


In situ gestimuleerde vastlegging van zware metalen in de Kempen

28 juni 2010

In situ gestimuleerde vastlegging van zware metalen in de Kempen

PT7105

Verantwoording

Titel	In situ gestimuleerde vastlegging van zware metalen in de Kempen
Opdrachtgever	Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem (SKB)
Projectleider	Thomas Keijzer
Auteur(s)	Karen de Roo en Jaap Steketee
Uitvoering veldwerk	Jos Richaerts, Marc Angenent, Nicky Bonants, Mark van Meeuwen
Projectnummer	0489655
Aantal pagina's	80 (exclusief bijlagen)
Datum	28 juni 2010
Handtekening	

Colofon

Tauw bv
afdeling Bodem
Handelskade 11
Postbus 133
7400 AC Deventer
Telefoon (0570) 69 99 11
Fax (0570) 69 96 66

Dit document is eigendom van de opdrachtgever en mag door hem worden gebruikt voor het doel waarvoor het is vervaardigd met inachtneming van de rechten die voortvloeien uit de wetgeving op het gebied van het intellectuele eigendom.

De auteursrechten van dit document blijven berusten bij Tauw. Kwaliteit en verbetering van product en proces hebben bij Tauw hoge prioriteit. Tauw hanteert daartoe een managementsysteem dat is gecertificeerd dan wel geaccrediteerd volgens:

- NEN-EN-ISO 9001
- VCA**-certificering voor veilig werken bij meet- en inspectieactiviteiten en bodemsaneringen, ook in risicogebieden railinfra
- Er zijn analyses uitgevoerd door het NEN-EN-ISO/IEC 17025 geaccrediteerde milieulaboratorium van AL-West
- Tauw bv is erkend voor het uitvoeren van veldwerk bij milieuhygiënisch bodemonderzoek conform de VKB-protocollen 2001, 2002, 2003 en 2018

Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL

Inhoud

Verantwoording en colofon	5
Informatieblad bij het project	9
1 Inleiding	13
1.1 Doelstelling	13
1.2 Deelresultaten	14
1.3 Leeswijzer	14
2 Locatie praktijkproef	19
3 Injectie- en monitoringsysteem praktijkproef	23
3.1 Ontwerp	23
3.2 Aanleg injectie- en monitoringsysteem	25
4 Bodemopbouw en nulsituatie	29
4.1 Bodemopbouw	29
4.1.1 Geologisch kader	29
4.1.2 Schematische bodemopbouw	29
4.2 Nulsituatie verontreiniging	31
4.2.1 Grondwatersamenstelling en heersende redoxcondities	33
4.2.2 Verontreinigingssituatie zink en cadmium	36
5 Laboratoriumexperimenten	43
5.1 Werkwijze	44
5.2 Resultaten	44
6 Substraatinjectie praktijkproef	53
6.1 Kengetallen praktijkproef op basis van laboratoriumexperimenten	53
6.2 Injectiewerkzaamheden	53
6.3 Controle metingen substraatinjectie	55
7 Resultaten en discussie praktijkproef	61
7.1 Verbruik van het substraat	61
7.2 Veranderingen in zuurgraad en redox-condities	62
7.3 Zink- en cadmiumconcentraties	65

7.4	Onderzoek grond.....	69
7.5	Kolomproeven vastlegging metalen	71
7.6	Discussie optredende processen tijdens de praktijkproef	74
8	Conclusies en aanbevelingen	79
8.1	Aanbevelingen.....	80

Bijlage(n)

1. Situering injectie- en monitoringsysteem op het NS-emplacement Budel-Schoot
2. Veld- en analysedata nulmeting
3. Veld- en analysedata eerste monitoringsronde
4. Veld- en analysedata tweede monitoringsronde
5. Veld- en analysedata derde monitoringsronde
6. Veld- en analysedata vierde monitoringsronde
7. Grafieken grondwater afkomstig uit injectoren 3000 en 3010
8. Grafieken grondwater op 1 m van injector 3010 (3006 en 3007)
9. Grafieken grondwater op 2 m van injector 3010 (3005)
10. Grafieken grondwater op 1 m van injector 3000 (3001, 3002 en 3003)
11. Grafieken grondwater op 2 m van injector 3000 (3004)
12. Veld- en analysedata referentiepeilbuis 3008

Informatieblad bij het project

Project

Item	Omschrijving
SKB-projectnummer	PT04.105-A / PT7105
Datum voorstel	5 april 2007
Titel	In situ gestimuleerde vastlegging van zware metalen uit grondwater middels ISMP in de Kempen
Verkorte titel	ISMP de Kempen
Tenderronde	-
Projectkosten	EUR 136.900,00
Startdatum project	1 juni 2007
Einddatum project	31 december 2010

Samenstelling consortium

Organisatie	Contactpersoon	Telefoonnummer	E-mailadres
<i>Penvoerder</i>			
Tauw bv	T.J.S. Keijzer	(0570) 69 97 17	Thomas.keijzer@tauw.nl
<i>Leden</i>			
Actief Bodembeheer de Kempen	T. Kamsma	(040) 232 92 92	tkamsma@abdk.nl
A&G Milieutechnieken	W. Boekholt	(0416) 34 40 44	willem.boekholt@aengbedrijven.nl
Wageningen Universiteit	E.J.M. Temminghoff	(0317) 48 23 57	Erwin.temminghoff@wur.nl

Samenvatting van het project

Op het NS-emplacement in Budel-Schoot heeft in het verleden ophoging van het maaiveld plaatsgevonden met behulp van zinkassen. Door uitloging van de zinkassen, is sprake van een bodemverontreiniging op deze locatie. Dit soort verontreiniging komt veelvuldig voor in de Brabantse en Belgische Kempen. Op de onderzoekslocatie zijn voornamelijk cadmium en zink aangetroffen in de bodem en het grondwater. Actief Bodembeheer De Kempen (AbdK) is geïnteresseerd in alternatieven om eventuele onaanvaardbare verspreiding van metalen in het grondwater te voorkomen. Dit omdat toepassing van conventionele technieken *zoals pump and treat* voor een gebied als De Kempen onrealistisch is. In Situ Metaal Precipitatie (ISMP) is een techniek waarbij door injectie van substraat mobiele metalen worden vastgelegd als metaalsulfiden.

Met de techniek kunnen meerdere zware metalen gelijktijdig geïmmobiliseerd worden. Doelstelling van het project is het bewijzen van het voorgestelde saneringsconcept en meer informatie verkrijgen over de stabiliteit van de gevormde metaalsulfiden. Uit de resultaten van de praktijkproef blijkt dat de zware metalen neer te slaan zijn. Hierbij nemen de grondwaterconcentraties van cadmium en zink af tot onder de beoogde saneringsdoelstelling. Tijdens de monitoringsperiode wordt echter geconstateerd dat met name in het ondiepe deel van de bodem remobilisatie optreedt. Dit wijst op een beperkte stabiliteit van de gevormde metaalsulfiden of het ontbreken van voldoende substraat om de redoxomstandigheden gunstig genoeg te houden voor sulfidevorming. Opmerkelijk genoeg resulteert de remobilisatie niet tot hoge zware metaal concentraties in het grondwater zoals gemeten voordat de praktijkproef startte. Dit wijst op andere processen zoals adsorptie aan, of incorporatie in ijzer- en aluminiumoxiden die worden gevormd wanneer de redoxomstandigheden gedurende de proef minder anaeroob worden.

Trefwoorden

Gecontroleerde trefwoorden	Vrije trefwoorden
Zware metalen	ISMP
In situ	Stabiele eindsituatie
Grondwater	
Immobilisatie	

Inleiding

1

Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL

1 Inleiding

In dit rapport is de eindrapportage van het project *In situ gestimuleerde vastlegging van zware metalen uit grondwater in de Kempen (PT7105)* opgenomen. Deze rapportage heeft betrekking op deelresultaat 5 zoals gedefinieerd in het projectplan P001-4472846JJS-beb-V02-NL d.d. 5 april 2007. In deze rapportage wordt voortgeborduurd op de eerdere resultaten van het project en de belangrijkste waarnemingen en conclusies van die eerdere deelresultaten zijn integraal verwerkt in deze rapportage. In dit hoofdstuk is voor de volledigheid een kort overzicht gegeven van de verschillende deelresultaten zoals deze aan SKB zijn gerapporteerd.

Op het NS-emplacement in Budel-Schoot heeft in het verleden ophoging van het maaiveld plaatsgevonden met behulp van zinkassen. Door uitloging van de zinkassen is sprake van een bodemverontreiniging op deze locatie. Dit soort verontreiniging komt veelvuldig voor in het gebied de Kempen. Op de onderzoekslocatie is voornamelijk cadmium en zink aangetroffen in grond en grondwater. Actief Bodembeheer de Kempen (ABdK) is geïnteresseerd in alternatieven om eventuele onaanvaardbare verspreiding van metalen in het grondwater te voorkomen. Dit omdat toepassing van conventionele saneringstechnieken zoals pump and treat voor een gebied als de Kempen onrealistisch is. In situ metaal precipitatie (ISMP) is een techniek waarbij door injectie van substraat mobiele metalen worden vastgelegd als metaalsulfiden. Met de techniek kunnen meerdere zware metalen gelijktijdig geïmmobiliseerd worden.

1.1 Doelstelling

De voor dit project gestelde doelstellingen, zoals eerder verwoord in het projectplan, zijn:

- **Demonstratie van de techniek ISMP** In het project dient te worden aangetoond dat het voorgestelde concept op de geselecteerde locatie effectief is voor meerdere zware metalen (cadmium en zink). De concentraties dienen ten minste worden teruggebracht tot achtergrondwaarden in het gebied, maar bij voorkeur tot de T waarden (voor deze demonstratie). Tevens dient te worden aangetoond dat de aanpak kosteneffectief is ten opzichte van klassieke methoden als pump and treat
- **Verdere ontwikkeling/optimalisatie van de techniek** De techniek wordt verder ontwikkeld en geoptimaliseerd door vast te stellen onder welke omstandigheden een zodanige sulfidenbuffer kan worden gecreëerd dat toekomstige emissies vanuit de bovengrond van zware metalen worden afgevangen. Hiervoor is het nodig om voldoende organisch substraat, sulfaat en/of ijzer in de bodem te brengen

- **Beoordelen en verifiëren van de stabiliteit van de gevormde metaalsulfides** De stabiliteit van de gevormde metaalsulfides wordt beoordeeld op basis van de tools die beschikbaar zijn in het Beslissings- Ondersteunend Systeem (BOS) vastlegging zware metalen (stabiliteitsindicator) en vindt plaats voor dosering aan substraat c.q. de verwachte vorming van sulfiden. Verificatie vindt plaats door monitoring van de grondwaterkwaliteit en de hoeveelheid en aard van de gevormde sulfiden
- **Vergroten van het draagvlak en kennisoverdracht** Door rapportages, een voordracht en een *on site* dag wordt de opgedane kennis gedeeld met het bevoegd gezag, zodat een betere beoordeling plaats kan vinden van de toepassingsmogelijkheden van ISMP en onzekerheden weggenomen kunnen worden

1.2 Deelresultaten

Gedurende de loop van het project is op een aantal vooraf vastgestelde momenten een tussenrapportage van de resultaten opgesteld. De deelresultaten betreffen:

1. Het projectplan, Tauw-rapport *Projectplan PT04.105-A In situ gestimuleerde vastlegging van zware metalen uit grondwater in de Kempen - Techniek, stabiliteit en bufferend vermogen*, kenmerk P001-442846JJS-beb-V02-NL d.d. 5 april 2007
2. Het vooronderzoek met betrekking tot het vaststellen van de locatie voor de praktijkproef, verwoord in de go/no go-notitie; Tauw-notitie *Go/No-Go verder onderzoek pilotlocatie ISMP Budel*, kenmerk N001-4472846MPM-cju-V01-NL d.d. 7 februari 2008. Het ontwerp van het injectie- en monitoringsysteem en de laboratorium experimenten, beide verwoord in de gezamenlijke deelrapportage van deel 2 en deel 3, zie Tauw-rapport *Deelresultaat 2 en 3 praktijkproef ISMP de Kempen (PT7105)*, kenmerk R001-4472846ORK-sbk-V02-NL d.d. 18 december 2008
3. De aanleg van het systeem en injectie van hulpstoffen (door A&G), eveneens verwoord in de gezamenlijke deelrapportage van deel 2 en deel 3
4. Rapportage van de monitoringsresultaten ongeveer halverwege de duur van de praktijkproef, de notitie omvat de resultaten tot en met de tweede monitoringsronde, zie Tauw-notitie *Deelresultaat 4 praktijkproef ISMP de Kempen (PT7105)*, kenmerk N003-4472846ORK-los-V01-NL d.d. 4 maart 2009
5. Eindrapportage (betreft onderhavig rapport) waarin in alle resultaten worden samengevat
6. Kennisoverdracht, naast standaardactiviteiten zoals rapportages is een *on-site* dag georganiseerd op 10 december 2009

1.3 Leeswijzer

De locatie van de praktijkproef is geselecteerd op basis van een aantal bodemonderzoeksrapporten naar de verontreinigingssituatie op het emplacement. In hoofdstuk 2 wordt kort een onderbouwing gegeven waarom voor deze locatie is gekozen en welke aanvullende zaken hiervoor onderzocht zijn.

In hoofdstuk 3 wordt het ontwerp van het injectie- en monitoringssysteem besproken in relatie tot de in het eerdere hoofdstuk geconstateerde hydrologische situatie. Ook wordt in hoofdstuk 3 de aanleg van het systeem beschreven. Op basis van de waarnemingen tijdens de aanleg wordt in hoofdstuk 4 een schets gegeven van de locale bodemopbouw en geologie. Ook wordt de nulsituatie van het bodem- en grondwatersysteem gegeven zoals vastgesteld vooraf aan de praktijkproef. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de laboratoriumproeven beschreven die zijn uitgevoerd op grond- en grondwatermonsters genomen tijdens de aanleg van het systeem. Op basis van deze gegevens zijn de concentraties te injecteren substraat bepaald. De injectiewerkzaamheden en de metingen tijdens de injectiewerkzaamheden zijn beschreven in hoofdstuk 6. Na de injectiewerkzaamheden is er gedurende een periode van anderhalf jaar gemonitord. De resultaten van deze monitoring, inclusief laboratoriumproeven die in die periode zijn gedaan aan genomen grondmonsters zijn beschreven in hoofdstuk 7. De generieke conclusies van het project zijn verwoord in hoofdstuk 8 evenals de aanbevelingen. In de verschillende bijlagen bij dit rapport zijn grafieken opgenomen met daarin de ruwe data in tabel- en grafiekvorm zoals geconstateerd tijdens de verschillende monitoringsronden in de verschillende peilbuizen.

Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL

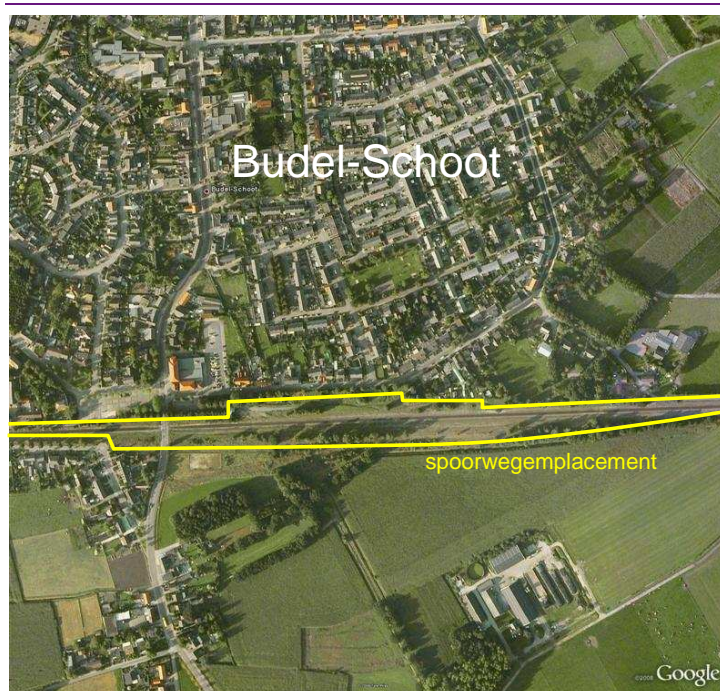
Locatie praktijkproef

2

2 Locatie praktijkproef

Ter bepaling van de locatie waar de praktijkproef het beste kon worden uitgevoerd heeft een vooronderzoek plaatsgevonden. Dit betrof activiteiten als een locatiebezoek, interpretatie van historische gegevens en een aanvullend bodemonderzoek.

Om te bepalen waar de praktijkproef het beste uitgevoerd kon worden zijn in het vooronderzoek vijf locaties op het NS-emplacement Budel geselecteerd en onderzocht op geschiktheid. Deze locaties zijn geselecteerd op basis van de verontreinigings situatie zoals deze is vast gesteld in het bodemonderzoeksrapport van Cauberg Huygen (kenmerk 2002.1188-8). Gezocht is naar de meest verontreinigde locaties basis van zinkgehalten in de grond en zinkconcentraties in het grondwater. Tijdens het locatiebezoek dat heeft plaatsgevonden op 23 augustus 2007 zijn de geselecteerde locaties bezocht. In figuur 2.1 is een luchtfoto gegeven van de ligging van het emplacement ten opzichte van Budel-Schoot.



Figuur 2.1 Globale ligging van de ligging van het spoorwegemplacement van Budel-Schoot.

Foto © Google, 2008

Op basis van het locatiebezoek en de historische gegevens is gekozen de locatie tussen kilometering 54,9 en 55,1 (zie figuur 2.2 voor ligging van proeflocatie) nader te onderzoeken door middel van een aanvullend grondwateronderzoek en waterpassing. Uit de resultaten blijkt dat vooral in het ondiepe grondwater sterk verhoogde concentraties aan zink worden aangetoond (zie N001-4472846MPM-cju-V01-NL). Over het algemeen ligt de zinkconcentratie in het grondwater aan de zuidzijde van de spoorlijn, tussen kilometering 54,9 en 55,1 tussen de 3.000 en 4.000 $\mu\text{g/l}$. De concentratie aan cadmium in het grondwater varieert sterk.



Figuur 2.2 Detailopname van het spoorwegemplacement Budel-Schoot met indicatief de ligging van de proeflocatie. Foto © Google, 2008

Injectie- en monitoringsysteem praktijkproef

3

3 Injectie- en monitoringsysteem praktijkproef

Het injectie- en monitoringsysteem dient ter verificatie, het verzamelen van aanvullende informatie en het volgen van de ISMP-praktijkproef. In het projectvoorstel was voorzien in een injectie- en monitoringsysteem op basis van een (deels) horizontaal gerichte grondwaterstroming waarbij met twee filterdiepten de praktijkproef gevolgd kan worden. Uit de waterpassing bleek echter dat de grondwaterstroming voornamelijk verticaal gericht is. Hierdoor is een ander soort ontwerp voor het monitoringsysteem opgesteld. Dit hoofdstuk beschrijft het ontwerp van het injectie- en monitoringsysteem en de aanleg hiervan.

Het bemonsteren van het monitoringsysteem tijdens de praktijkproef had tot doel:

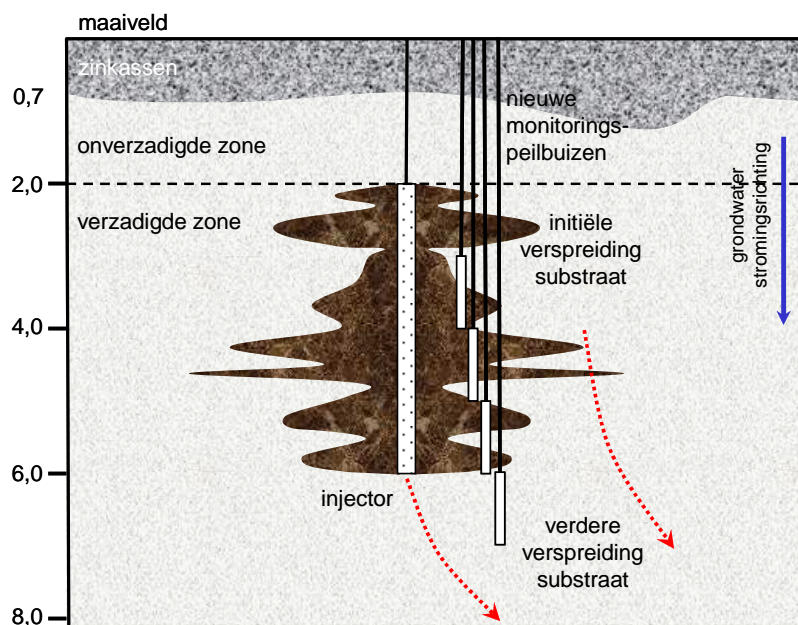
1. Vaststellen van de verspreiding van het substraat
2. Vaststellen van de effecten van de substraatinjectie
3. Bepalen van de stabiliteit van de effecten van de substraatinjectie
4. Bepalen van het bufferend vermogen voor (toekomstige) vastlegging van metalen en van de stabiliteit van dit vermogen

3.1 Ontwerp

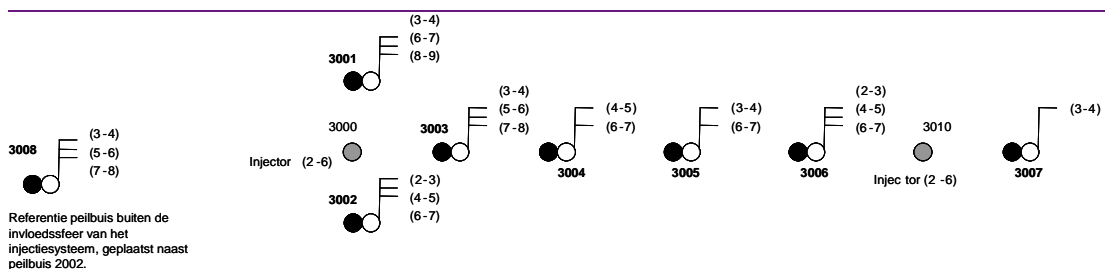
Doordat de grondwaterstroming voornamelijk verticaal gericht is, is de monitoring van de praktijkproef ook in verticale richting uitgevoerd. Op basis van de bodemopbouw (zie hoofdstuk 4), bepaald aan de hand van een intacte bodemkern tot 10 m -mv, is gekozen voor twee injectoren met een vier meter lang filter met een filterstelling van 2,0-6,0 m -mv. Zodat een filterbereik aanwezig is van iets boven de aanwezige kleiige laag, van circa 2,5-3,1 à 3,3 m -mv, tot in het meer zandige deel van het pakket onder deze kleiige laag. Onder de injectiefilters zijn, vanaf circa 7,3 m -mv, wederom afwisselend klei- en zandlaagjes aanwezig.

Wanneer wordt uitgegaan van een homogene en radiale verspreiding van het geïnjecteerde substraat rondom een injector, dan zal bij een verticale grondwaterstroming de laterale verspreiding met de diepte toenemen. In de praktijk zal verspreiding van het geïnjecteerde substraat niet geheel volgens dit theoretische model plaatsvinden, maar bestaat de kans op voorkeursstroming. Eventuele voorkeursstroming in horizontale richting kan worden opgevangen door ook op een afstand van twee en drie meter van de injector te monitoren. In figuur 3.1 (pagina 24) is een schematische weergave gegeven van verticale monitoring van het substraat na injectie.

Vervolgens is deze theoretische verspreiding van substraat vertaald naar een praktisch uitvoerbaar injectie- en monitoringsysteem op basis van twee injectoren, zodat de proef met twee verschillende substraatconcentratie kon wordt uitgevoerd. Het systeem is dusdanig opgezet dat het gehele bodemtraject van 2-7 (9) m -mv rondom elke injector kan worden gemonitord. In figuur 3.2 is een schematische weergave (bovenaanzicht) opgenomen van het injectie- en monitoringsysteem. De situering van het systeem ten opzichte van de overige peilbuizen op de locatie is weergegeven in bijlage 1.



Figuur 3.1 Schematische weergave van de verticale monitoring tijdens ISMP pilotsanering



Figuur 3.2 Schematische weergave (bovenaanzicht) van het injectie- en monitoringsysteem. In de tekening is bij de verschillende peilbuizen de filterstelling aangegeven

Het geplaatste injectie- en monitoringsysteem omvat, naast de twee injectoren (3000 en 3010), zeventien filters op verschillende dieptes verdeelt over de peilbuizen 3001 tot en met 3007. De zeven peilbuizen en de twee injectoren hebben een onderlinge afstand van circa 1 m. Tevens is een referentiepeilbuis (3008), met drie filters buiten de invloedssfeer van de injectoren geplaatst op circa 30 m ten westen van injector 3000.

Zoals in figuur 3.2 (pagina 24) te zien is, is rond injector 3000 het complete bodemtraject van 2,0-9,0 m -mv van filters voorzien. Rondom injector 3010 is, na karakterisering van de bodemopbouw, het bodemtraject van 2,0 tot 7,0 m -mv van filters voorzien. Hiervoor is gekozen omdat vanaf een diepte van circa 7,3 m -mv kleiige laagjes voorkomen die mogelijk een horizontale voorkeursstroming kunnen veroorzaken.

3.2 Aanleg injectie- en monitoringsysteem

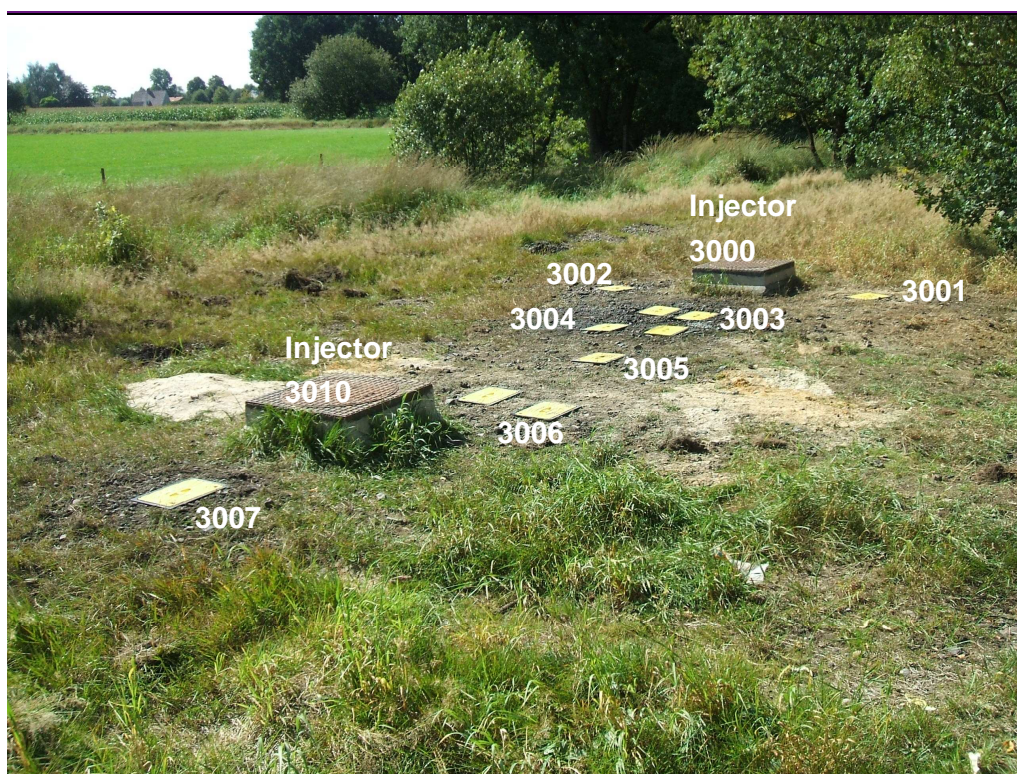
De aanleg van het injectie- en monitoringsysteem heeft in verschillende fases plaatsgevonden:

- Fase 1 van de aanleg van het monitoringsysteem -24, 25 en 28 april 2008- bestond uit het plaatsen van de peilbuizen 3001, 3002, 3003 en 3008. Tevens is tijdens deze fase een volledige bodemkern tot 10 m -mv gestoken ten behoeve van karakterisatie van de bodemopbouw ter plaatse (circa 0,5 m naast de beoogde locatie van injectiefilter 3000). Tijdens het plaatsen van de peilbuizen is het opgeboorde materiaal tevens per halve m bemonsterd. Deze grondmonsters zijn deels gebruikt voor het creëren van mengmonsters voor chemische analyses en deels gebruikt in de laboratoriumexperimenten (zie hoofdstuk 5)
- Na deze fase zijn de twee injectoren geïnstalleerd. Deze zijn op 8 mei 2008 door A&G Milieutechniek geplaatst. De injectoren hebben de nummers 3000 en 3010
- Op 23 juni 2008 zijn de resterende peilbuizen, 3004, 3005, 3006 en 3007 geplaatst

In totaal is er een injectie- en monitoringsysteem geplaatst dat bestaat uit 20 monitoringsfilters en twee injectiefilters. In figuur 3.3 (pagina 26) is een detailfoto te zien van één van de injectoren. Het gehele injectie- en monitoringsysteem is weergegeven op de foto in figuur 3.4. Tijdens het bemonsteren van het grondwater tijdens de nulmeting en ook later tijdens de eerste injectieronde bleek dat enkele filters waren vernield en niet meer bruikbaar. Na aanleiding van dit vandalisme is besloten om voor het injectie- en monitoringsysteem een andere wijze van afwerking van de peilbuizen te kiezen, brandkraanstraatpot in plaats van beschermkokers. Figuur 3.4 (pagina 26) toont het systeem nadat de herstelwerkzaamheden waren uitgevoerd. Als gevolg van vandalisme is gedurende het project ook een aantal peilbuizen herplaatst. Hierbij is steeds eenzelfde filterstelling gehanteerd en het omstortingsmateriaal zo veel mogelijk verwijderd om een optimaal beeld te krijgen van de processen die zich afspelen in het grondwater.



Figuur 3.3 Detailfoto van injector 3000



Figuur 3.4 Het injectie- en monitoringssysteem op 10 september 2008 nadat de herstelwerkzaamheden waren uitgevoerd. De foto is genomen vanuit het noordoosten, niet zichtbaar is referentiepeilbuis 3008. Vergelijk ook met de lay-out van het systeem in figuur 3.2, de nummering van de injectoren en de monitoringspeilbuizen is in de foto weergegeven

Bodemopbouw en nulsituatie

4

4 Bodemopbouw en nulsituatie

Tijdens de verschillende momenten van veldwerkzaamheden die zijn uitgevoerd gedurende het project is naast verschillende bodemprofielen ook een complete gestoken boorkern, een zogenaamde *liner* genomen. In dit hoofdstuk is een interpretatie gegeven van de bodemopbouw van het gebied waar de praktijkproef is uitgevoerd. Kennis met betrekking tot de bodemopbouw geeft inzicht in de heterogeniteit van de bodem en de invloed die dit heeft op de verspreiding van het geïnjecteerde substraat. Vervolgens wordt de nulsituatie van de grond- en grondwaterkwaliteit voor aanvang van de praktijkproef behandeld waarbij wordt geschetst welke geochemische condities er van nature heersen.

4.1 Bodemopbouw

4.1.1 Geologisch kader

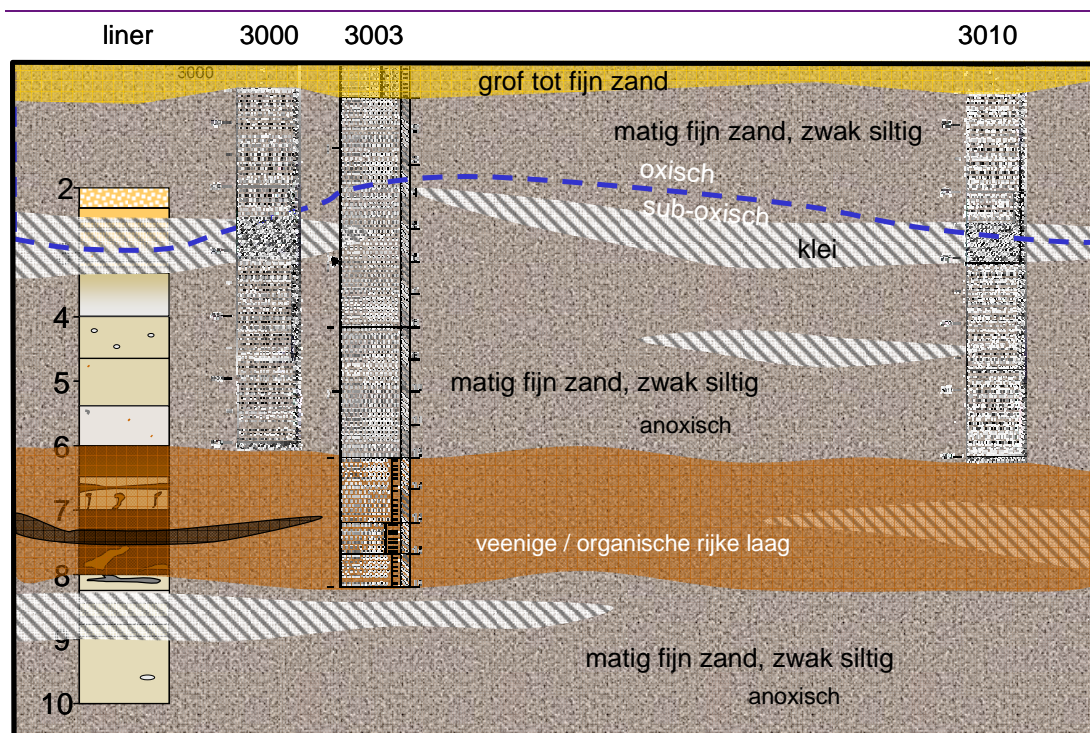
Tijdens de laatste twee ijstijden (Weiseliën & Saaliën) vindt sterke erosie plaats in de Belgische en Nederlandse Kempen. Er worden fluvioperiglaciale sedimenten afgezet, enerzijds wordt leem afgezet in dooimeren en gedurende de zomer wanneer veel smeltwater vrij komt verspoelen eerdere dekzand- en rivierafzettingen. In het systeem van verwilderde geulen en geultjes ontstaan echter ook nieuwe, sterk heterogene gelaagde zand afzettingen met ingesloten leemlagen en/of planten- en houtresten. Aan het eind van de laatste ijstijd veranderde het klimaat. Het wordt een stuk milder en het systeem van ondiepe verwilderde geulen veranderd in meanderende beken. Riviertjes als de Dommel, Warmbeek en Abeek snijden het Kempens plateau in aan de noord-noordoostzijde. In de dalen wordt zand en klei afgezet in dikkere pakketten. De ondiepe ondergrond tot circa 10 m -mv in Budel-Schoot is onderdeel van de Formatie van Boxtel.

4.1.2 Schematische bodemopbouw

Op basis van de rapportages van Cauberg Huygen (rapport 2202.1188-8 d.d. 3 november 2003) blijkt dat de ondergrond over het algemeen matig fijn tot fijn, zwak siltig zand bevat. De bovenste meter is in vele gevallen grindachtig en humeus. Er zijn echter ook diepere humusrijke bodemlagen aangetroffen. In enkele boringen zijn zandige kleilagen aangetroffen, deze varieerden in dikte tussen enkele tientallen centimeters tot maximaal een meter dikte. In de meeste gevallen werd het zwak siltige bodemprofiel onderbroken door matig siltige zandlagen van ongeveer een meter dikte. Noch de dikkere kleilagen noch de siltige bodemlagen zijn tussen de verschillende boorpunten te correleren.

Er mag dan ook worden aangenomen dat deze lagen voorkomen als geïsoleerde lenzen en de bodem, met name in de eerste 10 m die in de diverse onderzoeken zijn onderzocht, zeer heterogeen is.

