

SKB

De Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem draagt zorg voor kennisontwikkeling en kennisoverdracht die eigenaren en beheerders van percelen en terreinen nodig hebben om de kwaliteit van de bodem op een effectieve wijze in overeenstemming te brengen of te houden met het beoogde gebruik. SKB ondersteunt de ontwikkeling en demonstratie van nieuwe vormen van samenwerking, nieuwe aanpakken en technieken voor het verbeteren van de afstemming tussen bodemgebruik en bodemkwaliteit en bevordert een brede acceptatie hiervan in de maatschappij.

SKB Cahiers

SKB Cahiers zijn cahiers waarin op een beknopte en bondige wijze belangrijke onderwerpen over de bodem aan de orde komen. De SKB Cahiers zijn gericht op een breed publiek en leesbaar en toegankelijk geschreven. Op basis van toepassingsgerichte praktijkvoorbeelden moeten de lezers met het onderwerp in hun eigen beroepspraktijk aan de slag kunnen.

De titels die in deze reeks zijn verschenen, kunt u vinden op www.skbodem.nl. Hier kunt u deze ook bestellen.



**Stichting
Kennisontwikkeling
Kennisoverdracht
Bodem**

Postbus 420
2800 AK Gouda
Tel. (0182) 54 06 90
Fax (0182) 54 06 91
programmabureau@skbodem.nl
www.skbodem.nl

SKB Cahier

In-situ gestimuleerde biologische afbraak: een natuurlijke oplossing!

In-situ gestimuleerde biologische afbraak:

een natuurlijke oplossing!



Keuze 1
 Aromaten en lagere PAK (2 of 3 rings) kunnen zowel aëroob als anaëroob worden afgebroken. Vaak zijn deze verontreinigingen gerelateerd aan een verontreiniging met minerale olie. In dat geval ligt aërobe stimulatie voor de hand. Indien er geen relatie is met minerale olie hangt de keuze af van de gewenste saneringsduur, ruimtelijke inpasbaarheid en saneringskosten. Aërobe stimulatie verloopt sneller, maar brengt meer kosten met zich mee en zuurstof heeft in minder goed doorlatende bodems een slechtere verspreiding.

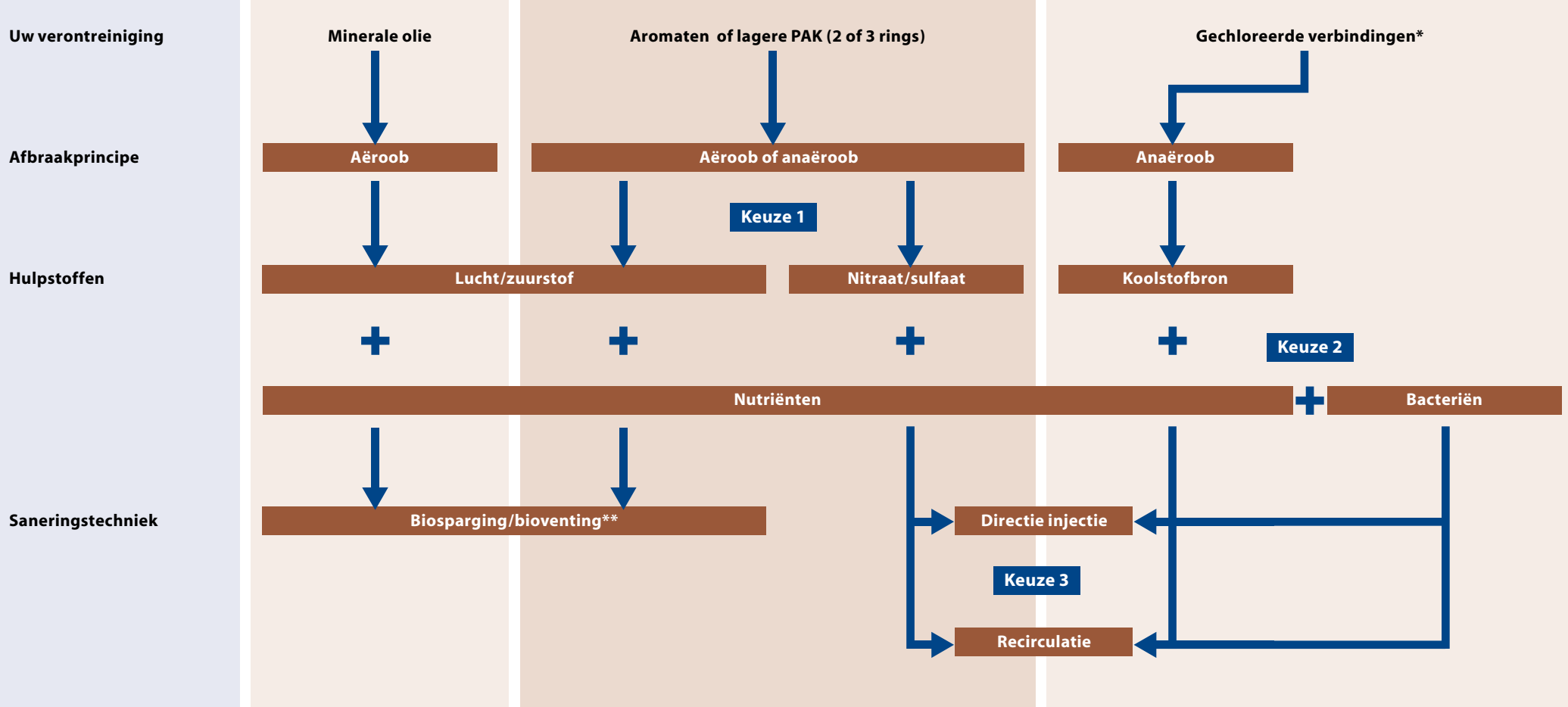
Keuze 2
 Gestimuleerde afbraak vindt alleen plaats in aanwezigheid van de juiste bacteriën. Als de bacteriën niet in voldoende mate aanwezig zijn dienen deze ook aan de bodem te worden toegevoegd via beënting of bioaugmentatie. Ook al zijn in de bodem de goede bacteriën van nature aanwezig, door het doseren van een reeds actieve populatie verloopt de afbraak in veel gevallen sneller.

Keuze 3
 Dosering van nitraat/sulfaat, koolstofbron, nutriënten en eventueel bacteriën kan door middel van directe injectie of recirculatie. De meest geschikte toepassingsvorm is van vier belangrijke factoren afhankelijk:

Factor	Directe injectie	Recirculatie
1. Ruimte	Onbebouwd	Bebouwd
2. Diepte	max. 15 à 20 m -mv	Onbeperkt
3. Doorlatendheid	Alle bodemtypes	Zandige bodems (> 1 à 5 m/dag)
4. Pluimomvang	Kleinschalig (ca. < 5.000 m ²)	Grootschalig (ca. > 5.000 m ²)

In-situ gestimuleerde biologische afbraak (gestimuleerde afbraak) kan gebruikt worden voor het saneren van verschillende verontreinigingen. Minerale olie, aromaten, lage PAK's en gechloreerde verbindingen zijn de meest voorkomende verontreinigingen die via gestimuleerde afbraak worden gesaneerd. Onderstaand schema geeft aan op welke wijze de

biologische afbraak van uw verontreiniging het beste gestimuleerd kan worden. Op drie punten in het schema wordt deze keuze bepaald door meerdere factoren. Deze keuzepunten zijn daarom tekstueel toegelicht. Een nadere en gedetailleerdere uitleg over de afbraakprocessen, hulpstoffen en saneringstechnieken is opgenomen in dit cahier.



** Bij bodems met een slechte doorlatendheid is biosparging/bioventing geen optie vanwege de beperkte verspreiding van lucht/zuurstof. Vanaf een doorlatendheid > 0,5 meter per dag kan deze techniek zonder meer goed worden toegepast. Bij een lage verontreinigingsvracht kunnen zuurstofleverende substraten of diffusiesystemen met pure zuurstof gebruikt worden als alternatief voor biosparging.

* Dit geldt voor verontreinigingen met PER, TRI en/of TCA. Bij een verontreiniging met alleen lager gechloreerde afbraakproducten komt aërobe gestimuleerde afbraak ook in aanmerking.

Doen en laten in de bodem

In-situ gestimuleerde biologische afbraak:

een natuurlijke oplossing!



Stichting
Kennisontwikkeling
Kennisoverdracht
Bodem

Inhoud

Voorwoord en leeswijzer	6	3.4 Anaërobe gestimuleerde saneringstechnieken	41
1. Wat is in-situ gestimuleerde biologische afbraak?	9	3.4.1 Dosering van elektronendonoren (VOCI)	42
1.1 Het basisprincipe van biologische afbraak	9	3.4.2 Nitraat en sulfaatdosering (BTEXN)	47
1.2 Randvoorwaarden voor biologische afbraak	12	3.5 Combinatie met andere saneringstechnieken	48
1.3 Afbraaksnelheid	15	4. Vooronderzoek en inschatten van de haalbaarheid	53
1.4 Technieken en uitvoeringsvormen voor gestimuleerde afbraak	16	4.1 Grondwaterkarakterisatie	53
2. Biologische afbraak van specifieke verontreinigingen	19	4.2 Afbraaktesten	55
2.1 Minerale olie	19	4.3 Veldmetingen en -proeven	58
2.2 Aromaten	20	4.3.1 Doorlatendheidstest	58
2.3 Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK)	22	4.3.2 Verspreidingsproef	59
2.4 Gechloreerde verbindingen	22	5. Samengevat	62
2.5 Gestimuleerde afbraak in Nederland	25	Bijlagen	65
3. Technieken voor gestimuleerde afbraak	29	Voorbeeldprojecten	65
3.1 Werken met hulpstoffen	29	Literatuur en websites	69
3.1.1 Hoeveelheid en soorten hulpstoffen	29		
3.1.2 Technische principes voor het doseren van hulpstoffen	31		
3.2 Monitoren van het saneringsverloop	35		
3.2.1 Algemeen	35		
3.2.2 Monitoring van het saneringsverloop bij aërobe technieken	36		
3.2.3 Monitoring van het saneringsverloop bij anaërobe technieken	37		
3.3 Aëroob gestimuleerde saneringstechnieken	38		
3.3.1 Bioventing en biosparging	38		
3.3.2 Dosering van zuurstofleverende hulpstoffen of pure zuurstof	41		

Voorwoord en leeswijzer

Via biologische afbraak kunnen bacteriën bodemverontreinigingen efficiënt verwijderen. Als de omstandigheden voor de bacteriën in de bodem gunstig zijn vindt afbraak van nature plaats. Daar waar de omstandigheden ongunstig zijn, kan de biologische afbraak worden gestimuleerd door het toevoegen van hulpstoffen en/of specifieke bacteriën aan de bodem. We spreken dan van (in-situ) gestimuleerde biologische afbraak. Gestimuleerde biologische afbraak is bij uitstek geschikt voor het verkrijgen van een schone en veilige bodem.

Gestimuleerde biologische afbraak is een kosteneffectieve, robuuste en duurzame methode voor de sanering van diverse bodemverontreinigingen:

- De kosten bedragen globaal 5 à 25 euro per kubieke meter bodemvolume.
- Het saneringsrendement of mate van vrachtverwijdering is hoog.
- De saneringsduur varieert van maanden tot enkele jaren.
- Toepassing bij intensieve bebouwing en/of infrastructuur is goed mogelijk.
- Energieverbruik en CO₂-productie is ten opzichte van andere saneringstechnieken laag.

Inmiddels is in Nederland vooral veel ervaring opgedaan met de gestimuleerde afbraak van aromaten (BTEX), lichte polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's zoals naftaleen en fenanthreen), minerale olie en gechloreerde organische verbindingen (VOCl). In dit cahier worden daarom voor deze bodemverontreinigingen het afbraakproces en de meest geschikte biologische technieken beschreven.

Naast de verontreinigingssituatie zijn bodemcondities en bodemopbouw bepalend voor de inzet van beschikbare technieken. In dit cahier is bij de beschrijving van de technieken daarom ook aandacht besteed aan deze aspecten.

Dit cahier behandelt in feite de basiskennis die nodig is om een onderbouwde keuze te kunnen maken voor gestimuleerde biologische afbraak en vervolgens de haalbaarheid, uitvoeringsvormen en saneringsvoortgang te kunnen beoordelen. Hoofdstuk 1 geeft een algemene beschrijving van wat we verstaan onder gestimuleerde biologische afbraak. De achterliggende biologische afbraakprocessen zijn in hoofdstuk 2 behandeld. Hoofdstuk 3 gaat in op de meest geschikte technieken en in hoofdstuk 4 wordt toegelicht hoe de haalbaarheid van gestimuleerde afbraak als saneringsvariant kan worden vastgesteld met behulp van vooronderzoek.

Voor meer informatie over natuurlijke afbraak wordt het cahier 'Natuurlijke afbraak, het is niet niks!' aanbevolen. Deze editie is in 2007 in opdracht van SKB uitgebracht.

De auteurs wensen u veel inspiratie toe en hopen dat u met dit cahier voldoende kennis opdoet om gestimuleerde biologische afbraak op een goede manier toe te kunnen passen.

1



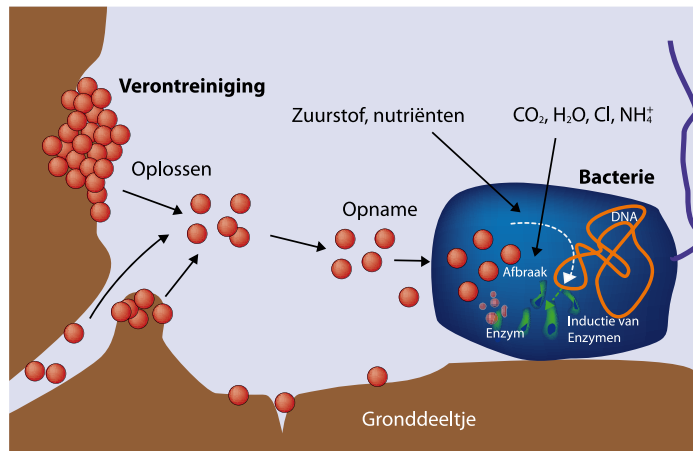
Wat is in-situ gestimuleerde biologische afbraak?

1.1 Het basisprincipe van biologische afbraak

Door het afbreken van verontreiniging krijgen bacteriën energie. Het principe is vergelijkbaar met onze spijsvertering en ademhaling. Via ons voedsel krijgen wij de benodigde voedingsstoffen binnen. De zuurstof die we inademen zorgt ervoor dat we de voedingsstoffen kunnen omzetten in energie om te leven. Zo werkt het ook bij bacteriën. Ook zij kunnen alleen leven als ze voldoende voedingsstoffen binnenkrijgen en kunnen ademen.

Bacteriën kunnen allerlei verbindingen gebruiken als voedsel. We noemen dit de elektronendonor. Daarnaast kunnen bacteriën met verschillende verbindingen ademen. Dit zijn de elektronenacceptoren. Bij gestimuleerde biologische afbraak bestaat de elektronendonor of de elektronenacceptor uit een verontreiniging.

