ontvangen. Eventuele stabiliteitsmetingen	
	Levensduur	Verwacht rendement en levensduur rekening houdend met neerslagen. Indien nodig methode van reactivatie van de actieve laag (vervanging, menging, reiniging door flushing van het ijzer)	
	Hydrogeologische aspecten	Verwachte hydraulische conductiviteit van de barrière, impact op het doorstromingspatroon van het grondwater: modellering door MODFLOW of een andere simulatiemodel	
	Verwacht rendement	Verwacht rendement op de	

Type van wand	Parameter	Omschrijving	Opmerkingen
	van de behandeling	afvang van de pluim: simulatie van de afvang met behulp van de modellen MODPATH of gelijkwaardige modellen	
Funnel & Gate	Dimensies	Breedte, diepte en dikte. Verantwoording van de parameters	
	Ontwerp van de wanden	Stalen damwanden, bodem – bentoniet, ...	
	Plaatsingsmethode	Omschrijving van de plaatsingsmethode, omschrijving van het depot voor opslag van ontgraven gronden. Het centrum dat de verontreinigde gronden zal ontvangen. Eventuele stabiliteitsmetingen	
	Hydrogeologische aspecten	Verwachte hydraulische conductiviteit van de barrière, impact op het doorstromingspatroon van het grondwater: modellering door MODFLOW of een andere simulatiemodel	
	Verwacht rendement van de behandeling	Verwacht rendement op de afvang van de pluim: simulatie van de afvang met behulp van de modellen MODPATH of gelijkwaardige modellen	
Behandelingsdoelstelling	Behandeling van de verontreinigingspluim in het grondwater	Te behalen doelstelling op een duurzame manier stroomafwaarts van de barrière. De behandelingsduur houdt rekening met de vuilvracht in de bodem	

Tijdens de voorstelling van de behandelingsinfrastructuur, zal de noodzaak tot wegnahme van de actieve barrière bediscussieerd worden.

10. Veiligheid- en specifieke stabiliteitsmaatregelen en beperking van overlast: geuren, geluid, 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 door verstoring van het doorstromingspatroon van het grondwater: verandering van stijghoogtes, risico's op onderlopen van laaggelegen punten,...
- Risico op vrijzetting van metaalverontreinigingen vanaf de ijzerwand en risico's verbonden met de pH-stijging van het grondwater
- Risico's voor nabijgelegen waterwinningen
- Risico's voor de stabiliteit van gebouwen aanwezig tijdens de plaatsing van ijzerwand

10.2 Risico's verbonden met de verstoring van het doorstromingspatroon van het grondwater

Stroomopwaarts van de barrière kan een verhoging van de stijghoogtes gecreëerd worden indien de hydraulische conductiviteit van de barrière lager is dan deze van de watervoerende laag. Op laaggelegen punten kan deze situatie zorgen voor overstromingen en opkwalling van het grondwater. Het gebruik van simulatiemodellen op de grondwaterstromingsrichting laat toe deze schadegevallen te anticiperen en corrigerende maatregelen te treffen: verhoging van de verdeling tussen het doorlatend gedeelte van de barrière/ de lengte van het ondoorlatend gedeelte van de barrière.

Stroomafwaarts van de barrière, kan een daling van de stijghoogte een gevolg zijn van een lage hydraulische conductiviteit in de barrière. In geval van een belangrijke daling dient de impact hiervan onderzocht te worden op de stabiliteit van nabijgelegen structuren.

10.3 Risico op vrijzetting van metaalverontreinigingen vanaf de ijzerbarrière en risico's gelegen aan de pH-stijging van het grondwater

Uitloogtesten die uitgevoerd worden op het ijzer nul materiaal zullen toelaten om op kwantitatieve wijze het risico op vrijzetting in te schatten. Onzekerheid blijft nochtans bestaan over het lange termijn gedrag van ijzernul deeltjes.

Over het algemeen zal een pH-verhoging in het grondwater overeenkomen met daling van de mobiliteit van verontreinigingen: gehydrolyseerde zware metalen verontreiniging, zwakke geïoniseerde zuren (fenolen), Het omgekeerde is waar voor sommige andere verontreinigingen zoals: gecomplexeerde cyanides,

Op basis van de gemeten concentraties in het grondwater en op de vaste bodemfractie, zal de expert de risico's onderstrepen die samengaan met een pH-verandering van het grondwater en hij zal de procedure van opvolging van de behandeling bijstellen in voorkomend geval.

10.4 Risico's voor nabijgelegen waterwinningen

Waterwinningen die gebruikt worden in de publieke distributie moeten beschouwd worden als een prioritair doel. Met andere waterwinningen, gebruikt voor privédoeleinden moet eveneens rekening gehouden worden, indien deze riskeren hinder te ondervinden ten gevolge van de behandeling. Deze waterwinningen kunnen hinder ondervinden ten gevolge van een onvoldoende werking van de grondwaterbehandeling ter hoogte van de pluim dewelke zich naar de waterwinningen toe verspreidt.

De controle op de grondwaterkwaliteit stroomafwaarts van de behandelingszone dient bijgevolg verplicht te worden uitgevoerd.

10.5 Risico's op de stabiliteit van gebouwen en structuren aanwezig in de nabijheid van de werf tijdens de plaatsing van de behandelingsinfrastructuur

Het belang van de risico's op de stabiliteit van structuren tijdens de installatiewerken van de reactieve wand hangt af van de gebruikte techniek:

- Intrillen van damwanden en profielen: trillingen tijdens het induwen en het uittrekken
- Ontgraving zonder beschoeiing: risico op inkalving van de wand
- Bemaling van het grondwater tijdens de ontgraving en tijdens de installatie van de actieve wand: verlies van densiteit en compactatiegraad van de gedraineerde grond

De evaluatie van de stabiliteitsrisico's van structuren en van de maatregelen die genomen moeten worden om de risico's te controleren vormen onderdeel van het saneringsvoorstel/risicobeheersvoorstel, of worden voor behandelingen die geen voorstel vereisen, nadien in het rapport toegelicht.

10.6 Conformiteit met de bestaande wetgeving

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 Doelstelling van de begeleiding

De voornaamste objectieven van deze monitoring zijn:

- Nagaan of de vervuilingspluim gecapteerd wordt door de wand en niet langs of onder de wand stroomt
- Nagaan of de beoogde behandeling van het grondwater in de wand effectief verloopt en effectief blijft verlopen. Dit wil zeggen nagaan in welke mate de opgelegde grondwaternormen bereikt worden.
- Nagaan of de installatie van de wand geen negatieve effecten heeft op de kwaliteit van het grondwater stroomafwaarts van de ijzerwand en op het stromingspatroon van het grondwater ter hoogte van de site.
- Een inschatting maken van de levensduur van de ijzerwand.

