

Code van goede praktijk 6

Bewaakte natuurlijke afbraak van verontreinigende stoffen in de bodem

Leefmilieu Brussel



Inhoudstafel

1.	Inleiding	3
2.	Beschrijving van de techniek en de basisprincipes van de implementatie	4
2.1.	Beschrijving van processen die verantwoordelijk zijn voor natuurlijke afbraak	4
2.1.1.	De fysische processen.....	5
2.1.2.	De chemische processen.....	5
2.1.3.	De biologische processen	6
2.2.	Combinatie met andere behandelingstechnieken	8
3.	Doelstellingen : pluim versus kern	9
4.	Verontreinigende stoffen en de meest geschikte situaties (kwalitatief)	10
4.1.	Verontreinigende stoffen met potentieel voor natuurlijke afbraak.....	10
4.2.	Meest geschikte omstandigheden.....	10
5.	Onderzoek van de technische haalbaarheid	13
5.1.	Aanvaardingscriteria	13
5.2.	Vooronderzoek : haalbaarheidsstudie.....	14
5.3.	Specifiek haalbaarheidsonderzoek.....	18
5.3.1.	Eerste stap van het haalbaarheidsonderzoek.....	18
5.3.2.	Tweede stap van het onderzoek	18
5.3.3.	Derde stap van het haalbaarheidsonderzoek	22
5.4.	Noodzaak voor een pilootproef	23
6.	Beschrijving van een installatietype.....	24
7.	Saneringsvoorstel of risicobeheersvoorstel	25
8.	Beschrijving van de installaties die voorzien worden.....	26
9.	Bijzonder veiligheidsmaatregelen en beperking van hinder : geur, lawaai, stof,.....	27
10.	Opvolgingsmaatregelen	28
10.1.	Basisregels voor de opvolgingsmaatregelen.....	28
10.2.	Opvolgingsmaatregelen : standaardopstelling.....	28
10.3.	Opvolgingsmaatregelen: op te volgen parameters en frequentie van opvolging	32
11.	Rapportage, optimalisatie en correctieve maatregelen.....	34
11.1.	Rapportage.....	34
11.2.	Optimalisatie en correctieve maatregelen.....	35
12.	Validatie methode en beslisschema voor stopzetting- voortzetting van de maatregel	37
13.	Mogelijke opvolgingsmaatregelen op lange termijn : installatie en type maatregelen	39
14.	Aanbevelingen op het vlak van stabiliteit en veiligheid.....	41
15.	Bibliografie.....	42

1. Inleiding

De behandelingstechniek die wordt beschreven draagt de naam « Bewaakte natuurlijke afbraak van verontreinigingen in de bodem ».

De techniek heeft als doel om grond- en grondwaterverontreinigingen op te volgen, die onder natuurlijke omstandigheden en binnen een redelijke termijn (vergeleken met actieve behandelingstechnieken) afbreken zonder interventie van de mens. De natuurlijke processen die verantwoordelijk zijn voor de afbraak van verontreinigende stoffen kunnen van chemische, fysische of biologische aard zijn. Ze resulteren in ofwel een daling van de concentraties, hoeveelheden of volumes van de verontreinigende stoffen ofwel in de daling van de mobiliteit en/of de toxiciteit van de verontreinigende stoffen.

Deze techniek van opvolging is gebaseerd op het goed begrijpen en een goede kwantitatieve evaluatie van de natuurlijke processen en mechanismen op de verontreinigde site. Ze moet er tevens op gericht zijn om het bewijs te kunnen leveren dat de natuurlijke afbraak processen in voldoende mate aanwezig zijn om blootstelling van de verontreiniging voor mens en leefmilieu uit te kunnen sluiten.

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 de basisprincipes van de implementatie

2.1. Beschrijving van processen die verantwoordelijk zijn voor natuurlijke afbraak

De natuurlijk processen, die opgevolgd worden tijdens de bewaakte natuurlijke afbraak, kunnen op verschillende manieren resulteren in een vermindering van de risico's die veroorzaakt worden door de aanwezigheid van de verontreiniging(en) in de bodem (in vaste fase, vloeibare fase of gasfase) :

- Doordat de verontreinigde stoffen afbreken of omgevormd worden tot stoffen die minder schadelijk zijn door afbraakmechanismen zoals biologische afbraak of abiotische afbraak (hydrolyse, oxidatie, reductie, ...)
- Door een daling van de concentraties van de verontreiniging zonder dat hier afbraakmechanismen aan te pas komen. Deze daling kan veroorzaakt worden door verdunning van de verontreiniging door verspreiding via het grondwater of verdamping via de gasfase in het onverzadigde deel van de bodem naar de atmosfeer.
- Door een daling van de mobiliteit of de beschikbaarheid van de verontreinigende stoffen ten gevolge van adsorptie aan het vaste deel van aarde of door neerslagreacties.

De verontreinigende stoffen kunnen aanwezig zijn in de bodem ter hoogte van een kern van een verontreiniging. De verontreinigde stoffen kunnen ook aanwezig zijn in hoge concentraties, soms zelf onder vorm van een vrije fase dat vast zit in de poriën van bodem (residuele verontreiniging) of als een zaklaag of een drijf laag voorkomt. De verontreinigende stoffen kunnen bovendien ook teruggevonden worden onder de vorm van een verontreinigingspluim, die steeds gevoed wordt door een bestaande kern, waarbij verontreinigende stoffen geleidelijk aan vrijkomen en verspreiden.

De afbraak van de stoffen kan leiden tot afbraakproducten die niet schadelijk zijn en die van nature uit in de bodem voorkomen zoals bijvoorbeeld CO₂, H₂O en Cl⁻, Anderzijds kan de afbraak aanleiding geven tot het ontstaan van (intermediaire) stoffen waar ook een behandelingsplicht op rust.

De biologische afbraakprocessen in de ondergrond komen in het algemeen veel vaker voor dan abiotische afbraakprocessen (hydrolyse, oxidatie,...) die in het algemeen veel trager werken.

De fysische processen kunnen resulteren in een daling van de concentraties in het grondwater, zoals bijvoorbeeld bij adsorptie of neerslagreacties waarbij de actuele risico's dalen maar waarbij de effectieve vuilvracht in de bodem niet daalt. Doordat deze processen niet altijd irreversibel zijn kunnen ze er op kortere of langere termijn voor zorgen dat de concentraties aan verontreinigende stoffen opnieuw stijgen doordat er wijzigingen optreden van één of meerdere parameters in de ondergrond.



2.1.1. De fysische processen

De volgende fysische processen zijn mogelijk bij de natuurlijke afbraak van de verontreinigende stoffen : verspreiding, verdunning en verdamping. Deze processen resulteren in een daling van de concentraties in de verschillende fases van de ondergrond, maar de totale vuilvracht van de verontreinigende stoffen blijft ongewijzigd.

- Verspreiding : verspreiding van de verontreinigende stoffen t.g.v. beweging door advectie in de richting(en) waarin het grondwater stroomt
- Diffusie : beweging van moleculen t.g.v. de chemische gradiënten. Zelfs in een omgeving (bodemplucht, grondwater) die immobiel is, zal diffusie plaatsvinden. De migratiesnelheden t.g.v. diffusie zijn langzaam in vergelijking met bewegingen t.g.v. advectie.
- Verdunning : verdunning treedt op wanneer een verontreinigingspluim een groter volume inneemt doorheen de tijd t.g.v. verplaatsing vanaf de kern. Verdunning kan ook het gevolg zijn van infiltratie van niet verontreinigd water in de verontreinigingspluim, bijvoorbeeld door hemelwater t.g.v. verticale infiltratie of door niet verontreinigde bovenliggende en/of onderliggende aquifers.
- Vervluchtiging (of verdamping) vluchtige componenten die in het grondwater opgelost zijn, in vrije fase aanwezig zijn of geadsorbeerd zijn aan de bodemmatrix kunnen in eerste instantie vervluchtigen richting de onverzadigde zone van de bodem en nadien richting de atmosfeer.

Deze fysische processen worden bepaald door de specifieke stoffeigenschappen en de parameters aanwezig in de ondergrond : T° , drukgradiënten, lokale geochemie, hydraulische gradiënten, etc.. Ook bodemeigenschappen zoals het aanwezige organische stofgehalte, de porositeit, de permeabiliteit... spelen een belangrijke rol.

2.1.2. De chemische processen

Volgende processen kunnen onderscheiden worden :

- Adsorptie (wordt ook wel eens als een fysisch proces beschouwd) : deze is het gevolg van de interactie van de verontreinigde stof(en) met de oppervlakte van de partikels van de vaste fase van de bodem. Deze interactie kan het gevolg zijn van elektrostatische energie waarbij elektrische ladingen van de oppervlakte van de partikels in het vaste deel van de bodem (kleimineralen en organische stof) en elektrische ladingen van de verontreinigende stoffen met elkaar interageren (vb. metaal ionen, ionische organische componenten). Dit kan ook het gevolg zijn van Vanderwaals krachten tussen partikels uit het vaste deel van de bodem (kleipartikels, organische stof, colloïden van metaaloxides) en de verontreinigende stoffen maar deze kan ook het beïnvloed worden door bijvoorbeeld de grootte en de hydrofobe eigenschappen van de verontreinigende stoffen.

De grootteorde van de adsorptie van een de verontreinigende stoffen in een bepaalde bodem wordt weergegeven via de distributiecoëfficiënt K_d :

$$K_d = C_s / C_l \quad \text{in m}^3/\text{kg}$$

C_s is de concentratie aan de verontreinigende stof in de bodem (in Kg verontreinigde stof/kg droge stof)

C_l is de concentratie van de verontreinigende stof in de vloeibare fase (in kg/m³)

Het mechanisme van de adsorptie is verantwoordelijk voor de vertraging van de verontreinigende stoffen tijdens hun verspreiding door advectie in het grondwater, t.o.v. de



effectieve grondwatersnelheid. Deze vertraging wordt kwantitatief weergegeven via de retardatiefactor R

$$R = 1 + p_b \cdot K_d / n \quad \text{zonder eenheid}$$

p_b = bulkdensiteit van de bodem in kg/m^3

n = totale porositeit van de bodem

De adsorptie speelt een rol in natuurlijke afbraak van de verontreinigende stoffen in die mate dat ze verantwoordelijk is voor een daling van de concentraties in het grondwater. De vuilvracht aan de verontreinigende stoffen in de verzadigde zone van de bodem blijft echter onveranderd. Eénmaal geadsorbeerd is er tevens een invloed op andere processen van de natuurlijke afbraak zoals de biodegradatie en de abiotische afbraak (hydrolyse) door de verminderde beschikbaarheid van de verontreinigende stoffen.

- De abiotische chemische afbraak is het gevolg van volgende mechanismen :
 - De hydrolyse en de substitutie reacties waardoor een organische component (of een metallisch organisch complex) reageert met het water of een hydroxide ion om een andere component te vormen (bijvoorbeeld een alcohol)
 - De oxido-reductie reacties die soms gekataliseerd kunnen worden door andere componenten in de bodem (bijvoorbeeld ijzer)
 - Eliminatie reacties die bijvoorbeeld een chlooralkaan omvormen tot en alkeen

Deze chemische processen spelen een niet zo belangrijke rol bij de abiotische afbraak van apolaire componenten zoals petroleum koolwaterstoffen. Ze spelen wel een rol bij de afbraak door hydrolyse van polaire componenten zou bijvoorbeeld chloorethanen. Voor deze familie van componenten, stijgt het belang van de hydrolyse naarmate de chloreringsgraad daalt. De 1,1,1-TCA hydrolyse gaat langzaam (de halfwaarde tijd ervan gaat over verschillende jaren), voor 1,1-DCA gaat deze hydrolyse sneller en voor chloorethaan is de halfwaarde tijd van de hydrolyse reactie in de grootteorde van enkele weken.

In het algemeen kan gesteld worden dat het belang van deze types afbraakreacties van de verontreinigende stoffen bescheiden in vergelijking met adsorptie en biodegradatie.