Voor biologische afbraak gebruiken de bacteriën specifieke enzymen, die een reactie tussen een elektronendonor en een elektronenacceptor op gang helpen (een redoxreactie). Bij deze redoxreactie komt energie vrij die voor allerlei processen in de bacteriën wordt gebruikt. De aanwezigheid van zowel een elektronendonor als elektronenacceptor is essentieel. Indien een van beide ontbreekt vindt er geen biologische afbraak plaats.



Figuur 1: Conceptueel model van biologische afbraakprocessen in de bodem.

Specifieke elektronenacceptoren die in de bodem voorkomen zijn zuurstof, nitraat, driewaardig ijzer, sulfaat en koolstofdioxide (tabel 1). Zij worden via een redoxreactie omgezet naar respectievelijk koolstofdioxide en water, stikstofgas, tweewaardig ijzer, sulfide en methaan. De aan- of afwezigheid van elektronenacceptoren bepaalt voor een groot deel welke reacties wel en niet kunnen plaatsvinden.

De elektronenacceptoren in tabel 1 zijn weergegeven in volgorde van afnemende energieopbrengst. In principe worden in de bodem eerst de verbindingen gebruikt die het meeste energie opleveren. Wanneer zuurstof aanwezig is overheersen de aërobe processen, ongeacht welke andere elektronenacceptoren verder nog aanwezig zijn. In afwezigheid van zuurstof en aanwezigheid van nitraat overheersen nitraatreducerende condities. Methanogenese is energetisch het minst gunstige proces en treedt pas op als zuurstof, nitraat, ijzer(III) en sulfaat niet meer beschikbaar zijn.

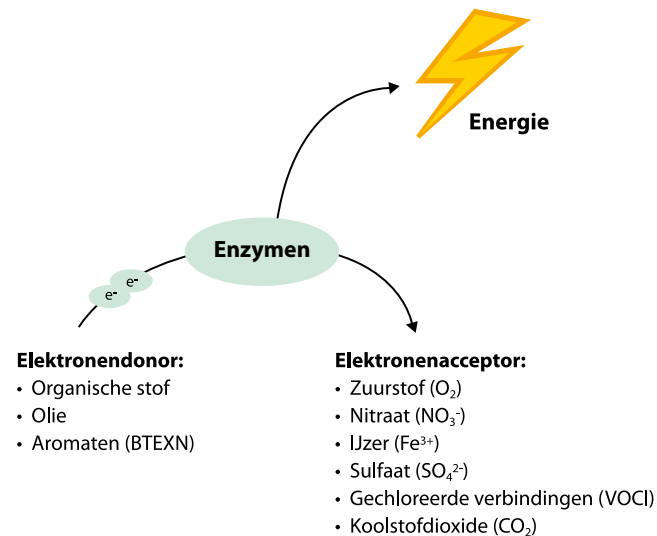
Tabel 1

Elektronenacceptoren in de bodem bij afnemende energieopbrengst

	Proces	Elektronenacceptor	Product
Aëroob	Aërobe afbraak	O ₂ (zuurstof)	CO ₂ en H ₂ O (koolstofdioxide en water)
Anaëroob	Nitraatreductie	NO ₃ ⁻ (nitraat)	N ₂ (stikstof)
	Ijzerreductie	Fe (III) (driewaardig ijzer)	Fe (II) tweewaardig ijzer)
	Sulfaatreductie	SO ₄ ²⁻ (sulfaat)	S ²⁻ (sulfide)
	Methanogenese	CO ₂ (koolstofdioxide)	CH ₄ (methaan)

De meeste organische verontreinigingen (zoals minerale olie en aromaten) dienen als elektronendonor en worden afgebroken via oxidatieve processen. Hier is dus een geschikte elektronenacceptor voor benodigd.

Belangrijke uitzondering hierop is een aantal gechlloreerde verbindingen. Dit zijn verbindingen die gebruikt kunnen worden als elektronenacceptor en die omgezet worden via reductieve processen. Voor deze afbraakprocessen is dus een geschikte elektronendonor benodigd. Het proces waarbij gechlloreerde verbindingen gebruikt worden als elektronenacceptor staat energetisch tussen sulfaatreductie en methanogenese in. Volledige reductieve dechlorering treedt pas op onder anaërobe condities waarbij nitraat, ijzer(III) of sulfaat niet meer beschikbaar zijn.



Figuur 2: Overdracht van elektronen van elektronendonor naar elektronenacceptor tijdens biologische afbraakprocessen.

1.2 Randvoorwaarden voor biologische afbraak

Gestimuleerde afbraak is gericht op het opheffen van limitaties die ontstaan door ongunstige milieucondities, afwezigheid of tekort aan geschikte bacteriën of door een beperkte beschikbaarheid van verontreinigingen voor de bacteriën (biobeschikbaarheid). In deze paragraaf wordt ingegaan op de algemene randvoorwaarden die een rol spelen bij biologische afbraak. Inzicht hierin is noodzakelijk om het optreden van de limitaties te kunnen begrijpen.

Milieucondities

Bacteriën functioneren alleen goed als er voldoende water (alleen opgeloste stoffen kunnen door bacteriën opgenomen worden), een geschikte combinatie van elektronendonor en elektronenacceptor, nutriënten (stikstof- en fosfaatmineralen) en sporenelementen beschikbaar zijn. Daarnaast mogen er geen hoge concentraties aan toxische verbindingen voorkomen. In het algemeen vindt bij een pH van 6 à 8 een optimale afbraak plaats.

De temperatuur in de bodem ligt tussen de 10 °C en 15 °C, terwijl de optimale temperatuur voor biologische afbraak tussen de 30 °C en 38 °C ligt. Dit betekent dat afbraak onder de in de bodem heersende temperatuur wel verloopt maar minder snel dan maximaal mogelijk is.

Het optreden van biologische afbraak is afhankelijk van de aanwezige combinatie van elektronendonor en elektronenacceptor. Zo is een tekort aan zuurstof vaak een limiterende factor voor de afbraak van minerale olie en vindt er geen volledige afbraak van VOCl plaats als er nog teveel zuurstof, nitraat, ijzer (III) en/of sulfaat in het grondwater beschikbaar is.

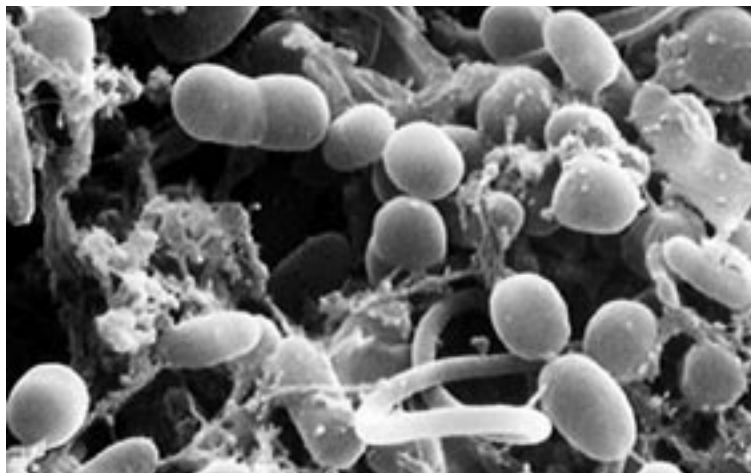
De balans tussen de hoeveelheid aanwezige elektronenacceptoren en -donoren is hierbij ook van belang. Deze balans is bepalend voor de continuering van de afbraakprocessen. Is er verhoudingsgewijs van één van beide teveel dan stagneert op termijn het afbraakproces. Daarom is het voor de inzet van biologische afbraak als saneringsvariant noodzakelijk dat er voldoende elektronendonor of -acceptor beschikbaar is om de verontreiniging in grond en grondwater af te breken. De verontreiniging moet hierin de beperkende factor zijn.

Aanwezigheid van geschikte bacteriën

Voor de biologische afbraak van verontreinigingen dienen de bacteriën die verantwoordelijk zijn voor de afbraak ook daadwerkelijk aanwezig te zijn. Verschillende bacteriën of groepen van bacteriën kunnen verschillende verontreinigingen afbreken.

Bacteriën die minerale olie en aromaten kunnen afbreken komen van nature wijd verspreid voor in de bodem. Bij deze verontreinigingen is het toedienen van bacteriën daarom niet nodig.

Voor gechloreerde verbindingen is toediening soms wel noodzakelijk. Tot op heden is er namelijk slechts één groep van bacteriën geïdentificeerd (*Dehalococcoides spp.*) die in staat is om gechloreerde verbindingen volledig af te breken.



Figuur 3: *Dehalococcoides Ethenogenes*, één van de bacteriën uit de groep ‘*Dehalococcoides spp.*’

Dehalococcoides spp.

In bodempakketten waar van nature gunstige omstandigheden voor de reductieve afbraak van gechloreerde verbindingen heersen (zoals klei- en veenlagen) hebben deze bacteriën zich vaak in de loop van de tijd in de verontreinigde zone ontwikkeld en zijn dan al aanwezig.

In zandige goed doorlatende bodempakketten waar de omstandigheden van nature overwegend ongunstig zijn is *Dehalococcoides spp.* slechts lokaal of niet in de bodem aanwezig. In dat geval kan overwogen worden om naast een elektronendonor ook bacteriën toe te voegen (bio-augmentatie) om de afbraak snel op gang te krijgen.

Biobeschikbaarheid

Om verontreinigingen te kunnen afbreken is het noodzakelijk dat deze beschikbaar zijn voor de bacteriën. Hiervoor moeten de verontreinigingen opgelost zijn in het grondwater.

Over het algemeen zijn goed oplosbare verontreinigingen in bodems met een laag organische stofpercentage in voldoende mate beschikbaar voor de bacteriën. Naarmate een verontreiniging sterker aan de bodem bindt en/of de bodem meer organische stof bevat, is deze lastiger beschikbaar. Dit geldt in het bijzonder voor minerale olie en PAK's. Ook verontreinigingen die in pure vorm voorkomen (puur product) zijn niet beschikbaar voor biologische afbraak.

De afbraaksnelheid van minder goed oplosbare verbindingen wordt vooral bepaald door de snelheid waarmee de verontreiniging vrijkomt vanuit de vaste fase van de bodem (desorptie) of oplost vanuit een puur product fase (drijf laag of zak laag).

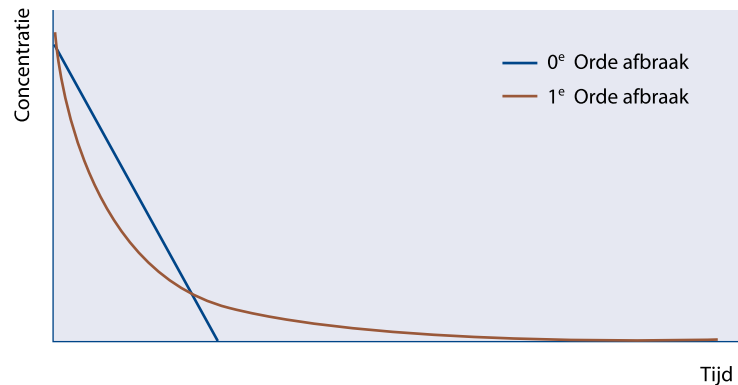
Aangezien bij biologische afbraak de opgeloste fractie van de verontreiniging snel wordt afgebroken ontstaat er een groter concentratieverschil tussen verontreiniging in de grond of in puur product en het grondwater. Hierdoor neemt de snelheid van desorptie en oplossen toe.

1.3 Afbraaksnelheid

Bij beschikbare verontreinigingen is de snelheid waarmee de afbraak plaatsvindt bepalend voor de saneringsduur. Hoe hoger de afbraaksnelheid, hoe sneller de verontreiniging is gesaneerd.

De afbraaksnelheid kan het beste met behulp van de Michaelis-Menten vergelijking worden beschreven. Er kan globaal onderscheid worden gemaakt in twee typen reacties, de nulde orde afbraak reacties en de eerste orde afbraak reacties (figuur 4).

De snelheid van een nulde orde afbraak reactie is onafhankelijk van de concentratie van het substraat (de verontreiniging) en wordt vaak gebruikt bij het inschatten van de saneringsduur van aërobe afbraak van minerale olie. De snelheid van een eerste orde afbraak reactie is wel afhankelijk van de concentratie en wordt gebruikt bij het beschrijven van de anaërobe afbraak van BTEX en gechloreerde verbindingen.



Figuur 4: Concentratieverloop bij nulde orde en eerste orde afbraak.

Voor het bepalen van de afbraaksnelheid is een aantal meetmethoden ontwikkeld die een goede indicatie geven van de daadwerkelijke afbraaksnelheid. In de praktijk blijft het echter lastig een goede inschatting te maken van de daadwerkelijke afbraaksnelheid. Mogelijke hulpmiddelen hierbij zijn toegelicht in hoofdstuk 4.

1.4 Technieken en uitvoeringsvormen voor gestimuleerde afbraak

Er is een breed scala aan uitvoeringsvormen beschikbaar, waarbij de saneringsduur kan variëren van minder dan één jaar tot meer dan tien jaar. Welke uitvoeringsvorm van gestimuleerde afbraak geschikt is, is onder andere afhankelijk van de eigenschappen van de verontreiniging en de bodem, de condities waaronder de verontreiniging afbreekbaar is, de bebouwingsdichtheid van de locatie en de tijd die voor de sanering beschikbaar is.

In de praktijk wordt een aantal technieken voor gestimuleerde afbraak regelmatig toegepast. Er wordt onderscheid gemaakt in aërobe en anaërobe technieken:

- Bij aërobe technieken worden (pers)lucht, pure zuurstof of zuurstofleverende hulpstoffen aan de bodem toegevoegd als elektronenacceptor. Aërobe technieken worden gebruikt voor de sanering

van minerale olie, BTEX en lichtere PAK. Een veelvoorkomende saneringstechniek die wordt gebruikt voor de aërobe gestimuleerde afbraak van minerale olie, BTEX en/of PAK is biosparging (verzadigde zone) of bioventing (onverzadigde zone). In hoofdstuk 3 is deze techniek nader toegelicht.

- Bij anaërobe technieken wordt een koolstofbron als elektronendonor of nitraat/sulfaat als elektronenacceptor aan de bodem toegevoegd. Nitraat en sulfaat dosering wordt toegepast bij de sanering van aromaten. Bij de gestimuleerde biologische sanering van gechlororeerde verbindingen wordt gebruik gemaakt van dosering van een elektronendonor. Als de dechlorerende bacteriën van nature niet in de bodem aanwezig zijn kunnen deze ook worden toegevoegd (bioaugmentatie).

Nutriëntendosering (toediening van stikstof- en fosfaatmineralen) kan noodzakelijk zijn om optimale omstandigheden voor afbraak te creëren. Dosering van hulpstoffen (eventueel in combinatie met bacteriën) wordt toegepast door middel van directe injectie of via een recirculatiesysteem. Beide technieken zijn in hoofdstuk 3 uitgewerkt.

Afbraak kan worden versneld door de afbraak te combineren met bodemverwarming. Een techniek die hier vaak voor wordt gebruikt is electro(bio)reclamatie (zie hoofdstuk 3).

