

Eindrapportage HIP-Pilot Actief te Amersfoort, stimuleren biologische afbraak VOCIs

Jasperien de Weert

1202190-003

Titel

Eindrapportage HIP-Pilot Actief te Amersfoort, stimuleren biologische afbraak VOCIs

Opdrachtgever

Sita Remediation BV

Project

1202190-003

Kenmerk

1202190-003-BGS-0001

Pagina's

92

Trefwoorden

VOCI-verontreiniging, substraatinjecties, Nutrolase/protamylasse, plantaardige olie

Samenvatting

Op de locatie "De Hoop" (voorheen bekend als "Actief") te Amersfoort is in het kader van het onderzoeksprogramma Holland In-situ Proeftuin (HIP) een pilot uitgevoerd. Het doel van de pilot was het stimuleren van de anaërobe afbraak van de aanwezige VOCI-verontreiniging door middel van shockload-injecties van substraat. Er zijn twee type substraten geïnjecteerd: Nutrolase (protamylasse) en sojaolie, waarbij is gekeken welk type het meest geschikt is. De aanwezige deepwell is gebruikt om de substraten na injectie te verspreiden. Aan de beide substraten is bromide toegevoegd als tracer om de verspreiding van de substraten te kunnen volgen.

Voorafgaande aan de injecties zijn extra monitoringspeilbuizen geplaatst tussen de injectiepunten en de deepwell en is de nulsituatie van het grondwater vastgelegd. Na injecties is het grondwater in de monitoringspeilbuizen achtmaal bemonsterd om de verspreiding van de substraten door de deepwell en de voortgang van gestimuleerde biologische afbraak te monitoren.

Uit de resultaten komt naar voren dat de Nutrolase zich voornamelijk verspreidt heeft in het middeldiepe grondwater, tussen 4 en 7 m-mv. Hierdoor worden de condities met name in de eerste 54 dagen na injectie zeer gunstig voor reductieve dechlorering. De temperatuur van het grondwater in deze periode is ook relatief hoog ten opzichte van de gemiddelde grondwatertemperatuur in Nederland, wat gunstig is voor biologische afbraak. Door deze gunstige condities zijn de aanwezige *Dehalococcoides*-bacteriën hier zeer sterk gegroeid van 10^1 tot 10^5 genkopiën/ml grondwater en vindt volledige afbraak plaats tot etheen. Na 54 dagen vanaf de injectie worden de omstandigheden minder gunstig en nemen de opgeloste organische stof- (DOC) en waterstofconcentraties af in de monitoringspeilbuizen. De mogelijke oorzaak hiervan is dat de Nutrolase (na het stopzetten van de actieve onttrekking) met de natuurlijke grondwaterstroming meestroomt, weg van de stroomopwaarts gelegen monitoringspeilbuizen. In de peilbuizen die stroomafwaarts zijn geplaatst blijkt namelijk dat er na 331 dagen na injectie in het middeldiepe grondwater nog ruim verhoogde DOC- en waterstofconcentraties aanwezig zijn en hier het substraat dus nog werkzaam is. Na 415 dagen na injectie zijn de DOC-gehalten nog wel verhoogd maar zijn de waterstofconcentraties tot onder de maximale achtergrondconcentratie van 1,5 nM gezakt. Gedurende de pilot is de Nutrolase niet of nauwelijks verspreid in het ondiepe (2 – 4 m –mv) en diepe grondwater (7 – 10 m –mv) ondanks dat het hier wel geïnjecteerd is.

De geïnjecteerde sojaolie heeft zich niet verspreid in het grondwater en de grondwateronttrekking heeft de verspreiding niet kunnen stimuleren. In de monitoringspeilbuizen zijn geen aanwijzingen gevonden dat het substraat deze heeft bereikt en de geochemische condities zijn niet verbeterd voor reductieve dechlorering. De toegevoegde tracer is wel in verhoogde concentraties aangetoond ten opzichte van de nulsituatie. Echter, omdat DOC niet in verhoogde concentraties is waargenomen is bromide geen goede tracer gebleken voor sojaolie. Blijkbaar ontmengen de componenten van de geïnfilterde oplossing in de bodem zodat de bromide zich wel verspreidt. De bacterie-aantallen van *Dehalococcoides* zijn eveneens niet toegenomen en er vindt geen vorming van etheen plaats. Ter plaatse van de sojaolie-injectie is de sojaolie zintuiglijk waargenomen en is 331 dagen na injectie een verhoogde DOC- en waterstofconcentratie gemeten. Tevens is de






Titel

Eindrapportage HIP-Pilot Actief te Amersfoort,
stimuleren biologische afbraak VOC's

Opdrachtgever Sita Remediation BV	Project 1202190-003	Kenmerk 1202190-003-BGS-0001	Pagina's 92
---	-------------------------------	--	-----------------------

redoxpotentiaal gunstig voor reductieve dechlorering. Deze condities zijn echter niet meer waargenomen na 415 dagen na injectie.

De goede werking van de Nutrolase op de locatie en het feit dat het na 331 dagen nog aanwezig en actief is, biedt mogelijkheden om dit substraat te gebruiken in een bioscherm als beheersmaatregel om verspreiding van VOC's tegen te gaan. Het zou ook als saneringsmaatregel toegepast kunnen worden om de restverontreiniging op de locatie in de bronzone te verwijderen. Er dient wel gekeken te worden naar de injectiewijze van het substraat om in alle grondwatertrajecten goede verspreiding te krijgen van de Nutrolase. Sojaolie blijkt niet geschikt als bioscherm of als andere toepassing voor het stimuleren van de reductieve dechlorering op deze locatie.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	aug. 2010	Jasperien de Weert		Nanne Hoekstra			
2	Dec. 2010	Jasperien de Weert		Nanne Hoekstra		Hilde Passier	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Doelstellingen	1
1.2 Kennis en onderzoeksvragen	2
1.3 Rapportages	2
2 Achtergrondinformatie	5
2.1 Reductieve dechlorering	5
2.2 Substraten	8
2.2.1 Nutrolase	8
2.2.2 Sojaolie	8
3 Locatie	11
3.1 Locatieomschrijving	11
3.2 Verontreinigings situatie en beheersmaatregelen	11
3.3 Bodemopbouw en grondwaterstroming	13
3.3.1 Regionale bodemopbouw	13
3.3.2 Lokale bodemopbouw	13
3.3.3 Grondwaterstromingstichting	14
3.3.4 Stromingssnelheid grondwater	15
4 Opzet pilot	17
4.1 Monitoringspeilbuizen	17
4.2 Substraatinjecties	18
4.3 Monitoring	19
5 Resultaten en discussie Nutrolase	23
5.1 Zintuiglijke waarnemingen	23
5.2 Algemene parameters: pH, Ec en temperatuur	24
5.3 Bromidetracer	25
5.4 DOC en waterstof	27
5.5 Redoxparameters	30
5.5.1 Redoxpotentiaal	30
5.5.2 Opgelost zuurstof, nitraat, sulfaat, ijzer en mangaan	32
5.6 Nutriënten	34
5.7 <i>Dehalococcoides</i> -bacteriën en VC-reductases	35
5.8 Verontreinigingssituatie en dechloreringsgraad	36
5.8.1 Verontreinigingssituatie	36
5.8.2 Dechloreringsgraad	39
6 Resultaten en discussie sojaolie	41
6.1 Zintuiglijke waarnemingen	41
6.2 Algemene parameters: pH, Ec en temperatuur	41
6.3 Bromidetracer	42
6.4 DOC en waterstof	44
6.5 Redoxparameters	46
6.5.1 Redoxpotentiaal	46
6.5.2 Opgelost zuurstof, nitraat, sulfaat, ijzer en mangaan.	47

6.6	Nutriënten	48
6.7	<i>Dehalococcoides</i> -bacteriën en VC-reductases	49
6.8	Verontreinigingssituatie en dechloreringsgraad	50
6.8.1	Verontreinigingssituatie	50
6.8.2	Dechloreringsgraad	52
7	Evaluatie pilot en beschrijving mogelijke saneringsvarianten	53
7.1	Werking van de substraten	53
7.2	Verspreiding van de substraten	54
7.3	Nalevering	55
7.4	Mogelijke varianten vervolgtraject	56
7.4.1	Nutrolase als bioscherm	57
7.4.2	Substraatinjecties in bronzone	59
7.4.3	Combinaties van saneringsmaatregelen	61
8	Conclusies	63
9	Aanbevelingen	65
	Bijlage(n)	
A	Situatietekeningen	A-1
B	Boorstaten	B-1
C	Beschrijving substraatinjectie door Sita Remediation BV	C-1
D	Samenstelling Nutrolase	D-1
E	Monitoringsdata	E-1

1 Inleiding

Op de locatie "De Hoop (voorheen bekend als Actief), gelegen op het industrieterrein De Isselt in Amersfoort is een in-situ pilot uitgevoerd in het kader van Holland In-situ Proeftuin (HIP). Het HIP-programma is een initiatief van het Uitvoerend Bedrijfsleven-SKB en TNO. Dit programma is uitgevoerd van 2006 tot 2010 en werd gesteund door het Ministerie van Economische zaken, SKB, het Ministerie van VROM, 10 UB-SKB bedrijven en bedrijven en grootsaneerders (o.a. SBNS, HBR).

De doelstellingen van het programma waren:

- Het wegnemen van technologische en niet-technologische knelpunten die de toepassing van een duurzame manier van bodemsaneren (veelal via in-situ oplossingen) belemmeren;
- Het vertrouwen in in-situ technieken in de markt vergroten.

Voor de start van de pilot was er op de locatie een beheersmaatregel in werking door middel van het onttrekken van grondwater via twee deepwells; A en B. Het onttrokken grondwater werd gezuiverd in een grondwaterzuiveringsinstallatie. Aanleiding om alternatieven voor de sanering te overwegen vormde de noodzakelijke vervanging van de grondwaterzuiveringsinstallatie. Bovendien zijn er in de loop van de jaren technieken ontwikkeld die een verontreiniging met vluchtige organische chloorkoolwaterstoffen (VOCs) effectiever kunnen saneren dan doormiddel van grondwateronttrekking en zuivering. Eén van deze technieken is de injectie van substraat waarbij de anaërobe afbraak van de VOC-verontreiniging wordt gestimuleerd; ook in verontreinigingskerngebieden met hoge concentraties.

1.1 Doelstellingen

De saneringspilot die uitgevoerd is op de locatie in Amersfoort, bestaat uit het stimuleren van biologische afbraak van de aanwezige VOCs via het injecteren van een overdosis (shockload) elektronendonator (substraat). Hiervoor zijn twee typen substraat gebruikt; een goed wateroplosbaar snelwerkend substraat en een slecht wateroplosbaar langdurige werkend substraat.

De eerste doelstelling van de pilot is vast te stellen of de afbraakcondities op de locatie geoptimaliseerd kunnen worden voor volledige biologische afbraak van de aanwezige VOCs door de injectie van substraat. De tweede doelstelling is te bepalen welk type substraat het meest geschikt is om de biologische afbraak van de VOCs te stimuleren. De aanwezige grondwateronttrekking, deepwell A, is gedurende de eerste weken na injectie ingeschakeld geweest ten behoeve van de derde doelstelling: te bekijken of de verspreiding van de substraten doormiddel van grondwateronttrekking bespoedigd kan worden en of een combinatie van substraatinjectie en actieve verspreiding door middel van grondwateronttrekking zinvol is.

De resultaten van de pilot moeten inzicht geven of grondwateronttrekking beëindigd kan worden en overgegaan kan worden op een bioscherm om de verspreiding van de VOCs tegen te gaan. Met de resultaten kan ook duidelijk worden of een sanering van de gehele

locatie plaats kan vinden om de restverontreiniging VOCs met behulp van gestimuleerde biologische afbraak te verwijderen en de sanering eindig te maken.

1.2 Kennis en onderzoeksvragen

Om de doelstellingen van de pilot te halen zijn voorafgaande aan de pilot twee centrale kennisvragen opgesteld

- 1 Welk type substraat is geschikt voor toepassing bij shock-loadinjecties in een homogene bodem met een redelijk doorlatende laag met matig fijn zand en een slecht doorlatende sterk zandig, matig veenhoudende leemlaag?
- 2 Kan de saneringstechniek shock-loadinjectie ook kosteneffectief gebruikt worden als bioscherm?

Om deze centrale kennisvragen te kunnen beantwoorden zijn per kennisvraag enkele onderzoeksvragen geformuleerd:

Type substraat:

- 1a: Vindt verspreiding van de substraten plaats?
- 1b: Wordt de verspreiding gestimuleerd door diepwell A?
- 1c: Veranderen de geochemische condities dusdanig dat geschikte omstandigheden ontstaan voor (volledige) reductieve dechlorering?
- 1d: Wordt de groei van de bacteriën die betrokken zijn bij de volledige reductieve dechlorering gestimuleerd?
- 1e: Vindt er volledige afbraak van de aanwezige VOCs plaats?

Bioscherm:

- 2a: Hoe lang is het substraat werkzaam?
- 2b: Wat is de invloed van de natuurlijke grondwaterstroming op het substraat?

In de loop van de pilot zijn op basis van de resultaten de volgende aanvullende onderzoeksvragen opgesteld om de eerder gestelde kennisvragen bevredigend te kunnen beantwoorden:

Nutrolase

- 1a: Wordt de geconstateerde afname van DOC en waterstof ter plaatse van peilbuis A01 en A02 veroorzaakt door afbraak van het substraat of door verdunning/verspreiding met de grondwaterstroming?
- 2a: In hoeverre is de Nutrolase nog aanwezig nabij de plek waar het geïnjecteerd is?
- 3a: Heeft de Nutrolase zich stroomafwaarts verspreid vanaf de injectiepunten en is dit onder invloed van de natuurlijke grondwaterstroming uniform gebeurd via de bodemlaag waarin de verontreinigingen aanwezig zijn en het substraat geïnjecteerd is?
- 4a: Wat voor een effect heeft de Nutrolase stroomafwaarts van de injectiepunten veroorzaakt?

Sojaolie

- 5a: In welke bodemlagen is de sojaolie terecht gekomen na injectie en wat zijn de effecten van de sojaolie?

1.3 Rapportages

Gedurende de pilot is de voortgang van de biologische afbraak van de VOCs intensief gemonitord. Dit is gebeurd door middel van veldmetingen en analyses op het grondwater in monitoringspeilbuizen die ten behoeve van de pilot zijn geplaatst. Voorafgaande aan de

injecties is de nulsituatie vastgelegd om de omstandigheden na de injecties van de substraten te kunnen vergelijken met de situatie ervoor. De resultaten van het nulsituatieonderzoek staan uitgebreid beschreven in het rapport "Nulsituatieonderzoek HIP-pilot Actief te Amersfoort; stimuleren biologische afbraak VOCs. (Deltares, rapportnummer 0910-0248, oktober 2009). Tijdens de pilot is via de reguliere monitoring gecontroleerd of er geen onacceptabele verspreiding van VOCs buiten de terreingrenzen heeft plaatsgevonden. De resultaten van deze reguliere monitoring van het grondwaterbeheerssysteem staan beschreven in het rapport "Nazorgstatus 2009 Actief te Amersfoort" (Wareco; rapportnummer AA36R, RAP 20100527, 27 mei 2010).

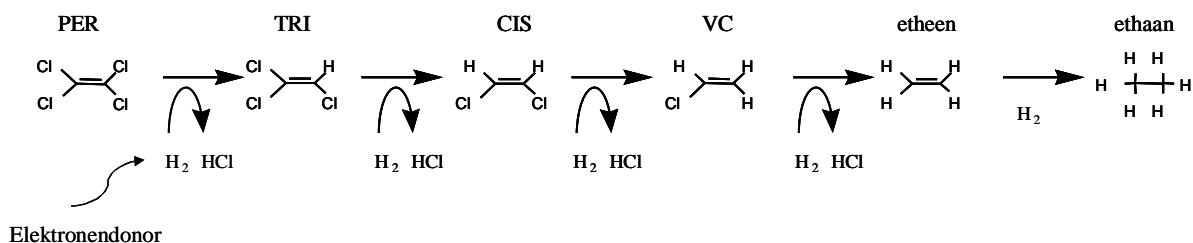
In deze rapportage worden de volgende aspecten behandeld:

- Achtergrondinformatie over reductieve dechlorering en relevante geochemische parameters (hoofdstuk 2);
- Locatiebeschrijving met bodemopbouw en grondwaterstroming (hoofdstuk 3);
- Opzet pilot en uitgevoerde substraatinjecties (hoofdstuk 4);
- Resultaten en discussie Nutrolase (hoofdstuk 5) en sojaolie (hoofdstuk 6);
- Evaluatie en saneringsvarianten (hoofdstuk 7);
- Conclusies (hoofdstuk 8);
- Aanbevelingen vervolgaanpak (hoofdstuk 9).

2 Achtergrondinformatie

2.1 Reductieve dechlorering

In de bodem vinden veel biologische en chemische reacties plaats. Een deel hiervan bestaat uit redoxreacties. Dit zijn reacties waarbij door de ene stof (de reductor) elektronen afgestaan worden aan een andere stof (de oxidator). Gechloreerde koolwaterstoffen kunnen als elektronenacceptor worden gebruikt, door bacteriën, die onder sulfaatreducerende en methanogene omstandigheden actief zijn. Bij dit proces, dat reductieve dechlorering wordt genoemd, wordt een chlooratoom van het koolstofskelet afgesplitst en vervangen door waterstof. In Figuur 2.1 is als voorbeeld de reductieve dechlorering van tetrachlooretheen (PCE of PER) weergegeven.



Figuur 2.1 Anaërobie afbraak van PER door middel van reductieve dechlorering

In principe geldt bij deze dechloreringsreacties dat hoe minder chlooratomen het molecuul bevat, hoe minder energie de afsplitsing van een chlooratoom oplevert. De afbraak van PER naar trichlooretheen (TCE of TRI) zal dus meer energie opleveren dan de afbraak van TCE naar 1,2-cis-dichloroethaan (cis-DCE). Onder sterk gereduceerde methanogene omstandigheden en de aanwezigheid van voldoende elektronendonoren kunnen deze gechloreerde ethenen zoals PCE en cis-DCE in principe helemaal worden gereduceerd tot etheen en ethaan. In het veld zijn de redox- en geochemische condities vaak niet optimaal en vindt er ophoping van cis-DCE of vinylchloride (VC) plaats. Omdat de volledige afbraak van chloorethenen tot etheen en ethaan gebeurt onder methanogene omstandigheden dient de redoxpotential op de locatie laag genoeg te zijn zodat deze processen plaats kunnen vinden.

In de bodem treden veel redoxreacties gelijktijdig op die samen de redoxpotential bepalen. Tabel 2.1 geeft een overzicht van belangrijke redoxreacties die plaatsvinden in de bodem. Deze kunnen zowel van links naar rechts (reductiereactie) als van rechts naar links plaatsvinden (oxidatiereactie). Naar beneden toe worden reductiereacties (van links naar rechts) steeds moeilijker.

Tabel 2.1 Redoxreacties die veelvuldig in de bodem plaatsvinden.

$O_2 + 4H^+ + 4e^-$	\leftrightarrow	$2H_2O$	Zuurstofreductie
$NO_3^- + 10H^+ + 8e^-$	\leftrightarrow	$NH_4^+ + 3H_2O$	Nitraatreductie
$Fe^{3+} + e^-$	\leftrightarrow	Fe^{2+}	Ijzerreductie
$SO_4^{2-} + 8H^+ + 8e^-$	\leftrightarrow	$S^{2-} + 4H_2O$	Sulfaatreductie
$CO_2 + 8H^+ + 8e^-$	\leftrightarrow	$CH_4 + 2H_2O$	Methaanvorming

Organisch stof in de bodem dient als elektronendonor. Het wordt geoxideerd waarbij elektronen vrijkomen. Componenten als zuurstof, nitraat, sulfaat en CO_2 zijn

elektronenacceptoren die de vrijgekomen elektronen kunnen opnemen. Deze componenten zullen worden gereduceerd. Omdat de reactie met zuurstof gemakkelijker verloopt dan met nitraat zal eerst het zuurstof gereduceerd worden en daarna pas nitraat, etc.

De redoxpotentiaal die in het veld wordt gemeten is de som van alle redoxpotentialen van de afzonderlijk optredende redoxreacties. Om de juiste redoxpotentiaal te bereiken voor reductieve dechlorering moeten er niet te veel processen in de bodem plaatsvinden die de redoxpotentiaal verhogen zoals de reductie van zuurstof en nitraat. Hiervoor is het belangrijk om inzicht te hebben in de concentraties van de redox-gevoelige macrocomponenten zoals zuurstof, nitraat, nitriet, opgelost ijzer, mangaan, sulfaat, sulfide, methaan, etc. Deze macrochemische parameters komen van nature in de bodem voor en bepalen het geochemische systeem.

Voor de reductieve dechlorering van VOCs is een elektronendonor nodig. Organisch stof, zoals ook wordt toegediend met de injectie van de substraten, kan als elektronendonor dienen. Een maat voor de hoeveelheid aanwezige donor is opgeloste organische koolstof (DOC). Echter, het gemeten DOC-gehalte gaat over het totaal aan DOC en verteld niets over de beschikbaarheid van deze donor. Het kan voorkomen dat er hoge DOC-gehalten aanwezig zijn maar dat dit niet beschikbaar is voor afbraak. Beschikbare DOC wordt omgezet in waterstof, dat vervolgens wordt gebruikt in het reductieve dechloreringsproces (Figuur 2.1). Waterstofconcentraties zijn dus een goede maat om inzicht te krijgen in de beschikbaarheid van de aanwezige elektronendonor.

Om chloorethenen om te zetten, zijn bacteriën nodig om dit afbraakproces uit te voeren. De afbraak van PCE naar cis-DCE kan uitgevoerd worden door diverse soorten bacteriën, zoals *Dehalobacter* en *Desulfobacterium*. Er zijn echter maar weinig bacteriën die in staat zijn om PCE volledig af te breken naar etheen en/of ethaan. De bacteriën die dat kunnen behoren tot het *Dehalococcoides* genus. Echter niet alle soorten *Dehalococcoides*-bacteriën zijn in staat VC verder af te breken tot etheen. Voor de laatste cruciale afbraakstap moeten de bacteriën een gen hebben dat codeert voor enzymen die betrokken zijn bij de omzetting van VC naar etheen via reductieve dechlorering. Dit zijn de zogenaamde VC-reductases. Om te bepalen of de juiste bacteriën aanwezig zijn en of ze in het bezit zijn van het juiste gen worden genetische analyses uitgevoerd om de mogelijkheid voor dechlorering vast te stellen.

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de verschillende parameters die de omstandigheden voor reductieve dechlorering beïnvloeden met daarbij de randvoorwaarden voor de ideale situatie voor de biologische afbraak van VOCs. De genoemde getallen zijn op basis van ervaring en zijn een indicatie voor ideale omstandigheden. Ideale omstandigheden komen op een locatie zelden voor, maar dat wil niet zeggen dat reductieve dechlorering dan niet mogelijk is. Deze waarden dienen dan ook gebruikt te worden als richtlijn. Het kan echter wel zijn dat de reductieve dechlorering geremd wordt door een of meerdere parameters zoals aanwezig nitraat en sulfaat.

Tabel 2.2 Overzicht van bodemparameters die van invloed zijn op reductieve dechlorering met de randvoorwaarden voor een ideale toestand.

Parameter	Randvoorwaarden	Toelichting
<i>Algemeen</i>		
Temperatuur	12 - 20 °C	Hogere temperaturen zijn gunstig voor reductieve dechlorering.
zuurgraad (pH)	5,5 - 8	Kan beïnvloed worden door aanpassing elektronendonor.
<i>Redox parameters</i>		
Redoxpotentiaal(mV)	< - 250	Vanaf een redoxpotentiaal van 150 mV kan enige reductieve dechlorering optreden.
Opgelost zuurstof	< 0,5 mg/l	Zuurstof dient afwezig te zijn. Met de beschikbare analysemethode betekent dat < 0,5 mg/l
Nitraat, nitriet	< 1 mg/l	Hogere concentraties remmen de reductieve dechlorering omdat eerst nitraat wordt gebruikt als elektronenacceptor in plaats van de VOCs.
Sulfaat	< 1 - 20 mg/l	Ruim concentratietraject omdat in bodem verschillende condities naast elkaar kunnen bestaan. Hogere concentraties remmen de reductieve dechlorering omdat eerst sulfaat wordt gebruikt als elektronenacceptor in plaats van de VOCs.
Sulfide	> 0,1 mg/l	De aanwezigheid van sulfide geeft een indicatie van een reeds redelijk lage redoxpotentiaal
IJzer (Fe)	> 1 mg/l	De aanwezigheid van ijzer geeft indicatie van reeds lage redoxpotentiaal
Methaan	> 1 mg/l	De aanwezigheid van methaan geeft indicatie van een voldoende lage redoxpotentiaal
<i>Elektronendonor (evenwichtsconcentraties)</i>		
DOC	> 20 mg/l	Aanwezige elektronendonor. Zowel beschikbaar als niet beschikbaar voor micro-organismen
Waterstof	> circa 2 à 5 nM	Uiteindelijke beschikbare elektronendonor; relatief hoge concentraties nodig voor volledige dechlorering
<i>Nutriënten (voedingsstoffen voor celbouw)</i>		
Ammonium	Verhouding C:N = 5:1	Voor celgroei is koolstof en ammonium nodig in de verhouding 5:1. Er wordt vanuit gegaan dat 10% tot 20% van het DOC wordt gebruikt voor celgroei.
Fosfaat	Verhouding C:P = 50:1	Voor celgroei is koolstof en fosfaat nodig in de verhouding 50:1. Er wordt vanuit gegaan dat 10% tot 20% van het DOC wordt gebruikt voor celgroei.
<i>Verontreiniging</i>		
Afbraakproducten	aanwezig	Dit betreft vooral VC en etheen, omdat dat aangeeft, dat de reductieve dechlorering volledig is
<i>Microbiologie</i>		
Dehalococoides	> 10 ³	Bij afwezigheid van deze bacteriën kan volledige reductieve dechlorering niet plaatsvinden
VC-reductase	> 10 ³	Bij afwezigheid van deze enzymen kan de afbraak van VC naar etheen en/of ethaan niet plaatsvinden

Naast de monitoring van parameters die de reductieve dechlorering beïnvloeden of inzicht geven in de geochemische omstandigheden is analyse op VOCs en de afbraakproducten etheen en ethaan relevant. Op basis hiervan kan worden bepaald of volledige reductieve dechlorering optreedt. Eveneens kan uit de gemeten concentraties de dechloreringsgraad berekend worden. Een toename van de dechloreringsgraad betekent dat de afname van de VOCs komt door de afbraak van de VOCs en niet door bijvoorbeeld verdunning. Voor de berekening van de dechloreringsgraad wordt er vanuit gegaan dat PCE de oorspronkelijke verontreiniging is en dat de andere aanwezige VOCs hieruit zijn ontstaan. De formule die wordt gebruikt bij de berekening is de volgende:

$$\frac{[\text{TCE}] + 2[\text{DCE}] + 3[\text{VC}] + 4[\text{Etheen}] + 4[\text{Ethaan}]}{4 \cdot ([\text{PCE}] + [\text{TCE}] + [\text{DCE}] + [\text{VC}] + [\text{Etheen}] + [\text{Ethaan}])} \cdot 100\%$$

Per tijdstip wordt met deze formule de dechloreringsgraad bepaald. In de teller staan het aantal afgesplitste chlooratomen. Bij TCE dat ontstaat uit PCE is één atoom afgesplitst, bij cis-DCE twee atomen, bij VC drie atomen etc. In de noemer staan het totaal aantal chlooratomen dat in het grondwater aanwezig is veroorzaakt door de verontreiniging op basis van de 4 chlooratomen die in het PCE-molekuul aanwezig zijn.

2.2 Substraten

2.2.1 Nutrolase

Een van de twee als elektronendonor gebruikte substraten is Nutrolase (protamylasse). Nutrolase is een extract uit aardappelvruchtwater. Het is een viskeuze vloeistof die goed wateroplosbaar is. Het substraat is rijk aan eiwitten, zuren, suikers en zouten en bevat nutriënten zoals ammonium en fosfaat (zie Bijlage D) die micro-organismen nodig hebben voor de groei. Doordat het goed wateroplosbaar is, kan het zich eenvoudig met het grondwater verspreiden en is het gemakkelijk beschikbaar voor de micro-organismen.

Er kunnen verschillende hoeveelheden protamylasse geïnjecteerd worden. Er kan gekozen worden om op basis van de hoeveelheid aanwezige VOCs en andere verbindingen, zoals nitraat en sulfaat die ook substraat verbruiken bij de reductie, uit te rekenen hoeveel protamylasse er nodig is. Het risico hierbij is dat er te weinig substraat is bij onverwachte processen die ook substraat verbruiken. Bovendien is er minder substraat en heeft het een minder lange werkingsduur. Er kan ook gekozen worden om shockload-injecties te doen waarbij een overdosis substraat wordt geïnjecteerd. De voordelen hiervan zijn dat er meer substraat beschikbaar is voor onverwachte processen en de grote voorraad een langere werkingsduur garandeert.

Het direct injecteren van protamylasse is al op een aantal locaties met succes toegepast voor de stimulering van de reductieve dechlorering van de chloorkoolwaterstoffen. Op de locatie van een voormalige schaatsenfabriek in IJlst is met succes een sanering met protamylasse uitgevoerd die met shock-loadinjecties was toegediend (SKB, rapport PT5400, 2007).

2.2.2 Sojaolie

Als slecht wateroplosbaar substraat is een plantaardige olie geschikt en voor deze pilot is er gekozen voor sojaolie aangezien dit relatief goedkoop is en al veelvuldig wordt gebruikt als elektronendonor. Met name in de Verenigde Staten wordt sojaolie regelmatig toegepast om anaërobie afbraak van VOCs te stimuleren bij in-situ saneringen (AFCCE-rapport "Protocol for in situ bioremediation of chlorinated solvents using edible oil", AFD-071203-9, 2007). De

olie wordt eerst gefermenteerd naar waterstof en lage vetzuren zoals lactaat en acetaat. Deze vetzuren dienen vervolgens als koolstof- en energiebron voor de micro-organismen in het proces van reductieve dechlorering. Eveneens kan de gevormde waterstof gebruikt worden voor de reductieve dechlorering. Sojaolie is slecht wateroplosbaar, waardoor het langzaam afbreekt en het daardoor een langdurig werkende koolstofbron kan vormen. De olie kan onbewerkt geïnjecteerd worden, maar vaak wordt er voorafgaande aan de injectie een emulsie van gemaakt met emulgatoren (surfactants) die aan de olie worden toegevoegd. De olie bevindt zich dan in kleine druppeltjes in de vloeistof waardoor het tijdens het injecteren in principe over grotere afstand verspreid kan worden, de injectie over het algemeen gemakkelijker gaat en de olie niet direct op het grondwater gaat drijven, hetgeen de te behandelen bodemzone ernstig zou verkleinen.

Door de langdurige werking hoeft niet regelmatig opnieuw substraat geïnjecteerd te worden. Bovendien zal het zich door de hoge viscositeit langzaam met het grondwater verspreiden waardoor het niet van de locatie wegstroomt. Dit heeft echter als nadeel dat de dosering een kleiner bereik heeft.

3 Locatie

3.1 Locatieomschrijving

De locatie is gelegen op het industrieterrein “De Isselt” te Amersfoort. Het terrein heeft een oppervlakte van circa 1,1 hectare en wordt gebruikt als bedrijfslocatie voor de chemische wasserij “De Hoop”. Op circa 250 m noordelijk van de bedrijfslocatie bevindt zich de rivier De Eem. Een overzichtsfoto van de terreinsituatie is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Terreinsituatie, met de saneringslocatie binnen de rode lijn.

3.2 Verontreinigings situatie en beheersmaatregelen

Op het bedrijfsterrein zijn door de voormalige wasserij Actief vanaf 1968 tapijten en textiel chemisch gereinigd en zijn er (textiel)verwerkzaamheden verricht. Voor de uitvoering van deze werkzaamheden werd per maand circa 5.000 liter PCE gebruikt. De vloeistof werd opgeslagen in een ondergrondse tank (10.000 l) aan de noordzijde van het bedrijfsterrein. In de wasafdeling werd gewerkt met PCE dat in vaten werd aangevoerd.

In 1981 bleek bij onderzoek dat de bodem ter plaatse van de opslagtank en onder het bedrijfsgebouw sterk verontreinigd was met vluchtige gechlloreerde koolwaterstoffen (VOCI), voornamelijk PCE en TCE. De verontreinigingen hadden zich in het grondwater over een afstand van 250 m in noordoostelijke richting naar de Eem verspreid.

Gefaseerd zijn er diverse saneringen uitgevoerd ter verwijdering van de bodemverontreiniging. De uitgevoerde saneringen betreffen:

- 1984-1985: grondsanering – ontgraving van de verontreinigde grond tot circa 4,5 m–mv in de bronzone (onder en ten noorden van de wasserij), afvoer van de aanwezige tanks.
Resultaat: niet alle verontreinigde grond is ontgraven. Vanaf 4,5 m–mv komen nog lichte tot plaatselijk sterke restverontreinigingen met PCE en TCE voor (situatie 1986).
- 1987: aanleg grondwateronttrekkingsysteem met totaal 7 deepwells.
- 1991: aanleg grondwater- en bodemluchtonttrekkingsysteem met 56 bemalingsfilters en 22 bodemluchtonttrekkingsfilters.
Doelstelling: sanering verontreinigd grondwater tot de A-waarde. De resultaten van deze sanering zijn niet bekend en het is ook niet duidelijk of het grondwater- en bodemluchtonttrekkingsysteem nog aanwezig is op de locatie.
- 1995-start pilot: Onttrekking via twee deepwells waarbij het grondwater wordt gezuiverd in een grondwaterzuiveringsinstallatie om verspreiding in het grondwater te voorkomen.
Resultaat: Verspreiding van de verontreiniging door het grondwater is voorkomen.