2.1.3. De biologische processen

In de bodem zijn er verschillende organismen (bacteriën en paddestoelen) die in staat zijn om de verontreinigende stoffen te gebruiken voor hun eigen metabolisme. In het ideale geval worden deze de verontreinigende stoffen afgebroken tot onschadelijke stoffen die van nature in de ondergrond teruggevonden kunnen worden zoals bijvoorbeeld CO_2 en H_2O in aerobe condities, en in CH_4 en CO_2 in anaërobe condities.

Tijdens biologische afbraakprocessen kunnen metabolieten en secundaire producten, die mogelijk schadelijk en toxisch zijn, ontstaan en zich zelf accumuleren in de bodem.

Enkele voorbeelden van de meest voorkomende biologische transformatieprocessen in de bodem zijn :

- Reductieve dechlorering van chloorhoudende solventen (of halo-respiratie), onder sterk reducerende omstandigheden in bodem (methanogene omstandigheden)



- Biochemische reductie van anorganische en organische componenten waar micro organismen de rol op zich nemen van katalysatoren : transformatie van nitrobenzeen in aniline, reductie van Cr^{VI} in Cr^{III}, reductie van Nitraat in N₂, reductie van sulfaat naar sulfide en per gevolg, de neerslag van aanwezige zware metalen in de aquifer (immobilisatie van zware metaalverontreinigingen)
- Oxidatie van koolwaterstoffen in H₂O en CO₂ in aanwezigheid van elektron acceptoren (O₂) en van nutriënten

Deze biotransformatie processen vinden plaats binnen een acceptabele tijdsperiode op voorwaarde dat volgende condities in de bodem aanwezig zijn:

- Een waarde voor de pH dicht bij dat van neutraal water : optimaal tussen 6 en 8, maar acceptabel tussen 5 en 9
- Voor processen waarbij oxidatie van de verontreinigende stoffen plaatsvindt is een voldoende toevoer aan O₂ of andere elektron acceptoren nodig: nitraten, sulfaten, Fe(III), Mn(IV). Tabel 1, hieronder weergegeven, geeft de verschillende elektron acceptoren weer die frequent in de bodem voorkomen, alsook hun actief redoxkoppel en de condities die in de bodem noodzakelijk zijn om de elektron acceptoren te activeren.
- Voor de processen die berusten op een reductie van de verontreinigende stoffen, een voldoende toevoer aan elektron donoren.
- Een voldoende hoge vochtigheidsgraad en temperatuur om toe te laten dat de biologische processen op gang kunnen komen.
- Een voldoende beschikbaarheid van nutriënten (PO₄³⁻, ...) die nodig zijn voor de microorganismen
- De afwezigheid van inhibitoren voor de biologische activiteit en van moeilijke condities in de bodem (vb. zoutgehalte van de bodem)
- De aanwezigheid van microorganismen die geschikt zijn om de biotransformatie tot het gewenste eindstadium te brengen.
- De biobeschikbaarheid van de verontreinigende stoffen

Tabel 1 : Lijst van elektron acceptoren en de redoxkoppels in functie van de redoxpotentiaal in de bodem

Elektron acceptor	Actief redoxkoppel	redoxpotentiaal (mv)
O ₂	O ₂ /H ₂ O	+ 820
Fe(III) opgelost	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	+ 770
NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	+ 430
Mn(IV) vaste fase	MnO ₂ /Mn ²⁺	+ 380
NO ₂ ⁻	NO ₂ ⁻ /NO	+ 350
Fe(III) vaste fase	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0
SO ₃ ²⁻	HSO ₃ ⁻ /HS ⁻	-110
SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ /HS ⁻	-230
CO ₂	CO ₂ /CH ₄	-240

Binnen eenzelfde verontreinigingspluim kunnen redoxcondities in de bodem verschillen in functie van de afstand tot de kern van de verontreiniging, zelfs in die mate dat er verschillende elektron acceptoren tegelijkertijd actief kunnen zijn op verschillende plaatsen in een verontreinigingspluim.

2.2. Combinatie met andere behandelingstechnieken

De opvolging van de natuurlijke afbraak wordt vaak toegepast nadat er andere, meer actieve, technieken werden gebruikt zoals bijvoorbeeld een ontgraving van de kern van de verontreiniging (en ex-site reiniging), het oppompen van hoge concentraties of puur product via pump & treat in de kern van de verontreiniging,... In die gevallen geldt de techniek als laatste fase (opvolging).

Omgekeerd, kan de bewaakte natuurlijke afbraak als meest geschikte techniek gekozen worden in vergelijking met meer actieve varianten indien deze onvoldoende resultaten leveren in gevallen dat er verontreiniging zijn waarbij er receptoren bedreigd worden door de verspreiding van de verontreinigingspluim.



3. Doelstellingen : pluim versus kern

De processen van biotransformatie waarvoor bewaakte natuurlijke afbraak het meest in aanmerking komt al vinden we vooral terug in verontreinigingspluimen en niet zozeer in verontreinigingskernen.

Ter hoogte van verontreinigingskernen, kunnen de concentraties aan de verontreinigende stoffen vaak zeer hoog zijn waardoor ze toxisch of nefast kunnen zijn voor de microorganismen die verantwoordelijk zijn voor de biotransformatie.

Anderzijds is het ook zo dat in kernzones van verontreinigende stoffen die minder goed oplosbaar zijn (bijvoorbeeld koolwaterstoffen), deze verontreinigende stoffen aanwezig kunnen zijn als vrije fase (vb. DNAPL) en daardoor minder goed beschikbaar en bereikbaar zijn voor microorganismen waardoor deze zones niet via biologische weg zullen gesaneerd zijn binnen een acceptabele tijdspanne.



4. Verontreinigende stoffen en de meest geschikte situaties (kwalitatief)

4.1. Verontreinigende stoffen met potentieel voor natuurlijke afbraak

Tabel 2 geeft de voornaamste verontreinigende stoffen die we in de bodem tegengekomen weer, met een indeling van de gekende afbraakmechanismen in de bodem en een weergave van de kans op slagen voor natuurlijke afbraak.

Sommige bestaande databases geven voor de verschillende verontreinigende stoffen die worden tegengekomen in de bodem de bestaande afbraakmechanismen weer onder natuurlijke omstandigheden. Eén van de noemenswaardige databases hierrond is deze van de « University of Minnesota Biocatalysis/Biodegradation database » (<http://eawg-bbd.ethz.ch/>).

4.2. Meest geschikte omstandigheden

Bewaakte natuurlijke afbraak van verontreinigende stoffen kan als techniek toegepast worden voor de behandeling van een verontreiniging in de grond of in het grondwater, met voldoende kans op slagen (gunstige resultaten), onder volgende omstandigheden :

- De te behandelen verontreinigende stoffen zijn niet in te hoge concentraties aanwezig in de kern van verontreiniging (toxisch of ongunstige omstandigheden voor de microorganismen) en zijn homogeen verspreid.
- De verontreinigende stoffen zijn ter hoogte van de kern niet aanwezig onder de vorm van een vrije fase (DNAPL) en bijvoorbeeld gevangen zitten in de poriën van de bodem waardoor ze bijgevolg die niet bereikbaar zijn. Rekening houdend met de lage biobeschikbaarheid van deze vrije fase zal de tijd die nodig zal zijn om voor de biologische afbraak ervan te lang zijn zonder dat gebruikt gemaakt wordt van bijkomende behandelingstechnieken.
- Er mag geen nalevering meer zijn van de bron van de verontreiniging (de toevoer van nieuwe verontreinigende stoffen is definitief gestopt).
- Homogene bodem : geen aanwezigheid van lagen en of lenzen met een andere textuur, geen aanwezigheid van preferentiële stromingsbanen door de aanwezigheid van nutsleidingen en ondergrondse structuren.
- Voldoende nutriënten aanwezig in de bodem en in het grondwater.
- Voldoende beschikbaarheid en toevoer van elektron acceptoren indien transformatie gebeurt door oxidatie of van elektron donoren indien transformatie gebeurt door reductie.
- De verspreidingssnelheid van de verontreinigende stoffen is niet hoger dan de tijd die noodzakelijk is om de verontreiniging af te breken zodat de receptoren niet bedreigd worden.



- De aanwezigheid van microorganismen in de bodem die ervoor zorgen dat de biotransformatie snel en volledig zal zijn.
- De gegevens verkregen tijdens de onderzoeksfases zijn voldoende gedetailleerd en volledig.



Tabel 2 : voornaamste verontreinigende stoffen die we in de bodem tegengekomen weer, met een indeling van de gekende afbraakmechanismen in de bodem en een weergave van de kans op slagen voor natuurlijke afbraak

Verontreiniging	Meest belangrijke afbraakproces	Huidig kennisniveau van de afbraakmechanismen	Kans op succes van de afbraak
Organische polluenten			
Koolwaterstoffen			
BTEX	Biotransformatie	hoog	hoog
Benzine - stookolie	Biotransformatie	gemiddeld	gemiddeld
Alifaten (weinig vluchtige)	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak
PAK's	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak
Creosoot	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak
Geoxideerde koolwaterstoffen			
Alcoholen met laag moleculair gewicht, ketonen en esters	Biotransformatie	hoog	hoog
MTBE	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
VOCI			
PCE, TCE, CCL ₄	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
TCA, DCA	Biotransformatie/ abiotische transformatie	gemiddeld	zwak
Dichloormethaan	Biotransformatie	hoog	hoog
Vinylchloride	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
DCE	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
Aromatische halogeenverbindingen			
Sterk gehalogeneerd	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak
PCB's			
Pentachloorfenolen			
Chloorfenolen			
Tetrachloordibenzofuran			
Zwak gehalogeneerd			
PCB's	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
Dioxine	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
Monochloorbenzeen	Biotransformatie	gemiddeld	gemiddeld
Aromatische nitroverbindingen			
TNT, RDX	Biotransformatie/immobilisatie/abiotische transformatie	gemiddeld	zwak
Anorganische polluenten			
Metallisch			
Ni	immobilisatie	gemiddeld	gemiddeld
Cu, Zn	immobilisatie	gemiddeld	gemiddeld
Cd	immobilisatie	gemiddeld	zwak
Pb	immobilisatie	gemiddeld	gemiddeld
Cr	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak/gemiddeld
Hg	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak
Niet metallisch			
As	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak
Se	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak
Oxi-anionen			
Nitraten	Biotransformatie	hoog	zwak
Perchloraten	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
Cianiden			
vrij	Biotransformatie	gemiddeld	gemiddeld
complex (ijzer)	immobilisatie	gemiddeld	zwak
Radionucliden			
⁶⁰ Co, ¹³⁷ CS	immobilisatie	gemiddeld	gemiddeld
³ H	Ontbinding	hoog	gemiddeld
⁹⁰ Sr	immobilisatie	hoog	gemiddeld
⁹⁹ Tc	Biotransformatie/immobilisatie	zwak	zwak
^{238, 239, 240} Pu	immobilisatie	gemiddeld	zwak
^{235, 236} U	Biotransformatie/immobilisatie	gemiddeld	zwak



5. Onderzoek van de technische haalbaarheid

5.1. Aanvaardingscriteria

De voornaamste criteria voor de aanvaarding van de bewaakte natuurlijke afbraak als techniek zijn de volgende :

- De verontreinigingssituatie is voldoende gekend en er werd via een monitoring aangetoond dat natuurlijke afbraak reeds plaatsvond en nog steeds in die mate plaatsvindt dat de doelstellingen behaald zullen worden
- De doelstellingen kunnen binnen een redelijke termijn behaald worden (minder dan 30 jaar)
- Er worden voldoende en objectieve gegevens aangeleverd die aantonen dat er tijdens het proces van de bewaakte natuurlijke afbraak geen bedreiging is en zal zijn van de receptoren en dat er geen relevante uitbreiding van de verontreinigingspluim kan verwacht worden.
- De bewaakte natuurlijk afbraak wordt beschouwd als een innovatieve techniek. In het geval dat de doelstellingen niet gehaald worden binnen een redelijke termijn, zal een meer actieve techniek overwogen moeten worden. In dit opzicht dient er reeds gedetailleerde uitwerking van een actieve variant beschikbaar te zijn bij de opmaak van het saneringsvoorstel of van het risicobeheersvoorstel.