Bijvoorbeeld in het bodemprofiel van beide injectoren, 3000 en 3010, wordt op circa 2 m -mv een kleilaag aangetroffen van iets minder dan een meter dikte. Deze kleilaag komt echter tussen beide injectoren niet in alle boorprofielen van de monitoringsfilters voor. Het voorkomen van deze niet continue kleilagen en de grote heterogeniteit van de bodem past in het beeld van de ontstaansgeschiedenis van het gebied. De verschillende bodemlagen zijn afgezet in een verwilderd systeem van kleine geultjes die zich met enige regelmaat verplaatste waardoor telkens dunne lagen klei, silt en zand zijn afgezet. De bodemlagen (waarschijnlijk eveneens lenzen) van grovere zanden zijn kenmerkend voor afzettingen in de rivierloop. Een geschematiseerde bodemopbouw ter plaatse van de praktijkproef is weergegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1 Geschematiseerde bodemopbouw op het emplacement van Budel-Schoot ter hoogte van het monitoring- en injectiesysteem op basis van de verschillende boringen en de gehele bodemkern (liner). De bodem tot circa 10 m -mv bestaat uit voornamelijk matig fijn zand vaak ook wat siltig. Er komen kleilagen voor met een maximale dikte van een meter die niet correleerbaar zijn tussen de verschillende diepe boringen. In het bodemprofiel van beide injectoren, 3000 en 3010, wordt op circa 2 m -mv een kleilaag aangetroffen. Deze komt echter tussen beide injectoren niet in alle boorprofielen van de monitoringsfilters voor. Op grotere diepte, dieper dan 6 m -mv, komt een zeer organisch rijke laag voor

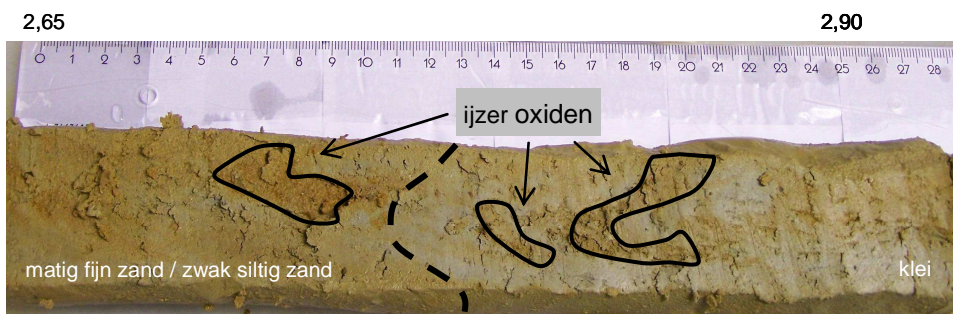
Ter hoogte van de proeflocatie is een bodemkern tot 10 m -mv gestoken. In figuur 4.2 (pagina 32) zijn een aantal foto's opgenomen van delen van de kern. De kern is in de buurt van eerder door Cauberg Huygen geplaatste diepe boringen tot 9 m -mv, daarnaast zijn ook enkele diepe boringen tot 8 m -mv geplaatst. Op basis van deze boringen en de bodemkern kan het volgende worden geconstateerd:

- Tot ongeveer 3,30 m -mv heeft de bodem een gelige kleur die langzaam overgaat in een wit/grijze kleur tot een diepte van circa 5,5 m -mv. Vanaf die diepte komen zogenaamde gleyverschijnselen (zie figuur 4.2 kern B5.3) voor. Deze ijzeroxiden die sterke gelijkenis vertonen met roestvlekken ontstaan door wisselende waterstanden. Tijdens hoge grondwaterstanden is de bodem op die plekken anaeroob waardoor ijzeroxiden in oplossing gaan (wit/grijze kleur). Tijdens lage grondwaterstanden wordt de bodem juist weer aeroob waardoor opgelost ijzer weer neerslaat, geel/oranje kleur, dit gebeurt voornamelijk rond bestaande ijzeroxides. Hierdoor ontstaat een karakteristiek vlekkenpatroon. Daarnaast vertoont de bodem ook op andere diepte trajecten sporen van naast elkaar voorkomende redoxomstandigheden (figuur 4.2, kern B5.11)
- Lokaal komen abrupte overgangen voor naar zeer organisch materiaal rijk zand en klei (5.4 % organisch stof). In de boorkern komt een dergelijke overgang twee keer voor, op circa 6 en op circa 7 m -mv. In figuur 4.2 (kern B5.18) is een voorbeeld gegeven van deze organisch rijke laag. In de boringen 3001, 3002, 3003 komen dergelijke overgangen tussen 6 en 8 m -mv voor. In boring 3002 is deze laag siltiger dan in de andere boringen. De diepe boringen door Cauberg Huygen gezet op andere delen van het emplacement bevatten deze organisch rijke lagen niet. Wel wordt in de boorbeschrijvingen aangegeven dat op deze diepte de kleur van de bodem van grijs/geel naar bruin overgaat. Dit kan echter ook wijzen op een redoxovergang
- Op circa 8 m is de bodem grijs/wit met enkele blauw/grijze vlekken, deze zouden kunnen wijzen op sulfaatreducerende omstandigheden. Dieper dan 8,50 m -mv verliest de bodem zijn geel/oranje kleur en krijgt het een grijzere kleur wat duidt op een continue anaeroob milieu

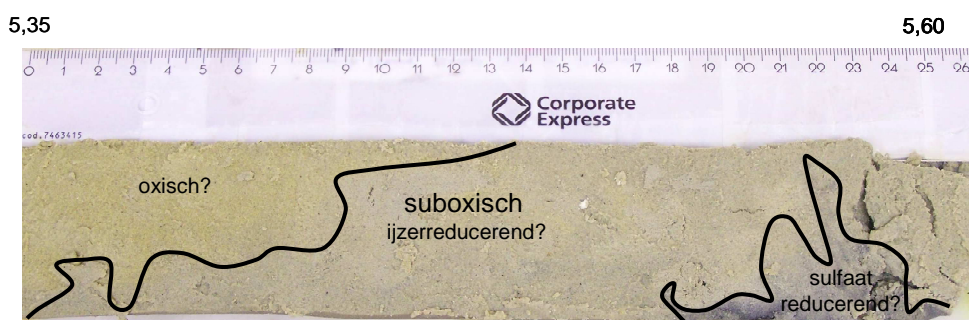
4.2 Nulsituatie verontreiniging

In het kader van de zogenaamde nulmeting voor de uitvoering van de praktijkproef is voor de stoffen cadmium, ijzer en zink in het grondwater de nulsituatie vastgelegd. Ter bepaling van de algemene grondwatercompositie is tevens voor het grondwater uit filters op verschillende dieptes de concentraties aan macronutriënten vastgesteld.

Tijdens het bemonsteren van het grondwater op 30 juni, 1 en 2 juli 2008 bleek dat de filterstellingen van het bovenste en onderste filter van peilbuis 3006 op een foutieve diepte waren geplaatst. Deze filters zijn na deze constatering herplaatst op de juiste diepte. Echter was het door het onttrekken van het grondwater ten behoeve van de injectie niet meer mogelijk om grondwatermonsters voor de nulmeting te nemen.



B5.3



B5.11



B5.18

Figuur 4.2 Enkele foto's van de gehele boorkern (liner) met daarin een aantal waarnemingen; helemaal boven kern B5.3 gley-verschijnselen in zowel kleiige als zandige bodemtextuur. Goed zichtbaar zijn de ijzeroxiden maar ook de meer gereduceerde, grijze bodemdelen zijn zichtbaar. Midden kern B5.11 naast elkaar voorkomende redoxcondities en onder kern B5.18 zeer organisch rijke bodemlaag in zowel kleiige als zandige textuur

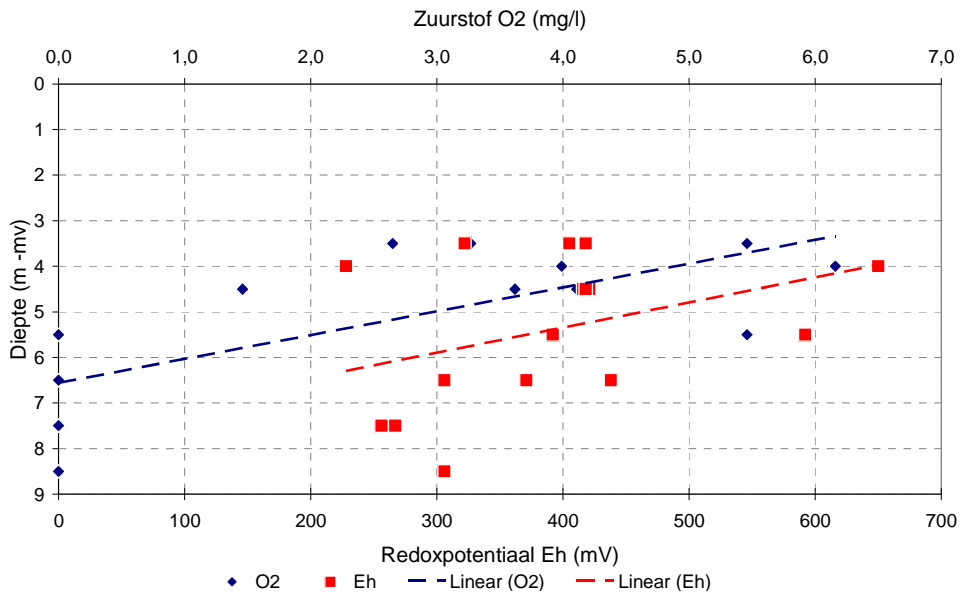
In de hierna volgende paragrafen zijn de analyseresultaten van de nulmeting opgenomen in een interpretatie dat de van nature voorkomende geochemische condities van het grondwater schetst. De veld- en analysedata zijn terug te vinden in de tabellen opgenomen in bijlage 2.

4.2.1 Grondwatersamenstelling en heersende redoxcondities

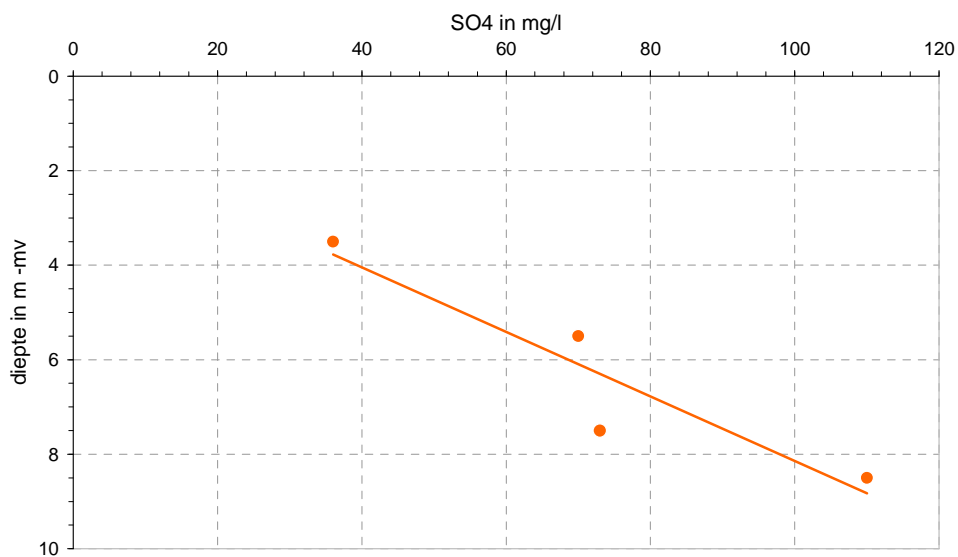
In het grondwater uit filters met een diepte van 3-4, 5-6, 7-8 en 8-9 m -mv zijn de concentraties van de macronutriënten aluminium, bicarbonaat, calcium, carbonaat, DOC, kalium, natrium, nitraat, ortho-fosfaat, stikstof (Kjeldahl-methode) en sulfaat bepaald.

Ter bepaling van de heersende redoxcondities kan naast de in het veld gemeten redoxpotentiaal (Eh) en zuurstofconcentratie van het grondwater ook worden gekeken naar redoxbepalende parameters als nitraat, ijzer en sulfaat. Uit de analyseresultaten van de nulmeting kan vervolgens worden bepaald dat de volgende redoxcondities heersen voor:

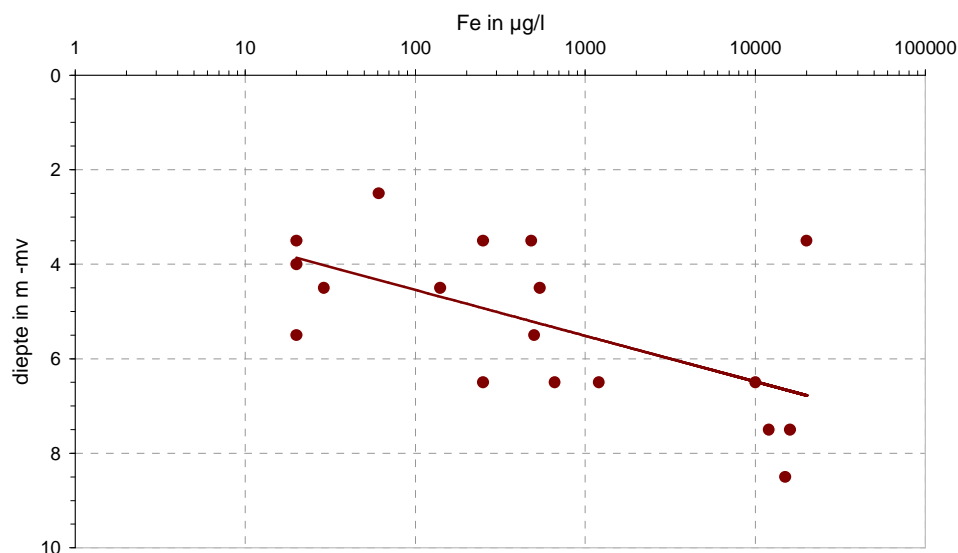
- **Bodemtraject 3-4 m -mv**
Met een gemiddelde zuurstofconcentratie in de filters op deze diepte van circa 4 mg/l, een gemiddelde redoxpotentiaal van circa 380 mV en een nitraatconcentratie van 0,97 mg/l ($\text{NO}_3\text{-N} = 0,22$ mg/l) kan worden vastgesteld dat op een diepte van 3-4 m -mv aerobe omstandigheden in het grondwater heersen
- **Bodemtraject 5-6 m -mv**
Op deze diepte wordt geen zuurstof meer gemeten in het veld (zie figuur 4.3, pagina 34) en een gemiddelde redoxpotentiaal van circa 490 mV. Er wordt echter nog wel nitraat aangetroffen met een concentratie van circa 1,5 mg/l ($\text{NO}_3\text{-N} = 0,35$ mg/l). Ook komt nog ijzer voor tot een concentratie van 0,5 mg/l. Op basis van deze gegevens wordt vastgesteld dat op een diepte van 5-6 m -mv subanaerobe omstandigheden heersen die enigszins nitraat-, mogelijk ook ijzerreducerend zijn
- **Bodemtraject 7-8 m -mv**
Met een sulfaatconcentratie van 73 mg/l (zie figuur 4.4, pagina 34) en een ijzerconcentratie variërend tussen 12 en 16 mg/l (figuur 4.5, pagina 35) kan worden vastgesteld dat op een diepte van 7-8 -mv anaerobe omstandigheden heersen, gezien de afnemende ijzer- en sulfaatconcentraties wordt onder de aanwezige omstandigheden ijzer en sulfaat gereduceerd
- **Bodemtraject 8-9 m -mv**
Op deze diepte is ten opzichte van het bodemtraject hierboven de sulfaatconcentratie hoger en ligt op circa 110 mg/l (figuur 4.4). De ijzerconcentratie blijft min of meer constant op circa 15 mg/l (figuur 4.5). Geconcludeerd wordt dat ook op deze diepte ijzer- tot sulfaatreducerende omstandigheden heersen



Figuur 4.3 Zuurstofconcentratie en redoxpotentiaal in grondwater nemen beiden over diepte af, alle waarnemingen van de nulmeting. Tevens is de lineaire regressielijn gegeven



Figuur 4.4 Concentratie sulfaat in het grondwater tijdens de nulmeting, alle waarnemingen. Tevens is de lineaire regressielijn gegeven

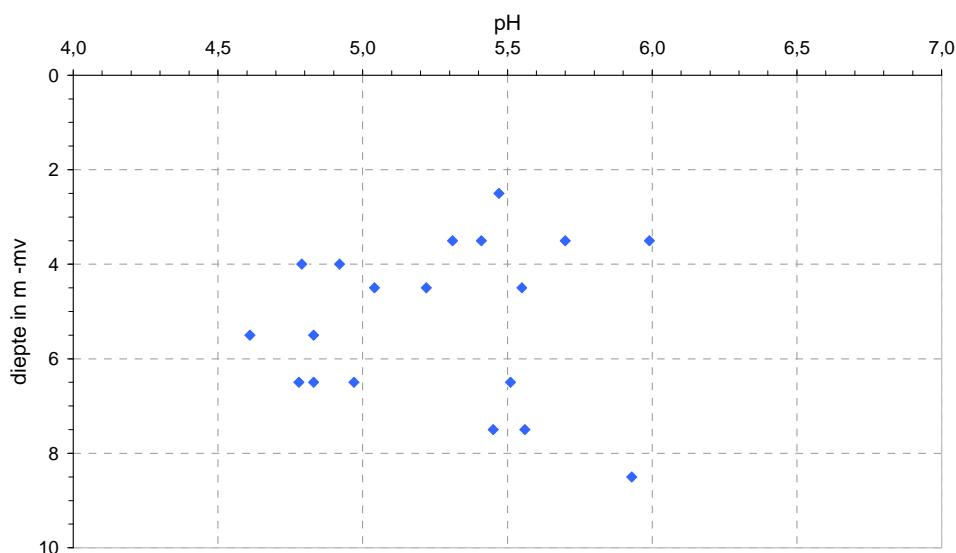


Figuur 4.5 Concentratie ijzer in grondwater tijdens de nulmeting, alle waarnemingen. Tevens is de lineaire regressielijn gegeven. De ijzerconcentratie in het grondwater neemt toe met de diepte

Om de praktijkproef uit te kunnen voeren is de aanwezigheid van ijzer en sulfaat in het grondwater vereist. Volgens het principe van ISMP wordt sulfaat, welke in voldoende mate aanwezig moet zijn in het grondwater, gereduceerd, waardoor metaalsulfides kunnen precipiteren. Door middel van co-precipitatie met ijzersulfides zal het aanwezige zink en cadmium gebonden worden. Zowel ijzer als sulfaat moeten dus in voldoende mate aanwezig zijn in het grondwater om deze vastlegging mogelijk te maken.

De ijzerconcentraties vastgesteld in het grondwater tijdens de nulmeting zijn weergegeven in figuur 4.5. In deze figuur is te zien dat bekeken over het injectie- en monitoringsysteem ijzerconcentratie in het grondwater met de diepte toeneemt. Wanneer naar de pH-variatie van het grondwater over de diepte wordt gekeken, figuur 4.6 (pagina 36), blijkt dat na 6,5 tot 7 m -mv de pH enigszins toeneemt. Op basis van afnemende oplosbaarheid bij een toenemende pH zou een afname van de ijzerconcentratie verwacht worden. Het toenemen van de ijzerconcentratie wijst daarom op de aanwezigheid van meer ijzerreducerende omstandigheden.

Een bijkomend aspect van het sulfaatreductie proces is de vorming van bicarbonaat welke een bufferende werking op de pH heeft. De van nature aanwezige buffercapaciteit van het grondwater wordt bepaald door de bicarbonaat- en calciumconcentraties in het grondwater.



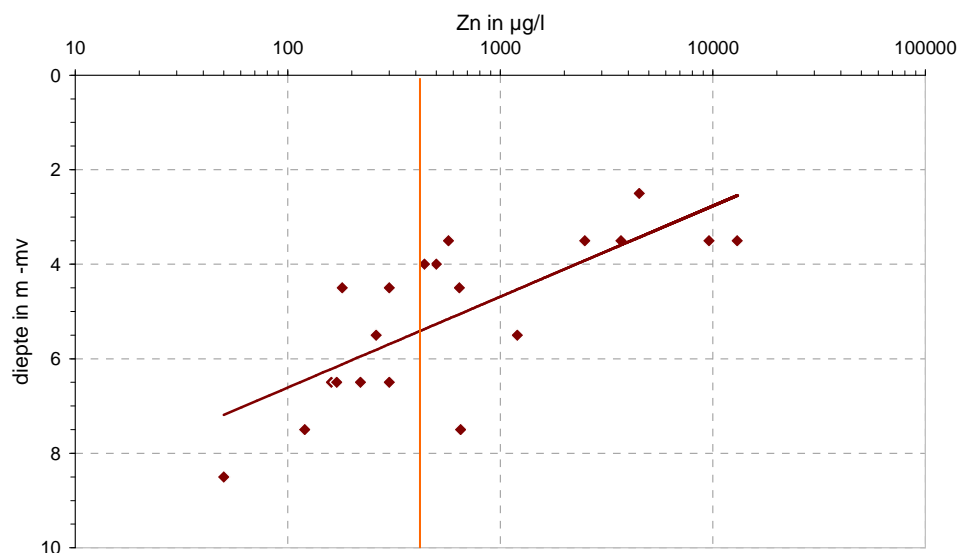
Figuur 4.6 pH-variatie in het grondwater tijdens de nulmeting, alle waarnemingen

4.2.2 Verontreinigingssituatie zink en cadmium

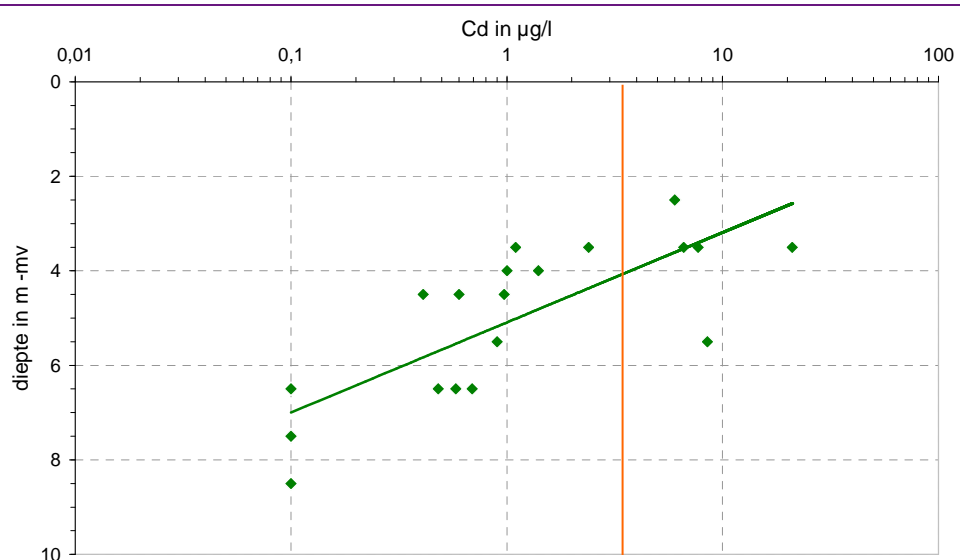
Door uitloging van de op het maaiveld aangebrachte zinkassen zijn in het grondwater verhoogde concentraties van zink en cadmium aanwezig. Als doel van de praktijkproef is gesteld om de aanwezige zink- en cadmiumconcentraties in het grondwater terug te brengen tot bij voorkeur de tussenwaarde volgens de STI-toetsingswaarden. Voor zink en cadmium zijn dit respectievelijk concentraties van 433 $\mu\text{g/l}$ en 3,2 $\mu\text{g/l}$.

In figuur 4.7 (pagina 37) is de zinkconcentratie tijdens de nulmeting, in het grondwater voor alle filters uitgezet tegen de diepte. Hieruit blijkt dat de zinkconcentratie met de diepte afneemt. In de grafiek is tevens de terugsaneerwaarde voor zink (433 $\mu\text{g/l}$) aangegeven. De zinkconcentraties in het grondwater zijn verhoogd ten opzichte van deze terugsaneerwaarde, voornamelijk in het ondiepe deel van de bodem. Ook uit de verontreinigingssituatie van cadmium in het grondwater blijkt dat de concentratie met de diepte afneemt (figuur 4.8, 37). Uit de zink- en cadmiumconcentraties is duidelijk af te leiden dat door de aanwezigheid van zinkassen op het maaiveld het grondwater in de bovenste bodemlagen is verontreinigd met deze metalen. Een zelfde trend, het afnemen van zink en cadmium met de diepte is terug te vinden in de gehalten die zijn gemeten in de mengmonsters van verschillende bodemlagen (figuur 4.9, pagina 38). Ook voor andere metalen zoals lood wordt deze afname met de diepte waargenomen. Het gehalte aan nikkel daarentegen vertoont geen correlatie met de diepte (figuur 4.9).

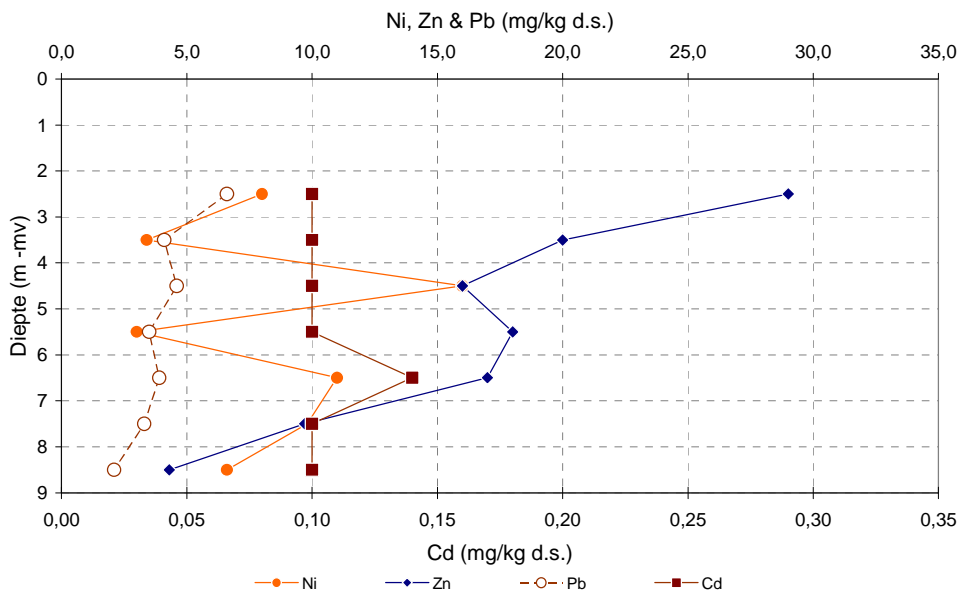
Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL



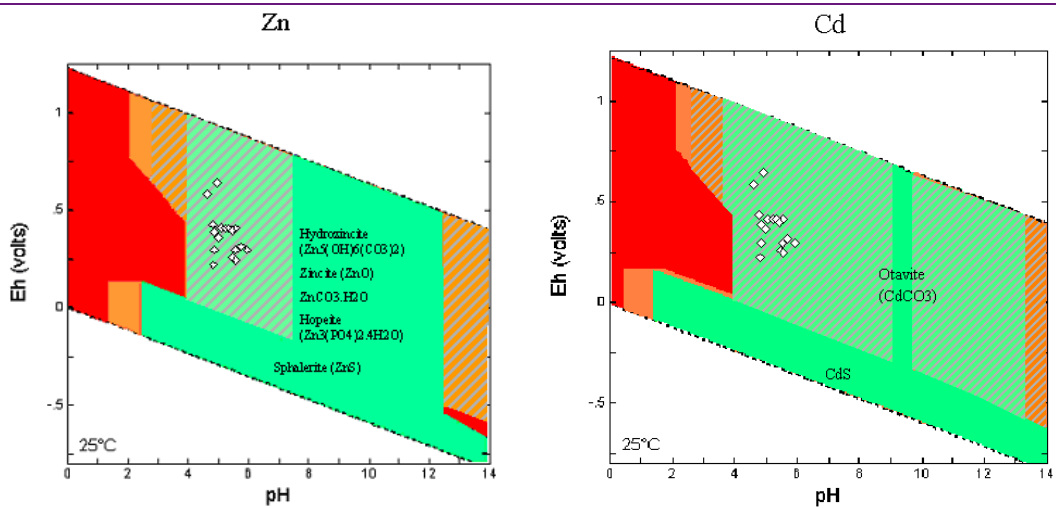
Figuur 4.7 Concentratie zink in grondwater tijdens de nulmeting, alle waarnemingen. De terugsaneerwaarde is eveneens aangegeven



Figuur 4.8 Concentratie cadmium in grondwater tijdens de nulmeting, alle waarnemingen. De terugsaneerwaarde is eveneens gegeven



Figuur 4.9 Gehalten in de grond aan zink (Zn), cadmium (Cd) nikkel (Ni) en lood (Pb) als functie van de diepte



Figuur 4.10 pH-Eh-diagram en de vastleggingsindicator voor op basis van de nulmeting; links zink en rechts cadmium. In de vastleggingsindicator geeft een groene kleur aan dat vastlegging plaatsvindt in de vorm van precipitaten, arcering geeft vastlegging door adsorptie aan en een rode kleur geeft aan dat er geen vastlegging plaatsvindt en er risico op verspreiding aanwezig is

Onder de heersende geochemische omstandigheden zoals gemeten tijdens de nulmeting, blijft in het grondwater aanwezige zink en cadmium in oplossing. De redoxpotentiaal (Eh) in het grondwater neemt met de diepte af (figuur 4.3, pagina 34) maar is waarschijnlijk niet anaeroob genoeg om het cadmium van nature te immobiliseren.

Om vast te stellen of onder de heersende redoxomstandigheden zink en cadmium worden vastgelegd, kan gebruik worden gemaakt van zogenaamde pH-Eh-diagrammen. In figuur 4.10 (pagina 38) is het pH-Eh-diagram voor zink en cadmium gegeven met daarin eveneens de vastleggingsindicator. In de vastleggingsindicator geeft een groene kleur aan dat vastlegging plaatsvindt in de vorm van precipitaten, arcering geeft vastlegging door adsorptie aan en een rode kleur geeft aan dat er geen vastlegging plaatsvindt en er risico op verspreiding aanwezig is. Op basis van figuur 4.10 kan worden afgeleid dat vastlegging van zink en cadmium door middel van adsorptie onder de omstandigheden geconstateerd tijdens de nulmeting op de locatie waarschijnlijk is.

Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL

Laboratoriumexperimenten

5

5 Laboratoriumexperimenten

Hoewel sulfaatreducerende bacteriën meestal van nature in de bodem aanwezig zijn, zijn er voorbeelden dat sulfaatreductie in aerobe, sterk verzuurde en/of sterk verontreinigde aquifers niet of nauwelijks opgang komt. Uit veldmetingen en de interpretatie op basis van de bodemprofielen en grondwatergegevens (hoofdstuk 4) blijkt dat het grondwater op de locatie tot een diepte van circa 5 m -mv oxisch of sub-oxisch is. De pH-waarden en de concentraties aan verontreinigingen zijn niet extreem. In dit hoofdstuk wordt de werkwijze van het laboratoriumonderzoek beschreven om aan de hand van een aantal cruciale vragen en antwoorden te bepalen welk type substraat geschikt is voor toepassing op de locatie.

Door middel van schudproeven met grond en grondwater van de locatie is gecontroleerd of sulfaatreductie spontaan op gang komt. Behalve organische substraten (koolstofbron) is er niets toegevoegd aan het grondwater. De volgende parameters zijn gevarieerd:

- Diepte van de **bodemlaag** - ondiepe laag is aerob, diepere niet of hooguit sub-oxisch
- **Type substraat** - lactaat en melasse. Lactaat is een substraat dat meteen kan worden gebruikt door sulfaatreducerders, waardoor het proces snel op gang kan komen. Melasse moet eerst door fermentatie worden omgezet in geschikte substraten, dit kost dus meer tijd. Melasse wordt in de praktijk gebruikt omdat het veel goedkoper is dan lactaat
- **Substraatconcentratie** - deze is voor melasse gevarieerd tussen een gangbare praktijkwaarde en een hoge concentratie. Met een hoge concentratie is het in theorie mogelijk een sulfidenbuffer te creëren, waarmee toekomstige emissies vanuit de verontreinigde toplaag afgevangen kunnen worden

De meeste proeven zijn uitgevoerd met het ondiepe monster omdat de zinkconcentraties in het ondiepe grondwater veel hoger zijn dan in het diepere monster. Ter controle is één serie proeven ingezet met het diepere monster, met melasse als substraat.

Naast het op gang komen van het sulfaatreductieproces, is onderzoek uitgevoerd naar toekomstige emissies op de locatie. Naast de nog aanwezige assen (die mogelijk in de toekomst worden verwijderd) zal de onverzadigde zone van de bodem metalen naleveren door desorptie. Dit geldt ook voor het deel van de verzadigde zone dat na behandeling niet (permanent) sulfaatreducerend blijft. De toekomstige emissies zijn onderzocht met behulp van kolomproeven.

5.1 Werkwijze

Alle proeven zijn ingezet als zuurstofloze schudproeven bij een L/S (Liquid/Solid) waarde van 5. Hierbij is grond van de locatie gemengd met grondwater, waaraan substraten zijn toegevoegd. De grond die voor deze proeven is gebruikt is afkomstig uit boring 3000, diepte 3-5 m (ondiep) en 5-7 m (diep). Het grondwater is afkomstig uit peilbuis 3008, filters 3-4 m (ondiep) en 5-7 m (diep).

De volgende proeven zijn ingezet met het ondiepe grond-/grondwatermonster:

- Lactaat: 4 g/l Na-lactaat 60 %
- Gangbare melasseconcentratie: 1,68 g/l
- Hoge melasseconcentratie: 16,8 g/l

Voor het diepe grondmonster is alleen de gangbare melasseconcentratie ingezet. Voor alle proeven geldt dat vier identieke flessen zijn gevuld, die op verschillende tijdstippen zijn opgeofferd. De waterfase is daarbij geanalyseerd op cadmium, zink, ijzer, zwavel en sulfaat (begin en eind, tussentijds op zink, ijzer en zwavel). De laatste fles van een serie is ook op DOC geanalyseerd. Onmiddellijk na het openen van een fles zijn de redoxpotentiaal en de pH gemeten. Er zijn analyses uitgevoerd na 1, 18, 40 en na ruim 80 dagen.

De uitloogproeven zijn uitgevoerd als kolomproeven volgens NEN 7373. Hierbij zijn drie eluaatfracties geanalyseerd op cadmium, zink en zwavel, namelijk L/S 0-1, 1-5 en 5-10. In deze fracties is tevens pH en geleidbaarheid gemeten. De volgende monsters zijn ingezet:

- Mengmonster van op de locatie verzamelde (zink)assen. Dit relatief grove materiaal moest voor de kolomproef eerst worden gebroken tot < 4 mm
- Mengmonster onverzadigde zone 0-1 m -maaiveld
- Mengmonster onverzadigde zone, 1-2 m -maaiveld
- Mengmonsters verzadigde zone, diepte nader te bepalen

5.2 Resultaten

De resultaten van de batchproeven zijn samengevat in tabel 5.1 (pagina 45). Dit betreft de frequent gemeten parameters. Uit de resultaten blijkt het volgende:

- Na één dag zijn de zinkconcentraties in de meeste monsters afgenomen en in het diepe monster toegenomen als gevolg van fysisch-chemische processen. Dit betreft adsorptie/desorptie (grond en grondwater zijn niet noodzakelijkerwijs met elkaar in evenwicht, mede als gevolg van veranderingen in pH en de testmethode) en eventueel complexatie door het toegevoegde substraat. De toename van de zwavelconcentratie (na 18 dagen schudden) wordt verklaard uit nalevering van de grond en zwavel aanwezig in het substraat. De startconcentratie is alleen de samenstelling van het grondwater, zonder substraat

Tabel 5.1 Resultaten batchproeven sulfaatreductie voor de frequent gemeten parameters. Bij de start van de experimenten bevatte het grondwater geen substraat

Parameter	Tijd na inzetten				
	Start	1 dag	18 dagen	40 dagen	81 / 87 dagen ¹⁾
Ondiep / lactaat					
pH	5,82	5,42	6,15	6,29	6,67 / 6,95
Redoxpotentiaal (mV)	257	391	-8	-83	-125 / -50
Zink (µg/l)	11.000	8.000	47	9,2	310 / 280
Cadmium (µg/l)	17,0	2,9	-	-	< 0,1 (2)
IJzer (mg/l)	< 0,020	-	2,5	4,4	2,5 / -
Zwavel (mg/l)	8,9	-	21	0,75	- / 1,0
Ondiep / melasse, gangbare concentratie					
pH	5,82	4,84	4,51	5,01	5,13 / 4,79
Redoxpotentiaal (mV)	257	366	325	-62	-37 / 29
Zink (µg/l)	11.000	5.700	5.300	48	510 / 340
Cadmium (µg/l)	17,0	2,9	-	-	< 0,1 (2)
IJzer (mg/l)	< 0,020	-	17,0	21,0	32,0 / -
Zwavel (mg/l)	8,9	-	18,0	9,5	- / 8,5
Ondiep / melasse, hoge concentratie					
pH	5,82	5,58	4,95	4,64	4,67 / 5,71
Redoxpotentiaal (mV)	257	255	-223	87	60 / 77
Zink (µg/l)	11.000	14.000	5.600	6.300	9.100 / 5.200
Cadmium (µg/l)	17,0	7,5	-	-	< 5 (2)
IJzer (mg/l)	< 0,020	-	39,0	44,0	65,0 / -
Zwavel (mg/l)	8,9	-	48,0	46,0	-
Diep / melasse, gangbare concentratie					
pH	4,93	5,87	4,28	4,47	4,48 / 6,12
Redoxpotentiaal (mV)	288	303	244	57	66 / -40
Zink (µg/l)	1.500	3.300	650	630	910 / 280
Cadmium (µg/l)	8,4	1,5	-	-	< 0,1 (2)
IJzer (mg/l)	0,036	-	16,0	16,0	20,0 / -
Zwavel (mg/l)	19,0	-	25,0	24,0	20 (2)

¹⁾ Analyse van eerder geopende flessen, meting redoxpotentiaal mogelijk soms minder betrouwbaar analyse na 72 dagen

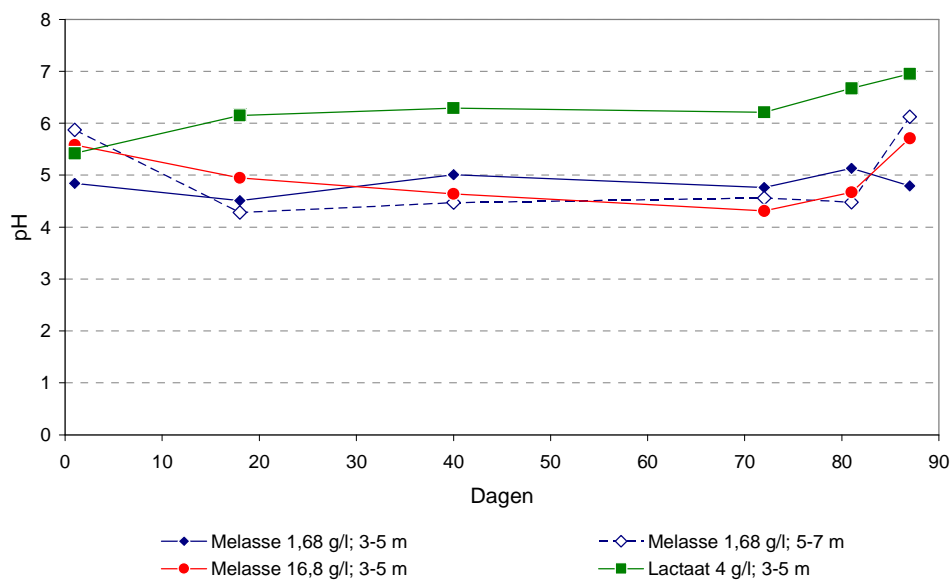
- Uit zowel de afname van redoxpotentiaal, de zwavelconcentratie als de zinkconcentratie (zie ook figuren 5.1 tot en met 5.3, pagina 47 en 48) kan worden afgeleid dat in de monsters ondiep/lactaat en ondiep/melasse de sulfaatreductie na ruim vijf weken goed op gang is gekomen. De zinkconcentraties zijn gedaald tot onder de streefwaarde. Na ruim 80 dagen worden hogere concentraties gemeten, hoewel meestal nog onder de T-waarde. De oorzaak van deze toename is niet zondermeer duidelijk. Naast variatie tussen de batches, kan meespelen dat complexatie door DOC sterker wordt en dat er, door de lage sulfaatconcentratie, een tekort is aan sulfide, met name bij de proef met lactaat
- In het monster ondiep/melasse, hoge concentratie komt de sulfaatreductie binnen 81 dagen niet op gang. Het proces stagneert, mogelijk als gevolg van substraatremming. De pH is wel aan de lage kant, maar niet lager dan bij de proef met de gangbare melasse concentratie. Uit de toename van opgelost ijzer blijkt dat wel ijzerreductie optreedt
- In het monster diep/melasse, gangbare concentratie komt de sulfaatreductie binnen 81 dagen niet op gang. Alleen na pH-correctie ontstaan wel sulfaatreducerende condities. In dit monster lijkt de pH, die daalt door fermentatie van de toegevoegde melasse, de kritische factor
- Voor cadmium (niet vermeld in tabel 5.1) geldt dat de concentraties na 72 dagen zijn gedaald tot $< 0,1 \mu\text{g/l}$, alleen het monster met de hoge concentratie melasse is minder goed te beoordelen omdat hier een concentratie van $< 5 \mu\text{g/l}$ werd gerapporteerd. De beginconcentraties van cadmium waren $17 \mu\text{g/l}$ in het ondiepe monster en $8,4 \mu\text{g/l}$ in het diepe monster

Bij alle proeven stijgt de ijzerconcentratie aanzienlijk als gevolg van ijzerreductie. De toename is het minst bij de proef met lactaat. Bij deze proef is de zwavelconcentratie het sterkst gedaald, daarom is gemobiliseerd ijzer wellicht neergeslagen als ijzersulfide. Het aanwezige sulfaat is bij de proef met lactaat na vijf weken vrijwel volledig verbruikt. Dit van nature aanwezige sulfaat is voldoende om zink neer te slaan, maar voor het neerslaan van voldoende ijzer c.q. het opbouwen van een sulfidenbuffer, moet wellicht additioneel sulfaat worden toegevoegd.