Naast het onderscheid tussen aërobe en anaërobe technieken kan er ook onderscheid worden gemaakt tussen drie technische uitvoeringsvormen voor de toediening van hulpstoffen en/of bacteriën:

- Directe injectie, waarbij toediening onder verhoogde druk plaatsvindt via injectielansen.
- Recirculatie, waarbij toediening plaatsvindt via een grondwater recirculatie systeem met onttrekkings- en infiltratiefilters of horizontale drains. Het systeem voorziet het onttrokken grondwater van deze hulpstoffen en/of bacteriën, waarna het verrijkte water weer wordt geïnfiltrerd.
- Infiltratie, waarbij toediening plaatsvindt door dosering via een horizontale drain of verticale filters.

2



Biologische afbraak van specifieke verontreinigingen

Dit hoofdstuk geeft een korte beschrijving van de gestimuleerde aërobe en anaërobe afbraak van een aantal veelvoorkomende organische verontreinigingen, zijnde: minerale olie, aromaten, PAK en gechlloreerde verbindingen. Per verontreiniging zijn de afbraakmogelijkheden beschreven. Daarbij zijn de mogelijke saneringstechnieken kort toegelicht. In het volgende hoofdstuk zijn deze technieken verder uitgewerkt.

2.1 Minerale olie

Minerale olie is een verzamelnaam voor een mengsel van veel verschillende stoffen. Deze stoffen bestaan met name uit koolwaterstofverbindingen. Voorbeelden hiervan zijn onder andere alkanen (ketens), aromatische koolwaterstoffen en polycyclische aromatische koolwaterstoffen (ringstructuren). Afhankelijk van het product zijn deze groepen in meer of mindere mate aanwezig.

Aërobe afbraak

Minerale olie, en dan met name de alkanenfractie, wordt alleen onder zuurstofrijke condities (aëroob) afgebroken. In aanwezigheid van zuurstof en nutriënten treedt een relatief snelle omzetting van minerale olie op tot koolstofdioxide en water.

Vaak is er wel sprake van een restverontreiniging omdat de zwaardere fracties in minerale olieverontreinigingen moeilijker afbreekbaar zijn en niet altijd even goed beschikbaar zijn voor de bacteriën. Aangezien de zwaardere fracties sterk retarderen en een zeer lage wateroplosbaarheid en dampspanning hebben leidt deze restverontreiniging vaak tot een risicoloze situatie. Daarmee kan er na gestimuleerde afbraak sprake zijn van een immobiele en stabiele restverontreiniging die voldoet aan de uitgangspunten van het bodemsaneringsbeleid, zelfs wanneer bijvoorbeeld interventiewaarden worden overschreden.

Aërobe saneringstechnieken voor minerale olie

Biosparging en bioventing zijn de meest geschikte in-situ technieken voor de gestimuleerde afbraak van minerale olie. Bioventing heeft betrekking op de onverzadigde zone en biosparging op de verzadigde zone. Bij biosparging wordt met een compressor buitenlucht in de verzadigde zone geïnjecteerd via injectielansen. Bij bioventing wordt in de onverzadigde zone zuurstof ingebracht door bijvoorbeeld het onttrekken van lucht of juist injecteren van lucht in deze zone. Aanvullend hierop moeten nutriënten aan de bodem worden gedoseerd. Als alternatief voor biosparging/bioventing wordt soms ook gebruik gemaakt van het doseren van zuurstofleverende zouten of pure zuurstof.

Anaërobe afbraak

Anaërobe afbraak van alkanen is tot op heden niet of nauwelijks aangetoond. Dit betekent dat onder zuurstofloze condities waarschijnlijk geen significante afbraak van minerale olie plaats vindt. In Nederland heersen er vaak anaërobe omstandigheden in de bodem, waardoor zuurstof moet worden toegevoegd om een olieverontreiniging biologisch te kunnen saneren.

Bepaalde stoffen in minerale olieverontreinigingen, zoals aromatische koolwaterstoffen (benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen) kunnen wel anaëroob worden afgebroken. Het biologische afbraakproces van aromaten is in de volgende paragraaf toegelicht.

2.2 Aromaten

Benzeen, toluen, ethylbenzeen en de drie isomeren van xyleen (paraxyleen, orthoxyleen en metaxyleen) vormen samen de belangrijke verbindingen in de groep van (mono)aromatische koolwaterstoffen. Benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen (BTEX) zijn ten opzichte van de overige componenten uit minerale olieproducten relatief goed wateroplosbaar en daardoor beter beschikbaar voor biologische afbraak.

Aërobe afbraak

BTEX kunnen in aanwezigheid van zuurstof (aërobe omstandigheden)

goed worden afgebroken. De verbindingen worden hierbij als koolstofbron (elektronendonor) gebruikt en zuurstof als elektronenacceptor. BTEX worden onder aërobe omstandigheden geheel afgebroken tot koolstofdioxide en water.

Aërobe saneringstechnieken voor aromaten

Bioventing en biosparging zijn ook geschikte saneringsvarianten voor de aanpak van BTEX. Echter, bij deze verontreiniging wordt de gestimuleerde afbraak vaak gecombineerd met een bodemluchtextractie omdat BTEX relatief vluchtig zijn en daarom voor een deel zullen vervluchtigen tijdens biosparging en bioventing. Met de bodemluchtextractie worden vrijkomende (vluchtige) verbindingen afgevangen en gezuiverd in een zuiveringsinstallatie.

Anaërobe afbraak

Tolueen, ethylbenzeen en xylenen zijn onder verschillende anaërobe condities (nitraatreducerend, ijzerreducerend, sulfaatreducerend en methanogeen) afbreekbaar. Onder deze condities kan benzeenafbraak ook optreden, maar praktijkervaring laat voor deze component een wisselend beeld zien.

Anaërobe saneringstechnieken voor aromaten

Voor de gestimuleerde anaërobe biologische afbraak van aromaten komt alleen nitraat- of sulfaatdosering in aanmerking. Deze stoffen zijn goed oplosbaar en kunnen goed in het verontreinigde grondwater verspreid worden.

Het doseren van nitraat of sulfaat via directe injectie of een recirculatiesysteem is de meest geschikte anaërobe saneringsvariant voor de gestimuleerde afbraak van toluen, ethylbenzeen en xylenen. In principe is deze techniek ook geschikt voor de aanpak van benzeen, maar uit praktijkervaring blijkt dat benzeen niet op elke locatie op deze wijze gesaneerd kan worden.

2.3 Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK)

Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) is een verzamelnaam voor alle aromatische koolwaterstoffen met twee of meer ringstructuren. Bekende voorbeelden van deze stoffen zijn naftaleen, antraceen en benzo[a]pyreen.

Aërobe afbraak

In het algemeen kan worden gesteld dat PAK alleen met zuurstof kunnen worden afgebroken en dat de snelheid van afbraak omgekeerd evenredig is aan het aantal ringen. Onder aërobe condities kunnen PAK met twee en drie ringen, zoals naftaleen en fenanthreen, in de bodem relatief gemakkelijk worden afgebroken. PAK met vier of meer dan vier ringen zijn nauwelijks afbreekbaar.

Aërobe saneringstechnieken voor PAK's

Bioventing en biosparging zijn geschikt voor de aanpak van PAK met twee en drie ringen (lichte PAK's).

Anaërobe afbraak

Naftaleen kan in principe ook onder anaërobe condities worden afgebroken, maar deze afbraak treedt niet altijd op. De oorzaak hiervan is vooralsnog niet bekend.

2.4 Gechloreerde verbindingen

De meest voorkomende bodemverontreinigingen met gechloreerde verbindingen zijn tetrachlooretheen (PER), trichlooretheen (TRI) en trichloorethaan (1,1,1-TCA of 1,1,2-TCA). Navolgend zijn vooral de afbraakroutes van deze stoffen en de tussenproducten die hierbij kunnen ontstaan (zoals *cis*- en *trans*-dichlooretheen (DCE), vinylchloride (VC) en dichloorethanen (DCA)) behandeld.

De afbraak van gechloreerde ethenen en ethanen kan via verschillende afbraakroutes verlopen. Welke afbraakroute optreedt is sterk afhankelijk van het aantal chlooratomen dat de stof bevat en de redoxcondities in de bodem die voor de toepassing van gestimuleerde afbraak zijn opgelegd.

Aërobe afbraak

In het algemeen worden verbindingen met veel chlooratomen niet aëroob afgebroken. Zo is afbraak van PER of TCA met zuurstof niet mogelijk. Lager gechloreerde verbindingen zoals TRI, 1,2-dichloorethaan (1,2-DCA), *cis*-dichlooretheen (*cis*-DCE), vinylchloride (VC), 1,1-dichloorethaan (1,1-DCA) en chloorethaan (CA) kunnen onder aërobe omstandigheden wel worden afgebroken. Daarbij zijn twee mogelijke processen te onderscheiden, namelijk oxidatieve afbraak en co-metabolische afbraak.

Bij **oxidatieve afbraak** fungeert de verontreiniging als voedingsstof (elektronendonator) voor de bacteriën, waarbij zuurstof als elektronenacceptor optreedt. Afbraakproducten van oxidatieve afbraak van VOCl zijn koolstofdioxide, chloride en water. Om van dit proces gebruik te maken dient zuurstof aan het grondwater te worden toegediend en mag geen oorspronkelijk product als PER of TCA meer aanwezig zijn. Deze gechloreerde verbindingen worden onder aërobe condities namelijk niet afgebroken.

Aërobe saneringstechnieken voor VOCl

Gestimuleerde aërobe afbraak van lager gechloreerde verbindingen kan plaatsvinden door toediening van zuurstof, vergelijkbaar met het principe van bioventing/biosparging. Omdat hoger gechloreerde verbindingen niet aëroob afbreekbaar zijn, kan deze techniek alleen ingezet worden als al enige mate van natuurlijke afbraak is opgetreden en er enkel tussenproducten als *cis*-DCE, VC of DCA aanwezig zijn. Dit is bijvoorbeeld van toepassing in een pluimgebied met alleen *cis*-DCE en VC. Een VOCl verontreiniging waarbij ook nog de oorspronkelijke hoog gechloreerde verbindingen aanwezig zijn wordt biologisch volledig anaëroob aangepakt middels reductieve dechlorering.

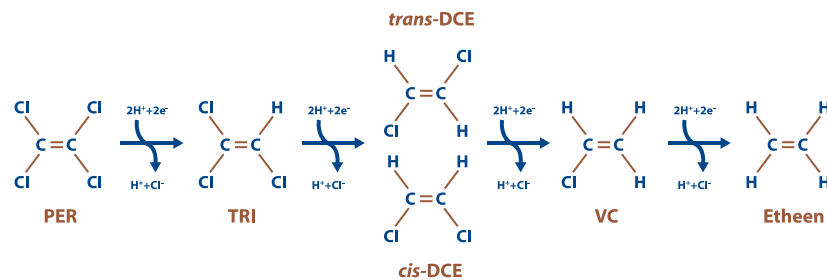
Co-metabolische afbraak wil zeggen dat de betreffende verontreiniging alleen niet voldoende is voor activiteit van de bacteriën, maar dat een aanvullende component (het co-substraat) nodig is om afbraak te genereren. Zo kan TRI aëroob alleen worden afgebroken in de

aanwezigheid van bijvoorbeeld toluen of fenol als co-substraat. Er worden dan enzymen aangemaakt die - toevalligerwijze - ook TRI kunnen aanpakken.

Voor de toepassing van co-metabolische afbraak dient naast zuurstof ook een co-substraat te worden gedoseerd. In Nederland is dit concept in het verleden zeer beperkt toegepast.

Anaërobe afbraak

Afbraak van gechlloreerde ethenen waarbij de verontreiniging als elektronenacceptor fungeert (en niet zoals bij de meeste verontreinigingen als elektronendonor) is onder anaërobe omstandigheden het belangrijkste afbraakproces. Dit proces wordt **reductieve dechlorering** genoemd. Bij reductieve dechlorering van PER en TRI wordt stapsgewijs een chlooratoom afgesplitst en ontstaan lager gechlloreerde ethenen, zoals *cis*-DCE en VC. Bij afbraak van TCA ontstaat achtereenvolgens DCA en monochloorethaan (CA). Onder gunstige condities wordt uiteindelijk volledige dechlorering bereikt met als onschadelijke eindproducten etheen en/of ethaan (figuur 5).



Figuur 5: Anaërobe afbraak van gechlloreerde ethenen.

Onder aërobe of nitraatreducerende omstandigheden treedt nagenoeg geen afbraak op van PER en TRI, onder ijzer- of sulfaatreducerende omstandigheden treedt onvolledige afbraak van PER en TRI op tot *cis*-DCE. Volledige afbraak tot etheen en/of ethaan treedt alleen op

onder methanogene omstandigheden. Deze condities zijn alleen aanwezig als er voldoende afbreekbaar elektronendonor in de bodem aanwezig is of aan de bodem wordt gedoseerd.

Anaërobe saneringstechnieken voor VOCl

Om de afbraak volledig te laten verlopen en de snelheid van afbraak te verhogen dient een geschikte en onschadelijke elektronendonor aan de bodem te worden toegevoegd. Soms worden er ook bacteriën gedoseerd.

2.5 Gestimuleerde afbraak in Nederland

Aërobe gestimuleerde afbraak

Het grondwater in Nederland is overwegend zuurstofloos. Om de aërobe afbraak van bijvoorbeeld minerale olie te stimuleren dient de bodem van zuurstof te worden voorzien. Het doseren van zuurstof is daarom een veel voorkomende techniek om de biologische afbraak van minerale olie, aromaten en lichte PAK te stimuleren.

Bij minerale olie en PAK moet rekening worden gehouden met een immobiele restverontreiniging bestaande uit de zwaardere bestanddelen. Typische rendementen die met in-situ aërobe afbraak van minerale olie behaald kunnen worden liggen gemiddeld tussen de 70 en 95% vrachtverwijdering.

Anaërobe gestimuleerde afbraak

In het westen en het noordoosten van Nederland zijn gebieden aanwezig waar in het grondwater in de klei- en veenlagen veel organisch materiaal aanwezig is. De grote hoeveelheid organisch materiaal veroorzaakt een sterk anaëroob (sulfaatreducerend tot methanogeen) milieu waar door de slechte doorlatendheid van de bodem weinig aanvoer van elektronenacceptoren plaatsvindt. Hierdoor is de kans aanwezig dat de anaërobe afbraak (reductieve dechlorering) van gechlloreerde verbindingen van nature al verloopt. Per geval dient echter wel beoordeeld te worden of deze in voldoende mate verloopt, ook in

de toekomst blijft verlopen en welke toegevoegde waarde (bijvoorbeeld het verkorten van de saneringsduur) stimulatie van de afbraak heeft.

De potentie voor natuurlijke afbraak van aromaten is in deze gebieden juist lager, omdat de geschikte elektronenacceptoren al zijn gereduceerd. Aërobe stimulatie via biosparging/bioventing heeft voor de biologische afbraak van aromaten de voorkeur, maar is minder geschikt aangezien de slechtere doorlatendheid van de bodem een goede injectie van lucht verhindert en zuurstof ook verbruikt wordt voor oxidatie van andere verbindingen, zoals natuurlijk organisch materiaal (geeft risico op zettingen), gereduceerd ijzer (II) en sulfides. Anaërobe stimulatie via dosering van nitraat of sulfaat is hier wel een optie.