Volgende opmerkingen kunnen geformuleerd worden :

- De graad van nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de gegevens die moeten aangeleverd worden afhankelijk van het type, de omvang van de verontreiniging en de risico's die ermee gepaard gaan.
- De termijn die ingeschat wordt voor het bereiken van de doelstellingen moet gelinkt zijn aan de heersende condities op de site : fysico-chemische kenmerken van de verontreinigende parameters, hydrogeologie van de site, kenmerken van de aquifer....
- Het gebruik van de site mag op langere termijn niet beperkt of gehinderd worden door het proces van de bewaakte natuurlijke afbraak. De verontreinigde zones op de site moeten bereikbaar blijven voor de opvolging van de verontreiniging en, in het andere geval, dient op voorhand toestemming aan de burens gevraagd worden indien de opvolging dient plaats te vinden op de naburige percelen.

Het onderzoek van de technische haalbaarheid van de natuurlijke afbraak vindt plaats in 4 opeenvolgende stappen :

- Het vooronderzoek : voorafgaandelijk onderzoek van de haalbaarheid van de natuurlijke afbraak
- Haalbaarheidsonderzoek op van actuele condities en kenmerken van de site
- De definiëring van het project : procedures uitwerken om het afbraakpotentieel op lange termijn te kunnen evalueren
- De uitvoering en de validatie : procedures die gevolgd moeten worden tijdens de opvolgingsfase om na te gaan of de doelstellingen al dan niet behaald worden.



5.2. Vooronderzoek : haalbaarheidsstudie

Minimaal volgende gegevens moeten beschikbaar zijn tijdens de haalbaarheidsstudie

Parameters van de verontreinigende stoffen :

- Ligging en uitbreiding (verticale en horizontale) van de kern van de verontreiniging
- Ligging en uitbreiding (verticale en horizontale) van de pluim van de verontreiniging
- Concentraties (grootte et distributie) in de kernzones en de pluimzones
- Vuilvracht in de kernzones en pluimzones voor de verschillende compartimenten van de bodem (vaste fase, vloeibare fase en gasfase) en de aanwezigheid van fase bestaand uit puur product. Dit vooronderzoek heeft betrekking op de verontreinigde stoffen en hun afbraakproducten die ook van verontreinigende aard zijn.
- Oorzaak en bron van de verontreiniging
- Achtergrondwaarden in de omgeving van de te behandelen site ; aantonen van mogelijke andere verontreinigingsbronnen in de omgeving ; fysicochemische parameters van de verontreiniging

Bodemparameters :

- Als er een aquifer aanwezig is en deze in verband kan gebracht worden met de verontreiniging (actueel of potentieel) : het belang van de aquifer (fysisch en economisch)
- Aanwezigheid van grondwateronttrekkingsinstallatie in de aquifer (bestaand of gepland)
- Hydrodynamische parameters van de aquifer : hydraulische conductiviteit, hydraulische gradiënt, grondwater snelheid, bewegingsrichting van het grondwater (en eventuele variaties hierop), bodemsamenstelling (heterogeniteit en aanwezigheid van de verschillende lagen, preferentiële stromingsrichtingen,....
- Parameters die een invloed kunnen hebben op de mobiliteit van de verontreinigende stoffen (pH, kleigehalte, organische stofgehalte, ...)
- Parameters die een invloed kunnen hebben op de (bio)afbreekbaarheid van de verontreinigende : redoxpotentieel, beschikbaarheid van elektron donoren of elektron acceptoren, aanwezigheid van verschillende verontreinigingen , ...

Receptoren :

Identificatie en lokalisatie van de potentiële of actuele doelwitten : aquifers, grondwaterwinningen, oppervlaktewater, woonzones, groen zones en andere speciale zone (volgens de definitie zoals weergegeven in bijlage 3 van de [BBHR van 29/03/2018](#))

Het voorafgaandelijke haalbaarheidsonderzoek zal uitgevoerd worden volgens volgende criteria.

Technische haalbaarheid :

- Onderzoek van de fysico-chemische kenmerken van de aanwezige verontreinigende stoffen (en hun nevenprodukten), hun toxiciteit en hun vatbaarheid voor (bio)degradatie volgens literatuurgegevens.
- Onderzoek van de bodemkarakteristieken en van eventuele aanwezige aquifers en de invloed van deze parameters op de natuurlijke afbraak
- Onderzoek van de belangrijkheid en van de evolutie van de verontreiniging door de oorspronkelijke verontreinigende stoffen en de degradatie parameters met een verontreinigend potentieel: vuilvracht, aanwezige concentraties, horizontale en verticale



uitbreiding, stabiliteit of evolutie van de uitbreiding van de verontreinigingsvlek (kern en pluim).

- Aanwezigheid van actuele of potentiële risico's voor gevoelige doelwitten (receptoren)
- Onderzoek van de specifieke karakteristieken van de site en hun compatibiliteit met een spontane afbraak van de verontreinigende stoffen op basis van gegevens die in de literatuur kunnen teruggevonden worden : bijvoorbeeld de pH, de redoxpotentiaal van de bodem, ...

Praktische aspecten van de haalbaarheidstudie :

- Is het toekomstig gebruik van de site voldoende gekend ? Is de toegankelijkheid van de site gegarandeerd voor de volledige duur van de bewaakte natuurlijke afbraak ? Zal het niveau van de risico's stabiel blijven tijdens de volledig duurtijd van de geplande opvolging ?
- De eigenaars van de naburige percelen die mogelijk betrokken zullen worden indien de verontreinigingsvlek uitbreidt, de wijze waarop deze percelen gebruikt worden en de toegankelijkheid van deze percelen indien opvolging op deze nodig zal zijn.
- In het geval de natuurlijke afbraak onvoldoende zou zijn, zijn de alternatieve (en relevante) technieken voldoende uitgewerkt en kunnen deze op een realistische manier in werking worden gesteld ? De haalbaarheid van de alternatieve technieken moet nagegaan worden tijdens de uitvoeringsfase van de bewaakte natuurlijke afbraak.

Financiële en economische haalbaarheid

- De technische haalbaarheidsstudie voor de uitvoering van een bewaakte natuurlijke afbraak houdt een gedetailleerde studie in, die op zich al belangrijke kosten met zich meebrengen
- De kosten voor een langdurende opvolging van het proces kunnen ook hoog oplopen. Werden deze kosten correct ingeschat, rekening houdend met een lange termijn visie (inflatie, actualisatie van de kosten) ? Werd de financiële impact van een lange termijn opvolging op het gebruik van het perceel en haar commerciële waarde voldoende geëvalueerd ?
- De evaluatie van de kans dat er een alternatieve techniek aangewend zal moeten worden dient uitgevoerd te worden. De evaluatie van de kosten voor de bewaakte natuurlijke afbraak moet rekening houden met de mogelijke implementatie van deze alternatieve techniek.
- De vergelijking van de kosten tussen een lange termijn opvolging van bewaakte natuurlijke afbraak en een meer actieve techniek dient opgemaakt te worden op basis van volledige en betrouwbare gegevens. Zo moeten bijvoorbeeld de meerkosten die gelinkt zijn aan onzekerheid door ontgraving + ex situ verwerking in rekening gebracht worden, alsook de meerkosten die gelinkt zijn aan lange duurtijd van natuurlijke afbraak, het gedetailleerd onderzoek van de te behandelen zone en de eventuele noodzaak om beroep te moeten doen op een alternatieve techniek.

Kans van aanvaarding door de publieke opinie en van de autoriteiten

Deze kans hangt af van volgende elementen :

- Betrouwbaarheid van de evaluatie van de risico's
- Kans op succes van de bewaakte natuurlijke afbraak in vergelijking met de betrouwbaarheid van andere, meer actieve, technieken om de verontreiniging aan te pakken
- De tijd dat het perceel al dan niet langer in categorie 4 dient te blijven van de inventaris



De impact van de verschillende onderzoekscriteria op de haalbaarheid van een aanpak via bewaakte natuurlijke afbraak kan (op kwantitatieve manier) samengevat worden zoals voorgesteld in **Tabel 3**.

Opmerking: Natuurlijke afbraak als methode op zich kan niet aanvaard worden als de dominante mechanismen waardoor deze afbraak optreedt de volgende zijn: verdunning, verdamping, reversibele adsorptie en reversibele neerslagreacties.

Tabel 3 : Kwalitatief onderzoek van de van de impact van de verschillende criteria van het voorafgaandelijke haalbaarheidsonderzoek

Evaluatiecriteria	Gunstige situatie	Intermediaire situatie	Ongunstige situatie
A. Technische aspecten			
Bron van de verontreiniging	Verwijderd/verdwenen	uitgeput of bijna uitgeput	Aanwezig of nog actief
Pluim	Ruimtelijk goed afgeperkt en inkrimpend	Stabiel	Contour slecht bepaald en in expansie
Risico op verspreiding voorbij de perceelsgrens	geen risico	beperkt risico	verwacht risico
Theoretische verwachting voor afbraak rekening houdend met de heersende terreinspecifieke condities	goed	gemiddeld	zwak of onzeker
Mobiliteit van de pollutant	zwak	gemiddeld	Haute
Afbraakmechanismen	Irreversibele afbraak tot op het eindstadium		Onvolledige/reversibele afbraak
Intermediaire afbraakproducten	intermediaire producten ook afgebroken/geen verder risico		Intermediaire producten accumuleren/verder risico
Effecten ten gevolge van gemixte verontreinigingen	Geen effect : natuurlijke afbraak gaat door zonder beïnvloed te worden		Effect van de combinatie van de verontreinigingen : natuurlijke afbraak van pollutant 1 beïnvloed op negatiever manier deze van pollutant 2
Watervoerende lagen : homogeniteit en isotropie	Homogeen en isotroop		Heterogeen/anisotroop
Aanwezigheid van een bedreigde receptor			
'- actueel	afwezig	aanwezig maar laag risico	aanwezig : hoog risico
'- potentieel	afwezig	aanwezig maar laag risico	aanwezig : hoog risico
Nabijheid van een beschermingszone van een waterwinning of een waterwinning	afwezig		Aanwezigheid van een beschermingszone type I, II of III volgens de definitie gegeven door de de BBHR van 19.09.2002
Belang van het gebruik van het grondwater, in het heden of in de toekomst	Biotransformatie	gemiddeld	zwak
'- prive gebruik	zwak	gemiddeld	hoog
'- industrieel gebruik	zwak	gemiddeld	hoog
Betrouwbaarheid van de opvolgingsgegevens	Hoog : verzamelen van gegevens voor een periode langer dan twee jaar		Laag : verzamelen van gegevens voor een periode minder dan twee jaar
Geldigheid van de gegevens betreffende de vuilvracht en de verdeling tussen de verschillende fases van de bodem en 3D verspreiding	Hoog (verontreiniging enkel in opgeloste vorm)		Laag (bijvoorbeeld door onzekerheid over het mogelijk aanwezig zijn van een puur product fase)
B. Bevoegde instanties			
Mogelijkheid tot aanvaarding	Niet in conflict met directieven en procedures ; geen technische onzekerheden	Niet in conflict met directieven en procedures ; technische onzekerheden	In conflict met directieven en procedures ; technische onzekerheden
C. Praktische aspecten en economische haalbaarheid			
Meetpunten voor controle liggen buiten de grenzen van het terrein	Toegang zonder beperkingen	Toegang mogelijk	Toegang beperkt of onmogelijk
Financiële aspecten	Budgetten beschikbaar op lange termijn financieringsbron op wettelijke basis gegarandeerd	Budgetten beschikbaar op lange termijn financieringsbron niet op wettelijke basis gegarandeerd	Geen budget voorzien op de langere termijn



5.3. Specifiek haalbaarheidsonderzoek

Volgende stappen kunnen gevolgd worden.

5.3.1. Eerste stap van het haalbaarheidsonderzoek

Uitvoeren van een trendanalyse op de gegevens van de gemeten concentraties van de opeenvolgende bemonstering die over verschillende jaren werd gemeten. Een dalende trend van de ernst van de verontreiniging kan als volgt vastgesteld worden :

- Een daling van de gemeten concentraties in de verschillende bemonsteringspeilbuizen.
- Een daling van de concentraties in de grondwaterstromingsrichting ter hoogte van de pluimzone

Als de dalende trend het voornaamste argument is om de haalbaarheid van de natuurlijke afbraak te bepalen, dient deze trend bevestigd te worden op basis van metingen die werden uitgevoerd over een periode van minimaal 3 jaar, met per jaar 2 tot 4 meetcampagnes. Op die manier kan de evolutie van de concentraties aan verontreinigende stoffen statistisch gezien als significant beschouwd worden. De vastlegging van het aantal bemonsteringen en de frequentie ervan dient rekening te houden met seizoensfluctuaties en variabelen in de hydrogeologische parameters van de site.

