

Direct-push injectie van een shock-load dosering protamylasse in een matig doorlatende bodem - bereik en werking van het substraat

Suzanne van der Meulen



Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel	1
2 Gegevens onderzoekslocatie	3
2.1 Ligging en inrichting locatie	3
2.2 Bodemopbouw	3
2.3 Grondwater	7
2.4 Verontreinigings situatie	7
2.5 Voorgaande saneringsactiviteiten	7
2.6 Saneringsdoelstelling	8
3 Uitgevoerde werkzaamheden en gebruikte methoden	9
3.1 Injectie protamylasse	9
3.2 Monitoring	10
3.2.1 Toelichting moleculaire analyses	11
3.2.2 Toelichting waterstofmetingen	12
4 Resultaten	15
4.1 Zintuiglijke waarnemingen	15
4.2 Standaard veldparameters: pH, EC en T	16
4.3 Elektronendonor: DOC en waterstof	16
4.3.1 DOC	16
4.3.2 Waterstof	19
4.4 Redox-omstandigheden	20
4.4.1 Oostelijke vlek	20
4.4.2 Westelijke vlek	20
4.5 Moleculaire (DNA-) analyses	22
4.5.1 Oostelijke vlek	22
4.5.2 Westelijke vlek	22
4.6 Verontreiniging en afbraak	24
4.6.1 Oostelijke vlek	24
4.6.2 Westelijke vlek	26
5 Discussie	27
5.1 Effecten van injectie met protamylasse	27
5.2 Bereik van het substraat	28
5.3 Effect van injecties op condities en afbraak	29
5.4 Verspreiding	30
5.5 Effecten van persluchtshot in de westelijke vlek	30
6 Conclusies en aanbevelingen	31
6.1 Conclusies bereik injecties met protamylasse en effect op afbraak	31
6.2 Aanbevelingen voor de full-scale sanering op de onderzoekslocatie	32
6.3 Beantwoording kennisvragen	32

Bijlage(n)

A	Overzichtstekening BAM Milieu	A-1
B	Boorstaten VCMI	B-1
C	Injectiegegevens BAM Milieu	C-1
D	Analyseresultaten VOCL, etheen en ethaan	D-1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op de locatie Stadhouderskade te Schiedam dient een saneringsmaatregel genomen te worden om risico's van de verontreiniging met tetrachloortheen (PER), trichlooretheen (TRI), dichlooretheen (DCE; voornamelijk cis-1,2-dichloortheen) en met name vinylchloride (VC) weg te nemen. Een eerder uitgevoerde ISCO-sanering heeft niet tot het gewenste resultaat geleid.

Ten behoeve van een onderbouwde keuze voor een kansrijke saneringsaanpak is in het kader van een vooronderzoek¹ onderzocht wat de eigenschappen zijn van de bodem, de verontreiniging en andere locatieafhankelijke factoren die de effectiviteit van de potentiële saneringstechniek beïnvloeden. Uit het vooronderzoek bleek dat op de locatie potentie is voor biologische afbraak, maar afbraak vindt in (zeer) beperkte mate plaats omdat de omstandigheden in de bodem niet optimaal zijn voor de gewenste reductieve dechlorering. Gestimuleerde biologische afbraak biedt naar verwachting een goede, kosteneffectieve oplossing, doordat de condities in de bodem ter plaatse betrekkelijk eenvoudig kunnen worden geoptimaliseerd. Met de zogenaamde shock-load-behandeling zijn in het verleden goede resultaten geboekt in een heterogene, relatief slecht doorlatende, bodem.

Naar aanleiding van het vooronderzoek is op de locatie door BAM Milieu een proefsanering uitgevoerd met directe injectie van een shock-load protamylasse. De proefsanering wordt uitgevoerd tot een diepte van maximaal 12 m –mv.

Deltares/TNO voert in het kader van het Holland In situ Proeftuin (HIP) programma in samenwerking met BAM Milieu monitoring van de proefsanering uit. Het HIP-programma heeft als doel het optimaliseren en demonstreren van in situ saneringstechnieken. De ervaringen die tijdens verschillende zogenaamde HIP-pilots worden opgedaan worden beschikbaar gemaakt via de website www.soilection.nl. In het kader van deze HIP-pilot is tijdens de proefsanering vooral aandacht besteed aan het ruimtelijke en temporele bereik gedurende het eerste halfjaar na injectie van het substraat, dat wordt toegediend ten behoeve van het stimuleren van biologische afbraak. Om te verifiëren of door de sanering verspreiding in alle richtingen voorkomen wordt, is tijdens de pilotsanering ook grondwater dieper dan 12 m –mv gemonitord.

1.2 Doel

Het primaire doel van de proefsanering is het bereik van de protamylasse-injecties te bepalen, zodat op basis hiervan de full-scale sanering kan worden gedimensioneerd. Secundair doel is om al een zo groot mogelijk deel van de sanering uit te voeren. De proefsanering is hiermee de eerste fase van de sanering.

De doelstelling van deze HIP-pilot is het demonstreren van een succesvolle saneringsaanpak, gebaseerd op gestimuleerde biologische afbraak, van een VOCl-verontreiniging in grondwater in een heterogene en matig doorlatende bodem. Daarnaast is

1. Vooronderzoek t.b.v. pilotsanering Stadhouderskade te Schiedam, Deltares, in opdracht van BAM Milieu namens BAM Vastgoed, januari 2009, rapportnummer 2008-U-R35962/B.

het doel van deze pilot om te bepalen wat het bereik van de behandeling is en op welke wijze de sanering gedimensioneerd kan worden.

Kennisvragen die in het kader van HIP beantwoord worden:

1. Hoe kan een sanering met behulp van direct-push shock-load toediening van een elektronendonor worden gedimensioneerd voor toepassing in een heterogene bodem met een grillige afwisseling van lagen met uiteenlopende fysische en chemische eigenschappen?
2. Hoe kan het bereik van de techniek worden vastgesteld en hoe wordt dit bereik beïnvloed door de heterogeniteit van de bodem?

2 Gegevens onderzoekslocatie

2.1 Ligging en inrichting locatie

De locatie bevindt zich aan de Stadhouderskade te Schiedam en wordt aan de oostzijde begrensd door de Westerhaven/Houthaven (zie figuur 2.1). De locatie is gedeeltelijk bebouwd met woningen. In bijlage A is een situatietekening van de locatie opgenomen. De locatie is in het voortraject al ingedeeld in twee deellocaties, genaamd 'oostelijke vlek' en 'westelijk vlek'.



Figuur 2.1 Ligging van de onderzoekslocatie. Figuur gebaseerd op www.maps.google.com

2.2 Bodemopbouw

In het rapport van het vooronderzoek¹ zijn boorbeschrijvingen en andere gegevens over de bodemopbouw uit voorgaande onderzoeken opgenomen en besproken. De boorstaten van de boringen die in het kader van dit onderzoek zijn geplaatst, zijn opgenomen in Bijlage B. In figuur 2.2 en 2.3 wordt een schematische weergave van de bodemopbouw op basis van de boorstaten gepresenteerd ter plaatse van de westelijke en de oostelijke vlek. Uit de boorbeschrijvingen blijkt, evenals uit diverse voorgaande onderzoeken, dat de bodem tot 12 m –mv bestaat uit een afwisseling van klei en zandlagen. Plaatselijk zijn dunne (0,5 tot 1,0 meter dikte) veenlagen aangetroffen rond 5 of 12 m –mv.

Voorgaande onderzoeken op de onderzoekslocatie en net daarbuiten wijzen ook op een heterogene bodemopbouw. In 1999 is grondmechanisch onderzoek uitgevoerd door MOS². Uit de sondeergegevens blijkt dat de bodem tot 12 m –mv overwegend uit klei of kleilig silt bestaat, met dunne lagen zand van centimeters tot enkele decimeters die vooral worden aangetroffen op een diepte van circa 3 m –mv en 10 m –mv. Uit de recente boorstaten blijkt dat zand voornamelijk aanwezig is in de bovenste 4 meter van het profiel, maar plaatselijk

2. Stadhouderslaan te Schiedam, MOS Grondmechanica, 3 december 1999.

(vooral in de westelijk vlek) ook dieper. Uit sondeergegevens van Joustra Geomet³ blijkt dat de bodem ten noorden van de westelijke vlek overwegend uit klei bestaat, met een zandlaag op 10,5-12,5 m –mv, en veenlagen op circa 3,5-4,5; 14,5 -15,5 en 17,3-18 m –mv. Ten noorden van de oostelijke vlek duiden de sondeergegevens op een klei-/leemlaag van maaiveld tot 19 m –mv. Dit pakket wordt onderbroken door veenlagen van 1 tot 2 m –mv en een dunne laag rond 12 m –mv. Zandlagen komen voor van 2,0 tot 3,5 en 10 tot 12 m –mv. Van 19 tot 25 m –mv wordt zand aangetroffen. Gegevens van een sondering ter plaatse van de oostelijke vlek duiden op de aanwezigheid van zand in de bovenste 3 meter van de bodem, met daaronder voornamelijk klei/silt. Op 12-13 m –mv wordt veen aangetroffen. Uit de sonderingen blijkt dat op de onderzoekslocatie de bodem vanaf circa 18 m –mv uit zand bestaat.

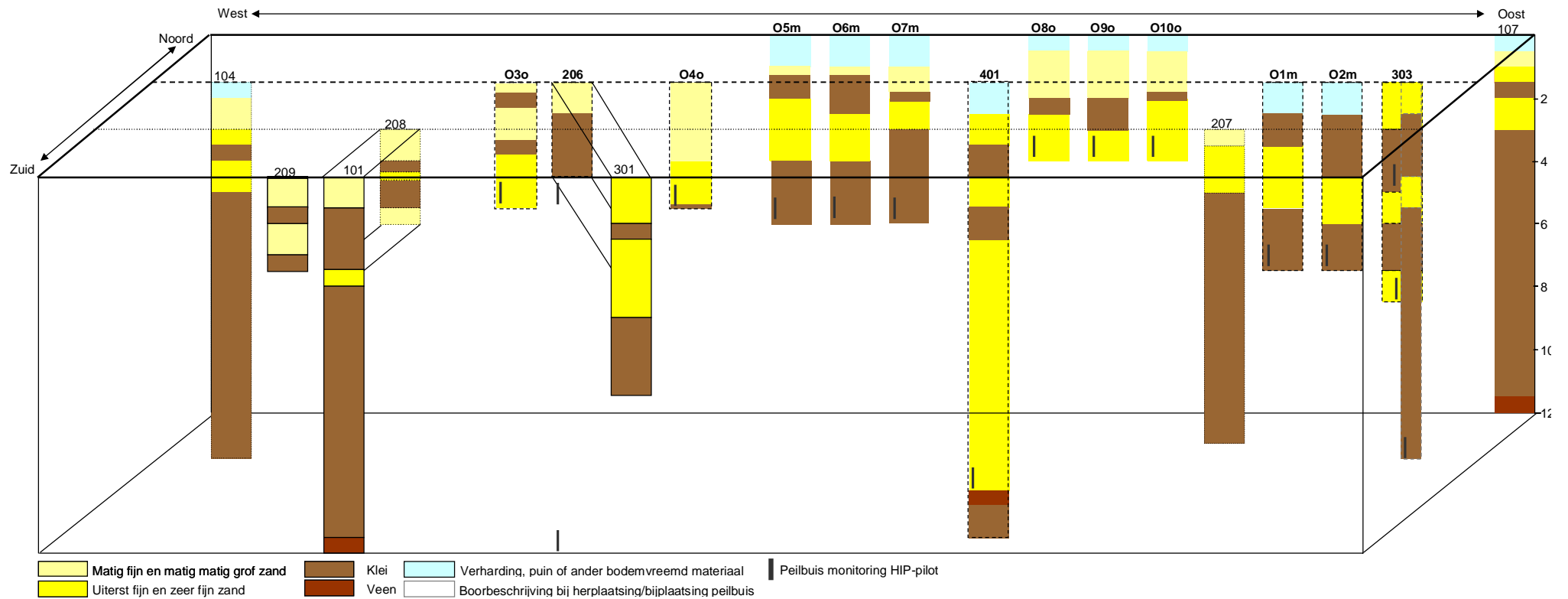
Er is weinig informatie uit boorstaten beschikbaar over het bodemprofiel beneden 12 m –mv. Uit de grondwaterkaart van Nederland (37 West-37 oost, TNO) blijkt dat de deklaag van klei en matig grof tot matig fijn zand eindigt op circa 18 m –mv. Dit bleek ook uit de sonderingen van Joustra Geomet. Daaronder bevindt zich tot een diepte van circa 35 m –mv het 1e watervoerend pakket dat bestaat uit matig fijn tot uiterst grof zand en grind. De onderste 4 meter is schelphoudend. De eerste scheidende laag (klei en matig grof tot matig fijn zand) bevindt zich op een diepte van circa 35 tot 50 m –mv, waar zich de bovenzijde van het tweede watervoerende pakket bevindt.

De bodemopbouw op de locatie wordt in tabel 2.1 globaal samengevat.

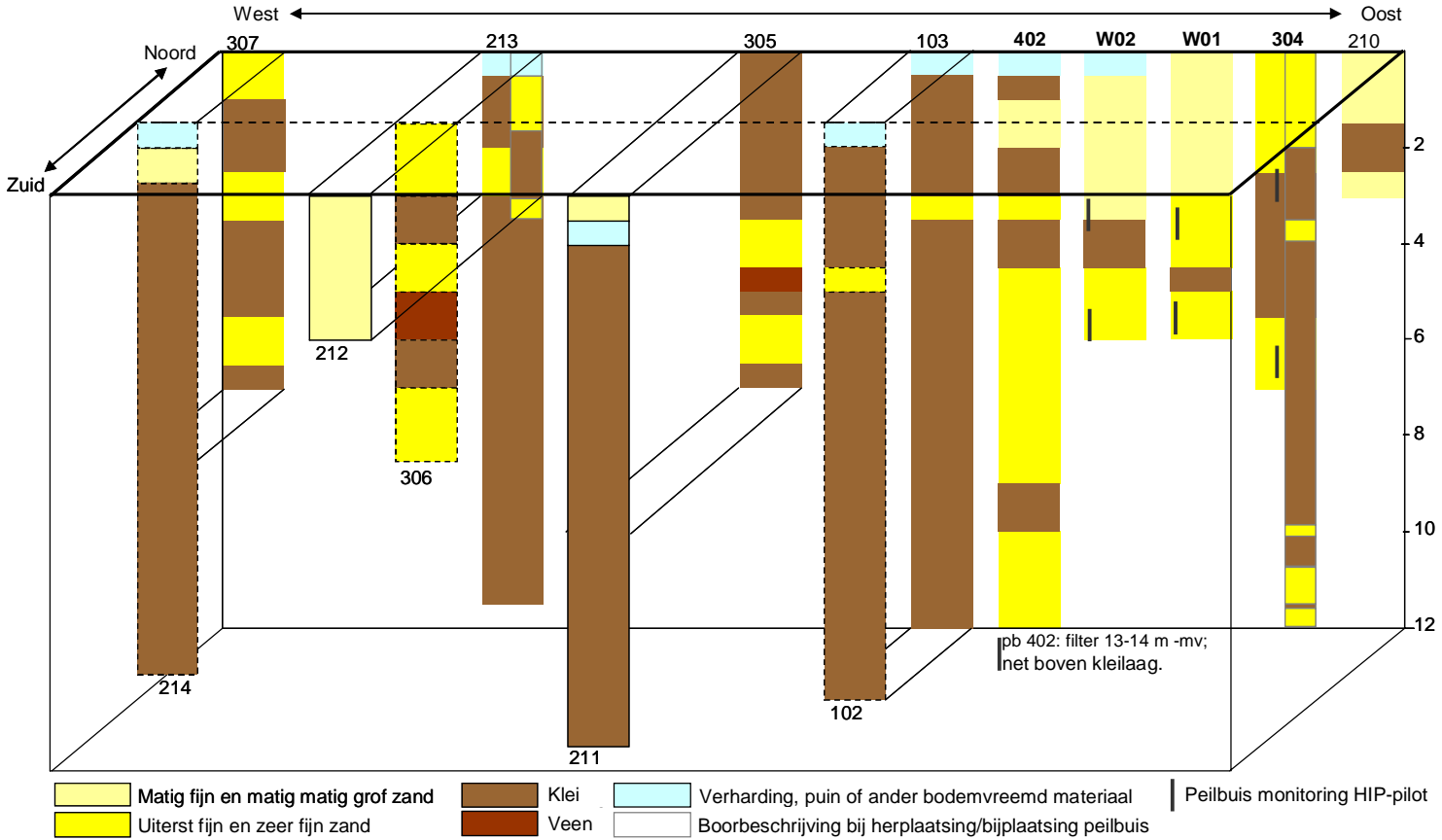
Tabel 2.1 Globale bodemopbouw

Diepte	Laag	Omschrijving
0 tot 18 m -mv	Deklaag	Afwisselend klei en matig grof tot zeer fijn zand. Zand wordt op de onderzoekslocatie voornamelijk aangetroffen in de bovenste 4 meter, maar plaatselijk ook dieper. Plaatselijk is veen aangetroffen op circa 5 en circa 12 m –mv.
18 tot 35 m -mv	1 ^e Watervoerende pakket	matig fijn tot uiterst grof zand en grind
35 tot 50 m –mv	1 ^e Scheidende laag	klei en matig grof tot matig fijn zand
v.a. 50 m -mv	2 ^e Watervoerende pakket	

3. Rapport betreffende fundering nieuwbouw woningen en woontoren op het voormalig wasserijterrein aan de Stadhouderslaan te Schiedam, Joustra Geomet B.V., 20 september 1995.



Figuur 2.2 Schematische weergave van de bodemopbouw ter plaatse van de **oostelijke vlek** op basis van beschikbare boorstaten. Wanneer twee boorbeschrijvingen op een punt zijn gemaakt, worden beiden weergegeven. De ligging van de boorpunten ten opzichte van elkaar is niet op schaal weergegeven.



Figuur 2.3 Schematische weergave van de bodemopbouw ter plaatse van de **westelijke vlek** op basis van beschikbare boorstaten. Wanneer twee boorbeschrijvingen op een punt zijn gemaakt, worden beiden weergegeven. De ligging van de boorpunten ten opzichte van elkaar is niet op schaal weergegeven.