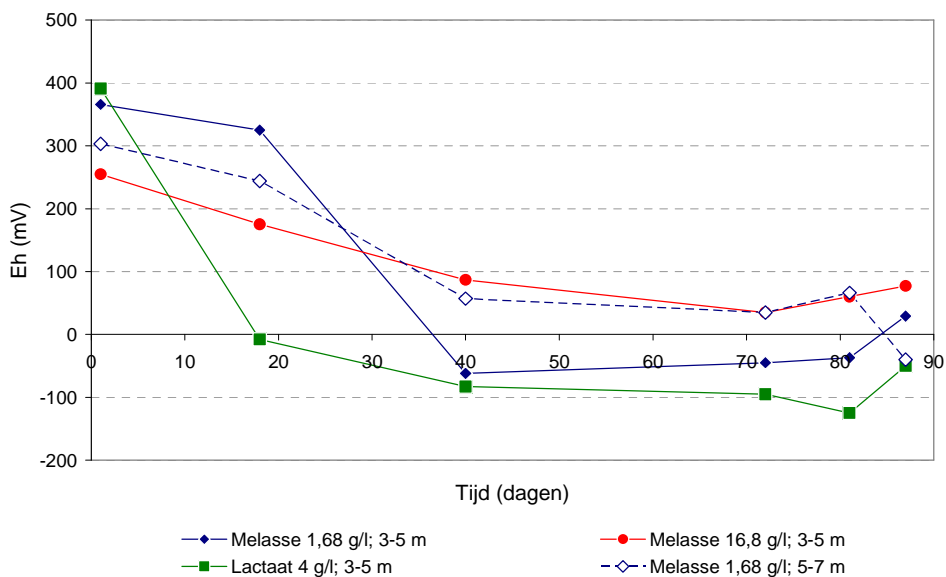
Het optreden van sulfaatreductie wordt bevestigd door zwartkleuring van de grond en een zwavelwaterstofgeur in de flessen. In het monster melasse, hoge concentratie zijn deze kleur en geur niet waargenomen.

Hierboven is al vermeld dat bij twee proefseries is geëxperimenteerd met pH-correctie. In de figuren 5.4 en 5.5 (pagina 48 en 49) zijn de resultaten van deze experimenten samengevat. Aangezien de pH van invloed is op de redoxpotentiaal, leidt een hogere pH altijd tot een afname van de redoxpotentiaal. Bij het diepe monster gaat de afname verder en ontstaan sulfaatreducerende condities. Bij de hoge melassedosering is dit echter niet het geval.

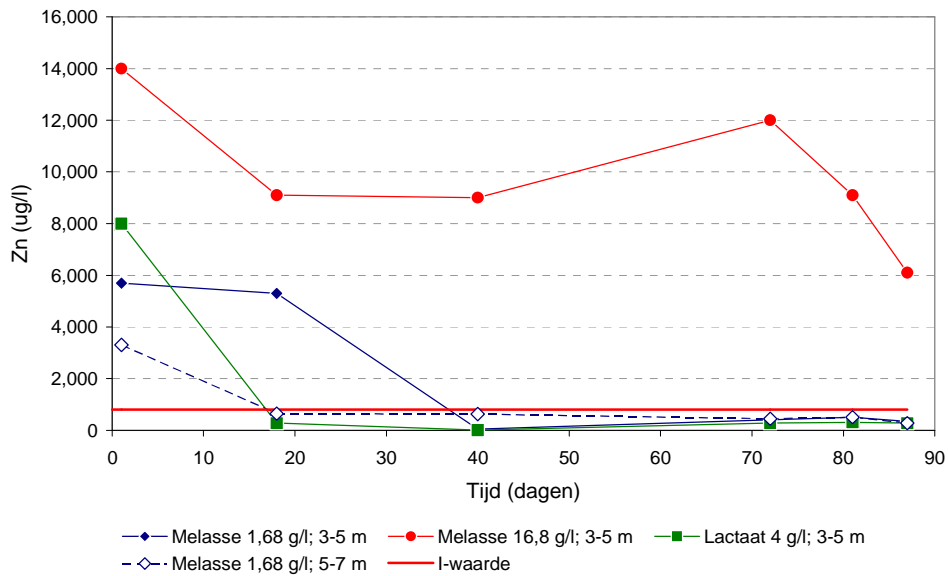
Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL



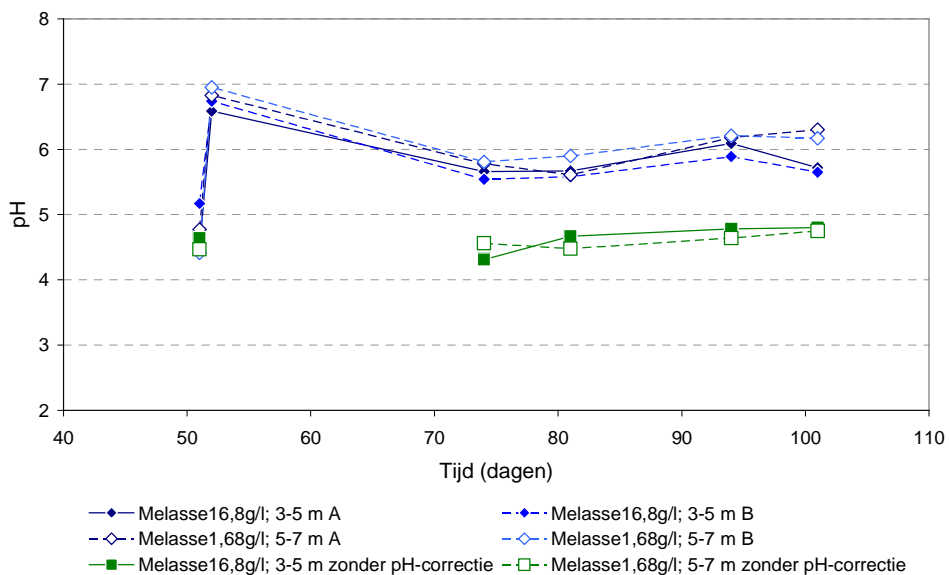
Figuur 5.1 Resultaten batchproeven sulfaatreductie: verloop pH met de tijd. Bij de laatste meetwaarden van melasse 16,8 g/l en melasse 1,68 g/l; 5-7 m is de pH op een eerder tijdstip gecorrigeerd



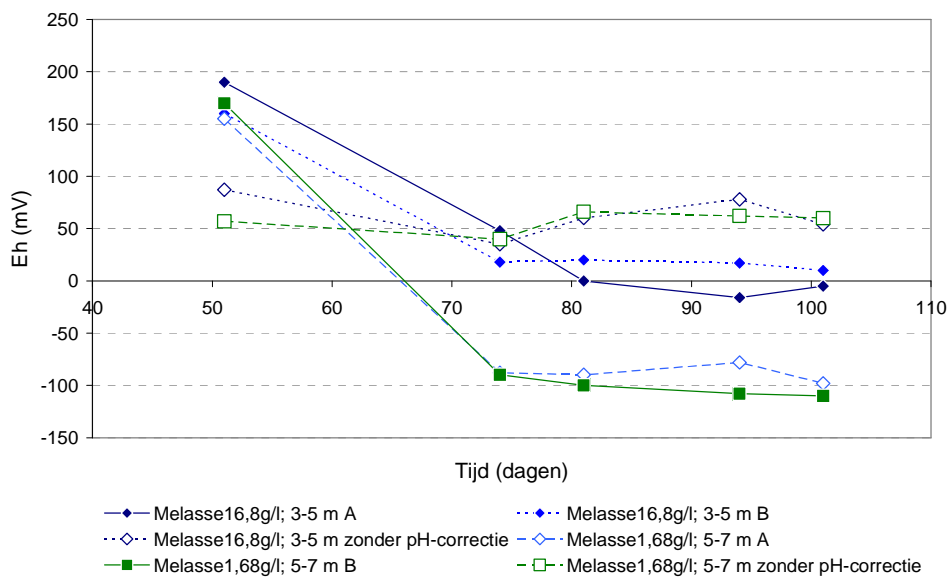
Figuur 5.2 Resultaten batchproeven sulfaatreductie: verloop redoxpotentiaal met de tijd. Waarde melasse 16,8 g/l na circa 20 dagen is geschat, meetwaarden op dag 87 door herhaald openen fles mogelijk minder betrouwbaar, bij melasse 1,68 g/l 5-7 m sterke daling door pH-correctie



Figuur 5.3 Resultaten batchproeven sulfaatreductie: verloop zinkconcentratie met de tijd. Bij laatste meetwaarden melasse 16,8 g/l en melasse 1,68 g/l; 5-7 m is de pH op een eerder tijdstip gecorrigeerd



Figuur 5.4 Verloop pH na pH-correctie bij batchproeven sulfaatreductie, uitgevoerd 51 dagen na de start van de proeven, in duplo. Ter vergelijking zijn ook metingen in niet gecorrigeerde monsters getoond



Figuur 5.5 Verloop redoxpotentiaal na pH-correctie bij batchproeven sulfaatreductie, uitgevoerd 51 dagen na de start van de proeven, in duplo. Ter vergelijking zijn ook metingen in niet gecorrigeerde monsters getoond

Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL

Substraatinjectie praktijkproef

6

6 Substraatinjectie praktijkproef

Uit de laboratoriumexperimenten, zie hoofdstuk 5, blijkt dat enting met sulfaatreducerende bacteriën voor de praktijkproef niet noodzakelijk is. Ook het toevoegen van nutriënten of sporenelementen is evenmin noodzakelijk. De van nature aanwezige sulfaatconcentraties zijn echter laag, zodat toevoeging van extra sulfaat voor de praktijkproef noodzakelijk is. In de laboratoriumexperimenten is bij de hoogste melassedosering het sulfaatreductieproces niet op gang gekomen.

6.1 Kengetallen praktijkproef op basis van laboratoriumexperimenten

Op basis van de laboratoriumexperimenten is besloten de volgende oplossingen te injecteren:

- Lage dosering substraat: 2 g melasse/L wat overeenkomt met 2 kg/m^3 en $240 \text{ mg Na}_2\text{SO}_4/\text{l}$ of 240 g/m^3
- Hoge dosering substraat: 10 g melasse/L wat overeenkomt met 10 kg/m^3 en $1,2 \text{ g Na}_2\text{SO}_4/\text{l}$ of $1,2 \text{ kg/m}^3$

Gezien de bodemopbouw is besloten om in elke injector in het meer slecht doorlatende gedeelte van het bodempakket van 2,0-3,1 m -v (tot onderkant kleiige laag) $1,4 \text{ m}^3$ substraatoplossing te injecteren. In het diepere bodempakket van 3,1-6,0 m -mv wordt $3,6 \text{ m}^3$ substraatoplossing geïnjecteerd. Dit is uitgevoerd met behulp van een *packer* waardoor op elke gewenste diepte in het filter van de injector kan worden geïnjecteerd. De geïnjecteerde volumes komen overeen met het grondwatervolume in de bodem in een straat van 1 m rondom de injector (uitgaande van een homogene verspreiding).

6.2 Injectiewerkzaamheden

Het injecteren van de substraatoplossing is door middel van twee injectieronden uitgevoerd. De eerste injectieronde heeft plaatsgevonden in week 28 van 2008. De opzet van de injectie was zo beoogd dat per laag 2,0 tot 3,1 en van 3,1 tot 6,0 m -mv het substraat zou worden toegevoegd met grondwater uit dat desbetreffende bodempakket. De doorlatendheid van met name het ondiepe bodempakket bleek echter slechter te zijn dan op basis van de bodemopbouw werd verwacht. Na circa vier uur onttrekken was er minder dan $0,5 \text{ m}^3$ grondwater onttrokken om op te mengen voor de substraatinjectie.

Tijdens de uitvoering is daarom besloten uit beide injectoren en van alle twee beoogde diepten het grondwater te verzamelen en op te mengen. In totaal was na drie dagen onttrekken 5 m^3 grondwater verzameld. Deze hoeveelheid grondwater is vervolgens opgemengd met melasse en natriumsulfaat zodat de hoge dosering met 10 g substraat is verkregen.

Dit is vervolgens in injector 3010 geïnjecteerd waarbij circa 1,4 m³ in het slecht doorlatende, ondiepe bodempakket geïnjecteerd (2,0-3,1 m -mv), en 3,6 m³ is in het diepere deel geïnjecteerd (3,1-6,0 m -mv). In figuur 6.1 en 6.2 (pagina 55) zijn een aantal foto's opgenomen die een beeld geven van de injectiewerkzaamheden. Vanwege de lage doorlatendheid hebben de werkzaamheden langer geduurd dan voorzien. Hierdoor is het in week 28 alleen mogelijk geweest om te injecteren op een injector, 3010.

Het injecteren van de lagere substraatdosis op injector 3000 in week 35 van 2008 plaatsgevonden. Ook tijdens deze tweede injectieronde is voorafgaand aan de injectie grondwater uit beide injectoren onttrokken, opgemengd en vervolgens geïnjecteerd in injector 3000. Tijdens het opmengen en injecteren is in eerste instantie een verkeerde substraatconcentratie opgemengd met het onttrokken grondwater (hoge dosering). Na het constateren van deze fout is het injecteren gestopt en opnieuw onttrokken uit de injector. De volgende dag is de juiste substraatdosering opgemengd en alsnog geïnjecteerd.



Figuur 6.1 Onttrekken van grondwater door A&G Milieutechniek. Onttrokken grondwater wordt eerst verzameld in een 3 m³ container. Op de voorgrond is injector 3000 zichtbaar



Figuur 6.2 Opmengen van het onttrokken grondwater met; links melasse en rechts Na_2SO_4

6.3 Controle metingen substraatinjectie

In tabel 6.1 en 6.2 (pagina 56) is een overzicht gegeven van de veld- en analyseresultaten van het opgepompte en gemengde grondwater zonder en met substraat. Hieruit blijkt dat het opmengen van het grondwater met 10 g/l substraat een Ec-verhoging geeft van 135 $\mu\text{S}/\text{cm}$ naar 2360 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De pH blijft gelijk. Circa één week na de injectie, in week 30-2008, is een controlemeting uitgevoerd (zie tabel 6.3, pagina 56).

In tabel 6.3 is indicatief met een kleur aangegeven welke filters in het monitoringsysteem, op basis van de geleidbaarheid zijn beïnvloed door de eerste substraatinjectie. De monitoringsfilters dichtbij injector 3010 zijn duidelijk beïnvloed en de beïnvloeding wordt in alle filters op alle diepten geconstateerd: 3007, 3006, 3005. Verder van de injector, zoals in 3004 en 3003, maar ook in 3001 stijgt de geleidbaarheid na de injectie. Dit gebeurt, met uitzondering van 3004 (4-5 m -mv), in de diepere filters. Gezien de stijging in geleidbaarheid en DOC in 3001 is er mogelijk sprake van verspreiding via voorkeursbanen. Net als in tabel 6.3 is ook in tabel 6.4 (pagina 57) indicatief met een kleur aangegeven welke filters in het monitoringsysteem, op basis van geleidbaarheid zijn beïnvloed door de tweede substraatinjectie. Ook nu zijn de monitoringsfilters dicht bij de injector waarop de injectie heeft plaatsgevonden duidelijk beïnvloed. De beïnvloeding is wederom op de verschillende filterdiepten waargenomen: peilbuizen 3001, 3002 en 3003. Opmerkelijk is wel dat de Ec-waarde in het diepe filter (8-9 m -mv) juist enigszins is afgenomen ten opzichte van de eerste controlemeting.

Tabel 6.1 Ec en pH van het verzamelde grondwater vooraf en na opmengen met melasse van de eerste injectieronde (week 28-2008). Ook de concentraties aan Zn, Cd, Fe en S van het opgepompte en gemengde grondwater is gegeven

	Gemengd grondwater	Grondwater + 10 g/l substraat
pH	5,2	5,2
Ec ($\mu\text{S/cm}$)	135	2.360
Zn ($\mu\text{g/l}$)	450	-
Cd ($\mu\text{g/l}$)	1,6	-
Fe ($\mu\text{g/l}$)	400	-
S (totaal) (mg/l)	14	-

Tabel 6.2 Ec, pH, Cd, Fe en S van het opgemengde grondwater met melasse van de tweede injectieronde (week 35-2008). Ook de DOC-concentraties bij de start van injectie en op het eind van de injectie zijn gegeven

	Grondwater + 2 g/l substraat Start injectie	Grondwater + 2 g/l substraat Eind injectie
pH	3,6	-
Ec ($\mu\text{S/cm}$)	840	-
Cd ($\mu\text{g/l}$)	< 1,0	-
Fe ($\mu\text{g/l}$)	2600	-
S (totaal) (mg/l)	74	-
DOC (mg/l)	430	380

Tabel 6.3 Overzicht pH en Ec-nulmeting ten opzichte van 1^e controlemeting en geanalyseerde parameters DOC en S van de controlemeting. Indicatief is aangegeven op basis van de Ec-metingen welke filters in het monitoringsysteem al dan niet zijn beïnvloed door de substraatinjectie tijdens de eerste injectieronde.

Tabel gaat verder op de volgende pagina

Peilbuis	Filterdiepte (m -mv)	pH		Ec ($\mu\text{S/cm}$)		DOC (mg/l)	
		Nulmeting	1 ^e controle	Nulmeting	1 ^e controle	Nulmeting	1e controle
3000	2-4	4,8	4,4	93	126	1,4	12
3001	3-4	6,0	5,8	325	304	-	-
3001	6-7	4,8	4,6	182	173	-	-
	8-9	5,9	6,3	358	436	3,1	31

Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL

Peilbuis	Filterdiepte (m -mv)	pH		Ec (µS/cm)		DOC (mg/l)	
		Nulmeting	1 ^e controle	Nulmeting	1 ^e controle	Nulmeting	1e controle
3002	2-3	5,5	5,2	105	107	-	-
	4-5	5,0	5,4	170	164	1,1	16
	6-7	4,8	4,4	147	179	1,4	21
3003	3-4	5,3	5,4	104	104	-	-
	5-6	4,8	4,8	202	197	-	-
	7-8	5,5	5,3	219	224	-	-
3004	4-5	5,2	5,3	168	205	1,7	21
	6-7	5,0	4,8	171	180	1,9	18
3005	3-4	5,7	5,9	183	284	5,4	22
	6-7	5,5	6,0	290	791	2,7	70
3006	2-3	-	4,9	-	1660	1.800	270
	4-5	5,6	-	175	-	-	-
	6-7	-	4,6	-	1779	1.500	220
3007	3-4	5,3	5,5	112	190	1,6	11
3008 ¹⁾	3-4	5,4	4,9	178	200	3,6	11
	5-6	4,6	4,4	243	253	2,2	23
	7-8	5,6	5,2	275	293	2,0	32
3010	2-6	4,9	3,6	89	761	650	83

¹⁾ Referentiepeilbuis

Tabel 6.4 Overzicht pH en Ec-nulmeting ten opzichte van 2^e controlemeting en geanalyseerde parameters DOC en S van de controlemeting. Indicatief is aangegeven op basis van de Ec-metingen welke filters in het monitoringsysteem al dan niet zijn beïnvloed door de substraatinjectie tijdens de tweede injectieronde.

Tabel gaat verder op de volgende pagina

Peilbuis	Filter- diepte (m -mv)	pH nulmeting	pH 1 ^e controle- meting	pH 2 ^e controle- meting	Ec (µS/cm) nulmeting	Ec 1 ^e (µS/cm) controle- meting	Ec 2 ^e (µS/cm) controle- meting	DOC 2 ^e (mg/l) controle- meting	S 2 ^e (mg/l) controle- meting
3000	2-4	4,8	4,4	3,7	93	126	816	340	75
3001	3-4	6,0	5,8	5,7	325	304	342	-	-
3001	6-7	4,8	4,6	4,2	182	173	615	300	74
	8-9	5,9	6,3	5,8	358	436	352	-	-
3002	2-3	5,5	5,2	5,7	105	107	172	20	8
	4-5	5,0	5,4	5,0	170	164	219	15	16

Peilbuis Filter- diepte (m -mv)	pH nulmeting	pH 1 ^e controle- meting	pH 2 ^e controle- meting	Ec nulmeting (μ S/cm)	Ec 1 ^e controle- meting (μ S/cm)	Ec 2 ^e controle- meting (μ S/cm)	DOC 2 ^e controle- meting (mg/l)	S 2 ^e controle- meting (mg/l)
6-7	4,8	4,4	4,2	147	179	568	210	62
3003 3-4	5,3	5,4	4,6	104	104	149	50	9,2
5-6	4,8	4,8	4,2	202	197	692	250	73
7-8	5,5	5,3	5,2	219	224	228	-	-
3004 4-5	5,2	5,3	4,9	168	205	162	-	-
6-7	5,0	4,8	4,3	171	180	273	56	24
3005 3-4	5,7	5,9	5,8	183	284	216	6,1	8,8
6-7	5,5	6,0	4,9	290	791	637	220	52
3006 2-3	-	4,9	5,6	-	1660	247	45	15
4-5	5,6	-	4,1	175	-	629	470	57
6-7	-	4,6	4,5	-	1779	551	350	34
3007 3-4	5,3	5,5	4,9	112	190	188	62	1,4
3008 ¹⁾ 3-4	5,4	4,9	4,7	178	200	273	3,1	9,2
5-6	4,6	4,4	4,3	243	253	280	4,3	19
7-8	5,6	5,2	5,2	275	293	298	4,1	27
3010 2-6	4,9	3,6	5,4	89	761	142	20	13

Resultaten en discussie praktijkproef

7

7 Resultaten en discussie praktijkproef

De effecten van de substraatdosering zijn gedurende een periode van circa 1,5 jaar gemonitord door middel van grondwaterbemonsteringen verdeeld over vier monitoringsrondes. Daarnaast is in de grondmonsters gekeken naar de gevormde neerslagen. In dit hoofdstuk worden deze monitoringsresultaten besproken.

Gedurende de praktijkproef hebben vier monitoringsrondes plaatsgevonden waarvan twee rondes waarbij een beperkte set aan monitoringspeilbuizen is bemonsterd en twee uitgebreide rondes waarbij alle filters zijn meegenomen. De monitoringsrondes hebben plaatsgevonden 13, 23, 49 en 60 weken nadat de substraatinjectie was afgerond (week 35 in 2008). In de bijlagen 3, 4, 5 en 6 zijn de ruwe veld- en analysedata van de monitoringsrondes opgenomen. Het verloop in concentraties van de geanalyseerde parameters tijdens de praktijkproef zijn door middel van grafieken weergegeven in figuren in de volgende bijlagen:

- Bijlage 7 - injector 3000 en 3010
- Bijlage 8 - peilbuizen op 1 m van injector 3010; 3006 en 3007
- Bijlage 9 - peilbuis op 2 m van injector 3010; 3005
- Bijlage - 10 - peilbuizen op 1 m van injector 3000; 3001, 3002 en 3003
- Bijlage - 11 peilbuis op 2 m van injector 3000; 3004
- En bijlage 12 - referentiepeilbuis 3008 buiten de invloedssfeer van de injectoren

7.1 Verbruik van het substraat

De praktijkproef is gestart met de injectie van substraat (hoge dosering) op injector 3010 (week 0), vervolgens heeft een tweede injectieronde plaatsgevonden (lage dosering) op injector 3000 (week 7).

De verspreiding en het verbruik van het substraat is gemonitord met behulp van de *dissolved organic carbon* of DOC-concentratie en elektrische geleidbaarheid (EC). De afname van de DOC-concentratie ter plaatse van de injectoren gedurende praktijkproef is te zien in figuur B7.1 en B7.2 (bijlage 7) en de afname van de EC. Na de injectie is een duidelijke afname van de DOC-concentratie in de injectoren waargenomen, enerzijds door verspreiding (dispersie) van het substraat naar de omringende bodem en anderzijds door verbruik (afbraak) van het substraat door micro-organismen. De afname van het substraat ter plaatse van de injector 3000 waarop een lage dosering is geïnjecteerd verloopt trager dan de afname rond injector 3010 waarop de hoge dosering is geïnjecteerd.

Figuur B8.1 (bijlage 8) toont de afname in DOC-concentratie voor verschillende bodemlagen op 1 m afstand van injector 3010. Uit deze grafiek is duidelijk een voorkeursstroming af te leiden, het substraat heeft wel peilbuis 3006 bereikt maar niet peilbuis 3007.

Ook op 1 m van de injector is na circa tien weken het substraatgehalte sterk afgenomen en neemt in de loop van de praktijkproef verder af.

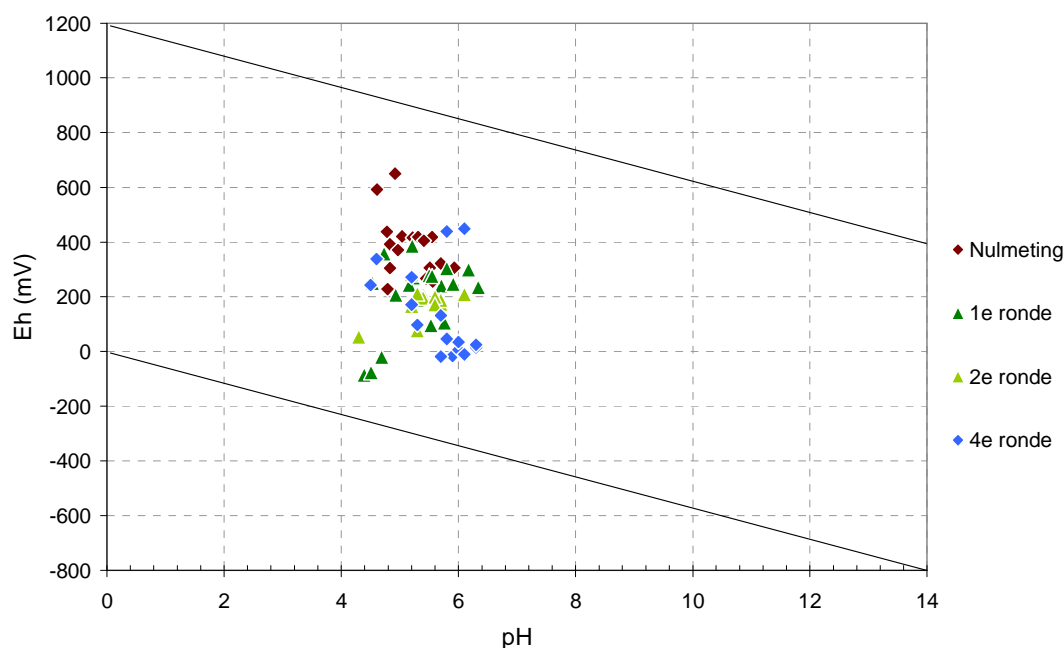
Aan de hand van figuur B9.1 (bijlage 9), het verloop van de DOC-concentratie op 2 m van de injector 3010, kan worden afgeleid dat het substraat niet direct na de injectie peilbuis 3005 heeft bereikt. Op 2 m van injector 3010 bereikt het substraat enkel de diepere bodemlagen. De verhoging van de DOC-concentratie ter plaatse van peilbuis 3005 is waargenomen nadat de tweede injectieronde heeft plaatsgevonden (lage dosering substraat op injector 3000). Mogelijk dat de onttrekking tijdens de tweede injectieronde er voor gezorgd heeft dat het substraat verder door de bodem is verspreid.

De verspreiding van het substraat geïnjecteerd via injector 3000 tijdens de tweede substraatinjectieronde is weergegeven in de grafieken van figuur B10.1 (bijlage 10) en figuur B11.1 (bijlage 11), de DOC-concentratie in verschillende bodemlagen op respectievelijk 1 en 2 m van injector 3000. Ook rondom injector 3000 is op 1 m van de injector een voorkeursstroming waar te nemen, het substraat bereikt niet elke peilbuis op corresponderende diepten even goed. In het grondwater uit de diepe filters (7-8 en 8-9 m -mv) is de DOC-concentratie maar beperkt verhoogd en neemt de concentratie met de tijd zelfs iets toe (peilbuis 3003 filter 7-8 m -mv). De gemeten EC-waarden vertonen een grilliger patroon dan de DOC-concentratie. Op 2 m van de injector neemt met de tijd de DOC-concentratie af maar de EC neemt toe, hier is geen duidelijke oorzaak voor aan te wijzen.

7.2 Veranderingen in zuurgraad en redox-condities

De injectie van substraat veroorzaakt in eerste instantie een verlaging van de pH van het grondwater, welke na verloop van tijd weer toeneemt en er een evenwicht ontstaat. In injector 3010, waar een hoge substraatconcentratie is gedoseerd stabiliseert de pH-waarde zich tussen pH 4 en pH 5. In het grondwater afkomstig uit injector 3000, lage substraat dosering, is de pH in de loop van de tijd opgelopen tot een waarde rond pH 6. In de bijlagen 7 tot en met 11 zijn eveneens grafieken van het verloop van de pH-waarde met de tijd opgenomen.

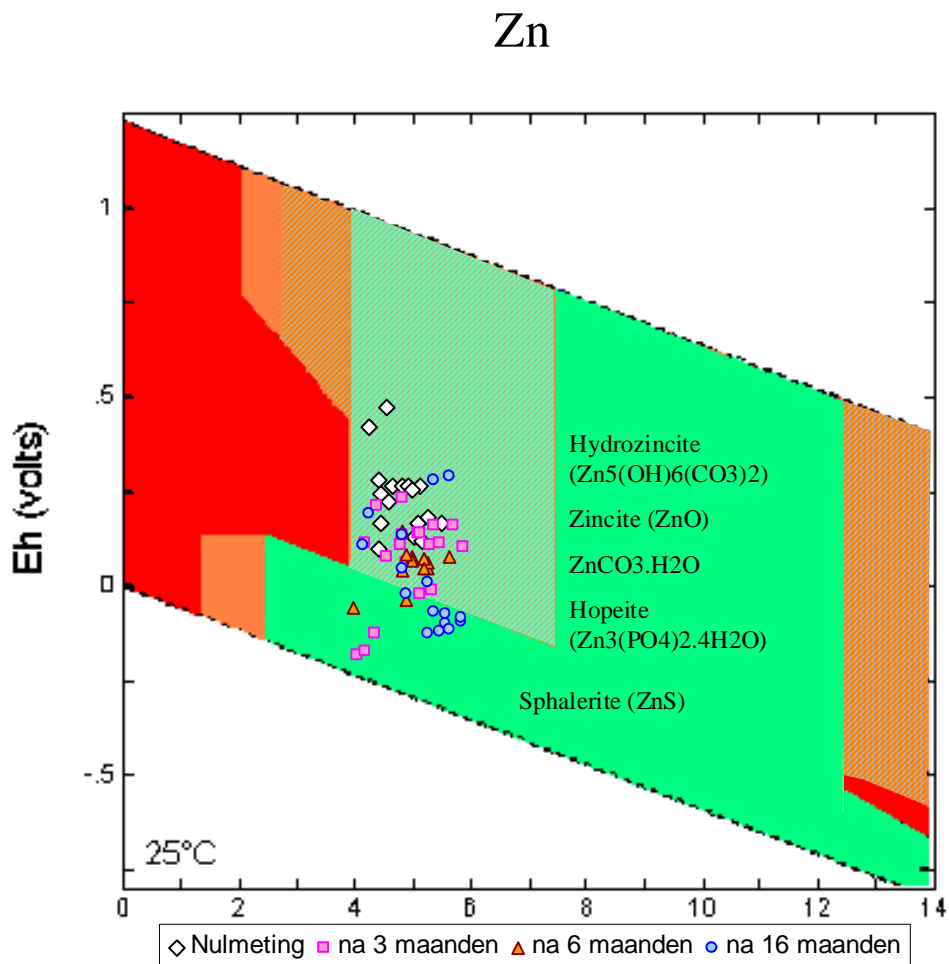
Door verbruik van het substraat door micro-organismen ontstaan gereduceerde omstandigheden, ijzer(II) komt vrij in het grondwater en het sulfaat wordt gereduceerd waarbij sulfides gevormd kunnen worden. De veranderingen in de redoxomstandigheden zijn onder andere gemonitord met behulp van de redoxpotentiaal. In figuur 7.1 (pagina 63) is een pH-Eh-diagram weergegeven waarin de resultaten van de veldmetingen tijdens de verschillende monitoringsronden zijn weergegeven. Hierin is te zien dat de redoxpotentiaal voor een aantal metingen tijdens de 4^e monitoringsronde weer op een vergelijkbaar niveau zijn als tijdens de nulmeting. Daarnaast zijn er ook metingen waar aan het eind van de praktijkproef nog wel een negatieve redoxpotentiaal aanwezig is.



Figuur 7.1 pH-EH-diagram met daarin de data van de monitoringspeilbuizen tijdens de verschillende monitoringsronden. De data van de referentiepeilbuis 3008 is niet opgenomen in de grafiek

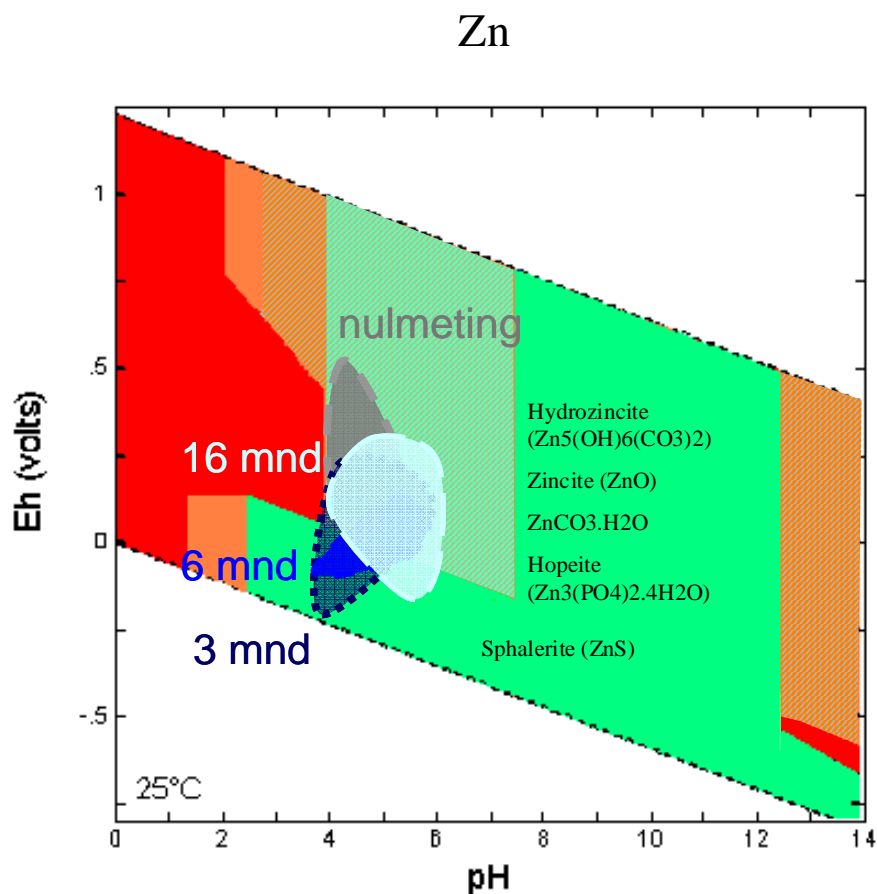
Met behulp van de vastleggingsindicator, figuur 7.2 (pagina 64), kan worden bepaald of onder de heersende redoxomstandigheden zink kan worden vastgelegd. Figuur 7.2 geeft de situatie weer van de redoxomstandigheden tijdens de nulmeting en na 3, 6 en 16 maanden nadat injectie van substraat heeft plaatsgevonden. In de vastleggingsindicator geeft een groene kleur aan dat vastlegging plaatsvindt in de vorm van neerslagen, arcering geeft vastlegging door adsorptie aan en een rode kleur geeft aan dat er geen vastlegging plaatsvindt en dat er risico op verspreiding aanwezig is.

In figuur 7.3 (pagina 65) is de evolutie van de redoxomstandigheden gedurende de praktijkproef gevisualiseerd. De redoxomstandigheden liggen tijdens de nulmeting voornamelijk in het gebied waar Zn door adsorptie aan ijzer- en aluminiumoxiden aan de bodem wordt gebonden. Na drie maanden zijn de redoxomstandigheden gedaald en is een deel van het proefgebied dusdanig anaeroob dat vastlegging plaatsvindt als sulfide. In de daarop volgende monitoringsronden na zes en 16 maanden stijgen de redoxomstandigheden in een gedeelte van het gebied weer. Nog steeds is een deel van het proefgebied anaeroob genoeg voor vastlegging door middel van sulfiden, echter het belangrijkste vastleggingsmechanisme is net als ten tijde van de nulmeting door middel van adsorptie.