De zandgronden in het zuiden en oosten van Nederland worden gekarakteriseerd door de aanwezigheid van nitraat en sulfaat en lage concentraties aan natuurlijke organische verbindingen. Hierdoor verloopt de natuurlijke afbraak van gechlloreerde verbindingen van



nature minder goed en is de dosering van koolstofbron en/of bacteriën vaak noodzakelijk om de afbraak van gechlloreerde verbindingen te stimuleren. De condities zijn vaak wel geschikt voor de natuurlijke afbraak van aromaten, maar kunnen in veel gevallen worden geoptimaliseerd door toediening van nitraat en/of sulfaat. Hiermee wordt de balans tussen elektronendonor (de verontreiniging) en elektronenacceptor hersteld.

Nutriëntendosering

Over het algemeen bevat de Nederlandse bodem voldoende nutriënten voor natuurlijke afbraak van lage concentraties opgeloste verontreiniging. Bij hoge concentraties aan verontreinigingen is de concentratie aan nutriënten vaak onvoldoende om de afbraak in stand te houden. Dit probleem doet zich met name voor bij de aërobe biologische sanering van minerale olie, waar vaak concentraties van duizenden mg/kg ds aan verontreiniging voorkomen. Daarom is het bijna altijd noodzakelijk om bij de aërobe biologische sanering van minerale olie naast zuurstof ook nutriënten te doseren. Ook voor de anaërobe sanering van gechlloreerde verbindingen is nutriëntendosering noodzakelijk omdat voor het stimuleren van de afbraak een goed afbreekbare elektronendonor wordt toegevoegd in hoge concentraties. Deze elektronendonor kan pas voor het afbraakproces worden gebruikt als ook voldoende nutriënten beschikbaar zijn.

Puur product zones

In geval van drijfvlagen met minerale olieproducten of zaklagen van gechlloreerde oplosmiddelen (puur product zones) is de toepassing van gestimuleerde afbraak alléén onvoldoende om op redelijke termijn de sanering af te ronden. Verontreinigingen dienen namelijk eerst in opgeloste vorm aanwezig te zijn voordat ze kunnen worden afgebroken. Het in oplossing gaan van grote hoeveelheden puur product kan zo lang duren dat het in stand houden van gunstige condities gedurende deze tijd geen reële optie is. Voor een efficiënte sanering op basis van gestimuleerde afbraak dient de drijfslag of het puur product eerst middels andere saneringstechnieken verwijderd te worden.

3

Technieken voor gestimuleerde afbraak

Voorafgaand aan de behandeling van enkele saneringstechnieken in de paragrafen 3.3 en 3.4 is aandacht besteed aan een aantal elementaire technische aandachtspunten. Het gaat om het werken met hulpstoffen en het monitoren van het saneringsverloop.

3.1 Werken met hulpstoffen

Zoals bij elke in-situ sanering is bij gestimuleerde afbraak de afstemming van het ontwerp op de bodemeigenschappen van groot belang. Vooral de mate van heterogeniteit, grondwaterstand en doorlatendheid kan het saneringsresultaat sterk beïnvloeden. Deze factoren zijn namelijk van invloed op de verspreiding van de hulpstoffen.

3.1.1 Hoeveelheid en soorten hulpstoffen

De concentratie van hulpstoffen en de snelheid waarmee deze worden verbruikt spelen een belangrijke rol bij het berekenen van de saneringsduur en de verspreiding van stoffen over het verontreinigd gebied. Een hulpstof die langzaam afbreekt en zich snel verspreidt beïnvloedt een groter gebied dan een hulpstof die snel afbreekt en sterk retardeert.

Bij anaërobe saneringstechnieken is de samenstelling van het grondwater bepalend voor de toediening van hulpstoffen. De soort en hoeveelheid van een bepaalde hulpstof wordt bepaald door de concentratie verontreiniging en door het natuurlijke verbruik. Bij de gestimuleerde afbraak van VOCl middels reductieve dechlorering treedt bijvoorbeeld pas volledige afbraak op nadat nitraat, ijzer(III) en sulfaat gereduceerd zijn. Voor de reductie van nitraat, ijzer(III) en sulfaat wordt een groot deel van de gedoseerde hulpstof verbruikt. Ook moet rekening worden gehouden met de aanwezigheid van elektronenacceptoren in het instromende grondwater. Voor elke sanering is een overmaat aan hulpstoffen nodig om te voorkomen dat afbraakprocessen stagneren voordat de saneringsdoelstelling is gehaald.



De specifieke bacteriën die verantwoordelijk zijn voor de afbraak van bepaalde verontreinigingen bepalen welke soort hulpstoffen aan de bodem moeten worden toegevoegd om de biologische afbraak te stimuleren. Onderstaande tabel geeft per verontreiniging aan welke stoffen nodig zijn om afbraak in de bodem op gang te krijgen of te versnellen.

Tabel 2

Dosering van hulpstoffen en/of bacteriën bij verschillende verontreinigingen

Verontreiniging	Elektronen-donor	Elektronenacceptor			Bacteriën	Nutriënten
		Zuurstof	Nitraat	Sulfaat		
PER, TRI ¹	+	-	-	-	+	+
cis-DCE, VC	+	+	-	-	+	+
TCA	+	-	-	-	+	+
DCA, CA	+	+	-	-	+	+
Minerale olie	-	+	-	-	-	+
BTEX	-	+	+	+	-	+
Naftaleen (2-rings)	-	+	+	+	-	+
Fenanthreen (3-rings)	-	+	-	-	-	+

¹ Voor TRI is cometaabolisch wel aërobe afbraak mogelijk, maar geen gangbare methode.

- + De afbraak van de verontreiniging is te stimuleren met deze dosering.
- De afbraak van de verontreiniging wordt niet gestimuleerd door deze dosering.

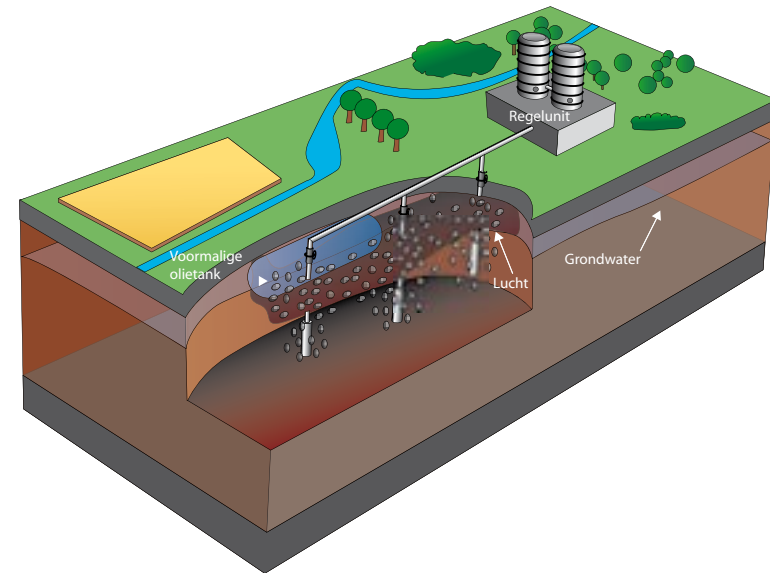
Voor een overzicht van veel gebruikte elektronendonoren wordt verwezen naar paragraaf 3.4.1 (tabel 3).

3.1.2 Technische principes voor het doseren van hulpstoffen

Technisch kan er bij de dosering van hulpstoffen onderscheid worden gemaakt in lucht/zuurstof en opgeloste en vloeibare hulpstoffen.

Lucht/zuurstof

Lucht of zuurstof wordt in de regel gedoseerd middels injectie van perslucht via injectiefilters. Een compressor zorgt ervoor dat de lucht onder druk in de bodem wordt geïnjecteerd.



Figuur 6: Principeschets voor injectie van zuurstof via injectiefilters.

Intermezzo

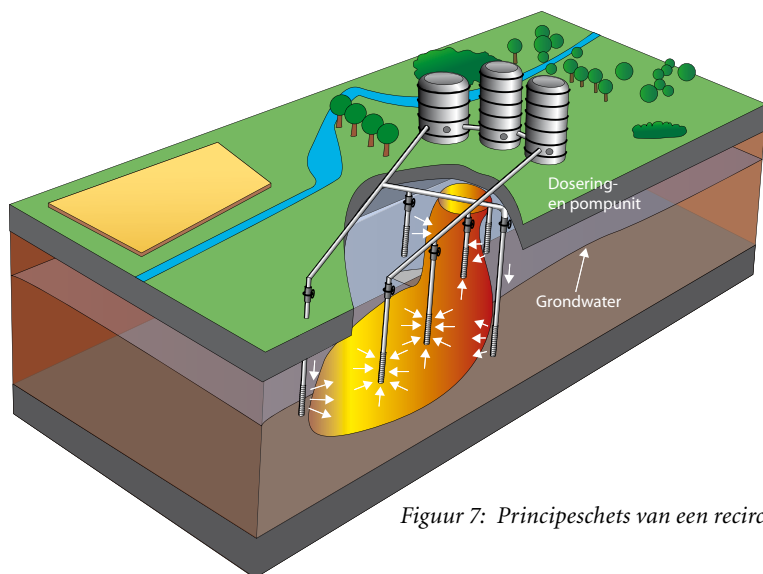
Technieken waarbij gasvormige substraten (waterstof) of substraten als nevel met behulp van stikstof als drager in het verontreinigde bodempakket (bijvoorbeeld Liner[®]) worden ingebracht zijn vergelijkbaar met het werkingsprincipe van persluchtinjectie voor biosparging. Middels deze techniek wordt het substraat over het te behandelen bodempakket verspreid.

Opgeloste en vloeibare hulpstoffen

Opgeloste en vloeibare hulpstoffen kunnen in de verzadigde zone worden gedoseerd met directe injectie, infiltratie op verticale filters of horizontale drains, of een recirculatiesysteem met infiltratie- en onttrekkingsfilters of horizontale drains. Voor nutriëntendosering in de onverzadigde zone wordt ook regelmatig gebruik gemaakt van drains.

Het recirculatiesysteem

Met dit systeem wordt onttrokken grondwater voorzien van hulpstoffen. Het verrijkte grondwater wordt vervolgens weer geïnfilteerd om de bacteriën te voeden. Tussen onttrekking en herinfiltratie vindt geen volledige zuivering van het grondwater plaats. De daadwerkelijke afbraak vindt in de bodem plaats.



Figuur 7: Principeschets van een recirculatiesysteem.

Een onttrekkings- en infiltratiesysteem kan worden toegepast bij voldoende doorlatendheid van de bodem. Een dergelijk systeem is over het algemeen goed toepasbaar bij een doorlatendheid van minimaal enkele meters per dag (zandige bodems). Toepassing bij een lagere doorlatendheid vraagt om een hoge filterdichtheid.

In heterogene bodems is het gebruik van additionele doseertechnieken, zoals directe injectie van hulpstoffen in klei- en veenlaagjes, een goede aanvulling op het recirculatiesysteem om de verspreiding van hulpstoffen te optimaliseren.

Directe injectie

Bij de directe injectie techniek worden de hulpstoffen direct in de bodem geïnjecteerd. Met behulp van een klein rupsbandvoertuig wordt een stalen lans naar beneden gedrukt. Via deze lans worden stoffen in de bodem gepompt of verneveld. Deze techniek wordt vaak toegepast in slecht doorlatende bodems met een doorlatendheid van minder dan 0,1 m/dag maar kan ook worden toegepast in bodempakketten met een hogere doorlatendheid. Middels kleine wendbare machines (zie figuur 8) kunnen dieptes tot 15 à 20 meter worden bereikt. Wanneer op grotere diepte moet worden geïnjecteerd is zwaardere apparatuur nodig.



Figuur 8: Het doseren van hulpstoffen via directe injectie.

De invloedstraal is vaak gering (enkele meters), zodat in slecht doorlatende pakketten met weinig natuurlijke grondwaterstroming een dicht 'grid' moet worden toegepast. Bij beter doorlatende pakketten worden de geïnjecteerde hulpstoffen door de natuurlijke grondwaterstromingsrichting over het verontreinigde gebied verspreid.

Intermezzo

In sommige gevallen is het om technische of financiële redenen niet haalbaar om een verontreiniging in zijn geheel te saneren. Dan kan er ook voor worden gekozen de condities voor biologische afbraak alleen plaatselijk (meestal aan het einde van de grondwaterpluim) te optimaliseren met behulp van bioschermen. Verontreinigingen die met het grondwater door deze gestimuleerde zones wordt getransporteerd worden ter plekke van deze zones afgebroken tot onschadelijke eindproducten. Hiermee wordt niet de gehele locatie gesaneerd maar wordt verspreiding wel voorkomen. Voor meer informatie wordt het SKB-cahier Reactieve Schermen aanbevolen.

Horizontale drains

Een drain is een geperforeerde buis die horizontaal in de bodem wordt gelegd in een speciaal daarvoor gemaakte sleuf. Vooral voor de dosering van nutriënten in de onverzadigde zone worden drains toegepast. Het toedienen van elektronendonoren, -acceptoren en bacteriën in de verzadigde zone vindt meestal plaats met verticale infiltratie- en onttrekkingsfilters, maar soms ook met horizontale drains.

Voor een goede dosering in de onverzadigde zone dient de drain boven grondwaterniveau en boven de verontreiniging te worden aangebracht. Indien het gebied vrij toegankelijk is kan een drain eenvoudig worden aangelegd. Bij toepassing van een drain dient er rekening mee gehouden te worden dat de nutriënten over de gewenste lengte van de drain infiltreren. Het gebeurt wel eens dat infiltratie alleen aan het begin van de drain plaatsvindt waardoor de nutriënten niet goed worden verspreid.

3.2 Monitoren van het saneringsverloop

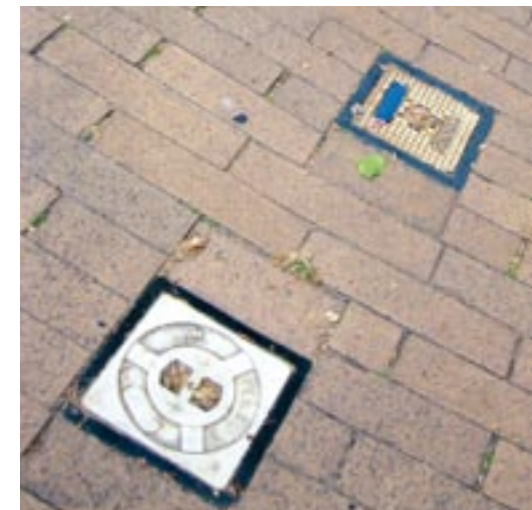
3.2.1 Algemeen

De monitoringsfrequentie en parameters moet worden afgestemd op een reële verwachting van het saneringsverloop en essentiële randvoorwaarden voor het afbraakproces.