Het uiteindelijke resultaat van deze saneringsmaatregelen is dat de VOCl-verontreiniging in het grondwater zich beperkt heeft tot de directe omgeving van de bronzone ter plaatse van het bedrijfsterrein van de voormalige wasserij omdat verdere verspreiding is voorkomen. Echter er zijn nog steeds verontreinigingen aanwezig in het grondwater en de grondwaterzuiveringsinstallatie is aan vervanging toe.

In de "(concept)jaarrapportage 2008 van de monitoring grondwaterbeheerssysteem Actief te Amersfoort" (Wareco, rapportnummer Aa36q.007ak, 10 maart 2009) wordt de huidige verontreinigings situatie in het grondwater als volgt omschreven: "Het ondiepe grondwater op de verontreinigingslocatie is sterk verontreinigd met PCE, cis-DCE en VC. Verder zijn matige tot lichte verontreinigingen met TCE in het ondiepe grondwater aangetroffen. Het middeldiepe grondwater is sterk verontreinigd met cis-DCE en VC en licht verontreinigd met PCE en TCE. In het diepe grondwater zijn nog lichte verontreinigingen met VOCl (PCE, TCE, cis-DCE en VC) aangetroffen. In bronbemaling A zijn in 2008 maximale jaarconcentraties van 2000 µg/l PCE, 930 µg/l TCE en 780 µg/l cis DCE aangetoond. In grondwater in bronbemaling B zijn vergelijkbare maximale concentraties aangetoond. PCE wordt onder de natuurlijke condities op de locatie omgezet. De aanwezigheid van de afbraakproducten TCE, cis-DCE en VC op de locatie duiden op deze omzetting. De afbraak is echter onvolledig en lijkt te stagneren bij VC. De afbraak van VC naar etheen en ethaan vindt niet plaats".

Vanaf 1995 tot aan de start van de pilot in juli 2009 is de grondwaterstroming dus beheerst door een grondwateronttrekking op het bedrijfsterrein via twee deepwells; deepwell A en B. Beide deepwells hebben een filterstelling van 2 tot 11,5 m –mv met een streefdebiet van ca. 48 m³/dag in deepwell A en 24 m³/dag in deepwell B. De plaats van deepwell A en B staat weergegeven op de situatietekening in Bijlage A.1.

Uit de resultaten van het nulsituatieonderzoek kwam naar voren dat de verontreiniging ten westen van deepwell B niet meer aanwezig was. De VOCl's die gedurende de laatste metingen zijn aangetoond in het onttrokken grondwater zijn waarschijnlijk afkomstig van

verontreinigingen die nog aanwezig zijn onder de bebouwing ten zuiden en oosten van deze onttrekking.

3.3 Bodemopbouw en grondwaterstroming

3.3.1 Regionale bodemopbouw

Vanaf het maaiveld reikt tot ca. 10 m -NAP een zandige deklaag die behoort bij de formatie van Boxtel (Tabel 3.1). Hieronder bevindt zich de eerste scheidende laag: de Eemformatie of Eemklei. Dit pakket bestaat uit kleilagen en matig fijn tot grof zand met schelpenlagen en is ca. 4 meter dik. Daaronder bevindt zich het tweede watervoerend pakket tot ca. 130 m -NAP, bestaande uit matig grof tot uiterst grof zand. Voorheen behoorde dit pakket bij de formatie van Enschede, maar het is sinds enige jaren ondergebracht bij de formatie van Peize. Het tweede scheidende pakket is aanwezig van -130 tot -140 m-mv en behoort tot het laagpakket van Tegelen, van de formatie van Waalre. Dit bestaat uit sterk zandige tot zwak siltige klei met lagen van uiterst fijn tot uiterst grof zand. Op 140 m -NAP begint de formatie van Maassluis, dat voornamelijk bestaat uit uiterst fijn tot matig grof zand en zwak siltige klei.

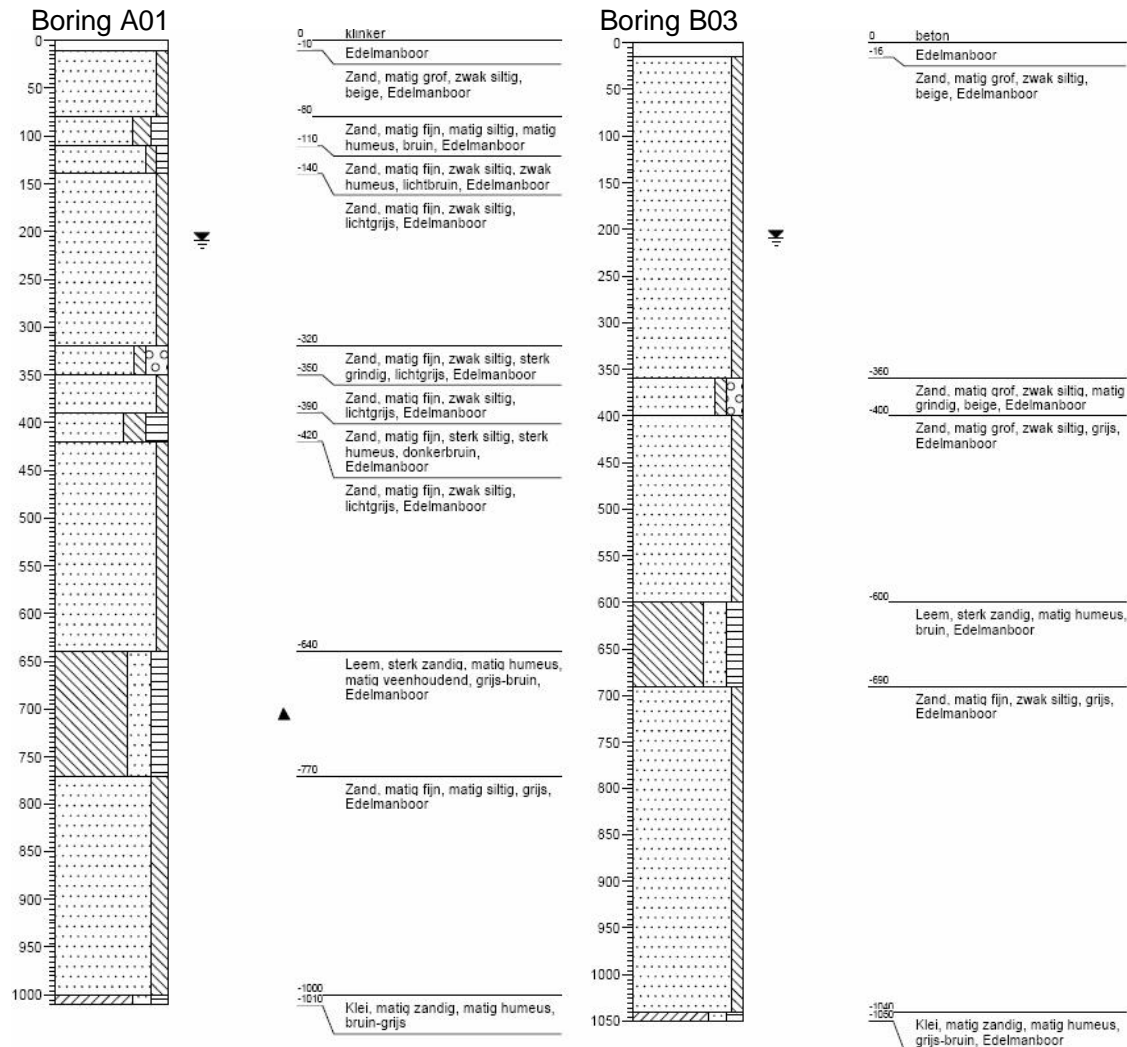
Tabel 3.1 Schematische regionale bodemopbouw (op basis van Wareco-rapporten en geverifieerd met informatie uit het DINO loket (TNO))

Diepte (m NAP)	Grondsoort	Hydrogeologie	Hydrogeologie	Hydraulische weerstand (d) of doorlatendheid (m ² /d)
+2 tot -10	zand	formatie van Boxtel (voorheen formatie van Twente)	1 ^e watervoerend pakket	50 m ² /d
-10 tot -14	klei/matig fijn tot grof zand	Eemformatie	1 ^e scheidende laag	500 d
-14 tot -130	matig grof tot uiterst grof zand	formatie van Peize (voorheen formatie van Enschede)	2 ^e watervoerend pakket	6000 m ² /d
-130 tot -140	sterk zandig tot zwak siltige klei/zand	formatie van Waalre - laagpakket van Tegelen	2 ^e scheidende laag	--
-140 tot ?	uiterst fijn tot matig grof zand/klei	formatie van Maassluis	--	--

3.3.2 Lokale bodemopbouw

De bodemopbouw op de locatie is bepaald op basis van boringen die zijn gezet ten behoeve van de plaatsing van de monitoringspeilbuizen. Figuur 3.2 geeft de bodemopbouw ter plaatse van boring A01 (ca. 3 meter van de Nutrolase-injecties) en boring B03 (westelijk op het terrein) weer en is representatief voor de pilotlocatie. De profielen van alle boringen zijn opgenomen in Bijlage B.. De bodemopbouw wordt gekenmerkt door een matig fijn tot matig grof zandig pakket op een scheidende laag van matig zandige klei laag die begint op dieptes variërend van 9,5 tot 10,5 m-mv: de Eemformatie. In het traject van 6 tot 8 m -mv bevindt zich ter plaatse van alle boringen een zwak tot sterk zandige leemlaag met een dikte van 0,5 tot 1,3 m. Uit de boorstaten blijkt dat de opbouw ter plaatse van waar de substraten geïnjecteerd zijn erg homogeen is.

In deze rapportage wordt onderscheid gemaakt tussen ondiep grondwater (freatisch van circa 2 m-mv tot 4 m-mv, middeldiep grondwater (van 4 tot 7 m-mv) en diep grondwater (van 7 tot 10 m-mv).



Figuur 3.2 Boorprofielen boring A01 en B03

3.3.3 Grondwaterstromingstichting

Na het stopzetten van de deepwell A op 21 augustus 2009 zijn eenmaal de stijghoogten gemeten in het kader van de monitoring van het grondwaterbeheerssysteem. Deze metingen zijn uitgevoerd door Wareco op 9 november 2009 en staan in het rapport "Nazorgstatusrapportage 2009, Actief te Amersfoort, Definitief" (Wareco, rapportnummer AA36R, RAP 20100527, 27 mei 2010). Een ruimtelijk beeld van de stijghoogtemetingen is weergegeven in Bijlage A.4. Deze stijghoogtemetingen en resultaten uit het rapport "Eindrapportage grondsanering Bodemsaneringsproject "Actief" te Amersfoort" (Provincie Utrecht Buro bodemsanering, juni 1989) zijn gebruikt om de stromingsnelheid van het grondwater en de stromingsrichting te bepalen. Uit deze stijghoogtemetingen valt echter geen eenduidig verhang en stromingsrichting af te leiden.

De hoogste stijghoogten worden aangetroffen nabij deepwell A. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verlagingskegel door de eerdere onttrekking in deepwell A na 2½ maand volledig was uitgedempt en dat er zelfs extra grondwateraanvulling nabij deepwell A plaatsvindt. Dit kan infiltratie van neerslag zijn, maar eventueel ook worden veroorzaakt door

een lekkende rioolbuis of waterleiding. Uit de data komt ook naar voren dat de stijghoogten in verticale richting afnemen. De grondwaterstroming zal daarom ook een (kleine) neerwaartse component hebben. Uit de gemeten stijghoogten na het stopzetten van de pompen valt geen eenduidige grondwaterstromingsrichting af te leiden.

In het eindrapport uit 1989 wordt informatie over de stromingsrichting van de pluim gegeven voordat de onttrekkingen van de sanering zijn aangezet. Een kopie van de situatietekening met afperking van de verontreiniging destijds is weergegeven in Bijlage A.5. Uit de achterliggende puntmetingen in dat rapport blijkt dat de VOCl-verontreiniging vooral in noord-noordoostelijke richting stroomt in de richting van de Eem. In peilbuis 31 is namelijk geen PCE en TCE aangetroffen (maar wel chloroform en toluen). Hoge concentraties aan PCE en TCE worden wel aangetroffen in de peilbuizen 24, 27, 28, terwijl in peilbuizen 25, 26, 30, 32 en 33 PCE in een lage concentratie wordt aangetroffen. Ook valt op dat de VOCl-pluim stroomafwaarts langzaam dieper wegduikt.

3.3.4 Stromingssnelheid grondwater

Uit paragraaf 3.3.3 komt naar voren dat op basis van de stijghoogte geen eenduidig verhang valt te berekenen. Voor het verhang wordt 1:700 genoemd in de jaarlijkse monitoringsrapportages van Wareco, maar de achterliggende data zijn niet opgenomen in deze rapportage. Er wordt een verplaatsingsnelheid van de verontreiniging van 15 m/jaar vermeld (op basis van berekening met formule van Darcy) en 20 m/jaar (op basis van een eerder gemeten verspreidingsnelheid). Om vervolgens de verplaatsingsnelheid van het grondwater te vertalen naar de verplaatsingsnelheid van de pluim is gedeeld door de retardatiefactor, waarbij is gerekend met een retardatiefactor van 1,3 voor VC op basis van een organisch stofgehalte van 1%. Het is echter niet helemaal duidelijk of de verplaatsingsnelheid van de pluim te vertalen is naar VC aangezien in de eindrapportage van de provincie Utrecht, met gegevens over de concentraties in de pluim, geen VC gemeten is. Hierdoor valt de snelheid van 15 tot 20 m/jaar niet na te rekenen.

Om beter inzicht te krijgen in de natuurlijke grondwaterstromingssnelheid is deze nogmaals berekend voor PCE en TCE op basis van meetresultaten van de pluim uit de eindrapportage uit 1989. Deze meetresultaten zijn verkregen van voor de aanleg van de grondwateronttrekkingssystemen op de locatie. Uit de data is af te leiden dat bij metingen in 1989 (22 jaar na het opstarten van de chemische wasserij Actief) op 225 m van de locatie in peilbuis 32 een significante concentratie TCE worden aangetroffen. Dit duidt op een verplaatsingsnelheid voor TCE van minimaal 10 m/jaar. Op basis van een organisch stofgehalte van 0,5 % (retardatiefactor TCE: 2.6) en 1% (retardatiefactor TCE van 4.2) komt dit neer op een minimale verplaatsing van het grondwater van 26 en 42 m/jaar, respectievelijk.

4 Opzet pilot

4.1 Monitoringspeilbuizen

Om de invloed van de geïnjecteerde substraten Nutrolase en sojaolie te volgen zijn voorafgaande aan de injecties monitoringspeilbuizen geplaatst door TerraSano Milieutechniek uit Nieuwegein. Een tekening van de locatie met de geplaatste peilbuizen is weergegeven in Bijlage A.1 en Bijlage A.2. In eerste instantie zou het ene substraat ten oosten van deepwell A en het andere substraat ten westen van deepwell B worden geïnjecteerd. Daartoe werden op 28 en 29 april en 4 mei 2009 peilbuizen A01 en A02 ten oosten van deepwell A en peilbuizen B03 en B04 ten westen van deepwell B geplaatst. Per peilbuis werden drie filters geplaatst op verschillende diepten (Tabel 4.). Om te voorkomen dat de filters elkaar te veel zouden beïnvloeden is per filter een apart boorgat gemaakt. De diepe filters zijn alle met de onderkant in de Eemklei geplaatst op een diepe variërend van 8,5-9,5 m-mv tot 9,5-10,5 m-mv.

Voorafgaande aan de injecties is de nulsituatie vastgesteld (Deltares; rapportnummer 0910-0248, 28 oktober 2009). Hierbij kwam naar voren dat in de monitoringspeilbuizen ten westen van deepwell B geen verontreiniging met VOC's meer aanwezig was. Daarop is besloten de substraten te injecteren ten oosten en ten westen van deepwell A en zijn op 22 en 23 juni 2009 ten oosten van deepwell A peilbuizen C05 en C06 geplaatst, eveneens met drie filters (Tabel 4.). De monitoringspeilbuizen B zijn daarom enkel bemonsterd voor de vaststelling van de nulsituatie van het grondwater op de locatie en ten behoeve van de voortgang van de pilot niet meer gemonitord. Voor het vaststellen van de nulsituatie is ook grondwater bemonsterd en geanalyseerd uit peilbuis 703. Peilbuis 703 is in het verleden geplaatst voor de monitoring van het grondwaterbeheerssysteem en staat bovenstrooms van de verontreiniging en de plek waar de substraatinjecties zijn uitgevoerd (zie bijlage A.4 voor de situering). De resultaten van deze peilbuis zijn gebruikt om te bepalen wat de kwaliteit en de geochemische samenstelling is van het instromende grondwater.

Op basis van de monitoringsresultaten van de eerste 6 maanden van de pilot zijn aanvullende monitoringspeilbuizen A03, A04, A05 en C07 geplaatst om de eerder genoemde aanvullende onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden. Voor de locatie van de peilbuizen en de diepte van de filters zie Bijlage A.2, Bijlage A.3 en Tabel 4.. Peilbuis A03 is stroomafwaarts van peilbuis A01 en peilbuizen A04 en A05 zijn stroomafwaarts van de injectiepunten geplaatst, met als doel de invloed van de natuurlijke grondwaterstroming op de verspreiding en werking van Nutrolase te bepalen. Peilbuis C07 is ter plaatse van de sojaolie-injecties geplaatst om meer inzicht te krijgen in de werking van de sojaolie.

Tabel 4.1 Overzicht monitoringspeilbuizen met filtertraject

Peilbuis	Plaatsing	Filter (m-mv)
A01	3 m van injectiepunten; 7 m ten oosten van deepwell A	3-4 4,5-5,5 9-10
A02	6 m van injectiepunten; 4 m ten oosten van deepwell A	3-4 4,5-5,5 9,5-10,5
B03	10,9 m ten westen van deepwell B	3-4 5-6 9,5-10,5
B04	14,9 m ten westen van deepwell B	3-4 5-6 9-10
C05	4 m van injectiepunten; 4,8 m ten westen van deepwell A	3-4 5,5-6,5 8,5-9,5
C06	2 m van injectiepunten; 6,8 m ten westen van deepwell A	2,5-3,5 5,5-6,5 8,5-9,5
Aanvullende peilbuizen		
A03	3 meter stroomafwaarts van peilbuis A01	5,4-6,4
A04	Nabij middelste injectiepunt Nutrolase*	3-4 5,3-6,3
A05	3 meter stroomafwaarts middelste injectiepunt Nutrolase	3-4 5,4-6,4
C07	Ter plaatse van het middelste injectiepunt sojaolie	1,5-3,5 (snijdend) 5,3-6,3

* Peilbuis A04 was gepland 0,5 meter stroomafwaarts van het middelste injectiepunt met Nutrolase. Dit bleek echter niet mogelijk vanwege de aanwezigheid van riolering en ondoordringbare lagen rondom dit injectiepunt. Daarom is de ondiepe peilbuis oostelijk van het injectiepunt geplaatst en de middeldiepe peilbuis oostelijk beide op ca. 0,3 m afstand van het injectiepunt.

4.2 Substraatinjecties

Van 6 tot en met 9 juli 2009 zijn de substraatinjecties uitgevoerd, waarbij de Nutrolase ten oosten van peilbuizen A01, A02 en deepwell A is geïnjecteerd en de sojaolie ten westen van peilbuizen C05, C06 en deepwell A (zie Bijlage A.2). De beide substraten zijn op drie punten geïnjecteerd met een afstand van 3 meter tussen de injectiepunten. Nutrolase is op 3 meter afstand van de eerste monitoringspeilbuis A01 ingebracht en sojaolie op 2 meter van peilbuis C06. De substraten zijn per injectiepunt over het traject van 13 m-mv tot 1,5 m-mv geïnjecteerd waarbij 40 l substraat/m (500 l per injectiepunt) in de grond is gebracht. De injectie heeft van onder naar boven plaatsgevonden. Voorafgaande aan de injectie is aan beide substraten lithiumbromide toegevoegd in een concentratie van 400 mg/l. De bromide is in de eerste weken na injectie gebruikt als tracer om de verspreiding van de substraten te kunnen volgen. Aan de sojaolie is onder andere ook ammoniumfosfaat toegevoegd omdat uit de resultaten van het nulsituatieonderzoek bleek dat de concentraties ammonium en fosfaat

in het grondwater te laag waren voor de gestimuleerde groei van de bacteriën. Nutrolase bevat ruimschoots ammonium en fosfaat (zie Bijlage D) zodat het niet noodzakelijk was dit hieraan extra toe te voegen. Een uitgebreide beschrijving van de substraatinjectie en de bereiding van de substraten, opgesteld door Sita Remediation BV, is opgenomen in Bijlage C.

Gedurende de injectie zijn deepwell A en B stopgezet. Om te kijken of de verspreiding van de substraten bevorderd zou kunnen worden door middel van actief onttrekken van water is deepwell A direct na de laatste injectie op 9 juli weer aangezet met een streefdebiet van 1,5 m³/h. Op 21 augustus is deepwell A definitief uitgezet op basis van de aangetroffen bromideconcentraties (paragraaf 5.3). Omdat van 29 juli tot 3 augustus deze deepwell ook tijdelijk stil had gestaan, heeft de deepwell 38 dagen na de injectie grondwater onttrokken totdat deze is stilgezet. Deepwell B is vanaf het moment van injectie uitgebleven om te voorkomen dat de sojaolie richting deepwell B werd verspreid in plaats van naar deepwell A. Deepwell B is op 17 februari 2010 weer aangezet naar aanleiding van de resultaten van het jaarlijkse reguliere onderzoek in het kader van de nazorg van het grondwaterbeheerssysteem (Wareco, rapportnummer AA36R, RAP 20100527, 27 mei 2010).

4.3 Monitoring

In Tabel 4.2 staat een overzicht van de uitgevoerde monitoringen met de datum, het type monitoring en de parameters die zijn gemeten in het veld of geanalyseerd in het laboratorium op de genomen grondwatermonsters.

Tabel 4.2 Overzicht monsternamen data, dagen na injectie en de geanalyseerde parameters.

Datum	Dagen na injectie	Type monitoring	Parameters
12-05-2010	Voor de substraatinjecties	Nulsituatieonderzoek in peilbuizen A01, A02, B03, B04 en 703	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC nitraat, nitriet, sulfaat, Nutrienten <i>Dehalococcoides</i> en VC- VOCl inclusief etheen en
30-06-2010	Voor de substraatinjecties	Nulsituatieonderzoek in peilbuizen C05 en C06	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC nitraat, nitriet, sulfaat, Nutrienten <i>Dehalococcoides</i> en VC- VOCl inclusief etheen en
13-7-2009	4 dagen	Verspreiding substraat	Bromide
28-7-2009	19 dagen	(Twee)maandelijke monitoring volgens plan van aanpak	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC Waterstof (veldmeting) VOCl inclusief etheen en
17-8-2009	39 dagen	Verspreiding substraat	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide
1-9-2009	54 dagen	(Twee)maandelijke monitoring volgens plan van aanpak	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC Waterstof (veldmeting) VOCl inclusief etheen en
5-11-2009	119 dagen	Tussentijdse monitoring volgens plan van aanpak	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC Waterstof (veldmeting) nitraat, nitriet, sulfaat, ijzer Nutrienten <i>Dehalococcoides</i> en VC- VOCl inclusief etheen en
26-01-2010	195 dagen	(Twee)maandelijke monitoring volgens plan van aanpak	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC Waterstof (veldmeting) VOCl inclusief etheen en
19-04-2010	278 dagen	(Twee)maandelijke monitoring volgens plan van aanpak inclusief bemonstering aanvullende peilbuizen	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC Waterstof (veldmeting)** VOCl inclusief etheen en
2-6-2010	331 dagen	Eindmeting volgens plan van aanpak inclusief bemonstering aanvullende peilbuizen	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC Waterstof (veldmeting) nitraat, nitriet, sulfaat, Nutrienten <i>Dehalococcoides</i> en VC- VOCl inclusief etheen en
25-8-2010	415 dagen	extra monitoring	O ₂ , Eh, Ec en pH Bromide DOC Waterstof (veldmeting) <i>Dehalococcoides</i>

* in peilbuis 703 zijn geen bacteriënaantallen en VC-reductases bepaald omdat deze in bodems aanzienlijk kunnen variëren en de aantallen in het bovenstroomse grondwater niet van invloed zullen zijn op de bacteriepopulatie in de verontreinigingsvlek, waar andere condities heersen;

** in de aanvullende peilbuizen is waterstof tijdens deze monitoringsronde niet gemeten aangezien de bemonstering van deze peilbuizen plaatsvond binnen 6 weken na plaatsing en het grondwater in de peilbuizen nog niet voldoende gestabiliseerd was voor een betrouwbare waterstofmeting.

Na plaatsing van de peilbuizen is twee weken gewacht met de eerste bemonstering om het grondwater te laten stabiliseren. Voorafgaande aan de bemonstering zijn de peilbuizen afgepompt (20 tot 35 l). Vervolgens zijn veldmetingen verricht en zijn grondwatermonsters genomen voor de analyse op diverse componenten. Om de verontreinigingssituatie te bepalen op de plaatsen waar de substraten geïnjecteerd worden, zijn de concentraties aan chloorkoolwaterstoffen gemeten, inclusief etheen, ethaan en methaan. Twee weken na plaatsing van de peilbuizen was het nog niet mogelijk om waterstof te meten aangezien het grondwater 6 weken moet stabiliseren om een representatieve meting te kunnen doen.

De nulsituatie is vastgelegd in peilbuizen A01, A02, B03, B04, C05, C06 en 703. Voor de monitoring van de pilot zijn de peilbuizen B03 en B04 komen te vervallen aangezien hier geen verontreinigingen meer zijn aangetoond en hier daarom ook geen substraat is geïnjecteerd. Na de monitoring van januari 2010 zijn de peilbuizen A03, A04, A05 en C07 geplaatst. In de daarop volgende monitoringsronden is het grondwater in deze aanvullende peilbuizen ook bemonsterd en geanalyseerd. Vanaf dat moment is, op basis van de resultaten, de bemonstering van peilbuizen C05 en C06 komen te vervallen evenals de bemonstering van het diepe grondwater in alle diepe peilbuizen. Omdat de aanvullende monitoringspeilbuizen zijn geplaatst in de loop van de pilot kon hierin de nulsituatie niet worden vastgelegd.

Een deel van de parameters is direct in het veld gemeten. Het betreft zuurgraad (pH), geleidbaarheid, redoxpotentiaal, temperatuur, opgelost zuurstof, en waterstof. De overige parameters zijn gemeten in het laboratorium van Deltares.

Om na plaatsing van de monitoringspeilbuizen eind april / begin mei 2009 de nulsituatie zo snel mogelijk vast te stellen, om te kunnen starten met de substraatinjecties, is in peilbuizen A01, A02, C05 en C06 de nulsituatie voor de waterstofconcentraties niet bepaald. Een peilbuis moet namelijk minimaal 6 weken stabiliseren voordat een representatieve waterstofmeting kan worden uitgevoerd. De waterstofconcentraties op de locatie zijn gemeten in de peilbuizen 702, 703 en B04. Deze worden representatief geacht voor de achtergrondconcentraties op de locatie en zijn gebruikt om de gemeten waterstofconcentraties in alle andere peilbuizen gedurende het vervolg van de pilot mee te vergelijken.

Na injectie zijn op negen tijdstippen grondwatermonsters genomen. Deze monsters zijn geanalyseerd op diverse parameters waarbij na 119 en 331 dagen na injectie het meest uitgebreide pakket aan parameters is geanalyseerd. De overige keren is volstaan met een beperkter pakket om de pilot te monitoren.

5 Resultaten en discussie Nutrolase

Alle monitoringsdata van de gemeten parameters gedurende de verschillende monitoringsronden staan weergegeven in bijlage E.

5.1 Zintuiglijke waarnemingen

Gedurende de bemonstering van het grondwater uit de peilbuizen zijn de grondwatermonsters zintuiglijk beoordeeld op kleur (Tabel 5.1). In het middeldiepe grondwater in peilbuis A01 werd vanaf 19 dagen na injectie een bruine kleur waargenomen. Dit duidt op de aanwezigheid van Nutrolase. Na 278 dagen vanaf injectie was de kleurintensiteit van het water afgenomen tot helder en lichtgeel na 331 dagen. In het ondiepe grondwater in deze peilbuis zijn geen kleurveranderingen waargenomen en was de grondwaterkleur gedurende de gehele pilot helder. Het diepe grondwater is 19 dagen na injectie eenmalig lichtgeel, maar deze kleur verdwijnt weer waarna het grondwater bij alle opeenvolgende bemonsteringen helder van kleur is.

Tabel 5.1 Zintuiglijk waarneming van de kleur van het grondwater uit peilbuizen A01, A02, A03, A04 en A05. - = helder, +/- = licht geel, + = donkergeel, ++ = bruin, x= niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Kleur								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	-	-	-	-	-	-	-	-	x
	4,5-5,5	-	++	++	++	++	++	-	+/-	x
	9-10	-	+/-	-	-	-	-	x	x	x
A02	3-4	-	-	+/-	-	-	-	+/-	-	x
	4,5-5,5	-	+	+	+/-	+/-	+/-	-	-	x
	9,5-10,5	-	-	-	-	-	-	x	x	x
A03	5,4-6,4	x	x	x	x	x	x	+	+	+
A04	3-4	x	x	x	x	x	x	-	-	x
	5,3-6,3	x	x	x	x	x	x	+/-	-	+
A05	3-4	x	x	x	x	x	x	-	-	x
	5,3-6,3	x	x	x	x	x	x	+/-	+	-

In peilbuis A02 verandert de kleur van het middeldiepe grondwater van lichtbruin naar lichtgeel op 54 dagen na injectie en vervolgens naar helder na 278 dagen. Op basis van deze waarnemingen lijkt minder substraat het middeldiepe grondwater ter plaatse van peilbuis A02 (6 meter stroomopwaarts van de injectiepunten) bereikt te hebben ten opzichte van peilbuis A01 (3 meter stroomopwaarts van de injectiepunten). In de loop van de pilot verdwijnt dit substraat zichtbaar, aangezien het water weer helder wordt. In het ondiepe grondwater varieert de kleur van lichtgeel na 19 tot helder na 278 dagen. Het diepe grondwater is tijdens elke bemonstering helder van kleur. Dit duidt erop dat in het ondiepe en diepe grondwater geen tot nauwelijks substraat aanwezig is.

In het middeldiepe grondwater van peilbuis A03 blijft de kleur tussen 278 en 331 dagen na injectie donkergeel en in A04 neemt de kleur af van lichtgeel naar helder. In het middeldiepe grondwater van peilbuis A05 heeft een kleurtoename van lichtgeel naar geel plaatsgevonden. Op basis van de kleur is in het middeldiepe grondwater in deze stroomafwaarts geplaatste peilbuizen na 278 dagen nog substraat aanwezig. Echter, na 415 dagen is het grondwater in deze peilbuis weer helder en lijkt op zintuiglijke basis het substraat niet meer aanwezig. Het

ondiepe grondwater in de aanvullende peilbuizen was gedurende de beide bemonsteringen helder.

Tussenconclusie: In het middeldiepe grondwater is op basis van de kleur substraat waargenomen, waarbij een kleurafname te zien is gedurende de pilot in peilbuis A01 en A02 op respectievelijk 3 en 6 meter stroomopwaarts van de injectiepunten. Stroomafwaarts is op basis van de kleur na 311 dagen nog substraat aanwezig, maar lijkt na 415 dagen verdwenen. In het ondiepe en diepe grondwater is zintuiglijk nagenoeg geen substraat waargenomen.

5.2 Algemene parameters: pH, Ec en temperatuur

Gedurende de bemonstering van het grondwater zijn de pH, geleidingsvermogen (Ec) en temperatuur gemeten in het veld. Waterstofconcentraties, redoxpotentialen en zuurstof zijn ook in het veld gemeten, maar worden later besproken (in paragraaf 5.4, 5.5.1 en 5.5.2 respectievelijk). Tabel 5.2 geeft een overzicht van de pH, Ec en temperatuur.

De pH van het grondwater in de diverse peilbuizen en grondwatertrajecten fluctueert tussen 5,3 en 7,3, waarbij er geen duidelijke stijgende of dalende trends waarneembaar zijn. De injectie van het substraat heeft daarom waarschijnlijk geen invloed op de pH van het grondwater op de locatie. De Ec neemt in het middeldiepe grondwater van peilbuis A01 en A02 in de eerste 54 dagen na injectie toe tot maximaal gemeten waarden van respectievelijk 2200 en 1540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ om vervolgens weer te dalen. In dit grondwatertraject in peilbuis A01 is de Ec na 331 na injectie nog ca. 3-maal hoger dan de Ec gemeten tijdens het vastleggen van de nulsituatie. In peilbuis A02 is de waarde gedaald tot op het niveau van de nulsituatie. In het middeldiepe grondwater van de aanvullende peilbuizen zijn in peilbuis A03 en A05 verhoogde waarden gemeten ten opzichte van de gemiddelde Ec die is gemeten in het grondwater tijdens de vastlegging van de nulsituatie. In peilbuis A04 is in het middeldiepe grondwater tot 331 dagen na injectie geen significant verhoogde Ec gemeten. Na 415 dagen is de EC wel verhoogd. De Ec in het ondiepe en het diepe grondwater is in alle peilbuizen gedurende de 331 dagen na de injectie niet sterk veranderd ten opzichte van de nulsituatie voor de injectie van Nutrolase. Ook in deepwell A is geen duidelijke trend te zien. Een toename in Ec in het middeldiepe grondwater duidt erop dat grondwater met een hogere geleidbaarheid aanwezig is. Deze hogere geleidbaarheid kan veroorzaakt worden door de aanwezigheid van substraat of in het grondwater opgeloste stoffen afkomstig uit het substraat.