Figuur 7.2 pH-Eh-diagram en de vastleggingsindicator voor zink met data op verschillende momenten tijdens de praktijkproef. De data van de referentiepeilbuis 3008 is niet opgenomen in de grafiek

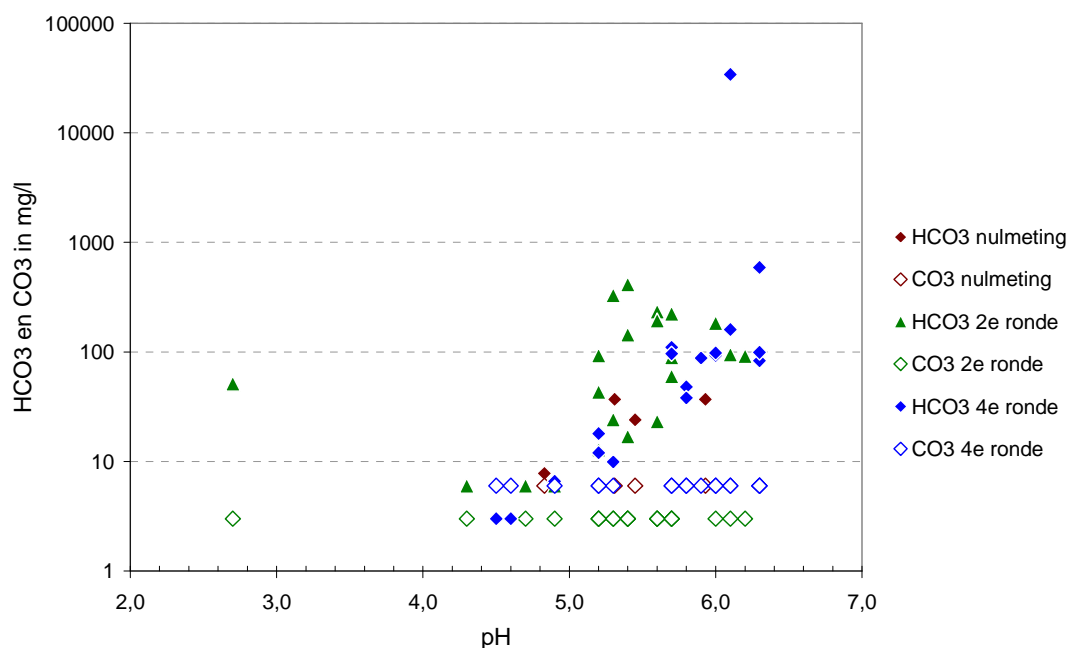
Naast de veranderingen in redoxpotentiaal zijn de effecten van de substraatdosering waar te nemen via de parameters ijzer, totaal-zwavel (sulfaat), bicarbonaat en carbonaat. Ook van deze parameters zijn grafieken die het verloop over de tijd weergegeven opgenomen in de bijlagen. Op basis van het carbonaatevenwicht zal bij een afnemende pH achtereenvolgens het carbonaat en het bicarbonaat uit de oplossing verdwijnen. De verhouding tussen pH, bicarbonaat en carbonaat is voor de nulmeting, 2^e en 4^e monitoringsronde weergegeven in de grafiek van figuur 7.4 (pagina 66).



Figuur 7.3 Evolutie van de redoxomstandigheden tijdens de praktijkproef. De redoxomstandigheden liggen tijdens de nulmeting (grijs) voornamelijk in het gebied waar Zn door adsorptie aan de bodem wordt gebonden. Na 3 (donker blauw), 6 (blauw) en 16 (wit) maanden zijn de redoxomstandigheden in een gedeelte van het gebied gedaald naar meer anaerobe omstandigheden waar vastlegging plaatsvindt als sulfide (sphalerite, ZnS). De redoxomstandigheden schuiven echter gedurende de monitoringsperiode steeds verder terug naar de redoxomstandigheden zoals gemeten tijdens de nulmeting

7.3 Zink- en cadmiumconcentraties

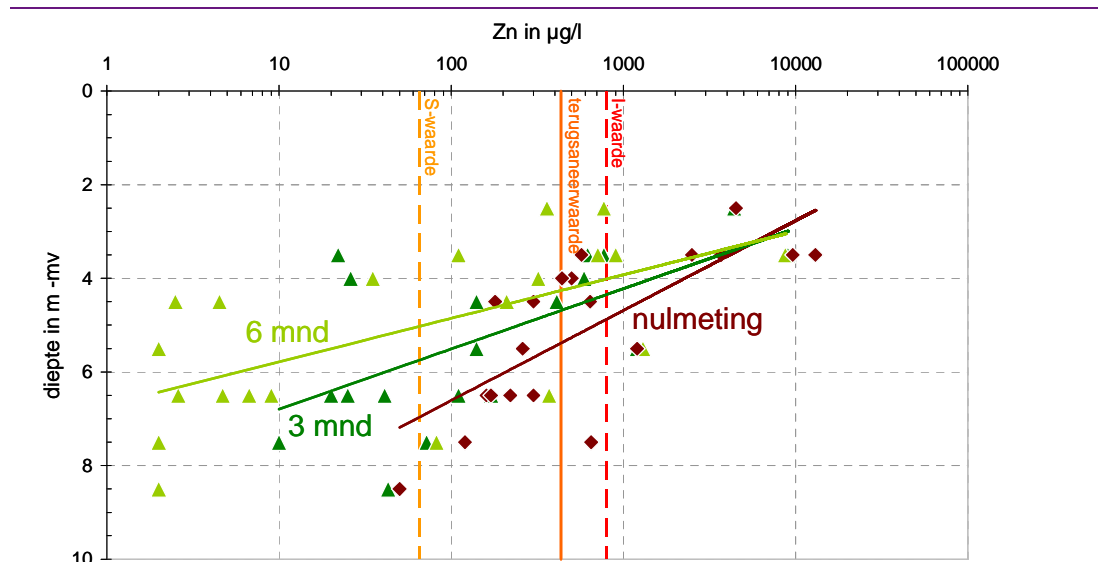
Eén van de doelen van de praktijkproef is het verlagen van de zink- en cadmiumconcentratie in het grondwater door middel van vastlegging van de metalen in zink- en cadmiumsulfides. Het verloop van de metalenconcentraties tijdens de praktijkproef zijn voor de verschillende bodemlagen en afstanden van de injectoren weergegeven in de grafieken van bijlage 7, 8, 9, 10 en 11.



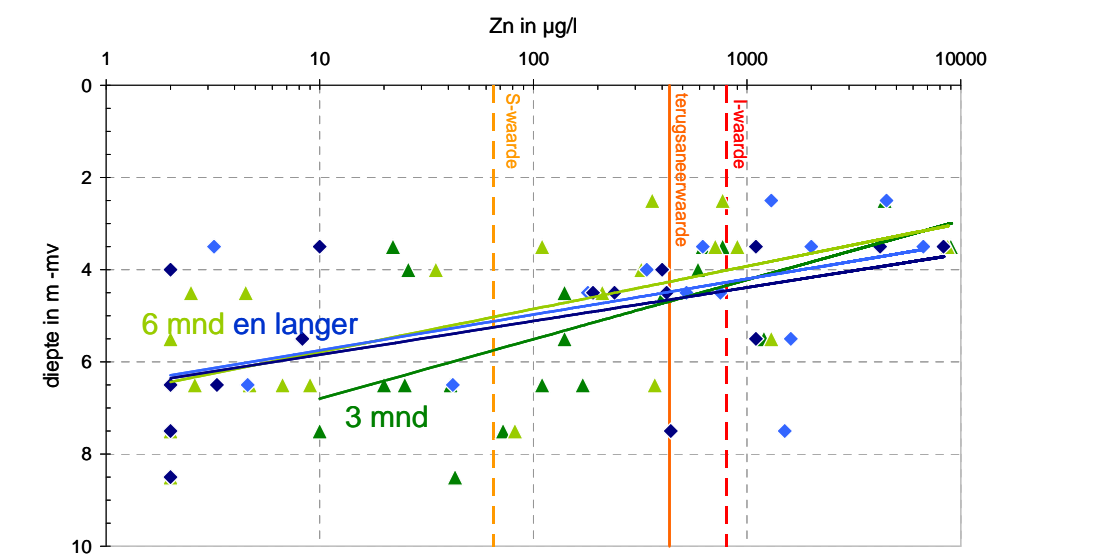
Figuur 7.4 pH versus de concentratie bicarbonaat en carbonaat zoals gemeten tijdens de verschillende monitoringsronden. De data van de referentiepeilbuis 3008 zijn niet opgenomen in de grafiek

Een samenvattend overzicht van de zinkconcentraties over de diepte is weergegeven in de grafiek van figuur 7.5, pagina 67. De cadmiumconcentraties met de diepte zijn weergegeven in figuur 7.6 (pagina 68).

In figuur 7.5A is duidelijk zichtbaar dat gedurende de eerste zes maanden van de praktijkproef de zinkconcentraties dalen ten opzichte van de nulsituatie. De lijn in deze figuur, een *best fit* met de kleinste kwadraten methode, laat zien dat met name in de diepere delen, van ongeveer 4 m -mv, van de bodem de concentraties aan Zn dalen. Er vindt een verschuiving plaats waarbij tijdens de nulmeting nog het merendeel van de meetpunten waarden bevatten boven de interventiewaarde voor Zn naar een situatie waarbij na drie en zes maanden het merendeel van de concentraties onder de interventiewaarde en terugsaneerwaarde zijn gezakt. In het ondiepe deel, het bodemtraject van 2-4 m -mv, blijven de concentraties hoog en boven de beoogde terugsaneerwaarde liggen. In de periode na zes maanden blijven met name in het bodemgedeelte onder de 4 m -mv de Zn-concentraties laag. In het ondiepe deel van de bodem stijgen de Zn-concentraties in het grondwater weer waarbij na 16 maanden na de start van de praktijkproef in sommige gevallen de concentraties vergelijkbaar zijn met de nulmeting. De stijging kan komen door het weer in oplossing gaan van als sulfiden neergeslagen Zn maar ook als gevolg van het instromen van met Zn verontreinigd infiltrerend regenwater.

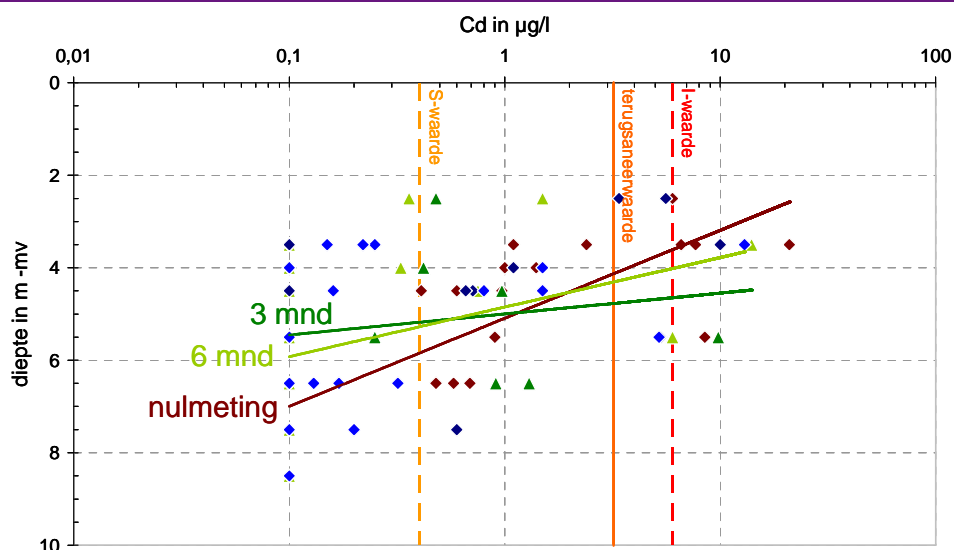


A



B

Figuur 7.5 Zinkconcentraties in het grondwater met de diepte, de trend in de data wordt gegeven door de lijn, in A gedurende de eerste zes maanden van de praktijkproef. Duidelijk zichtbaar is de daling gedurende deze periode, met name in de diepere delen van de bodem, van de zinkconcentraties ten opzichte van de nulmeting; B tijdens de gehele monitoringsperiode. Hier valt op dat tijdens de periode na zes maanden de zinkconcentraties in het grondwater langzaam stijgen. De data van referentiepeilbuis 3008 zijn niet opgenomen



Figuur 7.6 Zinkconcentraties in het grondwater met de diepte, de trend in de data wordt gegeven door de lijn. Ten opzichte van de nulmeting dalen in de eerste zes maanden de cadmiunconcentraties in het grondwater. In de periode na zes maanden (blauwe datapunten) stijgen de concentraties over het algemeen weer licht. De data van de referentiepeilbuis 3008 zijn niet opgenomen in de grafiek

Net als bij Zn blijkt uit figuur 7.6 dat ook voor Cd de hoogste concentraties aanwezig zijn in de bovenste bodemlagen tot circa 4 m -mv. Dit komt overeen met de oorzaak van de metalenverontreiniging, de zinkassen die in het verleden op maaiveld zijn aangebracht. Tijdens de praktijkproef dalen de Cd-concentraties in het grondwater in de eerste zes maanden over het algemeen tot onder de beoogde terugsaneerwaarde. In de maanden die daarop volgen nemen de Cd-concentraties in het grondwater wel weer licht toe. Alleen in het ondiepe deel van de bodem, tot 4 m -mv, komen de concentraties op een klein aantal plaatsen weer in de buurt van de concentraties gemeten gedurende de nulsituatie.

In zijn algemeenheid kan op basis van de monitoringsgegevens van Zn en Cd worden geconstateerd dat in het ondiepe deel van de bodem, dat wil zeggen tot circa 4 m -mv, de zware metalen worden vastgelegd gedurende de praktijkproef. Gedurende de proef remobiliseren deze echter weer of er stromen vanuit de zinkassen laag met het infiltrerende regenwater hoge concentraties in die niet als sulfiden worden vastgelegd. Dit laatste kan het gevolg zijn van het ontbreken aan een voldoende grote buffer aan sulfide om met de metalen neer te slaan, maar kan ook het gevolg zijn van de veranderingen in de redoxomstandigheden. In figuur 7.3 is te zien hoe de redoxomstandigheden tijdens de praktijkproef evolueren.

Wat daarbij opvalt is dat vlak na de injectie het merendeel van het gebied anaeroob is met gunstige condities voor het vastleggen van zware metalen als sulfiden maar dat na 16 maanden na de injectie de redoxomstandigheden voor een deel weer vergelijkbaar zijn met die aangetroffen tijdens de nulsituatie.

In de diepere delen van de bodem, dieper dan 4 m -mv worden Zn en Cd in het grootste gedeelte van het proefgebied neergeslagen als sulfiden waarbij de concentraties in het grondwater onder de beoogde terugsaneerwaarden komen. Ook hier wordt na de 4^e monitoringsronde wel een stijging in grondwaterconcentratie geconstateerd maar de concentraties voor zowel Zn als Cd zijn beduidend lager dan gemeten tijdens de nulsituatie. In de diepere delen heeft de vastlegging van de zware metalen een meer permanent karakter.

7.4 Onderzoek grond

Tijdens de tweede en de vierde bemonsteringsronde zijn ook grondmonsters genomen. Deze zijn geanalyseerd op diverse vormen van zwavel, enkele macro-componenten en zink en cadmium. De resultaten zijn samengevat in tabel 7.1 en 7.2 (pagina 70). In tabel 7.1 zijn de monsters rond injector 3000 opgenomen (lage substraatconcentratie), in tabel 7.2 de monsters rond injector 3010 (hoge substraatconcentratie). De monsters zijn genomen in maart 2009, 6000-serie, en oktober 2009, 7000-serie.

Tabel 7.1 Analyseresultaten grond (mg/kg d.s.) en interpretatie grondmonsters nabij injector 3000

Monsteromschrijving	6001+6002 (2,5-3)	6001+6002 (4-5)	6001+6002 (5,5-6,5)	7001+7002 (2,5-4)	7001+7002 (4-5,5)	7001+7002 (5,5-7)
Lutum (%)				10,0	3,7	5,1
Humus (%)				1,2	0,0	4,9
droge stof (d.s.) (%)	85,6	84,4	85,3	87,6	86,3	81,8
Metalen						
Zink (Zn)	28	3,2	4,2	30	23	12
IJzer (Fe)	11.000	1.200	1.400	7.700	5.900	3.500
Zwavel, totaal S	< 30	< 30	< 30	31	< 30	320
Cadmium (cd)				0,11	< 0,10	< 0,10
Overig						
Calciumcarbonaat (% d.s.)	2,3	0,3	0,4			
Calciumcarbonaat (g/kg d.s.)				0,10	0,11	0,11
Sulfaat	35	< 25	< 25	32	< 25	< 25
Sulfide (AVS)	< 15	< 0,8	< 0,8	1,8	1,1	5,5

Tabel 7.2 Analyseresultaten grond (mg/kg d.s.) en interpretatie grondmonsters nabij injector 3010

Monsteromschrijving	6003+6004	6003+6004	6003+6004	7003+7004	7003+7004	7003+7004
Diepte (m -mv)	(2,5-3)	(4-5)	(5,5-6,7)	(2,5-4)	(4-5,5)	(5,5-7)
Lutum (%)				10,0	3,7	5,1
Humus (%)				0,0	0,0	1,6
Droge stof (d.s.) (%)	86,6	86,7	84,3	86,6	84,2	83,7
Metalen						
Zink (Zn)	29	8,7	0,3	33	26	12
IJzer (Fe)	10.000	1.900	1.700	11.000	3.500	2.200
Zwavel, totaal S	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	150
Cadmium (Cd)				< 0,10	0,14	< 0,10
Overig						
Calciumcarbonaat (% d.s.)	1,4	0,6	0,3			
Calciumcarbonaat (g/kg d.s.)				0,10	0,11	0,11
Sulfaat	< 25	< 25	31	259	99	50
Sulfide (AVS)	< 3	< 3	4,5	0,5	1,4	1,0
<i>Sulfide-totaal</i>				< 18	< 22	< 22

De volgende zwavelvormen zijn bepaald:

- Sulfaat
- Zwavel-totaal
- Zuur hydrolyseerbare sulfiden (AVS), dit zijn amorfe, reactieve sulfiden die zware metalen kunnen binden

Zwavel-totaal bestaat, naast sulfaat-S en AVS, uit organisch gebonden zwavel en kristallijne sulfiden. Het zwavelgehalte in organische stof kan sterk variëren, maar in veel gevallen is 0,5 % een maximale waarde. Deze waarde is gebruikt om voor een aantal monsters het totaalgehalte aan sulfiden te berekenen.

Uit tabellen 7.1 en 7.2 blijken vaak aanzienlijke verschillen tussen de overeenkomstige monsters uit de 6000 en de 7000 serie. Dit wijst in de eerste plaats op een (sterk) heterogene bodemopbouw, daarnaast is ook de verspreiding van het substraat niet uniform geweest zoals in hoofdstuk 6 is beschreven.

De gehalten aan zuur hydrolyseerbare sulfiden (AVS) zijn steeds relatief laag, de hoogste waarden zijn circa 5 mg/kg d.s. in de onderste bodemlaag. Er zijn geen duidelijke verschillen tussen de injectoren met een lage en een hoge substraatinjectie.

De sulfiden zijn in de 7000-serie ook in de meest ondiepe bodemlaag aangetoond, die wijst op nieuwvorming als gevolg van substraatinjectie want het is niet aannemelijk dat ze in deze laag van nature voorkomen. Verder kan worden geconcludeerd dat 60 weken na de substraatinjectie ook in deze ondiepe laag nog sulfiden aanwezig zijn. De gehalten zijn echter (in alle monsters) zo laag dat ze geen substantiële buffer vormen om toekomstige emissies af te kunnen vangen. Daarom wordt geconcludeerd dat er uit oogpunt van de opbouw van een sulfidenbuffer te weinig substraat is geïnjecteerd of dat er bij de verspreiding in sterke mate voorkeursstroming is opgetreden.

Op basis van de eerder genoemde uitgangspunten is in de laag 2,5-4 meter maximaal 20 mg/kg d.s. totaal sulfide aanwezig en in de laag 5,5-7 meter 75 mg/kg d.s. In hoeverre deze sulfiden nog een bijdrage kunnen leveren aan de vastlegging van metalen is niet bekend, wel zal dit in elk geval minder zijn dan de AVS-fractie.

7.5 Kolomproeven vastlegging metalen

Met twee mengmonsters van grondmonsters die in maart 2009 zijn genomen zijn kolomproeven uitgevoerd. Dit betreft de lagen 4-5,5 m -mv en 5,5-7 m -mv. Gezien het redoxmilieu in de grond, zijn de kolommen in een zuurstofloze kast geplaatst. De kolomproef is uitgevoerd volgens NVN 7384. Aangezien het materiaal uit een zuurstofloos milieu afkomstig is, is de equilibratie periode aan het begin van de proef verkort van vier weken tot één week. Verder is de proef volgens de norm uitgevoerd. Het influent van beide kolommen bestond uit grondwater, afkomstig uit peilbuis 3008 (3-4 m -mv). Uit een visuele beoordeling blijkt dat de monsters uit de laag 4-5,5 m slechts hier en daar zwarte vlekken laten zien, de diepere monsters zijn voor een belangrijk deel donker tot zwart gekleurd. Het is in dit geval niet goed mogelijk om het zwarte ijzersulfide te onderscheiden van de aanwezige, donker gekleurde organische stof. Wel is duidelijk dat de bovenste laag niet veel ijzersulfiden bevat.

De analyseresultaten zijn samengevat in tabel 7.3 (pagina 72). Hieruit blijkt dat de grond uit de laag 4-5,5 m in staat is om de zure pH van het influent te neutraliseren, uitgezonderd in de laatste fractie. Daarentegen daalt de pH in het effluent van de laag 5,5-7 m (behalve in de eerste fractie) naar waarden tussen 4,2 en 4,4. Uit metingen na afloop van de proef blijkt dat de pH in de kolom hoger is dan in het effluent, wellicht als gevolg van ijzeroxidatie gedurende het opvangen van een fractie. Het verschil is circa 0,5 pH-eenheid. Als hiervan wordt uitgegaan, daalt de pH in de kolom slechts weinig en schommelen de effluent-waarden rond pH 5. Uit zowel redoxmetingen in de kolom als de aanwezigheid van ijzer, wordt afgeleid dat de redoxcondities overwegend (licht) ijzerreducerend zijn. De meetwaarden van de redoxpotentiaal in de kolommen zijn 220 mV voor de ondiepe monsters en 314 mV voor de diepe monsters. Zoals ook zichtbaar is in figuur 7.7 (pagina 73), worden cadmium en zink gedurende de volledige proef vrijwel volledig verwijderd uit het influent.

Tabel 7.3 Resultaten kolomproeven vastlegging metalen

Parameter	Influent kolom	Effluentwaarden bij cumulatieve L/S				
		1	2	4	6	10
Mengmonster 4-5,5 m						
pH	5,35	7,7	7,7	7,8	6,6	4,5 ¹⁾
Geleidbaarheid (µS/cm)	103	205	144	129	107	109
Cadmium (µg/l)	8,8	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
Zink (µg/l)	5700	210	8,9	7,4	33	28
IJzer (µg/l)	73	450	690	340	57	3600
Zwavel-tot. (mg/l)	7,2	13	8,2	8,1	8,1	8,2
Mengmonster 5,5-7 m						
pH	5,35	6	4,3	4,4	4,23	4,4 ²⁾
Geleidbaarheid (µS/cm)	103	161	115	106	106	102
Cadmium (µg/l)	8,8	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2
Zink (µg/l)	5700	160	33	22	27	110
IJzer (µg/l)	73	360	70	55	91	1900
Zwavel-tot. (mg/l)	7,2	15	8,3	8,4	8,1	8,4

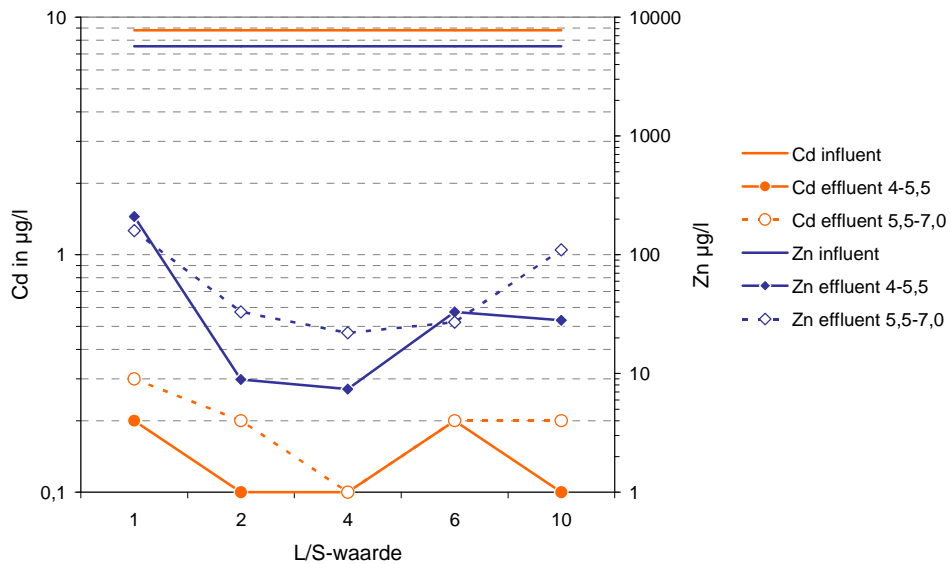
¹⁾ Meting in de kolom (na beëindiging proef) geeft een pH van 5,1

²⁾ Meting in de kolom (na beëindiging proef) geeft een pH van 5,0

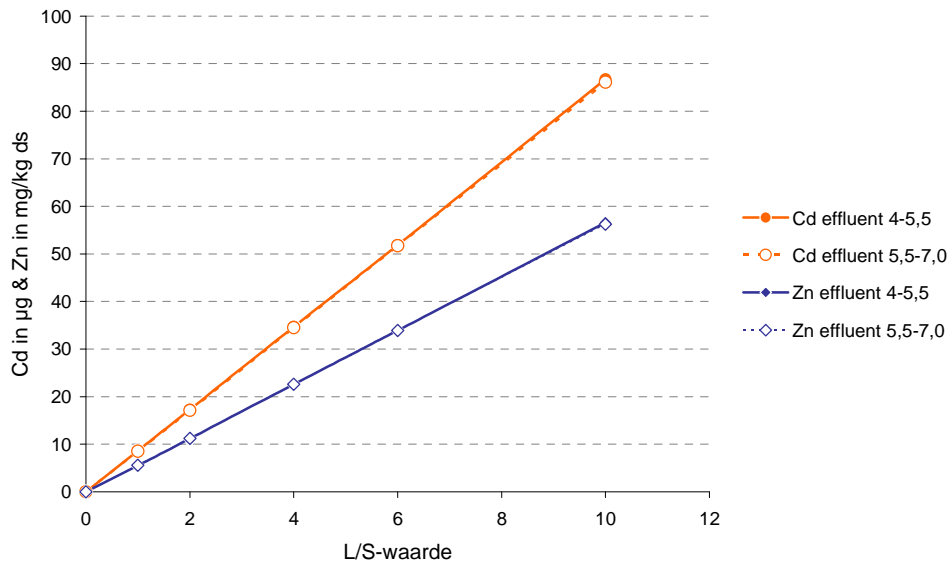
In de kolom met grond uit de laag 5,5-7 m lijkt de zinkconcentratie aan het eind van de proef te gaan stijgen. Ter indicatie van het concentratieniveau: in het influent ligt de concentratie cadmium een factor 1,5 en zink een factor 7 boven de interventiewaarde. De effluentwaarden van cadmium zijn steeds onder de streefwaarde, voor zink geldt dit voor de meeste fracties maar voor dit metaal liggen de concentraties onder de T-waarde.

Tabel 7.4 Cumulatieve verwijdering (negatief) of emissie (positief) van stoffen gedurende de kolomproeven

Parameter	4-5,5 m	5,5-7 m
Cadmium (µg/kg d.s.)	-88	-86
Zink (mg/kg d.s.)	-56,6	-56,3
IJzer (mg/kg d.s.)	15,6	7,6
Zwavel (mg/kg d.s.)	14,4	17,9



Figuur 7.7 Influent- en effluentconcentraties van cadmium en zink bij de kolomproeven



Figuur 7.8 Cumulatieve verwijdering van cadmium (µg/kg d.s.) en zink (mg/kg d.s.) tijdens de kolomproeven. De curves voor de twee dieptetrajecten vallen voor beide metalen over elkaar heen

In tabel 7.4 en figuur 7.8 zijn de verwijdering of emissie van stoffen gedurende de kolomproef samengevat. De resultaten per monster zijn in grote lijnen identiek: cadmium en zink worden verwijderd, ijzer en zwavel komen vrij als gevolg van ijzerreductie en de uitspoeling van sulfaat. Zwavel komt hoofdzakelijk vrij in de eerste fractie, waarschijnlijk omdat het poriewater van de monsters meer sulfaat bevat dan het grondwater. Voor de volgende fracties is het verschil met het influent niet groot. Gezien de redoxcondities is het niet aannemelijk dat er sulfide-oxidatie optreedt. Zeker is dat er geen sulfidevorming (meer) plaatsvindt. Uit het verloop van de lijnen in figuur 7.7 blijkt ook dat de maximale vastleggingscapaciteit nog niet is bereikt, er is immers nog geen duidelijke stabilisatie zichtbaar. Uit de resultaten kan worden berekend dat 0,8 $\mu\text{mol Cd/kg}$ droge grond is vastgelegd en 0,85 mmol zink. Het gehalte aan AVS is maximaal 0,17 mmol. Daarom kan cadmium wel volledig als sulfide zijn vastgelegd, maar zink niet. Naast sulfide-binding moeten dus andere reacties optreden, zoals adsorptie. De substraatinjectie kan ook daar een positief effect op hebben, bijvoorbeeld door een toename van de pH.

7.6 Discussie optredende processen tijdens de praktijkproef

Aan de hand van de waargenomen effecten van de substraatdosering kan het volgende beeld worden geschetst van de processen die gedurende de praktijkproef zijn opgetreden. Ondanks de heterogeniteiten in de bodem en de invloed die deze hebben gehad op de verspreiding van het substraat, dalen de redoxomstandigheden in het proefgebied. De redoxomstandigheden dalen, met name in de eerste zes maanden van de proef, voldoende om sulfidevorming te laten optreden. Deze daling gaat samen met een daling van de Zn- en Cd-concentraties in het grondwater wat duidt op de vastlegging van beide metalen in een sulfidische vorm. Dit kan als ZnS of CdS maar ook als co-precipitaat in ijzersulfiden (FeS).

In de monitoringsperiode die daarop volgt, stijgen de redoxomstandigheden in het proefgebied weer, de redoxomstandigheden zijn dan overwegend ijzerreducerend. Voor de optimale werking van de techniek is het wenselijk dat sulfaatreducerende omstandigheden overheersen; hoe lager de redoxomstandigheden hoe stabielere metaalbindingen zijn. Uit de laboratoriumproeven, maar ook de literatuur, blijkt dat de metaalbindingen die tijdens ISMP gevormd worden ook weer in oplossing kunnen gaan. Wanneer het geïnjecteerde substraat verbruikt is en de redoxomstandigheden onder invloed van natuurlijke processen, zoals het infiltreren van aerobisch regenwater, weer terugkeren naar de ijzerreducerende omstandigheden zullen de vastgelegde metalen uiteindelijk weer vrijkomen. In het proefgebied ziet men in die periode de Zn- en Cd-concentraties inderdaad weer stijgen. Deze stijging heeft echter niet tot gevolg dat de concentraties voor beide metalen stijgen naar waarden die tijdens de nulmeting zijn aangetroffen (zie figuur 7.5 en 7.6). In met name het bodemtraject onder de 4 m -mv blijven de concentraties voor beide metalen ver onder de beoogde terugstreefwaarde. Geconstateerd wordt dus dat de zware metalen na te zijn vastgelegd als sulfide bij de oxidatie van deze neerslagen niet in hoge concentraties in het grondwater terechtkomen.

Bij oxidatie van de sulfiden is het aannemelijk te veronderstellen dat beide metalen worden vastgelegd in andere bindingsvormen -geadsorbeerd of ingebouwd in de gevormde ijzer/aluminiumoxiden of carbonaten- waardoor de grondwaterconcentraties laag blijven en de verontreinigingsflux niet drastisch toeneemt.

ISMP zoals toegepast tijdens deze praktijkproef berust op het injecteren van melasse. In veel grond en grondwatersystemen treedt opgelost organisch materiaal of DOC op als complexvormer van zware metalen waardoor deze metalen in oplossing blijven. De DOC-concentratie gemeten tijdens de nulmeting was gemiddeld 2,8 mg/l en stijgt na injectie van melasse naar circa 63 mg/l gemeten tijdens de tweede monitoringsronde. Aan het einde van de monitoringsperiode wordt een gemiddelde DOC-concentratie van circa 8 mg/l gemeten. Een mogelijke oorzaak van de lichte toename van de concentratie aan Zn en Cd zou de complexatie van de metalen kunnen zijn als gevolg van de toegenomen concentraties aan organisch materiaal in het grondwater. Echter, complexatie van Zn en Cd door melasse wordt niet gezien als een belangrijk proces omdat melasse, dat voornamelijk bestaande uit suikers, weinig tot geen functionele groepen bevatten om de kationen Zn en Cd te complexeren.

Kenmerk R002-0489655ORK-sbb-V01-NL

Conclusies en aanbevelingen

8

8 Conclusies en aanbevelingen

Toepasbaarheid concept

Uit de laboratoriumproeven blijkt dat de keuze van het substraat en de concentratie daarvan per locatie kan verschillen en dat een hogere substraat dosering niet automatisch resulteert in betere resultaten. Uit de resultaten van de praktijkproef blijkt dat de zink- en cadmiumconcentraties in het grondwater onder invloed van de effecten van de substraatdosering zijn afgenomen. Uit de praktijkproef blijkt ook dat het substraat zich heterogeen heeft verspreid in het proefgebied. De gelaagdheid van de bodem is bepalend voor de injecteerbaarheid en verspreiding van het substraat en daarmee ook bepalend voor het succes van de techniek. Alleen gedetailleerde kennis van de techniek gecombineerd met kennis over de lokale bodemopbouw en geologie maken van in situ zware metalenprecipitatie een succesvol toepasbaar saneringsconcept.

Stabiliteit metaalbinding

Aan de hand van de waargenomen effecten van de substraatdosering blijkt dat ter plaatse van de praktijkproef de redoxomstandigheden overwegend ijzerreducerend zijn. Voor optimale werking van de techniek is het wenselijk dat de redoxpotentiaal nog lager is waarbij sulfaatreducerende omstandigheden overheersen. Hoe lager de redoxomstandigheden hoe stabielere de metaalbindingen zijn. Uit de diverse laboratoriumproeven en de praktijkproef blijkt dat de gecreëerde metaalbindingen omkeerbaar zijn. Wanneer het geïnjecteerde substraat verbruikt is en de redoxomstandigheden onder invloed van natuurlijke processen weer terugkeren naar de ijzerreducerende omstandigheden, zullen de vastgelegde metalen uiteindelijk weer vrijkomen. Hierbij valt op dat de verspreidingsflux van de metalen door toepassing van in situ zware metalenprecipitatie wel vertraagd wordt waardoor de grondwaterconcentraties aan zware metalen met de saneringstechniek onder interventiewaarde niveau kunnen worden gebracht. De verontreinigingsflux wordt daardoor verlaagd waardoor ook eventuele aan de verontreiniging geassocieerde risico's worden gereduceerd.

Geconstateerd wordt dat de zware metalen na te zijn vastgelegd in sulfide vorm bij de oxidatie van deze neerslagvormen niet in hoge concentraties in het grondwater terecht komen. Bij oxidatie worden de metalen zeer waarschijnlijk vastgelegd in andere bindingsvormen -geadsorbeerd of ingebouwd in gevormde ijzer/aluminiumoxiden of carbonaten- die de verontreinigingsflux positief beïnvloeden. Men zal zich dan ook bij in situ zware metalenprecipitatie niet moeten blind staren op één bindingsvorm maar moeten kijken naar alle mogelijke bindingsvormen, dus ook de niet sulfidische neerslagen, die het verspreidingsgedrag van de metalen gunstig kunnen beïnvloeden.

8.1 Aanbevelingen

Tijdens de praktijkproef is een grote hoeveelheid aan informatie verzameld. Het consortium is van mening dat hierin nog voldoende nieuwe informatie in aanwezig is die kan helpen bij het doorgronden van de processen die een rol spelen tijdens ISMP. Het consortium heeft bijvoorbeeld geen geochemische evenwichtsberekeningen uitgevoerd tijdens de verschillende fasen van het project; hiervoor ontbrak de tijd en de middelen. Om verdere analyse van de praktijkproef mogelijk te maken stelt het consortium alle data die is verzameld tijdens de proef beschikbaar voor verdere analyses. De data is als Microsoft Excel rekensheets via de Soilpedia website (www.soilpedia.nl) van SKB beschikbaar.