Bij een sanering middels gestimuleerde afbraak kunnen vaak drie fasen worden onderscheiden:

1. het optimaliseren van de condities voor afbraak;
2. de ontwikkeling van een actieve bacteriepopulatie;
3. de afbraakfase zelf.

De duur van deze fasen verschilt per techniek en per verontreiniging. Zo is middels persluchtinjectie snel voldoende zuurstof in het grondwater aanwezig voor aërobe afbraak en treedt afbraak nagenoeg meteen op, maar kan de reductie van het bodempakket voor anaërobe afbraak van VOCl weken of maanden duren. Bij de monitoring dient hiermee rekening gehouden te worden.



Figuur 9: Met straatpot afgewerkte monitoringsfilters.

Met een goed monitoringsplan worden gegevens verkregen van de relevante parameters over tijd en ruimte en worden eventuele factoren die van invloed zijn op het saneringsproces (zoals uitputting van de gedoseerde hulpstoffen, een verandering van de samenstelling van het instromende grondwater en/of stromingsrichting en -snelheid van het grondwater) tijdig gesignaleerd.

De wijze van interpretatie van de monitoringsresultaten is een belangrijk onderdeel van het monitoringsplan. Het plan dient duidelijk te beschrijven hoe de monitoringsgegevens worden geïnterpreteerd en wat de bijbehorende consequenties zijn. Daarin moet de ruimte beschreven zijn waarin rekening gehouden wordt met variatie die binnen de waarnemingen kan optreden. Eisen aan concentraties in peilbuizen lijken zinvol, maar een overschrijding van bijvoorbeeld de tussenwaarde na de actieve fase hoeft geen bezwaar te zijn, mits de condities voor afbraak ter plaatse nog gunstig zijn en er nog voldoende afstand is tot een eventueel bedreigd object.

3.2.2 Monitoring van het saneringsverloop bij aërobe technieken

In de eerste maanden van de sanering moet al duidelijk worden of de verspreiding van zuurstof en nutriënten voldoende is. Dit zijn dan ook belangrijke monitoringsparameters. De monitoringsfrequentie is daarom in het begin hoger en kan worden verlaagd, zodra blijkt dat de verspreiding voldoende is.

Voor aërobe omstandigheden is een zuurstofconcentratie van minimaal 2,0 mg/l benodigd. De pH dient tussen de 6 en 8 te zijn. Voor een goed verloop van de sanering dient de concentratie nutriënten in het grondwater tijdens de sanering groter te zijn dan de detectielimiet. De concentraties verontreiniging in het grondwater dalen bij aërobe saneringen snel. De ervaring leert dat in de eerste maanden de afbraak-snelheid toeneemt (groeifase van de bacteriën), een maximum bereikt en daarna weer langzaam afneemt door een steeds verdere afname van de verontreiniging. Bij de uitwerking van de frequentie van monitoring tijdens de actieve fase dient met dit verloop rekening gehouden te worden.

De grootste verontreinigingsvracht van minerale olie en PAK is aan de bodem gebonden. De afname van de grondconcentraties gaat daardoor langzamer waardoor pas later de resultaten te zien zijn. Om de effectiviteit van de sanering te kunnen monitoren moeten grondanalyses onderdeel zijn van het analysepakket. Voor het definitief beëindigen van de sanering dient gecontroleerd te worden of het stopzetten van het systeem niet leidt tot een toename van de concentraties in het grondwater door desorptie van de vaste fase.

3.2.3 Monitoring van het saneringsverloop bij anaërobe technieken

Koolstofdoserering en/of beënting voor VOCl

PER en TRI worden stapsgewijs afgebroken via *cis*-DCE en VC naar etheen en ethaan. Bij de beoordeling van de effectiviteit van de saneringsmaatregel moet daarom rekening worden gehouden met een tijdelijke toename van de concentraties *cis*-DCE en VC. Een (tijdelijke) toename van de concentraties VC zijn over het algemeen een teken dat afbraakprocessen goed verlopen. In een goed lopende sanering zullen de concentraties naar verloop van tijd ook weer dalen.

Bij anaërobe saneringen van gechlloreerde verbindingen zijn de afwezigheid van nitraat en sulfaat en de aanwezigheid van voldoende organisch materiaal belangrijke randvoorwaarden. Voor deze saneringen dient regelmatig geanalyseerd te worden op onder andere deze parameters. Aanvullend kunnen periodieke analyses op specifiek VOCl afbrekende bacteriën van belang zijn.

Nitraat of sulfaatdoserering voor aromaten

Tijdens de afbraak van aromaten met nitraat of sulfaat ontstaan tussen- en eindproducten die niet specifiek te relateren zijn aan de afbraak. Bovendien zijn deze componenten lastig te analyseren en/of worden in dermate lage concentraties gevormd dat de concentratie van deze stoffen niet toeneemt ten opzichte van de natuurlijke achtergrondgehalten. Daarom ligt de nadruk bij de monitoring van een sanering middels anaëroob gestimuleerde biologische afbraak van aromaten op het volgen van de concentraties aan verontreiniging

en de toegevoegde hulpstoffen. Analyses op aromaten en nitraat of sulfaat vormen de basis van het monitoringsprogramma.

3.3 Aëroob gestimuleerde saneringstechnieken

3.3.1 Bioventing en biosparging

Algemeen

Bij bioventing en biosparging wordt de afbraak gestimuleerd door toediening van lucht of zuurstof via injectiefilters. Daarbij vindt nutriëntendosering plaats (zie paragraaf 3.1.2).

De saneringsduur varieert van één tot enkele jaren, afhankelijk van de concentraties, de soort verontreiniging en beluchtbaarheid van de bodem. De techniek is bruikbaar voor het saneren van zowel de grond als het grondwater. Ook grote vrachten minerale olie (tienduizenden mg/kg ds) kunnen worden gesaneerd.

Na het saneren van minerale olie blijft meestal een restverontreiniging in de grond achter. Deze restverontreiniging bestaat vooral uit mobiele zwaardere oliefracties. Ondanks dat lokaal hoge concentraties tot boven de interventiewaarde achter kunnen blijven kan daardoor toch een stabiele eindsituatie worden bereikt. In vergelijking met fysische in-situ technieken is de restverontreiniging kleiner, omdat fysische technieken met name de vluchtige en/of oplosbare fractie aanpakken. Met biologische afbraak wordt in aanvulling op deze fracties ook een deel van de minder mobiele fracties verwijderd.

Bioventing heeft betrekking op de onverzadigde zone en biosparging op de verzadigde zone. De principes zijn vergelijkbaar, maar voor een goede verspreiding van hulpstoffen (met name opgeloste nutriënten) in de onverzadigde zone een intensiever netwerk van injectiefilters/draains noodzakelijk is. In de praktijk is het lastig om een goede verspreiding van opgeloste nutriënten in de onverzadigde zone te realiseren, waardoor bodemsaneringen met bioventing minder succesvol kunnen zijn.

Ontwerp

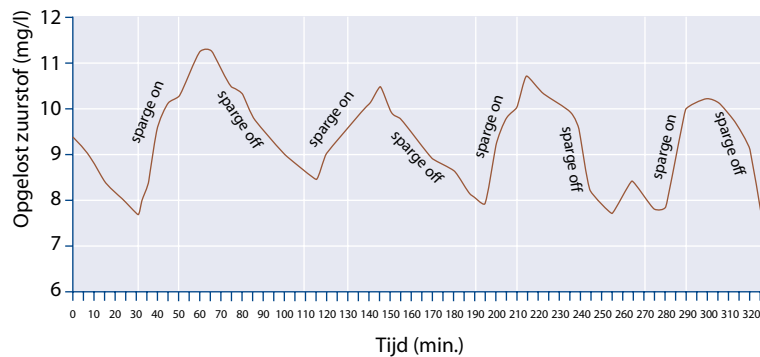
Bij doorlatendheden van meer dan 0,5 m/dag kan persluchtinjectie zonder meer goed toegepast worden. Een heterogene bodemopbouw kan echter een negatieve invloed hebben op het saneringsresultaat en de invloedsstraal, omdat minder goed doorlatende lagen slechter belucht worden en omdat lucht zich kan ophopen onder en kan afstromen langs de slecht doorlatende lagen. Bij een heterogene bodemopbouw worden filters daarom ook wel op meerdere diepten aangebracht.

Intermezzo

De belangrijkste ontwerpparameters van een biosparging systeem zijn de invloedsstraal van de luchtinjectie, de benodigde debieten, de benodigde injectiedrukken en de wijze van beluchting. De NOBIS gids 'In-situ Air Sparging- A Technical Guide' geeft een goed beeld van de benodigde infrastructuur en ontwerp parameters benodigd voor de biosparging. Met de gids kan aan de hand van een aantal vuistregels en diagrammen snel een ontwerp worden gemaakt.

De invloedsstraal wordt bepaald door de bodemopbouw (gelaagdheid), de diepte van het filter ten opzichte van de grondwaterstand en door de injectiedruk en de hoeveelheid lucht die geïnjecteerd wordt. Vuistregel is dat de invloedsstraal van een persluchtfilter gelijk is aan de diepte van de bovenkant van het filter onder het grondwaterniveau met een maximum van circa 8 meter. Gemiddeld worden persluchtfilters in de kern met een onderlinge afstand van 4 tot 6 meter en in de pluim met een onderlinge afstand van 6 tot 10 meter geplaatst.

Een intermitterende luchtinjectie heeft de voorkeur boven continue luchtinjectie omdat middels intermitterende injectie een betere verspreiding van de lucht wordt verkregen. Daarnaast ontstaat zo meer turbulentie in de bodem, wordt zuurstof efficiënter gebruikt en wordt daardoor energie bespaard en neemt het aandeel afbraak ten opzichte van vervluchtiging toe.



Figuur 10: Verloop zuurstofconcentratie bij goedlopende intermitterende beluchting.

Om er zeker van te zijn dat alle filters van de gewenste hoeveelheid lucht worden voorzien dienen de persluchtfilters afzonderlijk van perslucht te worden voorzien en dient het debiet per filter te worden geregeld en geregistreerd. Door clustering van persluchtfilters kunnen voorkeursstromingen ontstaan door plaatselijk lagere doorlatendheden zodat niet alle filters binnen het cluster de benodigde hoeveelheid lucht ontvangen.

Intermezzo

Het doseren van lucht via persluchtfilters is een intensieve techniek, omdat er continu lucht geïnjecteerd dient te worden. De bodem heeft namelijk een beperkte zuurstofopname capaciteit en de aanwezige zuurstof wordt snel gebruikt door verschillende biologische processen die voor een groot deel niet aan de afbraak van olie zijn gerelateerd.

Het PuriSoil™ concept speelt hierop in door eerst de vluchtige fractie te strippen (met hoge debieten en een dicht grid aan persluchtfilters), waarna deze naar het maaiveld wordt getransporteerd. Aan het maaiveld wordt de vluchtige fractie in een biologisch actieve laag,

die op het maaiveld is aangebracht, afgebroken. Dit concept is echter minder geschikt voor minder vluchtige verbindingen of in heterogene bodems. Bovendien dient het maaiveld vrij te zijn om de biologisch actieve laag aan te kunnen brengen.

3.3.2 Dosering van zuurstofleverende hulpstoffen of pure zuurstof

Algemeen

Voor de dosering van zuurstof aan het verontreinigde grondwater zijn ook extensieve technieken beschikbaar, waarbij gebruik wordt gemaakt van substraten die langzaam zuurstof vrijlaten of van systemen waarbij pure zuurstof wordt aangebracht. Hiermee kunnen hoge concentraties zuurstof in het grondwater worden behaald (40-60 mg/l). Voorbeelden van zuurstofleverende hulpstoffen zijn magnesium- of calciumperoxides die in contact met water langzaam zuurstof afgeven.

Dosering van zuurstofleverende hulpstoffen of pure zuurstof is alleen bruikbaar in bodems waar weinig vracht zit en de verontreiniging met name in het grondwater aanwezig is. Dat is hoofdzakelijk het geval voor BTEX verontreinigingen. Verder zijn dergelijke systemen alleen effectief in bodems waar het grondwater zich verspreidt. Alleen door grondwaterstroming kan voldoende verspreiding van de zuurstof in een acceptabele tijd worden bereikt.

Ontwerp

De belangrijkste ontwerpparameter voor zuurstofleverende hulpstoffen en pure zuurstof zijn de benodigde hoeveelheid zuurstof voor de afbraak, de werkingsduur en de verwachte invloedsstraal.

3.4 Anaërobie gestimuleerde saneringstechnieken

Anaërobie gestimuleerde afbraak wordt gekenmerkt door de korte inzet van bovengrondse installaties. Veelal kan volstaan worden met het doseren en verspreiden van de hulpstoffen in de bodem. Dit varieert van enkele weken bij directe injectie tot maximaal een jaar bij recirculatie systemen. Na het doseren vindt de afbraak plaats in

de bodem, waardoor bovengrondse installaties overbodig zijn en er nauwelijks overlast is voor de omgeving. Herdosering kan echter noodzakelijk zijn.

3.4.1 Dosering van elektronendonor (VOCI)

Algemeen

In zandige bodemtypes wordt voor het doseren van elektronendonoren veelal gebruik gemaakt van recirculatiesystemen waarbij de elektronendonor aan het geïnfilterde water wordt toegevoegd. De afstand tussen infiltratie- en onttrekkingsputten of -drains kan oplopen tot enkele tientallen meters, waardoor het een goed toepasbare saneringstechniek is in bebouwd gebied.

In slecht doorlatende bodemtypes, zoals (zandige) klei, leem en veen, is directe injectie van elektronendonoren effectief. Hierbij wordt onder druk van één tot enkele bar de elektronendonor geïnjecteerd. De afstand tussen de injectiepunten bedraagt over het algemeen één tot enkele meters. Deze techniek stelt daarmee eisen aan de bereikbaarheid van de saneringslocatie.

Soorten elektronendonoren

Als elektronendonor komen verschillende stoffen in aanmerking. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen complexe mengsels van verbindingen zoals protamylasse, wei en melasse (reststromen uit de voedingsmiddelenindustrie), enkelvoudige bulkchemicaliën zoals lactaat, acetaat, ethanol of methanol, en speciaal voor dit doel gemaakte stoffen zoals Hydrogen Release Compound (HRC®) of geëmulgeerde plantaardige olie. Voordeel van een verbinding als protamylasse is dat het tevens nutriënten en mineralen bevat.

De keuze van de koolstofbron wordt vooral bepaald door de toepassingsvorm, levensduur en de prijs. In tabel 3 is een aantal veelgebruikte koolstofbronnen weergegeven.