2.3 Grondwater

Het maaiveld bevindt zich op circa 1 m + NAP. De hoogte van de grondwaterstand bedraagt circa 1,5 tot 2,0 m –mv (0,5 tot 1,0 m –NAP). In het herziene saneringsplan³ wordt melding gemaakt van schijngrondwaterstanden, verspreid over de locatie, waardoor het afleiden van de stromingsrichting ter plaatse niet mogelijk is. Gezien het verhang en de bodemopbouw is de horizontale stroming in de deklaag waarschijnlijk beperkt. Op de locatie is sprake van een infiltratiesituatie. De verticale stromingsrichting is in de deklaag neerwaarts gericht.

Uit de grondwaterkaart blijkt dat de grondwaterstromingsrichting in het eerste watervoerende pakket regionaal noordoostelijk gericht is.

Het waterpeil in de haven bedraagt circa 0,4 m –NAP. De oever van de haven is voorzien van een houten (azobé) damwand tot circa 5,5 m –NAP.

2.4 Verontreinigingsituatie

Op de locatie is op twee deellocaties (westelijke vlek en oostelijke vlek) het grondwater tot minimaal 12 m –mv sterk verontreinigd met VC. Plaatselijk is een matige verontreiniging met Cis en een lichte verontreiniging met Per en Tri aangetoond. Plaatselijk komt ook een sterke verontreiniging met PER, TRI en DCE (vooral Cis) voor. De verontreiniging is onderzocht tot een diepte van 12 m –mv en is hiermee niet afgeperkt. Maximale concentraties die tijdens het vooronderzoek in de oostelijke vlek werden aangetoond bedragen:

- PER: niet aangetoond;
- TRI: niet aangetoond;
- Som DCE (bijna volledig Cis): 6.179 µg/l;
- VC: 4.707 µg/l.

Maximale concentraties die tijdens het vooronderzoek in de westelijke vlek werden aangetoond bedragen:

- PER: 817 µg/l;
- TRI: 4.885 µg/l;
- Som DCE (bijna volledig Cis): 33.608 µg/l;
- VC: 4.867 µg/l.

In de grond is tijdens voorgaand onderzoek alleen ter plaatse van een boring in de westelijke vlek een lichte verontreiniging met PER, TRI en Cis aangetroffen op een diepte van 3,5-3,7 m –mv.

2.5 Voorgaande saneringsactiviteiten

Op de locatie hebben (voorafgaand aan de proefsanering door middel van directe injecties met een shock load dosering protamylasse) de volgende saneringswerkzaamheden plaatsgevonden:

- 1995: grondsanering. Als gevolg van de sanering en de aanleg van een riool bestaat de bodem plaatselijk tot circa 3,0 m -mv uit matig fijn tot matig grof zand.
- Augustus 1995 - april 1998: start grondwatersanering door middel van onttrekking, zuivering en lozing.
- 2000 - 31 maart 2003: onttrekking via additioneel onttrekkingsysteem.
- Februari 2007-oktober 2007: in situ chemische oxidatie (ISCO) met Fenton's reagens.

Het huidige onderzoek en het hieraan voorafgaande vooronderzoek zijn uitgevoerd naar aanleiding van de laatstgenoemde saneringsactiviteit, die niet tot het gewenste resultaat

heeft geleid. In het vooronderzoek¹ zijn de werkzaamheden en de resultaten van de ISCO-sanering uitgebreid omschreven en besproken.

2.6 Saneringsdoelstelling

De saneringsdoelstelling luidt:

‘Een (sobere en doelmatige) kosteneffectieve sanering van de grondwaterverontreiniging met VOCl. De saneringsaanpak is er op gericht de mate van verontreiniging zodanig te reduceren, dat een eventuele kans op het alsnog ontstaan van onaanvaardbare humane, ecologische en/of verspreidingsrisico’s in de toekomst wordt voorkomen. Hierbij wordt zoveel als kosteneffectief mogelijk verontreiniging verwijderd en dient binnen 30 jaar sprake te zijn van een stabiele situatie.’

3 Uitgevoerde werkzaamheden en gebruikte methoden

3.1 Injectie protamylasse

Het saneringsplan⁴ ging uit van injectie van onverdunde protamylasse op injectiepunten die in de tuinen in een grid 2x2m worden geplaatst en in de openbare weg in een grid van 4x4 meter. De hogere dichtheid van injectiepunten in de tuinen heeft tot doel om de kans te verkleinen dat herhaaldelijk geïnjecteerd moet worden. Dit ontwerp is gebaseerd op ervaring van de aannemer.

In het kader van de proefsanering is injectie van protamylasse uitgevoerd door BAM Milieu met behulp van een sonische boorstelling (powerprobe) en een injectielans. Sonisch boren is hoogfrequent machinaal boren. Dit betekent dat in de machine een hoog frequente slagkracht gecreëerd wordt. Deze trilling wordt op de injectielans overgezet. Bij de punt van de boorbuis wordt de grond week gemaakt. Door het gewicht van de machine wordt de boorbuis in de grond gedrukt. De injectielans bestaat uit stalen, holer boorbuizen met een conische gevormde stalen kop (zie figuur 3.1). Door kleine gaatjes in de kop wordt de protamylasse geïnjecteerd.



Figuur 3.1 De gebruikte injectiekop

De injecties hebben plaatsgevonden van 9 tot en met 17 februari 2010. De injectiepunten zijn weergegeven in bijlage A. Injectiepunten (I)1 t/m (I)12 bevinden zich in de oostelijke vlek; injectiepunten (I)13 t/m (I)22 in de westelijke vlek. De afstand tussen de injectiepunten varieert en bedraagt over het algemeen in de oostelijke vlek circa 3 tot 4 meter en in de westelijke vlek 2,5 tot 6 meter.

Bij alle injecties is getracht maximaal 40 liter per meter te injecteren tot een overdruk van maximaal 20 bar, met een geplande totale hoeveelheid van 375 liter per injectiepunt. Dit is niet overal bereikt. Injectie 5 was de eerste en is van boven naar beneden uitgevoerd. In het traject van 4 tot 9 m -mv kwam een deel van de injectievloeistof naar boven in plaats van zich te verspreiden in de bodem. Op basis hiervan is besloten om van beneden naar boven te injecteren. Bij het injecteren boven de kleilaag, vanaf circa 4 m-mv, was het erg lastig de protamylasse in de bodem te krijgen. Doordat er een voorkeurstroming langs de boorstangen

4. Plan van aanpak vervolg bodemsanering Stadhouderskade te Schiedam. BAM Milieu, in opdracht van BAM Vastgoed, projectnummer 2008-108.

naar boven ontstond liep de protamylasse er aan de bovenzijde uit. Bij de meeste injectiepunten is daarom vanaf circa 4 á 5 m -mv gestart met injecteren. De injecties zijn zoveel mogelijk in volgorde van de buitenrand van de deellocaties naar binnen toe uitgevoerd met als doel verspreiding in het horizontale vlak te voorkomen. De protamylasse is onverdund geïnjecteerd. In de oostelijk vlek is 250 tot 435 liter protamylasse geïnjecteerd per injectiepunt, met een gemiddelde van 367 liter per injectiepunt. In de westelijke vlek is 60 (injectiepunt 19) tot 400 liter per injectiepunt geïnjecteerd. Bij injectie 19 kon in het traject van 2 tot 7 m -mv geen protamylasse geïnjecteerd worden ondanks een overdruk van 35 bar; ook in de overige trajecten is hier de geïnjecteerde hoeveelheid beperkt. Wanneer injectiepunt 19 buiten beschouwing gelaten wordt, bedraagt het gemiddelde volume protamylasse dat in de westelijke vlek is geïnjecteerd 347 liter.

In de westelijke vlek is voorafgaand aan de injectie van de protamylasse bij de injectiepunten 13 t/m 22 steeds eerst een shot perslucht toegediend. De ervaring van de aannemer is dat hierdoor meer substraat geïnjecteerd kan worden. De aannemer vermoedt dat dit het gevolg is van het creëren van haarscheurtjes in de bodem.

In bijlage C zijn de gedetailleerde injectiegegevens opgenomen.

3.2 Monitoring

Aanvankelijk waren in het kader van de HIP-pilot drie monitoringsrondes gedurende het jaar na injectie voorzien. In verband met vertraging tijdens de voorbereiding van de injectiewerkzaamheden is de monitoringsperiode verkort tot een half jaar.

Er zijn vier monitoringsrondes uitgevoerd, waarbij bemonstering en veldmetingen zijn uitgevoerd op onderstaande data:

- Ronde 0: 16-17 december 2009 (nulsituatie)
< 9 tot en met 17 februari 2010 injectie >
- Ronde 1: 24 en 25 februari 2010 (gemiddeld circa 12 dagen na de substraatinjectie)
- Ronde 2: 26 en 27 mei 2010 (circa 3 maanden na de substraatinjectie)
- Ronde 3: 31 augustus en 1 september 2010 (circa zes maanden na de substraatinjectie)

Voor de monitoring van de pilot is gebruik gemaakt van reeds bestaande peilbuizen en van nieuwe peilbuizen die in november 2009 zijn bijgeplaatst door VCMI. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de peilbuizen die zijn gebruikt voor de monitoring. De peilbuizen zijn zo gekozen dat er filters op verschillende dieptes en zowel in zand- als in kleilagen staan. Er zijn rondom de injectiepunten sublocaties gedefinieerd: Oost 1, oost 2, Oost 3 en West (zie tabel). De sublocaties omvatten sets van peilbuizen die op een diepte op verschillende afstanden van een injectiepunt staan.

Tabel 3.1 Gegevens van de monitoringspeilbuizen. 'Minimale afstand tot injectie' heeft betrekking op de afstand tot het dichtstbijzijnde injectiepunt.

Sublocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m -mv)	Minimale afstand tot injectie (m)
Oost 1	O8o	3-4	0,60
	O9o	3-4	1,10
	O10o	3-4	1,70
Oost 2	O3o	3-4	2,10
	206o	3-4	2,50
	O4o	3-4	2,30
Oost 1	O7m	5-6	0,70
	O6m	5-6	1,30
	O5m	5-6	2,00
Oost 2	206m	6-7	2,20
Oost 3	O1m	5-6	2,00
	O2m	5-6	2,50
	303m	6-7	2,30
Oost 2	206d	11-12	2,10
	401	12-13	1,77
Oost 3	303d	11-12	2,70
West	304o	2,5-3,5	0,70
	W01o	3-4	1,10
	W02o	3-4	2,00
West	304m	6-7	0,30
	W01m	5-6	1,10
	W02m	5-6	2,00
West	402	13-14	1,20

In het veld zijn in grondwater de volgende metingen uitgevoerd: waterstof (H₂), geleidbaarheid (EC), redoxpotentiaal (Eh), zuurstof (O₂), temperatuur en zuurgraad (pH).

De grondwatermonsters zijn in het laboratorium geanalyseerd op VOCl, etheen, ethaan, methaan, sulfaat, nitraat en DOC. Er zijn geen analyses op nutriënten uitgevoerd omdat de andere parameters voldoende aanwijzingen geven voor het bereik van het substraat. Op een deel van de monsters zijn moleculaire analyses (DNA) uitgevoerd op genen die coderen voor de bacteriegroep *Dehalococcoides Spp.* en de enzymen VcrA en BvcA.

Een aantal veldmetingen heeft niet kunnen plaatsvinden omdat er onvoldoende toestroom van grondwater naar de peilbuizen was. Hierdoor konden bij peilbuizen O5m, O6m en O7m tijdens drie monitoringsrondes geen waterstofmeting worden uitgevoerd. Bij O1m en O2m zijn tijdens twee rondes geen waterstofmeting uitgevoerd.

3.2.1 Toelichting moleculaire analyses

Tijdens ronde 0, ronde 1 en ronde 3 zijn tevens op een aantal peilbuizen moleculaire analyses (DNA) uitgevoerd. De analyses tijdens ronde 1 zijn extra toegevoegd aan het monitoringsprogramma ten behoeve van het onderzoeken van het eventuele effect van perslucht op de bacteriën. Niet alle soorten *Dehalococcoides* zijn even gevoelig voor de invloed van zuurstof. VC-afbrekende soorten zijn waarschijnlijk gevoeliger voor zuurstof dan

DHC-soorten die dit niet kunnen⁵. In box 1 wordt het belang van de moleculaire analyses nader toegelicht.

Box 1

Toelichting moleculaire analyse (DNA)

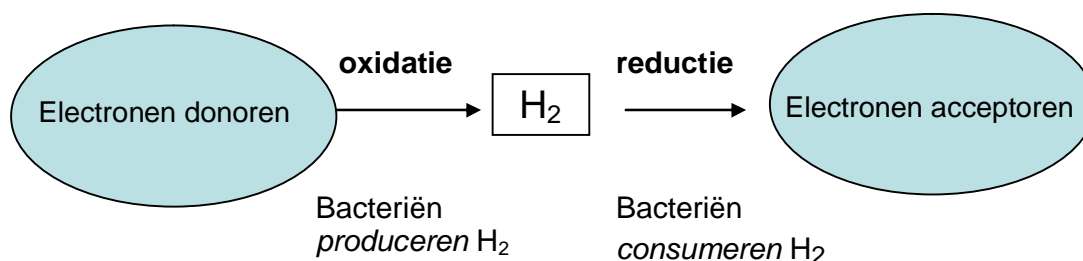
Chloorethenen kunnen door verschillende groepen van micro-organismen gedeeltelijk worden omgezet. Van *Dehalococcoides Spp.* is echter bekend dat micro-organismen uit deze groep PER volledig kunnen dechloreren via TRI, CIS en VC tot etheen. Met moleculaire analyse technieken zoals "real time-PCR" is *Dehalococcoides Spp.* kwantitatief aan te tonen in bodem en grondwatermonsters. Hiervoor wordt geanalyseerd op een gedeelte van het DNA van de bacterie, dat specifiek is voor deze bacteriesoort. Hiermee is via genen die coderen voor de bacteriegroep aan te tonen of deze bacteriegroep aanwezig is in de monsters en in welke aantallen. Nog specifiek is de analyse op het DNA voor enzymen zoals VC-reductases, die zorgen voor de omzetting van VC.

Indien de bacteriegroep *Dehalococcoides spp.* wordt aangetoond kan in principe afbraak van PER en TRI (via Cis en VC) plaatsvinden. De aanwezigheid van het enzym voor VC-reductase, de laatste stap in het afbraakproces, geeft uitsluitel of volledige afbraak naar etheen mogelijk is. Over het algemeen wordt een aantal van 1.000 genkopieën/ml *Dehalococcoides spp.* gehanteerd als ondergrens voor een geschikte populatie voor anaerobe reductieve dechlorering van VOCl. Een deel van het DNA kan echter afkomstig zijn van dode bacteriën.

De genen *VcrA* en *BvcA* coderen beiden voor een VC-reductase enzym. Dit enzym is verantwoordelijk voor de afbraak van vinylchloride naar etheen onder anaërobe condities. Van het *vcrA* gen is bekend, dat het voorkomt in 2 verschillende *Dehalococcoides* stammen: *Dehalococcoides sp. strain VS* en *Dehalococcoides sp. strain GT*. Het *bvcA* gen komt alleen voor in *Dehalococcoides sp. strain BAV1*.

3.2.2 Toelichting waterstofmetingen

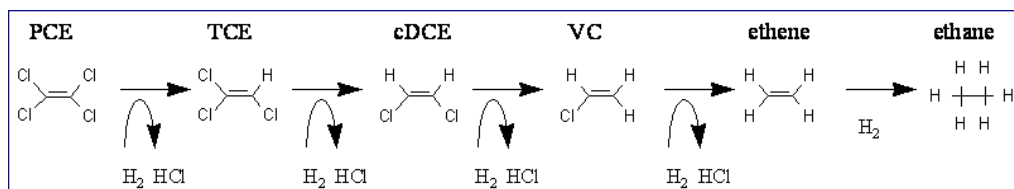
Voor een aantal gechloroerde verbindingen is reductieve dechlorering het enige biologische omzettingsproces. Dit geldt onder andere voor tetrachlooretheen (PER), hexachloorbenzeen (HCB) en polychloorbifenylen (PCB's). Reductieve dechlorering vindt plaats doordat specifieke bacteriën organische stof afbreken (oxideren) en de verontreiniging gebruiken als elektronenacceptor (zie figuur 3.2).



Figuur 3.2 Reductieve dechlorering vindt plaats doordat specifieke bacteriën organische stof afbreken (oxideren) en de verontreiniging gebruiken als elektronenacceptor

5. Amos et al., 2008. Oxygen effect on *Dehalococcoides* viability and biomarker quantification. *Environmental science & technology*, vol. 42, no. 15, 5718-5726.

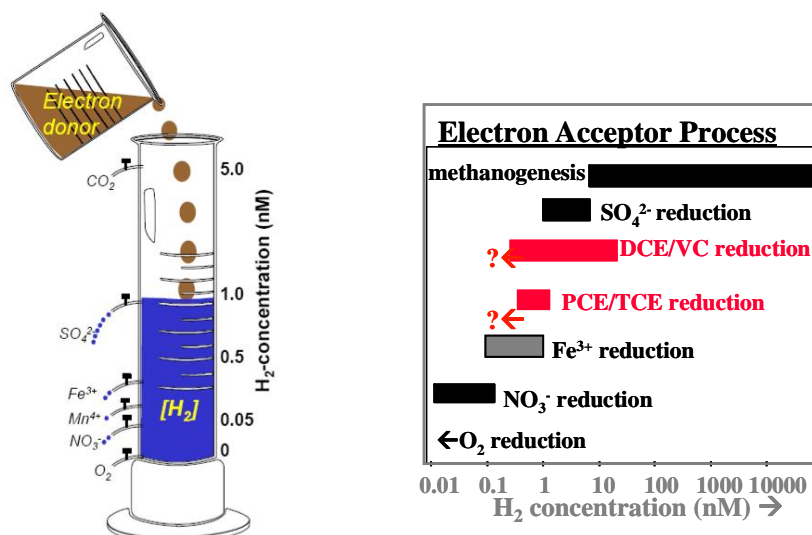
In figuur 3.3 wordt de volledige reductieve dechlorering van PER beschreven. Doordat steeds een chlooratoom wordt vervangen door een waterstofatoom ontstaan uiteindelijk de onschadelijke producten etheen en ethaan. De benodigde waterstof wordt geproduceerd doordat de bacteriën organische stof afbreken door middel van een oxidatieproces waarbij de organische stof fungeert als elektronendonor.