De temperatuur van het grondwater in het ondiepe en middeldiepe grondwater van peilbuizen A01 en A02 neemt over het algemeen de eerste 54 dagen toe om vervolgens weer te dalen. De temperatuur stijgt weer vanaf 278 dagen na injectie. Deze stijging in temperatuur na 278 dagen is ook waargenomen in het grondwater in peilbuizen A03, A04 en A05. Het ondiepe grondwater heeft een hogere temperatuur dan de het middeldiepe en met de diepte neemt de temperatuur verder af. De temperatuur van het grondwater is in alle peilbuizen relatief hoog ten opzichte van de gemiddelde Nederlandse grondwatertemperatuur van 12 à 14 °C. Dit is met name het geval bij de monsternamen tussen 19 en 54 dagen na injectie. Deze monsternamen heeft plaatsgevonden in de zomerperiode. Ook tussen 278 (april) en 415 dagen (augustus) stijgt de temperatuur weer. De fluctuatie in temperaturen lijkt deels verband te houden met de hogere temperaturen gedurende de zomer. De relatief hoge temperaturen zijn mogelijk ook het gevolg van de bedrijfsactiviteiten die al gedurende vele jaren op de locatie plaatsvinden en die het grondwater opgewarmd kunnen hebben. Bij een hogere temperatuur verloopt de biologische afbraak sneller.

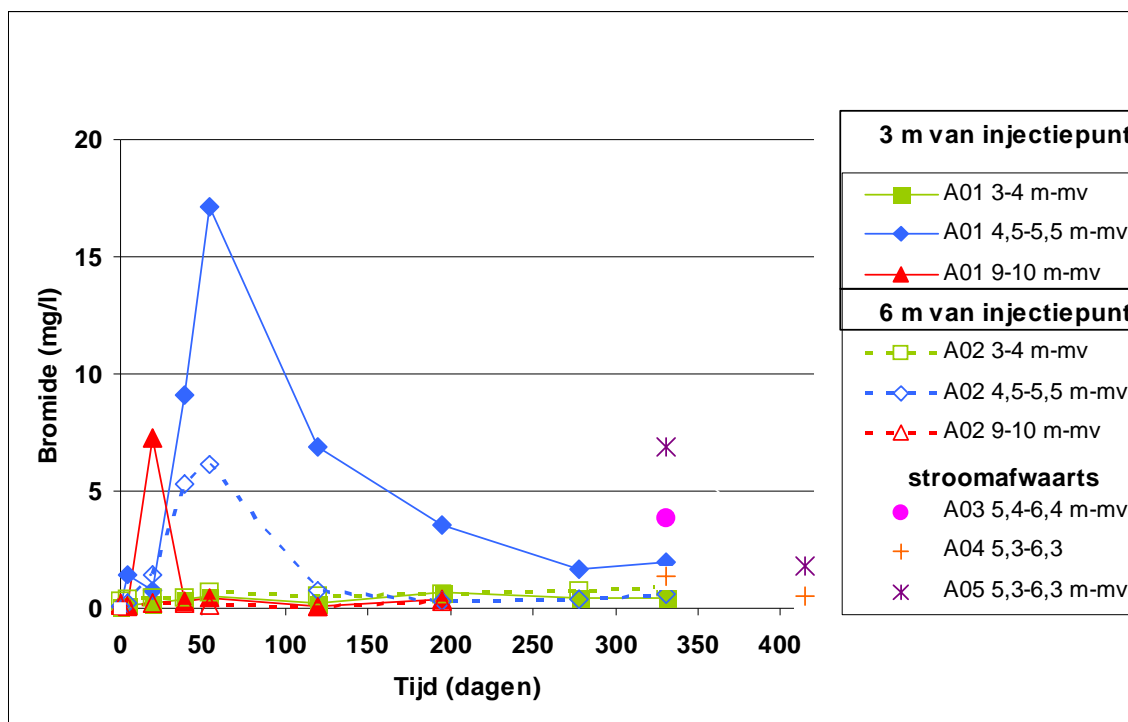
Tabel 5.2 pH, geleidingsvermogen (Ec), en temperatuur van het grondwater gemeten in het veld in peilbuizen A01, A02, en de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05. -- = niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	pH								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	5,8	5,8	5,6	5,5	5,5	5,6	5,3	5,8	--
	4,5-5,5	5,5	5,8	6,0	5,9	6,5	6,6	6,2	6,4	--
	9-10	6,6	6,5	6,8	6,2	7,2	7,1	--	--	--
A02	3-4	5,7	6,2	5,9	5,7	5,8	5,8	5,9	5,9	--
	4,5-5,5	5,6	5,9	6,3	6,0	6,6	6,2	6,0	6,0	--
	9,5-10,5	6,0	7,1	5,7	6,8	7,1	7,3	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	6,4	6,5	6,2
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	5,7	5,8	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	6,1	6,2	6,6
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	5,4	5,6	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	5,9	5,9	6,0
diepwell A		--	7,2	4,9	6,7	6,6	6,6	--	--	--
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Ec (µS/cm)								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	391	396	457	484	565	439	453	443	--
	4,5-5,5	424	1300	1740	2200	1670	1420	1090	1200	--
	9-10	460	690	480	457	344	633	--	--	--
A02	3-4	625	547	585	582	646	730	702	601	--
	4,5-5,5	496	820	1470	1540	740	542	430	465	--
	9,5-10,5	353	347	402	366	380	626	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	1250	1400	1020
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	370	382	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	776	644	1160
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	605	366	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	1230	1170	524
diepwell A		--	348	355	683	560	483	--	--	--
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	temperatuur (°C)								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	13,8	17,9	17,6	18,3	15,6	9,1	13,3	14,7	--
	4,5-5,5	13,5	17,9	16,2	16,9	15,6	11,3	13,6	14,4	--
	9-10	13,4	16,0	14,5	15,3	14,0	11,2	--	--	--
A02	3-4	13,8	18,4	18,1	18,9	16,0	11,4	13,6	15,0	--
	4,5-5,5	12,8	16,3	16,6	17,2	15,9	12,5	14,3	15,0	--
	9,5-10,5	14,5	15,4	15,0	14,8	14,5	11,9	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	12,1	14,2	15,9
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	10,8	13,5	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	12,3	13,5	15,7
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	10,9	13,3	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	12,3	13,3	15,4
diepwell A		--	18,3	17,0	17,0	15,5	11,9	--	--	--

Tussenconclusie: De substraatinjecties hebben geen invloed op de pH. Uit de Ec-metingen komt naar voren dat in het middeldiepe grondwater substraat en/of stoffen uit het substraat aanwezig zijn. De temperatuur van het grondwater is relatief hoog ten opzichte van de gemiddelde Nederlandse grondwatertemperatuur, wat gunstig is voor biologische afbraak.

5.3 Bromidetracer

In Figuur 5.1 staan de bromideconcentraties weergegeven die zijn gemeten in de peilbuizen A01 en A02 gedurende de pilot. Van de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05 zijn de bromideconcentraties opgenomen van het middeldiepe grondwater na 331 en 415 dagen na injectie. Alle data van de bromideconcentraties zijn opgenomen in Bijlage E.3.



Figuur 5.1 Bromideconcentraties in het grondwater in de filters van peilbuizen A01 en A02 met afstanden tot injectiepunt in de richting van het onttrekkingsfilter en in de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05, 3m stroomafwaarts in de richting van de natuurlijke grondwaterstroming.

De voornaamste stijging in de bromideconcentratie vindt plaats in het middeldiepe grondwater zowel op 3 meter (peilbuis A01) als op 6 meter afstand (peilbuis A02) van de injectiepunten. De eerste stijging van in dit grondwatertraject is waargenomen 4 dagen na injectie in peilbuis A01. Na 54 dagen na injectie daalt de bromideconcentratie weer in het middeldiepe grondwater zowel in peilbuis A01 en A02. In het middeldiepe grondwater van alle aanvullende peilbuizen zijn na 331 verhoogde hogere concentraties (7 tot 35 maal hoger) aangetoond ten opzichte van de gemiddelde bromideconcentraties gemeten tijdens het nulsituatieonderzoek. Voornamelijk in peilbuis A05 is een ruim verhoogde concentratie aanwezig. Na 415 dagen is zowel de concentratie in het middeldiepe grondwater van peilbuis A03 en A05 weer sterk afgenomen.

In het ondiepe grondwater van peilbuizen A01 en A02 zijn niet tot nauwelijks verhoogde concentraties ten opzichte van de nulsituatie gemeten. Eveneens is in het ondiepe grondwater in de aanvullende peilbuizen A04 en A05 de concentratie bromide niet toegenomen na substraatinjectie (data in Bijlage E.3). In het diepe grondwater is in peilbuis A01 een verhoging van de concentratie gemeten op 19 dagen na de substraatinjecties. Na 39 dagen na injectie werd deze verhoogde concentratie echter niet meer aangetroffen. In het diepe grondwater van peilbuis is geen verhoging van de bromideconcentratie aangetoond. Het is mogelijk dat op deze diepte de bromide geheel door de bodem is getrokken naar deepwell A en vervolgens door deepwell A aan het grondwater onttrokken is. Hierdoor is er verder geen bromide gemeten in het diepe grondwater van peilbuizen A01 en A02.

De toename in bromideconcentraties komen overeen met de zintuiglijke kleurwaarneming van het substraat: ook de voornaamste kleurtoenames werden waargenomen in het middeldiepe grondwater.

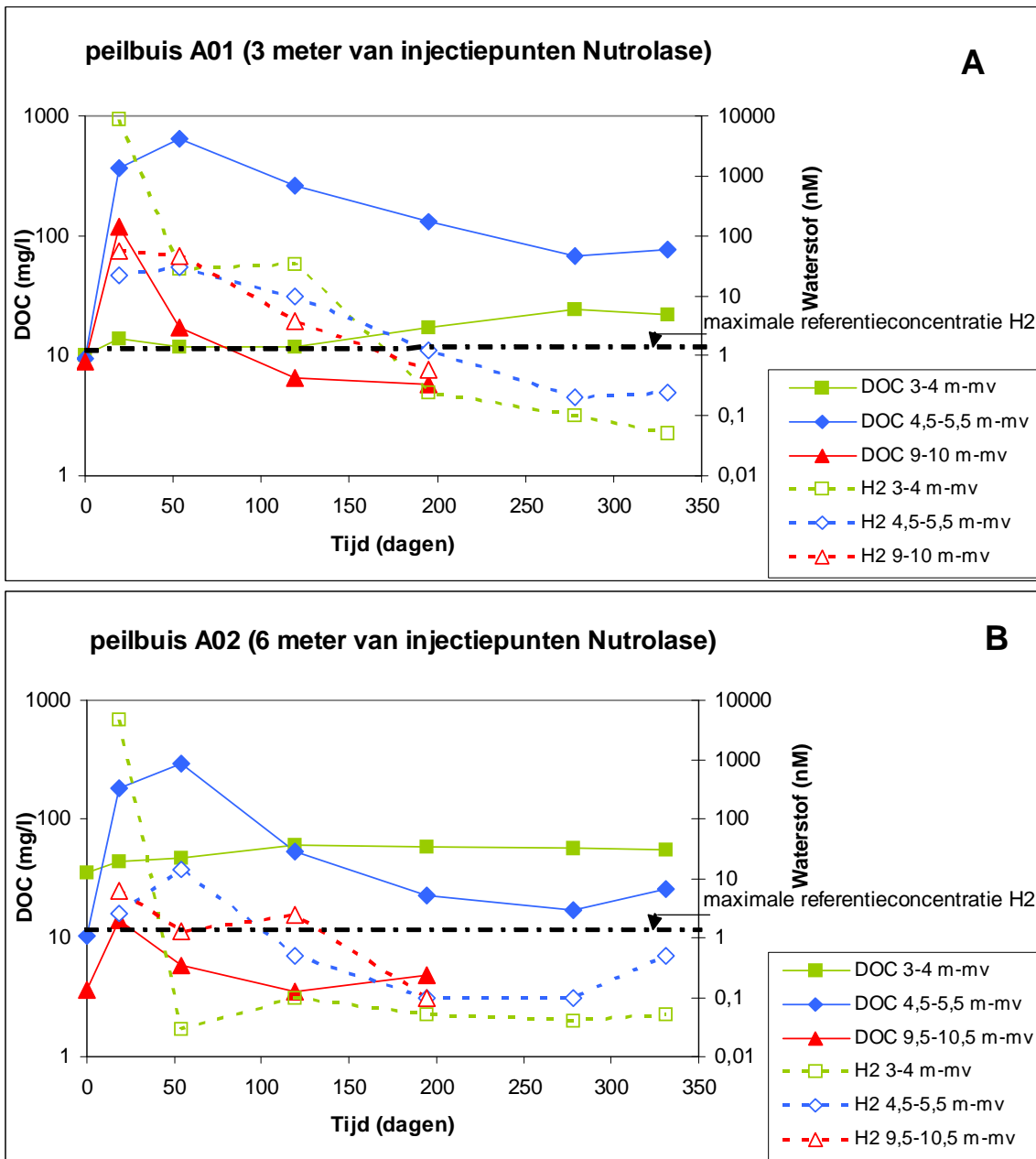
De grondwateronttrekking is beëindigd nadat in peilbuis A02, die het dichtste is gelegen bij deepwell A, verhoogde concentraties bromide werden gemeten in het middeldiepe grondwater. Dit is gebeurd na 38 dagen na injectie. Na het stopzetten van de bronbemaling zijn de bromideconcentraties in peilbuizen A01 (4,5-5,5 m-mv) en A02 (4,5-5,5 m-mv) nog toegenomen ondanks dat het grondwater niet meer stroomopwaarts richting deepwell A werd getrokken.

Tussenconclusie: Op basis van de bromideconcentraties heeft het substraat zich in het middeldiepe grondwater verspreidt tot peilbuis A02. Stroomafwaarts heeft de bromide zich na 331 dagen na injectie minimaal 3 meter vanaf de injectiepunten verspreidt. In het ondiepe en diepe grondwater lijkt op basis van de bromideconcentraties geen of nauwelijks substraat verspreid te zijn.

5.4 DOC en waterstof

Het DOC-gehalte (opgelost organisch koolstof) zegt iets over de aanwezigheid van het substraat. Het organisch koolstof in het substraat lost op in het grondwater en is te meten als DOC. Zodra ergens verhoogde DOC-gehalten gemeten worden, is het duidelijk dat hier substraat aanwezig is. Het opgelost organisch koolstof wordt in het grondwater vervolgens omgezet in waterstof. Dit waterstof wordt gebruikt voor de (volledige) reductieve dechlorering. Voor volledige reductieve dechlorering is over het algemeen een waterstofconcentratie nodig van 2 à 5 nM. De waterstofconcentraties geven dus een indicatie of (volledige) reductieve dechlorering plaats kan vinden. Een toename van de waterstofconcentraties geeft gunstigere condities voor (volledige) reductieve dechlorering.

Omdat waterstof uit DOC wordt gevormd, staan deze twee parameters met elkaar in verband. Daarom zijn beide parameters weergegeven in één figuur (Figuur 5.2: a voor peilbuis A01 en b voor peilbuis A02). De y-assen zijn logaritmisch; op de linker y-as staan de DOC-gehalten in mg/l en op de rechter y-as de waterstofconcentraties in nM. In de filters van de peilbuizen 702, 703 en B04 zijn waterstofconcentraties gemeten die als maat worden gebruikt voor de nulsituatiewaarde van de waterstofconcentratie in het grondwater. Deze waarden kunnen worden beschouwd als achtergrondwaarden voor de waterstofconcentraties in het grondwater op de locatie. De waterstofconcentraties in de referentiepeilbuizen variëren van 0,05 tot 1,5 nM (Bijlage E.4). In de figuren is de maximale referentieconcentratie van 1,5 nM weergegeven.



Figuur 5.2 DOC-gehalten en waterstofconcentraties in het grondwater in de filters van peilbuis A01 (fig. a) en peilbuis A02 (fig. b). Peilbuis A01 is geplaatst op 3 m en peilbuis A02 op 6 m van het injectiepunt. De maximale referentieconcentratie H₂ is de achtergrondwaarde van de waterstof in het grondwater op de locatie.

Uit de DOC-gehalten blijkt dat het substraat in peilbuis A01, die het dichtste bij de injectiepunten staat, voornamelijk aanwezig is in de bodemlaag 4,5-5,5 m-mv. Hierin is na 19 dagen een zeer sterke toename van het DOC-gehalte gemeten en ook zijn de waterstofconcentratie gestegen ten opzichte van de maximale referentiewaarde. De gemeten waterstofconcentraties stijgen tot ruim boven de minimaal gewenste waterstofconcentratie voor (volledige) reductieve dechlorering van 2 nM. Na 54 dagen dalen zowel de DOC-concentratie als de waterstofconcentratie in het middeldiepe grondwater maar deze lijken weer te stijgen na 278 dagen vanaf injectie. Deze dalende en vervolgens stijgende trend is

ook waargenomen in het middeldiepe grondwater in peilbuis A02, 6 meter van het injectiepunt. In peilbuis A01 blijft het DOC-gehalte ruim boven de waarden gemeten voor de nulsituatie. De waterstofconcentraties dalen echter tot beneden de maximale referentiewaarde. Een mogelijke reden voor de lage waterstofconcentraties is dat veel waterstof wordt geconsumeerd voor toegenomen biologische afbraak, dat daardoor de geproduceerde waterstof direct weer wordt omgezet en er dus lage concentraties gemeten worden. In peilbuis A02 zakt de DOC-concentratie nagenoeg terug tot het niveau van de nulsituatie en de waterstofconcentratie zakt tot onder de maximale referentiewaarde.

In het middeldiepe grondwater in de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05 zijn na 331 dagen verhoogde DOC-concentraties aanwezig ten opzichte van de gemiddelde waarden gemeten tijdens het nulsituatieonderzoek (Tabel 5.3). Met name in peilbuis A05 is een hoge DOC-concentratie aanwezig. Dit resulteert ook in verhoogde waterstofconcentraties. Peilbuis A05 staat enkele meters stroomafwaarts van de plaats waar Nutrolase geïnjecteerd is. Het substraat is na 331 dagen na injectie nog steeds in hoge concentraties aanwezig en is niet volledig met het grondwater meegestroomd of verdund geraakt. Na 415 dagen heeft in peilbuis A04 een toename van DOC plaatsgevonden terwijl in peilbuis A05 het substraat verdwenen is. Hieruit blijkt dat de verspreiding van DOC ruim een jaar na injectie een grilliger verloop krijgt.

Tabel 5.3 DOC- en waterstofconcentraties gemeten in de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05 na 331 en 415 dagen na substraatinjectie. - = niet bemonsterd.

Rood = ruim boven de nulsituatiewaarde.

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	DOC (mg/l)		H2 (nM)	
		331 dgn	415 dgn	331 dgn	415 dgn
A03	5,4-6,4	118,1	79,6	1,4	0,3
A04	3-4	13,3	--	0,2	--
	5,3-6,3	55,4	115,7	0,9	1,1
A05	3-4	7,9	--	0,1	--
	5,4-6,4	348,5	19,7	2,9	0,3

De waterstofconcentraties in het middeldiepe grondwater van peilbuis A03 en A04 zijn gelegen onder de maximale referentiewaarde ondanks dat de DOC-concentraties hoog zijn. Echter de concentratie is met name in peilbuis A03 hoger dan in hetzelfde grondwatertraject van peilbuis A01 en A02 en tevens lijken hier de condities met betrekking tot de waterstof gunstiger. Ook hier is het mogelijk dat het waterstof direct verbruikt wordt zodra het gevormd wordt waardoor er lage waterstofconcentraties gemeten worden ondanks een hoge DOC-concentratie. De sterke afname van de DOC-concentratie in met name peilbuis A02 wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door verdunning door de natuurlijke grondwaterstroming.

Opvallend zijn de waargenomen pieken in waterstofconcentratie in het ondiepe grondwater in peilbuis A01 en A02 na 19 dagen na de injectie (Figuur 5.2). Ondanks dat de DOC-gehalten nauwelijks zijn gestegen ten opzichte van de nulsituatie heeft er een zeer sterke stijging plaatsgevonden van de waterstofconcentraties. Na 19 dagen verdwijnt de waterstof weer nagenoeg, mogelijk doordat het snel wordt verbruikt bij biologische omzettingen. Omdat verhoogde waterstofconcentraties worden waargenomen maar geen verhoogde DOC-gehalten lijkt het erop dat waterstof zich sneller door het grondwater verspreidt dan DOC

In het diepe grondwater vindt in zowel peilbuizen A01 als A02 in eerste instantie een stijging van het DOC-gehalte plaats. Na 19 dagen daalt deze concentratie echter weer. Dit komt

overeen met het beeld van de bromideconcentraties, waardoor het lijkt dat het substraat hier weer onttrokken wordt door deepwell A of dat het substraat wegzakt naar dieper gelegen grondwater. In het diepe grondwater in peilbuis A01 worden in eerste instantie ook verhoogde waterstofconcentraties gemeten die vervolgens weer dalen tot onder de maximale referentiewaarde. In het diepe grondwater in peilbuis A02 vindt nauwelijks een stijging van de waterstofconcentraties plaats ten opzichte van de maximale referentieconcentratie. Dit is logisch omdat er eveneens geen DOC is dat omgezet kan worden naar waterstof.

Tussenconclusie: Na injectie nemen in het middeldiepe grondwater de DOC- en waterstofconcentraties toe tot boven de minimaal gewenste waarde voor reductieve dechlorering. Dit duidt op de aanwezigheid van substraat. Na 54 dagen na injectie dalen de DOC- en waterstofconcentraties weer in het middeldiepe grondwater tussen deepwell A en de injectiepunten. Stroomafwaarts zijn na 331 dagen nog verhoogde DOC-concentraties aangetroffen en is er dus nog substraat aanwezig. Na 415 dagen krijgt echter het concentratieverloop van DOC een grillig patroon en is 3 meter stroomafwaarts geen verhoogde DOC-concentratie meer waargenomen. In het ondiepe en diepe grondwater zijn de DOC- en waterstofconcentraties niet verhoogd en is dus geen substraat aanwezig.

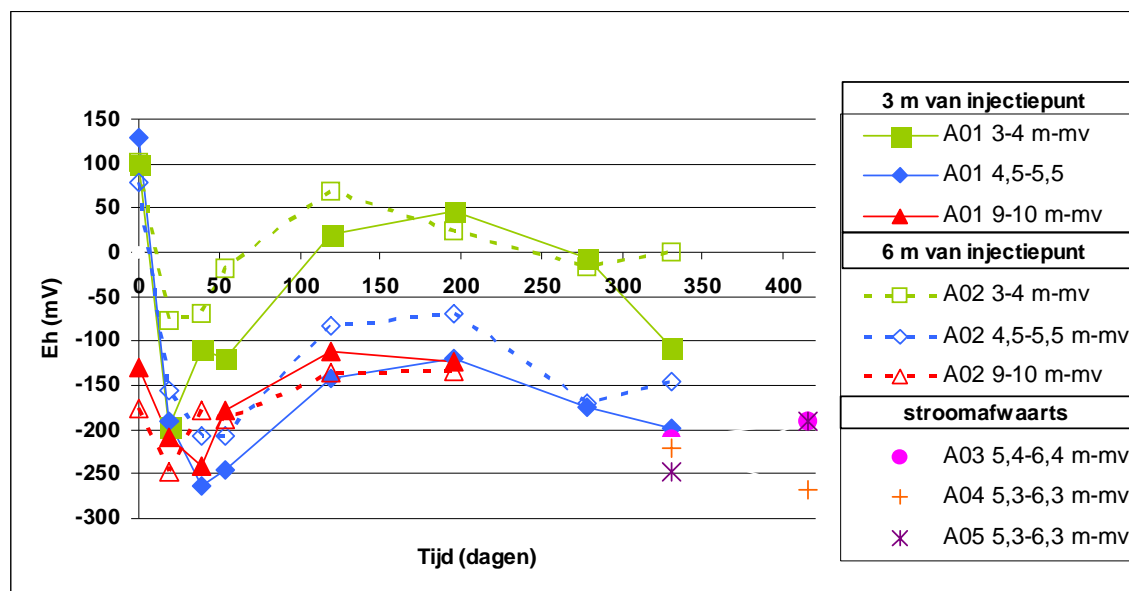
5.5 Redoxparameters

5.5.1 Redoxpotentiaal

De redoxpotentiaal is een belangrijke (som)parameter voor (volledige) reductieve dechlorering. Deze moet voldoende laag zijn om volledige reductieve dechlorering plaats te kunnen laten vinden. Optimale omstandigheden voor reductieve dechlorering liggen beneden -250 mV, maar aangezien de redoxpotentiaal als somparameter slechts een indicatieve waarde heeft, kan bij meetwaarden van ca. -150 mV en lager ook al enige reductieve dechlorering optreden. In Figuur 5.3 zijn de redoxpotentialen weergegeven die zijn gemeten in het veld in het grondwater van peilbuizen A01 en A02. Eveneens zijn de waarden weergegeven die zijn gemeten in het middeldiepe grondwater van de aanvullende peilbuizen op 331 dagen na injectie. De data van alle filters zijn opgenomen in Bijlage E.5. In de legenda van de figuur is de afstand van de peilbuizen tot de injectiepunten weergegeven. Doordat op de y-as zowel positieve als negatieve waarden staan en de x-as de y-as bij 0 snijdt, is de x-as weergegeven in het midden van de figuur.

Met name de redoxpotentiaal in peilbuizen A01 en A02 in het middeldiepe (4,5-5,5 m-mv) grondwater daalt snel van waarden rond +100 mV naar waarden variërend van -170 mV tot -250 mV. Door de substraatinjectie dalen de redoxpotentialen dus sterk richting de optimale waarden en verbeteren de condities voor volledige afbraak. Op 54 dagen na de injectie stijgen de redoxpotentialen echter weer om na 195 dagen opnieuw te dalen. Deze daling komt mogelijk door verhoogde microbiële activiteit door toename van de grondwatertemperatuur in het voorjaar en de zomer. De redoxpotentialen in het middeldiepe grondwater blijven gedurende de gehele periode na injectie ver beneden de waarden gemeten tijdens de vastlegging van de nulsituatie.

In het middeldiepe grondwater van de stroomafwaarts geplaatste peilbuizen A03, A04 en A05 is op 331 dagen na de injectie een redoxpotentiaal gemeten die dicht gelegen is bij de optimale waarde. Voor reductieve dechlorering zijn de redoxcondities hier dan nog steeds optimaal om de reductieve dechlorering van de aanwezige VOCs plaats te laten vinden. Tussen 311 en 415 dagen zijn in peilbuizen A03 en A05 de redoxpotentialen licht gestegen en in peilbuis A04 is de potentiaal in deze periode gedaald.



Figuur 5.3 Redoxpotentialen in het grondwater in de filters van peilbuizen A01 en A02 met afstanden tot injectiepunt en in het middeldiepe grondwater van de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05.

De redoxpotentialen in het ondiepe en diepe grondwater dalen in eerste instantie ook sterk, maar nemen na 19 dagen na injectie weer toe tot waarden die nagenoeg gelijk zijn aan de gemeten waarden tijdens de vastlegging van de nulsituatie. Met name in het ondiepe grondwater zijn deze waarden hoog en is de redoxpotentiaal verre van optimaal voor reductieve dechlorering, al daalt de potentiaal in peilbuis A01 weer naar meer gunstigere waarden. Er zijn echter geen verhoogde DOC- en waterstofconcentraties meer gemeten, dus is het niet duidelijk waar deze daling door veroorzaakt wordt.

De trend van de redoxpotentialen komt over het algemeen goed overeen met de resultaten van de DOC- en waterstofconcentraties. Dit is te goed te zien in het ondiepe grondwater in peilbuizen A01 en A02. De redoxpotentiaal daalt hier in de eerste 19 dagen, waarin ook een sterke stijging in waterstofconcentratie is gemeten. Daarna stijgt de potentiaal snel tot boven 0 mV en verdwijnt de waterstof ook nagenoeg. Door de stijging van de redoxpotentiaal en het verdwijnen van de waterstof verslechteren de condities voor volledige (reductieve) dechlorering. In het middeldiepe grondwater zijn verhoogde DOC- en waterstofconcentraties aanwezig, met name de eerste 54 dagen in peilbuis A01 en A02 en na 331 dagen in de stroomafwaarts gelegen peilbuizen. Gedurende deze perioden zijn ook lage redoxpotentialen gemeten.

Tussenconclusie: In het middeldiepe grondwater zijn met name in de eerste 54 dagen na injectie lage redoxpotentialen gemeten in de peilbuizen tussen de injectiepunten en diepwell A. Na 54 dagen stijgen de potentialen weer zodra ook de DOC- en waterstofconcentraties dalen. Stroomafwaarts zijn na 331 dagen na injectie nog lage redoxpotentialen gemeten die ideaal zijn voor (volledige) reductieve dechlorering. Deze potentialen zijn tussen 331 en 415 dagen wel weer licht gestegen. In het ondiepe en diepe grondwater dalen de redoxpotentialen enkel in het begin en nemen weer toe tot het niveau van de nulsituatie na 19 dagen na injectie.

5.5.2 Opgelost zuurstof, nitraat, sulfaat, ijzer en mangaan

Opgelost zuurstof, nitraat, sulfaat, ijzer en mangaan zijn specifieke redoxparameters voor de beoordeling van de redoxtoestand van het grondwater. Voor reductieve dechlorering zijn anaërobe omstandigheden noodzakelijk. Dit komt in de praktijk neer op zuurstofconcentraties < 0,5 mg/l. Aanwezig nitraat en sulfaat kunnen reductieve dechlorering remmen. Het aanwezige substraat zal namelijk eerst verbruikt worden voor de reductie van nitraat en vervolgens van sulfaat alvorens het gebruikt wordt voor reductieve dechlorering. Een aanwijzing dat de omstandigheden voor reductieve dechlorering gunstiger worden, is dan ook dat de nitraat- en sulfaatconcentraties gaan dalen. Een andere aanwijzing voor gunstigere redoxcondities is de toename van de concentraties van opgelost ijzer. IJzer (Fe^{3+}), dat in vaste vorm in de bodem aanwezig is, reduceert bij lagere redoxpotentialen naar ijzer (Fe^{2+}) dat oplost in het grondwater. Dit geldt eveneens voor mangaan. Echter, ijzer- en mangaanreductie remmen eveneens de reductieve dechlorering doordat dit concurrerende processen zijn.

In Tabel 5.4 zijn de monitoringsresultaten weergegeven van opgelost zuurstof, nitraat-, sulfaat-, ijzer- en mangaanconcentraties. In het grondwater in nagenoeg alle peilbuizen is een concentratie van opgelost zuurstof gemeten beneden 0,5 mg/l. Enkel in peilbuis A02 (4,5-5,5 m-mv) is een waarde van 0,6 mg/l gemeten na 19 dagen na injectie. Deze zuurstofconcentratie is echter weer gedaald vanaf 34 dagen na injectie. Met betrekking tot de opgeloste zuurstof zijn en blijven de omstandigheden gunstig voor reductieve dechlorering.

De nitraatconcentraties zijn over het algemeen niet veel veranderd ten opzichte van de nulsituatie. De situatie voorafgaande aan de injecties was al gunstig voor reductieve dechlorering met betrekking tot de nitraatconcentraties. Enkel in het ondiepe grondwater was nitraat aanwezig boven de detectielimiet van 0,5 mg/l en gedurende de pilot zijn de concentraties gedaald. Een duidelijke reden voor deze daling is niet bekend aangezien in het ondiepe grondwater geen substraat aanwezig is dat gebruikt kan worden voor nitraatreductie.

De sulfaatconcentratie in het middeldiepe grondwater in peilbuis A01 laat na 119 dagen een sterke daling zien van 84 naar 20 mg/l. Dit duidt op sulfaatreductie waarbij sulfaat wordt omgezet. In deze periode is ook een afname in het middeldiepe grondwater van peilbuis A02 te zien maar deze afname is minder sterk. Voor sulfaatreductie wordt ook substraat gebruikt. Ter plaatse van peilbuis A01 is meer substraat aanwezig dan bij peilbuis A02 en kan dus ook meer sulfaat omgezet worden. Sulfaatreductie is een concurrerend proces voor het verbruik van het substraat. Sulfaatreductie duidt echter ook op redoxomstandigheden die gunstig zijn voor reductieve dechlorering. Na 119 dagen stijgt de sulfaatconcentratie weer in dit grondwatertraject, mogelijk door instromend grondwater met sulfaat. In het middeldiepe grondwater in de peilbuizen die stroomafwaarts zijn geplaatst, zijn lage concentraties aanwezig. Deze liggen ver beneden de gemiddelde concentraties die zijn gemeten in dit grondwatertraject tijdens het vastleggen van de nulsituatie. Hier heeft dus ook sulfaatreductie plaatsgevonden. Tussen 311 en 415 dagen is de sulfaatconcentratie echter weer gestegen, eveneens mogelijk door instromend grondwater met sulfaat.

In het ondiepe en diepe grondwater lijkt er geen duidelijke afname of toename plaats te vinden.