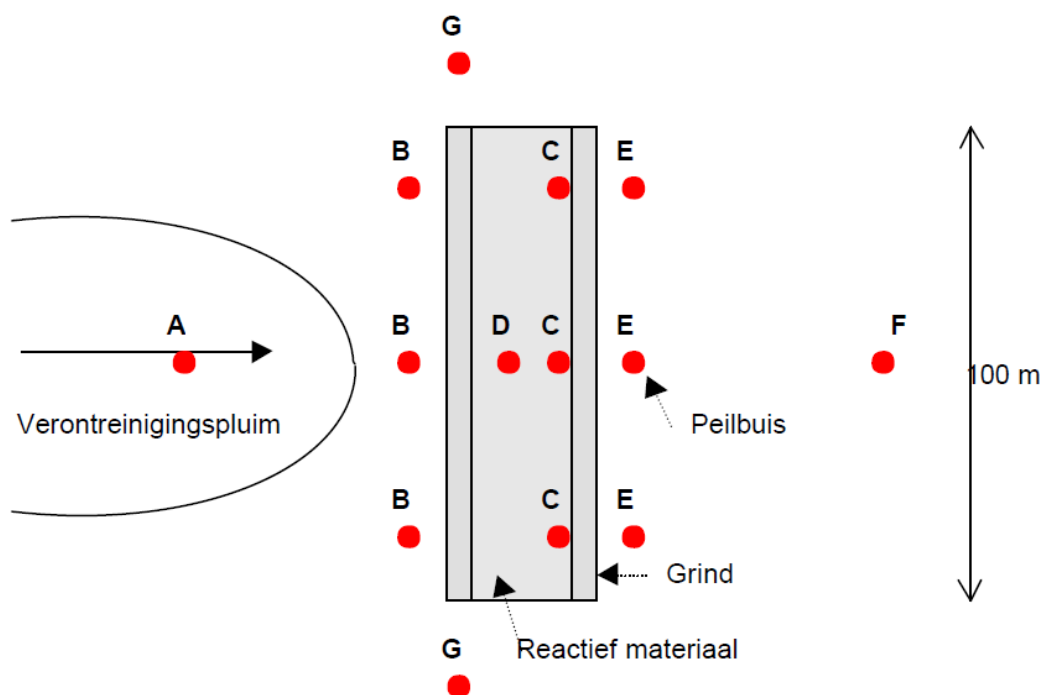
11.2 Opvolgingsmaatregelen: type van ijzerwand

De maatregelen die genomen moeten worden voor de opvolging van de behandeling, in de 3 gevallen van gebruikte systemen (continue wand, Funnel & Gate, Vessels) zijn schematisch weergegeven in onderstaande figuren.

Voor de installatie van controle peilbuizen wordt verwezen naar de code van goede praktijk nr. 2 van Leefmilieu Brussel betreffende de plaatsing van peilbuizen. Voor het nemen van grondstalen, grondwaterstalen en bodemluchstalen wordt verwezen naar de code van goede praktijk nr. 3 van het Leefmilieu Brussel “Staalnames in grond, grondwater, slib en bodemlucht,...”. De analyse van deze stalen dient te gebeuren conform de code van goede praktijk nr.4 “Code van goede praktijk voor analysemethodes” van Leefmilieu Brussel.

11.2.1 Continue wand

Figuur 5 : Opvolgingsmethode in geval van een continue wand



De meetmethode berust op volgende elementen:

- Peilput (type A) geplaatst op tenminste 10 meter stroomopwaarts van de wand (op de as van de verontreinigingspluim) om de ingaande grondwaterkwaliteit te meten
- Peilbuizen van het type B, gesitueerd 1 tot 2 m stroomopwaarts van de wand.
- Peilbuizen van het type C gesitueerd enkele centimeters verwijderd van het stroomafwaarts gelegen aquifer materiaal of grind. Volgens OVAM 2006 worden bij voorkeur geen peilbuizen in de eventueel aanwezige grindzone geplaatst
- Een peilbuis, type D gesitueerd in het stroomopwaartse gedeelte van de reactieve wand, stroomopwaarts van peilbuizen C, om (I) een inschatting te maken van de afbraaksnelheid en om (II) een eventuele doorbraak van polluenten vroeger te detecteren (breuk van de wand). D wordt best geplaatst daar waar de snelste doorstroming wordt verwacht. De plaatsing van een dergelijk type van peilbuis is enkel mogelijk voor wanden met grote dikte.
- Peilbuizen van het type E worden 1 tot 2 m stroomafwaarts van de wand geplaatst
- Eén peilbuis F wordt verder stroomafwaarts van de wand gezet.
- Peilbuizen van het type G worden zijdeling van de reactieve wand geplaatst om na te gaan of de verontreinigingspluim in zijn geheel gecapteerd wordt.

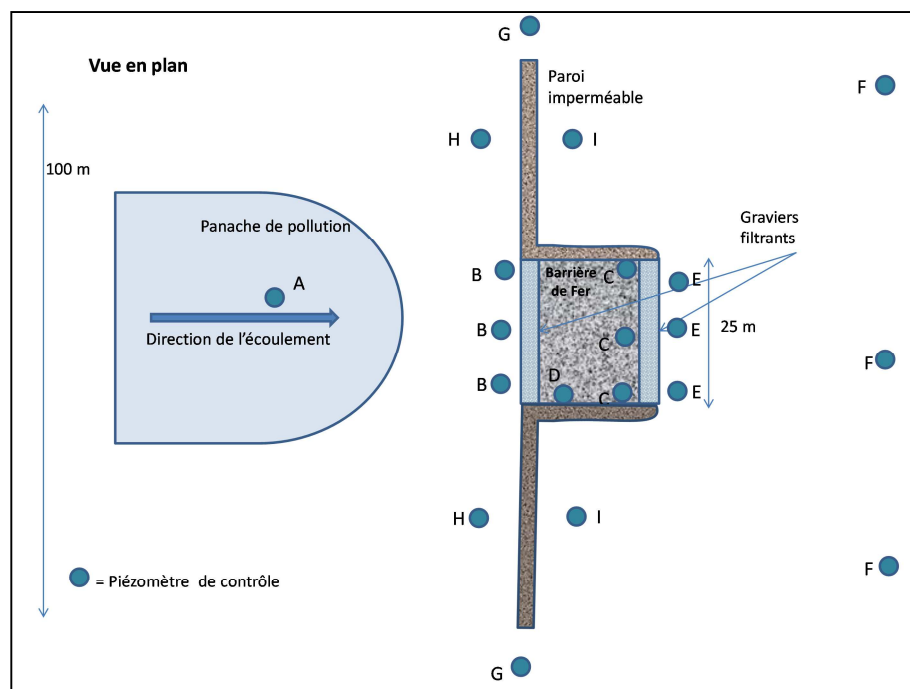
Het schema van bovenstaande figuur geeft het aantal controlepeilbuizen weer voor een continue wand met een lengte van maximaal 100m. In geval langere lengtes wordt het aantal peilbuizen aangepast zoals aangeduid in onderstaande tabel. Dezelfde tabel geeft een aanduiding van het belang van elk type van peilbuis.