Tabel 3

Verschillende gangbare koolstofbronnen, met toepassingsvorm, levensduur en prijsindicatie

Koolstofbron	Toepassingsvorm	Levensduur	Prijs (€/kg)
Wei	Oplossing	Meerdere weken	0,05 à 0,10
Melasse	Oplossing/puur	Meerdere weken/maanden	0,50 à 0,70
Protamylasse	Oplossing/puur	Meerdere weken/maanden	0,50 à 0,70
Acetaat	Oplossing	Meerdere weken	2 à 5
Lactaat	Oplossing	Meerdere weken	2 à 5
Geëmulgeerde olie	Emulsie van olie in water	Enkele jaren	4 à 6
HRC	Puur	Enkele jaren	12

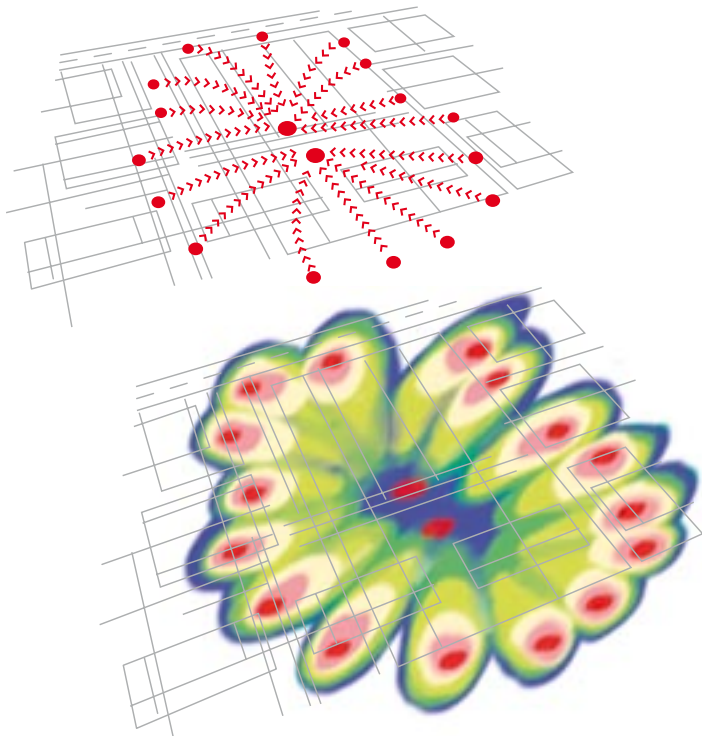
Bij het ontwerpen van een doseersysteem voor een elektronendonor voor de anaërobe afbraak van een verontreiniging met gechloreerde verbindingen moet aandacht worden besteed aan de selectie van de elektronendonor. Belangrijke aspecten zijn niet alleen de werkingstijd van de elektronendonor maar ook de doseerbaarheid ervan. Sommige goedkope elektronendonoren zoals protamylasse bevatten zwevende delen hetgeen de infiltreerbaarheid kan bemoeilijken.

Ontwerp recirculatiesysteem

Voor het ontwerpen van een recirculatiesysteem dienen de locatie van de onttrekkings- en infiltratiefilters, het debiet en de concentratie van de hulpstoffen in het infiltratiewater zodanig op elkaar afgestemd te zijn dat binnen redelijke tijd (enkele maanden tot een half jaar) het verontreinigde pakket van hulpstoffen is voorzien.

Met onttrekking en infiltratie is ruime ervaring opgedaan en kan een goede verspreiding van de hulpstoffen worden gerealiseerd. Nadelen zijn de kans op verstoppingen en een verdringing van verontreinigd grondwater rondom de infiltratiefilters. Deze nadelen kunnen door een goed ontwerp en door rekening te houden met periodieke regeneratie van filters worden voorkomen.

Bij recirculatie van anaëroob grondwater is het van belang om het onttrokken grondwater anaëroob te houden zodat geen problemen ontstaan met neerslagvorming. Het onttrokken water wordt zonder zuivering maar met toediening van de hulpstoffen in een gesloten systeem weer geïnfiltrated in horizontale drains of verticale infiltratiefilters.



*Figuur 11: Ontwerp recirculatiesysteem (bovenaanzicht).
Boven: stroombanen grondwater vanaf infiltratiefilters richting onttrekkingsfilters.
Onder: verspreiding van gedoseerde hulpstoffen.*

Bij het doseren van hulpstoffen via een recirculatiesysteem bestaat er ook een kans op verstopping van de infiltratiefilters door microbiologische groei (biofouling). Hier moet rekening mee gehouden worden bij het ontwerp en de bedrijfsvoering, bijvoorbeeld door het intermitterend doseren van de elektronendonor, het gescheiden injecteren van de elektronendonor en nutriënten en het doorspoelen van de infiltratiefilters met grondwater zonder elektronendonor.

Intermezzo: bioaugmentatie

Bij een beperkte afbraakcapaciteit in de bodem kan overwogen worden om een actieve bacteriepopulatie aan de bodem te doseren. Dit principe wordt beënting of bioaugmentatie genoemd. Hierbij wordt een mix van bacteriën, elektronendonor en nutriënten in de verontreinigde bodem aangebracht.

Er zijn twee vormen van beënting: één waarbij een op laboratorium schaal gekweekte bacterieoplossing wordt gedoseerd en één waarbij met een reactor op de locatie bacteriën worden gekweekt en gedoseerd. Een voordeel van beënting in vergelijking met het alleen doseren van een elektronendonor is het sneller op gang helpen van de gestimuleerde afbraak en daarmee het verkorten van de saneringsduur. Ook al zijn in de bodem de goede bacteriën van nature aanwezig, door het doseren van een reeds actieve populatie verloopt de afbraak in veel gevallen sneller.

Het TCE concept is een voorbeeld van een recirculatiesysteem met dosering van koolstofbron en bacteriën. Het TCE-concept is in de jaren negentig voor het eerst toegepast als totaal concept op de locatie Evenblij te Hoogeveen (TCE staat voor ‘Totaal Concept Evenblij’). Het was de eerste grootschalige en full scale bioaugmentatie met anaërobe bioreactoren.



Figuur 12: Dosering- en pompsysteem voor de recirculatie van hulpstoffen en bacteriën (TCE-concept).

Ontwerp directe injectie

Het ontwerp van een saneringsvariant waarbij de hulpstoffen met directe injecties worden toegediend wordt in eerste instantie bepaald door de invloedsstraal van de injecties. Deze invloedsstraal is afhankelijk van de bodemopbouw, het volume van de te injecteren oplossing en de wijze van injecteren.

Vaak wordt in heterogene bodems een raster van maximaal enkele meters aangehouden, waarbij de natuurlijke grondwaterstroming en diffusie na de injecties nog in geringe mate bijdragen aan de verdere verspreiding. Ook wordt in deze pakketten vaak een geconcentreerde oplossing of een onverdunde hulpstof als melasse of protamylasse geïnjecteerd. Hierdoor blijft de hulpstof lang werkzaam (enkele jaren) en wordt het verontreinigde grondwater rondom de geïnjecteerde vloeistof lang van de hulpstoffen voorzien.

In beter doorlatende zandbodems is de directe invloedsstraal eveneens afhankelijk van het geïnjecteerde volume. Vaak wordt in deze pakketten daarom een groter volume van een verdunde oplossing gedoseerd om een grote invloedsstraal te behalen. Tevens draagt

grondwaterstroming en diffusie in goed doorlatende pakketten in grotere mate bij aan de verdere verspreiding. Hierdoor kan een minder dicht raster worden gebruikt. Toch wordt ook in goed doorlatende pakketten een raster van maximaal 5 meter aangehouden om te voorkomen dat de hulpstoffen zijn uitgewerkt voordat zij zich over het gehele te behandelen pakket hebben kunnen verspreiden.

Er zijn technieken beschikbaar waarmee de invloedsstraal vergroot kan worden. Hierbij wordt eerst stikstofgas of perslucht geïnjecteerd, waarna de hulpstoffen onder grote druk in de luchtstroom worden verneveld. De bodem wordt als het ware kortstondig opgerekt, waarna de hulpstoffen in de poriën worden geblazen. Deze techniek wordt met name in slecht doorlatende pakketten gebruikt. De resultaten laten een wisselend beeld zien. In beter doorlatende pakketten is het resultaat vaak beter. Stroperige hulpstoffen als melasse of protamylasse lenen zich niet voor deze techniek.

Een ontwerp voor directe injecties (met name de onderlinge afstand tussen de injecties) is dus afhankelijk van de concentratie van de hulpstoffen in de injectievloeistof en het te injecteren volume. In slecht doorlatende pakketten wordt een dicht raster met kleine volumes hogere concentraties of onverdunde vloeistoffen gebruikt, in beter doorlatende pakketten worden grotere volumes van sterker verdunde oplossingen geïnjecteerd.

3.4.2 Nitraat en sulfaatdosering (BTEXN)

Problemen met grote BTEXN pluimen doen zich met name voor in gebieden die zeer sterk anaëroob zijn, zogenaamde methanogene bodems. Deze condities komen voor in veen- en kleigebieden maar ook in de bronzones van verontreinigingen met BTEXN, omdat de aanvoer van geschikte elektronenacceptoren (nitraat, sulfaat) met het instromende grondwater het verbruik door afbraak niet kan compenseren. De oorzaak van de langzame afbraak is een tekort aan een geschikte elektronenacceptor.

Om de biologische afbraak te stimuleren wordt in dergelijke situaties vaak gekozen voor een aërobe saneringsvariant. Aërobe afbraak van BTEXN verloopt namelijk sneller dan anaërobe afbraak en zuurstof is in goed doorlatende bodems goed te doseren. Ook is naast BTEXN vaak gelijktijdig minerale olie aanwezig en minerale olie is alleen goed afbreekbaar onder aërobe condities. Toch is er een aantal redenen om de anaërobe afbraak te stimuleren:

- nitraat en sulfaat zijn goed oplosbaar in water en kunnen daarom in grote hoeveelheden toegediend worden via de waterfase, in tegenstelling tot zuurstof (maximale oplosbaarheid van 10-12 mg/l bij gebruik van perslucht). Dit heeft voordelen in sterk gelaagde bodems waar persluchtinjectie leidt tot een zeer grillig verspreidingspatroon van zuurstof, of voor verontreinigingen op grote diepte waar continue injectie van zuurstof hoge (energie)kosten met zich meebrengt;
- bij het toedienen van nitraat of sulfaat in opgeloste vorm bestaat er geen risico op strippen en daarmee uitdamping van de verontreiniging;
- bij het stimuleren van de anaërobe afbraak is de kans op zetting door oxidatie van veen of aantasting van houten funderingspalen gering ten opzichte van gestimuleerde aërobe afbraak.

De keuze voor nitraat of sulfaat hangt af van de eigenschappen van de bodem. Als vuistregel kan worden aangehouden dat in pakketten waarin van nature aërobe tot nitraatreducerende condities heersen nitraat de voorkeur heeft. Zijn de redoxcondities van nature sterker gereduceerd dan heeft sulfaat de voorkeur. Een belangrijke randvoorwaarde is uiteraard dat anaërobe afbraak van BTEXN met nitraat of sulfaat ook daadwerkelijk optreedt. Dit kan middels een haalbaarheidsonderzoek worden vastgesteld (zie ook hoofdstuk 4).

3.5 Combinatie met andere saneringstechnieken

Gestimuleerde biologische afbraak kan worden gecombineerd met andere saneringstechnieken zoals ontgraving, verwarming, chemische oxidatie of chemische reductie. Deze technieken worden met name gebruikt voor bronverwijdering.

Redenen om gestimuleerde biologische afbraak te combineren met andere saneringstechnieken zijn een limitatie van de afbraak door te hoge concentraties verontreiniging (puur product) of een gewenste snelle sanering van de bronzone in verband met herontwikkeling. Daarnaast kunnen in een bronzone met zeer hoge concentraties verontreiniging ook te hoge restconcentraties achterblijven wanneer alleen gestimuleerde biologische afbraak wordt toegepast.

Verwarming van de bodem

De temperatuur in de Nederlandse bodem ligt gemiddeld op 10°C à 13 °C. Bij deze temperatuur verloopt de afbraaksnelheid niet optimaal. Bacteriën worden actiever naarmate de temperatuur stijgt. Globaal geldt dat bij elke 10 graden temperatuurstijging de activiteit verdubbeld. Dat betekent ook een verdubbeling van de afbraaksnelheid. Bacteriën zijn in staat om zich aan te passen aan de heersende temperatuur. Echter, vanaf 40 tot 50 °C wordt het te warm voor de bacteriën en neemt de activiteit weer af.

Voor het verwarmen van de bodem zijn verschillende technieken beschikbaar (bijvoorbeeld electroreclamatie of stoominjectie) waarmee de afbraak wordt gestimuleerd. Bij electroreclamatie wordt de bodem opgewarmd door middel het aanleggen van een elektrische spanning tussen elektroden in de bodem. Bij stoominjectie wordt de bodem verhit door het inbrengen van hete stoom.

Het verwarmen van de bodem in combinatie met een gerichte grondwateronttrekking is een saneringstechniek die vaak wordt toegepast in bronzones met hoge concentraties in de grond. De temperatuur in de bodem wordt hierbij opgevoerd tot meer dan 50 °C (en soms wel tot 100 °C). Hierdoor worden verontreinigingen beter oplosbaar en vluchtiger waardoor ze gemakkelijker uit de bodem kunnen worden verwijderd met fysische technieken. Deze hogere mobiliteit brengt echter ook een extra verspreidingsrisico met zich mee. Een goed ontwerp en intensieve monitoring is dus vereist.

Als de grootste vracht is verwijderd wordt de warmtetoevoer stopgezet. De bodem koelt dan langzaam af maar blijft gedurende enkele maanden nog redelijk warm. In deze afkoelende fase kan effectief gebruik worden gemaakt van de verhoogde biologische activiteit. Door het doseren van hulpstoffen in de bodem als deze de juiste temperatuur heeft bereikt (circa 35 °C of minder), wordt de biologische afbraak versneld.

In-situ chemische oxidatie

Bij in-situ chemische oxidatie wordt de verontreiniging afgebroken door de injectie van oxiderende stoffen als waterstofperoxide (Fenton's reagens), ozon of kaliumpermanganaat. Hierdoor wordt de verontreiniging chemisch geoxideerd. Bijkomend voordeel bij gebruik van waterstofperoxide of ozon is een toename van het zuurstofgehalte waardoor aërobe biologische afbraakprocessen gestimuleerd worden.

Voor verontreinigingen met gechloreerde verbindingen is het na chemische oxidatie wel noodzakelijk om een elektronendonor toe te voegen om weer anaërobe omstandigheden te verkrijgen voor afbraak van een eventuele restverontreiniging. Beënting kan daarnaast nodig zijn om het afbraakproces snel weer op gang te helpen.

Meerfasenextractie

Een drijfslaag met olie is niet biologisch te saneren en dient daarom middels een andere (in-situ) techniek verwijderd te worden. Een ontgraving heeft hiervoor de voorkeur omdat de drijfslaag zo grotendeels of volledig verwijderd kan worden. De pluim kan daaropvolgend middels een biologische in-situ sanering worden behandeld.

Een drijfslaag kan ook in-situ worden gesaneerd, bijvoorbeeld met meerfasenextractie. In de regel blijft hierbij echter altijd een restverontreiniging achter. Afhankelijk van de bodemeigenschappen en de eigenschappen van de verontreiniging kan per m³ bodem 10 tot 20 kg aan verontreiniging achterblijven. Ook in de smeerzone kunnen dergelijke concentraties aanwezig zijn. Een biologische in-situ sanering is na de drijfslaagsanering wel mogelijk maar niet gemakkelijk. Het systeem voor zuurstof- en nutriëntendosering zal in ieder geval

intensief moeten worden aangelegd om voldoende zuurstof en nutriënten te kunnen doseren. De aanwezigheid van een grote drijfslaag of smeerzone is daarom belangrijke risicofactor voor het succes van een biologische in-situ sanering.