Tabel 5.4 Opgelost zuurstof, nitraat-, sulfaat-, ijzer- en mangaanconcentraties in het grondwater van de diverse peilbuizen. Opgelost zuurstof is gemeten in het veld. - - niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	opgelost zuurstof mg/l								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn*	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	0,0	0,3	0,0	0,4	0,2	--	0,0	0,0	--
	4,5-5,5	0,0	0,6	0,0	0,3	0,0	--	0,1	0,0	--
	9-10	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	--	--	0,0	--
A02	3-4	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	--	0,2	0,0	--
	4,5-5,5	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	--	0,1	0,0	--
	9,5-10,5	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	--	--	0,0	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	0,0
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	0,2	0,0	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	0,0
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	0,0
* niet gemeten in verband met defecte zuurstofelectrode										
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	nitraat mg/l				sulfaat mg/l				
		nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	12,8	1,3	2,7	3,9	43,5	63,4	56,6	47,8	--
	4,5-5,5	<0,5	<0,5	0,6	0,5	84,0	20,3	44,2	50,2	--
	9-10	<0,5	<0,5	--	--	2,2	0,6	--	--	--
A02	3-4	2,3	<0,5	0,3	0,2	83,3	92,6	110,8	120,2	--
	4,5-5,5	<0,5	<0,5	0,2	0,1	90,5	63,4	63,3	85,1	--
	9,5-10,5	<0,5	<0,5	--	--	12,6	1,2	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	0,7	<0,5	--	--	9,6	4,0	--
A04	3-4	--	--	8,5	11,6	--	--	61,2	62,7	--
	5,3-6,3	--	--	2,6	0,7	--	--	42,2	23,9	97,9
A05	3-4	--	--	147,1	43,2	--	--	48,7	52,1	--
	5,4-6,4	--	--	20,8	13,6	--	--	6,8	1,0	8,1
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ijzer mg/l			mangaan mg/l					
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn			
A01	3-4	<0,008	4,9	0,5	0,5	0,9	1,0			
	4,5-5,5	2,1	127,6	82,7	2,7	< 0,0008	3,9			
	9-10	2,0	1,3	--	0,6	0,3	--			
A02	3-4	<0,008	1,4	7,8	2,6	5,3	7,3			
	4,5-5,5	4,3	42,1	27,9	2,6	4,4	2,8			
	9,5-10,5	1,0	1,0	--	0,5	0,4	--			
A03	5,4-6,4	--	--	73,2	--	--	3,8			
A04	3-4	--	--	<0,004	--	--	0,7			
	5,3-6,3	--	--	6,5	--	--	2,3			
A05	3-4	--	--	<0,004	--	--	0,6			
	5,4-6,4	--	--	16,7	--	--	2,3			

Er is een toename in de concentratie opgelost ijzer waargenomen in het middeldiepe grondwater met name na 119 dagen na de substraatinjectie. Nadien neemt de concentratie opgelost ijzer weer af. Dit kan komen doordat al het vaste ijzer reeds gereduceerd is of doordat de omstandigheden minder gunstig zijn geworden voor ijzerreductie en dan waarschijnlijk ook voor reductieve dechlorering. In het ondiepe grondwater in peilbuis A02 is na 331 een stijging in de opgeloste ijzerconcentratie waargenomen. Een reden hiervoor is niet duidelijk aangezien de redoxpotentiaal gelijk is gebleven en er ook geen verhoogde DOC en waterstofconcentraties zijn gemeten. Ook is niet te verwachten dat er opgelost ijzer van stroomopwaarts komt aangezien hier geen ijzerreductie te verwachten is.

De mangaanconcentraties fluctueren in alle peilbuizen, ook in het middeldiepe grondwater, en geven geen blijk van verandering in redoxcondities. Mogelijk is er nauwelijks vast mangaan in de bodem aanwezig dat in oplossing kan komen onder reducerende omstandigheden.

Tussenconclusie: Met betrekking tot de opgeloste zuurstof- en nitraatconcentraties zijn en blijven de condities gunstig voor reductieve dechlorering. In het middeldiepe grondwater vindt sulfaatreductie plaats, met name op de tijdstippen dat er eveneens verhoogde DOC- en waterstofconcentraties gemeten zijn. Dit geldt eveneens voor de ijzerreductie. Ondanks dat sulfaat- en ijzerreductie concurrerende processen zijn voor de afbraak van VOCs duidt dit er op dat de omstandigheden gunstig zijn voor reductieve dechlorering.

5.6 Nutriënten

Ammonium en fosfaat zijn nodig voor de groei van VOC-afbrekende bacteriën. Nutrolase bevat ammonium en fosfaat dat gebruikt kan worden bij de biologische afbraak van VOCs. Indien het substraat aanwezig is in het grondwater zal ook een toename van de ammonium- en fosfaatconcentraties plaatsvinden. Tabel 5.5 geeft een overzicht van de gemeten ammonium- en fosfaatconcentraties voor de injectie (nulsituatie), 119 en 331 dagen na de injectie.

Tabel 5.5 Ammonium en fosfaatconcentraties in het grondwater van peilbuizen A01 en A02 en de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05. -- = niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ammonium mg/l			totaal fosfaat mg/l		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
A01	3-4	<0,3	< 0,3	0,4	0,1	0,2	0,2
	4,5-5,5	1,1	51,3	51,2	0,0	1,4	2,6
	9-10	1,5	4,7	--	0,2	0,9	--
A02	3-4	8,1	16,5	15,0	0,0	0,0	0,0
	4,5-5,5	0,7	13,1	11,8	0,4	0,1	0,3
	9,5-10,5	1,4	1,4	--	0,2	0,2	--
A03	5,4-6,4	--	--	63,4	--	--	11,2
A04	3-4	--	--	0,2	--	--	0,1
	5,3-6,3	--	--	27,8	--	--	9,1
A05	3-4	--	--	0,3	--	--	0,1
	5,4-6,4	--	--	70,5	--	--	14,9

In het middeldiepe grondwater heeft in alle peilbuizen een stijging van de ammoniumconcentratie plaatsgevonden. In de peilbuizen waarin de grootste toename in DOC-concentraties is gemeten, is eveneens de ammoniumconcentratie het meeste toegenomen. Aangezien ook in de aanvullende peilbuizen verhoogde ammoniumconcentraties aanwezig zijn ten opzichte van de gemiddelde nulsituatieconcentratie, duidt dit er op dat in dit grondwatertraject het substraat zich verplaatst heeft. In het ondiepe grondwater zijn niet of nauwelijks stijgingen in de ammoniumconcentratie waargenomen.

De fosfaatconcentraties zijn over het algemeen in het middeldiepe grondwater ook toegenomen met uitzondering van peilbuis A02 ondanks dat hierin wel substraat is aangetroffen. Mogelijk is door de verdunning van het substraat in deze peilbuis de fosfaat dusdanig verdund dat het niet meer in verhoogde concentraties wordt waargenomen.

Op basis van de verhouding voor benodigd koolstof: stikstof: fosfaat van 1:0,2:0,02, waarbij er vanuit wordt gegaan dat 20% van het DOC gebruikt wordt voor celopbouw, is er voldoende ammonium en fosfaat aanwezig voor de bacteriën om de DOC om te zetten en om te groeien gedurende de reductieve dechlorering.

Tussenconclusie: In het middeldiepe grondwater zijn verhoogde ammonium- en fosfaatconcentraties aanwezig. De hoeveelheid ammonium en fosfaat is voldoende voor de

bacteriën om het DOC te gebruiken voor de groei. In het ondiepe en diepe grondwater zijn geen verhoogde ammonium- en fosfaatconcentraties gemeten.

5.7 Dehalococcoides-bacteriën en VC-reductases

De verspreiding van het substraat en daarmee het creëren van optimale omstandigheden voor (volledige) reductieve dechlorering heeft uiteindelijk tot doel de groei van de aanwezige *Dehalococcoides*-bacteriën te stimuleren.

Tabel 5.6 geeft een overzicht van de gemeten aantallen *Dehalococcoides* tijdens de nulsituatie en 119 en 331 dagen na injectie. Ook zijn hierin de gemeten concentraties van de VC-reductasegenen weergegeven. De getallen in rood en cursief zijn sterk verhoogd ten opzichte van de nulsituatie tot boven de minimaal gewenste aantallen van 10^3 genen/ml.

Tabel 5.6 *Dehalococcoides*-bacteriën en VC-reductases in het grondwater van de peilbuizen A01 en A02 en de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05. -- = niet bemonsterd. Rood en cursief = boven de gewenste minimale aantallen

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Dehalococcoides genkopiën/ml*					
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	415 dgn		
A01	3-4	9,24E+00	4,53E+01	<3	--		
	4,5-5,5	1,36E+01	2,57E+05	4,39E+04	--		
	9-10	1,50E+01	4,68E+02	--	--		
A02	3-4	8,66E+00	8,93E+01	<3	--		
	4,5-5,5	1,17E+01	2,68E+05	1,11E+0,3	--		
	9,5-10,5	5,70E+00	9,18E+01	--	--		
A03	5,4-6,4	--	--	1,01E+04	3,92E+04		
A04	3-4	--	--	<3	--		
	5,3-6,3	--	--	3,23E+04	5,89E+03		
A05	3-4	--	--	<3	--		
	5,4-6,4	--	--	2,90E+02	1,78E+04		
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	vcrA genkopiën/ml			bvcA genkopiën/ml		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
A01	3-4	<1,5E+01	<2	<20	<2E+00	<2	<20
	4,5-5,5	<1,5E+01	1,58E+03	2,76E+05	<2E+00	6,76E+02	2,04E+04
	9-10	3,58E+01	3,53E+02	--	<2E+00	<2	--
A02	3-4	<1,5E+01	<2	<20	<2E+00	<2	<20
	4,5-5,5	<1,5E+01	4,25E+05	1,36E+04	3,80E+00	3,09E+04	1,79E+03
	9,5-10,5	<1,5E+01	6,41E+01	--	<2E+00	<2	--
A03	5,4-6,4	--	--	1,18E+05	--	--	8,29E+03
A04	3-4	--	--	<20	--	--	<20
	5,3-6,3	--	--	3,46E+05	--	--	4,47E+03
A05	3-4	--	--	<20	--	--	<20
	5,4-6,4	--	--	1,21E+02	--	--	2,34E+02

* E+00 = 10^0 , E+01 = 10^1 , E+02 = 10^2 , E+03 = 10^3 , etc.

In de tabel is te zien dat alleen in het middeldiepe grondwater een sterke verhoging van de aantallen *Dehalococcoides*-bacteriën heeft plaatsgevonden ten opzichte van de nulsituatie. In 119 dagen na injectie van de Nutrolase zijn de aantallen toegenomen van 10^1 tot 10^5 genkopiën/ml grondwater, zoals gemeten in peilbuizen A01 en A02. Eveneens zijn de genkopiën van de VC-reductases toegenomen. Dit betekent dat de aanwezige *Dehalococcoides*-bacteriën in staat zijn om VC om te zetten naar VC indien de omstandigheden daarvoor gunstig zijn. De aantallen *Dehalococcoides*-bacteriën in het middeldiepe grondwater zijn 331 dagen na injectie afgenomen maar nog steeds aanwezig in aantallen boven de gewenste minimale hoeveelheid. In het middeldiepe grondwater van

peilbuis A05 zijn na 331 dagen na injectie $2,9 \cdot 10^2$ genkopiën/ml gemeten. Tussen 331 en 415 dagen zijn deze aantallen sterk toegenomen tot boven de gewenste waarde. Ook hier groeien de bacteriën snel zodra er substraat aanwezig is. De lagere aantallen *Dehalococcoides*-bacteriën in dit middeldiepe grondwater na 331 na injectie ten opzichte van de andere peilbuizen komt zeer waarschijnlijk doordat deze peilbuis stroomafwaarts staat van de injectiepunten en het substraat in eerste instantie de andere kant op, richting deepwell A, is getrokken. Hierdoor heeft het substraat het middeldiepe grondwater bij peilbuis A05 later bereikt en zijn de bacteriën later pas gaan groeien.

In enkele peilbuizen zijn de genkopieën van de VC-reductases toegenomen in het middeldiepe grondwater na 331 dagen vanaf injectie ondanks dat de bacterie-aantallen zelf zijn gedaald. Dit betekent dat er verhoudingsgewijs meer *Dehalococcoides*-bacteriën aanwezig zijn die VC kunnen afbreken tot etheen ten opzichte van de bemonstering na 119 dagen na injectie.

In het ondiepe en diepe grondwater zijn de aantallen *Dehalococcoides*-bacteriën niet of nauwelijks toegenomen. Deze resultaten laten zien dat alleen in het grondwatertraject waarin het substraat zich verspreid heeft de condities dusdanig gunstig zijn geworden dat de bacteriën die betrokken zijn bij volledige reductieve dechlorering kunnen groeien. In de grondwatertrajecten waarin geen verspreiding van het substraat heeft plaatsgevonden, zijn de omstandigheden niet zodanig veranderd dat er groei van de *Dehalococcoides*-bacteriën is opgetreden.

De sterke toename aan *Dehalococcoides*-bacteriën in het middeldiepe grondwater is opmerkelijk gezien de lage uitgangskonzentraties van de benodigde bacteriepopulatie en ervaringen op andere locaties. Een mogelijke reden van deze, op basis van ervaringen op andere locaties, zeer sterke toename is de relatief hoge temperatuur van het grondwater op de locatie. De temperatuur varieerde in het middeldiepe grondwater (4,5-5,5 m-mv) tussen de 16 en 17°C, terwijl de gemiddelde temperatuur van het grondwater in Nederland over het algemeen globaal tussen 12 en 14°C ligt. Een hogere temperatuur is gunstig voor de groei van de bacteriën zodra de omstandigheden daar geschikt voor zijn.

Tussenconclusie: In het middeldiepe grondwater waarin het substraat zich heeft verspreid zijn de Dehalococcoides-bacteriën snel sterk in aantal toegenomen evenals de genkopiën van de VC-reductases. Deze snelle en sterke toename is mogelijk mede veroorzaakt door de relatief hoge grondwatertemperatuur. In de grondwatertrajecten waarin geen substraat aanwezig is, zijn ook de Dehalococcoides-bacteriën niet in aantallen toegenomen.

5.8 Verontreinigingssituatie en dechloreringsgraad

5.8.1 Verontreinigingssituatie

In Tabel 5.7 zijn de gemeten VOCl-concentraties en de afbraakproducten weergegeven in het ondiepe, middeldiepe en diepe grondwater van peilbuizen A01, A02 en de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05. De waarden in rood en cursief gedrukt zijn concentraties die zijn gelegen boven de interventiewaarden. Deze staan eveneens in de tabel vermeld.

Na 19 dagen na de injectie is er een hoge piek in PCE, TCE, cis-DCE en VC in het grondwater te zien in deepwell A. Eveneens is er etheen en ethaan aangetroffen. Dit laatste betekent dat er al ergens volledige reductieve dechlorering plaatsvond. Gedurende de substraatinjecties heeft de pomp stil gestaan, waardoor er geen aanvoer was van grondwater en de VOCl-concentratie in het grondwater meer in evenwicht kon komen met de

bodemdeeltjes. Dit grondwater is vervolgens weer aangetrokken door de deepwell waardoor hogere concentraties in deepwell A zijn gemeten. De concentratie in deepwell A neemt af nadat de pomp is stilgezet na 38 dagen vanaf injectie en er geen verontreinigd grondwater actief meer wordt aangetrokken.

In het diepe grondwater van peilbuis A01 zijn tijdens de nulsituatie en gedurende de pilot geen verontreinigingen met VOCs waargenomen en in het diepe grondwater van peilbuis A02 zijn na 19 dagen na injectie geen verontreinigingen meer aangetoond. Na 195 dagen is het diepe grondwater niet meer bemonsterd en geanalyseerd. Gedurende de pilot heeft hier geen verspreiding van VOCs naar het diepere grondwater plaatsgevonden. In het diepe grondwater in peilbuis A02 zijn na 19 dagen na injectie PCE en cis-DCE nog aangetoond in concentraties boven de interventiewaarden, maar tijdens de volgende monitoringsronden zijn de PCE en cis-DCE niet meer aanwezig in concentraties boven de detectielimiet van 5 µg/l. In het middeldiepe grondwater in alle peilbuizen zijn gedurende de gehele pilot sterke verontreinigingen met cis-DCE en VC waargenomen. PCE is enkel na 19 dagen in concentraties boven de interventiewaarde aangetoond.

In het middeldiepe grondwater van peilbuizen A01, A02 en A04 is vanaf 119 dagen etheen aangetroffen en in peilbuis A03 ethaan. Dit betekent dat in deze grondwatertrajecten volledige afbraak van de VOCs plaatsvindt tot aan etheen of ethaan. Deze volledige afbraak gebeurt alleen in het deel van de bodem waarin de Nutrolase zich het beste heeft verspreid en waar de *Dehalococcoides*-bacteriën sterk in aantal zijn toegenomen. Het substraat heeft de omstandigheden dusdanig geoptimaliseerd dat volledige afbraak van de aanwezige VOCs kan plaatsvinden. In het middeldiepe grondwater in peilbuis A05 zijn geen etheen en ethaan aangetoond ondanks dat in dit grondwatertraject het substraat zich heeft verspreid en dat na 415 dagen na injectie de *Dehalococcoides*-bacteriën sterk zijn toegenomen. Mogelijk is er wel etheen of ethaan gevormd, maar door de relatief lage concentraties aan cis-DCE en VC is dit niet genoeg om boven de detectielimiet uit te komen.

In het ondiepe grondwater zijn gedurende alle monitoringsronden sterke verontreinigingen aan PCE aangetoond. Dit is opmerkelijk aangezien er in het verleden een ontgraving van de bovengrond heeft plaatsgevonden waarbij ten noorden van de wasserij en ook onder de bebouwing tot 4,5 m-mv ontgraven is. Mogelijk is er op het achterterrein of onder de bebouwing in de bovengrond een restverontreiniging of bron aanwezig die voor nalevering zorgt.

In het ondiepe grondwater is geen etheen en/of ethaan gevormd. Wel neemt de concentratie cis-DCE toe en wordt er VC gevormd. In dit grondwatertraject heeft geen verspreiding van substraat plaatsgevonden en zijn de opstandigheden niet verbeterd voor volledige reductieve dechlorering naar etheen of ethaan.

Tussenconclusie: In het middeldiepe grondwater waarin het substraat zich heeft verspreid vindt volledige afbraak van VOCI tot etheen of ethaan plaats. In de grondwatertrajecten waarin geen substraat aanwezig is, vindt wel afbraak plaats tot cis-DCE en in mindere mate tot VC, maar geen vorming van etheen of ethaan. In de bovengrond lijkt nalevering van PCE plaats te vinden.

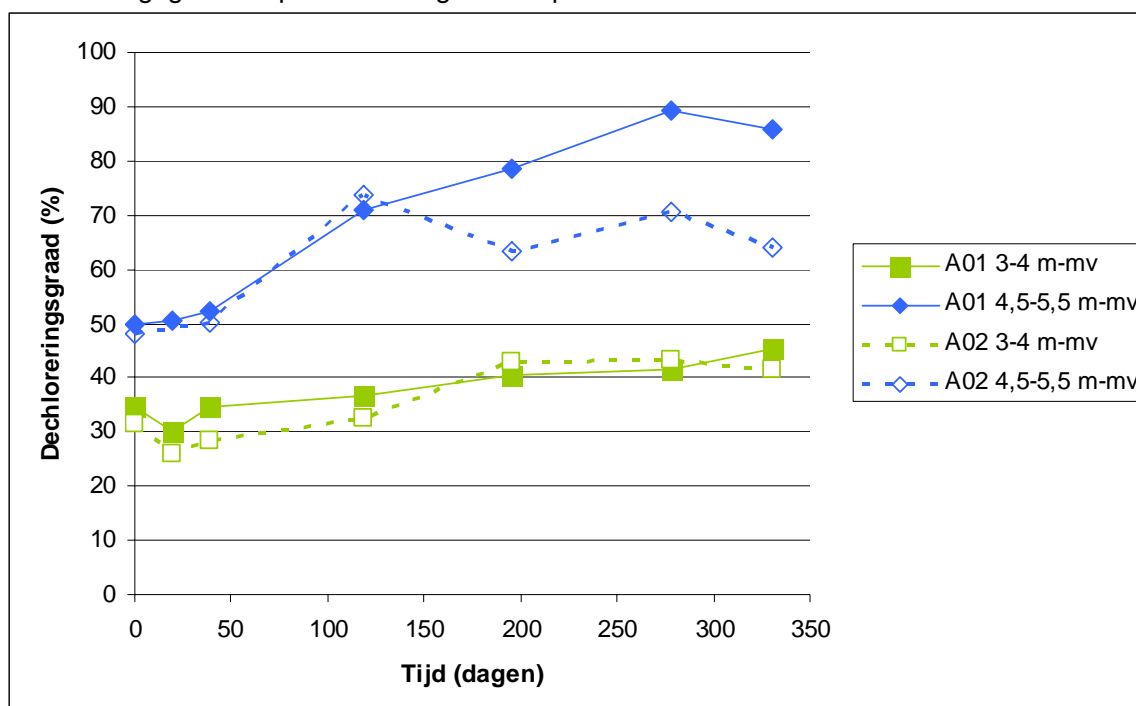
Tabel 5.7 Concentraties VOCs en de afbraakproducten etheen en ethaan in het grondwater van peilbuizen A01, A02 en de aanvullende peilbuizen A03, A04 en A05. - = niet bemonsterd, << = onder detectielimiet.

Rood en cursief = boven interventiewaarde

Peilbuis met filterdiepte	tijd na injectie dagen	Methaan µg/l	Etheen µg/l	Ethaan µg/l	VC µg/l	trans-DCE µg/l	cis-DCE µg/l	TCE µg/l	PCE µg/l
interventiewaarde		--	--	--	5	20	20	500	40
Deepwell A	19	6574	98	39	2249	15	9548	2155	5758
	54	3534	80	22	831	7	2636	39	53
	119	50	<<	<<	74	<<	266	89	348
	195	30	<<	<<	<<	<<	76	45	159
A01 3-4m-mv	0	8	<<	<<	<<	<<	66	22	42
	19	<<	<<	<<	<<	<<	72	35	73
	54	<<	<<	<<	<<	<<	101	38	65
	119	6322	<<	<<	5	<<	60	20	42
	195	7512	<<	<<	7	<<	107	31	43
	278	11277	<<	<<	9	<<	148	46	48
331	12075	<<	<<	9	<<	242	32	41	
A01 4,5-5,5 m-mv	0	10	<<	<<	13	<<	660	18	14
	19	13	<<	<<	13	<<	264	6	8
	54	188	<<	<<	35	<<	518	<<	<<
	119	11731	20	<<	268	<<	180	<<	<<
	195	9350	49	<<	86	<<	113	<<	<<
	278	10553	79	<<	109	<<	13	<<	<<
331	10253	91	<<	170	<<	38	7	<<	
A01 9-10 m-mv	0	7743	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	19	10060	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	54	18606	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	119	10325	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	613	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
331	--	--	-	--	--	--	--	--	
A02 3-4 m-mv	0	75	<<	<<	<<	<<	138	64	123
	19	69	<<	<<	<<	<<	81	47	125
	54	205	<<	<<	<<	<<	87	48	106
	119	3010	<<	<<	5	<<	101	64	90
	195	4882	<<	<<	6	<<	377	110	58
	278	8753	<<	<<	<<	<<	812	210	99
331	9413	<<	<<	<<	<<	428	132	82	
A02 4,5-5,5 m-mv	0	14	<<	<<	4	<<	552	26	29
	19	48	<<	<<	<<	<<	<<	<<	45
	54	440	<<	<<	15	<<	418	10	13
	119	6488	128	<<	88	<<	483	<<	5
	195	154	21	<<	36	<<	249	<<	<<
	278	93	29	<<	46	<<	159	<<	<<
331	490	25	<<	70	<<	313	<<	<<	
A02 9,5-10,5 m-mv	0	6725	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	19	2818	<<	<<	<<	<<	136	142	836
	54	6940	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	119	8984	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	1373	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
331	--	--	--	--	--	--	--	--	
A03 5,5-6,5 m-mv	278	22797	<<	20	<<	<<	11	<<	<<
	331	25577	<<	15	<<	<<	12	<<	<<
	415	23200	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
A04 3-4 m-mv	278	10456	<<	<<	22	<<	69	25	46
	331	9174	<<	<<	7	<<	104	38	50
A04 4,5-5,5 m-mv	278	9374	50	<<	80	<<	38	<<	<<
	331	12776	44	<<	81	<<	75	<<	<<
	415	17592	26	<<	8	<<	<<	<<	<<
A05 3-4 m-mv	278	12540	<<	<<	14	<<	92	19	47
	331	9211	<<	<<	<<	<<	82	27	52
A05 5,5-6,5 m-mv	278	22465	<<	<<	112	<<	168	22	<<
	331	13414	<<	<<	117	<<	61	<<	<<
	415	15373	<<	<<	11	<<	23	<<	<<

5.8.2 Dechloreringsgraad

Om beter inzicht te krijgen in de reductieve dechlorering is de dechloreringsgraad berekend voor het ondiepe en middeldiepe grondwater. In Figuur 5.4 zijn de berekende dechloreringsgraden weergegeven van peilbuizen A01 en A02. Van het diepe grondwater is geen dechloreringsgraad bepaald omdat in de diepe filters in de beide peilbuizen geen verontreinigingen aanwezig waren. Van de aanvullende peilbuizen is evenmin een dechloreringsgraad bepaald vanwege het beperkte aantal data.



Figuur 5.4 Dechloreringsgraad in de peilbuizen A01 en A02 aan de kant van de Nutrolase-injectie

In het middeldiepe grondwater is een stijging van de dechloreringsgraad te zien vanaf 54 dagen na substraatinjectie. In peilbuis A01 zet de dechlorering door tot 278 dagen. In peilbuis A02 stijgt de dechloreringsgraad tot 119 dagen en blijft daarna nagenoeg gelijk. Hier heeft dus dechlorering plaatsgevonden van de VOCs en dit komt overeen met de verbetering van de geochemische condities en de toename van de *Dehalococcoides*-bacteriën. De stagnatie van de dechlorering komt eveneens overeen met de afname van de DOC- en waterstofconcentraties in peilbuis A02 tot onder het niveau van voor de substraatinjectie. In peilbuis A01 neemt de DOC-concentratie ook af maar blijft ruim boven de concentraties gemeten tijdens de vastlegging van de nulsituatie. In peilbuis A02 lijkt dus niet voldoende substraat meer aanwezig te zijn om dechlorering van de VOCs voort te zetten.

In de figuur is te zien dat in het ondiepe grondwater een zeer lichte stijging van de dechloreringsgraad optreedt. Dit wordt veroorzaakt door enige omzetting van PCE en TCE naar cis-DCE. De dechloreringsgraad blijft laag. Dit betekent dat er niet veel dechlorering plaatsvindt.

Tussenconclusie: Op basis van de dechloreringsgraad is te zien dat de aanwezige VOCs in het middeldiepe grondwater omgezet worden door reductieve dechlorering. In het ondiepe grondwater vindt nauwelijks reductieve dechlorering plaats.

6 Resultaten en discussie sojaolie

6.1 Zintuiglijke waarnemingen

Gedurende de bemonstering van de monitoringspeilbuizen C05 en C06 aan de kant van de sojaolie zijn er zintuiglijk geen sporen van dit substraat waargenomen (Bijlage E.1). Tijdens alle bemonsteringen waren de grondwatermonsters helder en was er eveneens geen drijfslag op het water waar te nemen. Sojaolie is immers lichter dan water, bij aanwezigheid in het grondwater zou het een drijfslag vormen indien het uit de gemaakt emulsie vrij zou zijn gekomen.

Tijdens het plaatsen van peilbuis C07, ter plaatse van een injectiepunt, werd olie aangetroffen in de vorm van een dunne laag olie op het boormateriaal en aan de opgeboorde bodemdeeltjes. Deze olie leek over het gehele boortraject aanwezig te zijn. Tijdens de bemonstering van het grondwater uit deze peilbuis werd op zowel het ondiepe als middeldiepe grondwatermonster een filmlaag aangetroffen. Dit duidt erop dat er ter plaatse van peilbuis C07 sojaolie aanwezig is. Er was echter geen sprake van een drijfslag van sojaolie bij het snijdende filter, waardoor het erop lijkt dat de emulsie zich niet dusdanig ontbonden heeft dat de sojaolie is gaan drijven.

Tussenconclusie: In het grondwater op 2 en 4 meter afstand van de injectiepunten is sojaolie zintuiglijk niet waargenomen. Ter plaatse van de injectiepunten is sojaolie wel zintuiglijk waargenomen tussen de bodemdeeltjes en als filmlaag op de grondwatermonsters

6.2 Algemene parameters: pH, Ec en temperatuur

Een overzicht van de pH, Ec en temperatuur van het grondwater in de monitoringspeilbuizen aan de kant van de sojaolie-injecties is weergegeven in Tabel 6.1 .

De pH van het grondwater in de diverse peilbuizen fluctueert tussen 5,7 en 7,3 en er zijn geen stijgende of dalende trends waarneembaar. De injectie van de sojaolie heeft dus geen invloed gehad op de pH van het grondwater. Het geleidingsvermogen neemt alleen in het ondiepe grondwater van peilbuis C06 (2 meter afstand van de injectiepunten) na 19 dagen vanaf injectie toe van 860 tot 1660 $\mu\text{S}/\text{cm}$, waarna het weer daalt. In de overige peilbuizen fluctueert de Ec en is geen stijgende of dalende trend waarneembaar. In de aanvullende peilbuis C07 is eveneens geen stijging van de Ec waargenomen ten opzichte van de nulsituatie, ondanks dat hier zintuiglijk sojaolie is waargenomen. De sojaolie lijkt geen effect te hebben op de Ec. Waardoor de stijging in Ec in het ondiepe grondwater van peilbuis C06 is veroorzaakt is niet duidelijk.

Tabel 6.1 pH, geleidingsvermogen (Ec) en temperatuur van het grondwater van peilbuizen C05 en C06 en de aanvullende peilbuis C07, gemeten in het veld. - - = niet bemonsterd

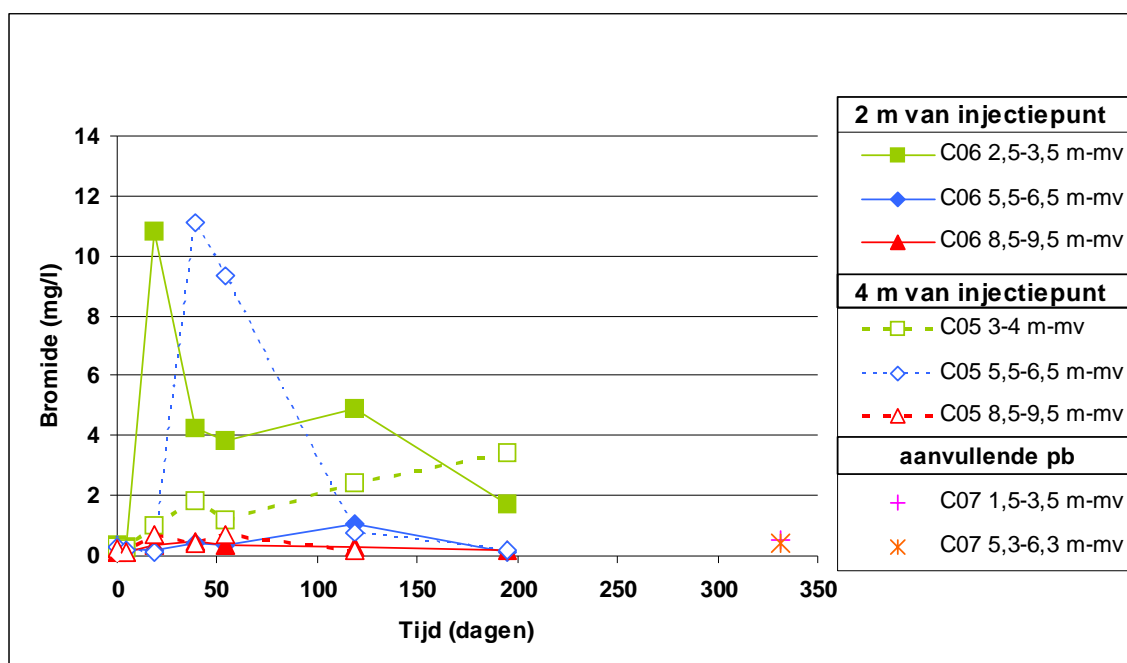
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	pH								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	6,5	6,3	6,3	6,2	5,7	6,5	--	--	--
	4,5-5,5	6,3	6,1	6,1	6,0	5,8	6,2	--	--	--
	9-10	7,0	6,8	6,8	6,5	6,8	6,8	--	--	--
C06	3-4	6,7	6,7	6,6	6,5	6,7	6,7	--	--	--
	4,5-5,5	6,3	6,4	6,2	5,8	6,2	6,4	--	--	--
	9,5-10,5	6,9	6,8	6,6	6,5	7,1	7,3	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	6,7	6,8	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	6,4	6,2	6,1
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Ec (µS/cm)								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	879	809	885	841	910	885	--	--	--
	5,5-6,5	683	673	745	733	714	764	--	--	--
	8,5-9,5	557	719	559	677	617	419	--	--	--
C06	2,5-3,5	860	1660	1180	1060	940	1100	--	--	--
	5,5-6,5	744	950	774	735	730	813	--	--	--
	8,5-9,5	380	598	718	550	344	463	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	902	752	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	711	653	387
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	temperatuur °C								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	19,5	19,7	20,3	20,7	18,1	14,1	--	--	--
	5,5-6,5	18,0	18,8	18,8	18,8	17,7	14,9	--	--	--
	8,5-9,5	17,9	18,5	18,2	18,0	17,0	15,1	--	--	--
C06	2,5-3,5	19,7	20,4	20,5	20,8	17,8	11,8	--	--	--
	5,5-6,5	18,4	18,5	19,0	19,2	18,2	13,5	--	--	--
	8,5-9,5	17,8	18,0	17,7	17,8	16,8	15,0	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	15,0	16,8	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	16,7	17,5	18,5

De temperatuur van het grondwater neemt over het algemeen toe ten opzichte van de nulsituatie in de eerste 54 dagen na de injectie. De temperatuur neemt ook hier af met de diepte van het grondwater, behalve na 195 dagen na injectie. Dan neemt de temperatuur toe met de diepte. Dit komt zeer waarschijnlijk door het tijdstip van de bemonstering, dat was in januari. De temperatuur lijkt deels gekoppeld aan het jaargetijde en de buitentemperatuur. Deze neemt af in de winter en toe in de zomer. De temperatuur van het grondwater in deze peilbuizen is eveneens relatief hoog ten opzichte van de gemiddelde Nederlandse grondwatertemperatuur.

Tussenconclusie: De sojaolie injecties hebben geen tot nauwelijks effect gehad op de pH en de Ec. De temperatuur van het grondwater is ook hier relatief hoog ten opzichte van de gemiddelde Nederlandse grondwatertemperatuur.

6.3 Bromidetracer

Bij peilbuis C06 (2 meter van injectiepunt) is na 19 dagen een sterke stijging te zien van de bromideconcentratie waarna deze daalt en enige tijd stabiel blijft rond 4 mg/l (= 10-maal de nulsituatieconcentratie). Vervolgens daalt de concentratie weer verder (Figuur 6.1). In het middeldiepe grondwater van peilbuis C05 (4 meter van injectiepunt) is 39 dagen na injectie een sterke stijging in bromideconcentratie waargenomen. De concentratie daalt vervolgens weer naar de waarde van voor de injectie van het substraat. Voor wat betreft de bromideconcentratie in het ondiepe grondwater van peilbuis C05 is vanaf 54 dagen na injectie een stijgende trend waarneembaar. In peilbuis C07, ter plaatse van het middelste injectiepunt, worden na 331 dagen na injectie geen verhoogde bromideconcentraties gemeten. In peilbuizen C05 en C06 heeft na 195 dagen geen bemonstering meer plaatsgevonden.