Tabel 6 : Aantal controle peilbuizen te plaatsen volgens hun ligging – relatief belang van de verschillende types van peilbuizen (Uit de OVAM 2006, Reactieve ijzerwanden, Code van Goede Praktijk)

Type van peilbuis	Aantal voor een barrière van 100 m (of minder)	Bijkomende peilbuizen	Belang van de peilbuis
A	1	-	++
B	3	1 per 100 bijkomende m	+++
C	3	1 per 50 bijkomende m	+++
D	1	Enkel bij brede wanden	+
E	3	1 per 100 bijkomende m	+++
F	1	-	+++
G	1 + 1	-	++

11.2.2 'Funnel - and - Gate configuratie

Figuur 6 : Opstelling van peilbuizen in geval van een Funnel & Gate configuratie



De meetopstelling berust op volgende elementen:

- Eén peilbuis type A op tenminste 10 meter stroomopwaarts van de wand (op de as van de verontreinigingspluim) om de ingaande grondwaterkwaliteit te meten die naar de barrière toestroomt.

- Peilbuizen van het type B gesitueerd 1 tot 2 m stroomopwaarts van de wand.
- Peilbuizen van het type C gesitueerd enkele centimeters verwijderd van het stroomafwaarts gelegen aquifer materiaal of grind. Volgens OVAM 2006 worden bij voorkeur geen peilbuizen in de eventueel aanwezige grindzone geplaatst. Bij een 'funnel-and-gate' systeem is het belangrijk om de peilbuizen aan de rand van de ondoorlatende wand te plaatsen aangezien de grondwatersnelheid groter kan zijn op deze punten. Deze peilbuizen kunnen "multilevel" geplaatst worden.
- 1 peilbuis van het type D: gesitueerd stroomopwaarts van de reactieve barrière. Deze peilbuis dient een beeld te geven van de afbraaksnelheid van polluenten doorheen de barrière. en om (II) een eventuele doorbraak van polluenten vroeger te detecteren. Peilbuis D wordt best geplaatst daar waar de snelste doorstroming verwacht wordt, wat mogelijk aan de rand van de wand is.
- Peilbuizen van het type E gesitueerd 1 tot 2 m stroomafwaarts van de doorlaatbare wand.
- Peilbuizen van het type F gesitueerd verder stroomafwaarts
- Peilbuizen van het type G gesitueerd zijdelings naast de reactieve wand om na te gaan of de vervuiling gecapteerd wordt door de wand en niet langs de wand heen stroomt.
- Peilbuizen H gesitueerd stroomopwaarts van de impermeabele wand
- Peilbuizen I gesitueerd stroomafwaarts van de impermeabele wand om na te gaan dat de vervuiling pluim efficiënt gecapteerd wordt door de wand en niet onder/langs de ondoorlaatbare wand stroomt.

Het schema van bovenstaande figuur geeft het aantal controlepeilbuizen weer voor een barrière met een lengte van maximaal 100m waarvan het reactief gedeelte een maximale lengte van 25 m bedraagt en waarvan de rest het ondoorlatende gedeelte is. In geval langere lengtes wordt het aanbevolen aantal peilbuizen aangepast zoals aangeduid in onderstaande tabel. Dezelfde tabel geeft een aanduiding van het belang van elk type van peilbuis.

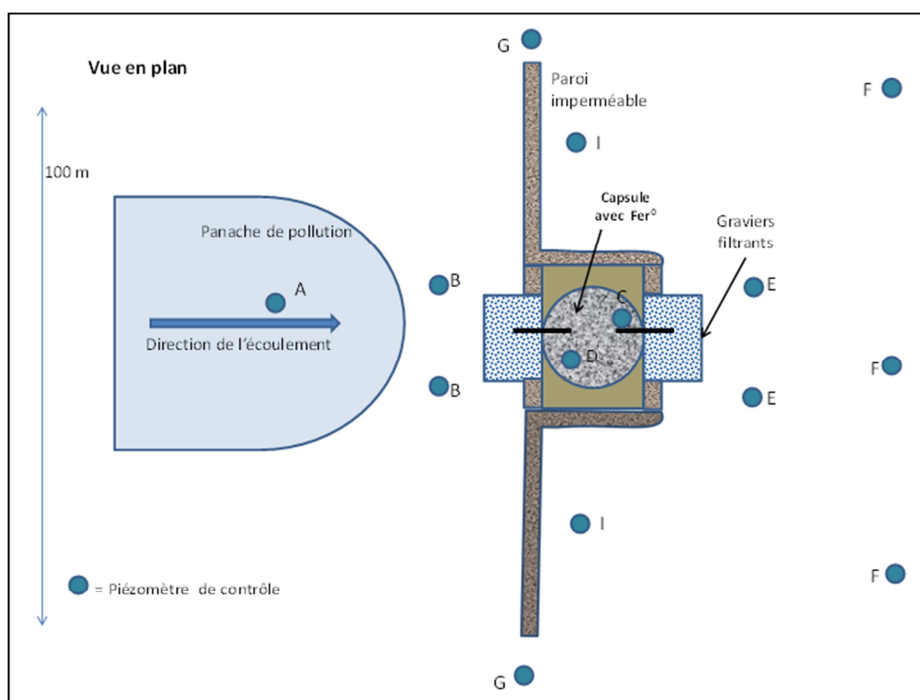
Tabel 7 : Aantal controle peilbuizen te plaatsen volgens hun ligging – relatief belang van de verschillende types van peilbuizen (Uit de OVAM 2006, Reactieve ijzerwanden, Code van Goede Praktijk)