Het opstarten van de biosparging in de laatste fase van de drijfslaagverwijdering kan zinvol zijn. Door de opgewekte turbulentie en dynamiek door persluchtinjectie kan het rendement tijdens de laatste fase van de drijfslaagverwijdering worden verbeterd. Het systeem voor de drijfslaagverwijdering dient na het opstarten van het persluchtinjectie nog enige tijd in stand te worden gehouden, omdat door persluchtinjectie ingesloten puur product kan worden vrijgemaakt. Als uit monitoring blijkt dat dit inderdaad optreedt kan het systeem voor drijfslaagverwijdering tijdelijk weer worden opgestart om de laatste resten mobiel puur product te verwijderen.



4

Vooronderzoek en inschatten van de haalbaarheid

Om de mogelijkheden voor gestimuleerde biologische afbraak vast te stellen kunnen verschillende onderzoeken worden uitgevoerd, zoals een grondwaterkarakterisatie, afbraaktesten en specifieke veldmetingen.

4.1 Grondwaterkarakterisatie

Een grondwaterkarakterisatie wordt uitgevoerd om de (redox)condities in het verontreinigde grondwater vast te stellen en te bepalen wat de eventuele limiterende factoren zijn voor biologische afbraak. Een karakterisatie wordt uitgevoerd met veldmetingen en laboratoriumanalyses op redoxparameters, verontreiniging en afbraakproducten en aanwezige bacteriën (zie tabel 4). Het uitvoeren van een grondwaterkarakterisatie is vooral bij anaërobe saneringen van verontreinigingen met VOCl en BTEX een voorwaarde om een betrouwbare haalbaarheidsinschatting te doen.

Tabel 4*Te onderzoeken parameters bij een grondwaterkarakterisatie*

	BTEX	VOCI
Redoxparameters		
Zuurstof	+	+
Nitraat	+	+
IJzer	+	+
Sulfaat en sulfide	+	+
Methaan	+	+
Redoxpotentiaal	+	+
Brandstof		
DOC/TOC	+	+
Nutriënten		
Ammonium	+	+
Fosfaat	+	+
Milieuparameters		
Zuurgraad (pH)	+	+
Geleidbaarheid	+	+
Afbraakproducten		
TRI, DCE, VC, etheen	-	+
TCA, DCA	-	+
Fenolen/benzoaten	+	-
Alkaliniteit (koolstofdioxide)	+	-
Specifieke verontreiniging afbrekende bacteriën	-	+

+ Noodzakelijke parameters om mee te nemen in grondwaterkarakterisatie.

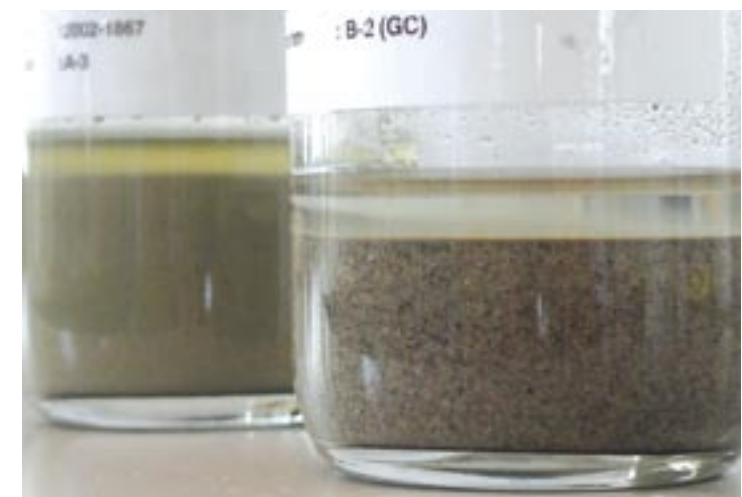
- Parameters die niet relevant zijn bij grondwaterkarakterisatie.

Intermezzo

Een grondwaterkarakterisatie kan eventueel worden uitgebreid met onder andere waterstofmetingen of isotopenanalyses. Deze analyses worden met name ingezet als extra bewijsvoering voor het optreden van natuurlijke afbraak en zijn minder van belang wanneer blijkt dat de afbraak gelimiteerd is en er stimuleringsmaatregelen benodigd zijn. Een nadere toelichting op deze technieken is opgenomen in het SKB-cahier 'Natuurlijke afbraak: het is niet niks'.

4.2 Afbraaktesten

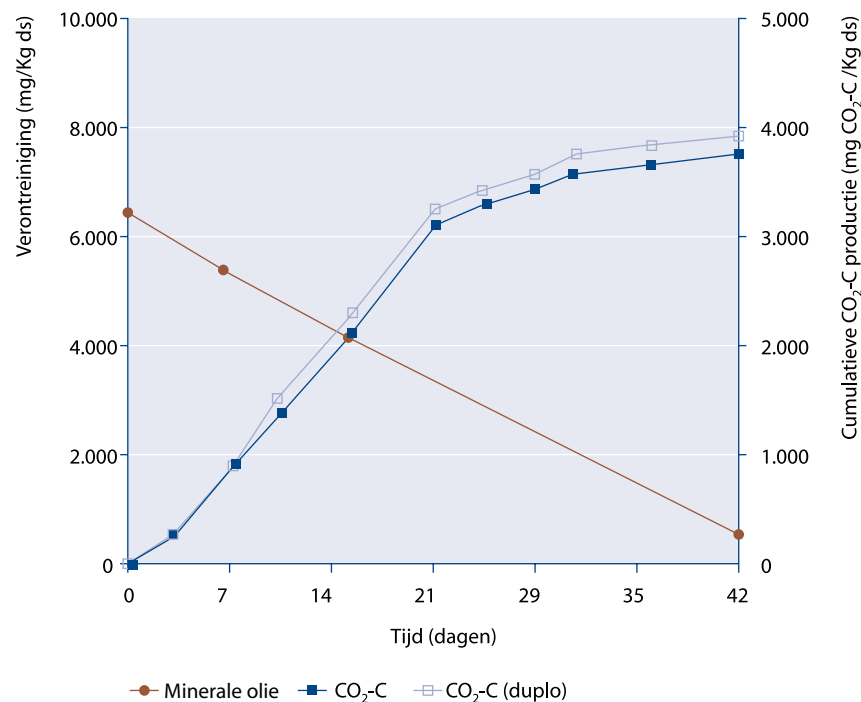
Bij afbraaktesten wordt de afbraak van een verontreiniging in het laboratorium gevolgd met behulp van representatieve grond- en grondwatermonsters van de verontreinigde locatie. Met een afbraaktest kan worden vastgesteld of de dosering van hulpstoffen leidt tot het gewenste afbraakproces. Tevens kan een indicatie van de afbraaksnelheid en de te bereiken eindconcentraties onder gestimuleerde omstandigheden worden verkregen.



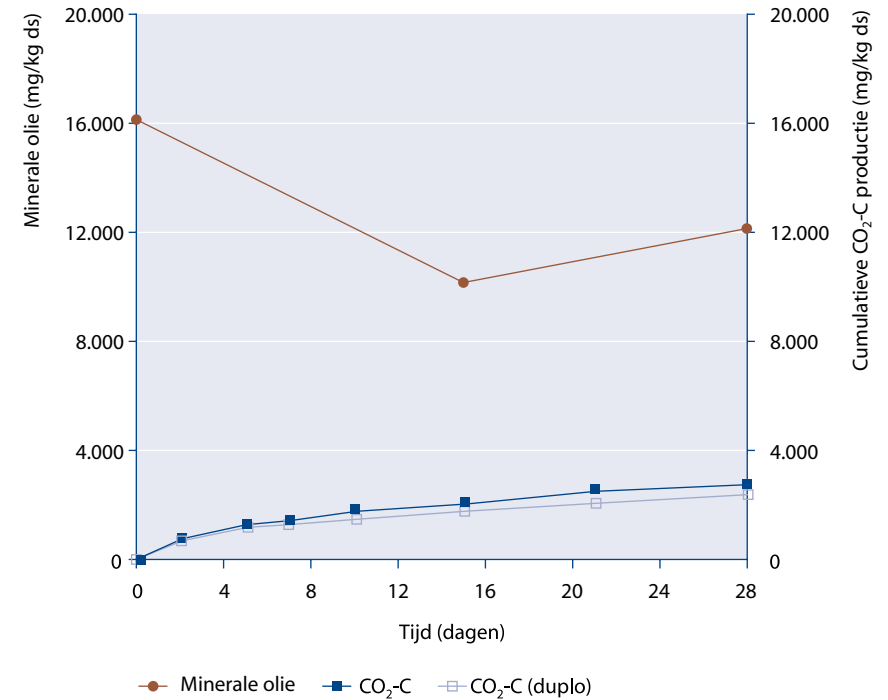
Figuur 13: Monsters voor een afbraaktest met verontreinigd grond en grondwater.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen aërobe en anaërobe afbraaktesten. Deze verschillen in de monstername, uitvoering en duur van het experiment van elkaar.

Bij **aërobe afbraaktesten** (voor minerale olie, BTEX of PAK's) is de blootstelling aan lucht bij monstername minder kritisch. De duur van het experiment is korter, omdat afbraak met zuurstof sneller verloopt. Een aërobe afbraaktest duurt ongeveer zes tot acht weken. Om de omstandigheden te optimaliseren worden naast zuurstof vaak nutriënten (stikstof en fosfaat) toegevoegd. Bij aërobe afbraaktesten van minerale olie en aromaten wordt naast de verontreiniging zelf ook het zuurstofverbruik en/of de CO₂ productie gemeten als bewijs voor biologische afbraak. In figuren 14 en 15 zijn voorbeelden gegeven van afbraaktesten waarbij respectievelijk de afbraak goed en slecht verloopt.



Figuur 14: Resultaten van goed lopende afbraaktest met minerale olie.



Figuur 15: Resultaten van afbraaktest waar nauwelijks afbraak optreedt.

Intermezzo

Aërobe afbraaktesten kunnen gecombineerd worden met een oliekarakterisatie. Oliekarakterisaties worden gebruikt om van een specifieke oliecontaminatie de oplosbaarheid, dampspanning en maximale biologische afbreekbaarheid te bepalen, alsmede de ketensamenstelling van de oliecontaminatie. Door vóór en na de afbraaktest een oliekarakterisatie uit te voeren kan inzicht worden verkregen in de samenstelling en stabiliteit van de restverontreiniging na afbraak.

Anaërobe afbraaktesten (voor BTEX of VOCl) worden in het laboratorium onder strikt anaërobe condities opgewerkt en gedurende vier tot zes maanden onder anaërobe condities geïncubeerd. De monstername dient daarom ook onder anaërobe omstandigheden plaats te vinden. Door aan de afbraaktesten hulpstoffen te doseren (nitraat of sulfaat voor aromaten en een elektronendonator voor VOCl verbindingen) en regelmatig te meten op de verontreiniging en eventueel afbraakproducten en verbruik van hulpstoffen kan het optreden van gestimuleerde afbraak en daarmee de haalbaarheid van de aanpak worden geverifieerd.

4.3 Veldmetingen en -proeven

Met de grondwaterkarakterisatie en afbraaktesten wordt niet vastgesteld of het op de locatie mogelijk is de hulpstoffen fysiek zodanig te doseren dat het verontreinigde bodempakket geheel hiermee wordt voorzien. Dit is echter wel een belangrijke voorwaarde voor het slagen van een in-situ sanering. Met name bij een heterogene bodemopbouw wordt daarom aanbevolen vooraf veldmetingen uit te voeren om de slagingskans en de benodigde dimensioneringsparameters te bepalen. Belangrijke dimensioneringsparameters zijn de doorlatendheid van de bodem (voor een onttrekkings- en infiltratiesysteem) en de straal van invloed, injectiedruk en -debiet van directe injecties. Om deze gegevens te verzamelen zijn verschillende veldmetingen beschikbaar, waarvan de doorlatendheidstest en de verspreidingsproef veel toegepast worden.

4.3.1 Doorlatendheidstest

Hiermee wordt de doorlatendheid van het bodempakket bepaald. Dit is een belangrijke ontwerpparameter voor een onttrekkings- en infiltratiesysteem, omdat het de doorspoeltijd en daarmee de tijdsduur voor het verspreiden van de hulpstoffen bepaalt.

Er zijn drie soorten doorlatendheidstesten: 'falling head', 'rising head' of 'steady-state':

- Voor een 'falling head' proef wordt (grond)water in een peilbuis gepompt en wordt middels een serie metingen van de grondwaterstand bepaald hoe snel het (grond)water wegzakt tot het

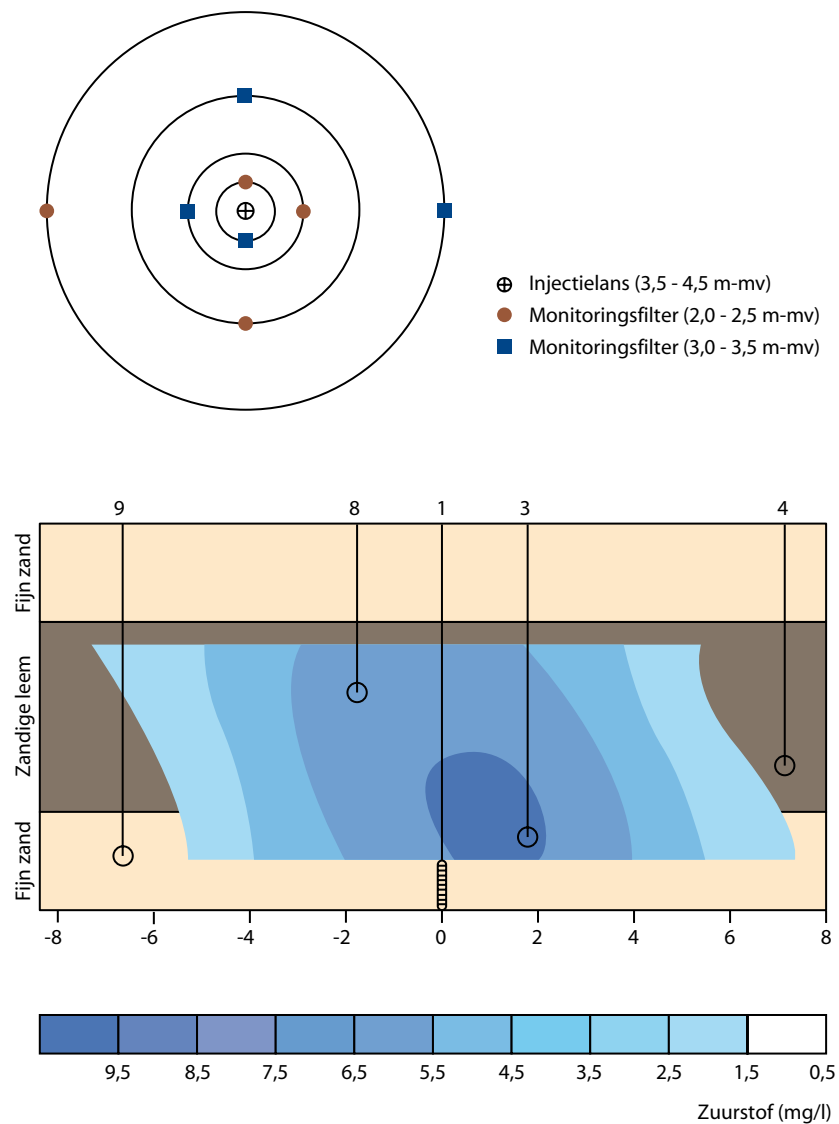
niveau van de oorspronkelijke grondwaterspiegel.