Figuur 6.1 Bromideconcentraties in het grondwater in de filters van peilbuizen C05 en C06 met afstanden tot injectiepunt en in het ondiepe en middeldiepe grondwater van aanvullende peilbuis C07.

Op basis van de resultaten lijkt het dat de bromide zich relatief snel heeft verspreid gedurende de tijd dat de onttrekkingsbron heeft aangestaan (tot 43 dagen na injectie). Vervolgens heeft de bromide zich langzaam verspreid in het ondiepe grondwater richting peilbuis C05. Peilbuis C05 ligt stroomafwaarts van de sojaolie-injectiepunten. In de overige grondwaterlagen vindt geen verdere verspreiding plaats. Een mogelijke reden dat de bromide zich verder door het ondiepe grondwater verspreidt, terwijl er geen andere indicaties van substraatverspreiding zijn, is dat een deel van de emulsie uit elkaar is gevallen en dat de sojaolie aan de bodemdeeltje is gaan hechten. De bromide heeft vervolgens kunnen oplossen in het ondiepe grondwater en zich kunnen verspreiden.

De bromide aan de kant van de sojaolie verspreidt zich langzamer dan aan de kant van de Nutrolase. De bromide is in eerste instantie aanwezig in de emulsie van de sojaolie. Het kan met de emulsie mee verspreiden door het grondwater, maar ook onafhankelijk van het substraat indien de emulsie uit elkaar valt en daarbij de bromide vrijkomt of dat het oplost vanuit de emulsie. In alle gevallen zal de verspreiding van de bromide langzamer gaan dan bij de Nutrolase. Immers, de sojaolie verspreidt zich langzamer dan Nutrolase door de lagere wateroplosbaarheid; de emulsie moet eerst uit elkaar vallen voordat de bromide vrij komt of de bromide moet eerst vanuit het substraat oplossen.

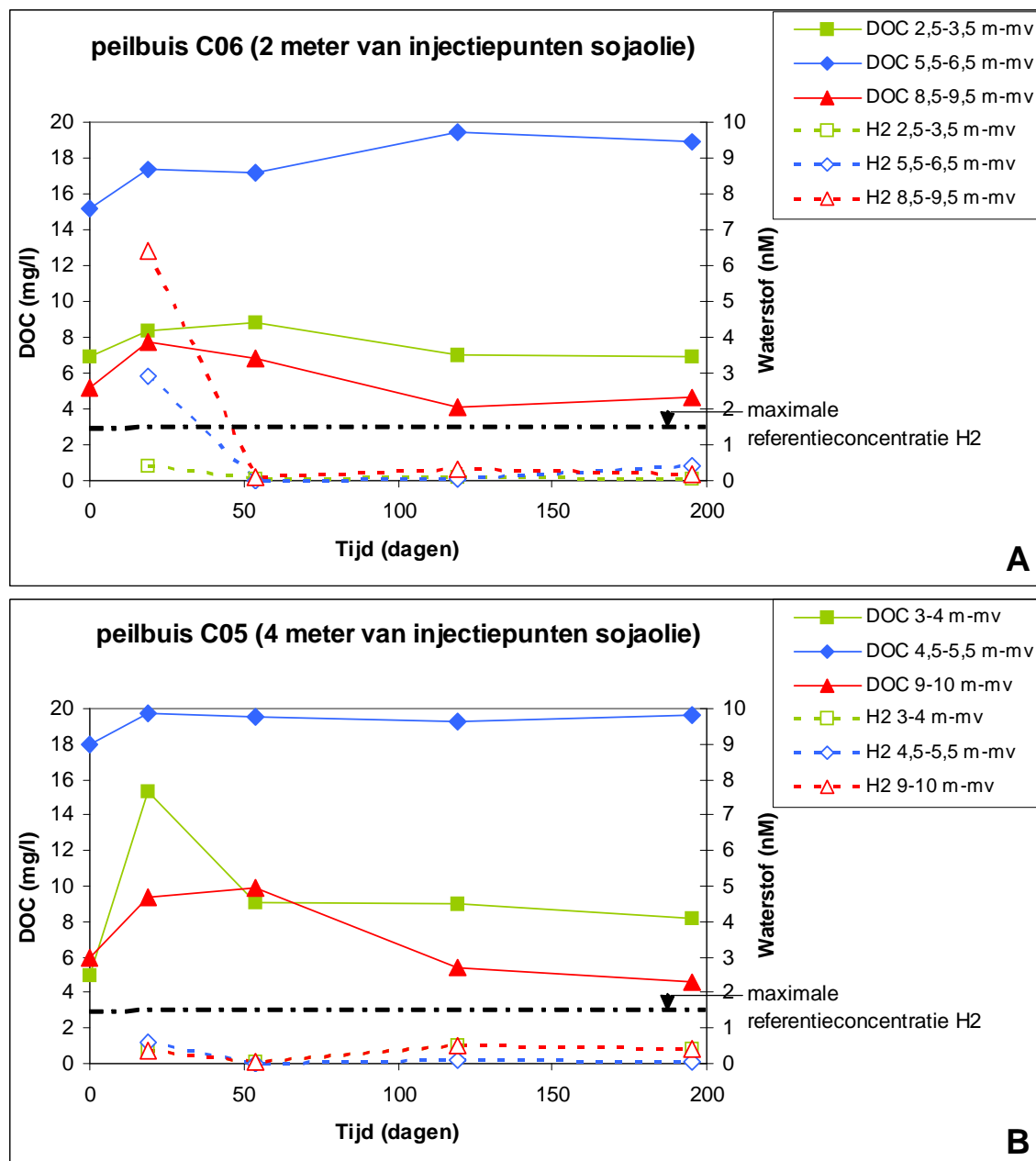
Tussenconclusie: In het ondiepe grondwater op 2 meter afstand en in het middeldiepe grondwater op 4 meter van de injectiepunten zijn verhoogde concentraties bromide aanwezig. Ter plaatse van de injectiepunten waar sojaolie zintuiglijk is waargenomen zijn geen verhoogde bromideconcentraties gemeten.

6.4 DOC en waterstof

In Figuur 6.2 zijn de resultaten van peilbuizen C06 (figuur a, 2 meter van de injectiepunten) en C05 (figuur b, 4 meter van de injectiepunten) weergegeven. Tevens is in de figuur de maximale referentiewaarde voor waterstof van 1,5 nM weergegeven. In Bijlage E.4 staan alle gemeten DOC- en waterstofconcentraties.

In het grondwater van alle filters is nagenoeg geen stijging van de DOC-gehalten waargenomen ten opzichte van de nulsituatie. Enkel in peilbuis C05, die het verst is gelegen van het injectiepunt is na 19 dagen een lichte stijging van de DOC-gehalten gemeten van 5 naar 15 mg/l. Echter, na 49 dagen daalt deze concentratie weer tot het niveau van voor de substraatinjecties. Ondanks dat er in enkele filters wel verhoogde bromideconcentraties zijn waargenomen zijn de DOC-concentraties niet toegenomen. Sojaolie heeft een grotere retardatie in het grondwater dan bromide. In geen van de peilbuizen is een DOC-concentratie gemeten boven de indicatief gewenste waarde van 20 mg/l.

De waterstofconcentraties in het middeldiepe en diepe grondwater van peilbuizen C06, die het dichtst bij de injectiepunten liggen, is na 19 dagen verhoogd ten opzichte van de referentiewaarde en is gelegen ruim boven de minimaal gewenste waarden van 2 nM. Deze concentraties dalen echter weer snel tot onder deze gewenste waarde en de maximale referentiewaarde. In het ondiepe, middeldiepe en diepe grondwater van peilbuis C05 neemt geen van de waterstofconcentraties toe en zijn ze allen gelegen beneden de maximale referentiewaarde van 1,5 nM. De sojaolie heeft zich niet (actief) verspreid door middel van de onttrekking en ook na het stopzetten van deepwell A heeft er geen verspreiding plaatsgevonden in 119 dagen na injectie.



Figuur 6.2 DOC-gehalten en waterstofconcentraties in het grondwater in de filters van peilbuis C06 (fig. a) en peilbuis C05 (fig. b). De maximale referentieconcentratie H2 is de achtergrondwaarde van de waterstof in het grondwater op de locatie.

In het middeldiepe grondwater ter plaatse van de sojaolie-injectie in peilbuis C07 (Tabel 6.2) is na 331 dagen na injectie een verhoogd DOC-gehalte gemeten en een verhoogde waterstofconcentratie. Ter plaatse waar de sojaolie zintuiglijk is waargenomen lijkt de sojaolie dus ook omgezet te worden naar waterstof. Deze verhoogde concentraties zijn echter 415 dagen na injectie niet meer aangetoond. De omzetting van de sojaolie heeft verder niet meer plaatsgevonden.

Tabel 6.2 DOC- en waterstofconcentraties gemeten in de aanvullende peilbuis C07 na 331 en 415 dagen na substraatinjectie. - = niet bemonsterd. Rood en cursief = ruim boven nulsituatiewaarde.

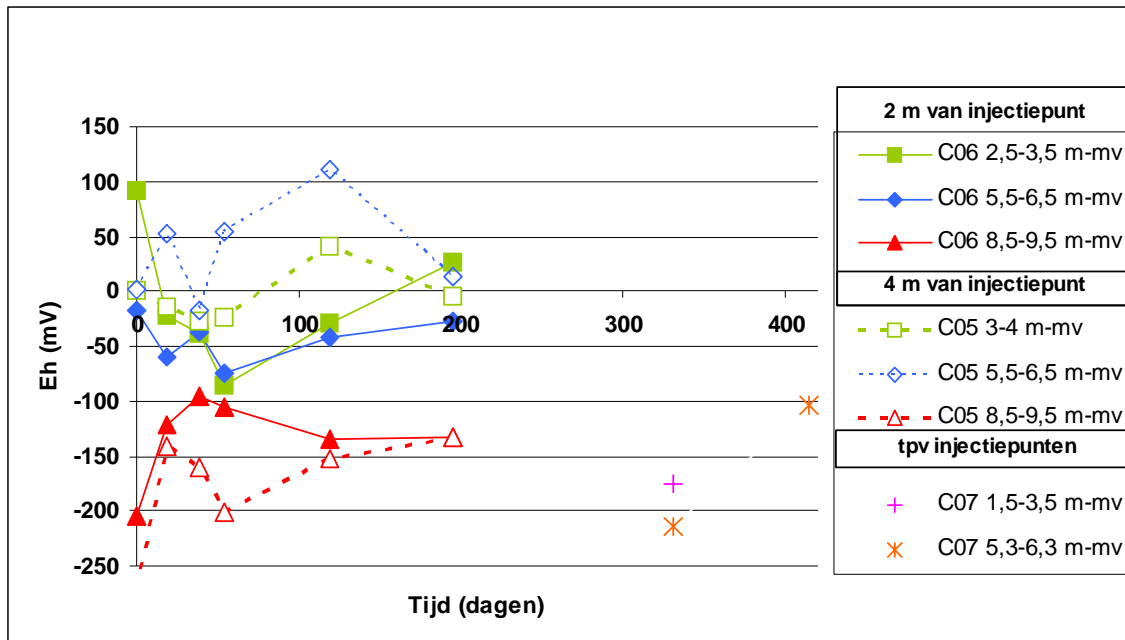
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	DOC (mg/l)		H2 (nM)	
		331 dgn	415 dgn	331 dgn	415 dgn
C07	1,5-3,5	6,4	--	0,5	--
	5,3-6,3	29,9	16,8	1,8	0,1

Tussenconclusie: In het grondwater op 2 en 4 meter afstand van de injectiepunten zijn nagenoeg geen verhoogde DOC- en waterstofconcentraties gemeten. Dit duidt erop dat het substraat zich hier niet verspreid heeft. Ter plaatse van de injectie zijn wel verhoogde DOC- en waterstofconcentraties gemeten na 331 dagen na injectie. Deze verhoogde concentraties zijn echter na 415 dagen weer verdwenen.

6.5 Redoxparameters

6.5.1 Redoxpotentiaal

In Figuur 6.3 zijn de redoxpotentialen in de tijd van het grondwater uit de filters van peilbuizen C05 en C06 weergegeven, met de afstand van de peilbuizen tot de injectiepunten. Ook zijn de potentialen opgenomen van de aanvullende peilbuis C07 op 331 dagen na de injectie van het substraat. De schaalverdeling van de x-as staat in het midden van de grafiek omdat op de y-as zowel positieve als negatieve waarden staan en de x-as de y-as bij 0 snijdt.



Figuur 6.3 Redoxpotentialen in het grondwater in de filters van peilbuizen C06 (2 meter van de injectiepunten) en C05 (4 meter van de injectiepunten) en van de aanvullende peilbuis C07 na 331 dagen na injectie.

In de eerste 54 dagen na injectie daalt de redoxpotentiaal in peilbuis C06 om vervolgens weer te stijgen. De laagste potentialen die wordt gemeten in het ondiepe en diepe grondwater zijn -86 en -75 mV, respectievelijk. Dit is nog ver boven de ideale redoxpotentiaal voor reductieve dechlorering. De potentiaal in het diepe grondwater is lager, maar deze stijgt zelfs na de injectie van het substraat. De daling in het begin in het ondiepe en middeldiepe

grondwater heeft mogelijk te maken met de stijging van de waterstofconcentraties na 19 dagen, al wordt er verder geen verhoogde DOC-concentratie waargenomen. In het ondiepe, middeldiepe en diepe grondwater in peilbuis C05 worden enkele fluctuaties in de redoxpotentiaal gemeten. Er is geen verband met de injectie van het substraat aangezien er in deze peilbuizen evenmin veranderingen in de DOC- en waterstofconcentraties zijn gemeten. De redoxpotentiaal in het diepe grondwater ligt ook in deze peilbuis lager dan in de bovengenoemde grondwatertrajecten.

De redoxpotentiaal in de aanvullende peilbuis C07, die op de plek staat waar de sojaolie is geïnjecteerd, ligt na 331 dagen na injectie rond de -200 mV. Dit is in de buurt van de ideale redoxpotentiaal voor reductieve dechlorering. Met name in het middeldiepe grondwaterfilter is de potentiaal laag. In dit grondwater zijn ook verhoogde DOC- en waterstofconcentraties gemeten. Echter na 415 dagen na injectie is de redoxpotentiaal hier in het middeldiepe grondwater weer gestegen tot -103 mV en zijn de omstandigheden voor reductieve dechlorering weer ongunstiger geworden.

Tussenconclusie: De redoxpotentialen dalen op 2 tot 4 meter afstand van de injectiepunten niet tot nauwelijks als gevolg van de sojaolie-injectie: de potentialen blijven ver boven de ideale potentiaal van - 250 mV. Ter plaatse van de injectie zijn na 331 dagen na injectie wel gunstige redoxpotentialen voor reductieve dechlorering gemeten. Deze gunstige condities zijn na 415 dagen weer verdwenen.

6.5.2 Opgelost zuurstof, nitraat, sulfaat, ijzer en mangaan.

De gemeten redoxparameters opgelost zuurstof, nitraat, sulfaat, ijzer en mangaan zijn weergegeven in Tabel 6.3. Voor opgelost zuurstof zijn in het grondwater in alle peilbuizen concentraties gemeten beneden 0,5 mg/l. De substraatinjecties hebben geen invloed gehad op de zuurstofconcentraties in het grondwater. In het ondiepe grondwater van peilbuizen C05 en C06 zijn de nitraatconcentraties toegenomen. Een duidelijke reden hiervoor is niet aan te wijzen, mogelijk komt dit door instromend grondwater. Het is wel een aanwijzing dat de redoxtoestand voor reductieve dechlorering aan de kant van de sojaolie-injecties niet verbeterd is. In de sulfaat-, ijzer- en mangaanconcentraties in alle filters in de peilbuizen C05 en C06 zijn nauwelijks veranderingen opgetreden ten opzichte van de nulsituatie en ook is hier de redoxtoestand met betrekking tot deze parameters niet verbeterd voor volledige reductieve dechlorering. In het ondiepe en middeldiepe grondwater van peilbuis C07 zijn vergelijkbare concentraties nitraat en sulfaat aanwezig als in dezelfde trajecten in peilbuis C05 en C06. Aanwezig substraat heeft (nog) niet geleid tot nitraat- of sulfaatreductie.

Tabel 6.3 Opgelost zuurstof, nitraat-, sulfaat-, ijzer- en mangaanconcentraties in het grondwater van peilbuizen C05, C06 en de aanvullende peilbuis C07. Opgelost zuurstof is gemeten in het veld. - = niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	opgelost zuurstof mg/l							
		nulsituatie	19 dgn	34 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn*	278 dgn	331 dgn
C05	3-4	0,00	0,19	0,1	0,04	0,1	--	--	--
	5,5-6,5	0,00	0,1	0,1	0,02	0,12	--	--	--
	8,5-9,5	0,00	0,1	0,1	0,08	0,11	--	--	--
C06	2,5-3,5	1,87	1,39	0,1	0,03	0,16	--	--	--
	5,5-6,5	0,10	0,1	0,1	0,02	0,11	--	--	--
	8,5-9,5	0,07	0,1	0,1	0,06	0,0	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0
* niet gemeten in verband met defecte zuurstofelectrode									
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	nitraat mg/l				sulfaat mg/l			
		nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn
C05	3-4	3,0	18,2	--	--	98,0	89,6	--	--
	5,5-6,5	<0,5	<0,5	--	--	37,0	39,1	--	--
	8,5-9,5	<0,5	<0,5	--	--	60,0	58,4	--	--
C06	2,5-3,5	5,0	34,4	--	--	100,0	117,4	--	--
	5,5-6,5	<0,5	<0,5	--	--	54,0	36,7	--	--
	8,5-9,5	<0,5	<0,5	--	--	6,0	4,7	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	30,3	36,8	--	--	100,3	84,9
	5,3-6,3	--	--	0,6	0,3	--	--	32,0	38,0
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ijzer mg/l			mangaan mg/l				
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn		
C05	3-4	98,0	89,6	--	0,7	0,5	--		
	5,5-6,5	37,0	39,1	--	0,0	0,1	--		
	8,5-9,5	60,0	58,4	--	1,1	1,1	--		
C06	2,5-3,5	100,0	117,4	--	<0,008	0,1	--		
	5,5-6,5	54,0	36,7	--	5,9	8,9	--		
	8,5-9,5	6,0	4,7	--	2,0	1,1	--		
C07	1,5-3,5	--	--	3,6	--	--	2,7		
	5,3-6,3	--	--	12,9	--	--	1,6		

Tussenconclusie: De redoxparameters aan de kant van de sojaolie zijn niet of nauwelijks veranderd ten opzichte van de nulsituatie. Dit duidt erop dat de redoxprocessen niet of nauwelijks zijn beïnvloed, ook niet ter plaatse van de sojaolie-injecties waar een lage redoxpotentiaal gemeten is.

6.6 Nutriënten

De ammonium- en fosfaatconcentraties die zijn gemeten in peilbuizen C05, C06 en C07 zijn weergegeven in Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Ammonium- en fosfaatconcentraties in het grondwater van peilbuizen C05, C06 en de aanvullende peilbuis C07. -- = niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ammonium mg/l			totaal fosfaat mg/l		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
C05	3-4	<0,3	0,5	--	0,2	0,1	--
	5,5-6,5	5,5	7,1	--	0,1	0,0	--
	8,5-9,5	2,1	43,0	--	0,2	22,7	--
C06	2,5-3,5	<0,3	14,9	--	0,2	7,6	--
	5,5-6,5	6,6	7,9	--	0,1	0,0	--
	8,5-9,5	3,1	2,7	--	0,4	4,2	--
C07	1,5-3,5	--	--	9,0	--	--	4,7
	5,3-6,3	--	--	8,4	--	--	2,7

Er heeft een toename plaatsgevonden van de ammoniumconcentraties in het ondiepe grondwater van peilbuis C06 en in het diepe grondwater van peilbuis C05. Tevens is de fosfaatconcentratie toegenomen in het diepe grondwater van peilbuis C05. De toenames van ammonium en fosfaat komen niet overeen met de veranderingen in bromide-, DOC- en waterstofconcentraties die zijn gemeten. Omdat er geen verhoogde gehalten aan DOC zijn

gemeten en ook de waterstofconcentraties niet zijn toegenomen, lijken ammonium en fosfaat die waren toegevoegd aan de sojaolie makkelijker op lossen uit de emulsie in het grondwater en zich afzonderlijk van het substraat te hebben verspreiden in het grondwater. In de aanvullende peilbuis zijn vergelijkbare ammoniumconcentraties gemeten in vergelijking met de andere peilbuizen. De fosfaatconcentraties in het middeldiepe grondwater bij peilbuis C07 zijn hoger dan in het middeldiepe grondwater bij peilbuis C05 en C06. Ondanks dat ammonium is toegevoegd aan de sojaolie is dit niet meer aanwezig ter plaatse van C07 en zal het zich hebben verspreidt. Fosfaat is nog wel aanwezig en dus niet allemaal meegestroomd met het grondwater.

Tussenconclusie: De ammonium- en fosfaatconcentraties nemen met name toe in het ondiepe en diepe grondwater. De verspreiding van deze nutriënten vindt onafhankelijk plaats van de verspreiding van de sojaolie.

6.7 Dehalococcoides-bacteriën en VC-reductases

Tabel 6.5 geeft een overzicht van de gemeten bacterieaantallen tijdens de nulsituatie en na 119 dagen na injectie in peilbuizen C05 en C06. In peilbuis C07 zijn de bacterieaantallen bepaald 331 dagen na injectie. Ook zijn de gemeten concentraties van de VC-reductasegenen weergegeven.

Tabel 6.5 Dehalococcoides-bacteriën en VC-reductases in het grondwater van peilbuizen C05, C06 en de aanvullende peilbuis C07. - = niet bemonsterd.

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Dehalococcoides genkopiën/ml					
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn			
C05	3-4	2,65E+01	5,19E+01	--			
	5,5-6,5	1,09E+02	5,72E+01	--			
	8,5-9,5	2,06E+02	9,57E+01	--			
C06	2,5-3,5	4,20E+01	1,39E+02	--			
	5,5-6,5	1,23E+02	8,27E+00	--			
	8,5-9,5	1,28E+02	4,93E+02	--			
C07	1,5-3,5	--	--	9,95E+00			
	5,3-6,3	--	--	1,83E+01			
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	vcrA genkopiën/ml			bvcA genkopiën/ml		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
C05	3-4	2,25E+02	8,60E+00	--	<2E+01	<2	--
	5,5-6,5	2,22E+01	1,38E+01	--	<2E+01	<2	--
	8,5-9,5	5,23E+02	2,63E+01	--	<2E+01	<2	--
C06	2,5-3,5	1,21E+02	4,84E+00	--	1,39E+02	<2	--
	5,5-6,5	3,93E+01	<2	--	4,97E+02	<2	--
	8,5-9,5	3,64E+02	2,65E+02	--	2,47E+02	<2	--
C07	1,5-3,5	--	--	2,34E+01	--	--	<20
	5,3-6,3	--	--	3,38E+02	--	--	<20

In alle grondwatertrajecten van de peilbuizen C05 en C06 zijn de aantallen *Dehalococcoides*-bacteriën niet of nauwelijks toegenomen. Dit geldt eveneens voor de VC-reductasegenen. In het middeldiepe grondwater van peilbuis C07 zijn overeenkomstige bacterie-aantallen waargenomen in vergelijking met de andere peilbuizen ondanks dat hierin verhoogde waterstofconcentraties gemeten zijn. De injectie van sojaolie heeft niet geleid tot een groei van de *Dehalococcoides*-bacteriën.

Tussenconclusie: De Dehalococcoides-bacteriën zijn niet in aantal toegenomen, eveneens niet in het grondwater waar sojaolie aanwezig is. De sojaolie heeft de condities niet dusdanig geoptimaliseerd om de groei te bevorderen.

6.8 Verontreinigingssituatie en dechloreringsgraad

6.8.1 Verontreinigingssituatie

In Tabel 6.6 zijn de gemeten VOCl-concentraties en de afbraakproducten weergegeven. De waarden in rood en cursief zijn concentraties die zijn gelegen boven de interventiewaarde. In het diepere grondwater van peilbuis C05 waren tijdens de nulsituatie geen verontreinigingen aanwezig en zijn ook gedurende de monitoring geen verontreinigingen waargenomen. Er heeft geen verticale verspreiding van de verontreiniging naar het diepere grondwater plaatsgevonden gedurende de pilot. In de overige peilbuizen zijn zo nu en dan PCE-concentraties gemeten boven de interventiewaarde. Vooral de verhoogde PCE concentraties in peilbuis C05 in het ondiepe en middeldiepe grondwater zijn opvallend. In het ondiepe grondwater zijn ook aan de kant van de Nutrolase verhoogde PCE-concentraties waargenomen. In het middeldiepe grondwater aan de kant van de Nutrolase zijn echter nauwelijks verhoogde PCE concentraties waargenomen. De hoge PCE-concentraties met name in het ondiepe grondwater zijn onverwacht gezien de sanering in het verleden en worden mogelijk veroorzaakt door nalevering uit een bron die nog aanwezig is.

In de peilbuizen is ook cis-DCE aanwezig maar er is geen VC gevormd met uitzondering van het diepe grondwater bij peilbuis C06 en het middeldiepe grondwater van peilbuis C07. In geen van de peilbuizen is etheen gevormd. Dat is in peilbuizen C05 en C06 ook niet te verwachten omdat er geen VC gevormd is en de sojaolie zich niet verspreid heeft. In peilbuis C07 zijn wel verhoogde waterstofconcentraties gemeten na 331 dagen na injectie maar dit heeft niet geleid tot een overtuigende omzetting naar VC en etheen.

In het ondiepe grondwater is een lichte stijging van de PCE-concentratie waargenomen. Echter, in het middeldiepe grondwater van peilbuis C07 is de PCE-concentratie van 278 dagen tot 415 dagen sterk toegenomen. Dit duidt op nalevering van PCE uit een bron. Wat voor een bron dit is, is onbekend.

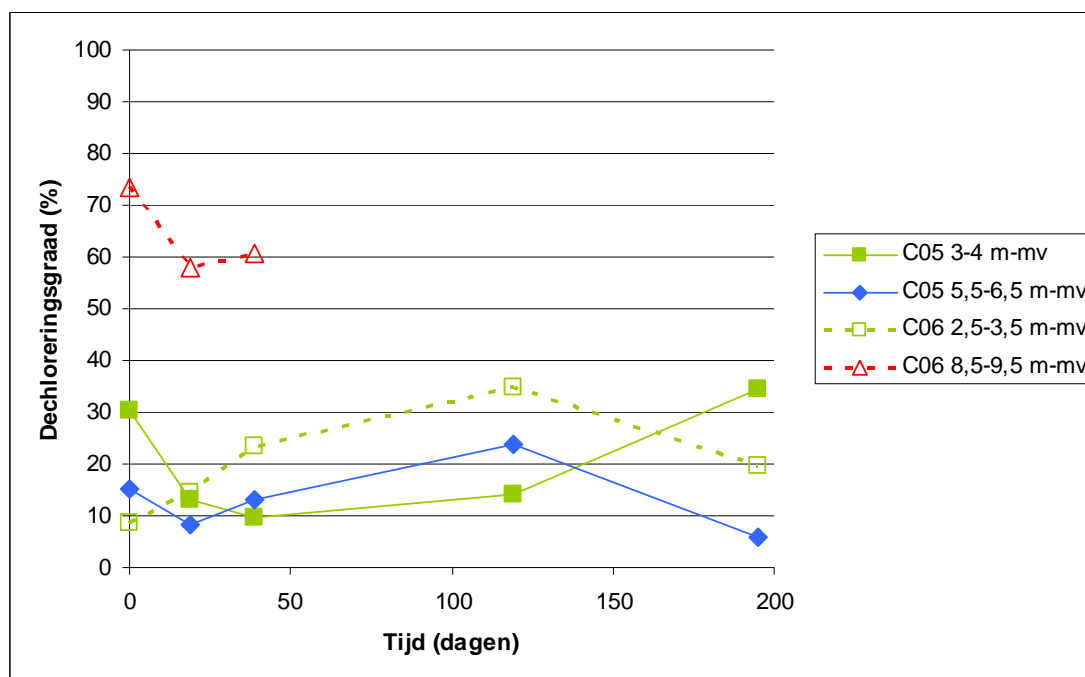
Tussenconclusie: Het grondwater op 2 meter afstand van de injectiepunten is nog sterk verontreinigd met PCE evenals het middeldiepe grondwater ter plaatse van de injectiepunten. Hierin nemen de PCE-concentraties toe, wat duidt op nalevering uit een bron. Enkel in het diepe grondwater op 4 meter afstand van de injectiepunten vindt vorming van VC plaats. Etheen en ethaan zijn niet waargenomen in de peilbuizen.

Tabel 6.6 Concentraties VOCs en de afbraakproducten etheen en ethaan in het grondwater gemeten in peilbuizen C05 en C06. - - = niet bemonsterd. << = onder detectielimiet. Rood en cursief = boven interventiewaarde

Peilbuis met filterdiepte	tijd na injectie dagen	Methaan µg/l	Etheen µg/l	Ethaan µg/l	VC µg/l	trans-DCE µg/l	cis-DCE µg/l	TCE µg/l	PCE µg/l
interventiewaarde		--	--	--	5	20	20	500	40
C05 3-4 m-mv	0	78	<<	<<	<<	<<	88	44	89
	19	253	<<	<<	<<	<<	107	229	764
	54	383	<<	<<	<<	<<	71	149	795
	119	150	<<	<<	<<	<<	60	61	316
	195	70	<<	<<	<<	<<	181	60	117
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C05 5,5-6,5 m-mv	0	687	<<	<<	<<	<<	52	15	216
	19	299	<<	<<	<<	<<	16	8	159
	54	839	<<	<<	<<	<<	13	6	67
	119	734	<<	<<	<<	<<	23	6	44
	195	637	<<	<<	<<	<<	20	26	353
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C05 8,5-9,5 m-mv	0	1783	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	19	1802	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	54	1863	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	119	4794	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	5327	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C06 2,5-3,5 m-mv	0	16	<<	<<	<<	<<	<<	15	35
	19	10	<<	<<	<<	<<	8	9	42
	54	138	<<	<<	<<	<<	19	10	38
	119	56	<<	<<	<<	<<	81	43	45
	195	27	<<	<<	<<	<<	6	5	17
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C06 5,5-6,5 m-mv	0	537	<<	<<	<<	<<	<<	<<	54
	19	450	<<	<<	<<	<<	418	49	75
	54	711	<<	<<	<<	<<	<<	<<	11
	119	790	<<	<<	<<	<<	<<	<<	21
	195	352	<<	<<	<<	<<	<<	8	17
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C06 8,5-9,5 m-mv	0	6230	<<	<<	242	<<	27	<<	<<
	19	6526	<<	<<	418	<<	597	199	49
	54	4306	<<	<<	370	<<	358	139	25
	119	7725	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	5096	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C07 1,5-3,5 m-mv	278	8307	<<	<<	<<	<<	8	<<	7
	331	2014	<<	<<	<<	<<	15	7	23
C07 5,5-6,5 m-mv	278	7948	<<	<<	9	<<	<<	<<	<<
	331	8737	<<	<<	<<	<<	31	65	555
	415	10160	<<	<<	4	<<	160	320	1768

6.8.2 Dechloreringsgraad

In Figuur 6.4 zijn de berekende dechloreringsgraden weergegeven voor het ondiepe en middeldiepe grondwater uit peilbuis C05 en voor het ondiepe en diepe grondwater uit peilbuis C06. Voor het diepe grondwater uit peilbuis C05 en voor het middeldiepe grondwater uit C06 is geen dechloreringsgraad berekend vanwege de afwezigheid van de verontreinigingen. Eveneens is voor de aanvullende peilbuis C07 geen dechloreringsgraad berekend door het beperkte aantal data.



Figuur 6.4 Dechloreringsgraad bij de sojaolie-injectie

In Figuur 6.4 is het laatste punt (t=119 dagen) voor peilbuis C06 (8,5-9,5 m-mv) niet aanwezig omdat er geen verontreinigingen en afbraakproducten waren gemeten op dit tijdstip. In de peilbuizen C05 en C06 aan de kant van de sojaolie-injecties is de dechloreringsgraad laag en neemt niet of nauwelijks toe. Na de stijging die is waargenomen in het ondiepe grondwater van peilbuis C06 in de eerste 119 dagen heeft er vanaf 119 dagen na injectie weer een daling plaatsgevonden. Uit deze resultaten blijkt dat er aan de kant van de sojaolie niet of nauwelijks reductieve dechlorering van de aanwezige VOC's plaatsvindt.

Tussenconclusie: Op basis van de dechloreringsgraad is te zien dat aan de kant van de sojaolie geen tot nauwelijks reductieve dechlorering optreedt.

7 Evaluatie pilot en beschrijving mogelijke saneringsvarianten

De doelstellingen van de pilot waren:

- 1) te bekijken of de geochemische condities op de locatie geoptimaliseerd kunnen worden voor volledige biologische afbraak van de VOCs door de injectie van substraat;
- 2) te bepalen welk substraat het meest geschikt is om de biologische afbraak van de VOCs te stimuleren;
- 3) te bekijken of de substraten actief verspreid kunnen worden doormiddel van de aanwezige diepwell.

Om deze doelstellingen te bereiken zijn enkele kennisvragen opgesteld:

1. Welk type substraat is geschikt voor toepassing bij shock-loadinjecties in een homogene bodem met een redelijk doorlatende laag met matig fijn zand en een slecht doorlatende sterk zandig, matig veenhoudende leemlaag?
2. Kan de saneringstechniek shock-loadinjectie ook kosteneffectief gebruikt worden als bioscherm?