Op basis van de ervaringen opgedaan tijdens de proef met ISMP worden de volgende aanbevelingen gedaan voor eventueel verder onderzoek naar de techniek en de achterliggende principes:

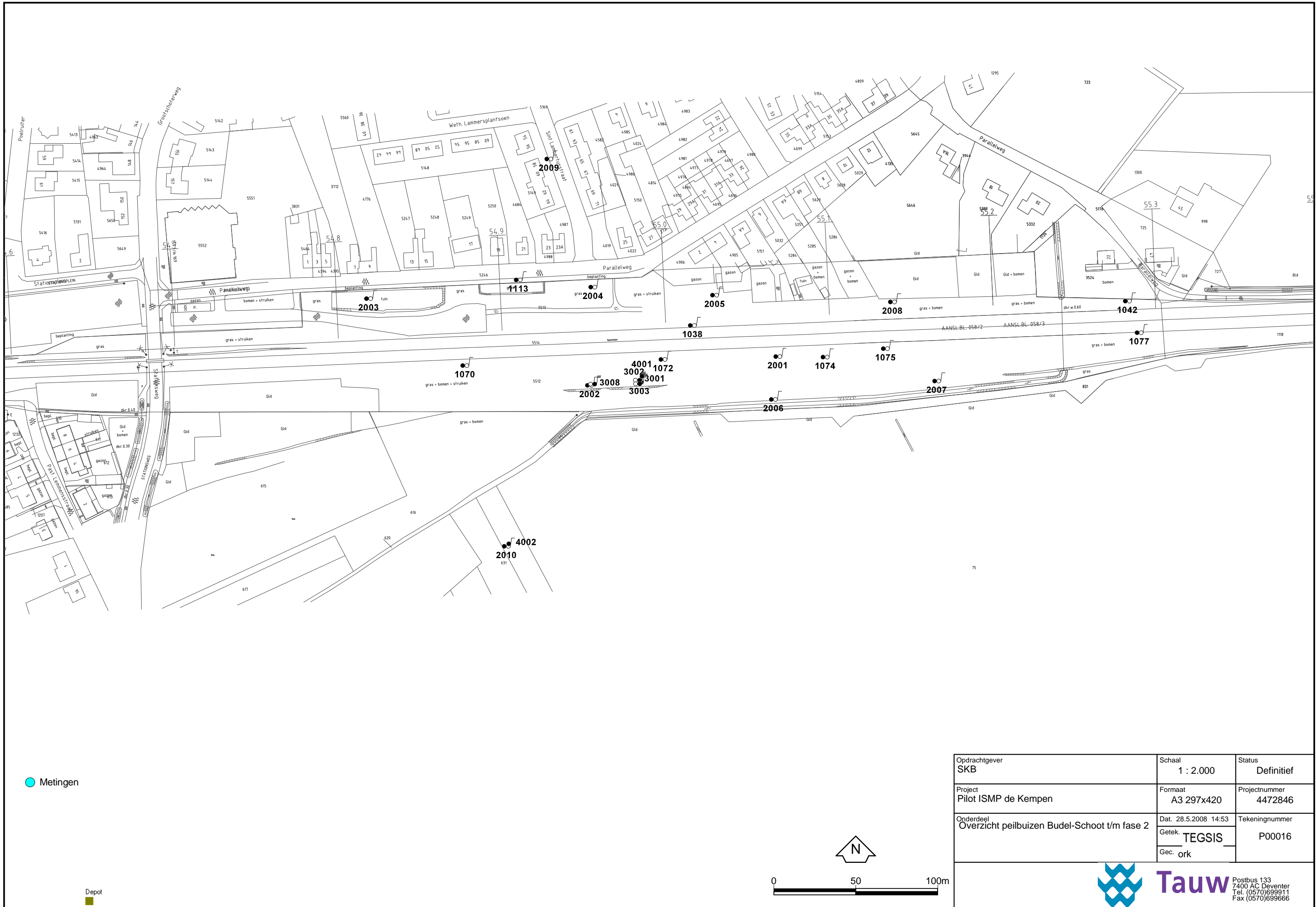
- Op basis van de waarnemingen tijdens de praktijkproef wordt afgeleid dat de ontstane sulfiden langzaam weer oxideren. Geochemische evenwichtsberekeningen kunnen inzicht verschaffen welke sulfiden er ontstaan en naar welke mineralen deze omzetten wanneer de redoxomstandigheden verschuiven van sulfaat- naar ijzerreducerend
- Bovenstaande modellering kan ook inzicht verschaffen welk proces en welke minerale fasen uiteindelijk de lange termijn verontreinigingsflux, dat wil zeggen het uitspoelen van de zware metalen, bepaald na de toepassing van ISMP
- Inzicht in de stabiliteit van de gevormde sulfide neerslagen is van belang bij het toepassen en begrijpen van de techniek. We weten dat de sulfide neerslagen worden gevormd en we weten dat ze weer in oplossing gaan bij het aërober worden van het grondstelsel. Er is echter geen inzicht hoe snel de vorming van de neerslagen verloopt en met welke snelheid ze weer oplossen. Inzicht in de kinetiek van deze processen kan helpen de praktische toepasbaarheid van de techniek verder vorm te geven. Hierbij kan gedacht worden aan de termijn waarin bijvoorbeeld herhalingsinjecties met melasse moeten plaatsvinden wanneer het bodemsysteem van nature niet sulfaatreducerend is
- Bij ISMP wordt nu voornamelijk gedacht aan het stimuleren van neerslagen van metaalsulfiden. Uit de praktijkproef blijkt dat alleen het stimuleren van vastlegging in deze mineraalvormen niet een volledige, lange termijn oplossing biedt voor de onderzochte zware metalen. Binnen de in situ saneringswereld zal daarom het besef moeten groeien dat de natuurlijke omstandigheden van het bodemsysteem bepalend moet zijn welke neerslagvorm de beste lange termijn oplossing biedt, en dat hoeft niet per definitie een sulfide neerslag te zijn. Men zal ook moeten kijken naar andere mineraalfasen waaronder oxiden of carbonaten en andere vastleggingsmechanismen bij de in situ sanering van zware metalen middels ISMP

Bijlage

1

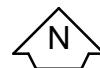
Situering injectie- en monitoringsysteem op het NS-emplacement

Budel-Schoot



● Metingen

Depot



Oprachtgever SKB	Schaal 1 : 2.000	Status Definitief
Project Pilot ISMP de Kempen	Formaat A3 297x420	Projectnummer 4472846
Onderdeel Overzicht peilbuizen Budel-Schoot t/m fase 2	Dat. 28.5.2008 14:53	Tekeningnummer P00016
	Getek. TEGSIS	
	Gec. ork	



Tauw Postbus 133
7400 AC Deventer
Tel. (0570)699911
Fax (0570)699666

Bijlage

2

Veld- en analysedata nulmeting

Grondmonsters

De samenstelling van de mengmonsters afkomstig van de grondmonsters genomen tijdens fase 1 van de aanleg van het monitoringsysteem is weergegeven in tabel B2.1. De mengmonsters zijn vervolgens geanalyseerd op zware metalen en op organische stof IB.

Tabel B2.1 Samenstelling mengmonsters grondmonsters fase 1

Mengmonster*	Diepte (m -mv)	Deelmonsters opgenomen in mengmonster (diepte in m -mv)
1	2-3	3001 (2-2.5) + 3001 (2.5-3) + 3002 (2-2.5) + 3002 (2.5-3) + 3003 (2-2.5) + 3003 (2.5-3) + 3008 (2-2.5) + 3008 (2.5-3)
2	3-4	3001 (3-4) + 3002 (3-3.5) + 3002 (3.5-4) + 3003 (3-3.5) + 3003 (3.5-4) + 3008 (3-3.5) + 3008 (3.5-4)
3	4-5	3001 (4-4.5) + 3001 (4.5-4) + 3002 (4-4.5) + 3002 (4.5-5) + 3003 (4-4.5) + 3003 (4.5-5) + 3008 (4-4.5) + 3008 (4.5-5)
4	5-6	3001 (5-5.5) + 3001 (5.5-6) + 3002 (5-5.5) + 3002 (5.5-6) + 3003 (5-5.5) + 3003 (5.5-6) + 3008 (5-5.5) + 3008 (5.5-6)
5	6-7	3001 (6-7) + 3002 (6-6.5) + 3002 (6.5-7) + 3003 (6-6.5) + 3003 (6.5-7) + 3008 (6-6.5) + 3008 (6.5-7)
6	7-8	3001 (7-7.5) + 3001 (7.5-8) + 3003 (7-7.5) + 3003 (7.5-8) + 3008 (7-7.5) + 3008 (7.5-8)
7	8-9	3001 (8-8.1) + 3001 (8.1-8.9) + 3001 (8.9-9)

* Het samenstellen van de mengmonsters heeft plaatsgevonden in het laboratorium

In tabellen B2.2 en B2.3 is een overzicht en interpretatie gegeven van de analyseresultaten van de grondmengmonsters.

Tabel B2.2 Analyseresultaten grond (mg/kg d.s.) en interpretatie

Mengmonster	1	2	3	4
Diepte (m -mv)	2,0-3,0	3,0-4,0	4,0-5,0	5,0-6,0
Lutum (%)	10,0	10,0	5,2	2,1
Humus (%)	1,3	0,8	0,6	0,3
METALEN				
arseen (As)	1,4	<1,0	<1,0	<1,0
cadmium (Cd)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
chrom (Cr)	14	7,3	22	6,9
koper (Cu)	3,7	3,1	5,2	1,5
kwik (Hg)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
lood (Pb)	6,6	4,1	4,6	3,5
nikkel (Ni)	8,0	3,4	16	3,0
zink (Zn)	29	20	16	18
Niet in STI-lijst van de Wbb				
organische stof vlgs. IB-methode (% van Ds)	0,2	0,1	<0,1	0,1

Tabel B2.3 Analyseresultaten grond (mg/kg d.s.) en interpretatie

Mengmonster	5	6	7
Diepte (m -mv)	6,0-7,0	7,0-8,0	8,0-9,0
Lutum (%)	5,1	3,0	2,6
Humus (%)	3,0	1,9	0,7

METALEN						
arseen (As)	8,9	-	4,8	-	<1,0	-
cadmium (Cd)	0,14	-	<0,10	-	<0,10	-
chrom (Cr)	18	-	17	-	10	-
koper (Cu)	4,0	-	1,3	-	1,3	-
kwik (Hg)	<0,05	-	<0,05	-	<0,05	-
lood (Pb)	3,9	-	3,3	-	2,1	-
nikkel (Ni)	11	-	9,8	-	6,6	-
zink (Zn)	17	-	9,7	-	4,3	-

Niet in STI-lijst van de Wbb			
organische stof vlgs. IB-methode (% van Ds)	2,6	1,6	0,3

Grondwatermonsters

In tabellen B2.4, B2.5, B2.6, B2.7 en B2.8 is een overzicht en interpretatie gegeven van de analyseresultaten van de nulmeting van de monitoringsfilters 3001 tot en met 3008.

Tabel B2.4 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3001	3001	3001	3002	3002					
Filterdiepte (m -mv)	(3-4)	(6-7)	(8-9)	(2-3)	(4-5)					
METALEN										
cadmium (Cd)	2,4	+	0,58	+	<0,10	-	6,0	++	0,60	+
cobalt (Co)					2,1	-				
molybdeen (Mo)					<2,0	-				
seleen (Se)					<5,0	<<				
zink (Zn)	9600	+++	220	+	50	-	4500	+++	640	++
Niet in STI-lijst van de Wbb										
aluminium (Al)					23					
calcium (Ca)					23000					
ijzer (Fe)	20000		1200		15000		61		540	
kalium (K)					4800					
natrium (Na)					25000					
nitraat als N (mg N/l)					<0,05					
Orthofosfaat (mg P/l)					0,00					
bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)					37					
carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)					<6,00					
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)					2,2					
stikstof vlgs. Kjeldahl (mg N/l)					0,14					
sulfaat (mg/l)					110					
<<	Geen streefwaarden voor grondwater, alleen tussen- en interventiewaarde bekend									

Tabel B2.5 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3002	3003	3003	3003	3004					
Filterdiepte (m -mv)	(6-7)	(3-4)	(5-6)	(7-8)	(4-5)					
METALEN										
cadmium (Cd)	0,69	+	7,7	+++	0,90	+	<0,10	-	0,97	+
cobalt (Co)			11	-	27	+	6,1	-		
molybdeen (Mo)			<2,0	-	<2,0	-	<2,0	-		
seleen (Se)			<5,0	<<	<5,0	<5,0	<5,0	<<		
zink (Zn)	300	+	2500	+++	260	+	120	+	300	+
Niet in STI-lijst van de Wbb										
aluminium (Al)			110		180		19			
calcium (Ca)			9700		13000		14000			
ijzer (Fe)	250		<20		500		16000		140	
kalium (K)			2200		4800		4600			
natrium (Na)			9000		8900		9400			
nitraat als N (mg N/l)			0,22		0,35		<0,05			
orthofosfaat (mg P/l)			<0,00		<0,00		0,00			
bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)			37		7,8		24			
carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)			<6,00		<6,00		<6,00			
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)			4,2		3,5		1,2			
stikstof vlgs. Kjeldahl (mg N/l)			0,12		<0,10		<0,10			
sulfaat (mg/l)			36		70		73			
<<	Geen streefwaarden voor grondwater, alleen tussen- en interventiewaarde bekend									

Tabel B2.6 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3004	3005	3005	3006	3007					
Filterdiepte (m -mv)	(6-7)	(3-4)	(6-7)	(4-5)	(3-4)					
METALEN										
cadmium (Cd)	0,48	+	6,6	+++	<0,10	-	0,41	+	1,1	+
zink (Zn)	160	+	3700	+++	170	+	180	+	570	++
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	660		480		10000		29		250	

Tabel B2.7 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3008	3008	3008			
Filterdiepte (m -mv)	(3-4)	(5-6)	(7-8)			
METALEN						
cadmium (Cd)	21	+++	8,5	+++	<0,10	-
zink (Zn)	13000	+++	1200	+++	650	++
Niet in STI-lijst van de Wbb						
ijzer (Fe)	<20	<20	12000			

Tabel B2.8 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3000		3010		3020	
Filterdiepte (m -mv)	(2-6)		(2-6)		Opgemengd grondwater t.b.v injectie	
METALEN						
cadmium (Cd)	1,4	+	1,0	+	1,6	+
zink (Zn)	500	++	440	++	450	++
Niet in STI-lijst van de Wbb						
ijzer (Fe)	<20		<20		400	
Zwavel (totaal S)					14000	

Bijlage

3

Veld- en analysedata eeste monitoringsronde

Tabel B3.1 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3000		3001		3001		3002		3002	
Filterdiepte (m -mv)	(2-6)		(6-7)		(8-9)		(4-5)		(6-7)	
METALEN										
cadmium (Cd)	0,42	+	0,91	+	<0,10	-	<0,10	-	<1,3	-
zink (Zn)	590	++	110	+	43	-	140	+	170	+
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	14000		7000		9000		4200		4100	
Zwavel-totaal (S)	67000		84000		26000		13000		100000	
pH (-)	4,2		4,4		4,9		5,8		4,5	
EC (µS/cm)	676		606		366		162		605	
Temperatuur (°C)	13,6		13,3		13,0		14,4		12,9	
Zuurstof (mg/l)	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
Redox (mV)	386		-86		207		304		-76	

Tabel B3.2 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3003		3003		3003		3004		3004	
Filterdiepte (m -mv)	(3-4)		(5-6)		(7-8)		(4-5)		(6-7)	
METALEN										
cadmium (Cd)	<0,10	-	0,28	-	<0,10	-	0,97	+	<0,10	-
zink (Zn)	770	++	140	+	10	-	410	+	20	-
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	20000		15000		16000		540		20000	
Zwavel-totaal (S)	730		59000		17000		16000		24000	
pH (-)	5,5		4,7		5,8		5,2		5,5	
EC (µS/cm)	225		517		225		166		221	
Temperatuur (°C)	n.b		14,0		13,8		14,3		14,8	
Zuurstof (mg/l)	n.b		0,0		0,0		1,9		0,0	
Redox (mV)	n.b		-20		105		270		96	
n.b	Niet bepaalbaar									

Tabel B3.3 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3005		3005		3006		3006		3006	
Filterdiepte (m -mv)	(3-4)		(6-7)		(2-3)		(4-5)		(6-7)	
METALEN										
cadmium (Cd)	<0,10	-	<0,10	-	0,48	+	<0,10	-	<0,10	-
zink (Zn)	620	++	25	-	4400	+++	140	+	41	-
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	8000		34000		7600		23000		61000	
Zwavel-totaal (S)	7200		51000		10000		45000		6700	
pH (-)	6,2		5,2		6,3		4,5		5,7	
EC (µS/cm)	214		1056		147		595		476	
Temperatuur (°C)	14,2		13,0		14,7		13,6		13,2	
Zuurstof (mg/l)	0,5		0,0		8,9		0,0		0,0	
Redox (mV)	300		243		235		251		241	

Tabel B3.4 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3007		3008		3008		3008		3010	
Filterdiepte (m -mv)	(3-4)		(3-4)		(5-6)		(7-8)		(2-6)	
METALEN										
cadmium (Cd)	<0,10	-	14	+++	9,8	+++	<0,10	-	<0,10	-
zink (Zn)	22	-	9000	+++	1200	+++	72	+	26	-
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	9500		<20		28		14000		10000	
Zwavel-totaal (S)	4300		13000		23000		32000		12000	
pH (-)	5,9		5,5		4,7		5,5		5,3	
EC (µS/cm)	273		156		235		266		163	
Temperatuur (°C)	15,2		13,8		12,7		12,1		14,6	
Zuurstof (mg/l)	7,7		2,2		1,7		0,0		0,0	
Redox (mV)	247		279		357		275		189	

Bijlage

4

Veld- en analysedata tweede monitoringsronde

Tabel B4.1 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3000	3001	3001	3001	3002
Filterdiepte (m-mv)	(2-6)	(3-4)	(6-7)	(8-9)	(2-3)
METALEN					
Cadmium (Cd)	<0,10	- <0,10	- <0,10	- <0,10	-
Zink (Zn)	35	- 900	+++ 6,7	- <2,0	-
Niet in STI-lijst van de Wbb					
IJzer (Fe)	28000	29000	93000	8800	
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)	110	18	320	2,8	
Bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	93,0	91,8	414	94,6	23,3
Sulfaat (mg/l)	7,7	37	140	71	
Organische Zwavel	19000	11000	43000	21000	
pH (-)	5,5	5,3	5,0	5,7	5,6
EC (µS/cm)	391	328	941	396	563
Zuurstof (mg/l)	54,0*	n.b.	0,3	0,3	n.b.
Redox (mV)	505	n.b.	432	433	n.b.
Temperatuur (°C)	10,1	10,6	10,7	10,7	1,6

* Ongebruikelijke waarde, hier is mogelijk een meetfout gemaakt met de veldmetingen

n.b. Niet bepaalbaar in verband met te langzame toestroming van het grondwater om een veldmeting te kunnen uitvoeren

Tabel B4.2 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3002	3002	3003	3003	3003
Filterdiepte (m-mv)	(4-5)	(6-7)	(3-4)	(5-6)	(7-8)
METALEN					
Cadmium (Cd)	0,36	- <0,10	- <0,10	- <0,10	- <0,10
Zink (Zn)	360	+ 4,5	- 370	+ <2,0	- <2,0
Niet in STI-lijst van de Wbb					
IJzer (Fe)	2000	33000	23000	33000	17000
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)	1,2	94	6,2	34	8,7
Bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0
Carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	12,9	144	51,4	89,3	60,1
Sulfaat (mg/l)	46	100	13	36	46
Organische Zwavel	13000	33000	3700	12000	14000
pH (-)	5,4	5,0	5,1	4,8	5,4
EC (µS/cm)	178	619	187	385	264
Zuurstof (mg/l)	3,4	0,3	n.b.	0,3	0,3
Redox (mV)	390	420	n.b.	398	412
Temperatuur (°C)	8,6	8,6	10,0	10,5	9,5

n.b. Niet bepaalbaar in verband met te langzame toestroming van het grondwater om een veldmeting te kunnen uitvoeren

Tabel B4.3 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3004		3004		3005		3005		3006	
Filterdiepte (m-mv)	(4-5)		(6-7)		(3-4)		(6-7)		(2-3)	
METALEN										
Cadmium (Cd)	0,75	+	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	1,5	+
Zink (Zn)	210	+	9,0	-	710	++	2,6	-	770	++
Niet in STI-lijst van de Wbb										
IJzer (Fe)	460		61000		8500		30000		1500	
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)	0,97		81		<0,10		320		13	
Bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	<3,0		<3,0		<3,0		<3,0		<3,0	
Carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	24,2		233		184		328		43,3	
Sulfaat (mg/l)	52		30		33		76		46	
Organische Zwavel	16000		19000		9000		27000		13000	
pH (-)	5,7		5,3		6,3		5,1		4,8	
EC (µS/cm)	201		436		281		847		181	
Zuurstof (mg/l)	2,8		0,3		n.b.		0,4		n.b.	
Redox (mV)	301		424		n.b.		436		n.b.	
Temperatuur (°C)	10,5		10,5				10,9			

n.b. Niet bepaalbaar in verband met te langzame toestroming van het grondwater om een veldmeting te kunnen uitvoeren

Tabel B4.4 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3006		3006		3007		3008		3008	
Filterdiepte (m-mv)	(4-5)		(6-7)		(3-4)		(3-4)		(5-6)	
METALEN										
Cadmium (Cd)	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	14	+++	6,0	++
Zink (Zn)	2,5	-	4,7	-	110	+	8700	+++	1300	+++
Niet in STI-lijst van de Wbb										
IJzer (Fe)	37000		130000		23000		<20		<20	
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)	76		210		13		2,9		1,4	
Bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	<3,0		<3,0		<3,0		<3,0		<3,0	
Carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	194		273		224		<6,00		<6,00	
Sulfaat (mg/l)	15		<1,0		21		41		51	
Organische Zwavel	19000		3200		6500		11000		15000	
pH (-)	5,7		6,1		5,5		5,3		5,0	
EC (µS/cm)	448		819		281		179		233	
Zuurstof (mg/l)	0,4		6,5		n.b.		n.b.		0,8	
Redox (mV)	396		244		n.b.		n.b.		404	
Temperatuur (°C)	8,6		7,7		9,8		10,4		10,3	

n.b. Niet bepaalbaar in verband met te langzame toestroming van het grondwater om een veldmeting te kunnen uitvoeren

Tabel B4.5 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3008		3010	
Filterdiepte (m-mv)	(7-8)		(2-6)	
METALEN				
Cadmium (Cd)	<0,10	-	0,33	-
Zink (Zn)	82	+	320	+
Niet in STI-lijst van de Wbb				
IJzer (Fe)	12000		2000	
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)	2,1		9,7	
Bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	<3,0		<3,0	
Carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	17,0		<6,00	
Sulfaat (mg/l)	90		29	
Organische Zwavel	27000		9100	
pH (-)	5,8		5,3	
EC (µS/cm)	294		150	
Zuurstof (mg/l)	0,6		4,6	
Redox (mV)	363		277	
Temperatuur (°C)	10,6		10,1	

Bijlage

5

Veld- en analysedata derde monitoringsronde

Tabel B5.1 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3000		3001		3001		3001		3002	
Filterdiepte (m-mv)	(2-6)		(3-4)		(6-7)		(8-9)		(2-3)	
METALEN										
cadmium (Cd)	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	5,6	++
zink (Zn)	<2,0	-	620	++	<2,0	-	<2,0	-	4.500	+++
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	11.000		33.000		27.000		12.000		<20	
Organische Zwavel	15.000		25.000		7.000		22.000		8.800	
pH (-)	5,7		6,2		6,4		6,1		5,5	
EC (µS/cm)	288		369		347		307		120	

Tabel B5.2 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3002		3002		3003		3003		3003	
Filterdiepte (m-mv)	(4-5)		(6-7)		(3-4)		(5-6)		(7-8)	
METALEN										
cadmium (Cd)	0,71	+	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-
zink (Zn)	520	++	<2,0	-	1.100	+++	8,2	-	<2,0	-
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	1.400		17.000		15.000		26.000		23.000	
Organische Zwavel	15.000		7.500		8.200		18.000		4.100	
pH (-)	5,4		6,2		6,0		6,2		6,0	
EC (µS/cm)	172		237		160		328		294	

Tabel B5.3 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3004		3004		3005		3005		3006	
Filterdiepte (m-mv)	(4-5)		(6-7)		(3-4)		(6-7)		(2-3)	
METALEN										
cadmium (Cd)	0,66	+	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	3,4	++
zink (Zn)	180	+	42	-	2.000	+++	<2,0	-	1.300	+++
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	680		81.000		11.000		24.000		37	
Organische Zwavel	15.000		5.700		12.000		11.000		35.000	
pH (-)	5,6		6,3		6,0		6,3		4,7	
EC (µS/cm)	214		527		266		633		336	

Tabel B5.4 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3006		3006		3007		3008		3008	
Filterdiepte (m-mv)	(4-5)		(6-7)		(3-4)		(3-4)		(5-6)	
METALEN										
cadmium (Cd)	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	10	+++	5,3	++
zink (Zn)	750	++	4,6	-	3,2	-	6.700	+++	1600	+++
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	15.000		21.000		35.000		<20		<20	
Organische Zwavel	39.000		29.000		9.200		7.300		13.000	
pH (-)	5,6		6,5		6,7		5,0		4,8	
EC (µS/cm)	412		413		350		162		214	

Tabel B5.5 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3008		3010	
Filterdiepte (m-mv)	(7-8)		(2-6)	
METALEN				
cadmium (Cd)	<0,60	-	<1,1	-
zink (Zn)	1.500	+++	340	+
Niet in STI-lijst van de Wbb				
ijzer (Fe)	4600		130	
Organische Zwavel	23.000		12.000	
pH (-)	5,6		4,5	
EC (µS/cm)	278		144	

Bijlage

6

Veld- en analysedata vierde monitoringsronde

Tabel B6.1 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3000	3001	3001	3002	3002
Filterdiepte (m-mv)	(2-6)	(6-7)	(8-9)	(4-5)	(6-7)
METALEN					
cadmium (Cd)	<0,10	- 0,13	- 0,10	- <0,80	- <0,10
zink (Zn)	<2,0	- <2,0	- <2,0	- 420	+ <2,0
Niet in STI-lijst van de Wbb					
ijzer (Fe)	9600	44000	14000	2000	22000
bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	88	160	48	12	93
carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	<6,00	<6,00	<6,00	<6,00	<6,00
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)	15	<0,10	2,9	<0,10	6,9
sulfaat (mg/l)	7,9	39	75	46	47
Organische Zwavel	17000	14000	25000	14000	19000
pH (-)	5,9	6,1	5,8	5,2	6,0
EC (µS/cm)	232	367	342	169	340
temperatuur	13,3				
zuurstof	1,0	0,4	0,0	1,5	0,0
redox	-240,1	225,1	214,2	47,3	-217,2

Tabel B6.2 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3003	3003	3003	3004	3004
Filterdiepte (m-mv)	(3-4)	(5-6)	(7-8)	(4-5)	(6-7)
METALEN					
cadmium (Cd)	0,15	- <0,10	- <0,10	- <1,5	- 0,32
zink (Zn)	1100	+++ 8,3	- <2,0	- 240	+ 3,3
Niet in STI-lijst van de Wbb					
ijzer (Fe)	14000	31000	19000	1700	150000
bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	22	98	110	18	590
carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	<6,00	<6,00	<6,00	<6,00	<6,00
DOC vlgs. NPR 6522 (mg DOC/l)	4,3	5,0	35	1,2	64
sulfaat (mg/l)	28	47	<1,0	48	15
Organische Zwavel	8000	15000	20000	17000	3600
pH (-)	n.b.	6,0	5,7	5,2	6,3
EC (µS/cm)	n.b.	249	242	153	842
temperatuur	n.b.	12,9	13,1	13,6	12,7
zuurstof	n.b.	1,0	1,0	3,5	1,0
redox	n.b.	-189,2	-242,9	-52,5	-209,8
n.b.	niet bepaald				

Tabel B6.3 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3005		3005		3006		3006		3007	
Filterdiepte (m-mv)	(3-4)		(6-7)		(4-5)		(6-7)		(3-4)	
METALEN										
cadmium (Cd)	0,25	-	0,17	-	0,16	-	0,10	-	0,22	-
zink (Zn)	4200	+++	<2,0	-	190	+	<2,0	-	10	-
Niet in STI-lijst van de Wbb										
ijzer (Fe)	13000		17000		14000		28000		33000	
bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	96		34000		38		83		99	
carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	<6,00		<6,00		<6,00		<6,00		<6,00	
DOC vlg. NPR 6522 (mg DOC/l)	5,1		37		4,4		7,1		3,9	
sulfaat (mg/l)	44		<1,0		89		63		34	
Organische Zwavel	13000		16000		33000		22000		9900	
pH (-)	5,7		6,1		5,8		6,3		6,3	
EC (µS/cm)	274		486		290		307		277	
temperatuur	14,8		13,7		13,9		13,7			
zuurstof	1,8		1,6		1,1		1,0			
redox	-92,1		-234,3		-177,8		-199,5			
toestroming	-		-		+		+		--	

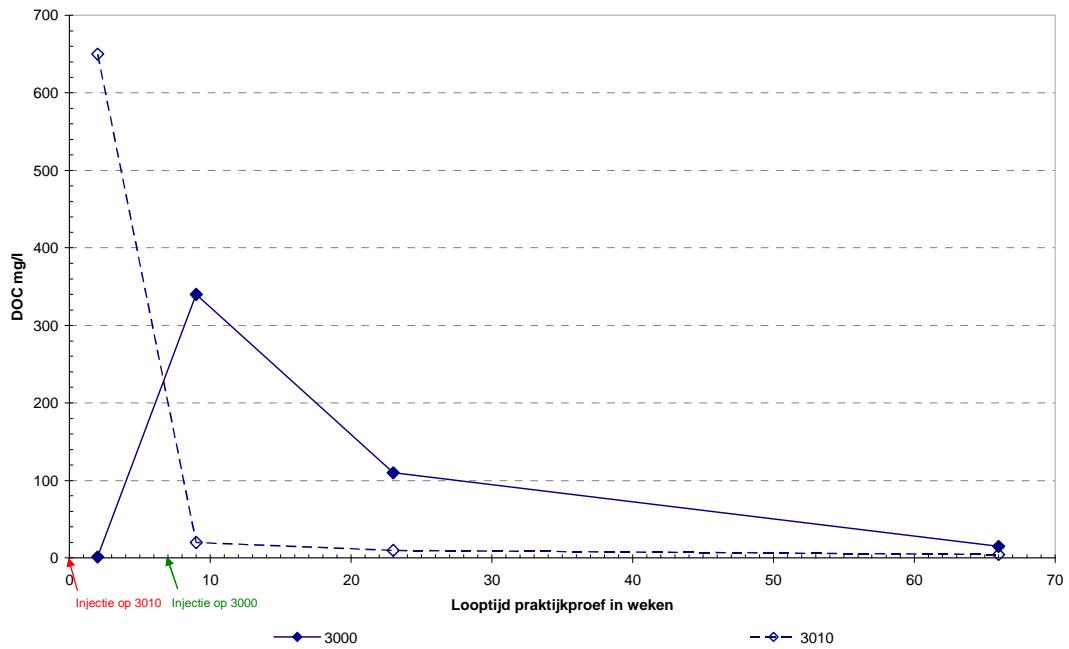
Tabel B6.4 Analyseresultaten grondwater (µg/l) en interpretatie

Peilbuis	3008		3008		3008		3010	
Filterdiepte (m-mv)	(3-4)		(5-6)		(7-8)		(2-6)	
METALEN								
cadmium (Cd)	13	+++	5,2	++	0,20	-	<1,5	-
zink (Zn)	8300	+++	1100	+++	440	++	400	+
Niet in STI-lijst van de Wbb								
ijzer (Fe)	<20		<20		6900		5700	
bicarbonaat (HCO ₃ ⁻) gehalte (mg/l)	6,6		<3,0		9,9		<3,0	
carbonaat (CO ₃ ²⁻) gehalte (mg/l)	<6,00		<6,00		<6,00		<6,00	
DOC vlg. NPR 6522 (mg DOC/l)	4,0		2,2		3,2		4,4	
sulfaat (mg/l)	27		39		72		51	
Organische Zwavel	8000		12000		23000		17000	
pH (-)	4,9		4,5		5,3		4,6	
EC (µS/cm)	154		188		223		165	
temperatuur							14,1	
zuurstof			5,4		0,3		1,1	
redox			18,8		-126,7		114,5	
toestroming	-		+		+		+	

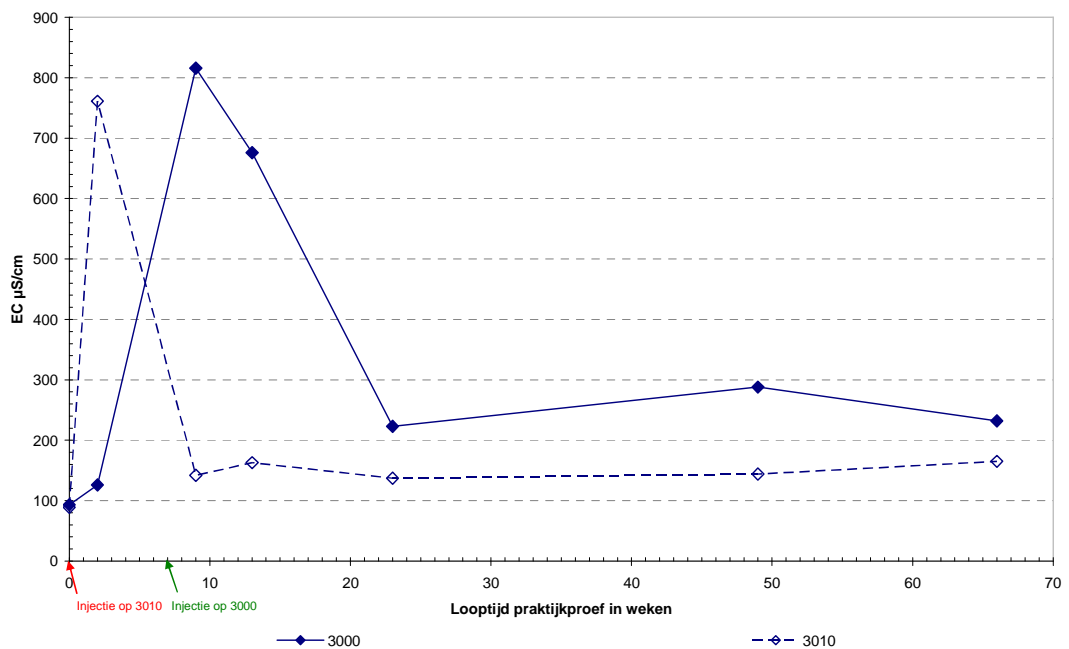
Bijlage

7

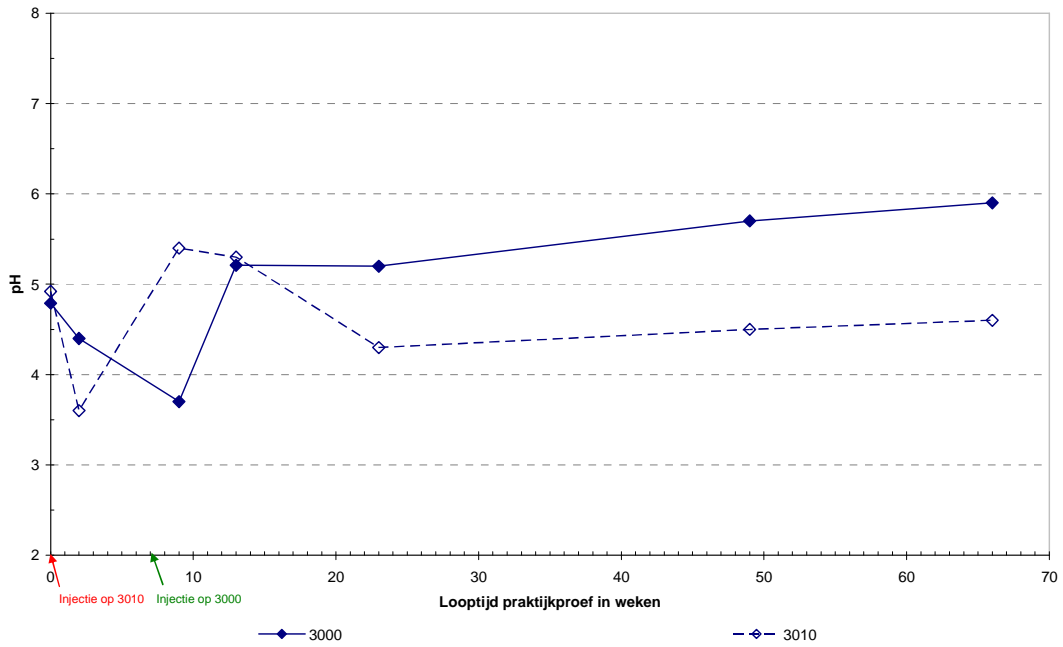
Grafieken grondwater afkomstig uit injectoren 3000 en 3010



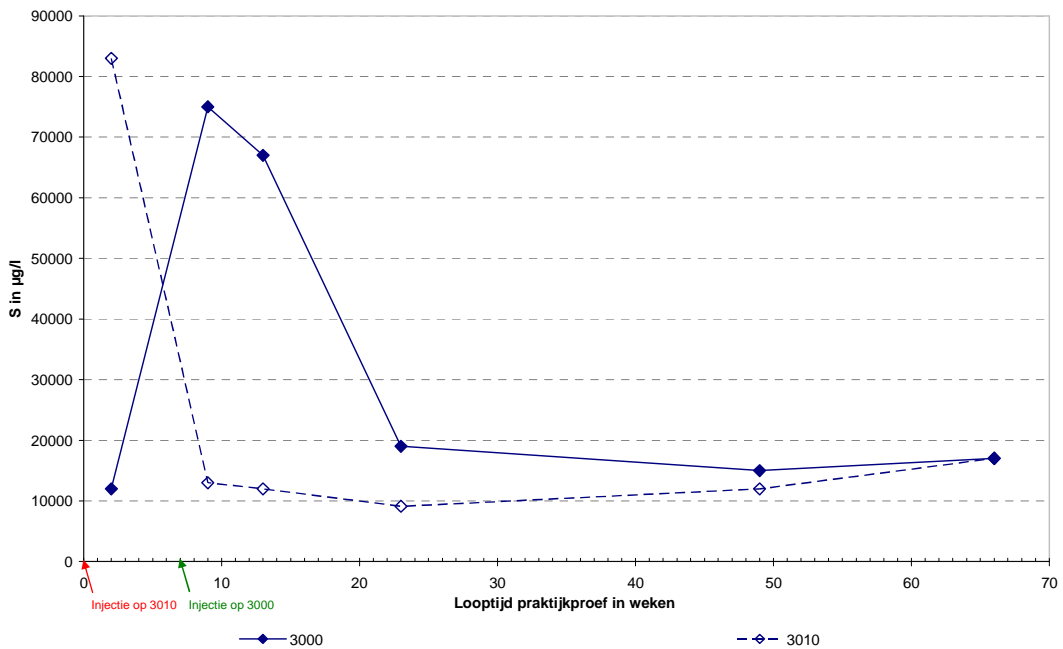
Figuur B7.1 DOC-concentratie injectoren 3000 en 3010



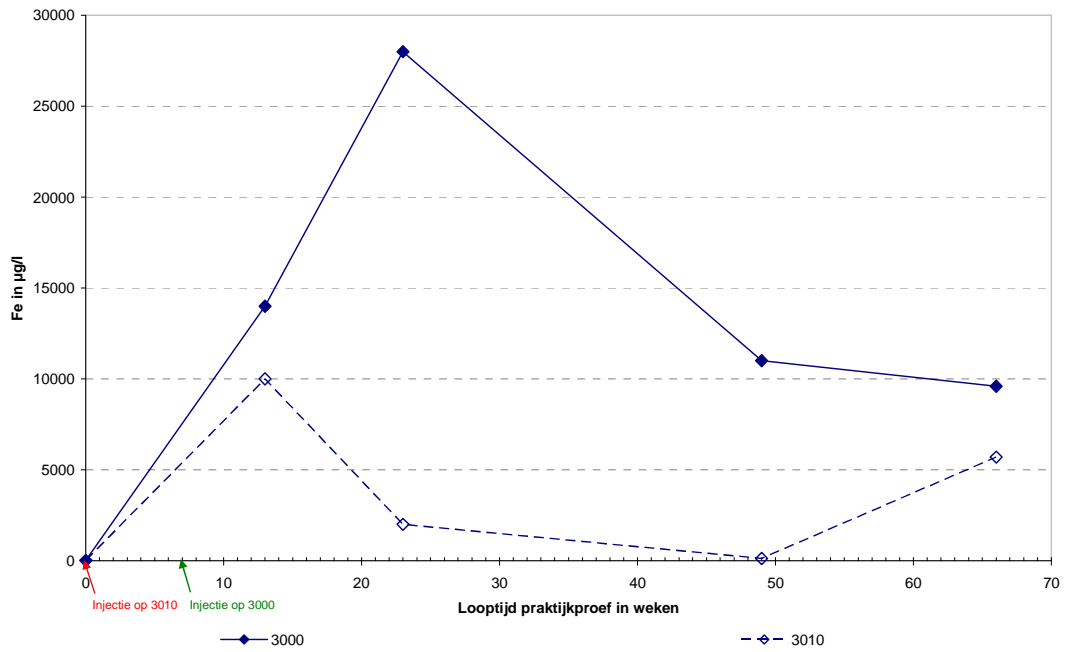
Figuur B7.2 Electriche geleidbaarheid (EC) injectoren 3000 en 3010