Figuur 3.3 Reductieve dechlorering van PER

Om volledige reductieve dechlorering van VOCl's te laten plaatsvinden is dus waterstof nodig, die geproduceerd moet worden door omzetting van een bepaalde hoeveelheid organische stof. Niet alle organische stof kan echter worden omgezet in waterstof.

De concentratie waterstof in het grondwater wordt bepaald door het evenwicht tussen waterstofproductie en -consumptie, oftewel door de elektronendonoren (organisch substraat) en -acceptoren (verontreiniging zoals PER of natuurlijke elektronenacceptoren zoals nitraat en sulfaat). In figuur 3.4 wordt weergegeven hoe de voorraad en oxidatie van elektrondonor (substraat) samen met de reductie van elektronenacceptoren de concentratie waterstof in grondwater bepalen. Op basis van empirische relaties is bepaald hoeveel de minimale concentratie waterstof bedraagt die nodig is voor de reductie van de natuurlijke elektronenacceptoren zuurstof, nitraat, ijzer III, sulfaat en koolstofdioxide. Ook de minimale concentratie waterstof die nodig is voor reductieve dechlorering is bij benadering bekend (zie figuur 3.3). Ieder omzettingsproces kent hiervoor een specifieke waarde.



Figuur 3.4 De concentratie waterstof in grondwater wordt bepaald door de productie en consumptie van waterstof. Op basis van empirische relaties is weergegeven vanaf welke concentratie verschillende reductieprocessen plaatsvinden (uit Ter Meer et al., 1999).

Vaak wordt opgelost organisch koolstof (Dissolved Organic Carbon, DOC) voorafgaand en tijdens de sanering gebruikt als indicatie voor de hoeveelheid substraat die aanwezig is. Omdat niet alle organische stof wordt omgezet in waterstof, en geschikt is als elektronendonor, geeft DOC een minder betrouwbaar beeld van de afbraakcondities dan de waterstofconcentratie. Ook kan het zo zijn dat het aanwezige DOC wordt omgezet en het vrijgekomen waterstof meteen door concurrerende niet dechlorerende bacteriën wordt verbruikt.

Wanneer de potentie van de bodem voor natuurlijke afbraak middels reductieve dechlorering wordt onderzocht, wijst een waterstofmeting uit of de in de bodem aanwezige organische stof geschikt is als elektronendonor en of toedienen van een substraat noodzakelijk is om de biologische afbraak te stimuleren (zoals op deze locatie).

In het geval van gestimuleerde biologische afbraak kan met behulp van waterstofmetingen de effectiviteit van verschillende substraten worden vergeleken. Wanneer de waterstofmetingen tijdens het verloop van de sanering na toediening van een substraat worden uitgevoerd, kan worden onderzocht of de waterstofproductie constant blijft, toeneemt of afneemt en er gunstige condities voor dechlorering gecreëerd worden en blijven.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van veldwerkzaamheden en analyses besproken. De resultaten ten aanzien van de bodemopbouw zijn verwerkt in hoofdstuk 2.

4.1 Zintuiglijke waarnemingen

In tabel 4.1 zijn de zintuiglijke waarnemingen tijdens bemonstering weergegeven. Plaatselijk is het grondwater troebel of bruin- of geelgekleurd. Tijdens ronde 0 is geen verkleuring opgevallen. Bij peilbuis 402 (West, 13-14 m –mv) is tijdens ronde 1, 2 en 3 pure protamylasse waargenomen in de peilbuis.

Tabel 4.1 Zintuiglijke waarnemingen tijdens monsterneming. L: licht; D: donker; P.M: protamylasse

Sublocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m -mv)	Kleur		
			24 en 25 feb. 2010 1e ronde na injectie	26 en 27 mei 2010 2e ronde na injectie	31 aug. en 1 sep. 2010 3e ronde na injectie
Oost 1	O8o	3-4	L. geel	L. geel	Geel
	O9o	3-4	L.geel	Helder	Helder
	O10o	3-4	L. gekleurd	Helder	Helder
Oost 2	O3o	3-4	Helder	Helder	Helder
	206o	3-4	L. gekleurd	Helder	Helder
	O4o	3-4	Helder	Helder	Helder
Oost 1	O7m	5-6	Helder	Helder	Helder
	O6m	5-6	Troebel	Helder	Helder
	O5m	5-6	L. gekleurd	Helder	Helder
Oost 2	206m	6-7	L. gekleurd	Helder	Helder
Oost 3	O1m	5-6	Helder	Helder	helder
	O2m	5-6	Helder	Helder	L. geel
	303m	6-7	Helder	Helder	Helder
Oost 2	206d	11-12	L. gekleurd	Helder	Helder
	401	12-13	L. gekleurd	licht geel	Geel
Oost 3	303d	11-12	L. Bruin	Geel	D. geel
West	304o	2,5-3,5	Helder	Helder	Helder
	W01o	3-4	Helder	Helder	Helder
	W02o	3-4	Helder	Helder	Helder
West	304m	6-7	Helder	Helder	Helder
	W01m	5-6	Helder	Helder	Helder
	W02m	5-6	Helder	Helder	Helder
West	402	13-14	Bruin P.M	Bruin P.M	Bruin P.M

4.2 Standaard veldparameters: pH, EC en T

In tabel 4.2 zijn de resultaten opgenomen voor de veldmetingen van de pH en EC. Gezien de samenstelling van het substraat, met zuren en zouten, kan de pH na de injectie dalen en de EC stijgen.

De gemiddelde geleidbaarheid bedroeg tijdens de nulmeting 2.774 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en tijdens ronde 1, 2 en 3 respectievelijk 3.319, 3.070 en 2.907 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De hoogste geleidbaarheid is tijdens ronde 1 aangetoond bij peilbuis 402, waar puur protamylasse werd aangetroffen. De EC bedroeg hier 16.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Bij de volgende peilbuizen is de EC na injectie met protamylasse tijdens minstens twee rondes hoger dan tijdens de nulsituatie: O8o, O9o, O7m, O1m, 303d, 304o, W01o, W02m, 402.

De gemiddelde zuurgraad bedraagt tijdens alle monitoringsrondes 6,7 of 6,8. De pH varieert van 6,1 tot 7,2 met een uitschieter bij peilbuis 402 tijdens ronde 1 wanneer de pH 5,8 is. De pH was bij de volgende peilbuizen tijdens minimaal twee monitoringsrondes lager dan tijdens de nulmeting: O8o, O9o, O7m, O6m, O5m, O1m, 303d en 402.

De temperatuur liep in de periode december 2009 tot augustus 2010 op van gemiddeld 9 °C tot 15,9 °C. De temperatuur wordt in het veld bepaald in een doorstroomcel boven het maaiveld.

4.3 Elektronendonor: DOC en waterstof

In tabel 4.3 worden de resultaten voor DOC en waterstof gegeven.

4.3.1 DOC

De concentratie DOC varieert:

- Ronde 0 van 7,7 tot 43 mg/l
(gemiddeld Oost: 20 mg/l; West: 12 mg/l)
- Ronde 1 van 5,4 tot 18.000 mg/l
(gemiddeld Oost: 525 mg/l, West incl. pb402: 2.581 mg/l; excl. pb 402: 11,4)
- Ronde 2 van 5,6 tot 2.900 mg/l
(gemiddeld Oost: 219 mg/l, West incl. pb402: 424 mg/l; excl. pb402: 11,7)
- Ronde 3 van 12 tot 2.400 mg/l
(gemiddeld Oost: 348 mg/l, West incl. pb402: 187 mg/l; excl. pb402: 18,0).

De toename van de concentratie DOC is het gevolg van de substraatinjecties. Bij een aantal peilbuizen is een sterke toename van de concentratie DOC waargenomen (zie figuur 4.1). Dit geldt met name voor de peilbuizen O8o, O9o, O7m, O2m, 401, 303d en 402, waar de concentratie tijdens ronde 1, 2 en/of 3 ten opzichte van de nulsituatie is toegenomen met minimaal een factor 10. Ter plaatse van enkele andere peilbuizen heeft (in de meeste gevallen tijdens de laatste monitoringsronde) een lichtere toename in de DOC plaatsgevonden ten opzichte van de nulsituatie. Mogelijk zet de stijging nog verder door als gevolg van oplossing van protamylasse. Dit wordt verwacht op basis van ervaringen in andere projecten, zoals bijvoorbeeld bij de shock-load behandeling in IJl⁶, waar tot 2 jaar (einde van de monitoring) na de shock load behandeling nog een stijgende trend in de concentratie DOC werd aangetoond.

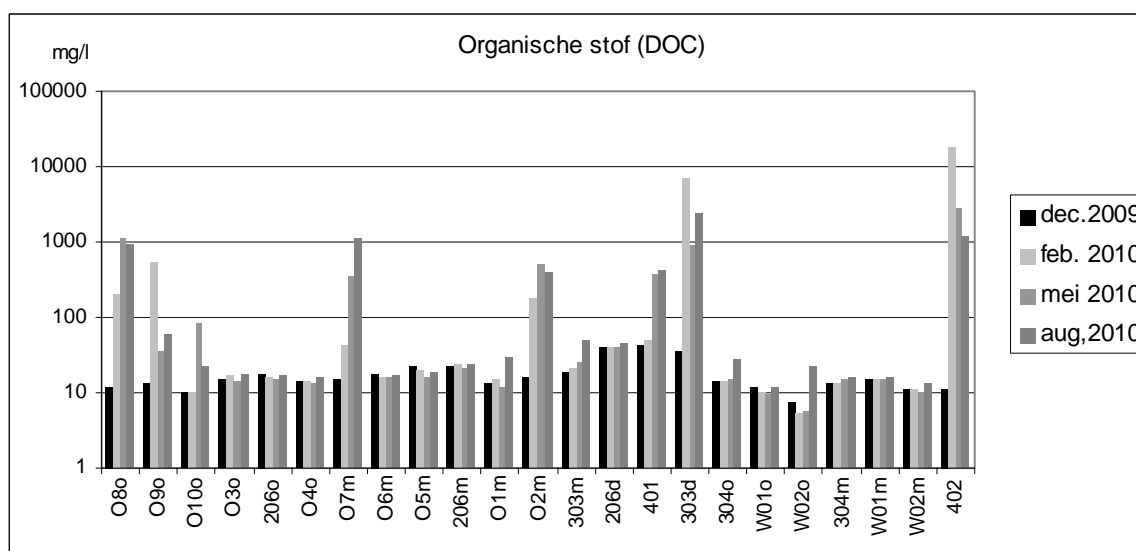
6. Shock-load behandeling CKW-kern Nooitgedacht IJl, Grontmij en TNO, SKB-rapport, projectnummer 167029, 22 november 2007.

Tabel 4.2 Resultaten van de veldmetingen voor geleidbaarheid (EC) en zuurgraad (pH). ---: niet bepaald. Waar mogelijk zijn ook de resultaten van het vooronderzoek in 2008 vermeld.

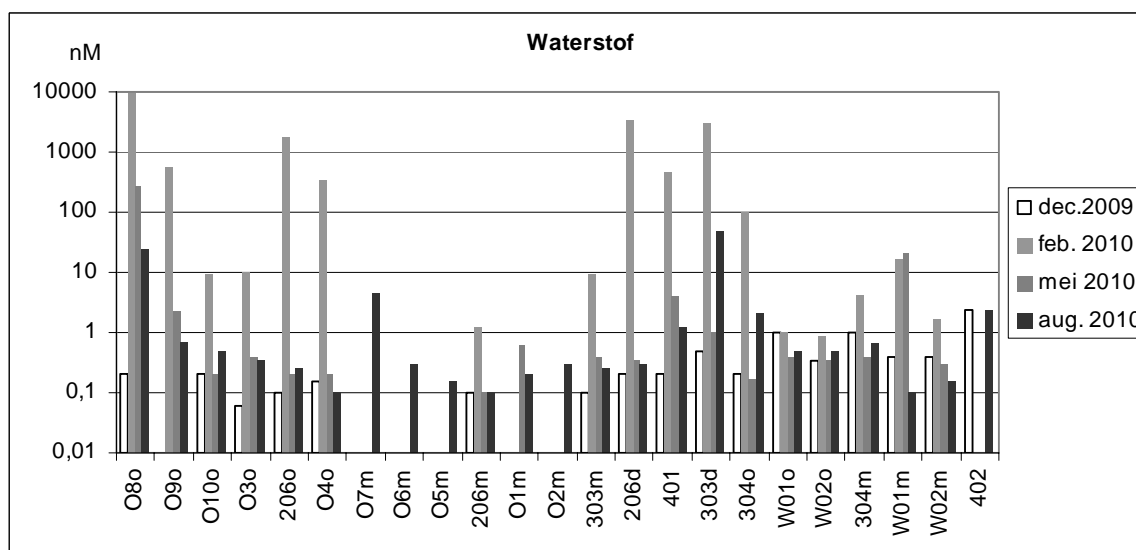
Sublocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m - mv)	EC (µS/cm)					pH				
			DATUM:	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug.2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010
Oost 1	O8o	3-4	---	1650	2070	3980	3300	---	6,7	6,6	6,4	6,4
	O9o	3-4	---	1460	2010	1420	1850	---	7,0	6,6	6,9	6,8
	O10o	3-4	---	1410	1170	1360	1470	---	6,9	7,0	7,2	6,9
Oost 2	O3o	3-4	---	1980	1960	1890	1820	---	6,4	6,9	6,9	6,8
	206o	3-4	1900	2490	2490	1840	1550	6,7	6,7	6,8	7,0	6,7
	O4o	3-4	---	2300	2290	2020	1970	---	6,8	7,0	7,0	6,9
Oost 1	O7m	5-6	---	2270	2180	3050	4320	---	6,8	6,4	6,2	6,5
	O6m	5-6	---	3280	2810	2420	2330	---	7,1	6,7	6,6	6,7
	O5m	5-6	---	2700	2900	2640	2560	---	6,7	6,5	6,5	6,7
Oost 2	206m	6-7	2680	3190	3030	2680	2810	6,7	6,6	6,7	6,8	6,7
Oost 3	O1m	5-6	---	1880	4250	2520	2090	---	7,0	6,7	6,8	6,9
	O2m	5-6	---	5210	4850	5220	4940	---	6,5	6,9	6,3	6,6
	303m	6-7	4710	6080	5360	4390	4800	6,5	6,3	6,6	6,5	6,6
Oost 2	206d	11-12	3930	5200	4840	4700	4660	6,7	6,5	6,7	6,8	6,6
	401	12-13	---	5470	4980	3920	5440	---	6,5	6,7	6,4	6,6
Oost 3	303d	11-12	4590	5570	6010	6150	7300	6,5	6,5	6,4	6,1	6,5
West	304o	2,5-3,5	930	1350	1130	1660	1610	6,8	6,2	6,9	6,5	6,8
	W01o	3-4	---	1100	1170	1280	1640	---	6,7	7,2	7,0	6,8
	W02o	3-4	---	1220	960	1240	1720	---	6,7	7,2	6,8	7,0
West	304m	6-7	1220	1480	1460	1470	1230	6,9	6,5	6,9	6,7	6,9
	W01m	5-6	---	1440	1140	1420	1220	---	6,6	7,0	6,8	6,7
	W02m	5-6	---	1100	782	2650	1300	---	6,6	7,2	6,8	6,9
West	402	13-14	---	3970	16500	10700	4930	---	6,7	5,8	6,4	7,0

Tabel 4.3 Analyseresultaten voor DOC en waterstof (H₂). ---: niet bepaald. Waar mogelijk zijn ook de resultaten van het vooronderzoek in 2008 vermeld.

Sublocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m -mv)	DOC (mg/l)					H ₂ (nM)				
			DATUM:	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug,2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010
Oost 1	O8o	3-4	---	12	200	1100	940	---	0,2	9100	274	24
	O9o	3-4	---	13	530	36	59	---	---	560	2,2	0,7
	O10o	3-4	---	10	9,8	86	23	---	0,2	9,5	0,2	0,5
Oost 2	O3o	3-4	---	15	17	14	18	---	0,06	10	0,4	0,4
	206o	3-4	42,1	18	16	15	17	0,2	0,1	1750	0,2	0,3
	O4o	3-4	---	14	14	13	16	---	0,15	350	0,2	0,1
Oost 1	O7m	5-6	---	15	43	360	1100	---	---	---	---	4,4
	O6m	5-6	---	18	16	16	17	---	---	---	---	0,3
	O5m	5-6	---	22	20	16	19	---	---	---	---	0,2
Oost 2	206m	6-7	20,2	22	24	21	24	0,1	0,1	1,2	0,1	0,1
Oost 3	O1m	5-6	---	13	15	12	30	---	---	---	0,6	0,2
	O2m	5-6	---	16	180	500	400	---	---	---	---	0,3
	303m	6-7	20,1	19	21	25	49	0,1	0,1	9,5	0,4	0,3
Oost 2	206d	11-12	26,3	39	40	40	44	0,1	0,2	3500	0,4	0,3
	401	12-13	---	43	50	370	410	---	0,2	441	3,8	1,2
Oost 3	303d	11-12	38,5	35	7200	880	2400	0,2	0,5	2870	0,0	49,0
West	304o	2,5-3,5	19,1	14	14	15	28	0,2	0,2	101,5	0,2	2,0
	W01o	3-4	---	12	10	9,6	12	---	0	1	0,4	0,5
	W02o	3-4	---	7,7	5,4	5,6	23	---	0,35	0,85	0,4	0,5
West	304m	6-7	16,4	13	13	15	16	0,2	0	4,3	0,4	0,7
	W01m	5-6	---	15	15	15	16	---	0,4	16,5	20,4	0,1
	W02m	5-6	---	11	11	10	13	---	0,4	1,7	0,3	0,2
West	402	13-14	---	11	18000	2900	1200	---	2,3	---	---	2,4



Figuur 4.1 Verloop van de concentratie DOC.