Uit de resultaten van de pilot moet blijken of de huidige beheersmaatregel beëindigd kan worden en overgegaan kan worden op een vervolgaanpak met shock-load injecties in een bioscherm om verspreiding van VOCs tegen te gaan of een sanering van de gehele locatie plaats kan vinden om de restverontreiniging VOCs met behulp van gestimuleerde biologische afbraak te verwijderen.

7.1 Werking van de substraten

Nutrolase blijkt zeer effectief te zijn in de stimulering van de volledige reductieve dechlorering. In het middeldiepe grondwater waar het substraat terecht is gekomen, zijn de geochemische condities dusdanig geoptimaliseerd dat de gewenste *Dehalococcoides*-bacteriën in korte tijd (circa 4 maanden) zeer sterk in aantal zijn toegenomen en de VOCs volledig zijn afgebroken naar etheen en ethaan.

Na 331 dagen na injectie zijn stroomafwaarts op 3 meter afstand van de injectiepunten nog substantieel verhoogde DOC- en waterstofconcentraties aanwezig en is het substraat nog actief. De lange werkingsduur van Nutrolase is verrassend omdat het substraat goed wateroplosbaar is en daarom over het algemeen als kortwerkend wordt beschouwd. Het injecteren van een shock-loadhoeveelheid Nutrolase op deze locatie is dus zinvol om de werkingsduur te vergroten ondanks dat er dan meer substraat nodig is. Bij een eerder uitgevoerd project in IJlst (SKB, rapportnummer PT5400, 2007), waarbij eveneens een shock-loadhoeveelheid Nutrolase (protamylasse) was geïnjecteerd, is dit ook geconstateerd. Het substraat bleef minstens enkele jaren actief in de lagen waar het voldoende aanwezig was en er werd eveneens volledige reductieve dechlorering gestimuleerd. In de lagen waarin het substraat zich minder goed verspreid had, was herinjectie van het substraat nodig om reductieve dechlorering te stimuleren.

De injectie van sojaolie heeft geen of nauwelijks verandering in de geochemische condities teweeg gebracht, de aantallen *Dehalococcoides*-bacteriën zijn niet toegenomen en er is geen etheen of ethaan gevormd. Ter plaatse waar de sojaolie is geïnjecteerd en zintuiglijk is waargenomen is eenmalig een verhoging van de DOC- en waterstofconcentraties gemeten, maar dit gunstige effect heeft zich niet voortgezet en heeft niet geleid tot de groei van de *Dehalococcoides*-bacteriën en gestimuleerde volledige reductieve dechlorering tot etheen. Mogelijk blijft de sojaolie op deze locatie te veel als aparte fase aanwezig en lost het niet of zeer langzaam op in het grondwater waardoor het geen effect kan hebben op het bodemsysteem en het de reductieve dechlorering niet kan stimuleren.

7.2 Verspreiding van de substraten

In de eerste anderhalve maand is de verspreiding van de substraten actief gestimuleerd door het onttrekken van grondwater met deepwell A. Actieve verspreiding heeft voor de Nutrolase wel effect gehad in tegenstelling tot de sojaolie. De onttrekking heeft de Nutrolase stroomopwaarts in de richting van de deepwell verspreid tot minimaal 6 meter van de injectiepunten. De sojaolie heeft zich niet verspreid ondanks dat het is toegepast in combinatie met een emulgator om de sojaolie in oplossing te houden.

Uit de resultaten van de Nutrolase komt wel naar voren dat de DOC-concentraties lager worden in de richting van de deepwell en dus de hoeveelheid Nutrolase die actief verspreid is richting de deepwell gering is. Eveneens nemen de DOC- en waterstofconcentraties in de tijd sterker af op grotere afstand van de injectiepunten. De afname vindt al plaats vanaf 54 dagen na de injectie van de Nutrolase en na circa een half jaar na injectie zijn er op 6 meter afstand van de injectiepunten geen substantieel verhoogde DOC-concentraties meer aanwezig. Hierdoor is de werkingsduur van het actief verspreide substraat op deze afstand relatief kort omdat er minder elektronendonoren beschikbaar is voor afbraak. Deze afname lijkt grotendeels te worden veroorzaakt door verdunning/verspreiding met de grondwaterstroming aangezien drie meter stroomafwaarts (van zowel de monitoringspeilbuizen waarin de DOC- en waterstofconcentraties afnemen als de injectiepunten) na een jaar na injectie nog wel substantieel verhoogde DOC- en waterstofconcentraties aanwezig zijn.

De grondwateronttrekking zorgt dus voor verspreiding, maar voor langdurigere werking van het substraat zou meer substraat verspreid moeten worden. Dit zou kunnen door langer grondwater te onttrekken. Het grote risico hierbij is echter dat het substraat de deepwell bereikt. Naast ongewenste onttrekking van nog niet gebruikt substraat kan dit leiden tot verstopping van de onttrekkingsbron.

Om de verspreiding te bevorderen kan het substraat bij een vervolgtraject ook stroomopwaarts geïnjecteerd worden zodat de natuurlijke grondwaterstroming zorgt voor de verspreiding. Ook kan het injecteren van een grotere hoeveelheid substraat of het aanpassen van de afstand tussen de injectiepunten over het algemeen de verspreiding bevorderen. De aanwezigheid van een grotere hoeveelheid substraat bevordert eveneens de werkingsduur.

Ondanks dat de Nutrolase is geïnjecteerd over het gehele bodemtraject van 1,5 tot 13 m-mv heeft het zich niet goed verspreid in alle geïnjecteerde grondwaterlagen. Het substraat heeft zich voornamelijk verspreid in het middeldiepe grondwater en niet in het ondiepe en diepe grondwater. Het niet verspreiden over het gehele injectietraject kan

mogelijk komen doordat de onttrekkingsbron van deepwell A zich op 6,5 m-mv bevindt en niet over het gehele traject even goed water onttrekt. Over het algemeen zijn er in de bodem voorkeursstromen voor het grondwater aanwezig en door de onttrekking kunnen er in de loop van de jaren extra voorkeurskanalen zijn ontstaan. Minder goede onttrekking geeft ook minder verre verspreiding.

Een andere mogelijke oorzaak van slechte verspreiding in het ondiepe grondwater kan de lichte verticale grondwaterstroming op de locatie zijn. Eveneens kan het substraat zijn uitgezakt naar diepere lagen omdat het zwaarder is dan water. Tevens is het substraat van onder naar boven geïnjecteerd waarbij eerst een boorgat is gemaakt tot de maximale diepte van injectie en vervolgens de injectielans langzaam naar boven is getrokken. Door deze wijze van injectie bestaat de mogelijkheid dat het substraat wegzakt in het boorgat. Bij het uitzakken van het substraat kan het vervolgens op minder goed doordringbare lagen blijven hangen zoals op de leemlaag op 6-7 meter ter hoogte van het middeldiepe grondwater. Toch staan de peilbuizen in het diepe grondwater juist met de voet in de slecht doordringbare Eemklei (vanaf 11 m – 14 mv). Bij uitzakken van het substraat komt dit op deze ondoordringbare laag terecht. In het diepe grondwater is echter geen substraat waargenomen.

In het diepe grondwater zijn geen verontreinigingen meer waargenomen, maar het ondiepe grondwater was nog sterk verontreinigd met onder andere PCE. Om bij een vervolgetraject voldoende substraat in het ondiepe grondwater te krijgen teneinde ook hier de reductieve dechlorering te stimuleren zal hierin gericht geïnjecteerd moeten worden.

7.3 Nalevering

Een aandachtspunt op de locatie is de PCE-concentratie die met name in het ondiepe grondwater wordt aangetroffen. Gedurende de pilot is deze concentratie toegenomen en lijkt er nalevering van PER plaats te vinden.

In het verleden zijn de verontreinigingen ontgraven tot een diepte van circa 5 m-mv, zowel op het onbebouwde gedeelte waar de pilot heeft plaats gevonden als onder de bebouwing. Ondanks dat er ter plaatse van de pilot geen bebouwing aanwezig is die ontgraving van de grond destijds had kunnen belemmeren, is het mogelijk dat hier een restverontreiniging is achtergebleven die voor nalevering zorgt. Dit is echter niet erg waarschijnlijk. Er kan ook nalevering plaatsvinden van verontreiniging die onder de bebouwing achtergebleven zijn door de natuurlijke grondwaterstroming. Door de deepwell A en B is jaren lang verontreiniging verwijderd waarbij bij deepwell B is gebleken dat dit met name afkomstig was van verontreinigingen onder de bebouwing.

Nalevering kan mogelijk ook plaatsvinden door een lekkend riool. Op de locatie is nog steeds een chemische wasserij gevestigd waar PCE wordt gebruikt. Ter plaatse van de pilotlocatie ligt een riool en afvoerput waaruit wellicht lekkage plaatsvindt waardoor het ondiepe water opnieuw verontreinigd zou kunnen worden. Inspectie van het riool zou lekkage kunnen uitsluiten.

Voordat op de locatie een vervolgetraject wordt ingezet is het noodzakelijk eerst de herkomst van de PCE in het ondiepe grondwater nader te onderzoeken en indien mogelijk de nalevering uit de bron te stoppen.

7.4 Mogelijke varianten vervolgtraject

Voor de vervolgaanpak van de HIP-pilot in Amersfoort zijn diverse varianten mogelijk. Een variant zou de voortzetting van de huidige beheersmaatregel kunnen zijn, waarbij eeuwigdurend het grondwater wordt opgepompt en bovengronds gereinigd. Gezien echter de goede resultaten van de stimulering van volledige reductieve dechlorering door middel van de injecties van Nutrolase, is een eindige variant haalbaar. Daarom wordt deze eeuwigdurende variant niet als optie beschouwd en zijn varianten met de injectie van Nutrolase als uitgangspunt genomen. Sojaolie wordt buiten beschouwing gelaten aangezien de pilot heeft aangetoond dat dit substraat de reductieve dechlorering op de locatie niet kan stimuleren. Opgemerkt wordt wel dat een eindige variant alleen haalbaar is als er geen voortgaande verontreiniging van de bodem plaatsvindt.

Bij het gebruik van substraatinjecties (zowel als bioscherm of als bronmaatregel) kan gedacht worden aan actieve verspreiding van de Nutrolase doormiddel van onttrekkingsbronnen of aan passieve verspreiding met de natuurlijke grondwaterstroming. Tijdens de pilot is het substraat in het begin actief verspreid door middel van deepwell A. Echter, het substraat werd niet evenredig over het gehele geïnjecteerde traject door de bodem verspreid en concentreerde zich in het middeldiepe grondwater. Bovendien is op de locatie in de bodem en het grondwater veel ijzer aanwezig hetgeen de pomp doet verstoppert. Gedurende de grondwateronttrekking ten tijde van de beheersmaatregel liep het debiet steeds verder terug vanwege dit ijzer. Door het inbrengen van substraat neemt de kans op aangroei van micro-organismen in de leidingen en daarmee de kans op verstoppingen toe. Ook is van belang dat bij het actief onttrekken van grondwater een onttrekkingsstelsel en grondwaterzuivering operationeel gehouden moeten worden. Dit brengt verhoogde kosten met zich mee. Vanwege deze bezwaren bij het actief verspreiden van het substraat op de locatie zijn de beschreven varianten gericht op de eventuele verspreiding van het substraat door de natuurlijke grondwaterstroming.

Op hoofdlijnen zijn er twee varianten die technisch haalbaar en zinvol worden geacht. Het betreft de toepassing van Nutrolase als:

1. bioscherm;
2. aanpak van de bronzone.

Deze varianten zijn verder uitgewerkt. Binnen deze varianten zijn een aantal saneringsmaatregelen mogelijk die afzonderlijk zullen worden besproken met daarbij de voor- en nadelen, de mogelijke uitvoering en een globale kostenraming met als doel inzicht te krijgen in de financiële consequenties. In de kostenraming (waar geen rechten aan kunnen worden ontleend) zijn niet de kosten opgenomen voor de jaarlijkse monitoring, begeleiding, rapportage, etc., aangezien deze activiteiten bij elke saneringsmaatregel uitgevoerd moeten worden.

Er zijn diverse combinaties mogelijk van de verschillende saneringsmaatregelen, waardoor in feite alternatieve varianten ontstaan. Enkele daarvan zullen ook beschreven worden met daarbij de voor- en nadelen.

7.4.1 Nutrolase als bioscherm

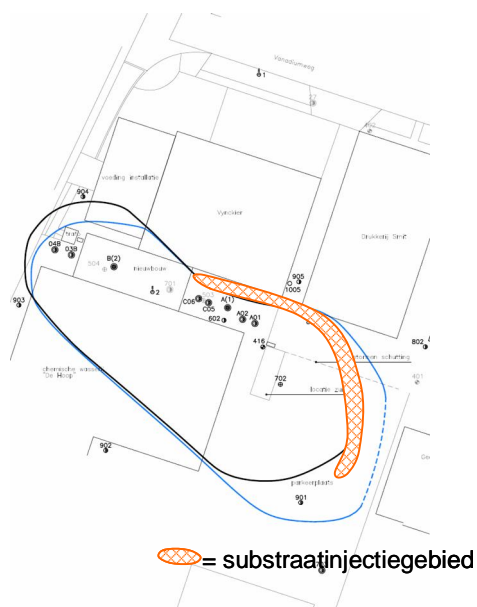
Gelet op de bovengrondse infrastructuur zijn er twee saneringsmaatregelen mogelijk voor het aanleggen van het bioscherm;

1. bioscherm aan de rand van de bronzone, op de overgang van het bron- en pluimgebied;
2. bioscherm stroomafwaarts van de pluimzone.

7.4.1.1 Saneringsmaatregel 1: Bioscherm rand bronzone

Nutrolase kan gebruikt worden als bioscherm aan de rand van de bronzone. Dit bioscherm zal stroomafwaarts aan de rand van het kerngebied van de verontreiniging aangebracht dienen te worden, zoals indicatief aangegeven in *Figuur 7.1*. De weergave van de verontreinigingsvlek is ook indicatief en zal met name aan de westzijde anders gelegen zijn, zoals is gebleken uit de resultaten van deze pilot.

Het voordeel van deze saneringsmaatregel is dat de VOC's die zich verspreiden vanuit het brongebied direct aan de grens van de bronzone weggevangen worden. Hierdoor wordt verspreiding naar de aangrenzende percelen en onder bebouwing voorkomen. De dimensionering van een afsluitend bioscherm is echter wel beperkt door de locatie en de bebouwing die hier aanwezig is. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat geen voldoende sluitend scherm gecreëerd kan worden en bestaat het risico dat de verontreinigingen zich vanuit de bronzone naar de pluim kunnen verspreiden. Een ander nadeel is dat de VOC's die zich al in de pluim onder de bebouwing bevinden niet actief aangepakt worden. Afbraak van deze VOC's zal gestimuleerd moeten worden door substraat en micro-organismen die vanuit het bioscherm door het grondwater mee worden gevoerd. Indien deze verspreiding niet voldoende optreedt zal de pluim zich mogelijk verder met de grondwaterstroming in noord-noordoostelijke richting verplaatsen. Omdat geen actieve sanering van het brongebied plaatsvindt, zal de duur van de sanering grotendeels bepaald worden door de langdurige nalevering (tientallen jaren) vanuit het brongebied naar het bioscherm. Dit betekent dat het bioscherm ook langdurig in stand gehouden dient te worden.



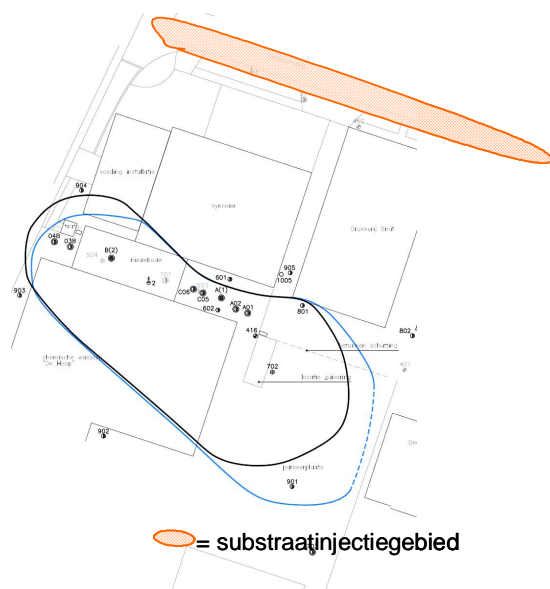
Figuur 7.1 Saneringsmaatregel 1: Nutrolase als bioscherm aan de rand van de bronzone

Gezien de mogelijke verspreiding van de Nutrolase in het bioscherm met de natuurlijke grondwaterstroming en werkingsduur van circa een jaar zal injectie van het substraat in het bioscherm een aantal keer herhaald moeten worden. Injecties kunnen met direct push uitgevoerd worden zoals is gedaan gedurende de pilot. Doordat er herhaaldelijk geïnjecteerd zal moeten worden, zou het zinvol kunnen zijn om ter plaatse van het bioscherm vaste injectiefilters te plaatsen waarmee het substraat eenvoudig herhaaldelijk geïnjecteerd kan worden. De kosten voor deze saneringsmaatregel uitgevoerd met direct push worden globaal geraamd op ca. € 15.000,- per injectieronde. Injectie via bijvoorbeeld 20 vaste filters kost globaal € 15.000,- voor de aanleg van het systeem en ca. € 4.000,- per injectieronde.

7.4.1.2 Saneringsmaatregel 2: Bioscherm stroomafwaarts pluim (Vanadiumweg)

Een bioscherm zou ook aangelegd kunnen worden stroomafwaarts van de pluim aan de Vanadiumweg (Figuur 7.2). Het grote voordeel hiervan is dat er bij de dimensionering van het scherm geen tot nauwelijks beperkingen zijn aangezien hier geen bebouwing aanwezig is. Tevens worden verontreinigingen die zich onder de bebouwing bevinden ook afgevangen en afgebroken in het scherm. Het nadeel is dat er verspreiding van de bronzone onder de bebouwing plaats gaat vinden voordat de VOC's het bioscherm bereiken waar ze afgebroken worden, met mogelijke humane risico's door uitdamping. Door de lange reisafstand van de VOCl naar het bioscherm zal deze sanering langer gaan duren dan bij saneringsmaatregel 1 waarbij het bioscherm aan de rand van de bronzone wordt geplaatst. Dit bioscherm stroomafwaarts van de pluim kan eveneens worden aangelegd door direct push of door injectie via vaste filters. Omdat ook bij dit bioscherm meerdere keren geïnjecteerd zal moeten worden, zou het zinvol kunnen zijn dit uit te voeren door middel van injectiefilters. De kosten van deze saneringsmaatregel worden geraamd op ca. € 25.000,- per ronde voor direct push. Voor de installatie van

circa 35 injectiefilters zijn de kosten ca. € 20.000,- ; de kosten per injectieronde worden dan ca. € 6.000,-.



Figuur 7.2: Saneringsmaatregel 2: Nutrolase als bioscherm stroomafwaarts van de pluim (Vanadiumweg)

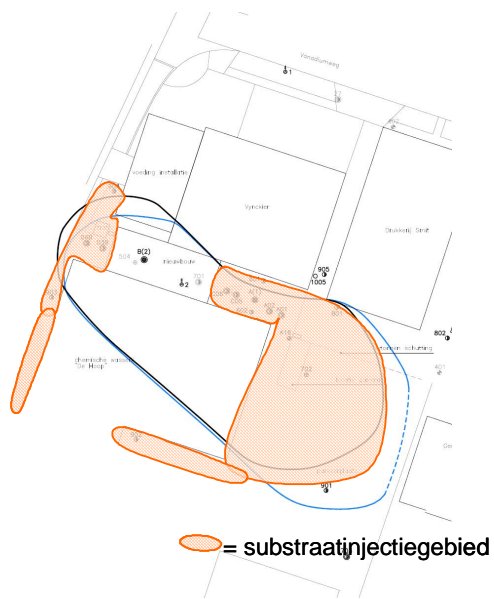
7.4.2 Substraatinjecties in bronzone

7.4.2.1 Saneringsmaatregel 3: Substraatinjecties in bronzone

Nutrolase kan ook vlakdekkend geïnjecteerd worden in de bronzone op de plaatsen waar dat mogelijk is op de locatie (Figuur 7.). Deze injectie wordt aangemerkt als saneringsmaatregel 3. Het voordeel van deze maatregel is dat de VOC's al in de bronzone afgebroken worden waardoor ze geen risico op verspreiding meer vormen. Bovendien wordt met deze maatregel de huidige eeuwigdurende beheersmaatregel omgezet in een eindige saneringsvariant waarbij de saneringsduur door de intensieve aanpak sterk wordt verkort. De saneringsduur wordt mede bepaald door de afbraaksnelheid van de VOC's door de aanwezige *Dehalococcoides*-bacteriën. Een nadeel is dat de VOC's die zich al in de pluim onder de bebouwing bevinden niet actief aangepakt worden. Afbraak van deze VOC's zal gestimuleerd moeten worden door substraat en micro-organismen die vanuit de bronzone door het grondwater mee worden gevoerd. Indien deze verspreiding niet voldoende optreedt zal de pluim zich mogelijk verder met de grondwaterstroming in noord-noordoostelijke richting verplaatsen. In dat geval zullen er aanvullende maatregelen noodzakelijk kunnen zijn.

Om de bronzone zo goed mogelijk van substraat te voorzien zal op dusdanige wijze geïnjecteerd moeten worden dat er ook verspreiding van het substraat onder het pand van de wasserij kan plaatsvinden. Dit kan door stroomopwaarts van de bebouwing te injecteren of indien mogelijk ook onder de bebouwing substraat in de bodem te brengen. Eveneens zou een systeem met injectiefilters aangelegd kunnen worden als blijkt dat er meerdere malen geïnjecteerd moet worden. Bij deze injecties in de bronzone kan na elke

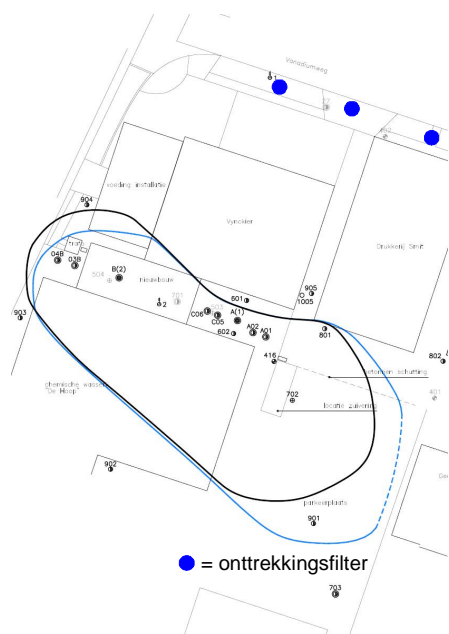
ronde worden vastgesteld waar nog verontreiniging is achter gebleven. Desgewenst kan dan locatiespecifiek nogmaals substraat geïnjecteerd worden. De globale kosten per ronde voor deze substraatinjecties in de bronzone voor ca. 100 direct push injecties zijn € 50.000,-. Voor de aanleg van een filtersysteem met 50 filters bedragen de globale kosten ca. € 35.000,- en de injecties per ronde € 10.000,-.



Figuur 7.3 Saneringsmaatregel 3: Substraatinjecties in bronzone

7.4.2.2 Saneringsmaatregel 4: beperkte grondwateronttrekking

Om verdere verspreiding van VOC's in de pluim te voorkomen kan saneringsmaatregel 3 eventueel gecombineerd worden met een beperkte grondwateronttrekking en lozing zonder zuiveringsinstallatie door middel van enkele onttrekkingsfilters stroomafwaarts van de locatie aan de Vanadiumweg (Saneringsmaatregel 4, Figuur 7.).



Figuur 7.4 Saneringsmaatregel 4: Onttrekkingsfilters stroomafwaarts van de pluim (Vanadiumweg).

Met een laag debiet ($0.5 - 1 \text{ m}^3/\text{uur}$) wordt voorkomen dat verontreinigingen die zich eventueel onder de bebouwing bevinden zich niet verder verspreiden. Tevens kan gemonitord worden of de verontreinigingen in de pluim niet toenemen mocht in de bronzone de reductieve dechlorering niet voldoende gestimuleerd blijken te worden en de verontreiniging zich onder de bebouwing verspreiden. De globale kosten voor deze saneringsmaatregel zijn eenmalige aanlegkosten van ca. € 20.000,- voor drie onttrekkingbronnen en € 7.000,- voor het jaarlijks onderhoud.

7.4.3 Combinaties van saneringsmaatregelen

De verschillende saneringsmaatregelen kunnen ook anders gecombineerd worden dan in de beide beschreven varianten waardoor bepaalde nadelen van de ene saneringsmaatregel kunnen worden opgeheven door de voordelen van de andere. Enkele van de combinaties staan in deze paragraaf beschreven.

Saneringsmaatregel 1 (bioscherm rand bronzone) kan gecombineerd worden met saneringsmaatregel 2 (bioscherm stroomafwaarts pluim). Verontreinigingen in de bronzone worden direct weggevangen in het bioscherm aan de rand van deze zone. Verontreinigingen die zich onder het pand bevinden of langs saneringsmaatregel 1 gaan worden afgebroken door het bioscherm stroomafwaarts van de pluim. Het voordeel is dat de verontreinigingen in

zowel de bronzone als de pluim zich niet verder verspreiden. Het nadeel van deze combinatie is echter dat de duur van de sanering vergroot wordt doordat de verontreinigingen zich eerst moeten verspreiden naar de bioschermen en daarbij verdund worden. Bovendien zal saneringsmaatregel 2 niet erg effectief zijn door de geringe hoeveelheid verontreiniging die het scherm bereikt omdat een groot deel al wordt afgevangen door saneringsmaatregel 1. Hierdoor wordt het moeilijk om de *Dehalococcoides*-bacteriën voldoende actief te houden. Voor het voorkomen van verspreiding van VOC's vanuit de pluim zou daarom ook saneringsmaatregel 1 gecombineerd kunnen worden met saneringsmaatregel 4 (onttrekkingsfilters stroomafwaarts van de pluim). Deze onttrekkingsfilters werken immers onafhankelijk van de hoeveelheden verontreiniging die in het grondwater aanwezig zijn. Mocht uit monitoring van de kwaliteit van het opgepompte grondwater blijken dat de concentraties VOC's te hoog zijn om ongezuiverd geloosd te mogen worden, zou alsnog gekozen kunnen worden voor saneringsmaatregel 2. Er zijn dan immers voldoende VOC's aanwezig zijn die het bioscherm actief houden.

Bij diverse combinaties van saneringsmaatregelen 1, 2 en 4 blijft de effectiviteit en daarmee de saneringsduur afhankelijk van hoe snel de verontreinigende stoffen zich vanuit de bronzone naar de schermen verspreiden en hoezeer de verontreinigingspluim daarbij uitwaaiert en verdund. Alleen bij saneringsmaatregel 3 (substraatinjecties in de bronzone) is de duur afhankelijk van hoe snel de verontreinigingen worden afgebroken. Saneringsmaatregel 3 is eigenlijk de enige van de genoemde maatregelen waarmee de sanering binnen redelijke termijn eindig wordt gemaakt. Om verspreiding vanuit de pluim te voorkomen, kunnen saneringsmaatregel 3 en 4, zoals beschreven in § 7.4.2, goed gecombineerd worden waarbij saneringsmaatregel 2 als "fall back" scenario kan worden gehanteerd, mocht het onttrokken water niet meer ongezuiverd geloosd kunnen worden. Saneringsmaatregel 3 is eveneens direct met saneringsmaatregel 2 te combineren, waarbij hier ook de kanttekening geplaatst moet worden dat het scherm van saneringsmaatregel 2 mogelijk minder effectief zal zijn door de lage VOC's-concentraties.

Saneringsmaatregel 3 is op korte termijn de meest kostbare variant omdat er op veel plaatsen substraat geïnjecteerd moet worden, waarbij de kosten voornamelijk zitten in de uitvoering van de injecties. Vooral de herhaling van de injecties is een relatief grote kostenpost. Dit geldt eveneens voor het vlakdekkend aanbrengen van injectiefilters. Daarom zou saneringsmaatregel 3 eveneens goed te combineren kunnen zijn met saneringsmaatregel 1. Het substraat in de bronzone zorgt voor de actieve afbraak van de verontreinigingen ter plaatse en het bioscherm aan de rand zorgt voor de afbraak van de verontreinigingen die nog nageleverd worden. In de bronzone wordt eenmaal een grote hoeveelheid geïnjecteerd die lang werkzaam zal zijn. Zodra het substraat in de bronzone is uitgewerkt, kan het bioscherm aan de rand van de bronzone gebruikt worden om de verspreiding van eventuele verontreinigingen die zijn achter gebleven verder te voorkomen. Dit bioscherm hoeft echter veel minder lang in stand gehouden te worden dan wanneer saneringsmaatregel 3 niet wordt uitgevoerd aangezien er beduidend minder verontreinigingen in de bronzone over zullen zijn.

8 Conclusies

Op basis van de resultaten van de pilot die is uitgevoerd kan het volgende geconcludeerd worden:

Nutrolase

- Nutrolase heeft zich na injectie verspreid in het middeldiepe grondwater. In het ondiepe en diepe grondwater heeft, hetzij door de wijze van injectie, hetzij door de grondwateronttrekking, geen verspreiding plaatsgevonden.
- Waar het substraat terecht is gekomen zijn de geochemische omstandigheden dusdanig beïnvloed dat de aantallen *Dehalococcoides*-bacteriën zeer sterk zijn toegenomen en er volledige reductieve dechlorering heeft plaatsgevonden tot etheen en ethaan. Nutrolase is dus zeer geschikt om de afbraak van VOCl te stimuleren.
- Waarschijnlijk door de relatief hoge grondwatertemperaturen, ten opzichte van gemiddelde temperaturen van het grondwater in Nederland, zijn de *Dehalococcoides*-bacteriën sterk in aantal toegenomen. Dit is gunstig voor reductieve dechlorering op de locatie.
- Na circa een jaar (331 dagen) na injectie zijn stroomafwaarts nog steeds verhoogde DOC- en waterstofconcentraties aangetoond en zijn de omstandigheden gunstig voor reductieve dechlorering. Toepassing van Nutrolase als bioscherm om verspreiding van de VOCl tegen te gaan is daarom goed mogelijk.
- Door de snelle werking kan Nutrolase ook gebruikt worden bij substraatinjecties in de bronzone om de huidige sanering eindig te maken.
- Na ruim een jaar (415 dagen na injectie) worden de omstandigheden minder gunstig en lijkt het substraat hier nagenoeg uitgewerkt of verdwenen. Bij toepassing van Nutrolase als bioscherm is herinjectie daarom noodzakelijk.
- Door onttrekking via de deepwell is het substraat actief stroomopwaarts verspreid. Hierdoor is het substraat echter ook verdund en is de werkingsduur verkort.

Sojaolie

- De sojaolie heeft zich niet verspreid na injectie. Er zijn geen verhoogde DOC- en waterstofconcentraties gemeten in de monitoringspeilbuizen op 2 en 4 meter afstand van de injectiepunten.
- Doordat de sojaolie zich niet verspreid heeft in het grondwater zijn de geochemische condities niet verbeterd voor reductieve dechlorering. Eveneens zijn de *Dehalococcoides*-bacteriën niet of nauwelijks in aantal toegenomen en heeft er geen reductieve dechlorering plaatsgevonden.
- Ter plaatse van de sojaolie-injectie, waar het substraat zintuiglijk is waargenomen, zijn eveneens de geochemische condities niet verbeterd en is reductieve dechlorering niet gestimuleerd.
- De onttrekking door deepwell A heeft de verspreiding van de sojaolie niet gestimuleerd. Actieve onttrekking is dus niet zinvol om sojaolie beter door de bodem te laten verspreiden.
- Het is niet zinvol sojaolie op deze locatie toe te passen om de volledige afbraak van de aanwezige VOCl's te stimuleren.

Op de locatie lijkt nalevering van PCE plaats te vinden. Voordat er gestart wordt met een vervolgaanpak is het noodzakelijk de oorzaak te achterhalen en indien mogelijk deze nalevering te stoppen.