De statistische trendanalyse moet berusten op een voldoende aantal meetpunten (bijvoorbeeld, minimaal 8 meetpunten indien een Mann-Kendall trendanalyse dient uitgevoerd te worden). De gegevens die bekomen werden tijdens de verschillende onderzoeksfases mogen gebruikt worden indien de metingen vergelijkbaar zijn en niet berusten op een confirmation bias. Indien de trendanalyse gebeurt via een statistische methode, dient de deskundige de gebruikte methode te onderbouwen.

Opmerking : een trendanalyse van de concentraties geeft geen indicatie over de mechanismen die verantwoordelijke zijn voor de trend : afbraak van de verontreiniging of verdunning of reversibele processen.

5.3.2. Tweede stap van het onderzoek

Dit onderzoek dient om aan te tonen dat de (bio)afbreekbaarheid van de verontreinigende stoffen weldegelijk plaatsvindt. Dit kan op verschillende manieren gebeuren :

- De microorganismen die nodig zijn voor de (bio)degradatie zijn weldegelijk aanwezig en actief : de aanwezigheid van bacteriën die de verontreinigende stoffen gebruiken voor hun voortplanting werden gedetecteerd in de verontreinigde zones, de activiteit van de microorganismen werd gedetecteerd doordat afbraakproducten werden teruggevonden (zeker als deze niet werd aangetroffen buiten de verontreinigde zones).
- De heersende condities in de ondergrond zijn gunstig voor de afbraak van de verontreinigende stoffen : de toevoer en de verdeling van elektron donoren of elektron acceptoren is verzekerd, de biobeschikbaarheid van de verontreinigende stoffen is voldoende, de duurzaamheid van de natuurlijke afbraak is verzekerd.
- Het gebruik van geochemische of biochemische indicatoren van de natuurlijke afbraak : daling van de concentraties aan O_2 en nitraat, stijging van de methaan concentraties, alsook van opgeloste Fe^{2+} en Mn^{2+} , aanwezigheid van afbraakproducten van de verontreinigende stoffen of van intermediaire producten. Deze metingen geven informatie over de types van mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de afbraak alsook van de snelheid ervan. Ze laten ook toe om na te gaan wat de invloed is van andere mechanismen



(niet destructieve mechanismen zoals verdunning, verdamping, reversibele adsorptie....). De weergave van de gegevens op concentratiekaarten (contourkaarten) naast kaarten die de verdeling weergeven van de stoffen kunnen handige instrumenten zijn voor interpretaties. De relatie tussen de concentraties aan verontreinigende stoffen en de waarden van de indirecte indicatoren, vergeleken met de afstand vanaf de bron kunnen ook gevisualiseerd worden.

De **tabellen 4a, 4b et 4c** stellen de parameters voor die moeten gemeten en/of gekwantificeerd worden voordat een programma van bewaakte natuurlijke afbraak voor een verontreiniging in de bodem en/of het grondwater kan opgestart worden. Deze tabellen dienen als een checklist van gegevens die moeten bekomen worden, ofwel tijdens de verschillende opeenvolgende onderzoekstadia (verkennend bodemonderzoek, gedetailleerd onderzoek, risico onderzoek) ofwel tijdens de voorbereidingsfase van het saneringsvoorstel of het risicobeheersvoorstel, dit voor de opstart van eventuele laboratorium testen, ofwel voor de start van de behandeling. In deze tabellen wordt een onderscheid gemaakt tussen twee niveaus van vereisten :

- Parameters waarvan de metingen of de ramingen altijd vereist zijn
- Parameters waarvan de metingen of de ramingen nuttig kunnen zijn



Tabel 4a : Parameters van de polluenten die bekomen moeten worden voordat het programma van bewaakte natuurlijke afbraak kan opgestart worden.

Parameters	Type van opvolging	Opmerkingen/commentaar
Verontreinigingsbron al dan niet nog aanwezig	Historische studie, terreinbezoek	Ter beschikking na het verkennend onderzoek
Concentraties in de bodem		
Concentraties in de bodem : verticale en horizontale afperking van de verontreinigingsvlekken (contour concentraties > IN en contour concentraties > SN en > terugsaneerwaarde/saneringsdoelstelling)	Boringen, staalname en analyses van de bodem en afperking	Voor elke verontreiniging waarvoor een interventie vereist is. Beschikbaar na het gedetailleerd onderzoek
Concentraties in de bodem : verticale en horizontale afperking van de verontreinigingsvlekken (contour concentraties > IN en contour concentraties > SN en > terugsaneerwaarde/saneringsdoelstelling)	Boringen, staalname en analyses van de bodem en afperking	Voor verontreinigende stoffen voortgekomen door biodegradatie
Inschatting van de totale vuilvracht	Op basis van ingeschatte volumes en gemiddelde concentraties	Voor alle verontreinigende stoffen die betrokken zijn in de keten van de biologische afbraak
Concentraties in het grondwater		
Concentraties in het grondwater : verticale en horizontale afperking van de verontreinigingsvlekken (contour concentraties > IN en contour concentraties > SN en > terugsaneerwaarde/saneringsdoelstelling)	Plaatsing van peilbuizen, staalname en analyses van grondwater en afperking	Voor elke verontreiniging waarvoor een interventie vereist is. Beschikbaar na het gedetailleerd onderzoek
Concentraties in het grondwater : verticale en horizontale afperking van de verontreinigingsvlekken (contour concentraties > IN en contour concentraties > SN en > terugsaneerwaarde/saneringsdoelstelling)	Plaatsing van peilbuizen, staalname en analyses van grondwater en afperking	Voor verontreinigende stoffen voortgekomen door biodegradatie
Inschatting van de totale vuilvracht	Op basis van ingeschatte volumes en gemiddelde concentraties	Voor alle verontreinigende stoffen die betrokken zijn in de keten van de biologische afbraak
Retardatiefactor	Kd waarden en effectieve porositeit van de aquifer	Voor elke verontreiniging waarvoor een interventie vereist is. Beschikbaar na het risico onderzoek
Migratie snelheid van de polluent volgens de longitudinale richting (verspreiding van de pluim in de richting van de grondwaterstroming)	Simulatie met behulp van analytische modellen : Domenico vergelijkingen met longitudinale, laterale en verticale verspreidingscoëfficiënten Of gebruik van numerieke modellen zoals MODFLOW, ...	Voor elke verontreiniging waarvoor een interventie vereist is. Beschikbaar na het risico onderzoek
Migratie snelheid van de polluent volgens de laterale richting (verspreiding van de pluim loodrecht op de richting van de grondwaterstroming)	Simulatie met behulp van analytische modellen : Domenico vergelijkingen met longitudinale, laterale en verticale verspreidingscoëfficiënten Of gebruik van numerieke modellen zoals MODFLOW, ...	Voor elke verontreiniging waarvoor een interventie vereist is. Beschikbaar na het risico onderzoek
Verticale bewegingssnelheid in de bodem (verticale verspreiding van de pluim tijdens de migratie ervan)	Simulatie met behulp van analytische modellen : Domenico vergelijkingen met longitudinale, laterale en verticale verspreidingscoëfficiënten Of gebruik van numerieke modellen zoals MODFLOW, ...	Voor elke verontreiniging waarvoor een interventie vereist is. Beschikbaar na het risico onderzoek
Trendanalyse van de concentraties in de bodem over verschillende jaren	Boringen, staalname en analyses van de bodem en afperking	Aantal controlepunten en meetcampagnes zijn voldoende - Voor de bronproducten en intermediaire producten
Trendanalyse van de concentraties in het grondwater over verschillende jaren	Plaatsing van peilbuizen, staalname en analyses van grondwater en afperking	Aantal controlepunten en meetcampagnes zijn voldoende - Voor de bronproducten en intermediaire producten
Trendanalyse van de totale vuilvracht over verschillende jaren	Op basis van ingeschatte volumes en gemiddelde concentraties	Aantal controlepunten en meetcampagnes zijn voldoende - Voor de bronproducten en intermediaire producten
Concentraties in de gasfase van de bodem (bodempluim)		
Controle van de concentraties aan verontreinigende stoffen in de gasfase van de bodem	Controle peilbuizen installeren om concentraties in de gasfase van de bodem op te volgen	Indien noodzakelijk wordt geacht door de deskundige rekening houdend met de bijdrage van de gasfase in vergelijking met de totale vuilvracht
Aanwezigheid van vrij fase (DNAPL)		
Aanwezigheid van een vrije fase nagaan	Bemonstering en analyse van bodem en grondwaterstalen in de kernzone	
Horizontale en verticale verspreiding van de vrije fase nagaan	Observatie van de aanwezigheid van een vrije fase (drijfvlag/zinklaag) ter hoogte van een netwerk van peilbuizen - meetcampagnes aan de hand van een MIP-systeem (Geoprobe) of door bodempluimmetingen	Indien aanwezig
Inschatting van de totale vuilvracht, alle fases van de bodem in rekening gebracht	Op basis van ingeschatte volumes en gemiddelde concentraties	
Fysico-chemische eigenschappen van de aanwezige polluenten		
Beschikbaarheid van de polluenten voor een spontane afbraak in de bodem - Gunstige en ongunstige condities	Literatuurgegevens	Voor alle aanwezige polluenten individueel bekeken - effect van de combinatie van de verschillende polluenten
	= parameters waarvan de meting of estimatie vereist is	
	= parameter waarvan de meting of estimatie nuttig is	

Tabel 4b: parameters van de bodem die dienen te worden bekomen (via metingen) voordat het programma van bewaakte natuurlijke afbraak kan opgestart worden

Parameters	Type van opvolging	Opmerkingen/commentaar
Hydrodynamische parameters van de bodem		
Stratigrafie van de bodem : aquifers, aquitards, aquicludes, ...	Geologische en geotechnische kaarten, sonderingen en beschrijvingen van de bodemlagen	Beschikbaar na het gedetailleerd onderzoek
Peilbuizen van de aquifer(s), hydraulische gradiënten, stromingsrichting, ingesloten of half ingesloten karakter	Geologische en geotechnische kaarten, sonderingen en beschrijvingen van de bodemlagen , plaatsing van peilbuizen, opvolging van de stijghoogtes en bemonstering van peilbuizen	Beschikbaar na het gedetailleerd onderzoek
Kracht van de aquifer(s)	Geologische en geotechnische kaarten, sonderingen en beschrijvingen van de bodemlagen	Beschikbaar na het gedetailleerd onderzoek
Siezoensfluctuaties van de grondwaterstijghoogtes	Opvolging van de stijghoogtes tijdens de opeenvolgende meetcampagnes	
Karakteristieken van het grondwater		
Fysico-chemische parameters van het grondwater : pH, Ec, opgeloste O ₂ , T°	Metingen op het terrein	Beschikbaar na het gedetailleerd onderzoek
- Afbraak en anaërobe condities = voornaamste mechanisme		
Chemische parameters : metingen van intermediaire afbraakproducten, Etheen, Ethaan, methaan, TOC, elektron acceptoren : Nitraat, Fe(III), Mn(IV), sulfaten, CO ₂ en hun reductie product : nitrieten, Fe(II), Mn(II), sulfieten, sulfide.	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	OVAM 2003
Bijkomende chemische parameters : opgelost H ₂ acetaat + andere vluchtige vetzuren, opgeloste anorganische koolstof, Cl-	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	OVAM 2007
Concentraties in nutriënten : Fosfaten, Ca	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	OVAM 2003
PCR test en bepaling van hoeveelheid bacteriën : populatie van de specifieke bacteriën	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	OVAM 2003
- Afbraak en aërobe condities = voornaamste mechanisme		
Chemische parameters : metingen van intermediaire afbraakproducten, Etheen, Ethaan, methaan, TOC, elektron acceptoren : Nitraat, Fe(III), Mn(IV), sulfaten, CO ₂ en hun reductie product : nitrieten, Fe(II), Mn(II), sulfieten, sulfide.	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	OVAM 2003
Fenolindex	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	Indicatoren van de afbraak van aromatische verbindingen zoals BTEX (OVAM 2003)
Concentraties in nutriënten : Fosfaten, Ca	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	OVAM 2003
PCR test en bepaling van hoeveelheid bacteriën : populatie van de specifieke bacteriën	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses	OVAM 2003
	= parameters waarvan de meting of estimatie vereist is	
	= parameter waarvan de meting of estimatie nuttig is	