Type van peilbuis	Aantal voor een barrière van 100 m (of minder)	Bijkomende peilbuizen	Belang van de peilbuis
A	1	-	++
B	3 voor het doorlatende gedeelte	1 per 50 bijkomende m	+++
C	3 voor het doorlatende gedeelte	1 per 25 bijkomende m	+++
D	1	Enkel bij brede wanden	++
E	3	1 per 100 bijkomende m	+++
F	3 per doorlatend gedeelte	-	+++
G	1 + 1	-	++
H	1 per ondoorlaatbare wand	1 per 50 bijkomende m	+++
I	1 per ondoorlaatbare wand	1 per 50 bijkomende m	+++

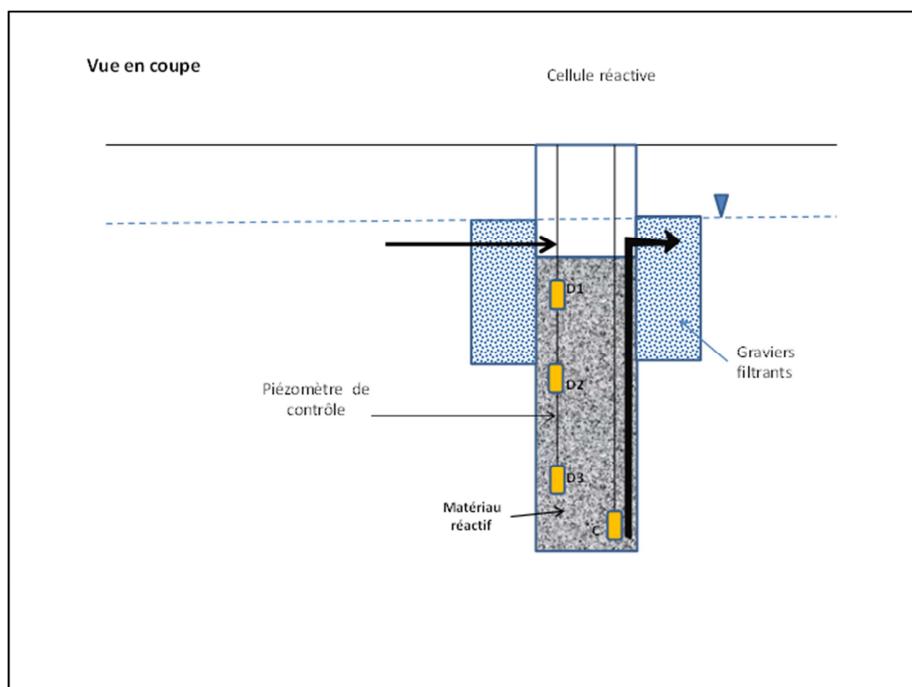
+++ = Noodzakelijk, ++ belangrijk, + nuttig

11.2.3 Vessel

Figuur 7 : Overzicht van een funnel & vessel configuratie



Figuur 8 : Dwarsdoorsnede van een vessel en positionering van de filters van controlepeilbuizen



De plaatsing van de controlepeilbuizen volgt de configuratie zoals beschreven in paragraaf 11.2.1.

Het schema zoals weergegeven in bovenstaande figuren geeft het aantal controlepeilbuizen weer voor een barrière met een maximale lengte van 100m met een reactieve “vessel” van maximaal 5 m diameter en waarvan de rest bestaat uit ondoorlatend gedeelte. In geval van grotere lengtes wordt het aanbevolen aantal peilbuizen aangepast zoals aangeduid in onderstaande tabel.

Dezelfde tabel geeft de mate van belang weer van elk type van peilbuis.

Tabel 11.1 Aantal controlepeilbuizen te installeren afhankelijk van hun positie in de wand – Relatief belang van de verschillende types van peilputten (uittreksel van de OVAM 2006, Reactieve ijzerwanden, Code van Goede Praktijk)

Type van peilbuis	Aantal voor een barrière van 100 m (of minder)	Bijkomende peilbuizen	Belang van de peilbuis
A	1	-	++
B	2 voor het doorlatende gedeelte	-	+++
C	1-2	1 per 2 bijkomende diameter	+++
D	1 multilevel	Enkel bij grote diameters	++
E	2 per doorlaatbaar gedeelte	-	+++
F	3 per doorlaatbaar gedeelte	-	+++
G	1 + 1	-	++

Type van peilbuis	Aantal voor een barrière van 100 m (of minder)	Bijkomende peilbuizen	Belang van de peilbuis
H	1 per ondoorlaatbare wand	1 per 50 bijkomende m	+++
I	1 per ondoorlaatbare wand	1 per 50 bijkomende m	+++

+++ = Noodzakelijk, ++ belangrijk, + nuttig

11.2.4 Algemene opmerking

In geval van een belangrijke verontreinigingspluim of in geval van een heterogene samenstelling van de bodem (verschillende watervoerende lagen met een verschillende hydraulische conductiviteit), worden “multilevel” peilbuizen geplaatst (peilbuizen waarvan de filters op verschillende dieptes worden geplaatst in hetzelfde boorgat of op korte afstand van elkaar).

Er wordt aanbevolen om multilevel peilbuizen te plaatsen in het reactieve gedeelte van de barrière zodat rekening kan gehouden worden met heterogeniteiten in het reactief materiaal (verschillen in porositeit tijdens het compacteren, aanwezigheid van neerslagen, ...). Ter hoogte van de ijzer₀ partikels is het niet nodig om de peilbuizen te voorzien van een grindomstorting. Het gaat hier om peilbuizen met kleine diameter (< 20 mm). Op deze manier kan het volume aan spoelwater worden verminderd en bestaat de mogelijkheid om een representatief grondwaterstaal te nemen in het reactieve materiaal. Bij deze wordt er aangeraden om te spoelen met kleine volumes grondwater en om low flow te bemonsteren. Rekening houdend met het belangrijk aantal te realiseren analyses en het volume grondwaterstaal zoals gevraagd door de laboratoria, is het mogelijk dat er door de bodemdeskundigen aanpassingen worden voorgesteld: halvering van de staalnamecampagnes en analyses met een interval van 1 week tussen 2 opeenvolgende staalnames,...

Om de evolutie in het stromingspatroon van het grondwater te kunnen opvolgen op de site op een grotere schaal dan de actieve barrière en zijn onmiddellijke omgeving, worden een aantal peilbuizen behouden op de site (degene dit geplaatst werden tijdens de onderzoeksfase). De stijghoogtes worden er regelmatig gemeten. De expert formuleert een monitoringvoorstel in het saneringsvoorstel/risicobeheersvoorstel.