Figuur 4.2 Verloop van de concentratie waterstof

4.3.2 Waterstof

Voor volledige reductieve dechlorering van VOCl naar etheen is over het algemeen minimaal een waterstofconcentratie noodzakelijk van 0,5 à 5 nM. Tijdens het vooronderzoek in 2008 waren de op deze locatie aangetoonde concentraties, op één uitzondering na, lager dan 0,5 nM. Dit duidt op een gebrek aan beschikbare elektronendonor op de locatie. De meetlocaties van het vooronderzoek komen deels overeen met de monitoringslocaties tijdens deze pilot. Tijdens ronde 0 varieerden de waterstofconcentraties van 0 nM tot 2,3 nM (gemiddeld oost 0,2 nM; gemiddeld west 0,5 nM). Dit zijn wederom (te) lage waarden.

In de oostelijke vlek zijn tijdens ronde 1 de concentraties waterstof bij alle peilbuizen gestegen ten opzichte van de nulsituatie (zie figuur 4.2). De concentraties variëren van 1,2 nM tot 9.100 nM, met een gemiddelde van 1.691 nM. De verhoogde waterstofconcentraties zijn echter tijdens ronde 2 niet meer aangetoond of ze zijn al weer gedaald. Mogelijk is dit het gevolg van verhoogde activiteit. Alleen bij O8o is de concentratie nog hoger dan 5 nM. We

benadrukken hier nogmaals dat bij peilbuizen O5m, O6m, O7m, O1m en O2m tijdens monitoringsrondes 0, 1 en/of 2 geen waterstofmeting kon worden uitgevoerd.

Tussen ronde 2 en 3 wordt de daling in de waterstofconcentraties na de piek tijdens ronde 1 voortgezet, of blijft de concentratie stabiel op een laag niveau. Ter plaatse van peilbuizen O8o, O7m en 303d worden nog waardes gemeten die hoog genoeg (respectievelijk 24 nM, 4,4 nM, 49 nM) zijn voor volledige reductieve dechlorering van VOCl. Bij een aantal peilbuizen is de waterstofconcentratie mogelijk voldoende: bij peilbuizen O9o en O10o, bedraagt de concentratie tijdens ronde 3 respectievelijk 0,7 en 0,5 nM.

In de westelijke vlek is tussen ronde 0 en ronde 1 de concentratie waterstof (geen metingen mogelijk bij peilbuis 402) gestegen maar minder dan bij de peilbuizen in de oostelijke vlek. De concentratie varieert van 0,85 tot 102 nM, met een gemiddelde van 21 nM. Tijdens ronde 2 is bij W01m de waterstofconcentratie nog iets verder gestegen ten opzichte van ronde 1 (van 16,6 naar 20,4 nM). Bij de overige peilbuizen is de concentratie gedaald tot lager dan 0,5 nM. Tijdens ronde 3 is de concentratie bij W01m teruggezaakt tot 0,1 nM. Ter plaatse van peilbuizen W01o, W02o en 304m is een waterstofconcentratie van 0,5 tot 0,7 nM aangetoond. Bij 304o en 402 is de concentratie het hoogst (resp. 2,0 en 2,4 nM).

4.4 Redox-omstandigheden

De redoxpotentiaal is na de injectie met protamylasse gedaald ten opzichte van de nulsituatie in 2009. Hierbij moet worden opgemerkt dat de redoxpotentiaal tijdens ronde 0 hoger was dan tijdens het vooronderzoek. Wanneer de redoxpotentiaal tijdens ronde 1, 2 en 3 daarmee wordt vergeleken, is alleen bij 206m en 206d sprake van een daling. Hoewel de organische stof in protamylasse de bodem sterker anaëroob maakt, bevat dit substraat ook stoffen die de redoxpotentiaal kunnen verhogen.

De concentraties zuurstof, nitraat, sulfaat en methaan wijzen op overwegend sulfaatreducerende omstandigheden en plaatselijk nitraatreducerende omstandigheden. Hieronder worden de analyseresultaten per deellocatie besproken. In tabel 4.4 worden de meetresultaten weergegeven.

4.4.1 Oostelijke vlek

Over het algemeen zijn de redoxomstandigheden in de deklaag, evenals voor de injectie, sulfaatreducerend en is de concentratie sulfaat gedaald. Ter plaatse van sublocatie Oost 1 (peilbuizen O8o, O9o en O10o) en peilbuis O4o zijn de hoogste zuurstofconcentraties gemeten; maximaal 5,6 mg/l. De redoxomstandigheden zijn nitraatreducerend ter plaatse van peilbuizen O8o, O2m en O7m en 303d. De concentratie nitraat is na de injectie met protamylasse toegenomen. Bij een aantal peilbuizen is ook de concentratie sulfaat gestegen ten opzichte van de nulsituatie. Over het algemeen is de concentratie vanaf ronde 2 of 3 weer gedaald tot een waarde die lager is dan in de nulsituatie.

In de diepere laag, bij peilbuizen 206d (11-12 m –mv) en 401 (12-13 m –mv), zijn de omstandigheden zowel voor als na injectie met protamylasse methanogeen.

4.4.2 Westelijke vlek

Tijdens de 2^e ronde na injectie is de nitraatconcentratie bij peilbuis 402 verhoogd tot 300 mg/l; tijdens de laatste ronde is deze echter al weer gedaald tot 7 mg/l. Ook de sulfaatconcentratie kent aanvankelijk een piek (1.298 mg/l tijdens ronde 1) en daalt daarna tot een gunstige waarde. Over het algemeen zijn de redoxomstandigheden in de deklaag bij de westelijk vlek sulfaatreducerend en is de sulfaatconcentratie, na een tijdelijke verhoging, tijdens ronde 3 lager dan tijdens de nulsituatie.

1012-0022, 28 januari 2011, definitief

Tabel 4.4 Redoxparameters. <: lager dan detectielimiet. ---: niet bepaald.

Sublocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m -mv)	Eh (mV)					O2 (mg/l)					Nitraat (mg/l)					Sulfaat (mg/l)					Methaan (µg/l)				
			okt. 2008	dec. 2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec. 2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec. 2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec. 2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2009	dec. 2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010
Oost 1	O8o	3-4	---	-61	-115	-115	-27	---	0,6	3,9	0,37	1,35	---	<0,5	4	35	42	---	210	300	40	51	---	10286	9359	3325	4348
	O9o	3-4	---	24	-97	-88	-22	---	2,4	1,8	4,40	4,35	---	<0,5	5	<0,5	<0,5	---	113	191	156	137	---	10256	9813	11681	2144
	O10o	3-4	---	-21	-113	-87	-39	---	0,1	0,7	5,90	5,60	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	201	149	38	57	---	8086	686	1082	537
Oost 2	O3o	3-4	---	-49	-122	-115	-82	---	0	0,1	0,60	0,10	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	226	240	294	247	---	7677	7939	7881	9481
	206o	3-4	-139	-36	-124	-138	-113	0,02	0,6	2,5	2,60	0,90	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	512	543	585	343	189	8897	9083	6239	1396	7931
	O4o	3-4	---	-40	-134	-117	-77	---	0	0,04	1,75	1,50	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	387	381	388	288	---	14007	11057	2202	10653
Oost 1	O7m	5-6	---	26	-95	-104	0	---	1,8	1,25	0,70	3,60	---	<0,5	<0,5	12	50	---	98	104	3	<0,5	---	4778	10871	3275	1339
	O6m	5-6	---	119	-7	-54	15	---	2,46	0,25	1,20	0,60	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	178	73	74	68	---	12995	21445	11779	16935
	O5m	5-6	---	137	-17	-55	10	---	0,1	0,5	0,00	0,35	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	83	73	65	69	---	21281	20739	8032	20136
Oost 2	206m	6-7	-117	-53	-124	-148	-126	0,02	0,3	0,3	0,90	0,06	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	58	90	96	109	81	20758	20599	22107	16452	23524
Oost 3	O1m	5-6	---	83	-32	-87	-2	---	2	0,66	0,28	0,10	---	9	<0,5	<0,5	<0,5	---	146	145	143	84	---	8348	15260	2363	12683
	O2m	5-6	---	-27	-62	-104	-7	---	0	2	0,63	1,80	---	<0,5	1	12	7	---	455	293	64	13	---	10927	13875	2527	10484
	303m	6-7	-102	-30	-93	-71	-69	0,03	0,18	0,58	0,00	0,09	<0,5	<0,5	<0,5	2	<0,5	264	238	278	233	186	16300	19992	17551	7171	15479
Oost 2	206d	11-12	-120	-26	-114	-161	-158	0,02	0,9	1,04	1,30	0,05	<0,5	<0,5	<0,5	4	<0,5	9	<0,5	1	1	<0,5	26482	23088	15855	21745	23809
	401	12-13	---	-45	-102	-115	-94	---	0,51	0,51	0,37	0,09	---	<0,5	<0,5	<0,5	3	<0,5	---	4	4	2	<0,5	---	30928	29553	20123
Oost 3	303d	11-12	-123	-30	-117	-98	-119	0,08	0,3	0	0,00	0,00	<0,5	<0,5	5	84	289	7	1	51	14	218	20692	22273	10364	11144	828
West	304c	2,5-3,5	-131	-52	-126	-116	-126	0,04	0	0,05	0,18	0,00	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	28	23	86	56	12	2584	7715	6067	12278	8352
	W01o	3-4	---	-79	-80	-70	-121	---	0,05	8,5	5,50	0,40	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	49	69	25	9	---	1555	379	17913	7806
	W02o	3-4	---	87	-68	-82	-122	---	0,12	2	1,25	0,84	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	229	109	41	14	---	2157	770	5187	7755
West	304m	6-7	-130	-57	-74	-108	-119	0,1	0,1	0,00	0,25	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	12	<0,5	1	<0,5	<0,5	2223	9071	9601	1881	13389
	W01m	5-6	---	-69	-180	-111	-117	---	0	0,1	0,00	0,07	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	24	28	24	19	---	7908	7927	4025	8296
	W02m	5-6	---	-64	-47	-111	-108	---	0	6,1	0,55	0,07	---	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	---	49	81	88	53	---	3044	61	703	2013
West	402	13-14	---	131	-70	-157	-104	---	0,4	0,03	0,00	0,55	---	132	14	300	7	---	54	1298	286	4	---	22063	324	15429	1022

4.5 Moleculaire (DNA-) analyses

In tabel 4.5 zijn de resultaten van de moleculaire analyses opgenomen. De concentratie genkopieën bacteriën uit de groep *Dehalococcoides spp.* en genen *VcrA* en *BvcA* die coderen voor de VC-reductase afbraak de zijn over het algemeen zowel voor als na substraatinjectie vrij laag en de concentraties zijn tijdens beide monitoringsrondes hoger in de oostelijke dan in de westelijke vlek. Dit blijkt ook uit de gegevens van het vooronderzoek. Hieronder worden de analyseresultaten per deellocatie besproken.

4.5.1 Oostelijke vlek

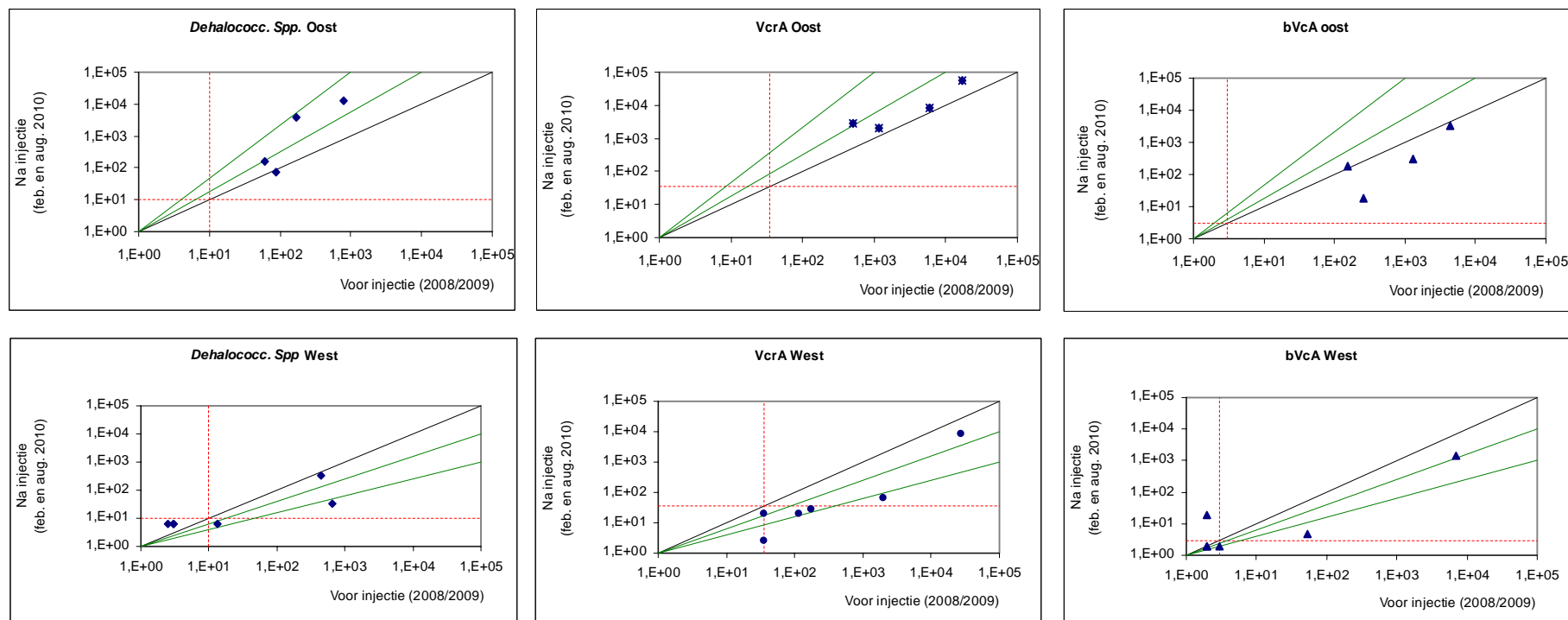
De concentratie *VcrA*-genen is in de oostelijke vlek over het algemeen voldoende voor afbraak. Genen die coderen voor de aanwezige *Dehalococcoides spp.*, en *bvcA* zijn lager maar mogelijk voldoende. Op één uitzondering voor *Dehalococcoides spp.* na, zijn de concentraties genen *Dehalococcoides spp.* en *VcrA* toegenomen na de injectie (zie figuur 4.6). De hoogste concentraties zijn aangetoond bij peilbuis 303d.

Tabel 4.5 Resultaten moleculaire analyses (DNA).

Sublocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m mv)	<i>Dehalococcoides</i>				<i>VcrA</i>				<i>bVcA</i>			
			(genkopieën/ml)				(genkopieën/ml)				(genkopieën/ml)			
DATUM:			okt. 2008	dec. 2009	feb. 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec. 2009	feb. 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec. 2009	feb. 2010	aug. 2010
Oost 1	O8o	3-4												
	O9o	3-4												
	O10o	3-4												
Oost 2	O3o	3-4												
	206o O4o	2,1-3,1 3-4					9,08E+01				2,09E+01			
Oost 1	O7m	5-6												
	O6m	5-6												
	O5m	5-6												
Oost 2	206m	6-7		8,70E+01	5,76E+01	8,60E+01	7,69E+02	1,55E+03	3,69E+03	5,18E+02	7,08E+01	4,48E+02	1,91E+01	1,82E+01
Oost 3	O1m	5-6												
	O2m	5-6												
	303m	6-7	4,76E+01	7,53E+01	1,02E+02	2,06E+02	5,85E+01	9,53E+02	3,94E+03	1,68E+03	1,76E+01	2,89E+02	2,21E+02	1,47E+02
Oost 2	206d	11-12		1,70E+02	4,64E+01	7,73E+03	1,90E+03	9,97E+03	4,89E+03	1,15E+04	7,43E+01	2,57E+03	2,83E+00	5,90E+02
	401	12-13												
Oost 3	303d	11-12		8,02E+02	5,40E+03	1,99E+04	6,49E+03	2,72E+04	7,94E+04	2,92E+04	1,71E+03	7,04E+03	3,86E+03	2,64E+03
West	304o	2,5-3,5		1,35E+01	<3	<10	2,44E+02	1,04E+02	<35	1,90E+01	3,83E+01	6,81E+01	<2	7,58E+00
	W01o	3-4		6,64E+02	<3	6,45E+01	2,03E+03	1,73E+01	1,11E+02			<2	<2	3,60E+01
	W02o	3-4		<3	<3	<10	<35	4,10E+00	<1			<2	<2	<2
	304m	5-6		2,46E+00	<3	<10	5,63E+00	2,25E+02	<35	4,05E+00	<3	<2	<2	<2
	W01m	5-6		4,47E+02	1,33E+02	5,43E+02	2,77E+04	1,47E+04	2,92E+03			7,08E+03	9,80E+02	1,82E+03
	W02m	5-6		<3	<3	<10		<35	3,59E+01	2,74E+00		<2	<2	<2
	402	13-14												

4.5.2 Westelijke vlek

In de westelijke vlek zijn, overal waar tijdens de nulsituatie concentraties genkopieën boven de detectielimiet werden aangetoond, de concentraties *Dehalococcoides spp.*-genen en *vcrA* en *bvcA* genen afgenomen na de substraatinjectie. Zowel voor als na injectie met protamylase zijn ter plaatse van peilbuis W01m voldoende hoge aantallen (≥ 1.000 genkopieën/ml) bacteriën en enzymen genen aanwezig voor succesvolle afbraak van de verontreiniging. Direct na de injectie waren de concentraties hier verlaagd, maar tussen ronde 1 en 3 zijn de aantallen *Dehalococcoides spp.*-genen en *bvcA* genen weer toegenomen. In de overige monsters bedragen genen voor *Dehalococcoides spp.*, *VcrA* en *bvcA* minder dan 1.000 genkopieën/ml. Bij peilbuizen W02o, 304m en W02m worden na injectie voor *Dehalococcoides spp.* en *bvcA* geen waarden boven de detectielimiet gemeten. Ook voor de injectie bedroegen de waarden al lager dan of ongeveer gelijk aan de detectielimiet. Het enzym *vcrA* is wel in verschillende van deze monsters aangetoond na de injectie van het substraat, maar in zeer lage aantallen.



Figuur 4.3 Gemiddelde concentratie genkopieën voor en na injectie. De rode stippellijnen geven de detectielimiet aan. De diagonale zwarte lijn geeft een verhouding 1:1 aan. De groene lijnen daarnaast geven de verhouding 1:10 en 1:100 aan.