Tabel 4c : parameters van de te betreffende site die geëvalueerd moeten worden voordat het programma van bewaakte natuurlijke afbraak kan opgestart worden

Parameters	Type van opvolging	Opmerkingen/commentaar
Aanwezigheid van kabels en leidingen in de bodem, op de site of in de onmiddellijke omgeving	Opvragen van informatie over kabels en leidingen bij nutsmaatschappijen, gemeente,.....	Uitgevoerd tijdens het verkennend en gedetailleerd onderzoek
	Detectie op het terrein : voorgraven, CAT-scan ,.....	Uitgevoerd tijdens het verkennend en gedetailleerd onderzoek
Aanwezigheid van bedreigde receptoren ter hoogte van de betreffende aquifer en andere onderliggende aquifers	Inventaris van de waterwinningen, hydrogeologische studie	Uitgevoerd tijdens het gedetailleerd onderzoek
Toegankelijkheid van de site voor opvolgingscampagnes	Inventaris	
Kans dat verontreinigingspluim de nabijgelegen percelen nadert of bereikt	Simulatie op basis van bekomen gegevens	
Toegankelijkheid van de buurtpercelen indien de opvolgingscampagnes daar uitgevoerd moeten worden	Inventaris	
Aanwezigheid van infrastructuur die potentieel beschadigd kan worden ten gevolge van de aanwezigheid van de pollutie en van de afbraakproducten, rekening houdend met de duurtijd van de behandeling/opvolging	Inventaris	
	= parameters waarvan de meting of estimatie vereist is	
	= parameter waarvan de meting of estimatie nuttig is	

5.3.3. Derde stap van het haalbaarheidsonderzoek

Laboratorium testen kunnen uitgevoerd worden onder vorm van microcosm testen, detectie van specifieke bacteriën, PCR testen (Polymerase Chain Reaction) of het onderzoek naar stabiele isotopen in de grondwaterstalen.

Deze testen kunnen als noodzakelijk geacht worden indien na de eerste twee stappen nog twijfels achterblijven over de mogelijke degradatie van dat de verontreinigende stoffen.

Microcosm testen laten toe om de bioafbreekbaarheid te testen of het potentieel aan bioafbreekbaarheid van de verontreinigende stoffen van stalen die afkomstig zijn van de site, door condities te scheppen die gelijkaardig zijn aan diegene die op de site worden aangetroffen. Ze laten toe om op kleine schaal vast te stellen of de afbraak van de verontreinigende stoffen al dan niet volledig kan plaatsvinden, totdat er afbraakproducten in de bodem ontstaan die geen nadelig effect hebben. Ze kunnen bijvoorbeeld nuttig zijn om de bioafbreekbaarheid van moeilijk afbreekbare stoffen na te gaan (bijvoorbeeld benzeen in anaërobe condities, MTBE in aerobe condities). Ze kunnen tevens nuttig zijn om na te gaan of gechloroerde solventen (per- en trichlooretheen) volledig afbreekbaar zijn tot onschadelijke stoffen (ethaan) en niet stagneren op een intermediaire stadium van afbraak waardoor de meer toxische en mobiele DCE en VC zich in het milieu gaan accumuleren.

De microcosm testen die uitgevoerd worden in anaerobe condities laten toe om een raming te bekomen van de snelheid van de afbraak. Deze gegevens kunnen, indien gecombineerd met gegevens over de verspreidingssnelheid van de verontreinigende stoffen in de bodem, gebruikt worden om via modelering na te gaan hoe de pluimen zullen evolueren.

De microcosm testen die uitgevoerd worden in aerobe condities daarentegen laten niet toe om een betrouwbare manier de afbraaksnelheden na te gaan aangezien de O₂ toevoer in natuurlijke omstandigheden systematisch lager is dan deze onder labo condities.

De testen in anaerobe condities dienen uitgevoerd te worden over een duurtijd van 3 tot 12 maanden terwijl deze uitgevoerd onder aerobe condities veel korter zullen zijn, in de grootteorde



van enkele weken. Gezien de mogelijke duurtijd van deze testen, is het aangewezen om deze uit te voeren vanaf eerste fase (opstartfase) van de opvolging van de natuurlijke afbraak.

De representativiteit van deze microcosm testen hangt af van een aantal factoren : het behoud van de heersende redoxcondities in de bodem tijdens de bemonstering, de omstandigheden waarin de bodem en/of grondwaterstalen worden vervoerd, het bemonsteren van één of meerdere representatieve zones in de verontreinigingsvlek (kern of pluim).

De raming van de snelheid voor de natuurlijke afbraak kan op verschillende manieren gebeuren :

- De snelheid waarmee de verontreiniging in de verontreinigingskern, die een invloed heeft op de pluim, afbreekt (evolutie van de gemeten concentraties doorheen de tijd)
- De gradiënt van de daling aan concentraties vergeleken met de afstand ten opzichte van de kern. Deze parameter is van belang om de maximale uitbreiding dat de pluim zou kunnen hebben te bepalen.
- De afbraaksnelheid van de totale vuilvracht aan verontreinigende stoffen : deze parameter bepaald de impact die de verontreiniging kan hebben op potentieel bedreigde receptoren. Deze is het resultaat van de som van de effecten van de (bio)afbreekbaarheid en van andere mechanismen zoals de verspreiding, de verdunning, de verdamping en de adsorptie.
- De snelheid van de (bio)afbreekbaarheid alleen

De geraamde snelheid kan gebruikt worden als parameter voor modeleringen om de verdere evolutie van de verontreinigingspluim te simuleren. Verschillende modellen kunnen hiervoor gebruikt worden : Bioscreen, Biochlor, Bioplum III, Modflow +RT3D, ...

5.4. Noodzaak voor een pilootproef

Rekening houdend met de mogelijke duurtijd van een pilootproef, lijkt deze optie niet relevant te zijn. Als de resultaten van het vooronderzoek naar de haalbaarheid van de natuurlijke afbraak gunstig zijn en voldoende betrouwbaar zijn, kan gestart worden met de opstelling van de nodige maatregelen voor de opvolging van de natuurlijke afbraak.

De maatregelen die genomen worden om de natuurlijke afbraak te kunnen opvolgen zullen de mogelijkheid bieden om, van bij de opstart van de opvolging, na te gaan of de natuurlijke afbraak even efficiënt verloopt dan voorzien of, in het andere geval, dat een actievere aanpak via één of meerdere andere technieken noodzakelijk is.



6. Beschrijving van een installatietype

De noodzakelijk installatie beperkt zich tot de infrastructuur en maatregelen die nodig zijn om de opvolging te kunnen uitvoeren (zie volgende hoofdstukken).

7. Saneringsvoorstel of risicobeheersvoorstel

Het sanerings- of risicobeheersvoorstel zal de volledige beschrijving weergeven van het voorafgaandelijke haalbaarheidsonderzoek.

Zullen duidelijk gedefinieerd worden :

- Geraamde duurtijd van de bewaakte natuurlijke afbraak tot dat de saneringsdoelstellingen bereikt zullen zijn.
- Vergelijking van de duurtijd ervan met de duurtijd van meer actieve varianten.
- De kans dat de natuurlijke afbraak doorgaat volgens de voorziene snelheid of, omgekeerd, de kans dat er in de toekomst nadelige effecten zouden optreden die een negatieve invloed zouden hebben op de efficiëntie van de natuurlijke afbraak : bijvoorbeeld een mogelijke lagere toevoer en/of verspreiding van elektron acceptoren of doneren, nutriënten, de accumulatie van intermediaire producten (stagnatie).
- De betrouwbaarheid en de graad van volledigheid van de bekomen gegevens alsook de mate waarin men de fenomenen begrijpt die geleid hebben tot de huidige situatie
- De betrouwbaarheid van de voorspellingen en de simulaties die werden gedaan voor de verspreiding van de verontreinigende stoffen en de pluim enerzijds en de efficiëntie van de natuurlijke afbraak anderzijds, op basis van de bekomen gegevens. Zijn deze volledig of op zijn minst voldoende ?

Het sanerings- of risicobeheersvoorstel zal tevens een beschrijving omvatten van één of meerdere relevante behandelingsvarianten die gebruikt zullen kunnen in het geval de bewaakte natuurlijke afbraak zou falen.



8. Beschrijving van de installaties die voorzien worden

De voorziene installaties beperken zich tot de voorzieningen die nodig zijn voor de opvolging, zoals hierna beschreven.

9. Bijzonder veiligheidsmaatregelen en beperking van hinder : geur, lawaai, stof,.....

De risico's waarmee hoofdzakelijk rekening dient te worden gehouden zijn de mogelijke te lange verblijftijd van de verontreinigende stoffen in de bodem en de dreiging dat de verontreinigende stoffen zich verspreiden richting receptoren (naburige percelen, grondwaterwinningen,....) in het geval dat de efficiëntie van de natuurlijke afbraak onvoldoende is om de verspreidingsnelheid van de verontreinigingspluim te kunnen compenseren.



10. Opgvolgingsmaatregelen

10.1. Basisregels voor de opvolgingsmaatregelen

De onderzoeksdata die uitgevoerd dienen te worden in het kader van de opvolging van de natuurlijke afbraak moeten een duidelijk en actueel beeld kunnen geven van de stand van zaken van de verontreiniging in de bodem en van de geochemische en hydrogeologische parameters van de bodem.

Meer concreet moet het opvolgingsprogramma aan volgende doelstellingen voldoen :

- Aantonen dat natuurlijke afbraak gebeurt zoals werd voorzien
- Identificatie van alle eventuele intermediaire afbraakproducten die gevormd worden
- Controle van de eventuele uitbreiding van de pluim
- Nagaan of geen enkele receptor bedreigd wordt
- Alle veranderingen in de condities van de bodem opvolgen die een negatieve invloed kunnen hebben op de efficiëntie van de natuurlijke afbraak
- De evolutie van de concentraties opvolgen en eventueel nagaan of de doestellingen werden behaald

Het opvolgingsprogramma moet opgesteld worden naargelang de site die opgevolgd dient te worden (gebaseerd op het conceptueel site model dat werd opgesteld voor de verontreinigingspluim) en moet een plan bevatten van de bemonsteringen en metingen die periodiek dienen te worden uitgevoerd voor bodem en/of grondwater.