11.3 Wijze van opvolging: op te volgen parameters en frequentie

De parameters die tijdens de behandeling worden opgevolgd en de frequentie van de metingen worden weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 9 : Op te volgen behandelingparameters en frequentie

Op te volgen parameters	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Commentaar
Opvolging van stijghoogtes	Metingen van het grondwaterniveau in controlepeilputten	Peillint	De eerste 3 maanden (opstartfase): elke 2 weken. Tussen 3 maanden en 1 jaar: elke 3 maanden Tussen 1 en 3 jaar: elke 6 maanden. Na 3 jaar elke 6 maanden of om het jaar	Volgens OVAM 2006: Opstelling van een isohypsenkaart met aanduiding van de grondwaterstromingsrichting
Fysico-chemische parameters	Staalname en in situ beoordeling van het	pH, Eh, opgeloste O ₂ , T°, EC	De eerste 3 maanden (opstartfase): elke 2 weken. Tussen 3 maanden en 1 jaar: elke 3	Bron OVAM 2006

Op te volgen parameters	Middel	Parameter	Minimale frequentie	Commentaar
van het grondwater	grondwater tijdens de bemonstering		maanden Tussen 1 en 3 jaar: elke 6 maanden. Na 3 jaar elke 6 maanden of om het jaar	
Concentratie aan organische verbindingen in het grondwater	Staalname en grondwateranalyses	Gechloreerde componenten (componenten waarvan de concentraties een interventie rechtvaardigen + gechloreerde verbindingen resulterend van afbraakproducten, andere pollutanten waarvan de concentraties moeten opgevolgd worden, niet gechloreerde afbraakproducten	De eerste 3 maanden (opstartfase): elke 2 weken. Tussen 3 maanden en 1 jaar: elke 3 maanden Tussen 1 en 3 jaar: elke 6 maanden. Na 3 jaar elke 6 maanden of om het jaar	Bron OVAM 2006
Concentratie aan anorganische verbindingen in het grondwater	Staalname en grondwateranalyses	Zware metalen :As, Cd, Hg, Ni, Cu, Pb, zn, Cr. Andere metalen Ca, Mg, Fe, Mn, Alkaliniteit (TIC). Anionen: Cl, NH ₄ , NO ₃ , SO ₄	De eerste 3 maanden (opstartfase): elke 2 weken. Tussen 3 maanden en 1 jaar: elke 3 maanden Tussen 1 en 3 jaar: elke 6 maanden. Na 3 jaar elke 6 maanden of om het jaar	Bron OVAM 2006
Residuele concentratie in grond	Boringen en grondstaalnames en analyse van VOCl en afbraakproducten	VOCl-gehalten en afbraakproducten (kg/kg of kg/m ³)	Tijdens de opstartfase en vervolgens elke 6 maand	Met de diepte van de staalname moet het mogelijk zijn, de eventuele verticale verspreiding van de pollutant op te volgen
Massabalans: Schatting van restverontreiniging aan VOCl en van afbraakproducten	Gemiddelde residuele concentraties in bodem en grondwater in de interventiezone	Massabalans: initiële hoeveelheid verontreiniging, residuele hoeveelheid, afgebroken hoeveelheid (kg) en geproduceerde hoeveelheid (kg) afbraakproducten	Elke 6 maanden	Schatting van de behandelingsduur
Uitbreiding van de verontreiniging	Staalname en grondwateranalyses	Zijwaartse en verticale uitbreiding van de verontreinigingspluim	De eerste 3 maanden (opstartfase): elke 2 weken. Tussen 3 maanden en 1 jaar: elke 3 maanden Tussen 1 en 3 jaar: elke 6 maanden. Na 3 jaar elke 6 maanden of om het jaar	Verspreidingsrisico naar gevoelige receptoren en naar diepere lagen

*de frequentie zal aangepast worden door de bodeverontreinigingsdeskundige in functie van de gegevens van de opvolging van de werken

Deze tabel omvat volgende opmerkingen:

- De periodiciteit van de monitoringcampagnes en van de analyses van grond en grondwater kunnen worden aangepast op voorstel van de expert
- De lijst van te analyseren pollutanten in het grondwater kan aangepast worden op voorstel van de expert bv onder de rubriek "andere pollutanten waarvan de gehalten moeten opgevolgd worden", men verstaat onder verontreinigingen wanneer de gemeten gehalten tijdens de onderzoeksfase de risicogrenswaarden benaderen of de genormeerde waarden, waardoor een behandelingsnoodzaak ontstaat. Verontreinigingen die gevoelig zijn voor vrijzetting tengevolge van wijzigende geochemische omstandigheden tengevolge van de behandeling vallen eveneens onder deze rubriek (reducerende omstandigheden, pH verhoging,...)
- Voor het nemen van grond- en grondwaterstalen wordt verwezen naar de Code van Goede Praktijk n° 3 van Leefmilieu Brussel betreffende het nemen van grond-, grondwater-, sediment-

en bodemluchtstalen. Voor analyse van de stalen wordt verwezen naar de code van goede praktijk nr.4 “Code van goede praktijk voor analysemethodes” van Leefmilieu Brussel.

- Het komt vaak voor dat een stijging wordt waargenomen van verontreinigingsconcentraties in de periode net volgend op de installatie van de reactieve barrière en dit omwille van mobilisatie van geadsorbeerde verontreiniging door het grondverzet.
- Indien de werking van de barrière op vlak van hydraulische conductiviteit en op vlak van behandelingsrendement de verwachtingen volgt zoals omschreven in het saneringsvoorstel/risicobeheersvoorstel, kan de opvolging hetzelfde zijn zoals beschreven in bovenstaande tabel (eventueel in een verlichte vorm). In het tegenovergestelde geval zullen aanpassingen in de opvolging worden voorgesteld door de expert.

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 maatregel zoals een reactieve ijzerwand 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 3 maanden normaal is voor de uitvoering van een opstartfase. Na verantwoording door een expert kan deze worden aangepast
- Andere tussentijdse rapporten indien de sanering/risicobeheer zich uitspreiden over meerdere jaren. De frequentie van deze tussentijdse rapporten wordt niet gepreciseerd in het Arrest. Deze frequentie wordt beschreven in het saneringsvoorstel op geargumenteerde voorstel van een 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 barrière nodig worden geacht. Deze aanpassingen worden onderworpen aan de goedkeuring van Leefmilieu Brussel: uitbreiding van de reactieve barrière, uitbreiding van het netwerk aan waarnemingspeilputten als resultaat van een uitgebreide pluim, installatie van andere behandelingstechnieken.