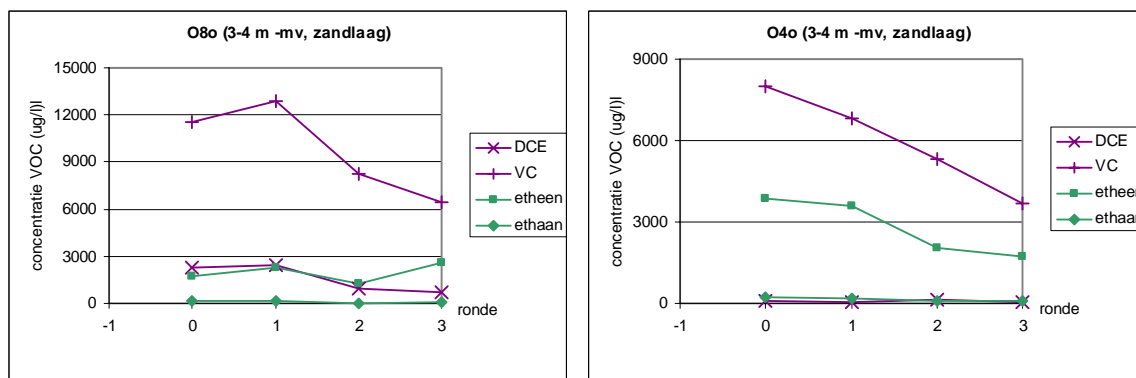
4.6 Verontreiniging en afbraak

Indien een verlaging van de concentratie VOCl-componenten wordt waargenomen, kan dit het gevolg zijn van afbraak. Een verschuiving van uitgangspullen naar afbraakproducten is een aanwijzing dat reductieve dechlorering plaatsvindt (dechlorering neemt toe). De concentratie van afbraakproducten kan tijdelijk toenemen omdat deze gevormd worden door afbraak van de hoger gechloroerde verbinding. In bijlage D zijn alle data opgenomen.

4.6.1 Oostelijke vlek

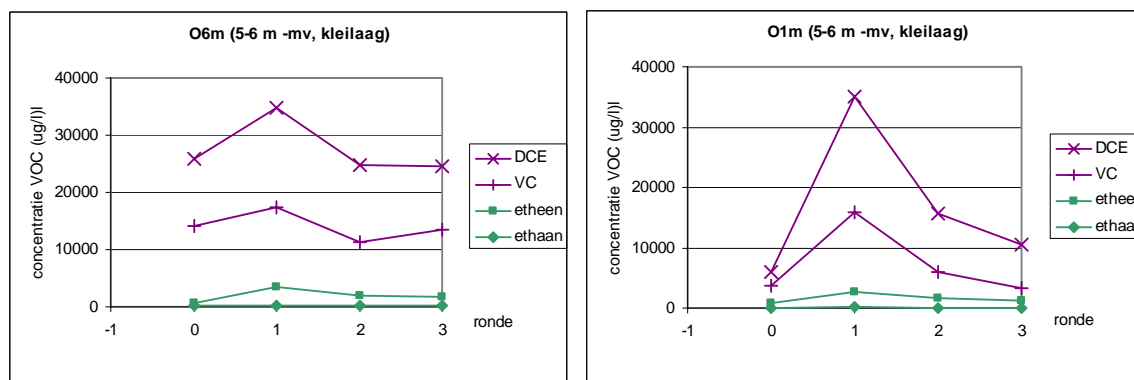
Uit het vooronderzoek is al gebleken dat sinds halverwege de jaren '90 nauwelijks PER en TRI zijn aangetoond. Ter plaatse van de monitoringspeilbuizen in de deklaag zijn tijdens het vooronderzoek en deze pilot geen PER en TRI aangetoond. De verontreiniging bestaat uit DCE en VC. Uit het huidige onderzoek blijkt dat op korte afstand de concentraties VC en DCE sterk kunnen variëren.

In de ondiepe zandlaag (3-4 m -mv) bij sublocaties Oost 1 en Oost 2 zijn de concentraties DCE en VC na injectie met protamylasse afgenomen. In de helft van de gevallen gaat de daling gepaard met een verlaging van de verhouding tussen DCE en VC met de tijd (zoals bijvoorbeeld bij O8o); dit is een aanwijzing voor reductieve dechlorering van DCE. Er is over het algemeen geen verschuiving van VC naar etheen te zien doordat ook de concentratie etheen en ethaan afneemt. Toch bijvoorbeeld wordt bij O8o tussen ronde 2 en 3 een stijging van de concentratie etheen waargenomen. Mogelijk is dit toch een aanwijzing voor afbraak van VC.



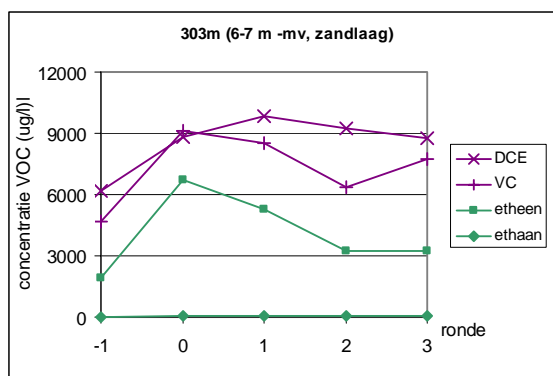
Figuur 4.4 Voorbeelden van het concentratieverloop als functie van de tijd in de ondiepe zandlaag bij Oost1 en Oost2. -1: vooronderzoek; 0: nulsituatie; 1: circa 12 dagen na injectie; 2: circa 3 maanden na injectie; 3: circa 6 maanden na injectie.

De hoogste concentraties VOCl zijn aangetoond in de kleilaag bij deellocaties Oost 3 en Oost 1 (peilbuizen op 5-6 m -mv). Hier worden DCE en VC aangetroffen in concentraties met een ordegrrootte van maximaal tienduizenden ug/l. Twaalf dagen na injectie is een piek te zien in de concentratie DCE en VC. Daarna nemen beide componenten weer af, evenals etheen en ethaan (zie voorbeelden in figuur 4.5). Er is geen verschuiving van uitgangspullen naar afbraakproducten te zien.



Figuur 4.5 Voorbeelden van het concentratieverloop als functie van de tijd bij middeldiepe peilbuizen bij Oost3 en Oost1. -1: vooronderzoek; 0: nulsituatie; 1: circa 12 dagen na injectie; 2: circa 3 maanden na injectie; 3: circa 6 maanden na injectie.

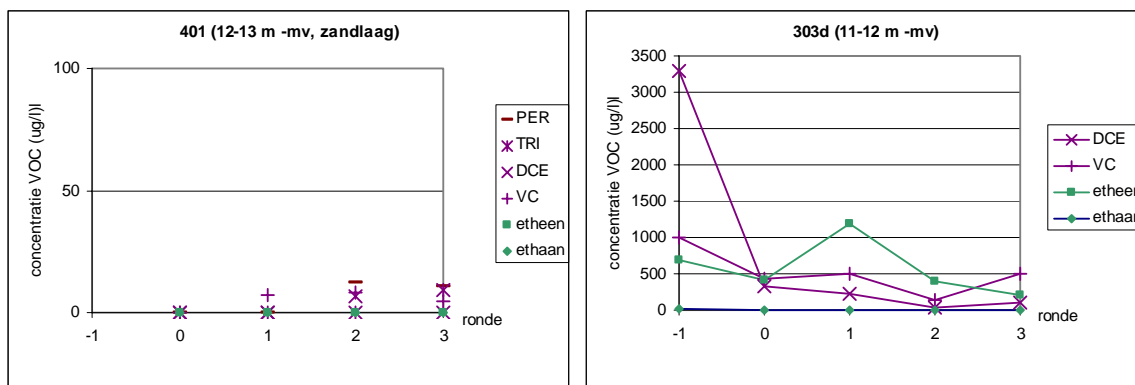
Bij peilbuis 303m (6-7 m -mv; zandlaag) daalt de concentratie DCE en VC (zie figuur 4.6). Omdat de verhouding DCE/VC niet afneemt en ook de concentratie etheen en ethaan afneemt, wordt vermoed dat de verlaging van VOCl niet het gevolg is van reductieve dechlorering.



-1: vooronderzoek;
0: nulsituatie;
1: circa 12 dagen na injectie;
2: circa 3 maanden na injectie;
3: circa 6 maanden na injectie.

Figuur 4.6 Voorbeelden van het concentratieverloop als functie van de tijd in het middeldiepe filter van Oost3.

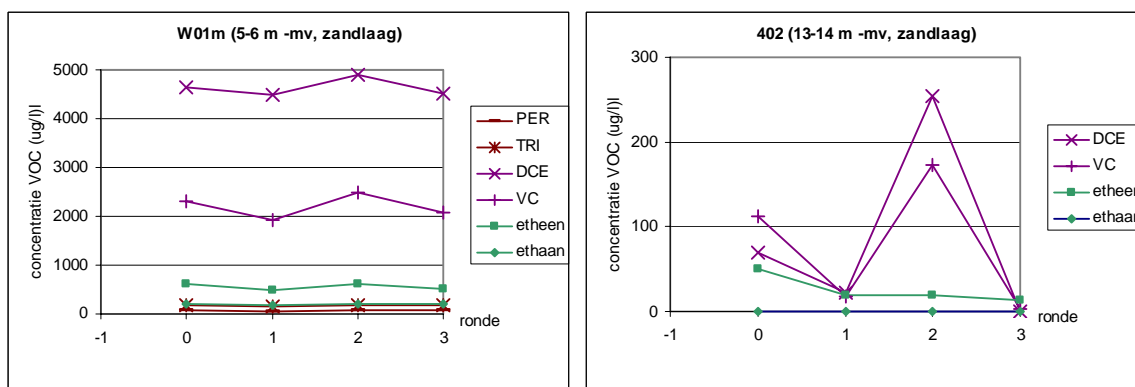
Ter plaatse van de diepere peilbuizen (onderzijde/direct beneden het behandelde traject) valt het volgende op. In de nulsituatie werden bij peilbuizen 401 (12-13 m -mv; zand) en 206d (11-12 m -mv; grondsoort onbekend) geen VOCl-verbindingen aangetoond. Na injectie zijn bij peilbuis 401 PER, TRI, DCE en VC tijdens een of meerdere rondes aangetoond in lage concentraties (respectievelijk maximaal 12, 9, 6 en 8 ug/l), zie figuur 4.7. Bij 206d zijn tijdens ronde 3 DCE en VC aangetoond (respectievelijk 5 en 7 ug/l). Ter plaatse van peilbuis 303d (11-12 m -mv, klei) was voorafgaand aan de injectie al sprake van een verontreiniging met DCE en VC. Na de injectie is DCE afgenomen en VC ongeveer gelijk gebleven; er is een verschuiving van DCE naar VC wat duidt op afbraak van DCE. Er wordt etheen aangetoond, wat een aanwijzing is dat afbraak van VC op enig moment heeft plaatsgevonden, maar de verhouding verandert niet. Afbraak van VC is hierdoor onzeker. Mogelijk was de opvallend hoge concentratie DCE en VC in 2008 het gevolg van de plaatsing van de peilbuis.



Figuur 4.7 Voorbeelden van het concentratieverloop als functie van de tijd in de diepere peilbuizen. -1: vooronderzoek; 0: nulsituatie; 1: circa 12 dagen na injectie; 2: circa 3 maanden na injectie; 3: circa 6 maanden na injectie.

4.6.2 Westelijke vlek

Tijdens deze pilot zijn bij peilbuis W01m (5-6 m -mv, zandlaag) tijdens alle monitoringsrondes PER en TRI aangetroffen in bijna constante concentraties van gemiddeld respectievelijk 173 en 70 ug/l. In de overige peilbuizen die in de monitoring van de proefsanering zijn opgenomen, zijn sinds 2009 geen PER en TRI aangetoond. De hoogste concentraties DCE en VC komen voor bij W01m en 402 (13-14 m -mv, zand). Er is bij W01m geen trend waarneembaar in de concentraties VOCl en etheen en ethaan (zie figuur 4.8). Mogelijk hangt de stijging van de concentratie DCE en VC bij peilbuis 402 tussen ronde 1 en 2 samen met de nitraatpiek, waardoor verontreiniging die van elders wordt aangevoerd niet wordt afgebroken of dit is het gevolg van verspreiding van bovenaf. In de westelijke vlek is één peilbuis in de kleilaag geplaatst: 304m. Ter plaatse van deze peilbuis zijn alleen tijdens ronde 1 DCE, VC en etheen aangetoond in concentraties van respectievelijk 7, 29 en 25 ug/l.



Figuur 4.8 Voorbeelden van het concentratieverloop als functie van de tijd in de westelijke vlek. -1: vooronderzoek; 0: nulsituatie; 1: circa 12 dagen na injectie; 2: circa 3 maanden na injectie; 3: circa 6 maanden na injectie.

5 Discussie

In paragraaf 5.1 en 5.2 wordt het bereik van de injecties op de onderzoekslocatie besproken. In paragraaf 5.3 wordt ingegaan op het effect van de injectie op afbraakcondities en afbraak van de verontreiniging. De gevolgen van de persluchtinjecties in de westelijke vlek zijn opgenomen in 5.4.

5.1 Effecten van injectie met protamylasse

Ter plaatse van peilbuis 402 (13 – 14 m -mv) in de westelijke vlek is visueel protamylasse waargenomen in de peilbuis. Het filter bevindt zich in een zandlaag en is gelegen tussen drie injectiepunten (I16-I18) waar tot 12 m -mv geïnjecteerd is. Het substraat is dus in de zandlaag vertikaal naar beneden verspreid.

Naast de visuele waarneming van protamylasse vallen een aantal veranderingen op bij deze peilbuis wanneer de omstandigheden voor injectie (ronde 0) worden vergeleken met na injectie (ronde 1, 2 en 3). Dit zijn indicatoren voor het bereik van het substraat.

Ten eerste is de geleidbaarheid (EC) verhoogd en de pH verlaagd. Deze effecten zijn bij andere peilbuizen in minder sterke vorm ook waargenomen. Zo is bij een aantal peilbuizen geen protamylasse gezien tijdens de bemonstering maar wel een verkleuring van het grondwater.

Tijdens het vooronderzoek bleek dat onvoldoende elektronendonor aanwezig was voor volledige afbraak van de verontreiniging. De toename van de concentratie DOC bij peilbuis 402 en een deel van de overige peilbuizen is het gevolg van de substraatinjecties.

Omdat niet bekend is welk deel van de aanwezige organische stof kan worden omgezet door bacteriën, om vervolgens als elektronendonor te kunnen dienen, zijn waterstofmetingen uitgevoerd. Circa 12 dagen na injectie (ronde 1) is de concentratie waterstof gestegen bij alle peilbuizen waar een meting verricht kon worden; ook bij de peilbuizen waar geen toename van de DOC-concentratie werd aangetoond tijdens ronde 1. Op één na zijn alle gemeten waarden hoger dan 5 nM. Hiermee blijkt de invloedsstraal van de injecties groter te zijn dan op basis van de DOC-concentraties verwacht wordt. Tijdens ronde 2 en ronde 3 zijn de hoge waterstofconcentraties weer sterk gedaald en laten de resultaten van de DOC-analyse in de oostelijke vlek juist een positiever beeld zien dan de waterstofconcentraties. Tijdens ronde 3 zijn de waterstofconcentraties over het algemeen niet sterk verhoogd, maar in de westelijke vlek en in de helft van de gevallen in de oostelijke vlek mogelijk voldoende voor volledige reductieve dechlorering van VOCl. Uit de waterstofconcentraties blijkt dat mogelijk voldoende organische stof aanwezig is. Waterstof kan ook zo snel worden verbruikt dat een lage evenwichtsconcentratie ontstaat.

Over het algemeen zijn de redoxomstandigheden sulfaatreducerend en is de sulfaatconcentratie een half jaar na de injecties gelijk aan of lager dan tijdens de nulsituatie. Dit wijst op gelijke of verbeterde redoxomstandigheden.

De redoxtoestand is plaatselijk (tijdelijk) verslechterd na de injectie met protamylasse. Zo is onder andere bij peilbuis 402, waar protamylasse werd waargenomen, een tijdelijke piek

aangetoond in de concentratie nitraat en sulfaat. Over het algemeen is de concentratie sulfaat vanaf ronde 2 of 3 weer gedaald tot een waarde die lager is dan in de nulsituatie. De plaatselijke (tijdelijke) verhoging van de nitraat- en sulfaatconcentraties is waarschijnlijk het gevolg van de protamylasse-injecties. Protamylasse-substraat bevat sulfaat (circa 18.000 mg/l) en in mindere mate nitraat (1.700 mg/l). Dit kan tot gevolg hebben dat de concentratie in grondwater aanvankelijk toeneemt als gevolg van de injecties. Aangezien het voor reductieve dechlorering juist noodzakelijk is om methanogene omstandigheden te creëren, moeten deze concentraties wel dalen. Dit is nog niet overal het geval.

5.2 Bereik van het substraat

In tabel 5.1 wordt per peilbuis samengevat of een effect verwacht wordt van de injectie met protamylasse op basis van verschillende aanwijzingen. Uit de tabel blijkt dat overal wel een aanwijzing wordt gevonden voor het bereik van de injectie. Iedere aanwijzing brengt echter onzekerheden met zich mee en het is vooral de combinatie van factoren die leidt tot een betrouwbaar beeld. In peilbuis 402 is protamylasse visueel waargenomen.

Een aantal peilbuizen vallen op in tabel 5.1 doordat veranderingen in alle parameters EC, pH, DOC-concentratie, waterstofconcentratie, redoxparameters (vooral nitraat en sulfaat) en eventueel ook verkleuring van het grondwater wijzen op de effecten van substraatinjectie. Het betreft O80, O90, O70, 303d en 402. Dit zijn ook de plaatsen waar de sterkste toename van de concentratie DOC wordt aangetoond.

Bij de volgende peilbuizen zijn aanwijzingen voor effect gevonden in de parameters DOC of waterstof en redoxparameters (vooral nitraat en sulfaatconcentratie): O100, 2060, O40, O1m, O2m, 303m, 3040, W020 en W02m. Bij de overige peilbuizen bestaat weinig zekerheid over het effect van de protamylassebehandeling omdat slechts één of enkele minder sterke indicatoren wijzen op het eventuele effect van de injectie.