Het meet- en bemonsteringsplan bij de opstart van de opvolging moet minimaal volgende elementen bevatten :

- De duurtijd van de opvolging
- De frequentie van de meet- en bemonsteringscampagnes
- De locatie van de meetpunten en de bemonsteringspunten
- De manier van bemonstering en de parameters die opgevolgd/opgemeten en geanalyseerd zullen worden

10.2. Opgvolgingsmaatregelen : standaardopstelling

De opvolging van een verontreinigingsvlek berust op het plaatsen, het opvolgen en bemonsteren van een aantal peilbuizen in en rond de verontreinigde zone. Zulke opstelling heeft als doel om na te gaan of de verontreiniging (kern + pluim) voor wat concentraties en volume betreft al dan niet wijzigt en om na te gaan of de pluim zich niet verder verspreid dan de toegelaten grenzen. De peilbuizen moeten minimaal op volgende plaatsen voorzien worden :

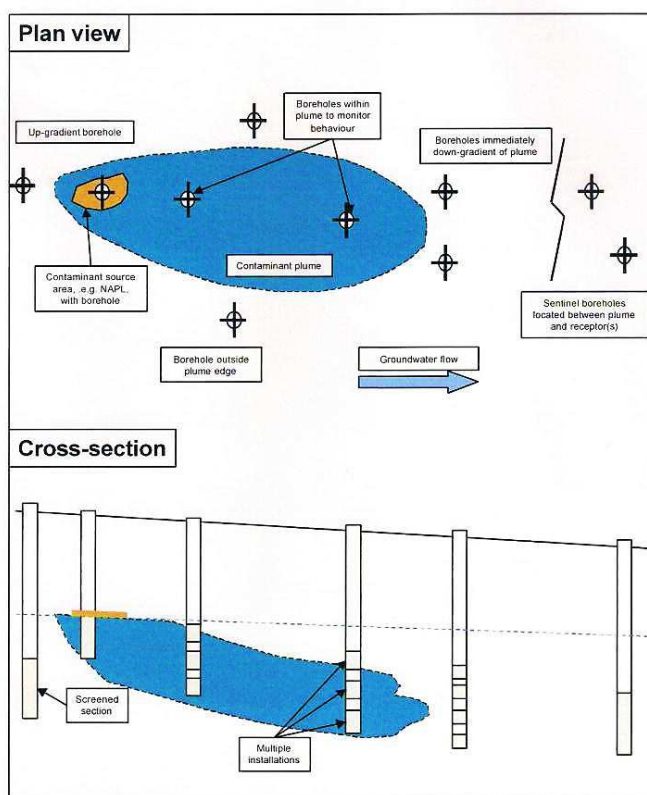


- Stroomopwaarts van de kern van de verontreiniging en buiten de verontreinigingsvlek, langs de stromingsas van de grondwaterstromingsrichting (en de verontreinigingspluim). Doel : de kwaliteit opvolgen van het instromende grondwater en nagaan of er wijzigingen optreden in de fysico-chemische parameters die een invloed kunnen hebben op het proces van de natuurlijke afbraak.
- Ter hoogte van de kern van de verontreiniging. Doel : nagaan of er geen bijkomende verontreiniging ontstaat die een invloed kan hebben op het verloop van de natuurlijke afbraak en opvolging van de ernst van de verontreiniging in de kern (en eventueel van de bron die mogelijk nog aanwezig is) in functie van de tijd. Het aantal peilbuizen die voorzien moeten worden hangt af van de omvang van de kern, maar moet er op gericht zijn om een voldoende goed beeld te kunnen krijgen van de evolutie ervan.
- Stroomafwaarts van de kern, in de richting van de voornaamste verspreidingsas, zowel in de aërobe als in de anaërobe delen van het grondwater, zodat de wijzigingen in concentraties en in fysico-chemische eigenschappen in de pluim opgevolgd kunnen worden. Het aantal opmetingspunten en de frequentie van het aantal bemonsteringen hangen af van de grootte van de pluim maar moet voldoende zijn om (door modelering) de evolutie van de pluim te kunnen voorspellen.
- Stroomafwaarts van de verontreinigingspluim, waar nog geen verontreiniging wordt waargenomen maar waar de concentraties aan elektron acceptoren al minder hoog zijn in vergelijking met de nog niet beïnvloedde zones van de grondwatertafel. Deze peilbuizen geven een indicatie van de mogelijke evolutie van de verontreinigingspluim.
- Ter hoogte van de controlepunten en stroomafwaarts van de verontreinigingspluim, ter hoogte van de perceelsgrenzen of in de richting van potentieel bedreigde receptoren. Deze opmetingspunten moeten toelaten om snel genoeg de beslissing te kunnen nemen om via alternatieven de verontreiniging aan te pakken voordat ze de perceelsgrenzen of potentieel bedreigde receptoren bereikt.
- Aan de zijkanen van de pluim om de evolutie loodrecht op de verspreidingsas te kunnen opvolgen.

Een voorbeeld van een standaardopstelling voor de opvolging wordt weergegeven in **figuur 1**.



Figuur 1 : Schema van een standaardopstelling voor de opvolgingsmaatregelen (Uittreksel uit « Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in groundwater » M.A. Carey et al., June 2000)



Ter hoogte van de verschillende bemonsteringspunten, en zeker ter hoogte van de verontreinigingspluim, is het aangeraden om verschillende peilbuizen te plaatsen (in hetzelfde boorgaten of in nabijgelegen boorgaten) om filters op verschillende dieptes te plaatsen. Deze aanbeveling is voornamelijk aan te raden in volgende gevallen :

- Aanwezigheid van verontreinigende stoffen met een hogere densiteit dan water (teer, VOCl, ...)
- Significante variaties van de stijghoogtes in de peilbuizen
- Aanwezigheid van een pomp- of (diepe) drainage installatie die een lokale daling van de grondwaterstijghoogtes in de peilbuizen kunnen veroorzaken.
- Een aanzienlijke gelaagdheid van de verontreiniging (oliën)

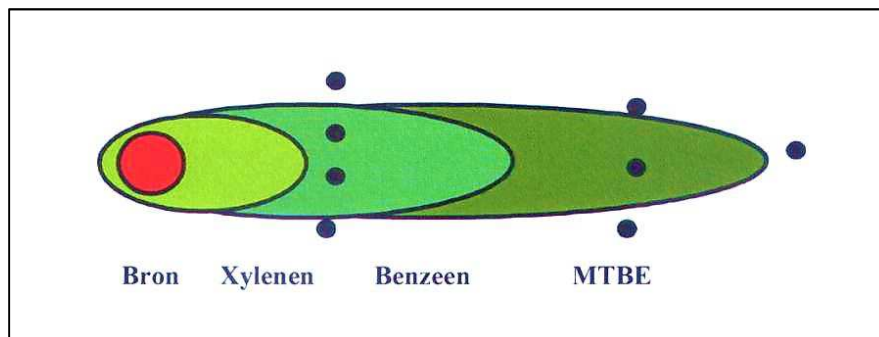
In het algemeen is het aangeraden dat het verschil in diepte tussen de verschillende peilbuis filters ter hoogte van een zelfde opmetingspunt maximaal 1 m is. Het is bovendien aangeraden om de filter te plaatsen in de lagen van de grondwatertafel die gekenmerkt worden door de hoogste hydraulische conductiviteit zodat er geen onderschatting wordt gedaan van de mogelijke risico's op verspreiding van de verontreiniging.

In het opmetings- en bemonsteringsplan dient door de deskundige bijzonder veel aandacht besteed te worden aan de site specifieke eigenschappen. Voor de correcte plaatsing van de peilbuizen in de richting de bewegingsas van het grondwater, is het in het algemeen voldoende om rekening te houden met de concentraties van de verontreiniging en de gemeten waarden van de geochemische indicatoren. Voor grote verontreinigingspluimen en in heterogene bodem, kan de deskundige gebruik maken van tracers (Bromide, jodide, boraat, ...). Om zeker te zijn dat de verspreidingsas van de verontreiniging goed wordt bepaald, is het aangeraden om de



controlepeilbuizen op lijnen te plaatsen die loodrecht staan op de stromingsas, zoals aangeduid in **figuur 2**.

Figuur 2 : Positionering van de controlepeilbuizen volgens transversale assen (Uittreksel van de OVAM 2003, Code van Goede praktijk - Natuurlijke afbraak)



Het is ook aangeraden om de controlepeilbuizen te plaatsen volgens de stromingsas van het grondwater, in de buurt van de raakvlakken tussen verschillende milieus: bijvoorbeeld het raakvlak tussen de aquifer en (een onderdeel) van het oppervlaktewater.

De densiteit van het aantal meetpunten moet aangepast worden naargelang de complexiteit en de heterogeniteit van de bodemsamenstelling. Het aantal meetpunten dient tevens voldoende te zijn om indien nodig een statistische analyse (trendanalyse) uit te voeren voor de meest kritische parameters.

In het geval van extreem complexe situaties (zeer heterogene bodems) kunnen de peilbuizen vervangen worden door sleuven ter hoogte van de pluim.

Voor de plaatsen van de peilbuizen, wordt verwezen naar Code van goede praktijk nr. 2 over de installatie van peilbuizen.

10.3. Opvolgingsmaatregelen: op te volgen parameters en frequentie van opvolging

De op te volgen parameters en de frequentie van opvolging worden in volgende tabel weergegeven (**tabel 5**) :

Tabel 5 : Op te volgen parameters en de frequentie van opvolging

Opvolgingsparameter	Middel	Parameter	Minimale frequentie*	Opmerkingen/commentaar
Opvolging peilbuizen	Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle	Peillint	Drie eerste jaren (opstartfase) : elke maand, daarna elke drie maand	Opstellen en up to date houden van isohypsen kaart en de stromingsrichting
Parameters van het grondwater	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses van het grondwater	Concentraties aan verontreinigende stoffen waarvoor de interventie nodig is en intermediaire afbraakproducten + secundaire verontreinigingen die ontstaan (As, ...)	Drie eerste jaren (opstartfase) : elke maand, daarna elke drie maand	Doel : opmaken of aanvullen van een trendanalyse , aantonen dat de natuurlijke afbraak plaatsvindt en een inschatting maken van de afbraaksnelheid, opvolgen van de verspreiding van de pluim
Parameters van het grondwater	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses van het grondwater	Geochemische indicatoren van de afbraak : TOC, concentraties in elektron acceptoren : O ₂ , Nitraat, sulfaat, Fe(II), Mn(II), pH, Ec, T°, anorganische opgeloste koolstof	Drie eerste jaren (opstartfase) : elke maand, daarna elke drie maand	Bron OVAM 2003
Facultatieve parameters van het grondwater	Nemen van stalen en uitvoeren van laboratoriumanalyses van het grondwater	PCR test, H ₂ , acetaat en vluchtige vetzuren, chloride, nitriet, sulfiet, sulfide, etheen, ethaan, methaan, fenolindex, CO ₂	Drie eerste jaren (opstartfase) : elke maand, daarna elke drie maand	Bron OVAM 2007 en 2003
Residuele concentraties in de bodem	Boringen en staalnames van de bodem en analyses, ter hoogte van de van de kern en van de pluim van de verontreiniging	Concentraties aan verontreinigende stoffen van het bronproduct en van intermediaire afbraakproducten (kg/Kg of kg/m ³)	Bij opstart en nadien na 6 maand	De diepte van de staalname moet toelaten moet toelaten om een eventuele verticale verspreiding op te sporen - indien mogelijk nagaan welke rol neerslag/sortie speelt in het proces
Concentraties in de gasfase van de bodem	Staalname van bodemlucht	Verontreinigende stoffen en vluchtige afbraakproducten	Drie eerste jaren (opstartfase) : elke maand, daarna elke drie maand	Facultatief, als de vervluchtiging of afbraak in de gasfase een belangrijke rol speelt in het mechanisme
Massabalans : Inschatting van de residuele hoeveelheden van de verontreinigende stoffen en van de afbraakproducten	Gemiddelde residuele concentraties van de verschillende fase in de bodem in de betrokken zone	Massabalans : initiële hoeveelheid van de verontreiniging, residuele hoeveelheid, afgebroken hoeveelheid (Kg) en geproduceerde hoeveelheid (kg) aan intermediaire afbraakproducten	Elke 6 maand	Inschatting van de duurtijd van de behandeling

* de frequentie zal door de deskundige aangepast worden afhankelijk van de gegevens bekomen tijdens de opvolging

Opmerkingen :

- Betreffende de te analyseren parameters, **tabel 5** bevat een checklist ten behoeve van de deskundigen. Bij de opmaak van het meet- en bemonsteringsplan, zal de deskundige een voorstel formuleren en rechtvaardigen van de te analyseren parameters in de verschillende fases van de bodem.
- De voorgestelde lijst van te analyseren parameters zal afhankelijk van de evolutie aangepast mogen worden: daling van het aantal te analyseren parameters na de aanloopfase in het geval de natuurlijke afbraak plaatsvindt zoals voorzien en indien de beschikbare gegevens voldoende zijn om de evolutie van de verontreinigingspluim te kunnen voorspellen in termen van verspreiding en concentraties.
- Betreffende de staalname- en analysefrequentie van het grondwater, dienen verschillende factoren in rekening te worden gebracht: de seizoensveranderingen in stijghoogtes, de afstand tot potentieel bedreigde receptoren en de advectie snelheid van het grondwater. In het algemeen wordt aangenomen dat het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende meet- en bemonsteringscampagnes maximaal de tijd voorstelt die nodig is voor de pluim om de eerste niet verontreinigde controle peilbuis te bereiken. Dit tijdsinterval wordt soms door twee gedeeld door rekening te houden met onzekerheden betreffende de grens van de verontreinigingspluim en de verspreidingsnelheid van de verontreiniging zelf. De voorgestelde regels voor wat betreft de frequenties in **tabel 5** zijn dus enkel indicatief en mogen door de deskundige op een gemotiveerde manier aangepast worden met behulp van concrete argumenten gebaseerd op site specifieke karakteristieken.