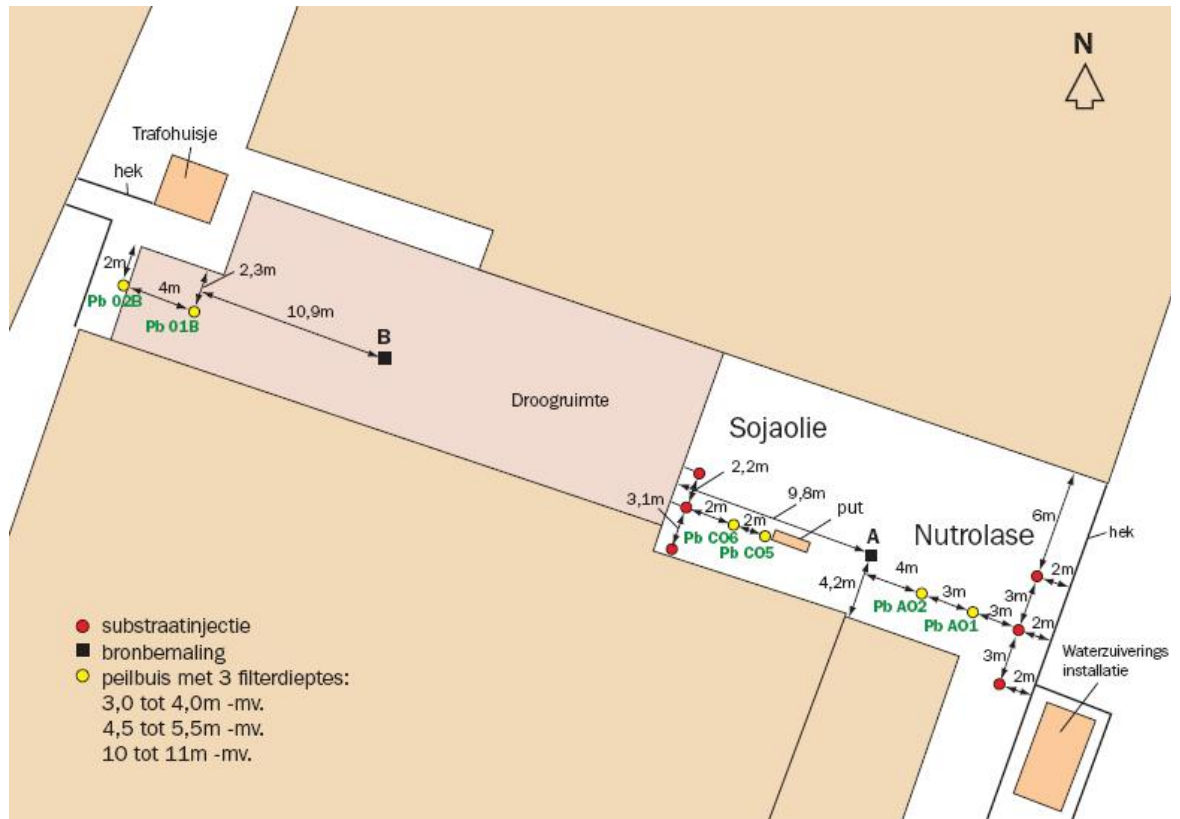
9 Aanbevelingen

Door de gunstige omstandigheden die worden gecreëerd voor reductieve dechlorering door de injectie van Nutrolase is het aan te bevelen te stoppen met de huidige beheersmaatregel en over te gaan op een saneringsvariant waarbij niet eeuwigdurend verontreinigd grondwater opgepompt hoeft te worden. Gezien de snelle werking van het substraat zou doormiddel van substraatinjecties in de bronzone van Nutrolase (saneringsmaatregel 3) de sanering waarschijnlijk eindig gemaakt kunnen worden in afzienbare tijd. De voorkeur voor deze locatie is dan ook in eerste instantie saneringsmaatregel 3 toe te passen waarbij ineens een shockload hoeveelheid in de bronzone wordt geïnjecteerd. Op basis van de resultaten en de afbraaksnelheid van de verontreinigingen kan, zodra het substraat in de bronzone nagenoeg uitgewerkt is en de verontreinigingen grotendeels verdwenen, overgegaan worden op een bioscherm aan de rand van het kerngebied (saneringsmaatregel 1), om de resterende verontreiniging om te zetten voordat deze zich verder verspreidt. Bij een geringe resterende verontreinigingsvracht zullen enkele rondes met directe injecties volstaan. Indien uit de toekomstige monitoring blijkt dat nog een relatief grote restverontreiniging aanwezig is, is het rendabel om voor dit bioscherm vaste filters te gebruiken. De exacte situering van de schermconstructie is afhankelijk van de locatie van de restverontreiniging en daarmee van de resultaten van de toekomstige monitoring. Hoe dan ook zal het eerst noodzakelijk zijn om te achterhalen of er werkelijk nalevering van PCE plaatsvindt op de locatie en wat de mogelijke oorzaak hiervan is en deze indien mogelijk te stoppen.

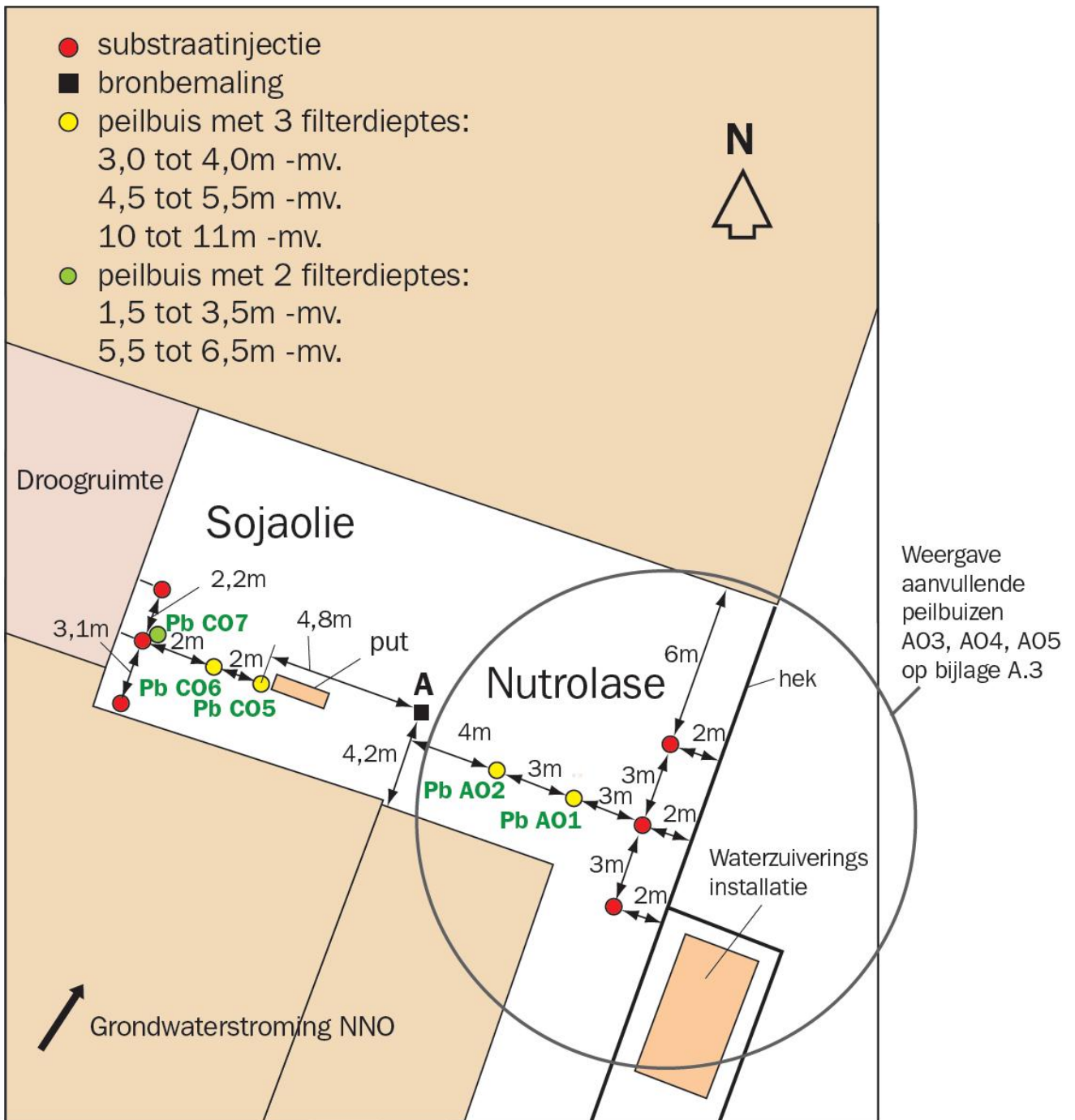
Maatregelen ter plaatse van de pluim zijn vanwege de geringere verontreinigingsgraad veel minder effectief. Daarbij zullen substraat en micro-organismen vanuit de bronzone door het grondwater mee worden gevoerd, zodat de saneringsmaatregelen in de bronzone ook afbraak in de pluim stimuleren. Er wordt geadviseerd vooralsnog geen actieve saneringsmaatregelen in de pluim te treffen, maar eerst alleen door monitoring te controleren dat hier geen onacceptabele risico's ontstaan. Als dat toch het geval blijkt, komen als terugvalscenario bij relatief lage concentraties grondwateronttrekking (saneringsmaatregel 4) en bij wat hogere concentraties een stroomafwaarts bioscherm (saneringsmaatregel 2) in aanmerking.

Geadviseerd wordt om de toekomstige monitoring niet te beperken tot de verontreinigende stoffen maar periodiek ook procesparameters mee te nemen, zoals in het onderhavige onderzoek zijn toegepast, om de voortgang van de sanering goed te kunnen blijven volgen.

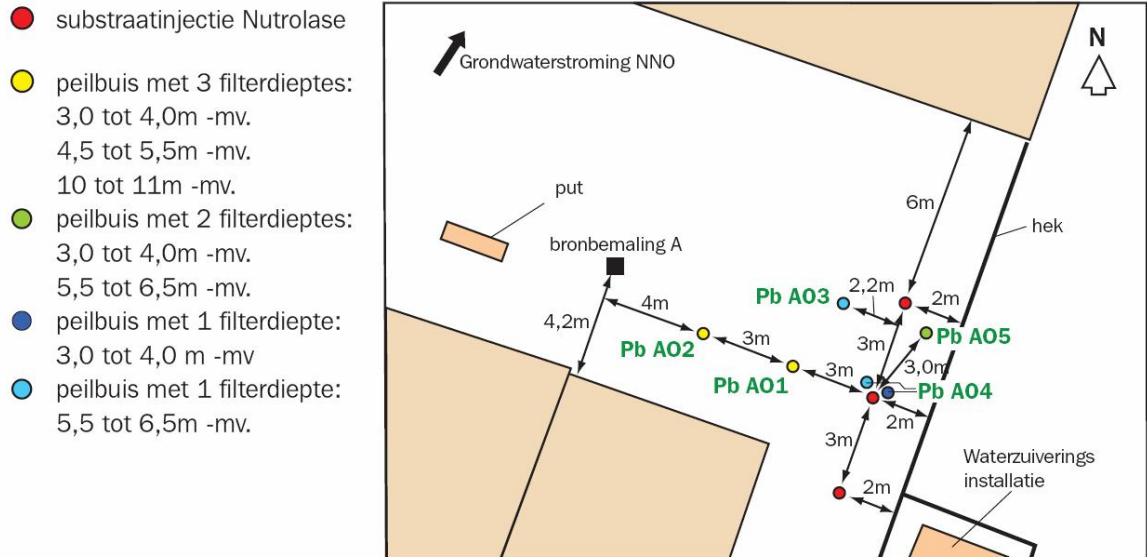
A Situatietekeningen



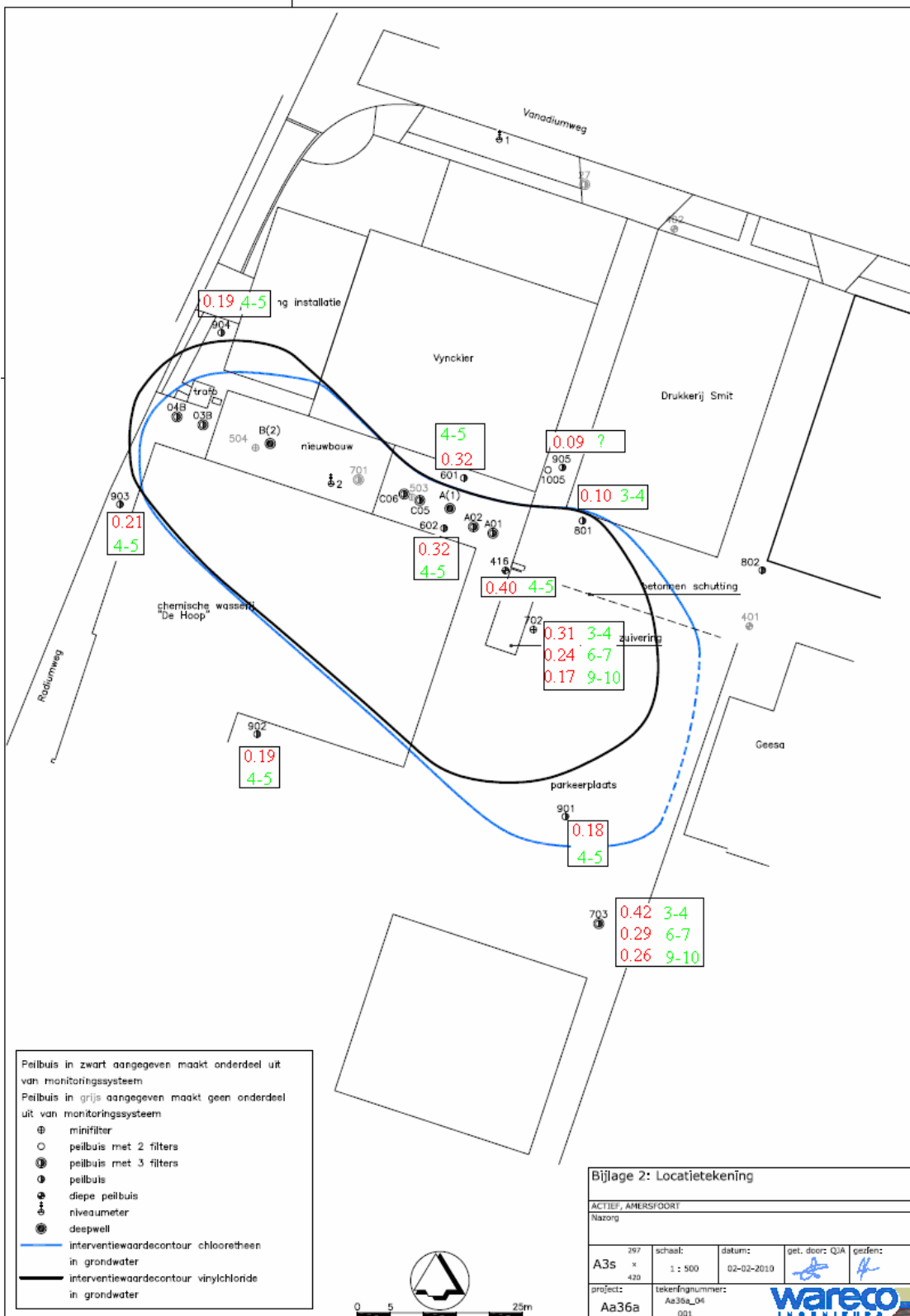
Bijlage A.1 Situatietekening met deepwell A en deepwell B.



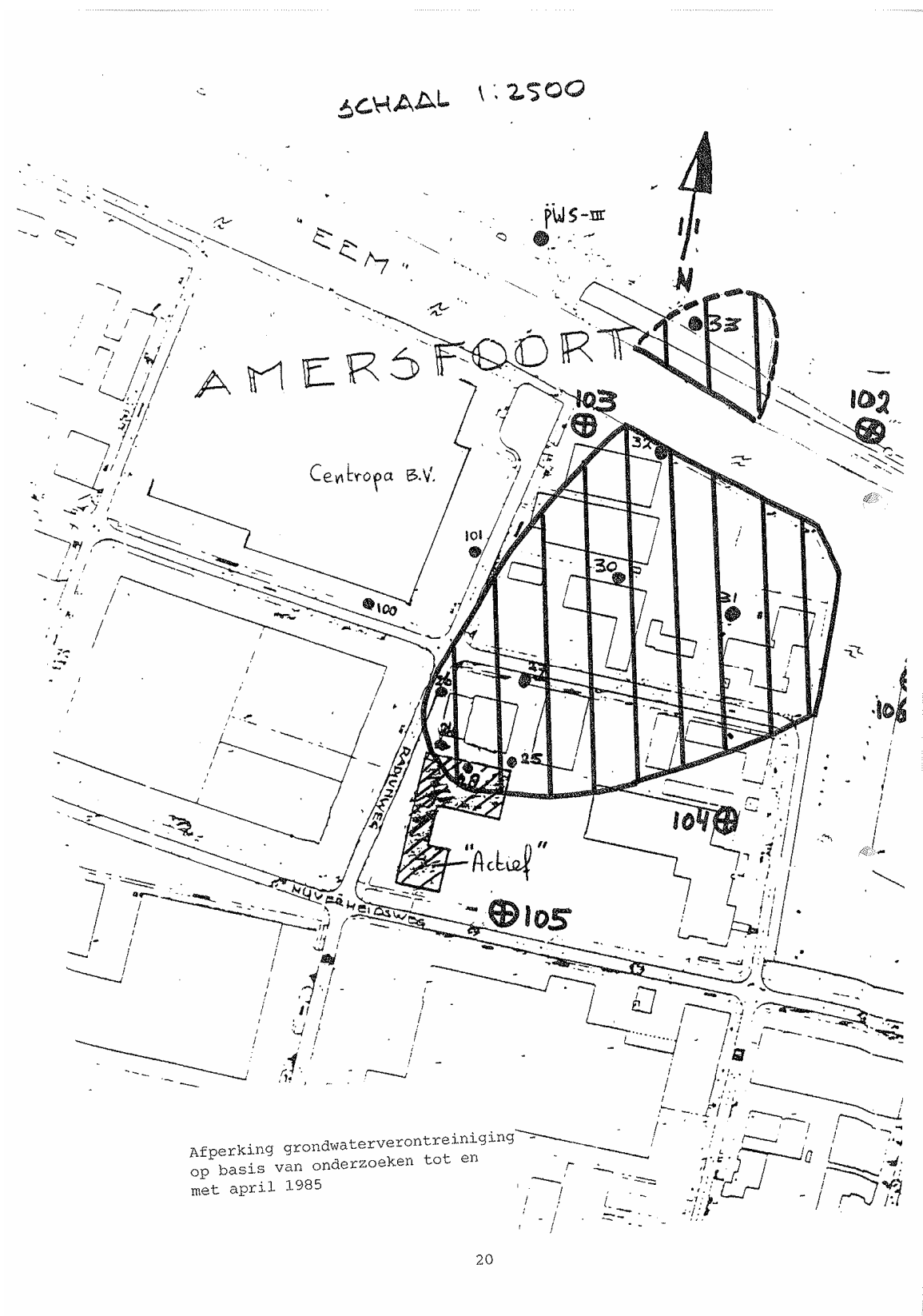
Bijlage A.2 Situatietekening met monitoringspeilbuizen en injectiepunten. Aanvullende monitoringspeilbuizen A03, A04 en A05 staan op de tekening in bijlage A.3.



Bijlage A.3 Situatietekening met aanvullende peilbuizen Nutrolase-injectie



Bijlage A.4 Situatietekening met stijghoogten in rood (m+NAP) gemeten op diverse tijdstippen en filterdiepten in groen (m-mv). Stijghoogten zijn gemeten door Wareco en staan in rapport "Nazorgstatusrapportage 2009 Actief te Amersfoort" (Wareco, rapportnummer Aa36R, 20100527, 27 mei 2010).

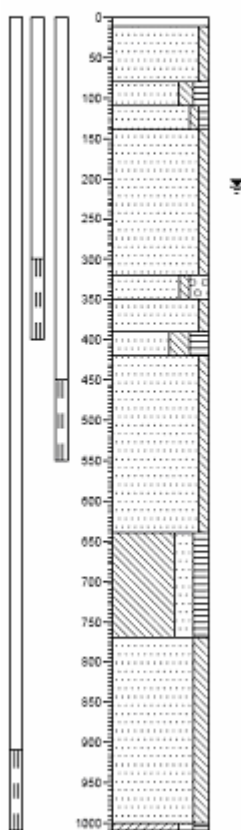


Bijlage A.5 Afperking van verontreinigingspluim uit "Eindrapportage grondsanering Bodemsaneringsproject "Actief" te Amersfoort" (Provincie Utrecht, Buro bodemsanering, juni 1989).

B Boorstaten

Boring: A01

Datum: 28-04-2009
GWS: 210



0 klinker
Edelmanboor

10 Zand, matig grof, zwak siltig, beige, Edelmanboor

40 Zand, matig fijn, matig siltig, matig humeus, bruin, Edelmanboor

110 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, lichtbruin, Edelmanboor

140 Zand, matig fijn, zwak siltig, lichtgrijs, Edelmanboor

160 Zand, matig fijn, zwak siltig, sterk grindig, lichtgrijs, Edelmanboor

180 Zand, matig fijn, zwak siltig, lichtgrijs, Edelmanboor

200 Zand, matig fijn, sterk siltig, sterk humeus, donkerbruin, Edelmanboor

220 Zand, matig fijn, zwak siltig, lichtgrijs, Edelmanboor

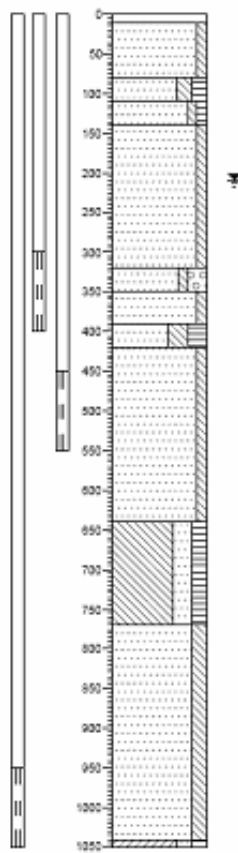
400 Leem, sterk zandig, matig humeus, matig veerhoudend, grijs-bruin, Edelmanboor

770 Zand, matig fijn, matig siltig, grijs, Edelmanboor

1000 Klei, matig zandig, matig humeus, bruin-grijs

Boring: A02

Datum: 28-04-2009
GWS: 210



0 klinker
Edelmanboor

10 Zand, matig grof, zwak siltig, beige, Edelmanboor

40 Zand, matig fijn, matig siltig, matig humeus, bruin-grijs, Edelmanboor

110 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, lichtbruin, Edelmanboor

140 Zand, matig fijn, zwak siltig, lichtgrijs, Edelmanboor

300 Zand, matig fijn, zwak siltig, sterk grindig, lichtgrijs, Edelmanboor

360 Zand, matig fijn, zwak siltig, lichtgrijs, Edelmanboor

420 Zand, matig fijn, sterk siltig, sterk humeus, donkerbruin, Edelmanboor

450 Zand, matig fijn, zwak siltig, lichtgrijs, Edelmanboor

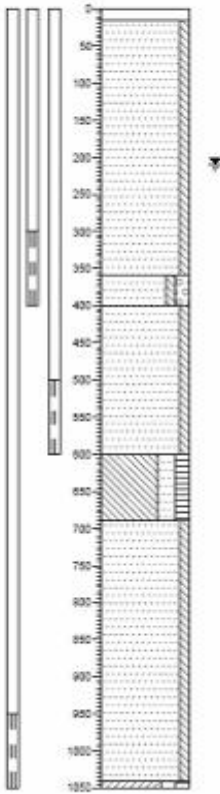
660 Leem, sterk zandig, matig humeus, matig veerhoudend, grijs-bruin, Edelmanboor

770 Zand, matig fijn, matig siltig, grijs, Edelmanboor

1000 Klei, matig zandig, matig humeus, grijs-bruin

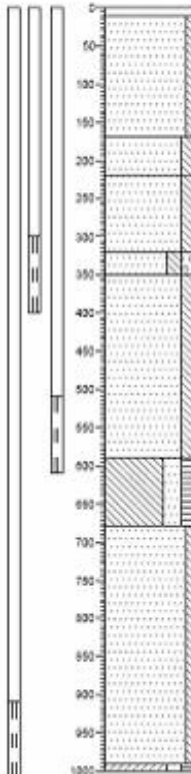
Boring: B03

Datum: 04-05-2009
GWS: 210



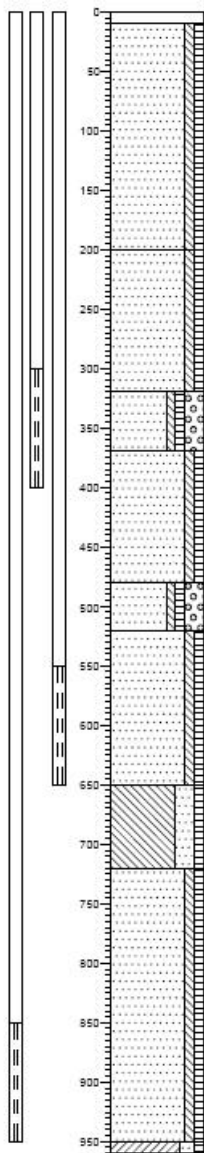
Boring: B04

Datum: 29-04-2009
GWS: 220



Boring: C05

Datum: 23-06-2009
GWS: 200



0 klinker
-10 Edelmanboor
Zand, matig grof, zwak siltig, zwak humeus, beige, Edelmanboor

-200 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, lichtgrjs, Edelmanboor

-320 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, sterk grindig, lichtgrjs, Edelmanboor

-370 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

-480 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, sterk grindig, grjs, Edelmanboor

-520 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

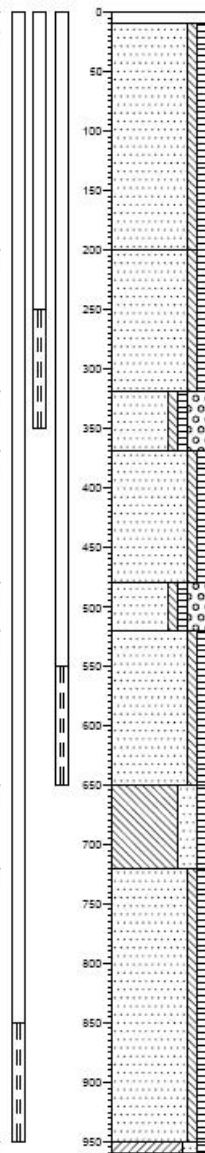
-650 Leem, sterk zandig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

-720 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

-950 Klei, matig zandig, zwak humeus, bruin-grjs, Edelmanboor

Boring: C06

Datum: 23-06-2009
GWS: 200



0 klinker
-10 Edelmanboor
Zand, matig grof, zwak siltig, zwak humeus, beige, Edelmanboor

-200 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, lichtgrjs, Edelmanboor

-320 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, sterk grindig, lichtgrjs, Edelmanboor

-370 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

-480 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, sterk grindig, grjs, Edelmanboor

-520 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

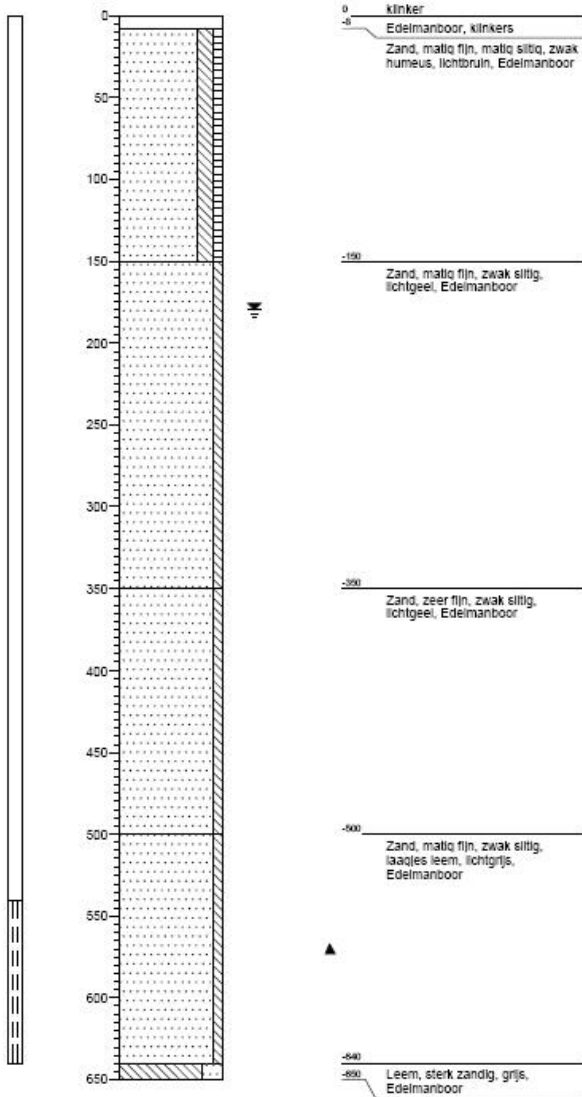
-650 Leem, sterk zandig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

-720 Zand, matig fijn, zwak siltig, zwak humeus, grjs, Edelmanboor

-950 Klei, matig zandig, zwak humeus, bruin-grjs, Edelmanboor

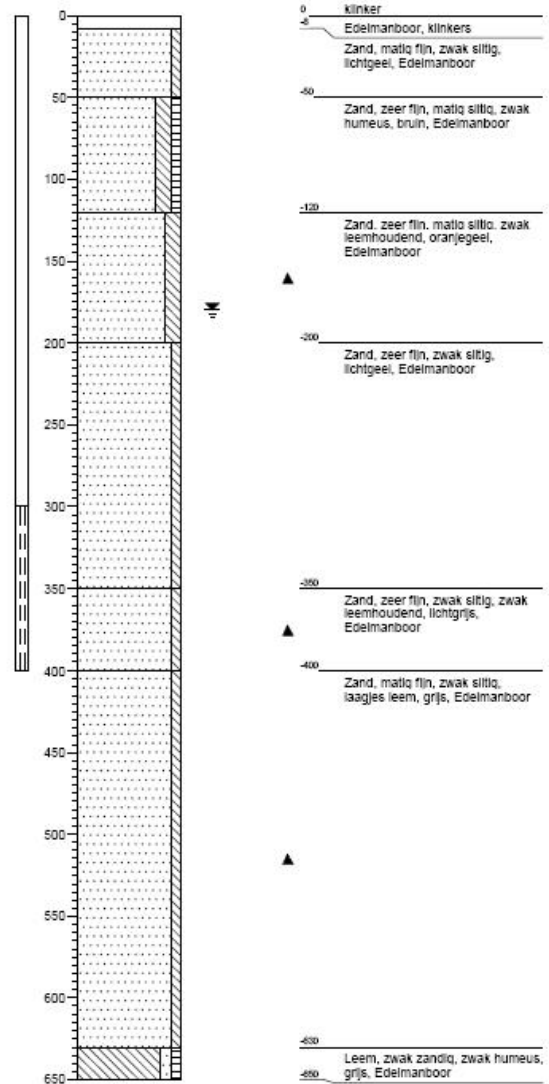
Boring: A03

Datum: 01/04/2010
GWS: 180



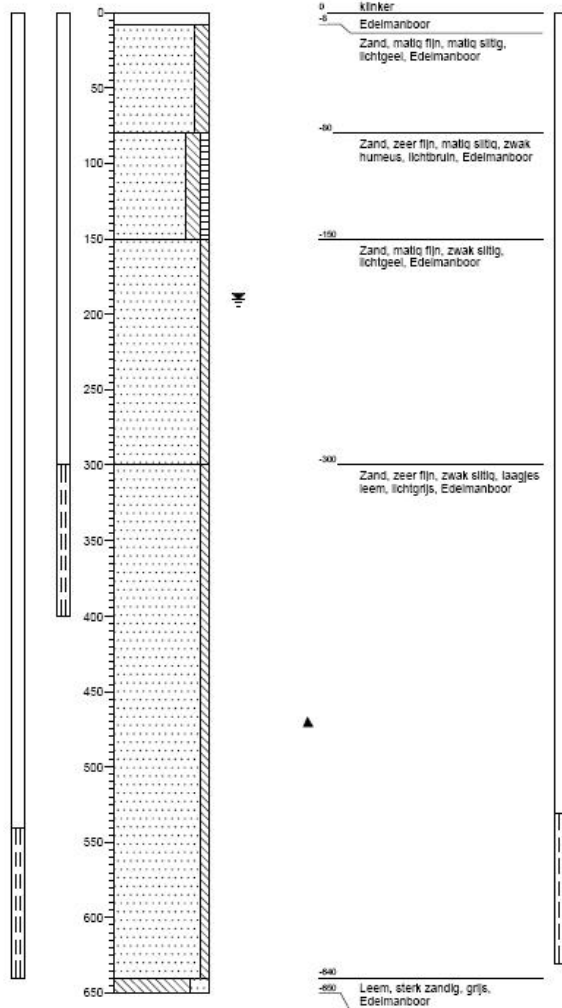
Boring: A04

Datum: 01/04/2010
GWS: 180



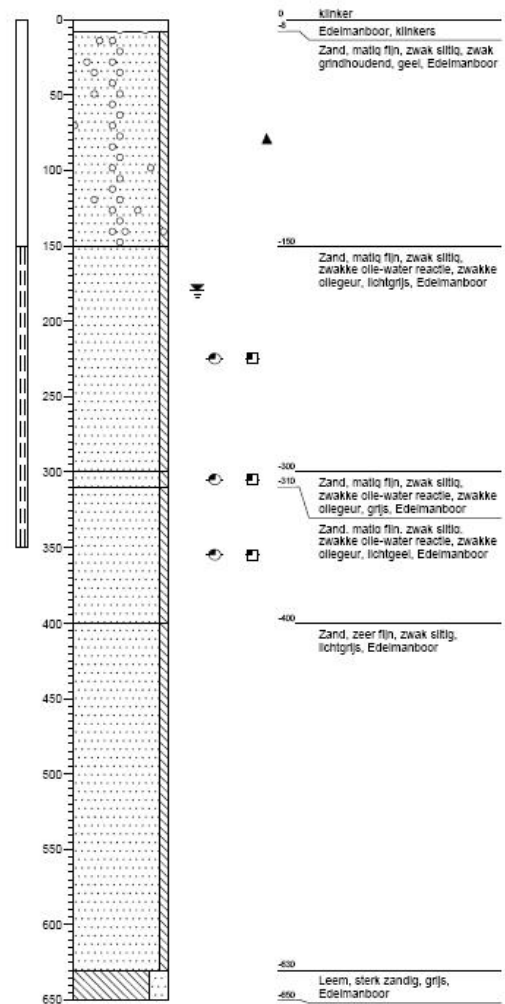
Boring: A05

Datum: 01/04/2010
GWS: 190



Boring: C07

Datum: 01/04/2010
GWS: 180



C Beschrijving substraatinjectie door Sita Remediation BV

Inleiding:

Ten behoeve van de uitvoering van de pilot bij Actief Amersfoort zijn 6 proefinjecties uitgevoerd om de anaërobe biologische afbraak van VOCl te bevorderen. In dat kader zijn twee verschillende typen substraat (koolstofbron) in de bodem worden geïnjecteerd. Ten behoeve van de pilot is dan ook een proefgebied rondom deepwell A ingericht.

In het proefgebied aan de oostzijde van deepwell A zijn 3 injecties met Nutrolase uitgevoerd. Voorafgaande aan de injecties is een tracer aan het substraat toegevoegd. Ten westen van deepwell A zijn 3 injecties uitgevoerd met sojaolie waaraan dezelfde tracer is toegevoegd. Een tracer is een stof die in het water wordt opgelost om de verspreiding van het substraat in het grondwater te volgen. In dit geval is lithiumbromide toegepast. Per boorpunt is circa 500 liter substraatoplossing geïnjecteerd.

De werkzaamheden die tijdens de technische uitvoering van de injecties zijn uitgevoerd en de werkwijze voor het aanmaken van de injectievloeistoffen worden in deze bijlage beschreven.