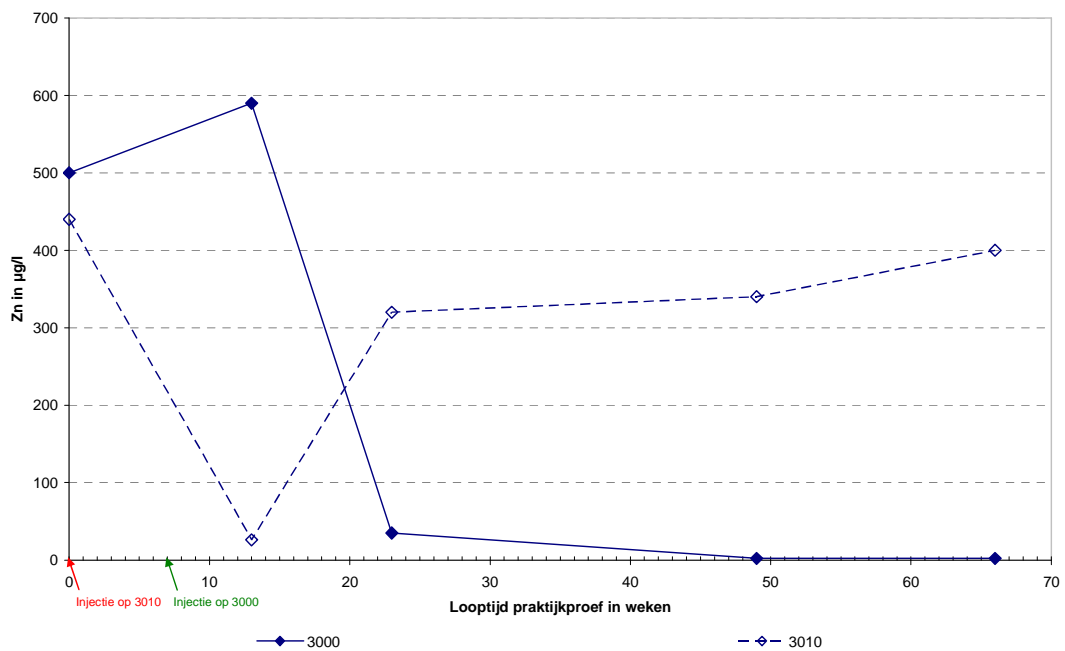
Figuur B7.3 Zuurgraad (pH) injectoren 3000 en 3010



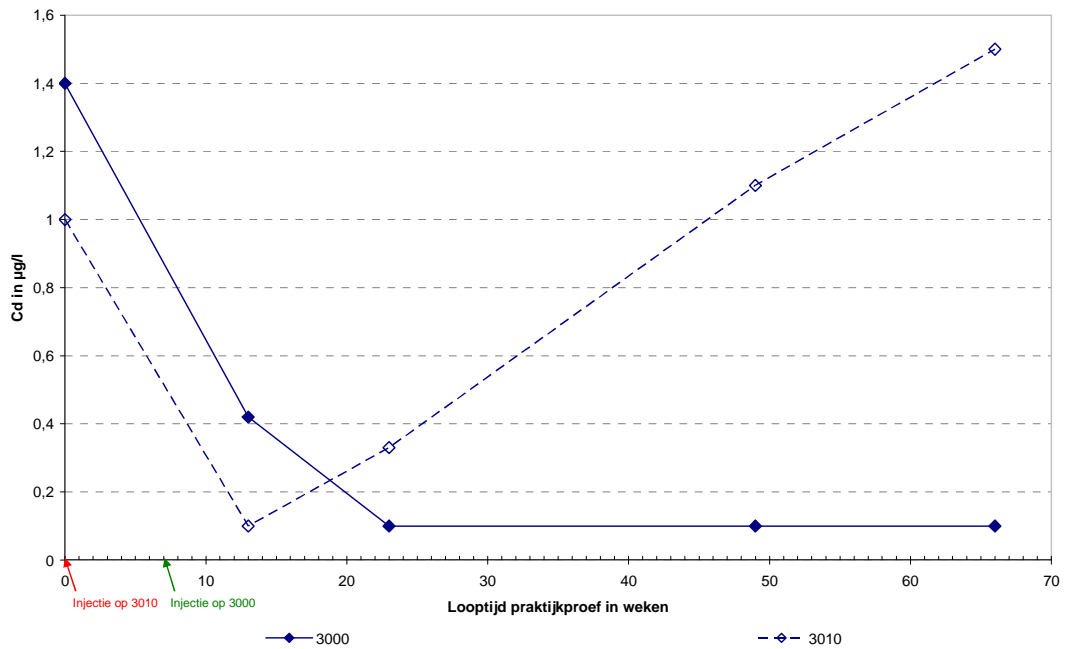
Figuur B7.4 Totaal-zwavelconcentratie (S) injectoren 3000 en 3010



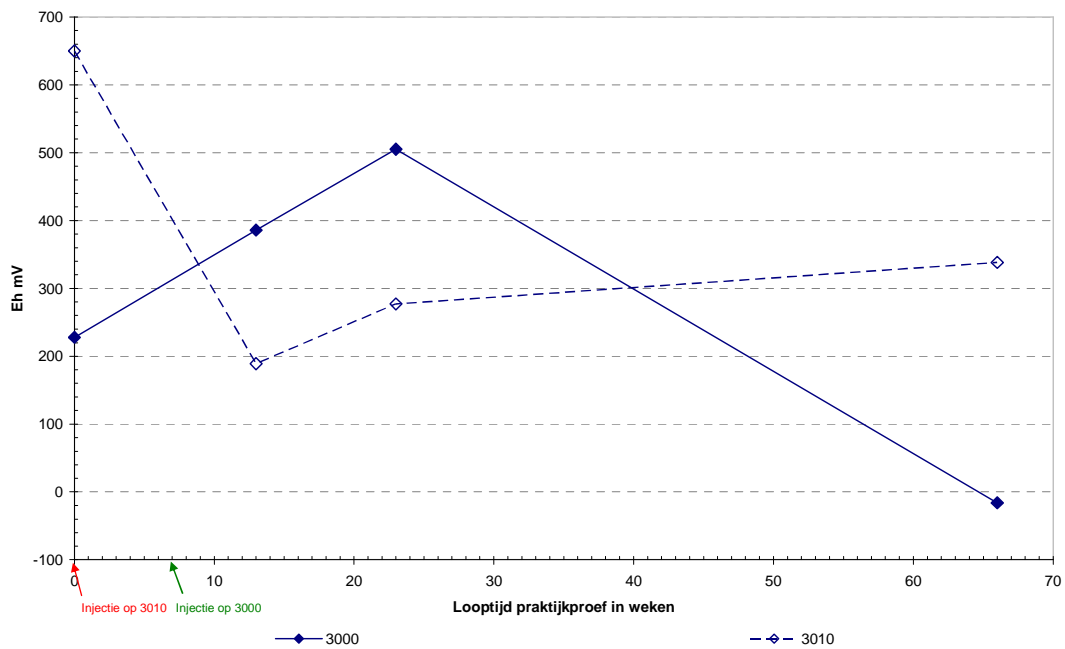
Figuur B7.5 IJzerconcentratie (Fe) injectoren 3000 en 3010



Figuur B7.6 Zinkconcentratie (Zn) injectoren 3000 en 3010



Figuur B7.7 Cadmiumconcentratie (Cd) injectoren 3000 en 3010

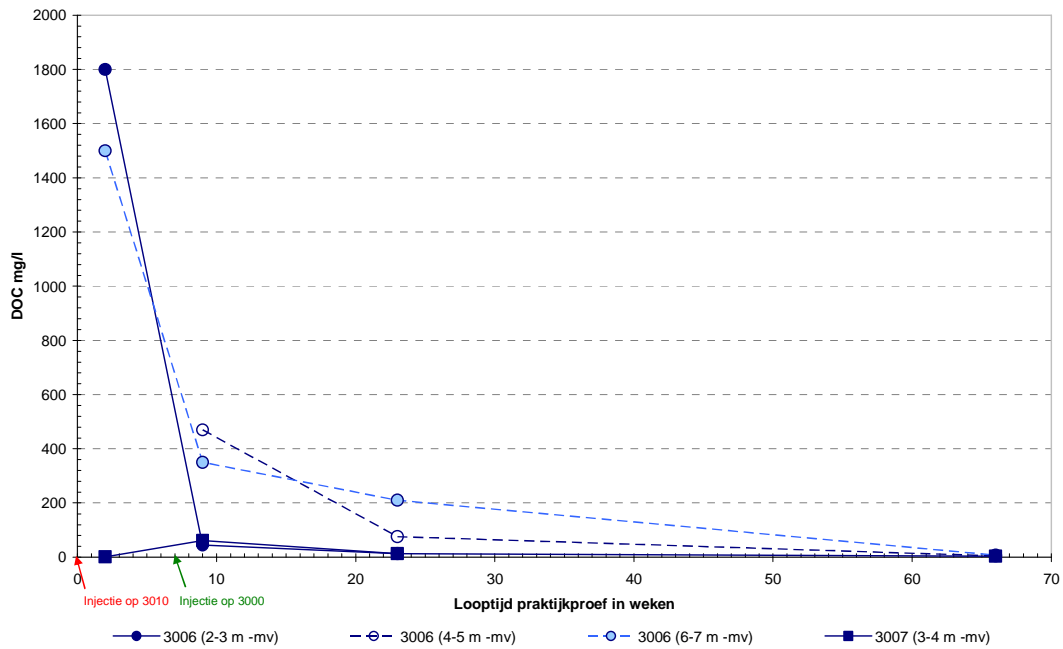


Figuur B7.8 Redoxpotential (Eh) injectoren 3000 en 3010

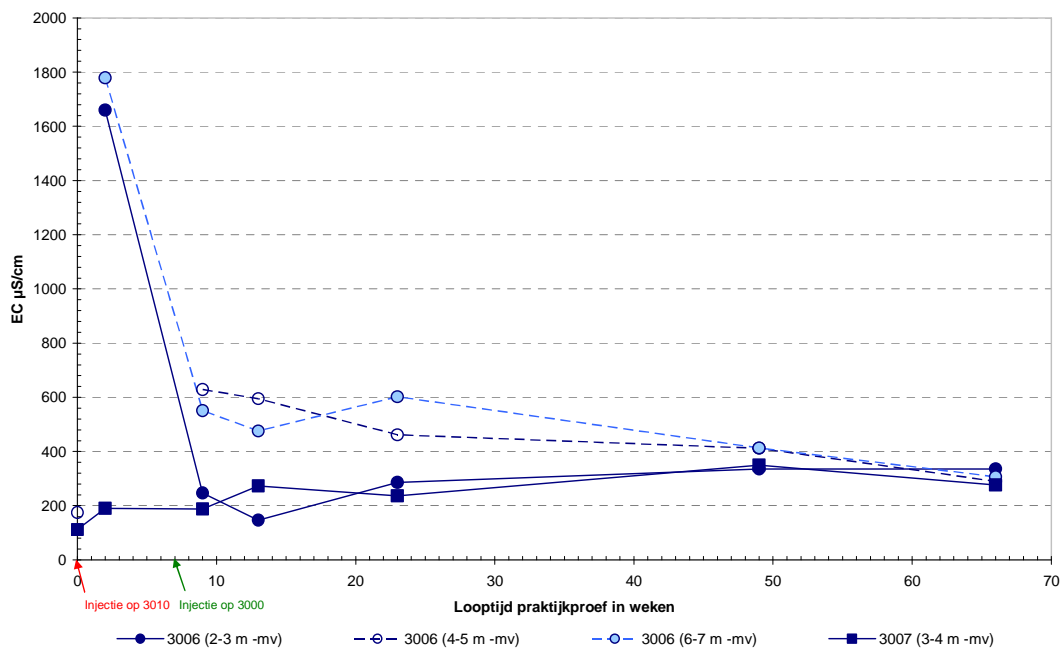
Bijlage

8

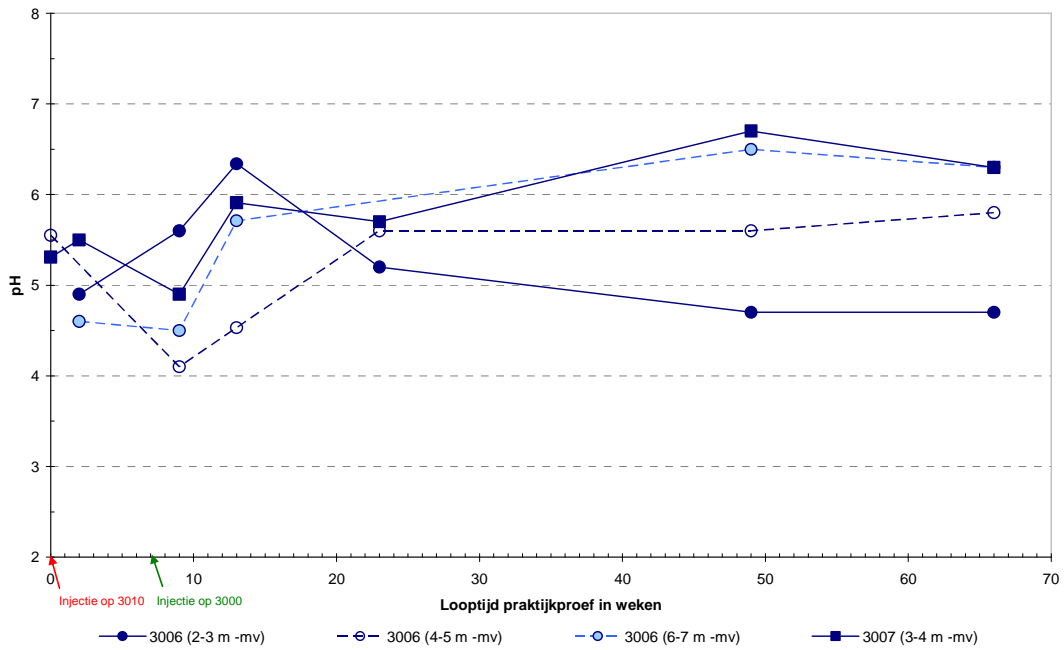
Grafieken grondwater op 1 m van injector 3010 (3006 en 3007)



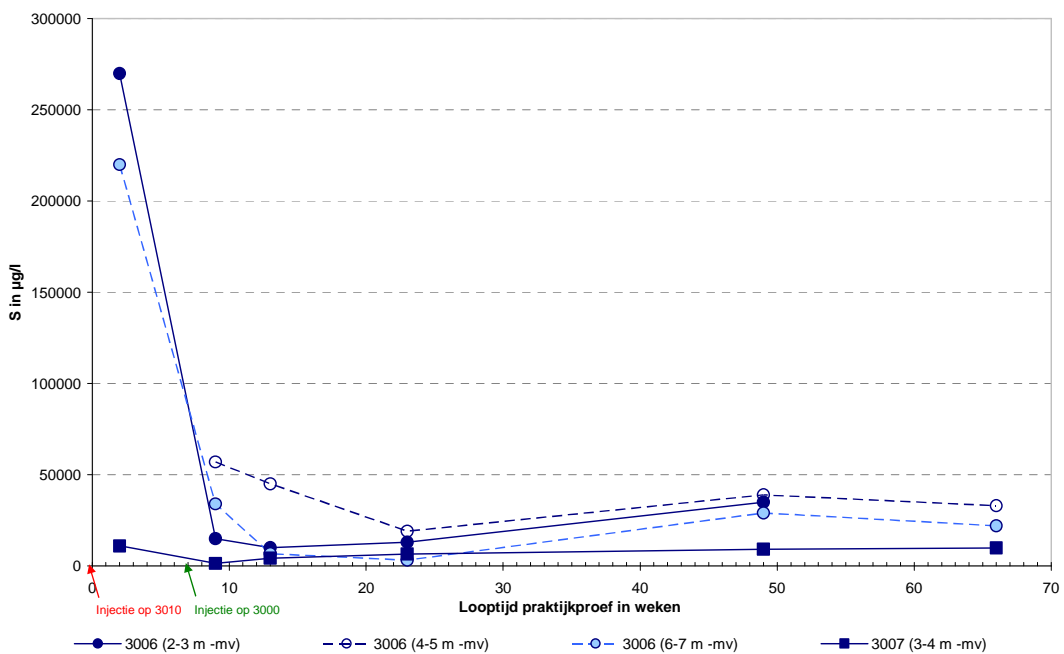
Figuur B8.1 DOC-concentratie op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)



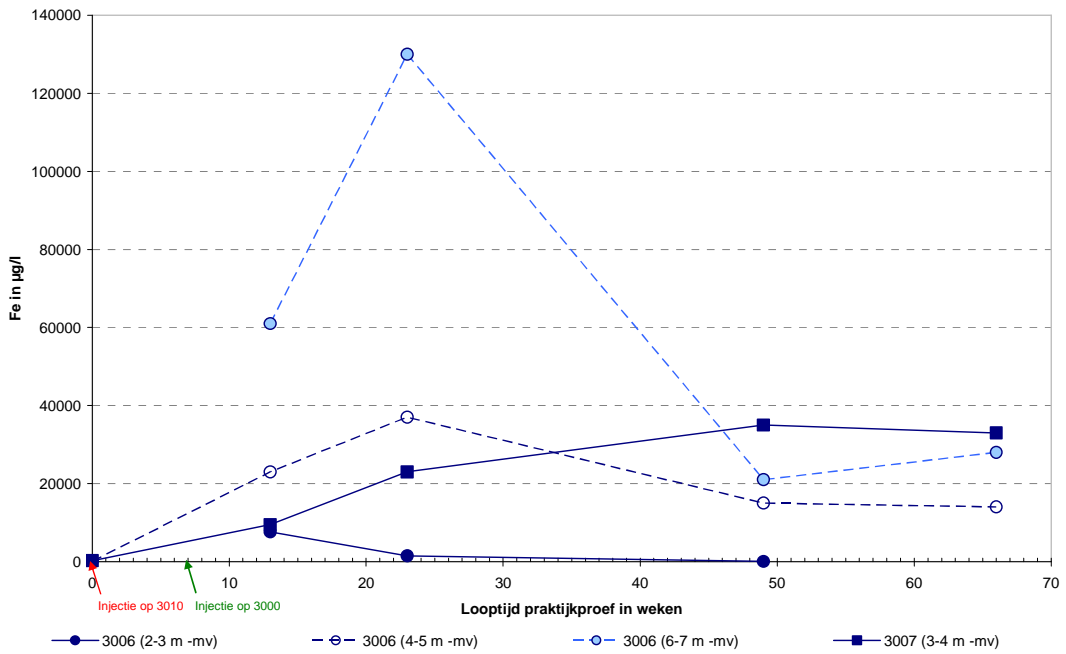
Figuur B8.2 Elektrische geleidbaarheid (EC) op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)



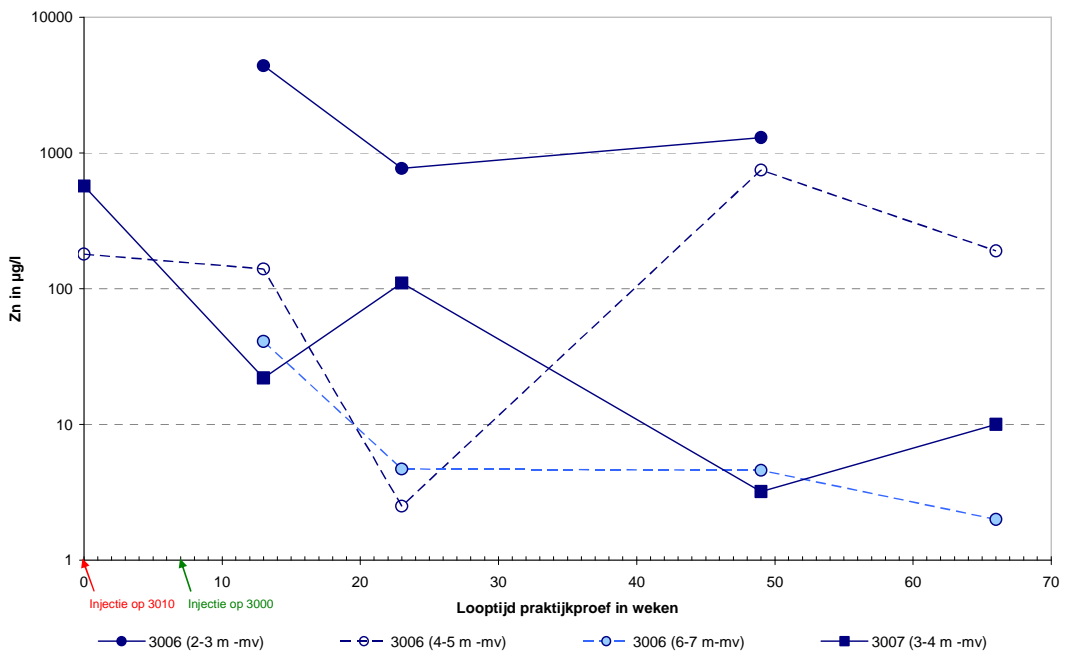
Figuur B8.3 Zuurgraad (pH) op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)



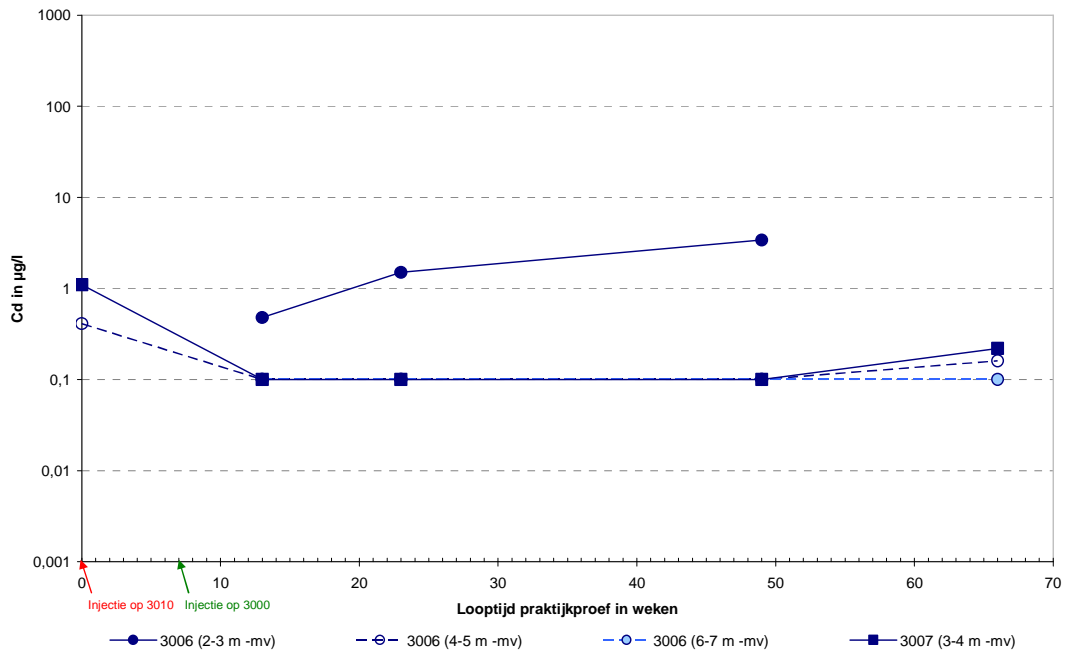
Figuur B8.4 Totaal-zwavelconcentratie (S) op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)



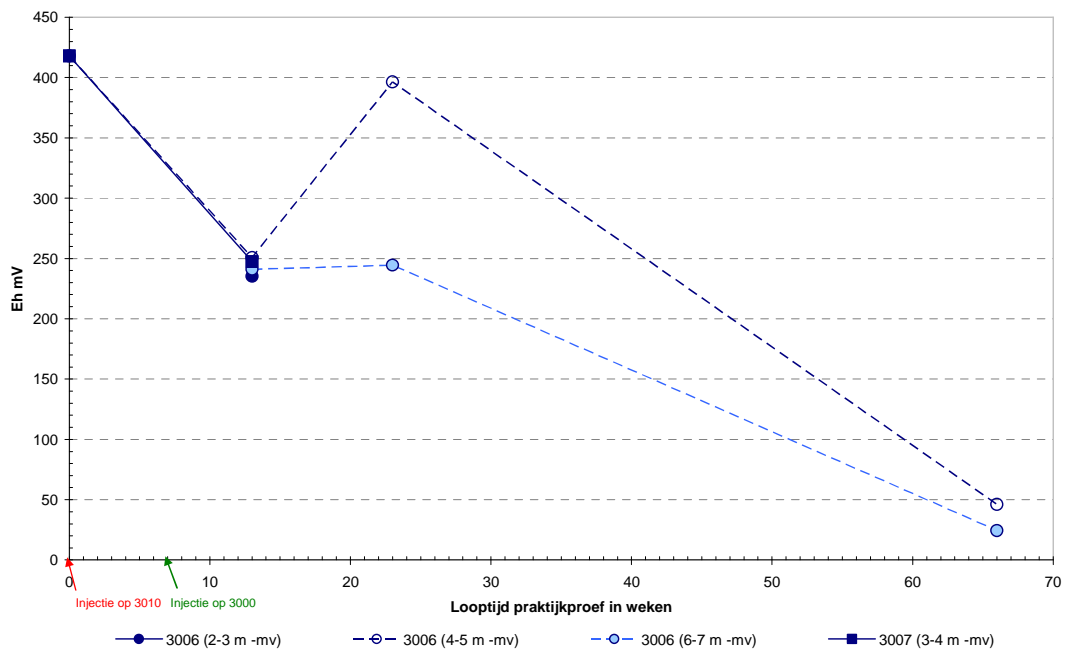
Figuur B8.5 IJzerconcentratie (Fe) op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)



Figuur B8.6 Zinkconcentratie (Zn) op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)



Figuur B8.7 Cadmiumconcentratie (Cd) op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)

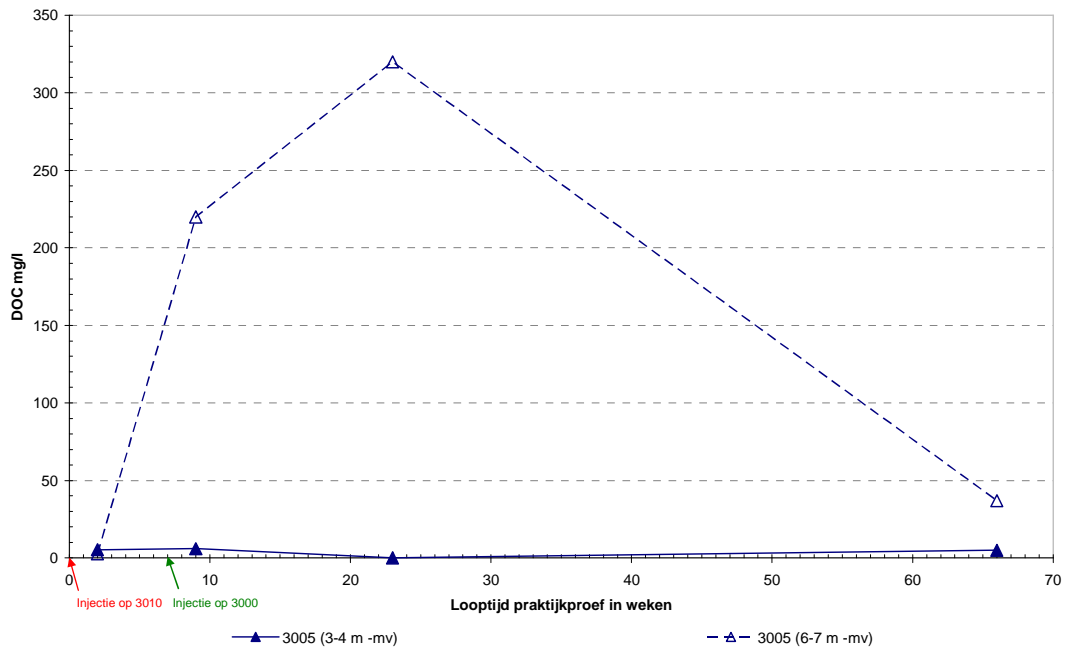


Figuur B8.8 Redoxpotentiaal (Eh) op 1 m van injector 3010 (peilbuizen 3006 en 3007)

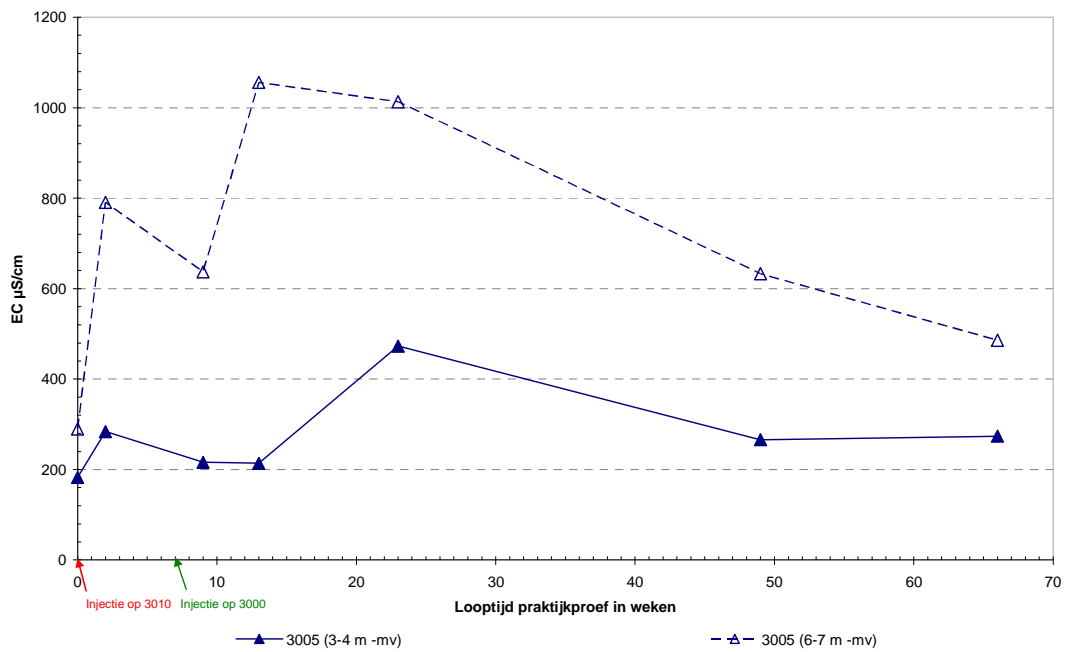
Bijlage

9

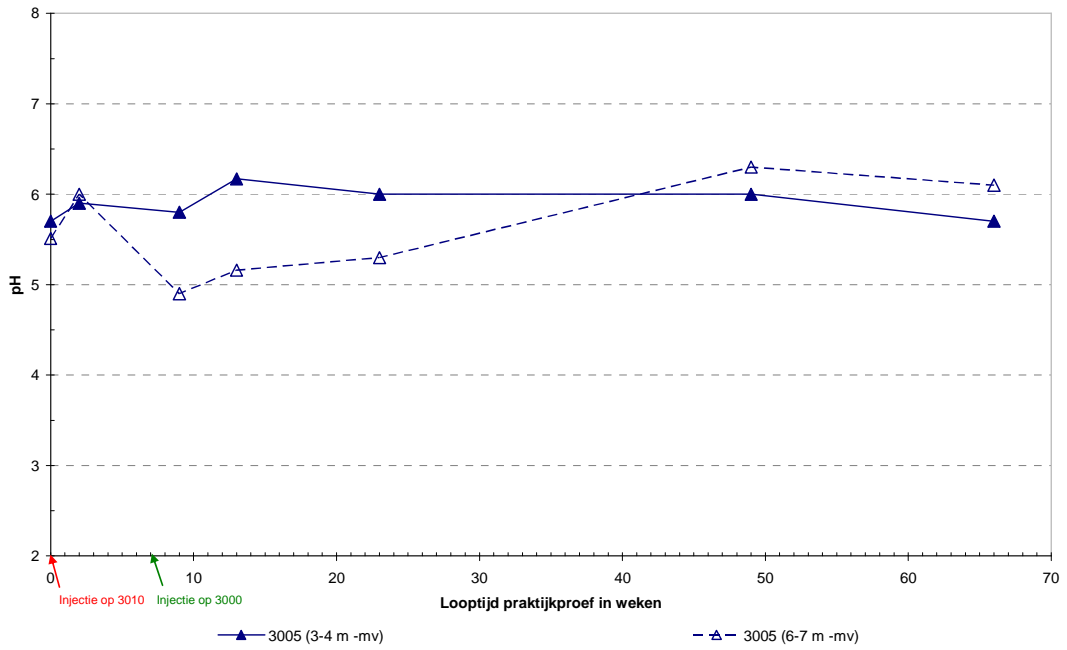
Grafieken grondwater op 2 m van injector 3010 (3005)



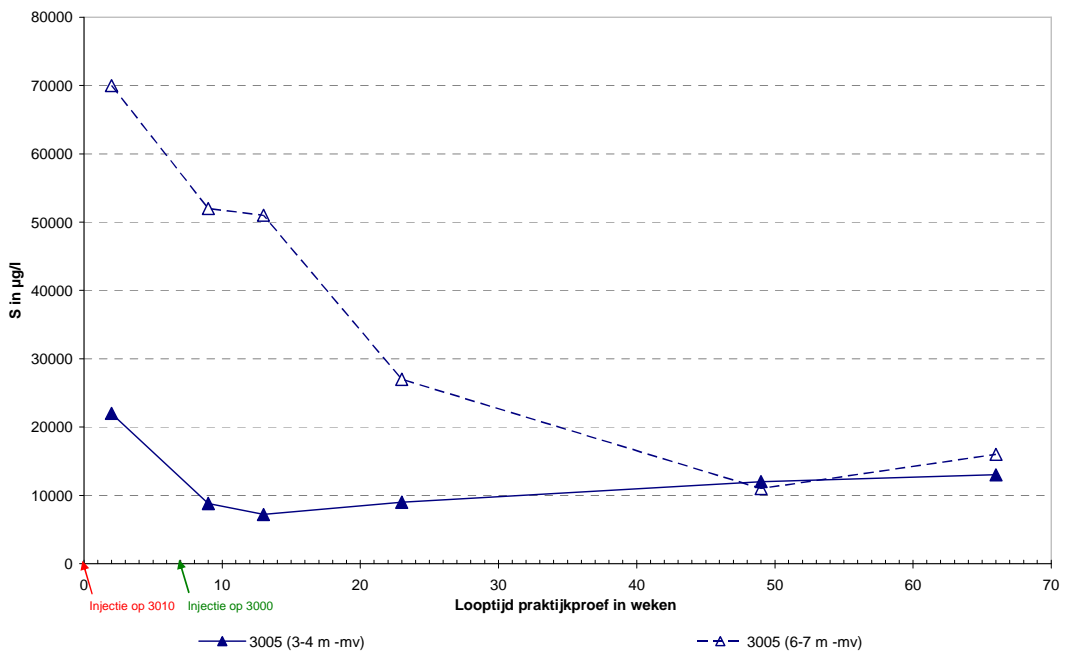
Figuur B9.1 DOC-concentratie op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)



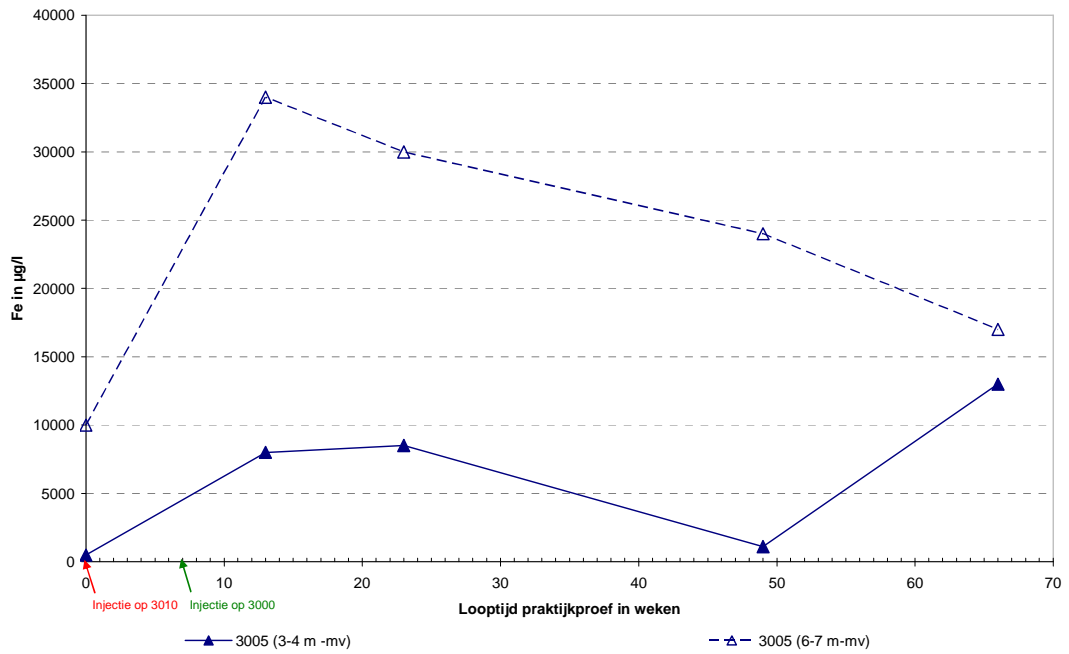
Figuur B9.2 Elektrische geleidbaarheid (EC) op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)