- De frequentie van de meetcampagnes zal, op initiatief van de deskundige, mogen aangepast worden in functie van de tijd en het efficiënte verloop van de natuurlijke afbraak. In het geval dat de natuurlijke afbraak evolueert zoals voorzien, zal de frequentie van de meetcampagnes kunnen verkleinen terwijl dat in het andere geval (het opduiken van niet voorziene fenomenen of gedrag van de verontreiniging) een verhoging van de frequentie eventueel nodig zal moeten zijn.
- Er dient opgemerkt te worden dat in het geval van MTBE, er een hogere meetfrequentie aan te raden is rekening houdend met het specifieke gedrag van deze verontreinigingsparameter : belangrijke varianties in gemeten concentraties doorheen de tijd ten gevolge van het sporadisch in oplossing gaan van de stoffen.
- De duurtijd van de opvolging komt minimaal overeen met de tijd die nodig is om de doelstellingen te bereiken, met daarbovenop enkele jaren opvolging om dit resultaat te bevestigen.
- De analyse van concentraties aan verontreinigende stoffen in de gasfase zal, indien nodig, uitgevoerd worden in een laboratorium na staalname met actiefkoolbuisjes of in staalnamezakjes. De deskundige mag echter voorstellen om metingen uit te voeren om de concentraties te bepalen aan de hand van FID, PID en Dräger op het terrein zelf, zolang hij kan aantonen dat de er een goede correlatie is tussen de terreinmetingen en de laboratoriumanalyses. De metingen voor concentraties aan O₂ en CO₂ in de gasfase mogen ter plaatse uitgevoerd worden.
- Voor de bemonstering van stalen in de bodem, het grondwater en de gasfase, is het aangewezen om de Code van goede praktijk nr. 3 van Leefmilieu Brussel « Staalname van bodem, grondwater, sedimenten en bodemlucht ... » te raadplegen. Voor het analyseren van stalen, is het noodzakelijk dat dit gebeurt conform de Code van goede praktijk nr. 4 « Code van goede praktijk voor analysemethoden ... », van Leefmilieu Brussel.



11. Rapportage, optimalisatie en correctieve maatregelen

11.1. Rapportage

Conform de voorschriften van [het besluit van de Brusselse Hoofdstedelijke Regering van 29/03/2018 tot vaststelling van de type-inhoud van het risicobeheersvoorstel, van het behandelingsvoorstel, de aangifte voorafgaand aan de behandeling van beperkte duur en de modaliteiten van de bekendmaking door aanplakking van de behandeling van beperkte duur](#), dient een interventie in het kader van een bewaakte natuurlijke afbraak vergezeld te worden door één of meerdere tussentijdse rapporten aan Leefmilieu Brussel :

- Tussentijds rapport na de opstartfase. Geschat wordt dat een periode van drie jaar een normale termijn is voor de uitvoering van de opstartfase. Hier kan op gemotiveerde wijze van afgeweken worden door de deskundige.
- Andere tussentijdse rapporten indien de behandelingsmaatregelen of risicobeheersmaatregelen over een groot aantal jaren uitgevoerd worden. De frequentie voor het indienen van de tussentijdse rapporten wordt niet gespecificeerd in het decreet. Deze frequentie zal in het project, op een gemotiveerde wijze door de deskundige, voorgesteld worden.
- Een tussentijds rapport zal, ter goedkeuring van Leefmilieu Brussel, opgestuurd worden naar Leefmilieu Brussel indien blijkt dat op basis van de gegevens bekomen uit verschillende meet- en bemonsteringscampagnes, significante wijzigingen in de interventie maatregel nodig zijn: alternatieve technieken, uitbreiding van het aantal controlepeilbuizen na uitbreiding van de pluim ,.....

De inhoud van de eerste tussentijds rapport zal minimaal de informatie bevatten die opgenomen is in **tabel 6**.

Tabel 6 : Informatie die moet weergegeven worden in het eerste tussentijds rapport

Rubriek	Parameters en te meten hoeveelheden	Opmerkingen
Beschrijving van de beginsituatie, op het moment van de start van de behandeling	Verdeling van de concentraties aan verontreinigende stoffen en hun intermediaire afbraakproducten (in 3D) in de vaste en vloeibare fase van de bodem (eventueel in de gasfase), piezometrische stijghoogtes en isohypsen (stromingsrichting). Geochemische indicatoren van de afbraak : TOC, concentraties in elektron acceptoren : O ₂ , Nitraat, sulfaat, Fe(II), Mn(II), pH, Ec, T°, anorganische opgeloste koolstof. Geraamde duurtijd van de behandeling op basis van de bekomen gegevens.	Grafische voorstelling van de verspreiding van de verontreinigingspluim
Beschrijving van de opvolgingsmaatregelen (as buijt)	Beschrijving van de verschillende elementen van de maatregel : opvolgingspeilbuizen (aantal, ligging, beschrijving, diepte, filterstelling, kleistoppen, temperatuursonde), staalnamepunten van de bodem (ligging, diepte), eventuele staalnamepunten van de bodemlucht (aantal, ligging, beschrijving, diepte, filterstelling, kleistoppen, temperatuursonde,...)	Liggingplan
Evolutie van de parameters die gerapporteerd dienen te worden tijdens de eerste fase	Verdeling van de concentraties aan verontreinigende stoffen en hun intermediaire afbraakproducten (in 3D) + secundaire verontreiniging die ontstaan zijn. piezometrische stijghoogtes en isohypsen (stromingsrichting). Geochemische indicatoren van de afbraak : TOC, concentraties in elektron acceptoren : O ₂ , Nitraat, sulfaat, Fe(II), Mn(II), pH, Ec, T°, anorganische opgeloste koolstof.	Grafische voorstelling van de verspreiding van de verontreinigingspluim
Facultatieve parameters die gerapporteerd moeten worden	PCR test van het grondwater. Concentraties in het grondwater van H ₂ , acetaat en andere vluchtige organische zuren, chloride, nitriet, sulfiet, sulfide, etheen, ethaan, methaan, fenolindex, CO ₂	
Interpretatie van de resultaten	Simulatie van de toekomstige verspreiding van de pluim en risico niveau voor de bedreigde receptoren. Inschatting van de duurtijd van de behandeling. Analyse van de haalbaarheid van de behandeling door bewaakte natuurlijke afbraak.	Grafische voorstelling van de verspreiding van de verontreinigingspluim
Correctieve acties	Wijzigingen aan te brengen aan de opvolgingsmaatregelen. In het geval de natuurlijke afbraak onvoldoende blijkt te zijn (te lange duurtijd, risico voor de bedreigde receptoren) dient een meer actieve variant te worden voorgesteld voor de verdere behandeling	



11.2. Optimalisatie en correctieve maatregelen

Zoals elke methode van aanpak waarbij biologische processen in natuurlijke condities plaatsvinden een belangrijke rol spelen, is de efficiëntie van de bewaakte natuurlijke afbraak afhankelijk van een groot aantal factoren die een invloed kunnen hebben op de goed afloop ervan: fysico-chemische karakteristieken van de bodem en van het grondwater, heterogeniteit van de bodem, gemengde verontreinigingen die de biologische activiteit negatief kunnen beïnvloeden (bijvoorbeeld zware metalen, ...).

Correctieve maatregelen kunnen noodzakelijk zijn indien blijkt dat, ondanks de hoge graad aan beschikbare informatie bekomen uit voorgaande fases tijdens onderzoeken uitgevoerd op het terrein of in het laboratorium, de graad van onzekerheid over de haalbaarheid (technisch en economisch) van het proces door natuurlijke afbraak als te groot wordt beschouwd, of dat de afbraaksnelheid van de verontreinigende stoffen lager blijkt te zijn dan deze die verondersteld werd tijdens de opmaak van het behandelingsplan.

Vier types van problematische situaties kunnen regelmatig voorkomen.

De vergaarde informatie blijkt onvoldoende te zijn om een uitspraak te kunnen doen over de haalbaarheid (technisch en economisch) van de bewaakte natuurlijke afbraak. De aangereikte correctieve maatregelen kunnen de volgende zijn:

- Verdichting of uitbreiding van het netwerk aan controle peilbuizen
- Opgvolgen van bijkomende parameters die toelaten om de evolutie van de natuurlijke afbraak op te volgen of waardoor een simulatie van de uitbreiding van de verontreinigingspluim mogelijk is.

Stagnatie of accumulatie van intermediaire afbraakproducten die mogelijk meer mobiel of meer toxisch zijn door, bijvoorbeeld, de afwezigheid van de juiste bacteriën die in staat zijn om de laatste stappen van de afbraak te verwezenlijken. Dit kan eventueel nagegaan worden door het uitvoeren van een PCR test in het grondwater. De correctieve maatregelen die in overwegingen dienen te worden genomen zijn eerder actieve maatregelen:

- Combinatie met een techniek van gestimuleerde natuurlijke afbraak die toelaat om de condities in de ondergrond te wijzigen.
- Inenting, in de bodem, van microorganismen die in staat zijn om de afbraak tot op het eindstadium te verwezenlijken (CO₂, etheen, ethaan) na laboratoriumtesten en het bekomen van de nodige machtigingen. Deze microorganismen kunnen afgeleverd worden door een laboratorium die gegevens over hun karakteristieken en hun afbraakpotentieel aanleveren of ze kunnen aangemaakt worden door een ent (bodem of grondwater) afkomstig van een site waar volledige afbraak werd waargenomen.

Duurtijd van de natuurlijke afbraak is niet realistisch vanuit een economisch standpunt bekeken. De ingeschatte tijdsduur van de techniek om de doelstellingen te bereiken dient op basis van gegevens bekomen tijdens het vooronderzoek en/of opstartfase in die mate in de hoogte te worden herzien dat de termijnen voor het behalen van de doelstellingen niet realistisch worden in termen van bestemming en toegankelijkheid van het terrein, kosten voor de opvolging... De correctieve maatregelen impliceren steeds dat er meer actieve technieken nodig zijn om de kern en/of de pluim aan te pakken.

De afbraaksnelheid van de verontreinigende stoffen en/of intermediaire afbraakproducten is onvoldoende om de verspreiding van de verontreinigingspluim richting de geïdentificeerde potentieel bedreigde receptoren te vermijden (perceelsgrenzen, receptoren zoals woonzones,



beschermingszones voor grondwaterwinningen, groenzones, ...). De correctieve maatregelen impliceren steeds dat meer actieve maatregelen noodzakelijk zijn om de verspreiding van de pluim tegen te gaan of om de afbraaksnelheid van de verontreinigende stoffen te verhogen ofwel een combinatie van beiden.

12. Validatie methode en beslisschema voor stopzetting- voortzetting van de maatregel

De validatie methode heeft als doel om te vast te leggen dat de einddoelstellingen van de behandeling op een duurzame manier behaald werden, waardoor gesteld kan worden dat de behandeling beëindigd kan worden.

Deze maatregel bestaat uit het uitvoeren van een laatste meet- en bemonsteringscampagne van de geïmpacteerde bodem- en grondwaterlagen. Deze analysecampagne behelst een analyse van alle verontreinigende stoffen waarvoor een interventie nodig was, al hun intermediaire toxische afbraakproducten en andere mogelijke verontreinigende stoffen die verondersteld mogelijk te zijn ontstaan door aanwezigheid van de verontreiniging (As,...).