Tabel 5.1 Per peilbuis wordt aangegeven of veranderingen in verschillende parameters duiden op een effect van de injectie (groene cellen). De effecten zijn voor alle parameters (m.u.v. kleur) waargenomen bij de donkergrijs gekleurde peilbuizen en minder duidelijk bij de lichtgrijze peilbuizen. De veranderingen zijn niet per se direct gunstig voor reductieve dechlorering.

Deellocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m mv)	Minimale afstand tot injectie (m)	Injectie volume (l)	kleur	EC	pH	DOC	H2	redox-parameters
Oost 1	O80	3-4	0,60	1690						
	O90	3-4	1,10	1690						
	O100	3-4	1,70	1690						
Oost 2	O30	3-4	2,10	765						
	2060	3-4	2,50	765						
	O40	3-4	2,30	765						
Oost 1	O7m	5-6	0,70	1045						
	O6m	5-6	1,30	1045						
	O5m	5-6	2,00	1045						
Oost 2	206m	6-7	2,20	765						
Oost 3	O1m	5-6	2,00	1180						
	O2m	5-6	2,50	1180						
	303m	6-7	2,30	1180						
Oost 2	206d	11-12	2,10	765						
	401	12-13	1,77	1010						
Oost 3	303d	11-12	2,70	1180						
West	3040	2,5-3,5	0,70	1080						
	W010	3-4	1,10	1080						
	W020	3-4	2,00	1080						
West	304m	6-7	0,30	1080						
	W01m	5-6	1,10	1080						
	W02m	5-6	2,00	1080						
West	402	13-14	1,20	1360						

Vergelijking van de tabel met de situatietekening wijst uit dat het effect van de injectie het sterkst is bij peilbuizen die vanuit meerdere richtingen door injectiepunten omsloten worden.

Ook 1 tot 2 meter beneden het behandelde gebied is protamylasse terecht gekomen. Deze verticale neerwaartse verspreiding is het gevolg van het hoge soortelijke gewicht van het substraat en werd ook op andere onderzoekslocaties waargenomen. Het plaatselijk injecteren vanaf dieper dan 4 m –mv lijkt geen effect te hebben op het bereik op 3 tot 4 m –mv. Vermoedelijk komt via het boorgat wel voldoende protamylasse in de bodem terecht.

Over het algemeen zijn er dicht bij de injectiepunten meer indicatoren die wijzen op invloed van de injectie dan verder weg. De peilbuizen waar sterke aanwijzingen zijn gevonden bevinden zich in de meeste gevallen op ongeveer 0,5 tot 1 meter vanaf het dichtstbijzijnde injectiepunt. Peilbuizen waar minder maar wel meerdere belangrijke indicatoren wijzen op effect van de substraatinjectie bevinden zich meestal op een afstand van 2 tot 2,5 meter vanaf het dichtstbijzijnde injectiepunt.

Peilbuizen waar geen sterke aanwijzingen zijn dat het substraat (witte cellen in tabel 5.1) deze heeft bereikt, bevinden zich voornamelijk langs de tuin, ten westen van het behandelde gebied in de oostelijke vlek.

5.3 Effect van injecties op condities en afbraak

Tussen een gesloten grid van injectiepunten zijn als gevolg van de directe injectie met protamylasse de omstandigheden voor reductieve afbraak over het algemeen verbeterd. De omstandigheden zijn echter over het algemeen nog niet goed genoeg. Vooral de concurrentie om elektronen met sulfaat en nitraat en plaatselijk de beperkte toename van elektronendonor is belemmerend voor vlotte, volledige afbraak. Aan de hand van de verhouding uitgangsubproducten en afbraakproducten kan in een aantal gevallen niet worden aangetoond dat dalende concentraties DCE en VC het gevolg zijn van reductieve dechlorering. Toch blijkt uit moleculaire analyses voor de oostelijke vlek, bijvoorbeeld voor 303m, wel een toename van *Dehalococcoides Spp.* genen en VC-reductase genen. In combinatie met de aanwezigheid van etheen wordt verwacht dat daar wel afbraak van VC naar etheen plaatsvindt.

In sommige gevallen, zoals bij O9o, is de hoeveelheid elektronendonor na injectie gunstig, maar een toename aan sulfaat of nitraat als gevolg van de injectie belemmert vlotte en volledige afbraak van VOCl tot etheen. Waarschijnlijk verbeteren de redoxcondities met de tijd als gevolg van omzetting van nitraat en sulfaat. Het is wel de vraag of dan nog voldoende substraat beschikbaar is voor afbraak van de verontreiniging, maar ook de concentratie DOC kan nog toenemen. De monitoringsperiode van een half jaar is te kort om dit te onderzoeken.

De omstandigheden zijn een half jaar na de injectie met protamylasse (ronde 3) wel verbeterd én gunstig voor reductieve afbraak ter plaatse van de peilbuizen O10o (3-4 m –mv) en 401 (12-13 m –mv). Op basis van de concentraties VOCl-verbindingen en etheen en ethaan wordt verwacht dat bij O10o afbraak van DCE plaatsvindt, maar VC-afbraak is onzeker. Er zijn geen DNA-analyses beschikbaar om hier uitsluitsel over te geven. Bij andere peilbuizen waar wel DNA-analyses zijn uitgevoerd is wel gebleken dat de activiteit van VC-reducerende bacteriën in de oostelijke vlek waarschijnlijk is toegenomen.

Er is beperkt of geen effect van de injectie op condities voor afbraak waargenomen ter plaatse van de peilbuizen aan de buitenrand van het behandelde gebied. Dit geldt voor de peilbuizen langs de tuin: sublocaties Oost 1-middendiep en Oost 2 (met uitzondering van peilbuis 401). Toch is de concentratie VOCl (DCE en VC) afgenomen. Er kan niet worden aangetoond dat dit het gevolg is van afbraak. Mogelijk is de daling in de concentraties VOCl plaatselijk het gevolg van verdunning na injectie of vinden andere afbraakprocessen dan reductieve dechlorering plaats.

In de westelijk vlek worden sinds 2009 (voor de injectie), met uitzondering van enkele tijdelijke lage waardes, alleen bij monitoringspeilbuizen Wo1m (5-6 m -mv) en 402 (13-14) VOCl-verbindingen aangetoond. De omstandigheden voor reductieve dechlorering zijn ter plaatse van peilbuis 402 verbeterd en gunstig ten aanzien van DOC en redoxtoestand. De waterstofconcentratie is een half jaar na injectie, ondanks de verhoogde DOC-concentratie, niet hoger dan daarvoor maar vermoedelijk hoog genoeg. De verbeterde omstandigheden hebben geleid tot een sterke afname van DCE en VC tot respectievelijk minder dan de detectielimiet en 3 ug/l tijdens ronde 3. In de ondiepe zandlaag, bij WO1m, zijn de omstandigheden niet verbeterd en is geen toename van de afbraak waargenomen. Dit wordt onderschreven door de moleculaire analyses.

5.4 Verspreiding

Om te onderzoeken of injecties hebben geleid tot verticale verspreiding van de verontreiniging is gekeken naar de VOCl-concentratie ter plaatse van peilbuizen 401 (12-13 m -mv) en 402 (13-14 m -mv). De filters van deze peilbuizen staan dieper dan de maximale injectiediepte (12 m -mv). Ter plaatse van beide peilbuizen is een piek in de concentraties waargenomen tijdens ronde 2. Bij peilbuis 401 in de oostelijke vlek werd voor de injectie geen verontreiniging aangetoond; na injectie zijn lage waardes gemeten. Vermoedelijk heeft de injectie tot enige verspreiding in verticale richting geleid. Tijdens vervolgmonitoring is het raadzaam om deze peilbuis te blijven monitoren. Bij peilbuis 402 in de westelijke vlek zijn tijdens ronde 3 de concentraties VOCl-verbindingen al gedaald tot onder of nabij de detectielimiet.

5.5 Effecten van persluchtshot in de westelijke vlek

De concentraties bacteriën en enzymen in de westelijke vlek, die al laag waren voor de substraatinjectie, zijn gedaald na substraatinjectie. Bij de meeste van deze peilbuizen zal de afname van *Dehalococcoides Spp.* en VC-reductase enzymen het gevolg zijn van het ontbreken van significante concentraties VOCl-verbindingen. De afname van *Dehalococcoides Spp.* en VC-reductase genen bij WO1m is mogelijk het gevolg van de toediening van perslucht. De concentraties zuurstof zijn hier echter niet verhoogd en andere redoxparameters wijzen ook niet op minder gereduceerde omstandigheden als gevolg van de injecties. Er zijn geen sterke aanwijzingen dat het substraat deze peilbuis beïnvloedt heeft; mogelijk geldt dat ook voor de persluchtinjecties. *Dehalococcoides Spp.* en CV-reductasen genen zijn overigens na een half jaar wel weer toegenomen ten opzichte van de situatie kort na de injectie (ronde 1).

Uit de injectievolumes blijkt niet dat als gevolg van de persluchtshots in de westelijke vlek meer substraat geïnjecteerd kan worden of een groter bereik is bewerkstelligd.

6 Conclusies en aanbevelingen

Op de locatie is een proefsanering uitgevoerd door BAM Milieu door middel van directe injecties met een shock-load protamylasse. Deltares heeft in het kader van deze HIP-pilot aanvullend onderzoek uitgevoerd. In paragraaf 6.1 worden conclusies getrokken over het bereik en de werking van het substraat op de onderzoekslocatie. In paragraaf 6.2 worden aanbevelingen gedaan voor het vervolg van de sanering op de onderzoekslocatie. De kennisvragen uit paragraaf 1.2 worden beantwoord in paragraaf 6.3.

6.1 Conclusies bereik injecties met protamylasse en effect op afbraak

Het bereik van de injecties lijkt vooral bepaald te worden door de combinatie van situering van injectiepunten, het volume substraat dat is geïnjecteerd en de dichtheid van het injectiegrid. Het effect van de injectie is het sterkst bij peilbuizen die vanuit meerdere richtingen door injectiepunten omsloten worden. Over het algemeen zijn er dichter bij de injectiepunten meer indicatoren die er op wijzen dat de substraatinjectie deze plaats heeft bereikt dan verder van de injectiepunten. De peilbuizen waar sterke aanwijzingen zijn gevonden dat deze binnen het injectiebereik liggen, bevinden zich in de meeste gevallen op ongeveer 0,5 tot 1 meter vanaf het dichtstbijzijnde injectiepunt. Peilbuizen waar minder maar wel meerdere belangrijke indicatoren wijzen op effect van de substraatinjectie bevinden zich meestal op een afstand van 2 tot 2,5 meter vanaf het dichtstbijzijnde injectiepunt. Puur protamylasse is aangetoond in één peilbuis, die dieper gelegen is dan de maximale injectiediepte. Hieruit blijkt dat het substraat tot minimaal 1 á 2 meter beneden het behandelde gebied naar beneden verspreid is. Dit is het gevolg van het hoge soortelijke gewicht van protamylasse.

Peilbuizen waarvoor geen sterke aanwijzingen zijn dat het substraat deze heeft bereikt, bevinden zich voornamelijk langs de tuin, ten westen van het behandelde gebied in de oostelijke vlek.

Uit de injectievolumes blijkt niet dat als gevolg van de persluchtshots meer volume geïnjecteerd kan worden of het bereik van de injectie groter is.

Tijdens het vooronderzoek bleek dat volledige afbraak van VOCl gelimiteerd was door een gebrek aan nutriënten en elektronendonor, een te hoge sulfaatconcentratie en te weinig bacteriën die de verontreiniging volledig kunnen omzetten.

Als gevolg van de directe injectie met protamylasse zijn de omstandigheden voor reductieve afbraak in de oostelijke vlek ter plaatse van de openbare weg over het algemeen verbeterd, maar op dit moment nog niet overal goed genoeg. Vooral de concurrentie om elektronen met sulfaat en nitraat en plaatselijk de beperkte toename van elektronendonor is belemmerend voor vlotte, volledige afbraak. Over het algemeen dalen de concentraties DCE en VC, in sommige gevallen na een tijdelijke piek, maar er is nog geen verschuiving te zien van de verhouding VC/etheen. Hogere VC-concentraties zijn wel gekoppeld aan hogere etheenconcentraties en het aantal *Dehalococcoides Spp.* genen en VcrA-genen is (licht) toegenomen. Op basis van deze onderzoeksresultaten verwachten wij dat plaatselijk VC in enige mate afbreekt, maar dat dit proces langzaam verloopt. De omstandigheden zullen mogelijk nog verbeteren als gevolg van voortdurende oplossing van protamylasse en een

daling van de nitraat- en sulfaatconcentraties op plaatsen waar de injectie tot een stijging heeft geleid. Tijdens de verdere sanering is het daarom raadzaam om dit verloop te monitoren.

De injecties hebben waarschijnlijk geleid tot enige mate van verspreiding naar beneden. Dit blijkt uit de concentratie VOCl bij twee diepere peilbuizen. Tijdens vervolgmonitoring is het raadzaam om deze peilbuizen te blijven monitoren. Bij de peilbuis in de oostelijke vlek zijn tijdens ronde 3 de concentraties VOCl-verbindingen al gedaald tot onder of nabij de detectielimiet.

Het effect van de persluchtinjecties in de westelijke vlek op de bacteriepopulatie is onzeker. Het beperkte aantal moleculaire analyses geeft hier een aanwijzing voor maar de andere onderzoeksresultaten kunnen de geconstateerde daling van de populatie niet verklaren. Eventuele effecten van persluchtshots zouden nader onderzocht kunnen worden.

6.2 Aanbevelingen voor de full-scale sanering op de onderzoekslocatie

De monitoringsperiode was (noodgedwongen) te kort om uitsluitsel te geven over de optimale dimensionering van de sanering op deze locatie. Vermoedelijk zullen de omstandigheden op de locatie nog verbeteren. Daarom adviseren wij om de monitoring met langere tussenpozen voort te zetten. Op basis van de resultaten kan besloten worden of aanpassing van het saneringsplan wenselijk is. Mogelijk is bijvoorbeeld een grid met een grotere dichtheid nodig.

Op basis van de monitoring tot en met een half jaar na de substraatinjecties worden alvast de volgende aanbevelingen gedaan:

- Van beneden naar boven injecteren;
- Een raster van injectiepunten aanleggen dat een groter veld beslaat dan het te saneren gebied;
- Protamylasse verspreidt naar beneden; eventueel kan na vervolgmonitoring besloten worden om minder diep, maar in een dichter raster te injecteren om een betere dekking te verkrijgen;
- Verspreiding richting dieper gelegen grondwater blijven monitoren;
- Persluchtshots hebben geen positief effect op het volume substraat dat geïnjecteerd kan worden of het bereik van het substraat terwijl het risico dat schade wordt toegebracht aan de (VC)-reducerende bacteriepopulatie niet kan worden uitgesloten. Wij adviseren daarom om beide aspecten nader te onderzoeken;
- Wij adviseren om tijdens de vervolgmonitoring o.a. op nitraat en sulfaat te blijven analyseren.

6.3 Beantwoording kennisvragen

1. Hoe kan een sanering met behulp van direct-push shock-load toediening van een elektronendonor worden gedimensioneerd voor toepassing in een heterogene bodem met een grillige afwisseling van lagen met uiteenlopende fysische en chemische eigenschappen?

Met deze pilot is op de onderzoekslocatie gedemonstreerd hoe de dimensionering tot stand is gekomen.

Ontwerp proefsanering op basis van ervaring

Op basis van ervaring van de aannemer is een ontwerp gemaakt met specificatie van het aantal injectiepunten, onderlinge afstand en te injecteren volume. Maatregelen ter optimalisatie van de injectie die mogelijk ook nadelige effecten op de sanering kunnen hebben (in dit geval persluchtshots) zijn getest op een deel van de proeflocatie.

Haalbaarheid technisch ontwerp

Tijdens de injectie is voor ieder injectiepunt per meter bijgehouden hoeveel substraat geïnjecteerd wordt. Alle injectiepunten en monitoringspeilbuizen zijn nauwkeurig ingemeten. Omdat bij de eerste injectie, die van boven naar beneden werd uitgevoerd, de injectievloeistof naar boven kwam, in plaats van zich te verspreiden in de bodem, is besloten om van beneden naar boven te injecteren. Er is gebleken dat het geplande volume in delen van het profiel niet overal geïnjecteerd kan worden.

Aan de hand van injectiegegevens is onderzocht of de aanvullende maatregel van persluchtinjecties het gewenste resultaat heeft (vergroting volume dat geïnjecteerd kan worden). Met behulp van moleculaire analyses is het eventuele schadelijke effect op de bacteriepopulatie onderzocht.

2. Hoe kan het bereik van de techniek worden vastgesteld en hoe wordt dit bereik beïnvloed door de heterogeniteit van de bodem?