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

Tabel 10 : Voor te leggen informatie in een eerste tussentijds rapport

Rubriek	Te meten parameters (en hoeveelheid)	Opmerkingen
Beschrijving van de geïnstalleerde maatregel (as built)	Beschrijving van de elementen van de maatregel: doorlatend gedeelte met Fe^0 (dimensies, situering, wijze van plaatsing, aard, oorsprong en samenstelling van het Fe^0 , mogelijkheid tot vrijzetting van zware metalen, granulometrie, porositeit van het reactieve ijzer). In geval van ondoorlatende wanden: dimensies, situering, samenstelling, wijze van plaatsing). Indien er sleuven gevuld zijn met drainerend grind: dimensies, situering, aard en granulometrie. In geval van reactieve “vessels”: dimensies, situering, aard en oorsprong van het ijzer, samenstelling, granulometrie en vermogen tot vrijzetting van zware metalen	Op te stellen situeringsplan
Beschrijving van de opvolgingsmaatregel (as built)	Controlepeilbuizen: situering, beschrijving (diameter, diepte, positie van het filter, filteromstorting, annulaire opvulling, top)	Situeringsplan, op te stellen as built
Te rapporteren parameters	Peilbuismeting en doorstromingspatroon van het grondwater. Evolutie van fysico-chemische	OVAM 2006 – Isohypsokaart en wijze van circulatie van het

Rubriek	Te meten parameters (en hoeveelheid)	Opmerkingen
	eigenschappen van het grondwater (stroomopwaarts, stroomafwaarts en in de barrière). Evolutie van concentraties aan organische componenten (stroomopwaarts, stroomafwaarts en in de barrière). Evolutie van concentraties aan anorganische gehalten (stroomopwaarts, stroomafwaarts en in de barrière)	grondwater
Interpretatie van de resultaten	Evaluatie van de wijze van doorstroming van het grondwater en vergelijking van de resultaten met de voorspelling van het model. Evaluatie van eventuele problemen in geval van grote afwijkingen. Schatting van het volume behandelde grondwater. Schatting van de hoeveelheid afgebroken polluenten. Hydraulische conductiviteit van het doorlatende gedeelte; Evolutie van de concentratie aan polluenten stroomopwaarts, stroomafwaarts van de barrière: efficiëntie van de behandeling en het behalen van de behandelingsdoelstelling. Evaluatie van de behaalde concentraties in de barrière: afbraaksnelheid, nodige verblijftijd; Evaluatie van de concentraties stroomafwaarts van de ondoorlatende gedeeltes: controle van de ondoorlatendheid. Evaluatie van de concentraties onder en naast de barrière. Evaluatie van de volledigheid van afvang. Schatting van de neerslagen. Schatting van de hoeveelheid verontreiniging in de bodem en schatting van de behandelingsduur: Controle op vrijzetting van zware metalen door het Fe ⁰	

12.2 Corrigerende maatregelen en optimalisatie

Zoals elk in situ proces, kan de efficiëntie van de behandeling onderworpen zijn aan een aantal gevaren die het goed functioneren van de behandelingsmaatregel kunnen beïnvloeden: heterogeniteit van de bodem,

Voortschrijdende daling van de hydraulische conductiviteit van de doorlatende wand

De meest voorkomende oorzaak is het dichtslibben van poriën door neerslag van minerale componenten: carbonaten, sulfaten,.... Minder frequent komt ook "biofouling" voor.

Een interventie op niveau van de doorlaatbare wand moet voorzien worden: flushing, zuurspoeling doorheen de barrière, vervanging van de barrière (of van de Vessel).

Bypass van de actieve barrière door een gedeelte van de verontreinigingspluim

Hiervoor kunnen meerdere oorzaken zijn: ongecontroleerde voorkeursstroming doorheen de ondoorlatende wand (Funnel & Gate), onaangepaste breedte of diepte van de barrière, breuken in de ondoorlatende wand of het doorlatende gedeelte.

De vaststelling van de plaats waar de bypass zich voordoet kan gerealiseerd worden aan de hand van “tracers”.

In een eerste geval: aanpassingen aan de barrière zijn technisch en financieel mogelijk (laterale uitbreiding, herstel van de breuk,...

In een tweede geval: de noodzakelijke aanpassingen worden niet als realistisch aanzien (onvoldoende diepte of dikte van de barrière). De corrigerende maatregelen bestaan er in door het plaatsen van andere behandelingstechnieken: pump and treat, ISCO,...

13. Evaluatie van de behandeling en beslisschema rond 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 tussenafbraakproducten met schadelijk karakter en andere verontreinigingen die mogelijks worden vrijgezet door de reactieve ijzerwand ten gevolge van wijzigingen in de geochemie van het grondwater (pH-verhoging en creatie van strikt reducerende omstandigheden).

Op het ogenblik dat de doelstellingen bereikt worden in grond en grondwater, worden 2 bijkomende en opeenvolgende staalnamecampagnes van het grondwater uitgevoerd respectievelijk 3 maanden en 6 maanden nadat de doelstelling werd bereikt, om op deze manier de stabiliteit van de verworven resultaten te controleren (afwezigheid van een seizoenseffect).