- Voor een 'rising head' proef wordt de peilbuis leeggepompt en wordt middels een serie metingen van de grondwaterstand bepaald hoe snel de grondwaterstand in de peilbuis weer toeneemt tot het oorspronkelijke niveau.
- Bij een 'steady-state' pompproef wordt met een vast debiet grondwater onttrokken en wordt de grondwaterstandsverlaging bij dit debiet bepaald.

4.3.2 Verspreidingsproef

Een verspreidingsproef wordt uitgevoerd door op een klein deel van de locatie een beperkt aantal injecties uit te voeren of onttrokken grondwater na verrijking met hulpstoffen weer te infiltreren en de verspreiding van de hulpstoffen (zuurstof, nutriënten of een elektronendonator) te monitoren. Hiervoor dient een aantal peilbuizen geplaatst te worden die tijdens of kort na de verspreidingsproef worden bemonsterd. In figuur 16 zijn de opzet en de resultaten van een zuurstof-injectieproef weergegeven.

Tijdens de uitvoering van de injecties wordt informatie verzameld over haalbare injectiedebieten en -drukken, zodat een inschatting gemaakt kan worden van de benodigde tijdsduur. Door analyses uit te voeren op de geïnjecteerde hulpstoffen en een eventueel toegevoegde tracer wordt de invloedsstraal van de injecties of de injectiefilters vastgesteld.



Figuur 16: Zuurstofprofiel bij een injectieproef.

Intermezzo

Bij het toepassen van biosparging wordt vaak vooraf een verspreidingsproef met perslucht uitgevoerd. Via het beschreven principe wordt gemeten of de zuurstof in de bodem zich goed verspreidt.

Deze verspreidingsproef kan worden gecombineerd met een stopproef. Nadat het zuurstofgehalte in de bodem een continu beeld laat zien, wordt bij een stopproef de injectie voor een langere periode stilgezet. Gedurende deze periode wordt de afname van de zuurstofconcentratie gevolgd om de mate van biologische activiteit te bepalen. Een snelle afname in de zuurstofgehalten is een indicatie dat de biologische activiteit hoog is. Bij een langzame afname is de biologische activiteit laag en kan verwacht worden dat de afbraaksnelheid van de verontreiniging ook laag is.

5

Samengevat

Gestimuleerde biologische afbraak biedt kansen voor bodemsanering. Het principe is eigenlijk eenvoudig. Door toediening van hulpstoffen worden in de bodem voor de bacteriën de juiste condities gecreëerd om verontreinigingen af te breken. Soms dienen bij de sanering van verontreinigingen met VOCI ook bacteriën te worden toegevoegd.

Afhankelijk van de verontreinigingssituatie en bodemeigenschappen zijn verschillende saneringsvarianten en doseringstechnieken denkbaar.

- In dit cahier zijn aërobe en anaërobe saneringsvarianten behandeld. Aërobe varianten - waarbij zuurstof wordt gedoseerd - zijn vooral geschikt voor de sanering van verontreiniging met minerale olie, aromaten (BTEX) en lage PAK's (naftaleen, fenanthreen). Voor de aanpak van VOCI worden doorgaans anaërobe technieken toegepast, waarbij koolstofbron wordt gedoseerd. Sulfaat/nitraat dosering kan worden toegepast als anaërobe techniek voor de aanpak van aromaten (BTEX).
- Ook zijn verschillende doseringstechnieken aan bod gekomen. Recirculatiesystemen met onttrekkings- en infiltratiefilters, directe injectie en horizontale drains. De toepassing is met name afhankelijk van de doorlatendheid van de bodem en bebouwingsdichtheid.

Gestimuleerde biologische afbraak kan goed worden gecombineerd met bronverwijderingstechnieken voor de aanpak van puur product, zoals chemische oxidatie, meerfasenextractie en ontgraving. Verwar-

ming van de bodem via electroreclamatie of stoominjectie is ook een aanvullende techniek die kan worden ingezet bij bronverwijdering.

Voor een succesvolle sanering middels gestimuleerde afbraak is het van belang dat de benodigde gunstige condities voor afbraak overal in het verontreinigde gebied aanwezig zijn. Dit vraagt vanzelfsprekend om een goede voorbereiding, installatie en bedrijfsvoering. Ervaring met en kennis over gestimuleerde biologische bodemsaneringen in het projectteam wordt daarom sterk aanbevolen.

In de voorbereidingsfase zijn verschillende methoden beschikbaar om de haalbaarheid van een bodemsanering met gestimuleerde biologische afbraak te bepalen, zoals oliekarakterisaties, afbraaktesten, grondwaterkarakterisaties en veldmetingen.

De monitoring op het saneringsverloop en randvoorwaarden voor het afbraakproces speelt een cruciale rol. Een goede monitoring geeft vroegtijdig inzicht in de noodzaak tot bijsturen van het proces om ervoor te zorgen dat een bodemsanering met gestimuleerde biologische afbraak succesvol kan worden afgerond.

Bodemsanering met gestimuleerde biologische afbraak is een kosten-effectieve saneringsmethode. Bovendien is het goed in te passen in een omgeving met intensieve bebouwing en/of infrastructuur. Bacteriën verwijderen de verontreinigingen daadwerkelijk uit het milieu. Problemen met bodemverontreinigingen worden zo dus natuurlijk opgelost!

B

Bijlagen



Figuur 17: Schematisatie aanleg horizontale drainage.

Voorbeeldprojecten

Grootschalige anaerobe sanering in het centrum van Uden

Wanneer een grondwaterverontreiniging een bedreiging vormt voor potentiële drinkwaterreservoirs zijn saneringsmaatregelen noodzakelijk. Dit geldt ook voor een omvangrijke grondwaterverontreiniging onder het centrum van Uden in Noord-Brabant. Daar heeft een chemische wasserij in het verleden gezorgd voor een grondwaterverontreiniging met Perchlooretheen (PER) over een oppervlak van meer dan 10 hectare en tot diepten van meer dan 15 meter onder het maaiveld.

Een conventionele sanering door middel van pump and treat zou inhouden dat grote hoeveelheden grondwater moesten worden onttrokken met als neveneffect een ongewenste daling van het grondwaterpeil. Om die reden is voor de locatie een full scale biologische in-situ sanering ontworpen.

Door de grote omvang van de locatie, ongeveer 1,5 miljoen kubieke meter bodemvolume, moest een effectieve en goedkope koolstofbron worden gebruikt om het biologische afbraakproces te stimuleren. Hiervoor is protamylasse geselecteerd, een bijproduct uit de aardappelverwerkende industrie. Injectie van protamylasse resulteerde op de locatie tot een effectieve en volledige reductieve dechlorering. Hierbij werd gebruik gemaakt van dechlorerende bacteriën die reeds van nature in de bodem aanwezig waren.

Voor het doseren van de koolstofbron werd gebruik gemaakt van veertien horizontale drains, die onder het centrum van Uden zijn aangebracht. De lengte van de drains varieert van 200 tot 400 meter.

Monitoringsresultaten laten zien dat tussen 2002 en 2005 volledige dechlorering van PER (enkele duizenden microgrammen per liter) is opgetreden tot etheen. Op verschillende plekken zijn nog gechloreerde omzettingproducten aanwezig. Als voorbereiding op de afronding van de actieve fase van de sanering wordt onderzocht of deze tussenproducten onder de huidige condities verder worden afgebroken.

Directe injectie in het centrum van Haarlem

In het centrum van Haarlem wordt een grondwaterverontreiniging met chloorethenen en aromaten gesaneerd met behulp van biologische afbraak. De afbraak van chloorethenen is gestimuleerd door het doseren van een protamylasse oplossing met directe injectie. De verontreiniging met aromaten breekt van nature af.

Na de dosering is begonnen met de bouw van een appartementencomplex. Terwijl de nieuwbouw in uitvoering was, werd de verontreiniging ondergronds door dechlorerende bacteriën afgebroken. Inmiddels zijn de appartementen bewoond en gaat de afbraak van chloorethenen in de bodem onverstoord door.

Door injectie van voedingsstoffen zijn de redoxcondities sterker gereduceerd en beschikken de dechlorerende bacteriën over voldoende koolstofbron. Beënting was niet nodig, omdat er voldoende dechlorerende bacteriën in de bodem aanwezig waren.

De verontreinigingen bevonden zich vooral in een veenpakket op een diepte van ongeveer 3 meter beneden maaiveld met bronconcentraties aan chloorethenen tot 300.000 µg/l. In totaal is 6.000 kg protamylasse oplossing toegediend tot een maximale diepte van 3,5 m -mv.

De protamylasse heeft zich na de injectie over het gehele pluimgebied verspreid. Het grondwater bevat één jaar na de injectie nog steeds

Figuur 18: Dosering met behulp van directe injectie.



ruim voldoende koolstofbron voor de volledige reductie van het grondwater en de afbraak.

Een dalende trend in concentraties chloorethenen, een stijgende dechloreringsgraad (maat voor de hoeveelheid VOCl die is afgebroken) en een toenemende concentratie etheen/ethaan tonen aan dat afbraak van de chloorethenen verontreiniging nog steeds optreedt.

Snelle biologische sanering met bioaugmentatie te Almelo

Bij een chemische wasserij in Almelo is een grondwaterverontreiniging met PER en TRI gesaneerd met behulp van gestimuleerde afbraak. Hierbij werd de biologische afbraak gestimuleerd door het doseren van specifieke verontreiniging afbrekende bacteriën, koolstofbron en nutriënten.

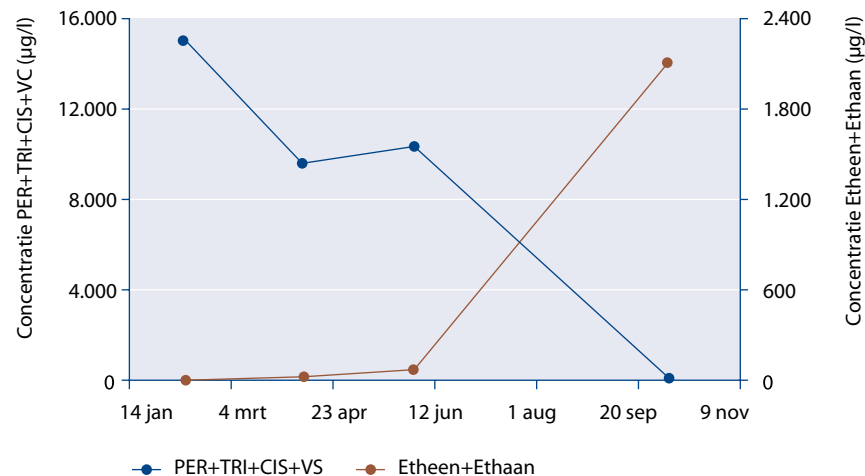
De dosering werd uitgevoerd met behulp van een recirculatiesysteem, die was aangesloten op een bovengrondse mobiele bio-reactor. Oorspronkelijk bevatte de kern hoge concentratie aan PER (15.000 µg/l) en in de pluimzone waren concentraties waargenomen van enkele honderden microgrammen per liter. Het verontreinigd bodemvolume bedroeg circa 12.000 m³ en de grondwaterverontreiniging bevond zich tot circa 10 meter beneden maaiveld.

De afwezigheid van geschikte voedingsstoffen, de afwezigheid van dechlorerende bacteriën en de aanwezigheid van sulfaat zorgden voor ongunstige omstandigheden voor natuurlijke afbraak. Daarom is via een recirculatiesysteem in korte tijd het verontreinigd gebied intensief doorspoeld. Het systeem werd na 4 maanden gestopt, waarna de biologische afbraak onder de geoptimaliseerde condities bleef verlopen totdat de verontreiniging volledig was afgebroken tot onschadelijke eindproducten.

Figuur 19: Bioreactor met dechlorerende bacteriën.



Na toediening van de voedingsstoffen en biomassa verliep de afbraak snel. Binnen acht maanden na de start van de sanering zijn de gechloro-reerde verbindingen bijna geheel afgebroken tot etheen (rendement is 99,2%). In figuur 2 is het resultaat van de sanering in de bron weergegeven. Ook in de pluim was sprake van een snelle biologische omzetting tot etheen en ethaan. Na 14 maanden was alle verontreiniging omgezet tot etheen.



Figuur 20: Het saneringsverloop in de bron.

Literatuur en websites

Artikelen, boeken en websites over biologische afbraak

- Van Agteren, M.H., S. Keuning en D.B. Janssen. 1998. Handbook on biodegradation and biological treatment of hazardous organic compounds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN 0-7923-4989-X.
- Chakraborty, R. en Coates, J.D. (2004). Anaerobic degradation of monoaromatic hydrocarbons. *Applied Microbiology and Biotechnology* vol. 64, pp. 437-446.
- Bradley, P.M. 2003. History and ecology of chloroethene biodegradation: a review. *Bioremediation Journal* vol. 7(2), pp. 81-109.
- www.bodemrichtlijn.nl

Handige protocollen en richtlijnen

- CUR/NOBIS, in-situ air sparging - a technical guide, NOBIS 95-1-13, version 1.1, February 2000.
- Een uitgebreide beschrijving van procesparameters die gebruikt kunnen worden bij het monitoring en volgen van een sanering middels gestimuleerde afbraak is opgenomen in VKB-protocol 6002 wat te verkrijgen is via de website van SIKB (www.sikb.nl).
- Met behulp van protocollen zoals het BOS-NA protocol, het D-NA protocol (beschikbaar op de website www.skbodem.nl (VOCl) of www.nicole.org (BTEX)) of het protocol van Wiedemeijer et al. (beschikbaar via de website www.epa.gov) kunnen de heersende redoxcondities worden afgeleid en kan worden vastgesteld wat de limiterende factoren voor biologische afbraak zijn.

Colofon

Auteurs

Niels van Ras
Bart Volkers

*Bioclear bv
Bioclear bv*

Lezersgroep

Twan Kanen
Hylke Simonides
Han de Kreuk
Mariëtte Schut
Vincent Breij
Marc van Someren
Tobi Venhorst

*Mourik Groot-Ammers
AVEBE U.A.
Biosoil
Provincie Drenthe
OTUS Projectmanagement / Advies BV
Gemeente Haarlem
Econsultancy bv*

Vormgeving

Van Lint Vormgeving, Zierikzee

Druk

Hoorens printing, Kortrijk

Beeldmateriaal

Bioclear bv
Van Lint Vormgeving

Oktober 2008