De concentraties van deze laatste dienen, indien aanwezig, vergeleken te worden met de saneringsnormen en interventienormen zoals gedefinieerd in de [BBHR van 29/03/2018](#). Verschillende mogelijkheden kunnen zich voordoen :

- De stijging van de concentraties is tijdelijk: er dienen geen acties te worden ondernomen
- De stijging van de concentraties is permanent de concentraties zijn $> IN$. Een actieve behandeling dient te worden ondernomen.
- De stijging van de concentraties is permanent en de concentraties zijn $< NI$ terwijl de stijging van de concentraties \leq dan $1 \times SN$: er dienen geen acties te worden ondernomen
- De stijging van de concentraties is permanent en de concentraties zijn $< IN$ terwijl de stijging van de concentraties $>$ dan $1 \times SN$: een actieve behandeling van de verontreiniging zal potentieel verplicht worden (onder voorbehoud dat rekening wordt gehouden met het BATNEEC principe)

In het geval dat de doelstellingen werden bereikt voor een bepaalde verontreinigingsvlek, dienen twee opeenvolgende bemonsteringscampagnes te worden uitgevoerd, respectievelijk na 3 en na 6 maanden om de duurzaamheid van de behaalde resultaten na te kunnen gaan.

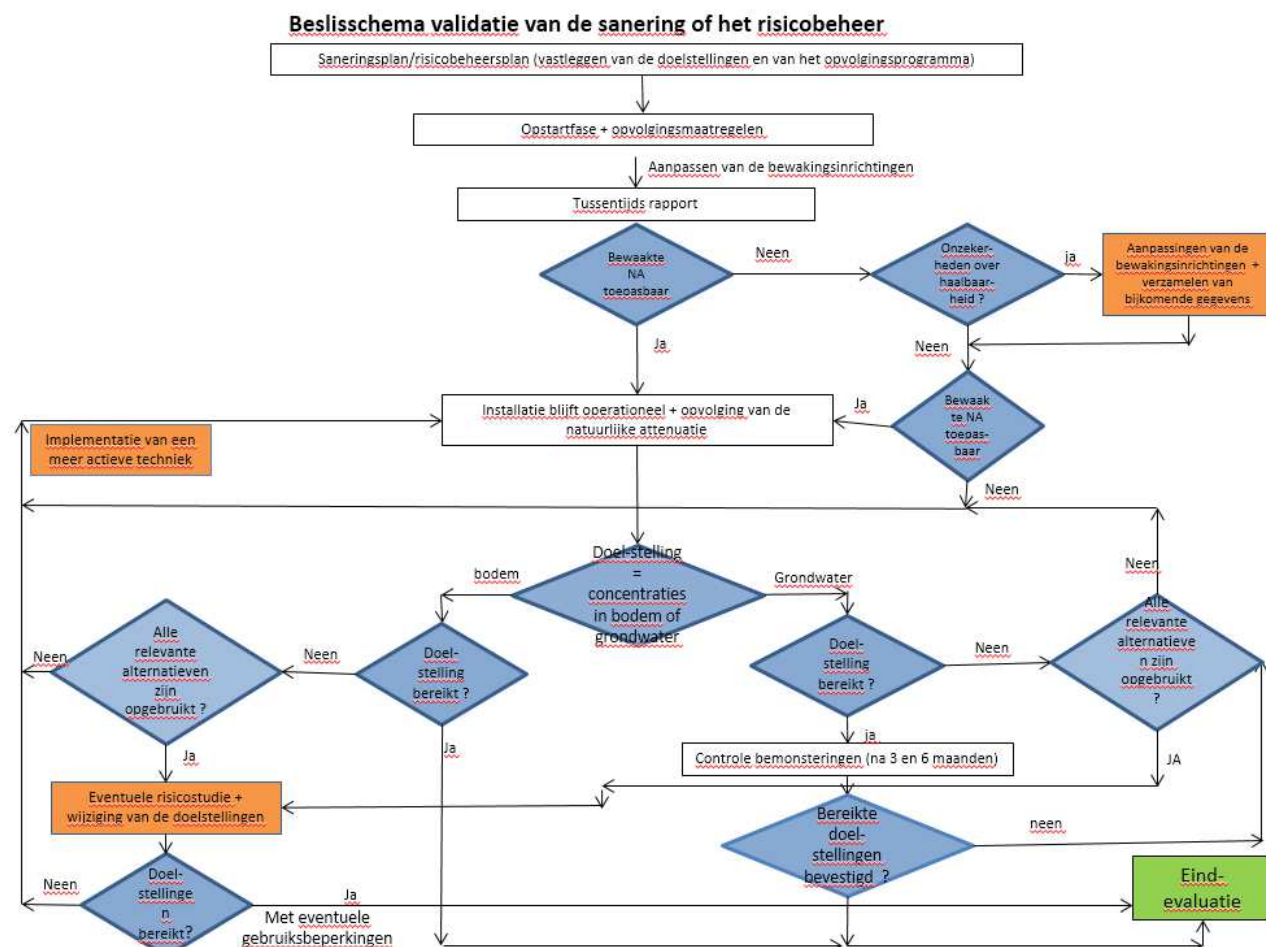
In het geval dat de concentraties in evenwicht onder de doelstellingen blijven, kan de behandeling als afgerond beschouwd worden. De opvolgingsmaatregelen kunnen dan ontmanteld worden (tenzij een validatie op langere termijn dient te worden gerealiseerd), en er kan een evalueerapport worden opgesteld.

In het geval dat er geen stabiele eindtoestand aangetoond kan worden (doelstellingen bereikt), dienen de opvolgingsmaatregelen van kracht te blijven en dienen eventueel ook bijkomende correctieve maatregelen genomen te worden: overgaan tot meer actieve maatregelen zoals gestimuleerde natuurlijke afbraak door infiltratie/injectie van componenten die de condities kunnen wijzigen zoals de pH, de T° , de beschikbaarheid van elektron donoren of acceptoren; de injectie van surfactanten; een ontgraving van de kern...

Indien tijdens de volgende validatie campagnes, de doelstellingen nog steeds niet bereikt worden, kan een aanpassing van de doelstellingen door de deskundige voorgesteld worden in combinatie met een risico studie (met eventueel een voorstel voor gebruiksbepalingen). Na goedkeuring van dit aangepast voorstel door Leefmilieu Brussel, zijn er twee mogelijkheden : op basis van de nieuwe doelstellingen kan de maatregel als afgerond beschouwd worden of in het andere geval dienen de verrichtingen opnieuw opgestart worden al dan niet samen met bijkomende correctieve maatregelen.



Het beslisschema tijdens de validatiefase ziet er als volgt uit :



13. Mogelijke opvolgingsmaatregelen op lange termijn : installatie en type maatregelen

Na aangeven van de deskundige of op vraag van Leefmilieu Brussel kunnen opvolgingsmaatregelen (validatie op lange termijn of na beheersing) gevraagd worden aan de behandelingsplichtige na afronding van de sanering of het risicobeheer. Deze maatregelen hebben als doel de resultaten van de werken te bevestigen en na te gaan of het behalen van de doelstellingen van blijvende aard zijn. Deze opvolgingsmaatregelen op lange termijn zijn gerechtvaardigd van zodra er een onzekerheid bestaat in de bekomen resultaten : grote concentratie wijzigingen in de controlepeilbuizen, grote wijzigingen in stijghoogtes, concentraties die stabiel zijn maar die dicht bij de doelstellingen aanleunen, specifieke ongunstige omstandigheden....

Bij de maatregelen waarbij de doelstellingen gerelateerd zijn aan de kwaliteit van het grondwater, kan deze opvolging op lange termijn plaatsvinden door de opvolging van een aantal peilbuizen ter hoogte van de verontreinigde zone en stroomafwaarts ervan.

In tegenstelling tot de maatregelen genomen tijdens de opvolgings- of validatiefase, zullen in deze fase niet alle peilbuizen bemonsterd worden voor analyse maar slechts een aantal representatieve peilbuizen die toelaten de kwaliteit op te volgen in de verontreinigde zone en stroomafwaarts ervan.

In ieder geval, dient één of meerdere peilbuizen die stroomopwaarts gelegen is ten opzichte van de geïdentificeerde potentieel bedreigde receptoren te worden opgenomen in het opvolgingsplan voor bemonstering en analyse.

De parameters die opgevolgd zullen worden zijn :

- De residuele concentraties aan verontreinigende stoffen in het grondwater (verontreinigende stoffen waardoor de maatregelen opgestart werden worden geanalyseerd + intermediaire afbraakproducten die een mogelijke negatieve impact om mens en leefmilieu hebben, metalen en andere mogelijke verontreinigende stoffen die gevoelig zijn voor veranderingen in redox condities in de bodem).
- De parameters die een invloed hebben op het verdere verloop van de natuurlijke afbraak van de verontreiniging: pH, O₂, CO₂, TOC, nitraat, sulfaat, nutriënten, Fe(II), Mn(II), ... afhankelijk van de processen die verantwoordelijke zijn voor de natuurlijke afbraak.

Voor de bemonstering van stalen in het grondwater, is het aangewezen om de Code van goede praktijk nr. 3 van Leefmilieu Brussel « Staalname van bodem, grondwater, sedimenten en bodemlucht ... » te raadplegen. Voor het analyseren van stalen, is het noodzakelijk dat dit gebeurt conform de Code van goede praktijk nr. 4 « Code van goede praktijk voor analysemethoden ... », van Leefmilieu Brussel.

De duurtijd en de frequentie van de opvolgingsmaatregelen op lange termijn zijn afhankelijk van de situatie: de graad van onzekerheid en het niveau van de residuele concentraties, type van aanwezige verontreinigende stoffen en de ernst van het risico dat hun aanwezigheid teweeg brengt, aanwezigheid en afstand tot potentieel bedreigde receptoren, snelheid van verspreiding van de verontreinigende stoffen.

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 meet- en bemonsteringscampagnes en het overmaken van de rapporten aan Leefmilieu Brussel gebeurt op jaarlijkse basis of (minder gebruikelijk) na elke opvolgingsronde.

De gemeten concentraties worden vergeleken met de doelstellingen. De interpretatie van de van de waarden worden uitgevoerd als volgt :

- Alle concentraties zijn systematisch lager dan de doelstellingen : de bekomen resultaten zijn bevestigd en het dossier kan afgesloten worden.
- De concentraties van een aantal verontreinigende stoffen en ter hoogte van de bemonsteringspunten zijn er fluctuaties doorheen de tijd waardoor er soms tijdelijk lichte overschrijdingen van de doelstellingen worden waargenomen: verlenging van de validatiefase op lange termijn, indien er geen dalende trend wordt waargenomen.
- De concentraties aan verontreinigende stoffen overschrijden de doelstellingen regelmatig, zelfs na verlenging van de opvolgingsmaatregel of de concentraties aan verontreinigende stoffen overschrijden in belangrijke mate en op systematische wijze de doelstellingen en/of er wordt (terug) vrij fase aangetroffen. Indien deze situatie zich voordoet zijn er drie mogelijke scenario's :
 - De verontreiniging is van een andere aard dan deze die werd beschreven tijdens het gedetailleerd onderzoek : nieuwe actieve bron, nieuwe omstandigheden, nieuwe verontreiniging, ... Een nieuw gedetailleerd onderzoek is noodzakelijk, welke aanleiding zal geven tot een nieuwe behandeling, waarbij nagegaan wordt of het over eenzelfde of een andere plichtige gaat.
 - Aanvullende verrichtingen zijn noodzakelijk om de eerder gedefinieerde doelstellingen te bereiken.
 - Het is niet mogelijk om de doelstellingen op duurzame manier binnen een redelijke termijn en met een realistisch budget te behalen : de doelstellingen worden gewijzigd (interventienorm of waarden die bepaald worden op basis van een risico studie)



14. Aanbevelingen op het vlak van stabiliteit en veiligheid

De enige risico's waarmee rekening dient te worden gehouden zijn deze gelinkt aan het niet behalen van de doelstellingen doordat de NA te traag evolueert alsook de risico's van een mogelijke impact op receptoren doordat de NA onvoldoende efficiënt is om verspreiding van de verontreinigingspluim tegen te gaan.

15. Bibliografie

De referentiedocumenten die gebruikt werden voor de opmaak van dit document zijn de volgende:

- Code van goede praktijk : Natuurlijke afbraak, OVAM, Januari 2003
- Natural Attenuation of MTBE in the Subsurface under Methanogenic Conditions, John T. Wilson et al., EPA/600/R-00/006, January 2000
- Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in Groundwater, M.A. Carey et al., Environment Agency 2000, R&D Publication 1995
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001.
- Standaardprocedure Bodemsaneringwerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazorg, versie oktober 2011, OVAM