Aanmaken injectievloeistof

De injectievloeistoffen zijn aangemaakt op depot te Utrecht, voorafgaand aan de uitvoering van de injecties. Vrijdag 3 juli zijn de oplossingen aangemaakt.

Aanmaken Nutrolase-oplossing:

In totaal is een hoeveelheid oplossing van 1500 liter aangemaakt. Daartoe zijn twee multiboxen met elk een inhoud van 1000 liter gevuld.

Aan de Nutrolase is 400 gram/m³ oplossing lithiumbromide toegevoegd. Aan 1500 liter is totaal 600 gram toegevoegd.

Multibox 1; 200 gram lithiumbromide toegevoegd aan de multibox met 500 liter Nutrolase.

Multibox 2; 400 gram lithiumbromide toegevoegd aan de multibox met 1000 liter Nutrolase.

De oplossing is gedurende 1 uur gemixed.

Aanmaken sojaolieoplossing:

De sojaolie oplossing is in twee multiboxen aangemaakt.

Multibox 1; 400 gram lithiumbromide toegevoegd aan multibox met 800 liter sojaolie.

Ten behoeve van de correctie ten opzichte van Nutrolase zijn vervolgens de volgende stoffen toegevoegd.

- Een hoeveelheid van 2,38 kilogram aan natriumnitraat;
- Een hoeveelheid van 25 kilogram aan ammoniumfosfaat.

Aan deze oplossing is een emulgator toegevoegd om de sojaolie in de bodem in oplossing te houden. In overleg met de leverancier zijn de volgende hoeveelheden van het emulgatorproduct toegevoegd.

- Radasurf 7145, hoeveelheid 100 liter;
- Radiamuls 2157, hoeveelheid 100 liter

De oplossing is gedurende 2 uur gemixed.

Multibox 2: 200 gram lithiumbromide toegevoegd aan multibox met 400 liter sojaolie.

Vervolgens zijn toegevoegd:

- 1,19 kilogram aan natriumnitraat;
- 12,5 kilogram aan ammoniumfosfaat.

Daarna is de emulgator toegevoegd.

- Radasurf 7145, hoeveelheid 50 liter;
- Radiamuls 2157, hoeveelheid 50 liter

De oplossing is gedurende 2 uur gemixed.

Uitvoering injecties

In week 28, van 6 t/m 9 juli 2009, zijn de injecties in onderaanneming uitgevoerd door E.P.S. (Environmental Probing Services B.V.). In eerste instantie zijn de drie injecties met Nutrolase uitgevoerd. Per boorpunt is 500 liter Nutrolase-oplossing geïnjecteerd. De injecties zijn van onder naar boven uitgevoerd. Dit houdt in dat de boorlans eerst tot op diepte is gebracht. Vervolgens is de boorlans, tijdens het verpompen van de oplossing, omhoog getrokken. Per meter is ca. 60 liter vloeistof geïnjecteerd. De injectieboringen zijn allen uitgevoerd tot op de afsluitende laag, op 10,5 m-mv. Er is in het traject van 10,5 tot 1,5 m-mv geïnjecteerd.

Op 8 juli 2009 zijn twee injecties met sojaolie oplossing uitgevoerd. Om eventuele fasescheiding van de sojaolie te voorkomen, is tijdens de injectie de oplossing in de multibox gemixed. De injecties met sojaolieoplossing zijn op een identieke wijze uitgevoerd als de Nutrolase-injecties. Tijdens de injecties bleek dat de sojaolie-oplossing gemakkelijker kon worden geïnjecteerd dan de Nutrolase-oplossing.

Uiteindelijk zijn de injecties afgerond op donderdag 9 juli. Direct na het afronden van de injecties is de grondwateronttrekking van de nabij gelegen deepwell A opgestart met een debiet van 1,5 m³/uur. Dit is gedaan om met de grondwateronttrekking het substraat te verspreiden binnen het pilotgebied.

D Samenstelling Nutrolase

Samenstelling	mg/l	0,17 % oplossing mg/l
Totaal fosfor	6400	11
Totaal zwavel	12.000	20
Totaal stikstof	32.000	54
Ruw eiwit	199.000	338
Aminozuren	147.000	250
Suikers:		
Fructose	31.000	53
Glucose	31.000	53
Sacharose	61.000	104
Reducerende suikers	45.000	76
Organische zuren:		
Azijnzuur	3500	6
Melkzuur	11.000	19
Oxaalzuur	5200	9
Appelzuur	31.000	53
Citroenzuur	62.000	105
Kationen:		
Kalium	80.000	136
Magnesium	4.100	7
Calcium	580	1
Natrium	580	1
Ammonium	3500	6
Anionen:		
Chloride	4100	7
Nitrat	1740	3
Sulfaat	18.000	31
Fosfaat	20.300	35

E Monitoringsdata

Bijlage E.1 Zintuiglijke waarneming grondwater, peilbuizen A01, A02, A03, A04 en A05. - = helder, ,
+/- = licht geel, + = donkergeel, ++ = bruin, x= niet bemonsterd.

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Kleur								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	-	-	-	-	-	-	-	-	x
	4,5-5,5	-	++	++	++	++	++	-	+/-	x
	9-10	-	+/-	-	-	-	-	x	x	x
A02	3-4	-	-	+/-	-	-	-	+/-	-	x
	4,5-5,5	-	+	+	+/-	+/-	+/-	-	-	x
	9,5-10,5	-	-	-	-	-	-	x	x	x
A03	5,4-6,4	x	x	x	x	x	x	+	+	+
A04	3-4	x	x	x	x	x	x	-	-	x
	5,3-6,3	x	x	x	x	x	x	+/-	-	+
A05	3-4	x	x	x	x	x	x	-	-	x
	5,3-6,3	x	x	x	x	x	x	+/-	+	-
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Kleur								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	-	-	-	-	-	-	x	x	x
	5,5-6,5	-	-	-	-	-	-	x	x	x
	8,5-9,5	-	-	-	-	-	-	x	x	x
C06	2,5-3,5	-	-	-	-	-	-	x	x	x
	5,5-6,5	-	-	-	-	-	-	x	x	x
	8,5-9,5	-	-	-	-	-	-	x	x	x
C07	1,5-3,5	x	x	x	x	x	x	filmlaag	filmlaag	x
	5,3-6,3	x	x	x	x	x	x	filmlaag	filmlaag	-

Bijlage E.2 Algemene parameters, -- = niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	pH								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	5,8	5,8	5,6	5,5	5,5	5,6	5,3	5,8	--
	4,5-5,5	5,5	5,8	6,0	5,9	6,5	6,6	6,2	6,4	--
	9-10	6,6	6,5	6,8	6,2	7,2	7,1	--	--	--
A02	3-4	5,7	6,2	5,9	5,7	5,8	5,8	5,9	5,9	--
	4,5-5,5	5,6	5,9	6,3	6,0	6,6	6,2	6,0	6,0	--
	9,5-10,5	6,0	7,1	5,7	6,8	7,1	7,3	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	6,4	6,5	6,2
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	5,7	5,8	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	6,1	6,2	6,6
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	5,4	5,6	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	5,9	5,9	6,0
diepwell A		--	7,2	4,9	6,7	6,6	6,6	--	--	--
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Ec (µS/cm)								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	391	396	457	484	565	439	453	443	--
	4,5-5,5	424	1300	1740	2200	1670	1420	1090	1200	--
	9-10	460	690	480	457	344	633	--	--	--
A02	3-4	625	547	585	582	646	730	702	601	--
	4,5-5,5	496	820	1470	1540	740	542	430	465	--
	9,5-10,5	353	347	402	366	380	626	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	1250	1400	1020
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	370	382	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	776	644	1160
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	605	366	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	1230	1170	524
diepwell A		--	348	355	683	560	483	--	--	--
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	temperatuur (°C)								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	13,8	17,9	17,6	18,3	15,6	9,1	13,3	14,7	--
	4,5-5,5	13,5	17,9	16,2	16,9	15,6	11,3	13,6	14,4	--
	9-10	13,4	16,0	14,5	15,3	14,0	11,2	--	--	--
A02	3-4	13,8	18,4	18,1	18,9	16,0	11,4	13,6	15,0	--
	4,5-5,5	12,8	16,3	16,6	17,2	15,9	12,5	14,3	15,0	--
	9,5-10,5	14,5	15,4	15,0	14,8	14,5	11,9	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	12,1	14,2	15,9
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	10,8	13,5	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	12,3	13,5	15,7
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	10,9	13,3	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	12,3	13,3	15,4
diepwell A		--	18,3	17,0	17,0	15,5	11,9	--	--	--

Algemene parameters vervolg

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	pH								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	6,5	6,3	6,3	6,2	5,7	6,5	--	--	--
	4,5-5,5	6,3	6,1	6,1	6,0	5,8	6,2	--	--	--
	9-10	7,0	6,8	6,8	6,5	6,8	6,8	--	--	--
C06	3-4	6,7	6,7	6,6	6,5	6,7	6,7	--	--	--
	4,5-5,5	6,3	6,4	6,2	5,8	6,2	6,4	--	--	--
	9,5-10,5	6,9	6,8	6,6	6,5	7,1	7,3	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	6,7	6,8	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	6,4	6,2	6,1
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Ec ($\mu\text{S/cm}$)								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	879	809	885	841	910	885	--	--	--
	5,5-6,5	683	673	745	733	714	764	--	--	--
	8,5-9,5	557	719	559	677	617	419	--	--	--
C06	2,5-3,5	860	1660	1180	1060	940	1100	--	--	--
	5,5-6,5	744	950	774	735	730	813	--	--	--
	8,5-9,5	380	598	718	550	344	463	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	902	752	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	711	653	387
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	temperatuur °C								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	19,5	19,7	20,3	20,7	18,1	14,1	--	--	--
	5,5-6,5	18,0	18,8	18,8	18,8	17,7	14,9	--	--	--
	8,5-9,5	17,9	18,5	18,2	18,0	17,0	15,1	--	--	--
C06	2,5-3,5	19,7	20,4	20,5	20,8	17,8	11,8	--	--	--
	5,5-6,5	18,4	18,5	19,0	19,2	18,2	13,5	--	--	--
	8,5-9,5	17,8	18,0	17,7	17,8	16,8	15,0	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	15,0	16,8	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	16,7	17,5	18,5

Bijlage E.3 Bromideconcentraties; getallen in rood en cursief zijn concentraties die significant hoger zijn dan de gemeten concentraties tijdens de nulsituatie. -- = niet bemonsterd. Rood en cursief = ruim boven nulsituatiewaarde

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Bromide (mg/l)									
		nulsituatie	4 dgn	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195	278	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	0,0	0,2	0,2	0,4	0,5	0,2	0,7	0,5	0,5	--
	4,5-5,5	0,1	1,4	0,8	9,1	17,2	6,9	3,6	1,7	2,0	--
	9-10	0,2	0,2	7,3	0,3	0,4	0,1	0,4	--	--	--
A02	3-4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,5	0,6	0,7	0,9	--
	4,5-5,5	0,1	0,2	1,4	5,3	6,1	0,7	0,3	0,4	0,6	--
	9,5-10,5	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	--	2,1	3,8	--
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	--	0,3	0,1	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	--	1,7	1,4	0,5
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	--	0,7	0,2	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	--	6,3	6,9	1,8
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Bromide (mg/l)									
		nulsituatie	4 dgn	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195	278	331 dgn	
C05	3-4	0,3	0,2	1,0	1,8	1,2	2,4	3,4	--	--	
	5,5-6,5	0,3	0,2	0,1	11,1	9,4	0,8	0,2	--	--	
	8,5-9,5	0,3	0,1	0,7	0,4	0,7	0,2	0,2	--	--	
C06	2,5-3,5	0,4	0,3	10,8	4,3	3,9	4,9	1,7	--	--	
	5,5-6,5	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	1,1	0,1	--	--	
	8,5-9,5	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	--	--	
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	--	1,6	0,6	
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	--	0,3	0,4	
diepwell A		--	0,2	0,1	0,2	0,4	0,4	0,2	--	--	

Bijlage E.4 DOC- en waterstofconcentraties; getallen in rood en cursief zijn concentraties die significant hoger zijn dan de gemeten concentraties tijdens de nulsituatie. - = niet bemonsterd. Rood en cursief = ruim boven nulsituatiewaarde

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	DOC (mg/l)							
		nulsituatie	19 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	10,1	14,0	11,9	11,9	17,4	24,6	21,9	--
	4,5-5,5	9,5	370,7	649,2	257,8	132,6	68,3	77,1	--
	9-10	8,8	119,4	17,2	6,5	5,7	--	--	--
A02	3-4	35,5	43,6	46,9	59,6	57,9	55,9	55,6	--
	4,5-5,5	10,4	183,2	291,7	53,1	22,9	17,1	26,1	--
	9,5-10,5	3,7	14,3	5,9	3,5	4,8	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	88,2	118,1	79,6
A04	3-4	--	--	--	--	--	13	13,3	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	77,9	55,4	115,7
A05	3-4	--	--	--	--	--	7,5	7,9	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	420,8	348,5	19,7
diepwell A		--	5,6	28,8	6,4	5,3	--	--	--
Referentiepeilbuizen									
B04	3-4	24,6	--	26,3	--	--	--	--	--
	4,5-5,5	25,7	--	25,8	--	--	--	--	--
	10-11	5,1	--	6,9	--	--	--	--	--
703	3-4	8,6	--	--	--	--	--	--	--
	6,7-7,7	13,2	--	--	--	--	--	--	--
	9-10	3,7	--	--	--	--	--	--	--
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Waterstof (nM)							
		nulsituatie	19 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	--	8960,0	28,0	34,0	0,3	--	0,1	--
	4,5-5,5	--	22,0	30,0	10,0	1,2	0,2	0,3	--
	9-10	--	56,0	46,0	3,9	0,6	--	--	--
A02	3-4	--	4690	0,03	0,1	0,1	0,0	0,1	--
	4,5-5,5	--	2,6	14	0,5	0,1	0,1	0,5	--
	9,5-10,5	--	6,3	1,3	2,4	0,1	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	1,4	0,3
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	0,2	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	0,9	1,1
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	0,1	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	2,9	0,3
Referentiepeilbuizen									
B04	3-4	--	--	0.20	--	--	--	--	--
	4,5-5,5	--	--	0.20	--	--	--	--	--
	10-11	--	--	1.35	--	--	--	--	--
702	3-4	0,1	--	--	--	--	--	--	--
	6-7	0,9	--	--	--	--	--	--	--
	9-10	0,3	--	--	--	--	--	--	--
703	3-4	1,5	--	--	--	--	--	--	--
	6,7-7,7	0,05	--	--	--	--	--	--	--
	9-10	0,5	--	--	--	--	--	--	--

Vervolg DOC- en waterstofconcentraties

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	DOC (mg/l)							
		nulsituatie	19 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	5,0	15,3	9,1	9	8,2	--	--	--
	5,5-6,5	18,0	19,7	19,5	19,3	19,6	--	--	--
	8,5-9,5	6,0	9,4	9,9	5,4	4,6	--	--	--
C06	2,5-3,5	6,9	8,4	8,8	7	6,9	--	--	--
	5,5-6,5	15,2	17,4	17,2	19,5	18,9	--	--	--
	8,5-9,5	5,2	7,7	6,8	4,1	4,6	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	14,4	6,4	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	18,6	29,9	16,8
diepwell A		--	5,6	28,8	6,4	5,3	--	--	--
Referentiepeilbuizen									
B04	3-4	24,6	--	26,3	--	--	--	--	--
	4,5-5,5	25,7	--	25,8	--	--	--	--	--
	10-11	5,1	--	6,9	--	--	--	--	--
703	3-4	8,6	--	--	--	--	--	--	--
	6,7-7,7	13,2	--	--	--	--	--	--	--
	9-10	3,7	--	--	--	--	--	--	--
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Waterstof (nM)							
		nulsituatie	19 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	--	0,21	0,03	0,2	0,03	--	--	--
	5,5-6,5	--	0,6	0,02	0,1	0,03	--	--	--
	8,5-9,5	--	0,38	0,06	0,5	0,4	--	--	--
C06	2,5-3,5	--	0,4	0,04	0,1	0,05	--	--	--
	5,5-6,5	--	2,9	0,02	0,05	0,4	--	--	--
	8,5-9,5	--	6,4	0,08	0,3	0,2	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	0,5	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	1,8	0,1
Referentiepeilbuizen									
B04	3-4	--	--	0,20	--	--	--	--	--
	4,5-5,5	--	--	0,20	--	--	--	--	--
	10-11	--	--	1,35	--	--	--	--	--
702	3-4	0,1	--	--	--	--	--	--	--
	6-7	0,9	--	--	--	--	--	--	--
	9-10	0,3	--	--	--	--	--	--	--
703	3-4	1,5	--	--	--	--	--	--	--
	6,7-7,7	0,05	--	--	--	--	--	--	--
	9-10	0,5	--	--	--	--	--	--	--

Bijlage E.5 Redoxpotentiaal gemeten in het veld. -- = niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Eh mV								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	100	-197	-110	-120	20	46	-7	-108	--
	4,5-5,5	130	-190	-263	-246	-142	-119	-174	-198	--
	9-10	-129	-208	-242	-178	-111	-124	--	--	--
A02	3-4	102	-77	-68	-19	68	25	-16	-1	--
	4,5-5,5	80	-157	-206	-206	-83	-68	-171	-146	--
	9,5-10,5	-177	-248	-179	-189	-135	-133	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	-201	-210	-191
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	-47	7	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	-222	-220	-268
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	-126	-48	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	-252	-248	-190
diepwell A		--	-172	-193	-230	-45	-36	--	--	--
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Eh mV								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	1	-14	-27	-24	41	-5	--	--	--
	5,5-6,5	2	53	-17	54	111	14	--	--	--
	8,5-9,5	-272	-141	-161	-202	-153	-133	--	--	--
C06	2,5-3,5	92	-23	-38	-86	-29	26	--	--	--
	5,5-6,5	-17	-60	-37	-75	-42	-27	--	--	--
	8,5-9,5	-205	-122	-96	-105	-134	-133	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	-166	-176	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	-195	-215	-103

Bijlage E.6 Redoxparameters: opgelost zuurstof, nitraat, sulfaat, ijzer en mangaan. -- = niet bemonsterd.

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	opgelost zuurstof mg/l								
		nulsituatie	19 dgn	39 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn*	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	0,0	0,3	0,0	0,4	0,2	--	0,0	0,0	--
	4,5-5,5	0,0	0,6	0,0	0,3	0,0	--	0,1	0,0	--
	9-10	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	--	--	0,0	--
A02	3-4	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	--	0,2	0,0	--
	4,5-5,5	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	--	0,1	0,0	--
	9,5-10,5	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	--	--	0,0	--
A03	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	0,0
A04	3-4	--	--	--	--	--	--	0,2	0,0	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	0,0
A05	3-4	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	--
	5,4-6,4	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	0,0
* niet gemeten in verband met defecte zuurstofelectrode										
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	nitraat mg/l				sulfaat mg/l				
		nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn	415 dgn
A01	3-4	12,8	1,3	2,7	3,9	43,5	63,4	56,6	47,8	--
	4,5-5,5	<0,5	<0,5	0,6	0,5	84,0	20,3	44,2	50,2	--
	9-10	<0,5	<0,5	--	--	2,2	0,6	--	--	--
A02	3-4	2,3	<0,5	0,3	0,2	83,3	92,6	110,8	120,2	--
	4,5-5,5	<0,5	<0,5	0,2	0,1	90,5	63,4	63,3	85,1	--
	9,5-10,5	<0,5	<0,5	--	--	12,6	1,2	--	--	--
A03	5,4-6,4	--	--	0,7	<0,5	--	--	9,6	4,0	--
A04	3-4	--	--	8,5	11,6	--	--	61,2	62,7	--
	5,3-6,3	--	--	2,6	0,7	--	--	42,2	23,9	97,9
A05	3-4	--	--	147,1	43,2	--	--	48,7	52,1	--
	5,4-6,4	--	--	20,8	13,6	--	--	6,8	1,0	8,1
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ijzer mg/l			mangaan mg/l					
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn			
A01	3-4	<0,008	4,9	0,5	0,5	0,9	1,0			
	4,5-5,5	2,1	127,6	82,7	2,7	< 0,0008	3,9			
	9-10	2,0	1,3	--	0,6	0,3	--			
A02	3-4	<0,008	1,4	7,8	2,6	5,3	7,3			
	4,5-5,5	4,3	42,1	27,9	2,6	4,4	2,8			
	9,5-10,5	1,0	1,0	--	0,5	0,4	--			
A03	5,4-6,4	--	--	73,2	--	--	3,8			
A04	3-4	--	--	<0,004	--	--	0,7			
	5,3-6,3	--	--	6,5	--	--	2,3			
A05	3-4	--	--	<0,004	--	--	0,6			
	5,4-6,4	--	--	16,7	--	--	2,3			

Vervolg redoxparameters

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	opgelost zuurstof mg/l								
		nulsituatie	19 dgn	34 dgn	54 dgn	119 dgn	195 dgn*	278 dgn	331 dgn	415 dgn
C05	3-4	0,00	0,19	0,1	0,04	0,1	--	--	--	--
	5,5-6,5	0,00	0,1	0,1	0,02	0,12	--	--	--	--
	8,5-9,5	0,00	0,1	0,1	0,08	0,11	--	--	--	--
C06	2,5-3,5	1,87	1,39	0,1	0,03	0,16	--	--	--	--
	5,5-6,5	0,10	0,1	0,1	0,02	0,11	--	--	--	--
	8,5-9,5	0,07	0,1	0,1	0,06	0,0	--	--	--	--
C07	1,5-3,5	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	--
	5,3-6,3	--	--	--	--	--	--	0,1	0,0	0,0
* niet gemeten in verband met defecte zuurstofelektrode										
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	nitraat mg/l				sulfaat mg/l				
		nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	278 dgn	331 dgn	
C05	3-4	3,0	18,2	--	--	98,0	89,6	--	--	
	5,5-6,5	<0,5	<0,5	--	--	37,0	39,1	--	--	
	8,5-9,5	<0,5	<0,5	--	--	60,0	58,4	--	--	
C06	2,5-3,5	5,0	34,4	--	--	100,0	117,4	--	--	
	5,5-6,5	<0,5	<0,5	--	--	54,0	36,7	--	--	
	8,5-9,5	<0,5	<0,5	--	--	6,0	4,7	--	--	
C07	1,5-3,5	--	--	30,3	36,8	--	--	100,3	84,9	
	5,3-6,3	--	--	0,6	0,3	--	--	32,0	38,0	
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ijzer mg/l			mangaan mg/l					
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn			
C05	3-4	98,0	89,6	--	0,7	0,5	--			
	5,5-6,5	37,0	39,1	--	0,0	0,1	--			
	8,5-9,5	60,0	58,4	--	1,1	1,1	--			
C06	2,5-3,5	100,0	117,4	--	<0,008	0,1	--			
	5,5-6,5	54,0	36,7	--	5,9	8,9	--			
	8,5-9,5	6,0	4,7	--	2,0	1,1	--			
C07	1,5-3,5	--	--	3,6	--	--	2,7			
	5,3-6,3	--	--	12,9	--	--	1,6			

Bijlage E.7 Nutriënten; ammonium en fosfaat. - - = niet bemonsterd

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ammonium mg/l			totaal fosfaat mg/l		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
A01	3-4	<0,3	< 0,3	0,4	0,1	0,2	0,2
	4,5-5,5	1,1	51,3	51,2	0,0	1,4	2,6
	9-10	1,5	4,7	--	0,2	0,9	--
A02	3-4	8,1	16,5	15,0	0,0	0,0	0,0
	4,5-5,5	0,7	13,1	11,8	0,4	0,1	0,3
	9,5-10,5	1,4	1,4	--	0,2	0,2	--
A03	5,4-6,4	--	--	63,4	--	--	11,2
A04	3-4	--	--	0,2	--	--	0,1
	5,3-6,3	--	--	27,8	--	--	9,1
A05	3-4	--	--	0,3	--	--	0,1
	5,4-6,4	--	--	70,5	--	--	14,9
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	ammonium mg/l			totaal fosfaat mg/l		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
C05	3-4	<0,3	0,5	--	0,2	0,1	--
	5,5-6,5	5,5	7,1	--	0,1	0,0	--
	8,5-9,5	2,1	43,0	--	0,2	22,7	--
C06	2,5-3,5	<0,3	14,9	--	0,2	7,6	--
	5,5-6,5	6,6	7,9	--	0,1	0,0	--
	8,5-9,5	3,1	2,7	--	0,4	4,2	--
C07	1,5-3,5	--	--	9,0	--	--	4,7
	5,3-6,3	--	--	8,4	--	--	2,7

Bijlage E.8 DNA-analyses; Dehalococcoides-aantallen en VC-reductases; getallen in rood en cursief zijn concentraties die significant hoger zijn dan de gemeten concentraties tijdens de nulsituatie. - - = niet bemonsterd. Rood en cursief = boven gewenste minimale aantallen.

Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Dehalococcoides genkopiën/ml*					
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	415 dgn		
A01	3-4	9,24E+00	4,53E+01	<3	--		
	4,5-5,5	1,36E+01	2,57E+05	4.39E+04	--		
	9-10	1,50E+01	4,68E+02	--	--		
A02	3-4	8,66E+00	8,93E+01	<3	--		
	4,5-5,5	1,17E+01	2,68E+05	1,11E+03	--		
	9,5-10,5	5,70E+00	9,18E+01	--	--		
A03	5,4-6,4	--	--	1,01E+04	3,92E+04		
A04	3-4	--	--	<3	--		
	5,3-6,3	--	--	3,23E+04	5,89E+03		
A05	3-4	--	--	<3	--		
	5,4-6,4	--	--	2,90E+02	1,78E+04		
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	vcrA genkopiën/ml			bvcA genkopiën/ml		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
A01	3-4	<1,5E+01	<2	<20	<2E+00	<2	<20
	4,5-5,5	<1,5E+01	1,58E+03	2,76E+05	<2E+00	6,76E+02	2,04E+04
	9-10	3,58E+01	3,53E+02	--	<2E+00	<2	--
A02	3-4	<1,5E+01	<2	<20	<2E+00	<2	<20
	4,5-5,5	<1,5E+01	4,25E+05	1,36E+04	3,80E+00	3,09E+04	1,79E+03
	9,5-10,5	<1,5E+01	6,41E+01	--	<2E+00	<2	--
A03	5,4-6,4	--	--	1,18E+05	--	--	8,29E+03
A04	3-4	--	--	<20	--	--	<20
	5,3-6,3	--	--	3,46E+05	--	--	4,47E+03
A05	3-4	--	--	<20	--	--	<20
	5,4-6,4	--	--	1,21E+02	--	--	2,34E+02
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	Dehalococcoides genkopiën/ml					
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn			
C05	3-4	2,65E+01	5,19E+01	--			
	5,5-6,5	1,09E+02	5,72E+01	--			
	8,5-9,5	2,06E+02	9,57E+01	--			
C06	2,5-3,5	4,20E+01	1,39E+02	--			
	5,5-6,5	1,23E+02	8,27E+00	--			
	8,5-9,5	1,28E+02	4,93E+02	--			
C07	1,5-3,5	--	--	9,95E+00			
	5,3-6,3	--	--	1,83E+01			
Peilbuis	Filterdiepte m-mv	vcrA genkopiën/ml			bvcA genkopiën/ml		
		nulsituatie	119 dgn	331 dgn	nulsituatie	119 dgn	331 dgn
C05	3-4	2,25E+02	8,60E+00	--	<2E+01	<2	--
	5,5-6,5	2,22E+01	1,38E+01	--	<2E+01	<2	--
	8,5-9,5	5,23E+02	2,63E+01	--	<2E+01	<2	--
C06	2,5-3,5	1,21E+02	4,84E+00	--	1,39E+02	<2	--
	5,5-6,5	3,93E+01	<2	--	4,97E+02	<2	--
	8,5-9,5	3,64E+02	2,65E+02	--	2,47E+02	<2	--
C07	1,5-3,5	--	--	2,34E+01	--	--	<20
	5,3-6,3	--	--	3,38E+02	--	--	<20

Bijlage E.9 Verontreinigingssituatie; getallen in rood en cursief zijn gelegen boven de interventiewaarde. - - = niet bemonsterd. << = kleiner dan detectielimiet. Rood en cursief = boven interventiewaarde

Peilbuis met filterdiepte	tijd na injectie dagen	Methaan µg/l	Etheen µg/l	Ethaan µg/l	VC µg/l	trans-DCE µg/l	cis-DCE µg/l	TCE µg/l	PCE µg/l
interventiewaarde		--	--	--	5	20	20	500	40
Deepwell A	19	6574	98	39	2249	15	9548	2155	5758
	54	3534	80	22	831	7	2636	39	53
	119	50	<<	<<	74	<<	266	89	348
	195	30	<<	<<	<<	<<	76	45	159
A01 3-4m-mv	0	8	<<	<<	<<	<<	66	22	42
	19	<<	<<	<<	<<	<<	72	35	73
	54	<<	<<	<<	<<	<<	101	38	65
	119	6322	<<	<<	5	<<	60	20	42
	195	7512	<<	<<	7	<<	107	31	43
	278	11277	<<	<<	9	<<	148	46	48
	331	12075	<<	<<	9	<<	242	32	41
A01 4,5-5,5 m-mv	0	10	<<	<<	13	<<	660	18	14
	19	13	<<	<<	13	<<	264	6	8
	54	188	<<	<<	35	<<	518	<<	<<
	119	11731	20	<<	268	<<	180	<<	<<
	195	9350	49	<<	86	<<	113	<<	<<
	278	10553	79	<<	109	<<	13	<<	<<
	331	10253	91	<<	170	<<	38	7	<<
A01 9-10 m-mv	0	7743	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	19	10060	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	54	18606	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	119	10325	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	613	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	--	--	--	--	--	--
A02 3-4 m-mv	0	75	<<	<<	<<	<<	138	64	123
	19	69	<<	<<	<<	<<	81	47	125
	54	205	<<	<<	<<	<<	87	48	106
	119	3010	<<	<<	5	<<	101	64	90
	195	4882	<<	<<	6	<<	377	110	58
	278	8753	<<	<<	<<	<<	812	210	99
	331	9413	<<	<<	<<	<<	428	132	82
A02 4,5-5,5 m-mv	0	14	<<	<<	4	<<	552	26	29
	19	48	<<	<<	<<	<<	<<	<<	45
	54	440	<<	<<	15	<<	418	10	13
	119	6488	128	<<	88	<<	483	<<	5
	195	154	21	<<	36	<<	249	<<	<<
	278	93	29	<<	46	<<	159	<<	<<
	331	490	25	<<	70	<<	313	<<	<<
A02 9,5-10,5 m-mv	0	6725	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	19	2818	<<	<<	<<	<<	136	142	836
	54	6940	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	119	8984	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	1373	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	--	--	--	--	--	--
A03 5,5-6,5 m-mv	278	22797	<<	20	<<	<<	11	<<	<<
	331	25577	<<	15	<<	<<	12	<<	<<
	415	23200	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
A04 3-4 m-mv	278	10456	<<	<<	22	<<	69	25	46
	331	9174	<<	<<	7	<<	104	38	50
A04 4,5-5,5 m-mv	278	9374	50	<<	80	<<	38	<<	<<
	331	12776	44	<<	81	<<	75	<<	<<
	415	17592	26	<<	8	<<	<<	<<	<<
A05 3-4 m-mv	278	12540	<<	<<	14	<<	92	19	47
	331	9211	<<	<<	<<	<<	82	27	52
A05 5,5-6,5 m-mv	278	22465	<<	<<	112	<<	168	22	<<
	331	13414	<<	<<	117	<<	61	<<	<<
	415	15373	<<	<<	11	<<	23	<<	<<

Vervolg verontreinigingssituatie

Peilbuis met filterdiepte	tijd na injectie dagen	Methaan µg/l	Etheen µg/l	Ethaan µg/l	VC µg/l	trans-DCE µg/l	cis-DCE µg/l	TCE µg/l	PCE µg/l
interventiewaarde		--	--	--	5	20	20	500	40
C05 3-4 m-mv	0	78	<<	<<	<<	<<	88	44	89
	19	253	<<	<<	<<	<<	107	229	764
	54	383	<<	<<	<<	<<	71	149	795
	119	150	<<	<<	<<	<<	60	61	316
	195	70	<<	<<	<<	<<	181	60	117
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C05 5,5-6,5 m-mv	0	687	<<	<<	<<	<<	52	15	216
	19	299	<<	<<	<<	<<	16	8	159
	54	839	<<	<<	<<	<<	13	6	67
	119	734	<<	<<	<<	<<	23	6	44
	195	637	<<	<<	<<	<<	20	26	353
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C05 8,5-9,5 m-mv	0	1783	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	19	1802	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	54	1863	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	119	4794	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	5327	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C06 2,5-3,5 m-mv	0	16	<<	<<	<<	<<	<<	15	35
	19	10	<<	<<	<<	<<	8	9	42
	54	138	<<	<<	<<	<<	19	10	38
	119	56	<<	<<	<<	<<	81	43	45
	195	27	<<	<<	<<	<<	6	5	17
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C06 5,5-6,5 m-mv	0	537	<<	<<	<<	<<	<<	<<	54
	19	450	<<	<<	<<	<<	418	49	75
	54	711	<<	<<	<<	<<	<<	<<	11
	119	790	<<	<<	<<	<<	<<	<<	21
	195	352	<<	<<	<<	<<	<<	8	17
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C06 8,5-9,5 m-mv	0	6230	<<	<<	242	<<	27	<<	<<
	19	6526	<<	<<	418	<<	597	199	49
	54	4306	<<	<<	370	<<	358	139	25
	119	7725	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	195	5096	<<	<<	<<	<<	<<	<<	<<
	278	--	--	--	--	--	--	--	--
	331	--	--	-	--	--	--	--	--
C07 1,5-3,5 m-mv	278	8307	<<	<<	<<	<<	8	<<	7
	331	2014	<<	<<	<<	<<	15	7	23
C07 5,5-6,5 m-mv	278	7948	<<	<<	9	<<	<<	<<	<<
	331	8737	<<	<<	<<	<<	31	65	555
	415	10160	<<	<<	4	<<	160	320	1768