Monitoren bereik en resultaat

Bij één peilbuis is visueel protamylase waargenomen. Bij andere peilbuizen zijn aanwijzingen voor het bereik van protamylase-injectie verkregen uit de volgende veranderingen ten opzichte van de nulsituatie:

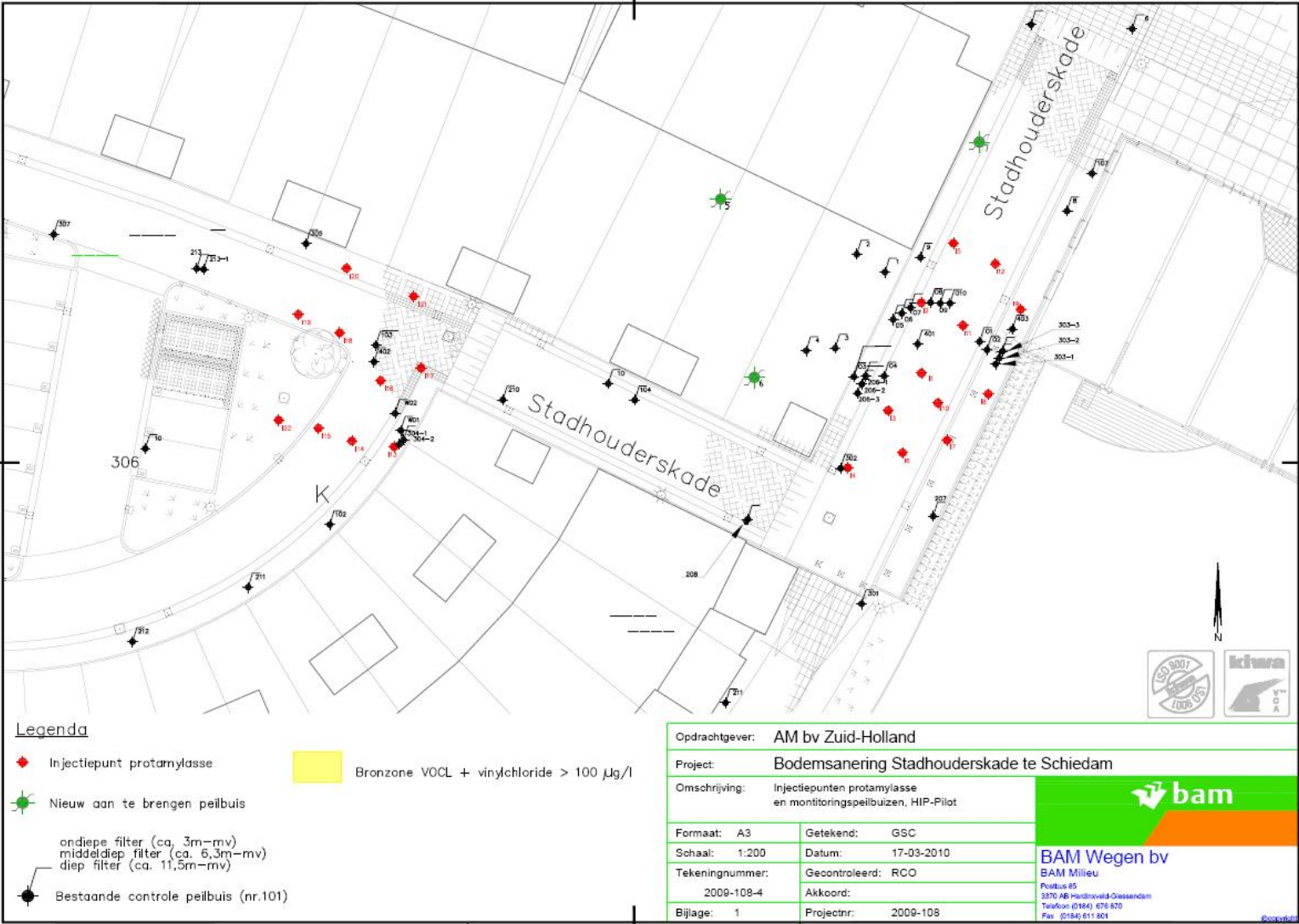
- Verhoging EC
- Verlaging pH
- Toename concentratie DOC
- Toename concentratie waterstof
- Afname nitraat en sulfaat concentratie of juist een (tijdelijke) verhoging
- Toename aantal genkopieën/ml *Dehalococcoides Spp.* en VC-reductase enzymen.

Iedere parameter kent onzekerheden; daarom is het belangrijk om naar een combinatie van parameters te kijken.

Het doel van de injecties is dat volledige afbraak van de VOCI-verontreiniging, die hier vooral uit DCE en VC bestaat, plaatsvindt. Het is de vraag of de veranderingen als gevolg van de substraatinjecties ook het gewenste effect hebben op de mogelijkheden voor reductieve dechlorering en daardoor leiden tot volledige afbraak. In dit kader zijn de parameters DOC, waterstof, redoxtoestand (eventueel nutriënten) en de bacteriepopulatie van belang omdat deze betrekking hebben op limiterende omstandigheden voor reductieve dechlorering van VOCI. Als gevolg van de aanwezigheid van sulfaat en nitraat in het substraat, kunnen de concentraties hiervan tijdelijk verhoogd zijn als gevolg van protamylase-injectie. Daarnaast kan de concentratie DOC tot wel enkele jaren na de injecties verhoogd blijven. Het is daarom raadzaam om de monitoring over minimaal een jaar uit te voeren in drie rondes.

Het bereik van het substraat wordt beïnvloed door het al dan niet insluiten van het te behandelen gebied met directe injecties en de dichtheid van het grid. Omdat protamylase een grote soortelijke massa heeft, verspreidt het gemakkelijker naar beneden dan in horizontale richting. Een injectiegrid met een grotere dichtheid is in een matig doorlatende, sterk heterogene bodem belangrijker dan injectie tot de te behandelen diepte.

A Overzichtstekening BAM Milieu



Opmerking: maatvoering is indicatief, voor de exacte afstand tussen peilbuizen en injectiepunten wordt verwezen naar bijlage 3.

Direct-push injectie van een shock-load dosering protamylasse in een matig doorlatende bodem - bereik en werking van het substraat

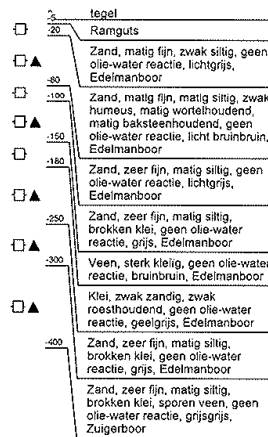
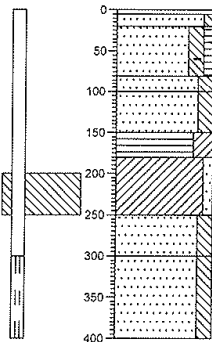
B Boorstaten VCMi



Boring: 01

X:
Y:
Datum: 4-11-2009
GWS: 200

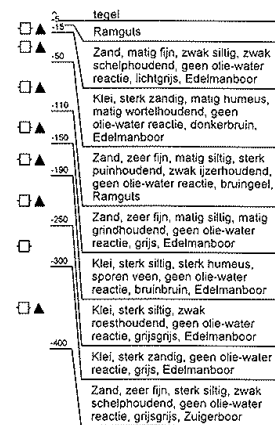
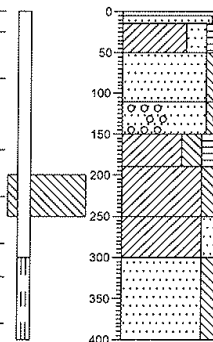
Opmerking:



Boring: 02

X:
Y:
Datum: 4-11-2009
GWS: 200

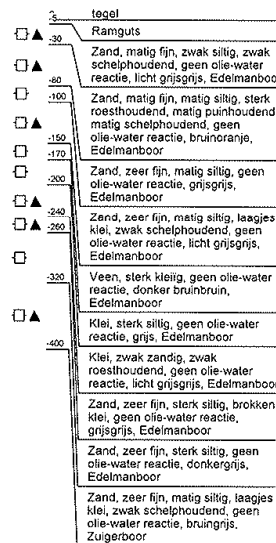
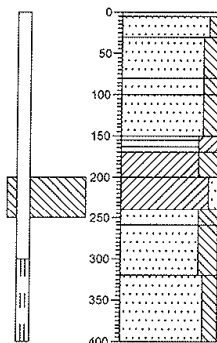
Opmerking:



Boring: 03

X:
Y:
Datum: 4-11-2009
GWS: 200

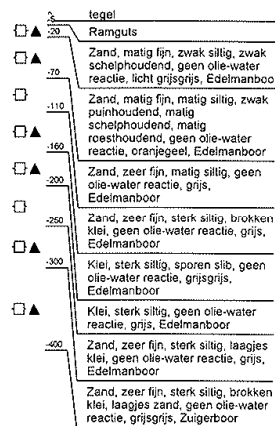
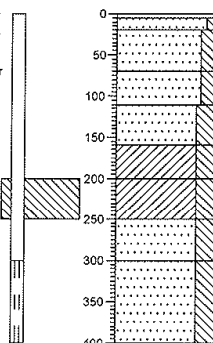
Opmerking:



Boring: 04

X:
Y:
Datum: 4-11-2009
GWS: 200

Opmerking:



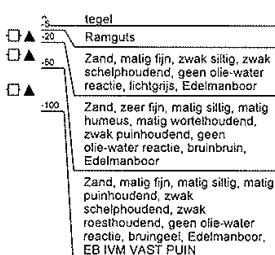
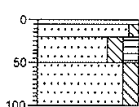
Opdrachtgever: Infrasoil BV
Projectcode: 01.09.782
Boormeester: S. Bonants



Boring: 04A

X:
Y:
Datum: 4-11-2009
GWS:

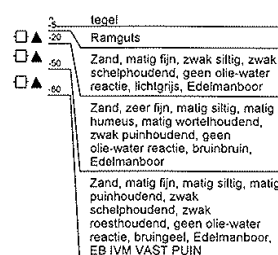
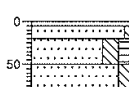
Opmerking:



Boring: 04B

X:
Y:
Datum: 4-11-2009
GWS:

Opmerking:





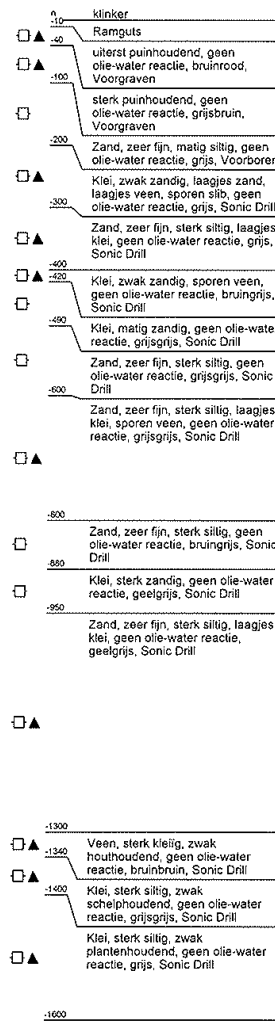
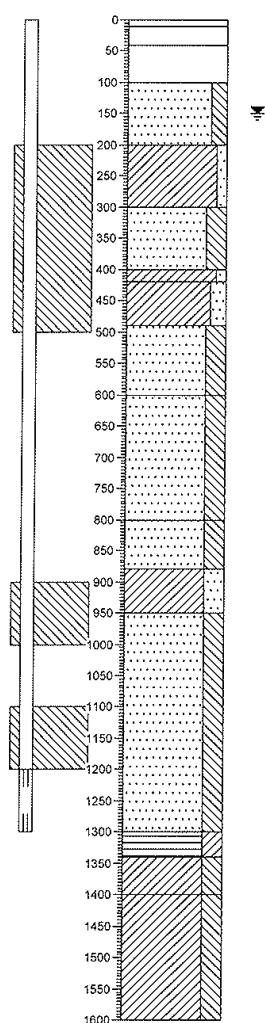
Boring: 401

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 150

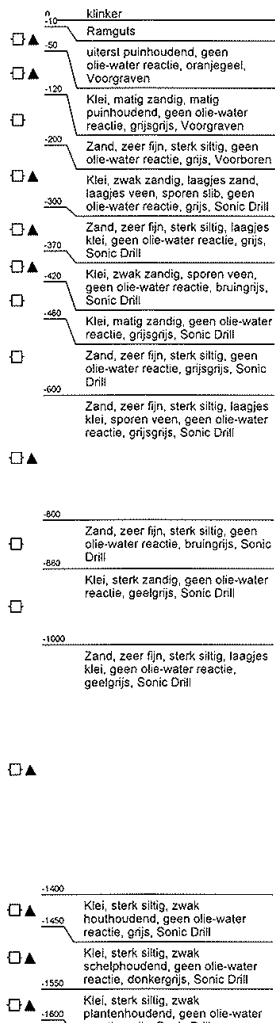
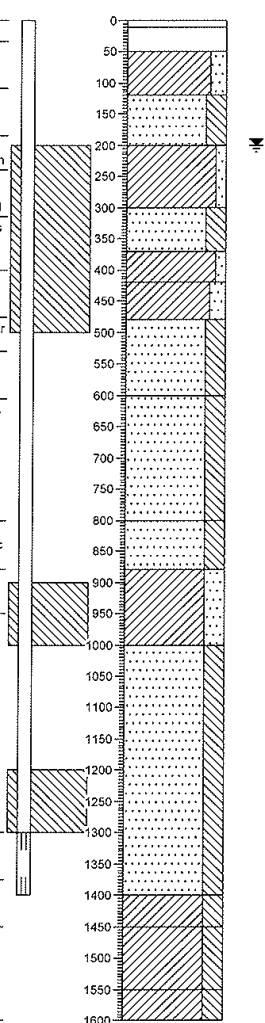
Boring: 402

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 200

Opmerking:



Opmerking:

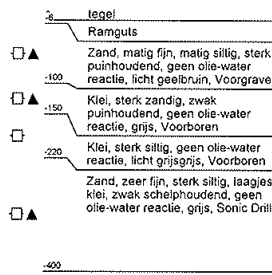
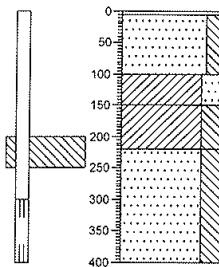




Boring: 403

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 200

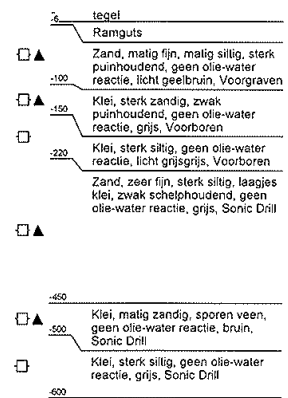
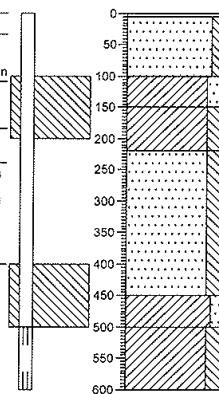
Opmerking:



Boring: 404

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 200

Opmerking:

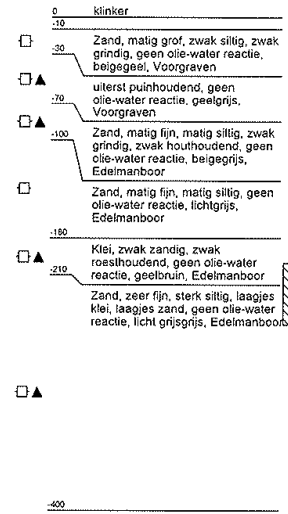
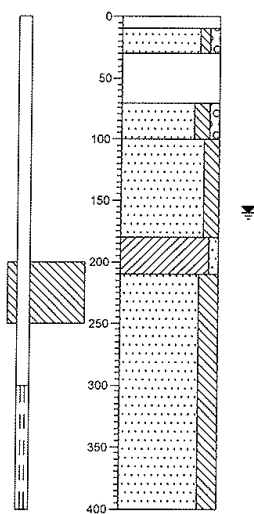




Boring: O100

X:
Y:
Datum: 28-10-2009
GWS: 160

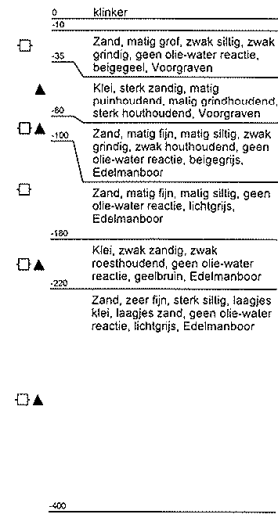
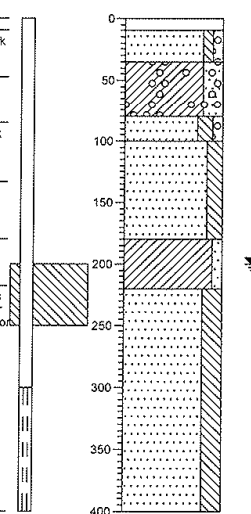
Opmerking:



Boring: O30

X:
Y:
Datum: 28-10-2009
GWS: 200

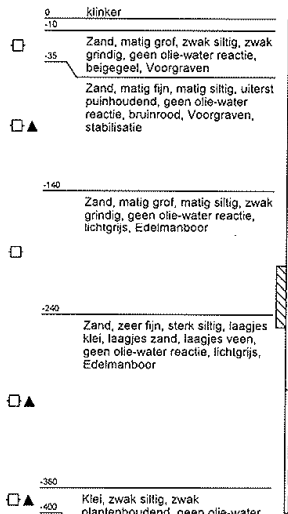
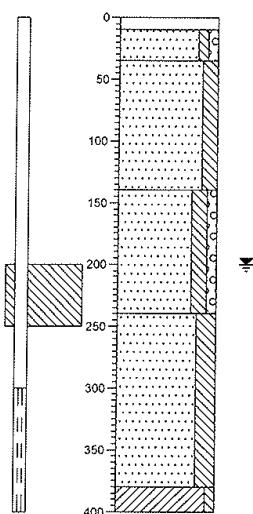
Opmerking:



Boring: O40

X:
Y:
Datum: 28-10-2009
GWS: 200

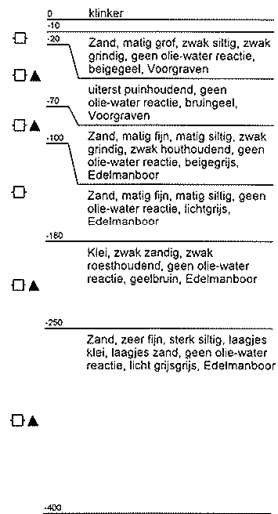
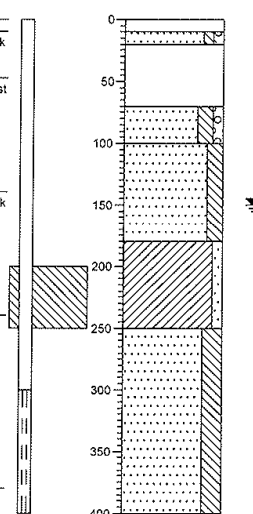
Opmerking:



Boring: O80

X:
Y:
Datum: 28-10-2009
GWS: 150

Opmerking:



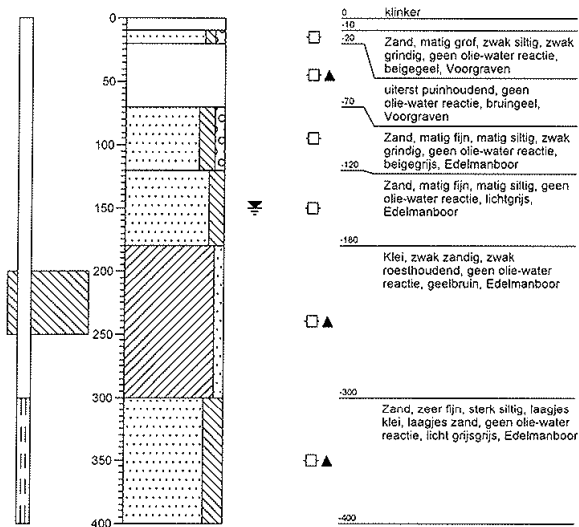
Opdrachtgever: Infrasoil BV
Projectcode: 01.09.782
Boormeester: S. Bonants



Boring: O90

X:
Y:
Datum: 28-10-2009
GWS: 150

Opmerking:

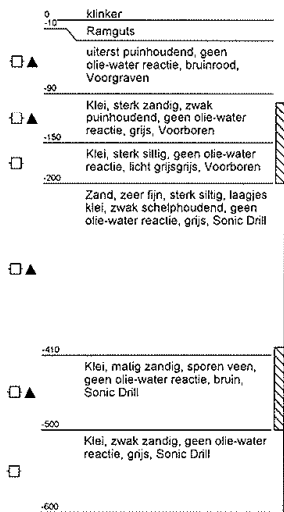
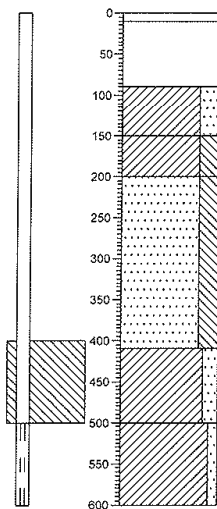




Boring: O1M

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 200

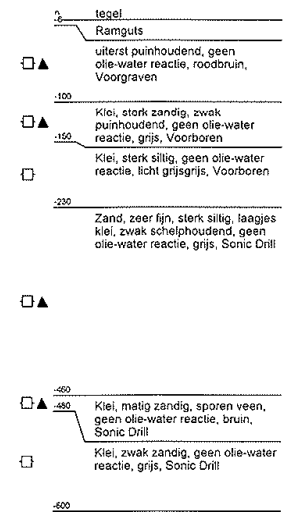
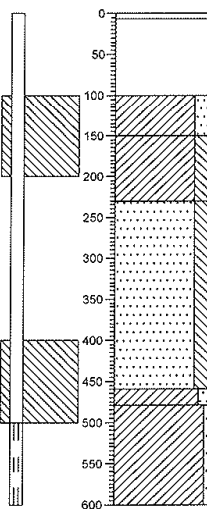
Opmerking:



Boring: O2M

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 180

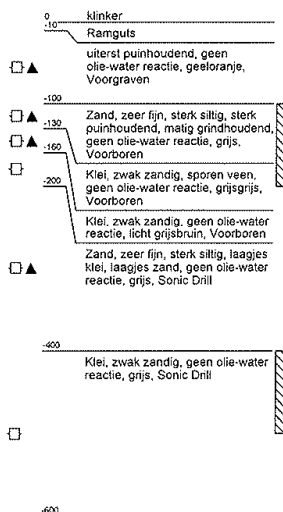
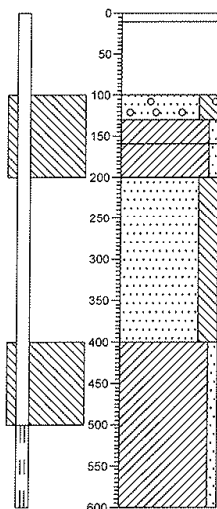
Opmerking:



Boring: O5M

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 100

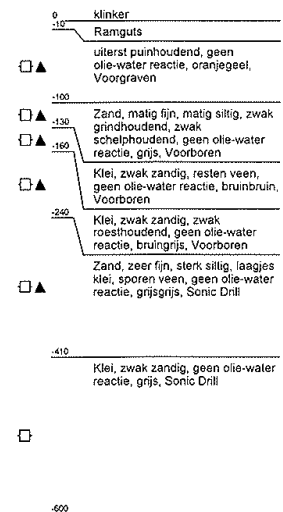
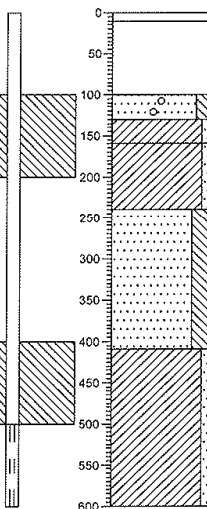
Opmerking:



Boring: O6M

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 150

Opmerking:



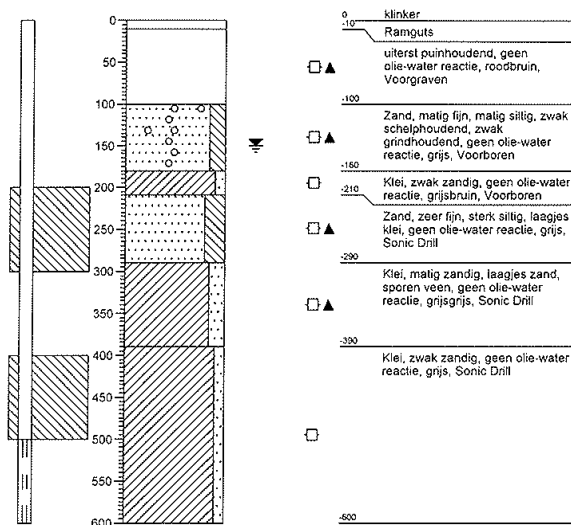
Opdrachtgever: Infrasoil BV
Projectcode: 01.09.782
Boormeester: S. Bonants



Boring: O7M

X:
Y:
Datum: 3-11-2009
GWS: 150

Opmerking:

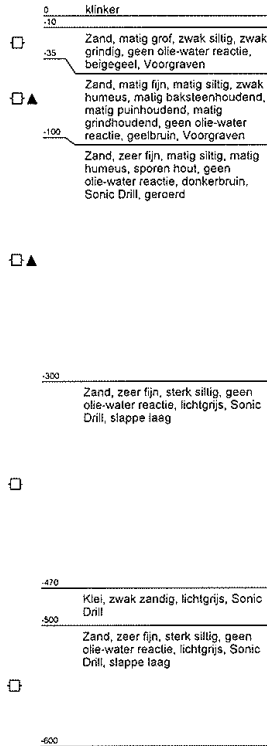
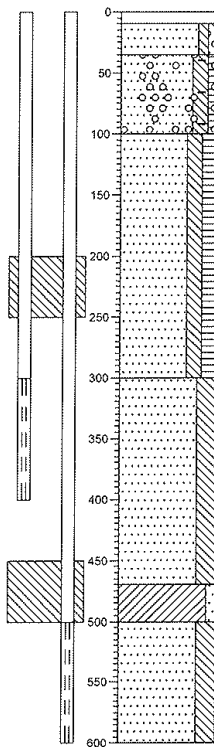




Boring: W01

X:
Y:
Datum: 28-10-2009
GWS: 250

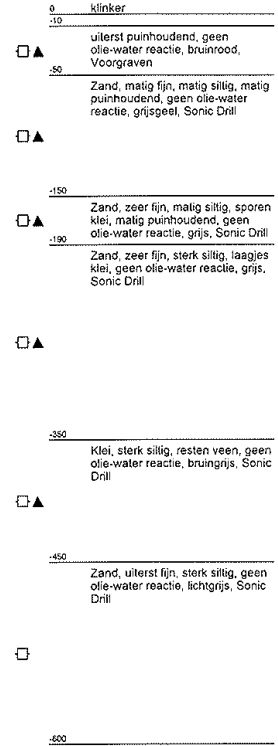
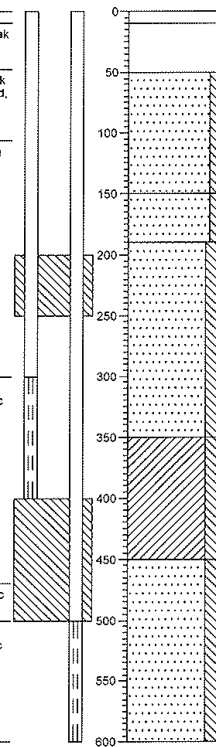
Opmerking:




Boring: W02

X:
Y:
Datum: 28-10-2009
GWS: 150


Opmerking:




C Injectiegegevens BAM Milieu

 infra	Grondwaterreiniging				NEN-EN-ISO 9001 / VCA**/BRL 7000				
	KAM-coördinator				Technische informatie / Locatiemap				
Januari 2010				Formuliernummer:					
Registratie formulier directpush									
projectnummer: 2009-108				spot: Westelijke vlek					
projectlocatie: Stadhouderskade, Schiedam				injectienummer: 1 t/m 9					
datum: 8 tot 11 februari 2010				toezichhouder: F. Stevens					
Diepte (cm)	Hoeveelheid (liter)								
cm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
perslucht	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee
Datum	2010-02-10	2010-02-09	2010-02-09	2010-02-10	2010-02-09	2010-02-11	2010-02-11	2010-02-10	2010-02-12
0									
100									
200	40	0	0	20	20	10	20	20	20
300	40	0	0	20	37	20	20	40	20
400	40	0	10	40	10	40	40	40	40
500	40	10	40	40	10	40	40	40	40
600	40	20	40	40	10	40	40	40	40
700	40	20	40	40	10	40	40	40	40
800	40	40	40	40	10	40	40	40	40
900	35	40	40	40	10	40	40	40	40
1000	40	40	40	40	47	40	40	40	40
1100	40	40	40	40	57	40	40	40	40
1200	40	40	40	40	37	40	40	40	40
1300									
1400									
1500									
1600									
1700									
1800									
1900									
Totaal	435	250	330	400	258	390	400	420	400
Opmerkingen									
<p>1). Injectie 5 was de eerste en is van boven naar beneden uitgevoerd, in het traject van 4 tot 9 m-mv kwam de injectie vloeistof naar boven, inplaats van zicht te verspreiden in de bodem, op basis hiervan is besloten om van beneden naar boven te injecteren</p> <p>2). Bij het injecteren boven de kleilaag, vanaf 4m-mv was het erg lastig de protamylasse in de bodem te krijgen. Doordat er een voorkeurstroming langs de boorstangen naar boven ontstond liep de protamylasse er aan de bovenzijde uit. Om dit te beperken is bij diverse injecties in de bovenste laag minder geïnjecteerd.</p> <p>3). De kop van de boorstelling kan maximaal een overdruk van 20 bar aan.</p> <p>4). Bij alle injecties is getracht maximaal 40 liter te injecteren tot een overdruk van maximaal 20 bar, dit heeft er in een aantal gevallen toegeleid dat de berekende hoeveelheid van 375 liter niet is behaald.</p> <p>5). De hoeveelheid is bepaald aan de hand van een schaalverdeling op de IBC, hierbij is bepaald dat 1 cm, 10 liter vloeistof is</p>									

Vervolg bijlage C

 bam infra	Grondwaterreiniging	NEN-EN-ISO 9001 / VCA**/BRL 7000							
	KAM-coördinator	Technische informatie / Locatiemap							
	Januari 2010	Formuliernummer:							
Registratie formulier directpush									
projectnummer: 2009-108		spot: Oostelijke en Westelijke vlek							
projectlocatie: Stadhouderskade, Schiedam		injectionnummer: 10 t/m 18							
datum: 8 tot 11 februari 2010		toezichthouder: F. Stevens							
Diepte (cm)	Hoeveelheid (liter)								
cm	10	11	12	13	14	15	16	17	18
perslucht	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Datum	2010-02-11	2010-02-12	2010-02-12	2010-02-15	2010-02-15	2010-02-15	2010-02-16	2010-02-16	2010-02-16
0									
100									
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	40	0	0	0	40	0	20	0	0
400	40	40	40	40	40	0	40	20	0
500	40	40	40	40	40	40	40	40	0
600	40	40	40	40	40	40	40	40	40
700	40	40	40	40	40	40	40	40	40
800	40	40	40	40	40	40	40	40	40
900	40	40	40	40	40	40	40	40	40
1000	40	40	40	40	40	40	40	40	40
1100	40	40	40	40	40	40	40	40	40
1200	40	40	40	40	40	40	40	40	40
1300									
1400									
1500									
1600									
1700									
1800									
1900									
Totaal	400	360	360	360	400	320	380	340	280
Opmerkingen									
6). Bij de injecties 13 t/m 22 is voorafgaand aan het injecteren een persluchtshot gegeven van ca. 35 bar, gedurende 20 seconden									

Vervolg bijlage C

 bam infra	Grondwaterreiniging	NEN-EN-ISO 9001 / VCA**/BRL 7000						
	KAM-coördinator Januari 2010	Technische informatie / Locatiemap						
		Formulernummer:						
Registratie formulier directpush								
projectnummer: 2009-108				spot: Westelijke vlek				
projectlocatie: Stadhouderskade, Schiedam				injectienummer: 19 t/m 27				
datum: 8 tot 11 februari 2010				toezichthouder: F. Stevens				
Diepte (cm)	Hoeveelheid (liter)							
cm	19	20	21	22				
perslucht	Ja	Ja	Ja	Ja				
Datum	2010-02-16	2010-02-17	2010-02-17	2010-02-12				
0								
100								
200	0	0	0	20				
300	0	0	0	20				
400	0	20	20	40				
500	0	20	20	40				
600	0	40	40	40				
700	0	40	40	40				
800	10	40	40	40				
900	10	40	40	40				
1000	10	40	40	40				
1100	10	40	40	40				
1200	20	40	40	40				
1300								
1400								
1500								
1600								
1700								
1800								
1900								
Totaal	60	320	320	400				
Opmerkingen								
7). Bij injectie 19 kon in het traject van 2 tot 7 m-mv geen protamylasse geïnjecteerd worden ondanks een overdruk van 35 bar, ook in de overige trajecten is de geïnjecteerde hoeveelheid beperkt.								

D Analyseresultaten VOCL, etheen en ethaan

Deellocatie	Peilbuis	Filterdiepte (m - mv)	ethaan (µg/l)					etheen (µg/l)					VC (µg/l)					Som DCE (cis+trans) (µg/l)					TCE (µg/l)					PCE (µg/l)					
			okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	
DATUM:			okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	okt. 2008	dec.2009	feb. 2010	mei 2010	aug. 2010	
Oost 1	O8o	3-4	---	147	124	35	56	---	1692	2313	1243	2614	---	11542	12911	8226	6415	---	2309	2409	930	669	---	<5	<5	<5	<5	<5	---	<5	<5	<5	<5
	O9o	3-4	---	56	54	51	33	---	743	1242	1244	1430	---	3011	4367	5206	4442	---	252	919	867	934	---	<5	<5	<5	<5	<5	---	<5	<5	<5	<5
	O10o	3-4	---	46	<15	<15	<15	---	383	86	106	96	---	3253	841	543	456	---	478	175	71	52	---	<5	<5	<5	<5	<5	---	<5	<5	<5	<5
Oost 2	O3o	3-4	---	122	151	67	185	---	1031	1388	488	1339	---	530	500	297	412	---	<5	11	<5	<5	---	<5	<5	<5	<5	---	<5	<5	<5	<5	
	206o	3-4	71	87	95	50	34	990	1014	1307	396	99	2887	2481	3058	1234	343	97	114	192	39	9	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Oost 1	O4o	3-4	---	208	166	105	83	---	3859	3579	2033	1728	---	8002	6802	5297	3669	---	83	54	144	60	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
	O7m	5-6	---	30	69	34	17	---	1013	2406	1435	1010	---	3777	4376	2962	1777	---	214	153	65	38	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
	O6m	5-6	---	196	257	141	123	---	644	3469	1947	1840	---	14024	17386	11225	13423	---	25943	34815	24861	24497	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
O5m	5-6	---	326	252	77	232	---	4381	3731	1341	3054	---	15875	16647	8662	15300	---	37453	32518	22386	40443	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Oost 2	206m	6-7	77	304	276	224	237	363	710	1097	886	802	235	183	54	45	61	8	<5	<5	<5	14	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Oost 3	O1m	5-6	---	37	113	59	46	---	848	2750	1637	1287	---	3715	15774	5992	3352	---	6012	34968	15768	10519	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	O2m	5-6	---	<15	112	34	39	---	2639	4776	1640	2292	---	6568	15219	16559	10484	---	2570	6687	9930	7755	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	303m	6-7	22	75	72	50	48	1918	6743	5295	3251	3255	4707	9112	8549	6357	7761	6179	8819	9830	9212	8789	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Oost 2	208d	11-12	<15	<15	<15	<15	<15	<14	<14	<14	<14	<14	<2,5	<2,5	<2,5	7	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
	401	12-13	---	<15	<15	<15	<15	---	<14	<14	<14	<14	---	<2,5	7	8	5	---	<5	<5	6	<5	---	<5	<5	<5	<5	9	---	<5	<5	12	11
Oost 3	303d	11-12	18	<15	<15	<15	<15	688	414	1186	395	203	1001	424	499	133	493	3301	331	218	33	107	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
West	304o	2,5-3,5	18	<15	33	26	31	<14	<14	<14	<14	<14	13	<2,5	4	<2,5	<2,5	100	<5	<5	<5	<5	7	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	W01o	3-4	---	<15	<15	20	88	---	<14	<14	<14	<14	---	<2,5	8	<2,5	<2,5	---	<5	12	<5	<5	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
West	W02o	3-4	---	86	40	54	65	---	<14	<14	<14	<14	---	<2,5	4	3	<2,5	---	<5	<5	<5	<5	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	304m	6-7	98	302	268	303	275	<14	<14	25	<14	<14	<2,5	<2,5	29	<2,5	<2,5	<5	<5	7	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	W01m	5-6	---	214	181	212	215	---	624	486	604	522	---	2298	1935	2500	2065	---	4635	4482	4903	4522	---	183	152	177	178	---	70	63	70	76	
W02m	5-6	---	147	<15	146	141	---	<14	<14	<14	<14	---	<2,5	3	<2,5	4	---	<5	<5	<5	9	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
West	402	13-14	---	<15	<15	<15	<15	---	51	20	20	14	---	112	18	173	3	---	69	22	254	<5	---	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5