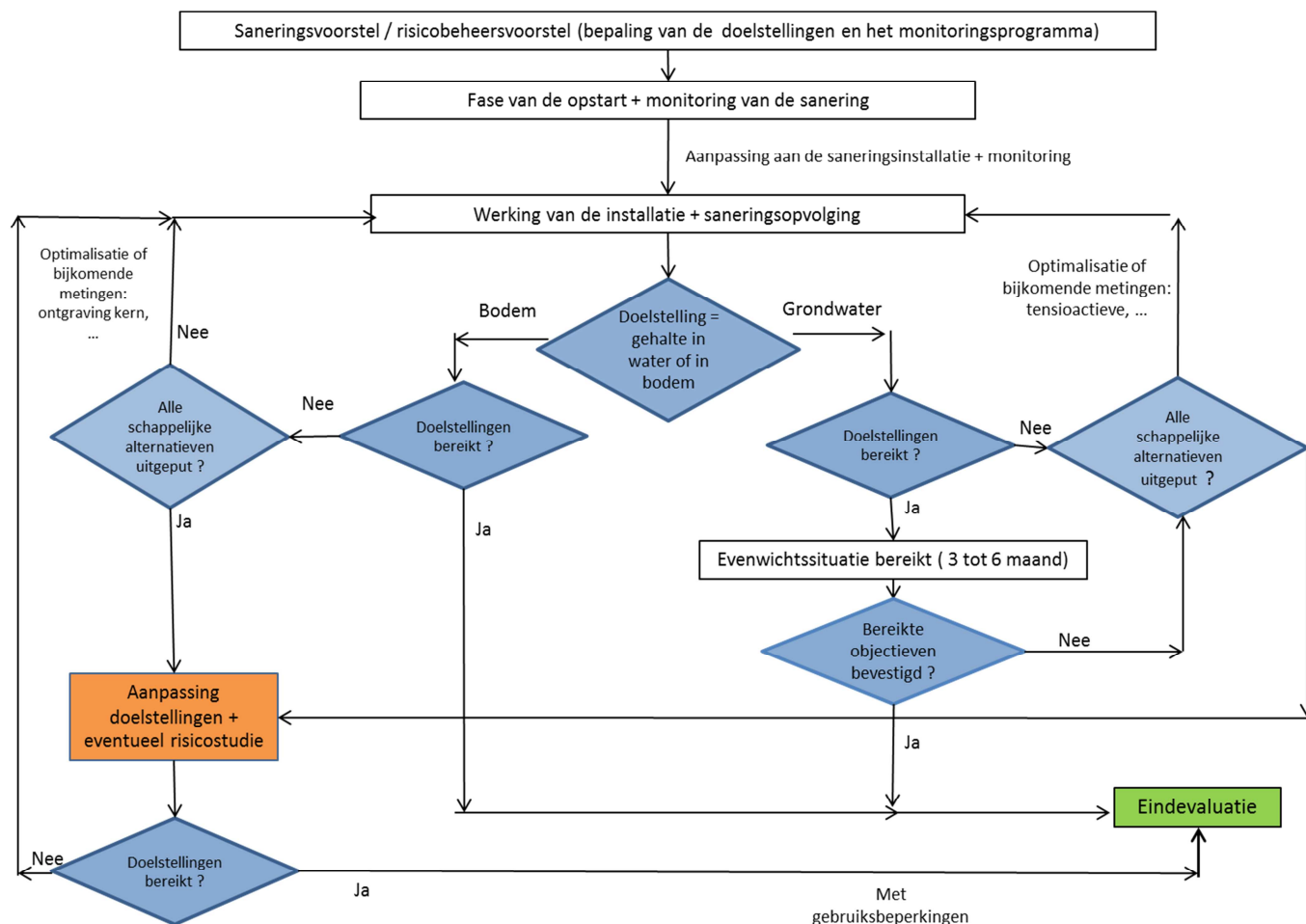
In geval de waargenomen concentraties onder evenwicht onder de doelstellingen blijven, kan de behandeling als voltooid worden beschouwd en een eindevaluatierapport wordt ingediend.

In geval de doelstellingen niet bereikt worden, wordt de reactieve ijzerwand verder in stand gehouden met – eventueel – de installatie van bijkomende maatregelen: ontgraving van de kern, gestimuleerde afbraak,...

Indien tijdens de volgende meetcampagne de doelstellingen nog altijd niet bereikt worden, moet er een aanpassing van deze 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 sanering als beëindigd worden beschouwd of in het andere geval dient de sanering opnieuw te worden opgestart met toevoeging van bijkomende corrigerende maatregelen of door installatie van bijkomende maatregelen.

Het beslisschema tijdens de evaluatie van de behandeling is het volgende.



In het finale eindrapport zal de expert een uitspraak doen over de noodzaak tot ontmanteling (totaal of gedeeltelijk) van de actieve barrière. Bij deze zullen volgende aspecten in overweging worden genomen:

- Impact op de hydrogeologie van de site
- Stabiliteit van de bodem
- Verstopping van de ondergrond
- Kost en impact van de ontmanteling



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 behandelingswerken. Deze maatregelen streven naar een bevestiging van de resultaten van de behandelingswerken 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 bekomen resultaten: belangrijke schommelingen in de gemeten concentraties in de controlepeilbuizen, gehalten die zich stabiliseren nabij de behandelingsdoelstellingen, 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 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 et andere verontreinigingen gevoelig voor de redox- en pH- omstandigheden van de bodem).

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 analysemethoden” van Leefmilieu Brussel.

De duurtijd en de frequentie van de lange termijn opvolging (nazorg) hangt af van de lokale 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 zeldzaam na elke monitoringcampagne.

De gemeten concentraties worden vergeleken met de behandelingsdoelstellingen. 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: verderzetting 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 puur product (her)verschijnt: In deze situatie kan er op 3 manieren gereageerd worden:
 -
 - 0 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.
 - 0 Bijkomende behandeling is nodig om tot de eerder opgelegde doelstellingen te komen
 - 0 Het is niet mogelijk om de doelstellingen te bereiken op een duurzame manier binnen een redelijke termijn en volgens een realistische begroting: de doelstellingen van de sanering of van het risicobeheer 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 houden met de grote verscheidenheid van situaties die kunnen voorkomen, kan deze checklist worden uitgebreid.

Tabel 15 : 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 nutsleidingen
Gevoeligheid van de ingegraven infrastructuur aan wijzigingen in pH en redoxpotentiaal	Adequate gevoeligheidsstudie coherent met de uit te voeren werken
Stabiliteitsstudie naar bovengrondse en ingegraven installaties	Degelijke stabiliteitsstudie coherent met de uit te voeren werken: ontgraving (met of zonder beschoeiing) voor de plaatsing van de barrière, trillingen tijdens de plaatsing of het terugtrekken van de stalen damwandplaten, bemaling tijdens de ontgraving,...
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 behandelingsinfrastructuur (plaats, dimensies, wijze van plaatsing, voorschrift van de kwaliteit van de gebruikte materialen en omschrijving van het toezicht (plaatsing van de controlepeilbuizen)
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 werkommschrijving mee rekening is gehouden: Stockage en overname van ontgraven verontreinigde gronden,...
Definiëring van de communicatielijnen	Identiteit en coördinaten van de toezichthouder, de opdrachtgever, de inspecteur, het bevoegd gezag
Informatie die beschikbaar moet zijn in het veiligheids- en gezondheidsplan van de aannemer	
Vaststelling en aard van de risico's	Risico-analyse van ondergrondse infrastructuur indien gevoelig voor wijzigingen in pH en redoxpotentiaal
	Risico's op bodem- en grondwaterverontreiniging ten gevolge van stockage van verontreinigde gronden op de site tijdens de installatiefase van de barrière
	Risico op ongevallen: val, brand, electrocutie
	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
	Risico's voor het verkeer bij werken op de openbare weg
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde risico's, vaststelling en uitvoering van preventieve maatregelen inbegrepen opleiding van het personeel
Correctieve 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	Opstopping van de toegangswegen
	Vervuiling van de toegangswegen

Rubriek	Controle
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde hindergevallen, vaststelling en omschrijving van de preventieve maatregelen
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
	Planning van onderhoud (aan de capsules van reactief ijzer)
Vaststelling van defecten en technische problemen	Defecten aan de uitrusting en aan de installatie: lekken in de vloeistofdichte wanden, verlies van hydraulische conductiviteit in de goed doorlatende gedeeltes van de barrière, efficiëntieverlies van het goed doorlatende wandgedeelte (breuken, bypass)
Correctieve maatregelen en interventie maatregelen	Voor elk van de mogelijke problemen: voorbereiding van correctieve maatregelen en interventie maatregelen (in spoed indien nodig)
Toezichtrapportage van de expert	Rekening houdend met de opvolgingsrapporten van de expert, uitvoering van correctieve en optimalisatie maatregelen

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 tabel 9 is geldig voor de aannemers en hun onderaannemers in hun respectievelijke interventiedomeinen
- In het geval van stockage op site van verontreinigde gronden opgegraven tijdens de plaatsing van de barrière, moeten er maatregelen genomen worden om te vermijden dat de onderliggende bodem en grondwater verontreinigd wordt: afscherming van de bodem met HDPE-folie, recuperatie 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).

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 12 : Checklist voor experts

Rubriek	Controle
Voorafgaande informatie compleet en voldoende (voorafgaande studie, bestek, omschrijving der werken)	
Karakteristieken van de te saneren bodemlaag en watervoerende lagen	Samenstelling van de bodem: opeenvolging en karakterisatie van de bodemlagen, aanwezigheid van verschillende doorlatendheden, adsorptiecapaciteit, homogeniteit,voldoende informatie beschikbaar?
	Hydrodynamische eigenschappen van de bodem: Metingen naar hydraulische conductiviteit, pomptesten, stijghoogtemetingen, stromingsrichting, seizoensale schommelingen, vermogen van de watervoerende laag, afscherming van de verschillende watervoerende lagen,

Rubriek	Controle
	schatting van de retardatiefactoren. 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 (retardatiefactor), aanwezigheid van vrij product als drijf laag 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
Stabiliteitsstudie op bovengrondse constructies	Noodzaak voor een stabiliteitsstudie? Indien ja dienen ze coherent te zijn met de uit te voeren werken: ontgraving (met of zonder beschoeiing), trillingen tijdens de plaatsing of het terugtrekken van de stalen damwandplaten, soilmixing,...
Stabiliteitsstudie op ondergrondse constructies	Noodzaak voor een stabiliteitsstudie? Indien ja dienen ze coherent te zijn met de uit te voeren werken: ontgraving (met of zonder beschoeiing), trillingen tijdens de plaatsing of het terugtrekken van de stalen damwandplaten, soilmixing,...
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 behandelingsinfrastructuur (plaats, dimensies, aard van de materialen, wijze van plaatsing, fysische parameters...)
	Voorafgaande controle van de werking van de behandelingsinfrastructuur: Wijze waarop het grondwater stroomt, uitbreiding van de captatiezone, efficiëntie van de zuivering van opgeloste verontreiniging en van tussentijdse afbraakproducten, verblijftijd en afbraaksnelheid, vermogen tot vrijzetting van zware metalen
	De doelstellingen worden duidelijk vastgelegd
	Inschatting van de behandelingsduur, noodzaak tot uitvoering van bijkomende behandelingsacties : ontgraving van de kernzone
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
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: Tijdelijke stockage op site van verontreinigde gronden en overname van deze materialen ex situ
Definiëring van de communicatielijnen	Identiteit en coördinaten van de toezichthouder, de opdrachtgever, de inspecteur, het bevoegd gezag
Vaststelling en aard van de risico's	Risico's voor de gebouwen en bovengrondse infrastructuur ten gevolge van de werken: ontgraving met of zonder beschoeiing, trillingen tijdens het plaatsen of terugtrekken van stalen damwanden, bemaling tijdens de installatiewerken
	Risico's voor de ondergrondse infrastructuur ten gevolge van de werken: ontgraving met of zonder beschoeiing, trillingen tijdens het plaatsen of terugtrekken van stalen damwanden, bemaling

Rubriek	Controle
	tijdens de installatiewerken
	Risico's op bodem- en grondwaterverontreiniging ten gevolge van stockage van verontreinigde gronden op de site tijdens de installatiefase van de barrière
	Risico's voor het verkeer bij werken op de openbare weg
	Risico's op inkalving tijdens de ontgravingswerken bij de plaatsing van de barrière: risico voor het personeel en voor bovengrondse en ondergrondse infrastructuur
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	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)	
Toezihtsmaatregel bij de behandeling	Omschrijving, situering en aanduiding op plan van de toezihtsmaatregel: controlepeilput,... Rekening houdend met gevoelige en te beschermen receptoren
Op te volgen parameters tijdens het toezicht	Stijghoogte metingen en isohypsenkaarten, gehalten in het grondwater stroomopwaarts van, in, en stroomafwaarts van de barrière, balans van de massa aan vuilvracht, residuele concentraties aan verontreiniging en aan afbraakproducten (indien schadelijk) in de watervoerende laag. Verdeling, laterale en verticale verspreiding van de pluim, verspreiding van de pluim naar een gevoelige receptor
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 pluim en in de bodem, balans van de vuilvracht
Risicostudie in geval van wijziging van de doelstellingen	De verzamelde gegevens zijn voldoende voor de realisatie van dit punt?
Evaluatie op de lange termijn (nazorg)	Toezihtsmaatregel: controlepeilputten
	Opvolgingsparameters: gehalten aan verontreiniging en hun afbraakproducten

16. Bibliografie

Volgende bronnen werden gebruikt bij de redactie van dit document:

- Code van goede praktijk: Reactieve ijzerwanden, OVAM, 2006
- EnvironMetal Technologies, Inc. Metal-Enhanced Dechlorination of Volatile Organic Compounds Using an In-Situ Reactive Iron Wall, Innovative Technology Evaluation Report, US-EPA, September 1998
- Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in groundwater. US-EPA, 1998
- Biodegradatie van gechloreerde solventen onder natuurlijke omstandigheden, S. Denys, INERIS, oktober 2004
- Chloronet, gids van gechloreerde koolwaterstoffen, eigenschappen en gedrag in het milieu, Schlieren et al., Zwitsers Federaal Milieu Agentschap, mei 2008
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001
- Standaardprocedure Bodemsaneringswerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazorg, versie oktober 2011, OVAM
- Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation, Gavaskar A. et al., Batelle, Columbus, Ohio, Maart 2000.