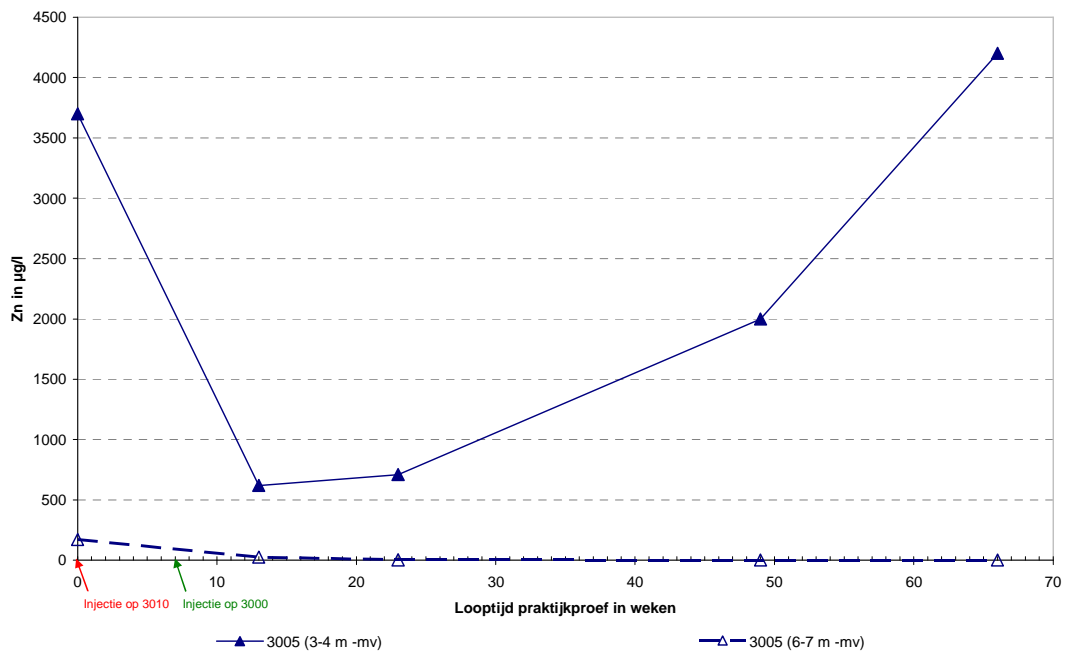
Figuur B9.3 Zuurgraad (pH) op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)



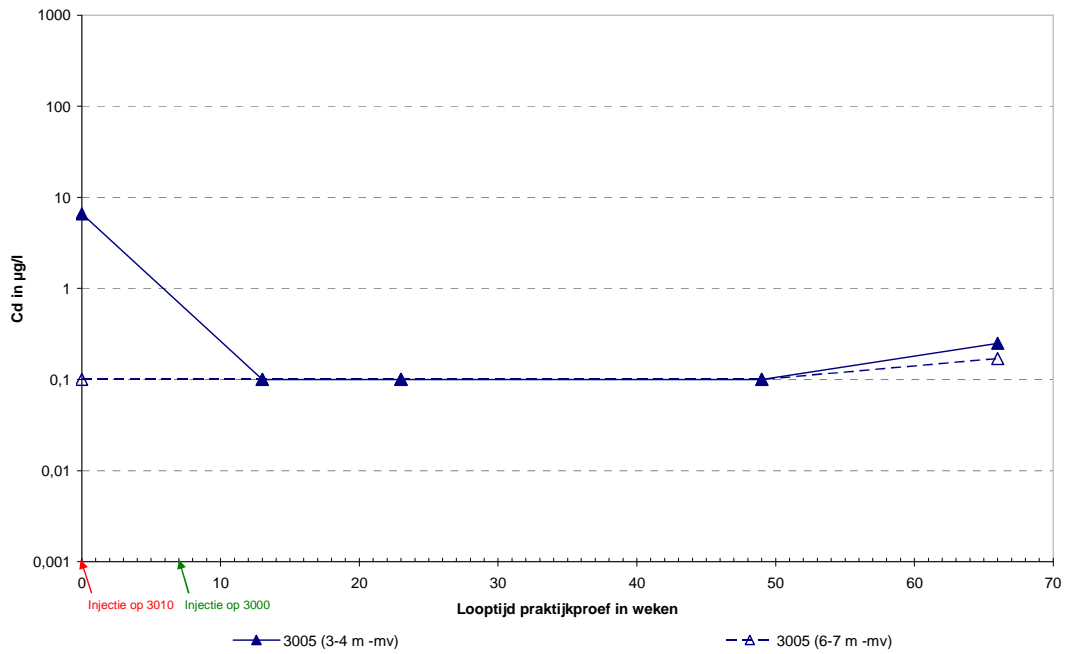
Figuur B9.4 Totaal-zwavelconcentratie (S) op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)



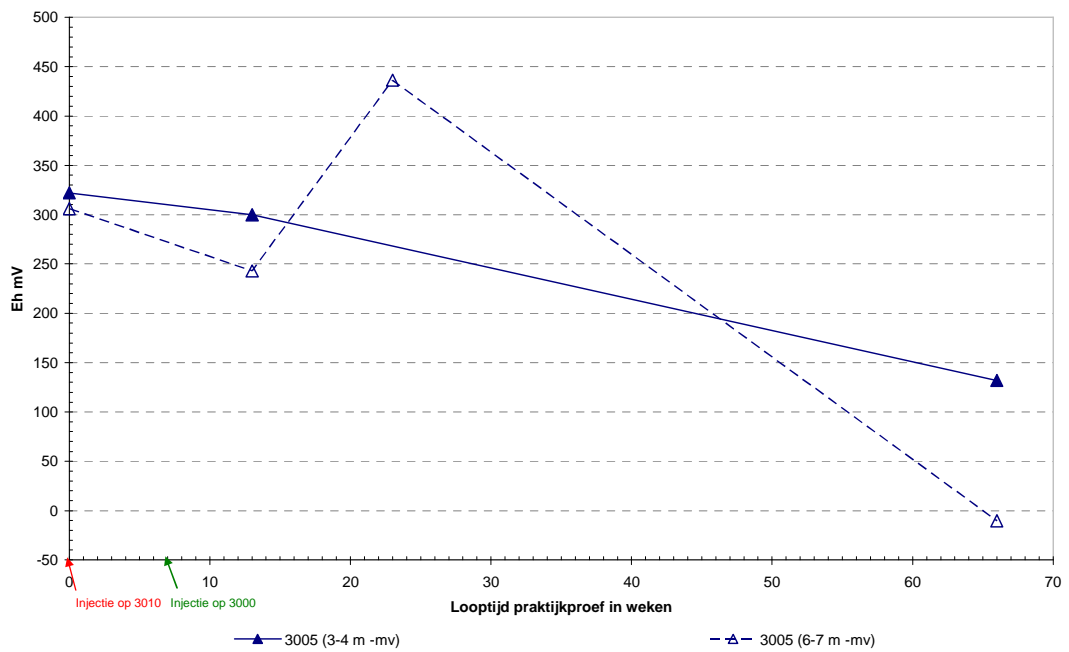
Figuur B9.5 IJzerconcentratie (Fe) op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)



Figuur B9.6 Zinkconcentratie (Zn) op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)



Figuur B9.7 Cadmiumconcentratie (Cd) op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)

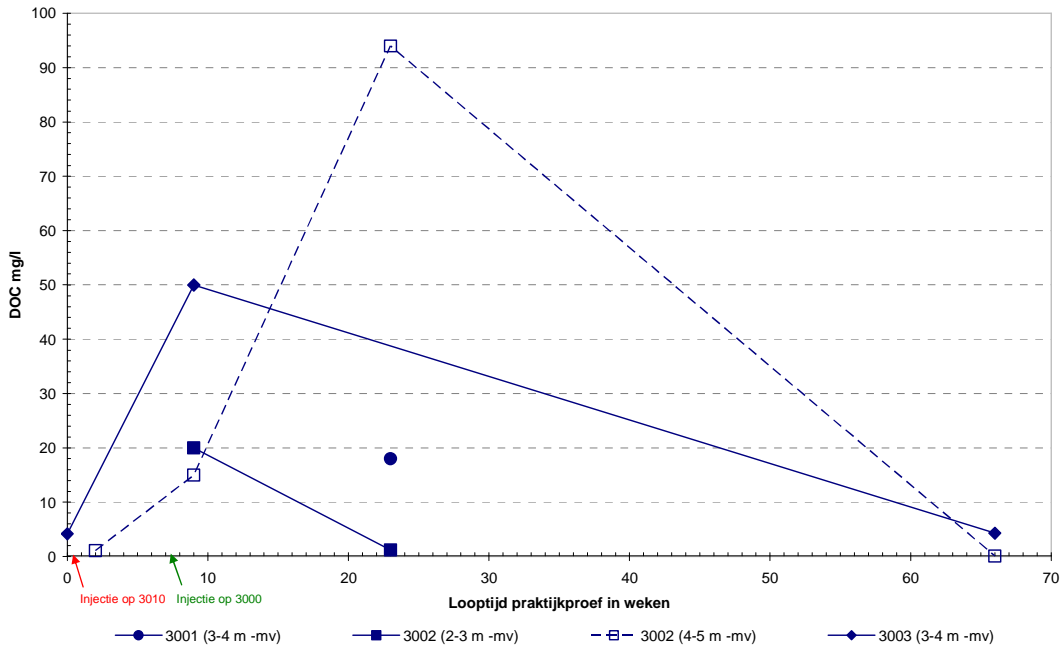


Figuur B9.8 Redoxpotentiaal (Eh) op 2 m van injector 3010 (peilbuis 3005)

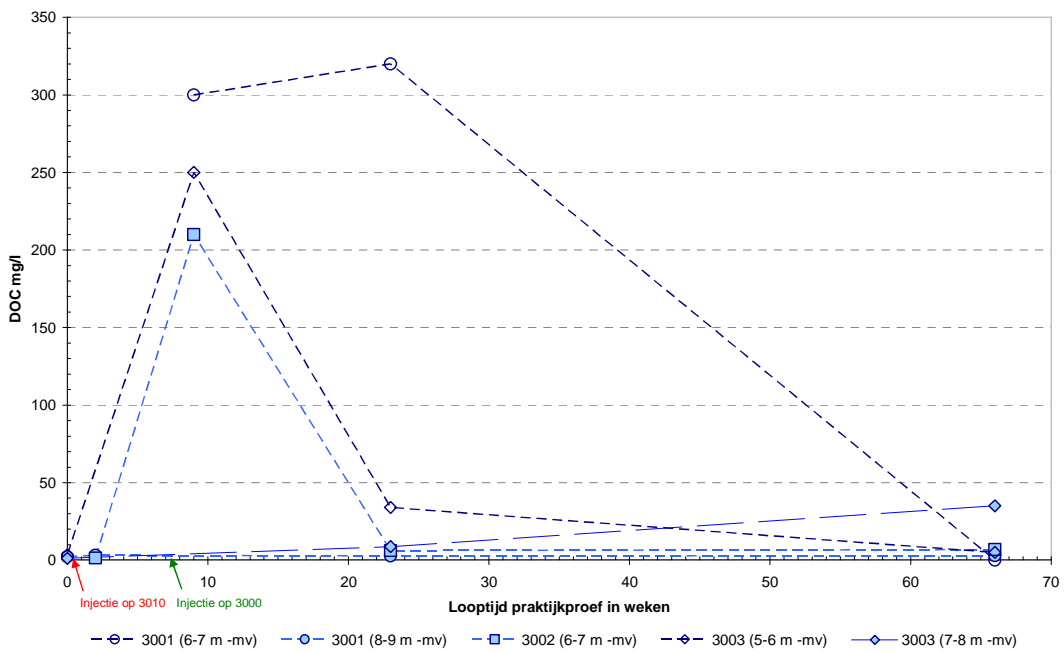
Bijlage

10

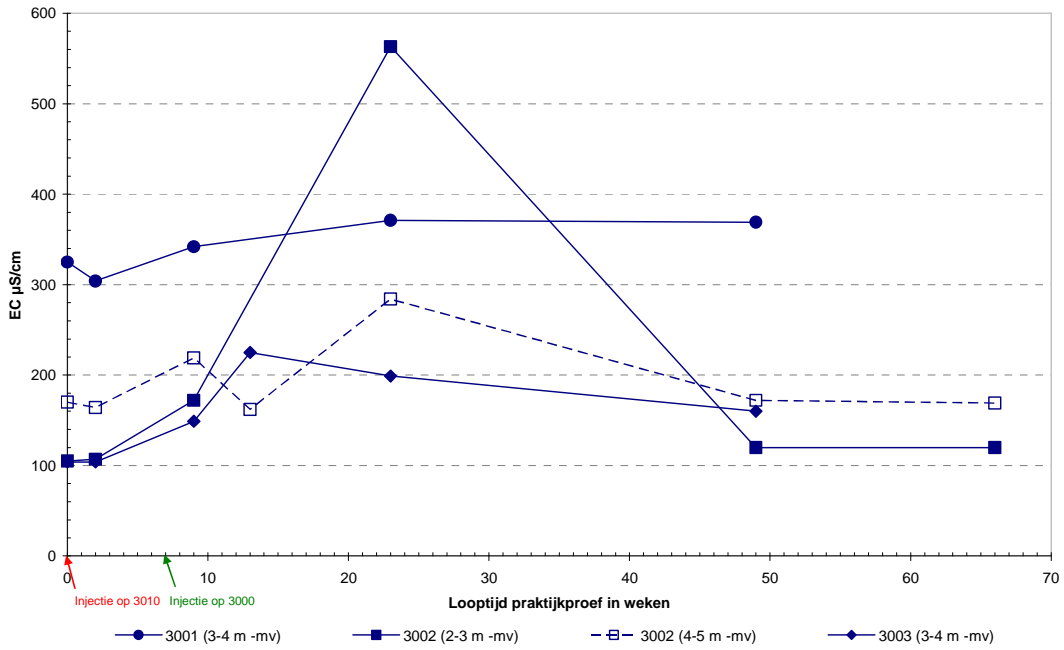
Grafieken grondwater op 1 m van injector 3000 (3001, 3002 en 3003)



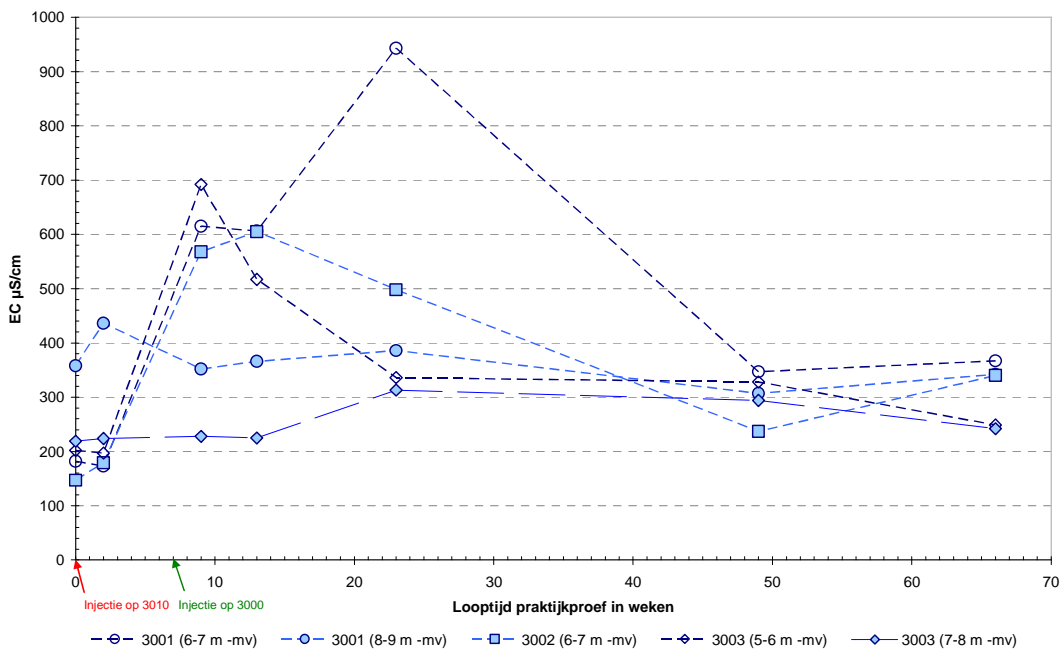
Figuur B10.1 DOC-concentratie op 1 m van injector 3000 (peilbuis 3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv



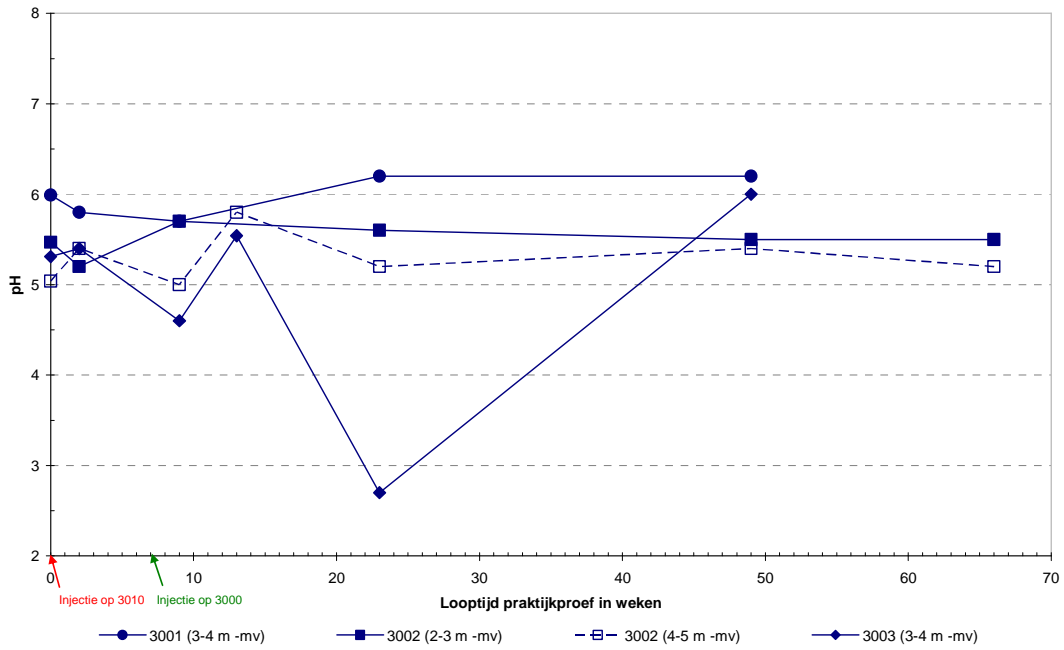
Figuur B10.2 DOC-concentratie op 1 m van injector 3000 (peilbuis 3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv



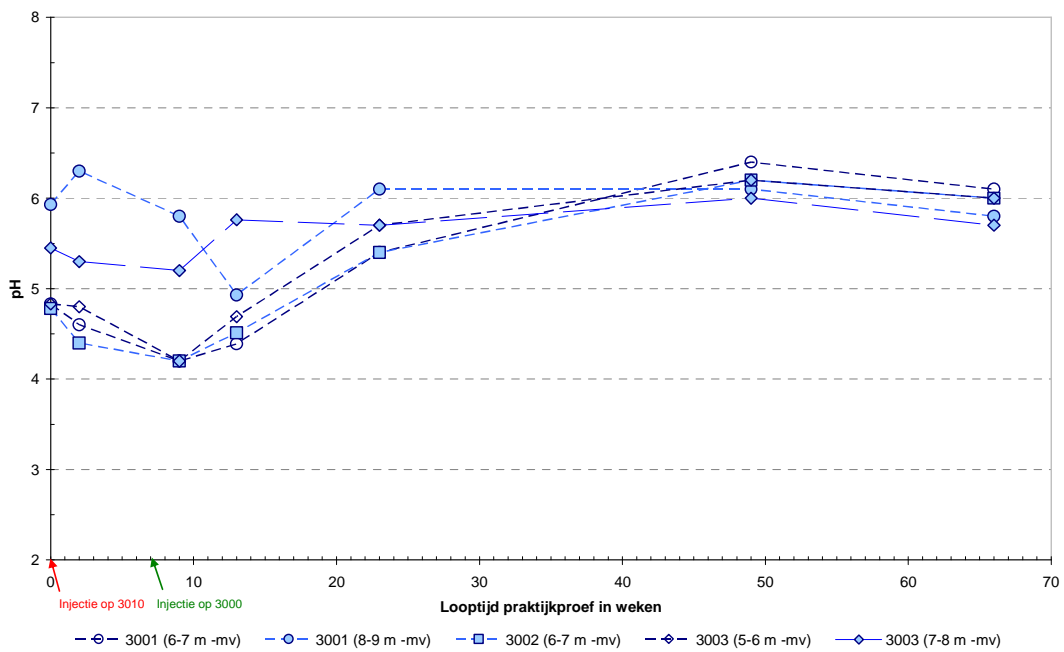
Figuur B10.3 Elektrische geleidbaarheid (EC) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv



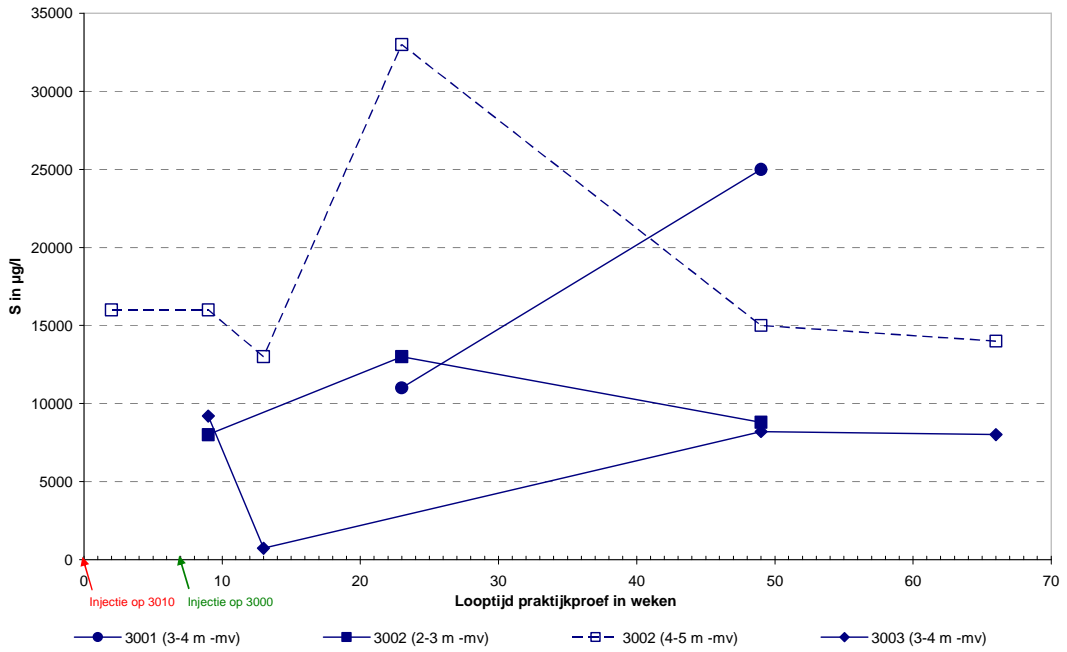
Figuur B10.4 Elektrische geleidbaarheid (EC) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv



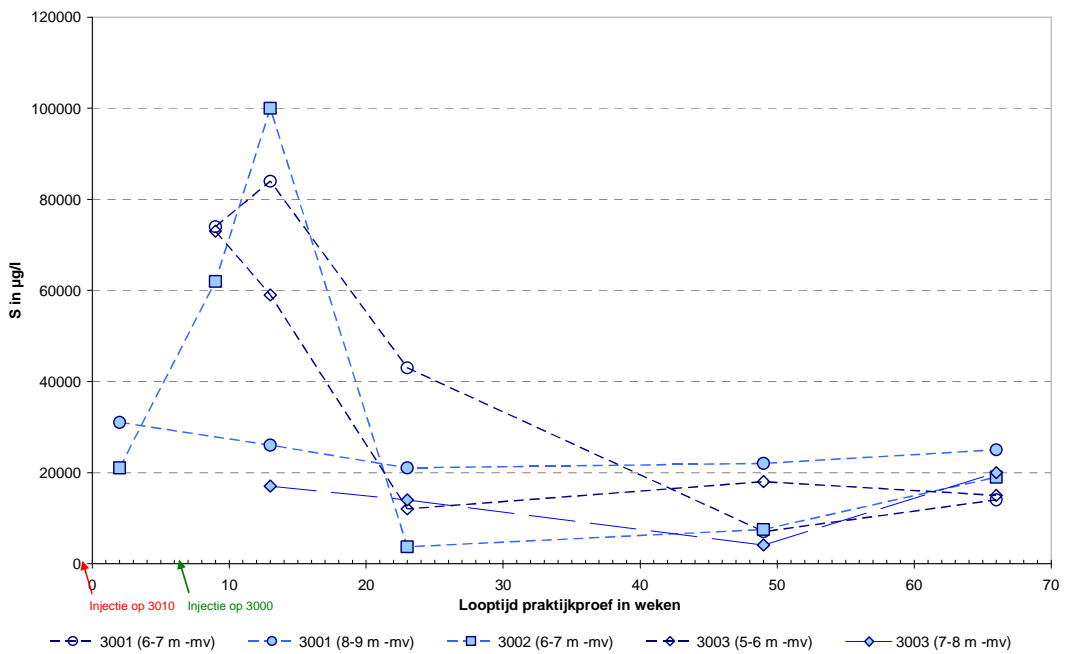
Figuur B10.5 Zuurgraad (pH) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv



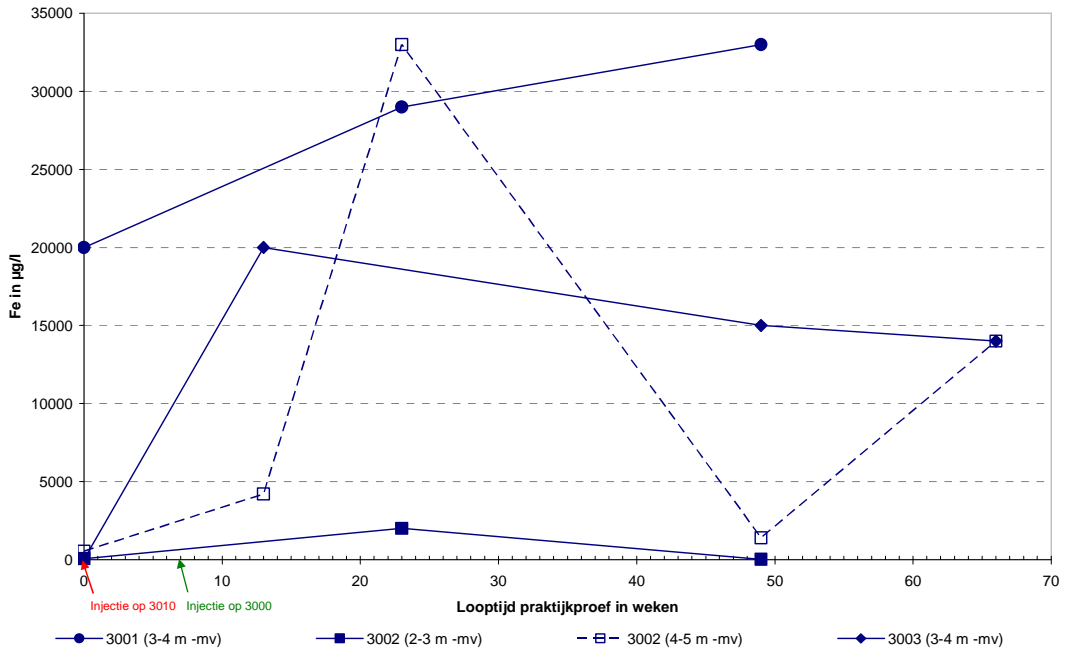
Figuur B10.6 Zuurgraad (pH) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv



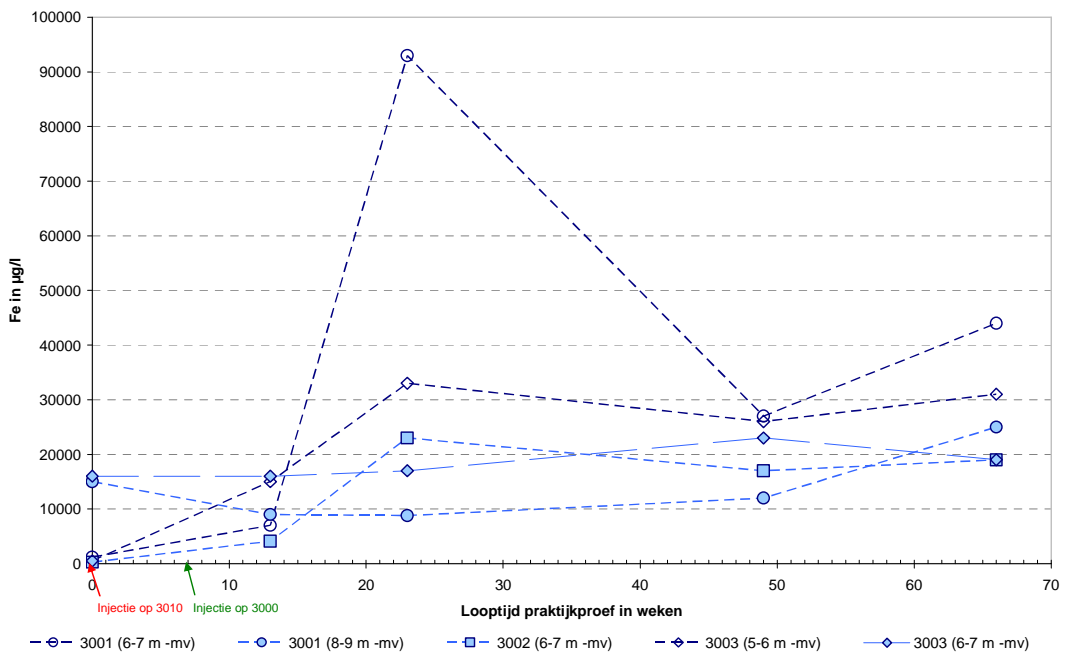
Figuur B10.7 Totaal-zwavelconcentratie (S) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv



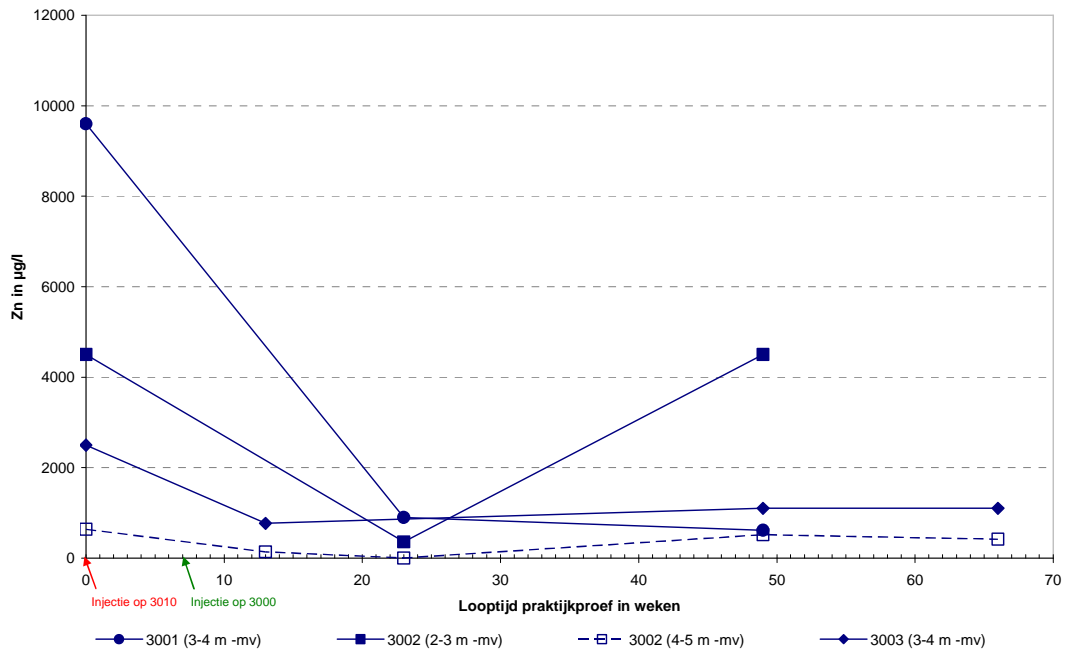
Figuur B10.8 Totaal-zwavelconcentratie (S) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv



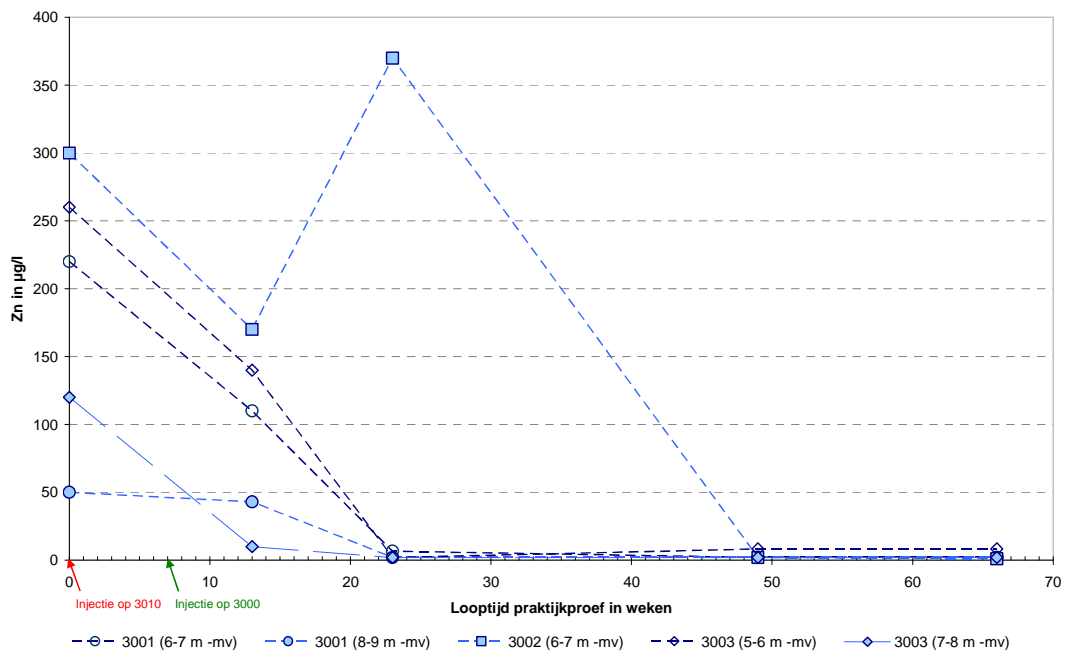
Figuur B10.9 IJzerconcentratie (Fe) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv



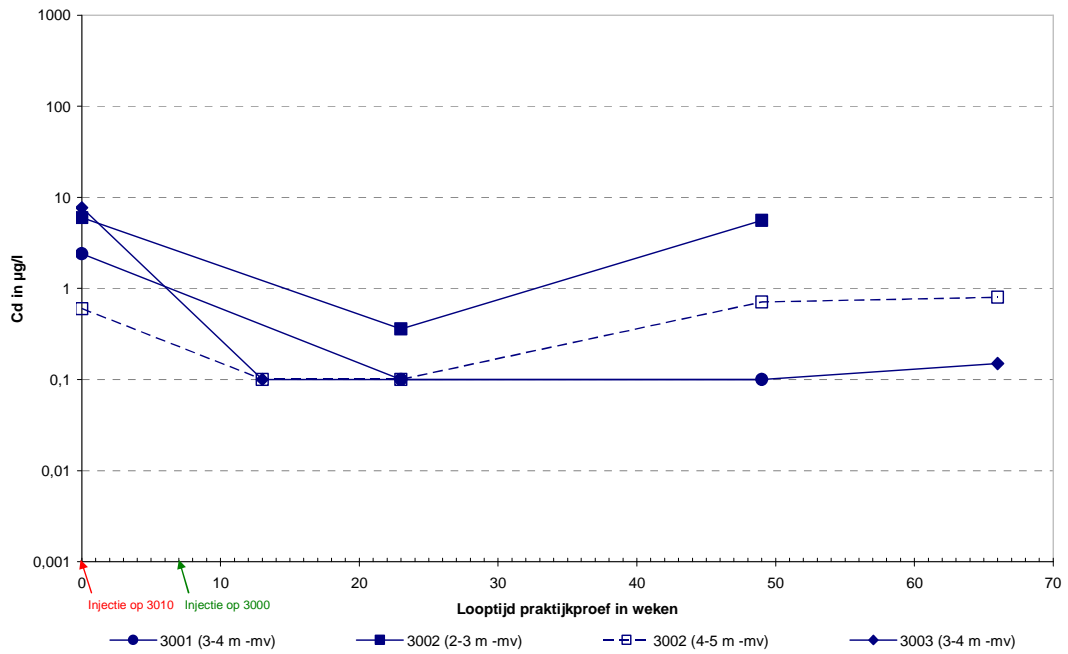
Figuur B10.10 IJzerconcentratie (Fe) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv



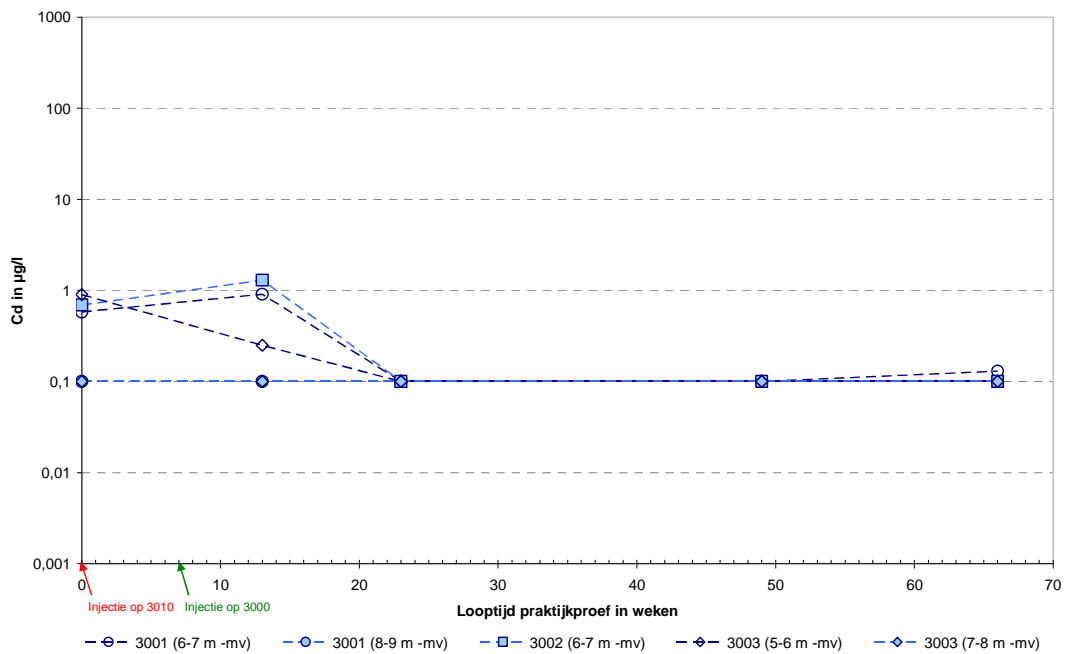
Figuur B10.11 Zinkconcentratie (Zn) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv



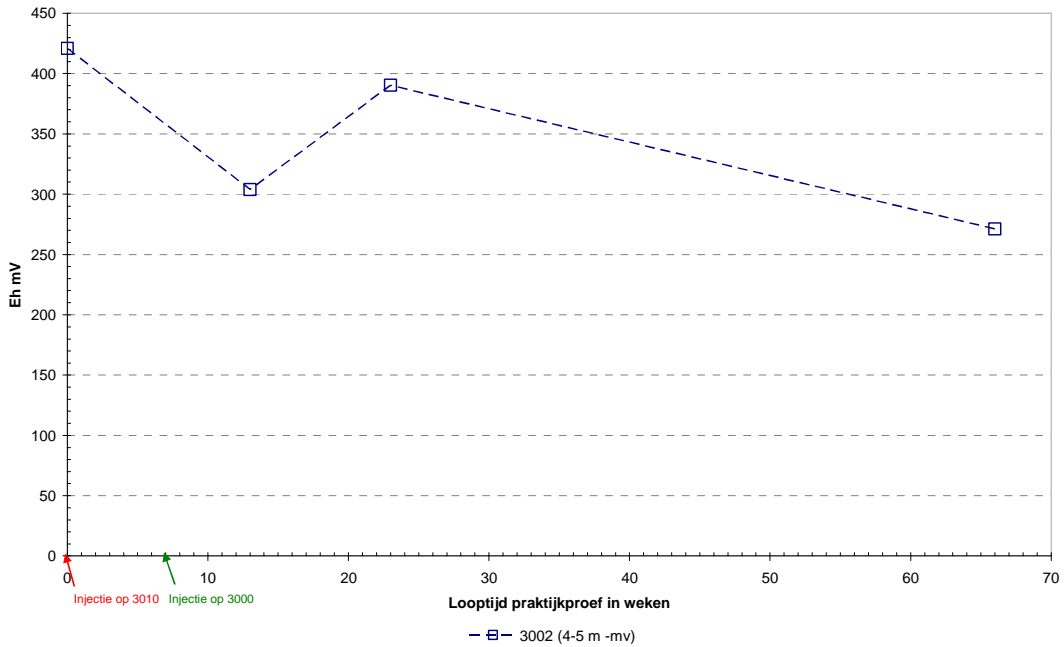
Figuur B10.12 Zinkconcentratie (Zn) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv



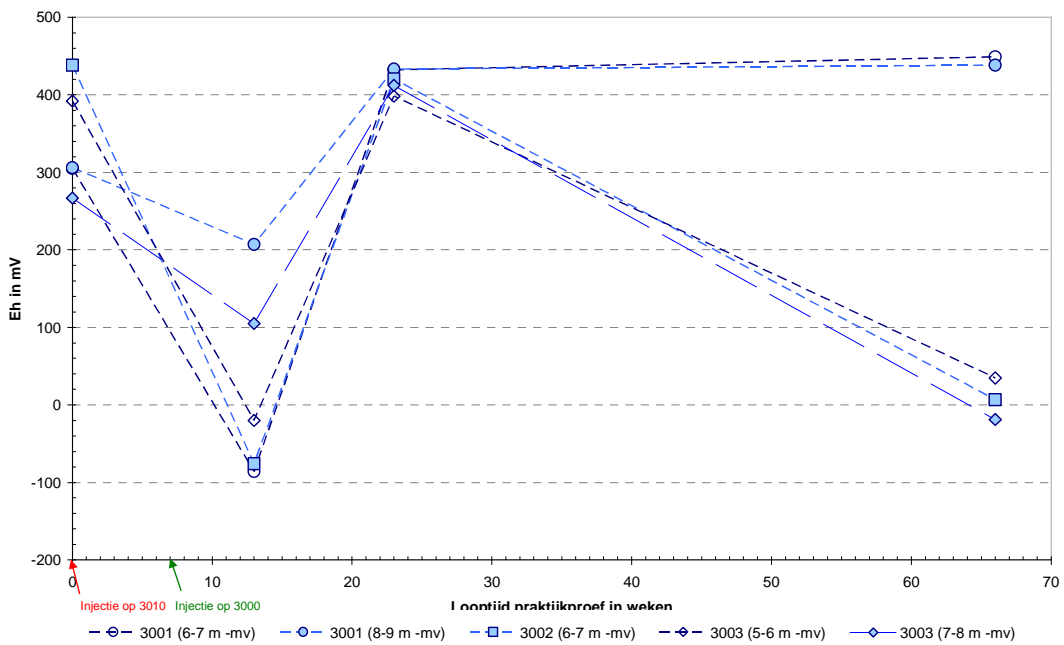
Figuur B10.13 Cadmiumconcentratie (Cd) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv



Figuur B10.14 Cadmiumconcentratie (Cd) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv



Figuur B10.15 Redoxpotentiaal (Eh) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) tot 5 m -mv

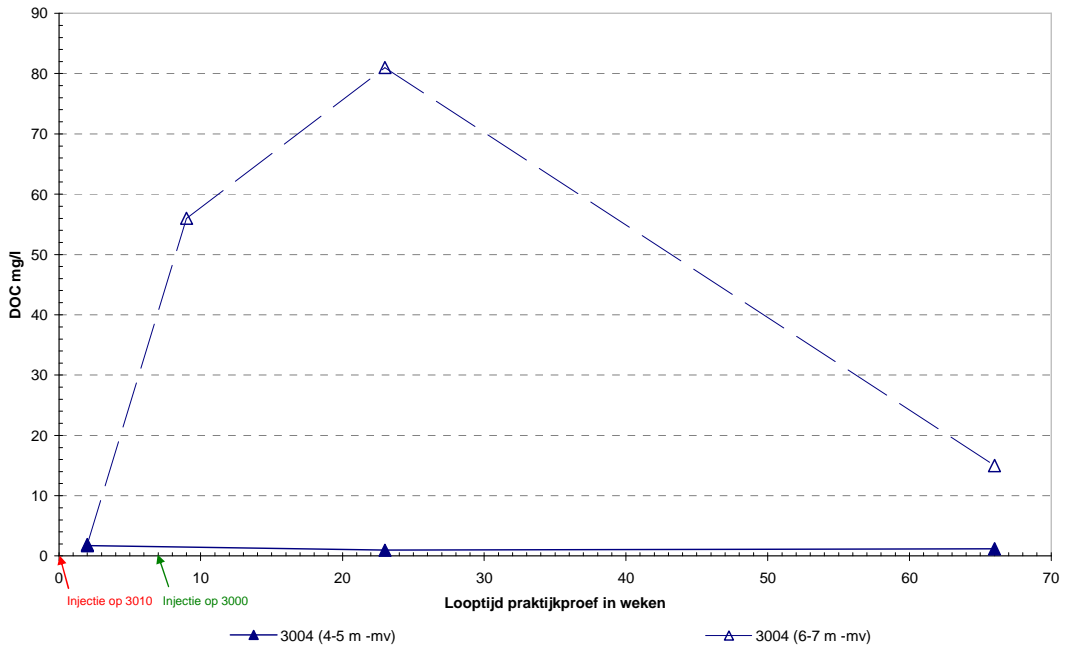


Figuur B10.16 Redoxpotentiaal (Eh) op 1 m van injector 3000 (3001, 3002, 3003) vanaf 5 m -mv

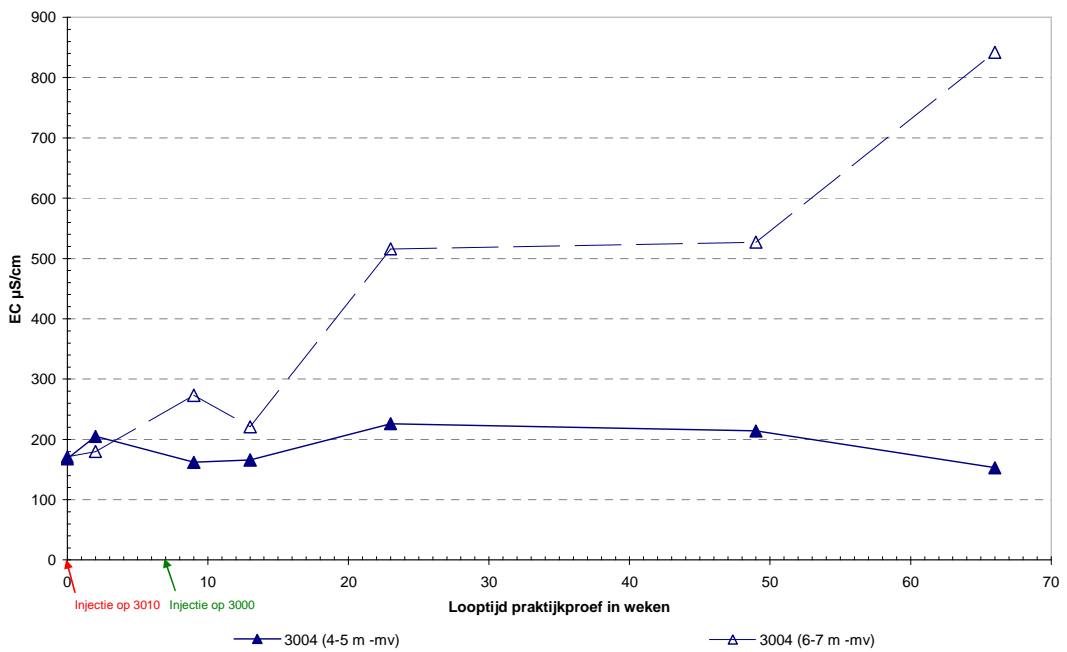
Bijlage

11

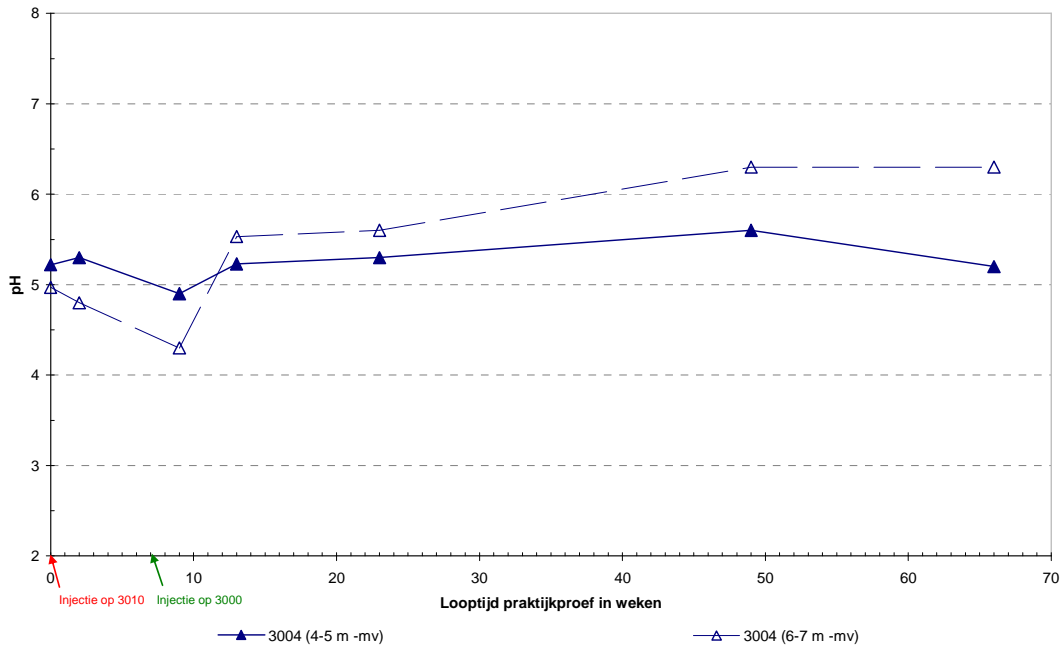
Grafieken grondwater op 2 m van injector 3000 (3004)



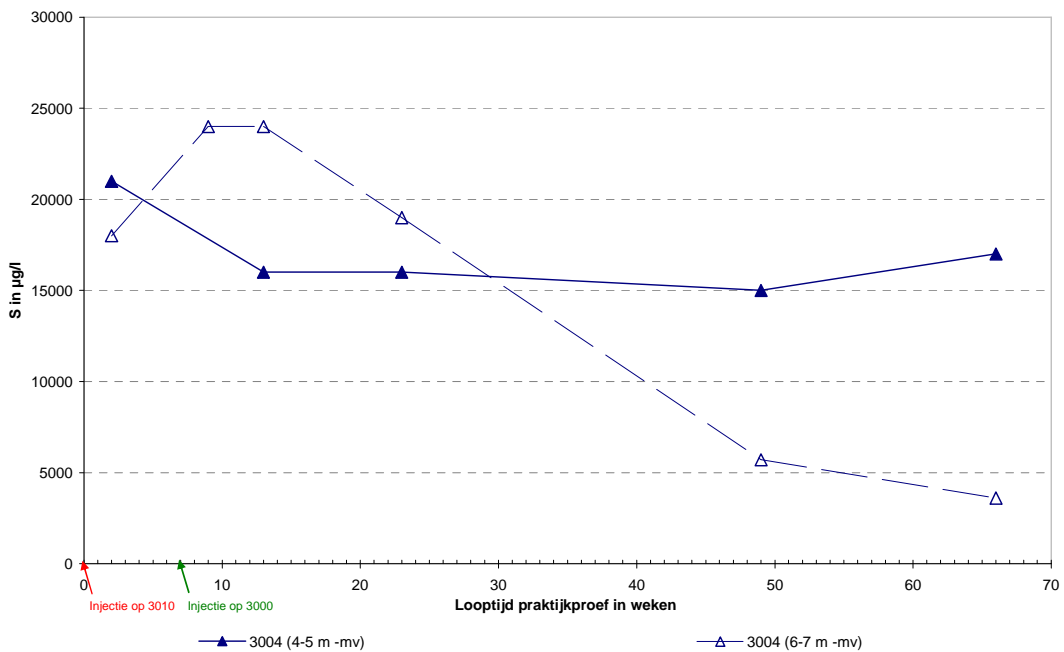
Figuur B11.1 DOC-concentratie op 2 m van injector 3000 (peilbuis 3004)



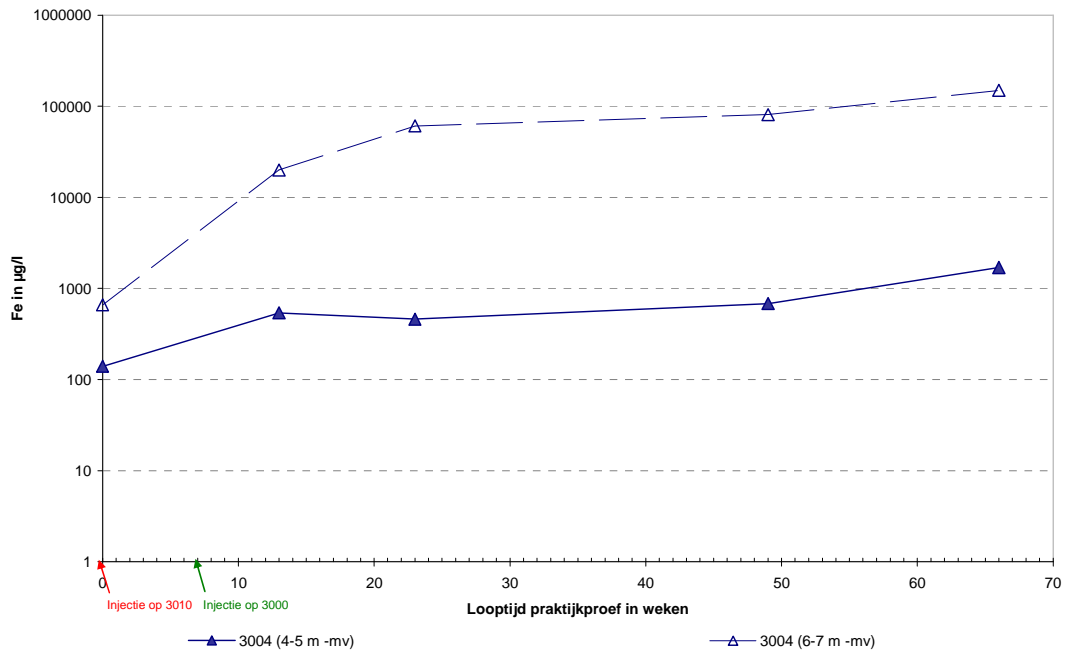
Figuur B11.2 Elektrische geleidbaarheid (EC) op 2 m van injector 3000 (peilbuis 3004)



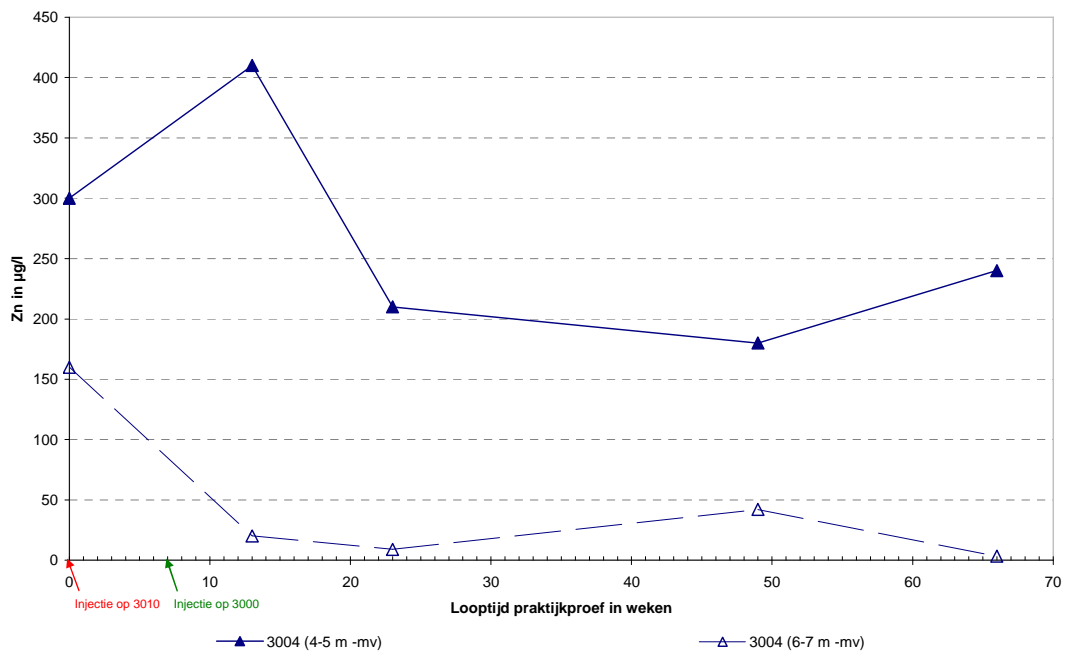
Figuur B11.3 Zuurgraad (pH) op 2 m van injector 3000 (peilbuis 3004)



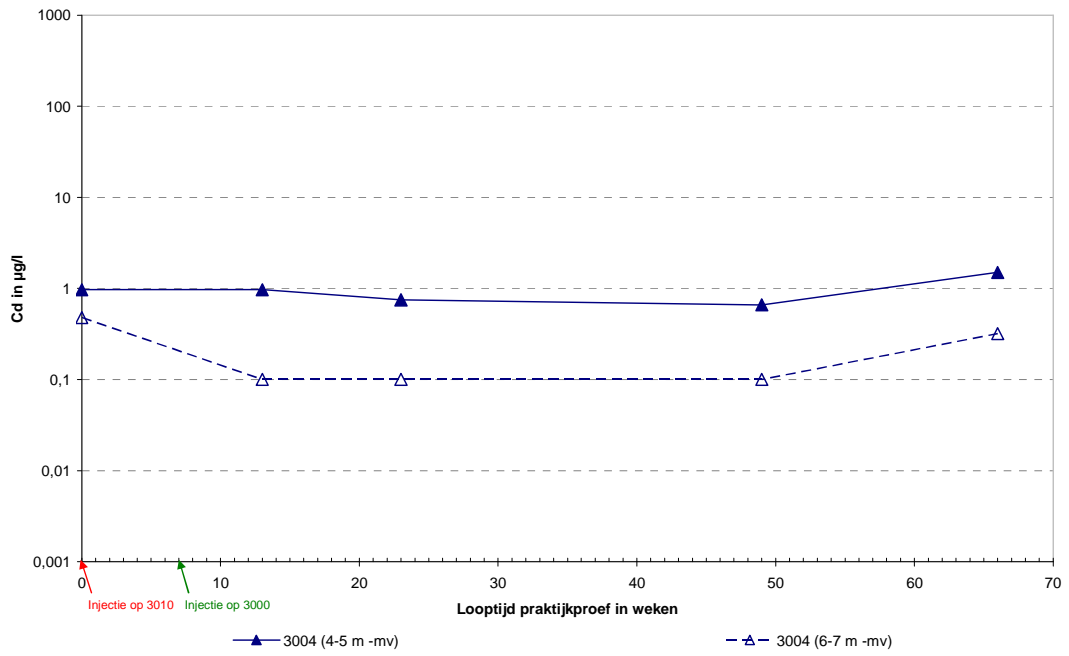
Figuur B11.4 Totaal-zwavelconcentratie (S) op 2 m van injector 3000 (peilbuis 3004)



Figuur B11.5 IJzerconcentratie (Fe) op 2 m van injector 3000 (peilbuis 3004)



Figuur B11.6 Zinkconcentratie (Zn) op 2 m van injector 3000 (peilbuis 3004)

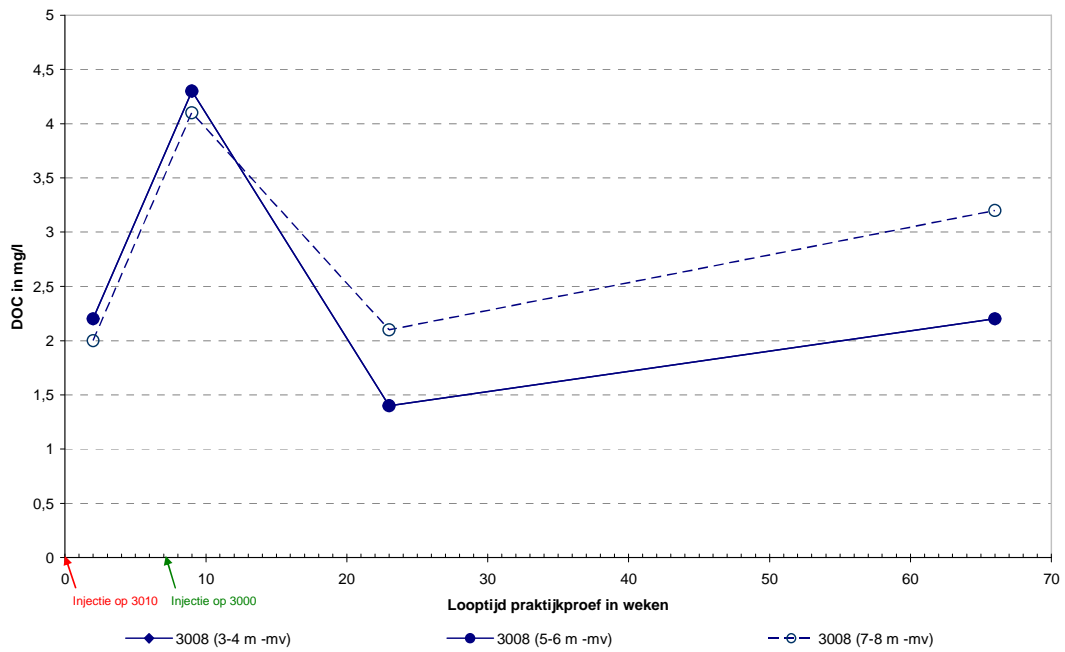


Figuur B11.7 Cadmiumconcentratie (Cd) op 2 m van injector 3000 (peilbuis 3004)

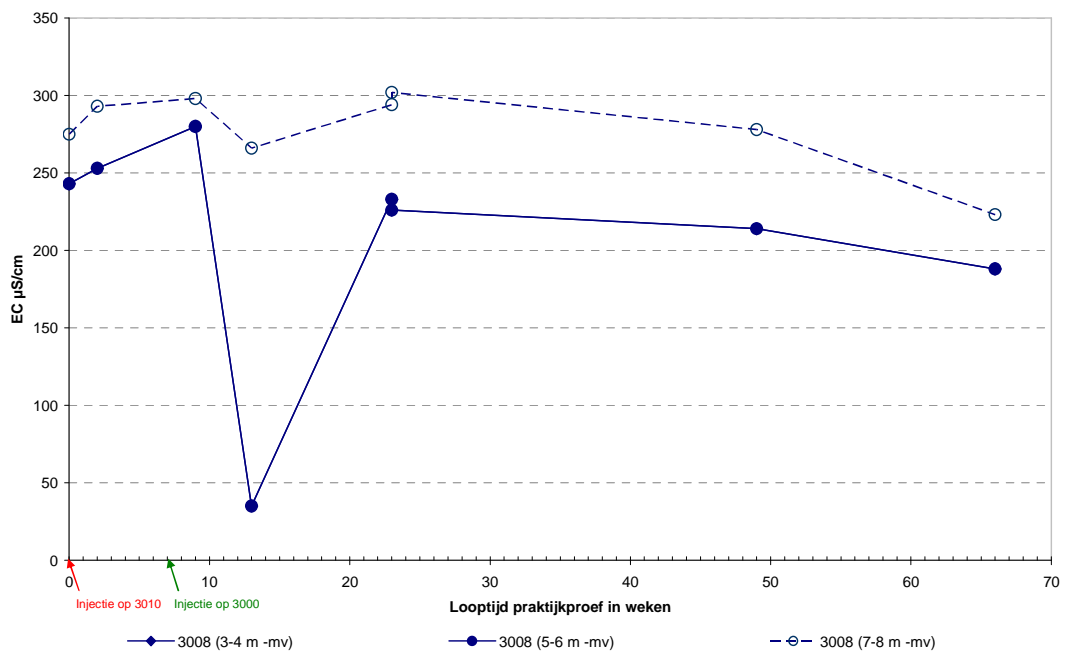
Bijlage

12

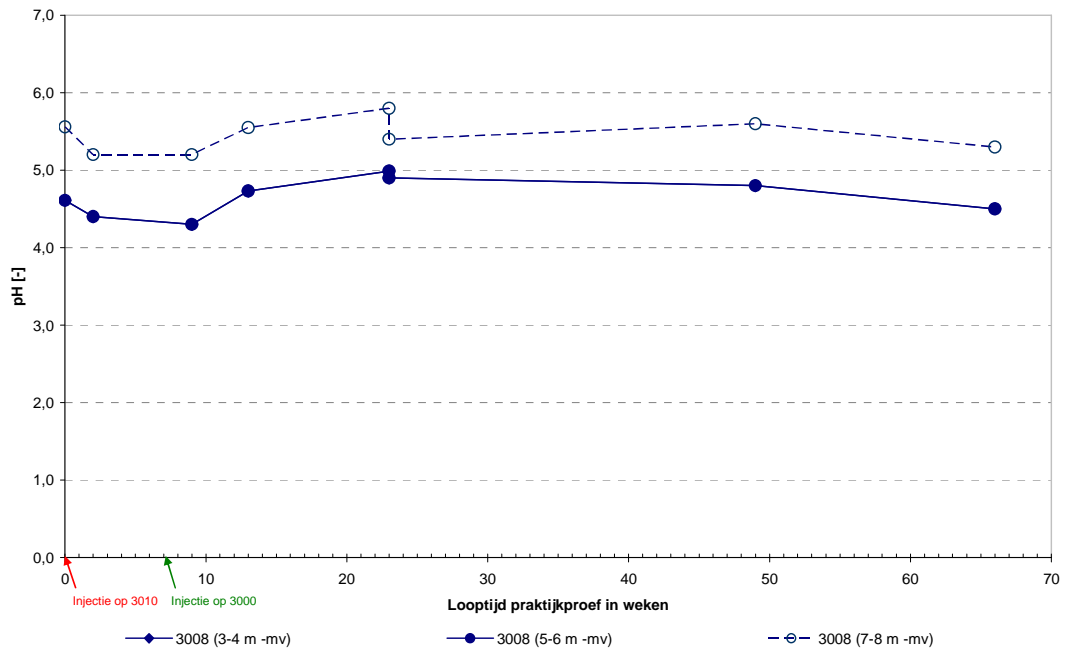
Veld- en analysedata referentiepeilbuis 3008



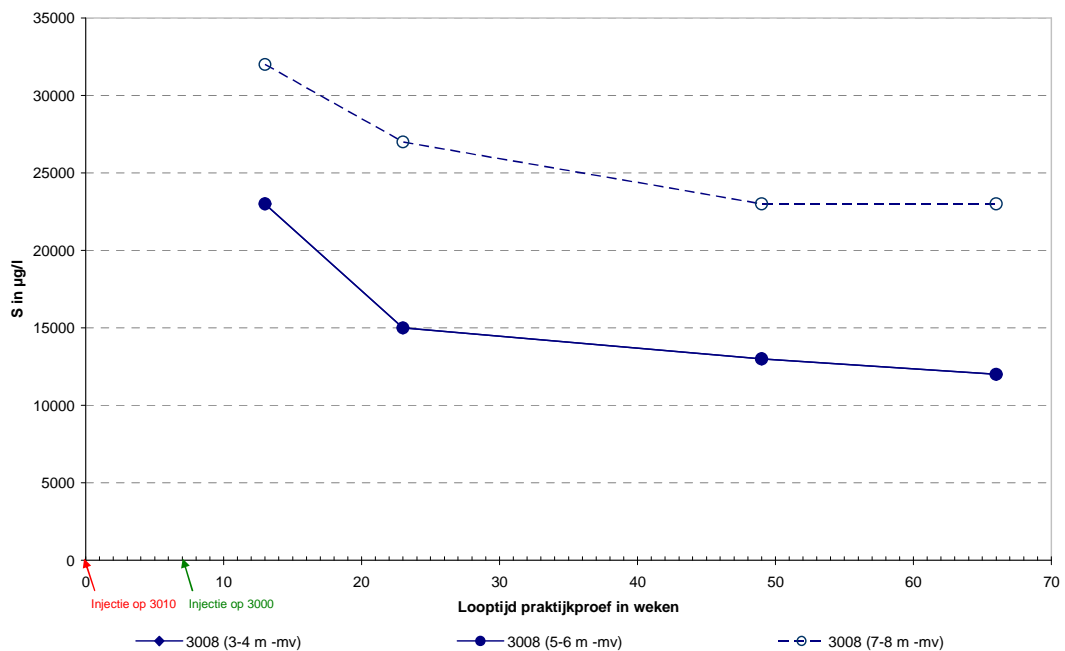
Figuur B12.1 DOC-concentratie in referentiepeilbuis 3008



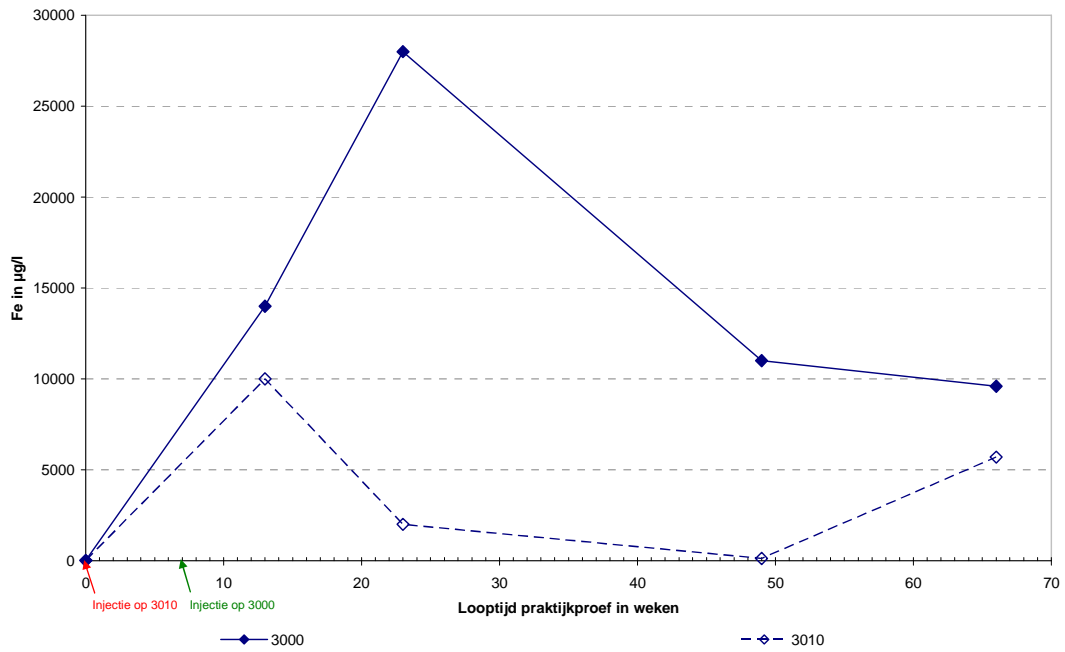
Figuur B12.2 Elektrische geleidbaarheid (EC) in referentiepeilbuis 3008



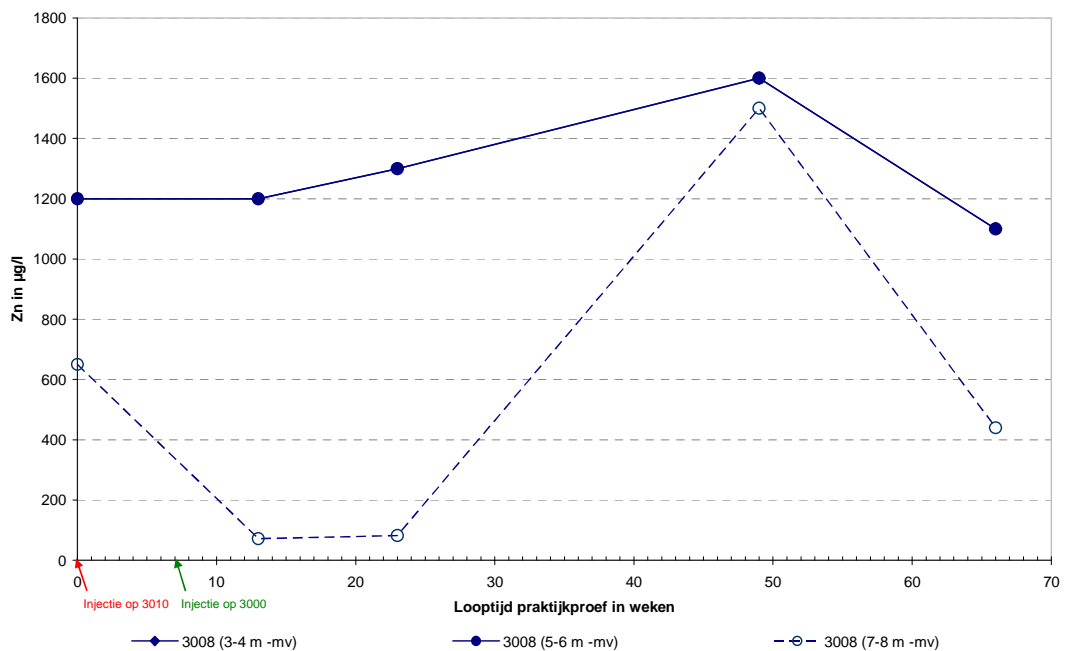
Figuur B12.3 Zuurgraad (pH) in referentiepeilbuis 3008



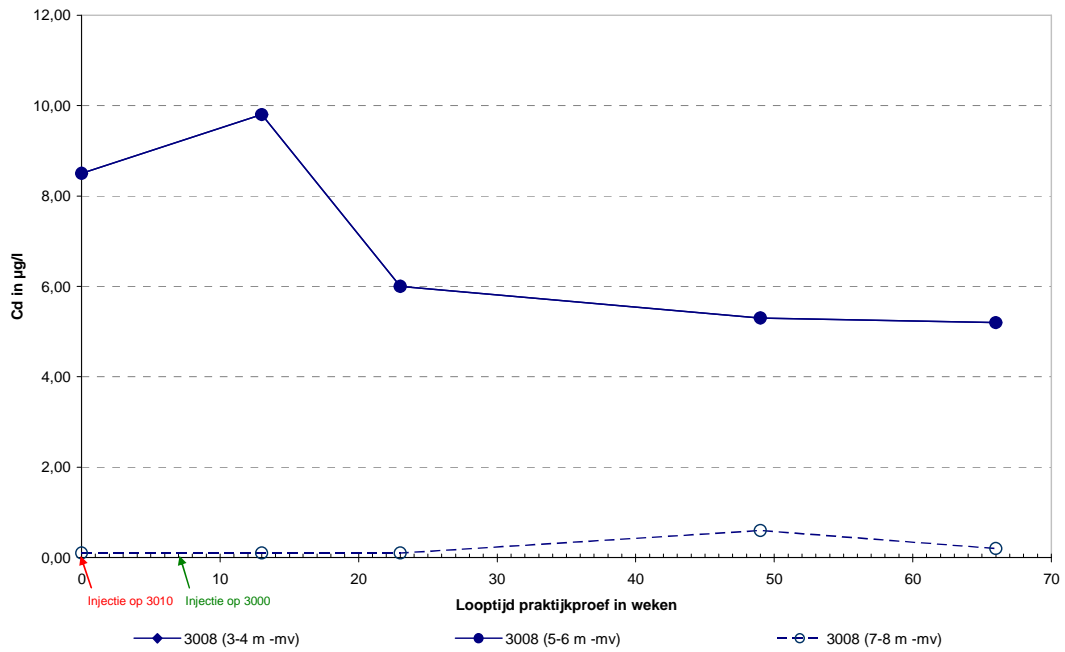
Figuur B12.4 Totaal-zwavelconcentratie (S) in referentiepeilbuis 3008



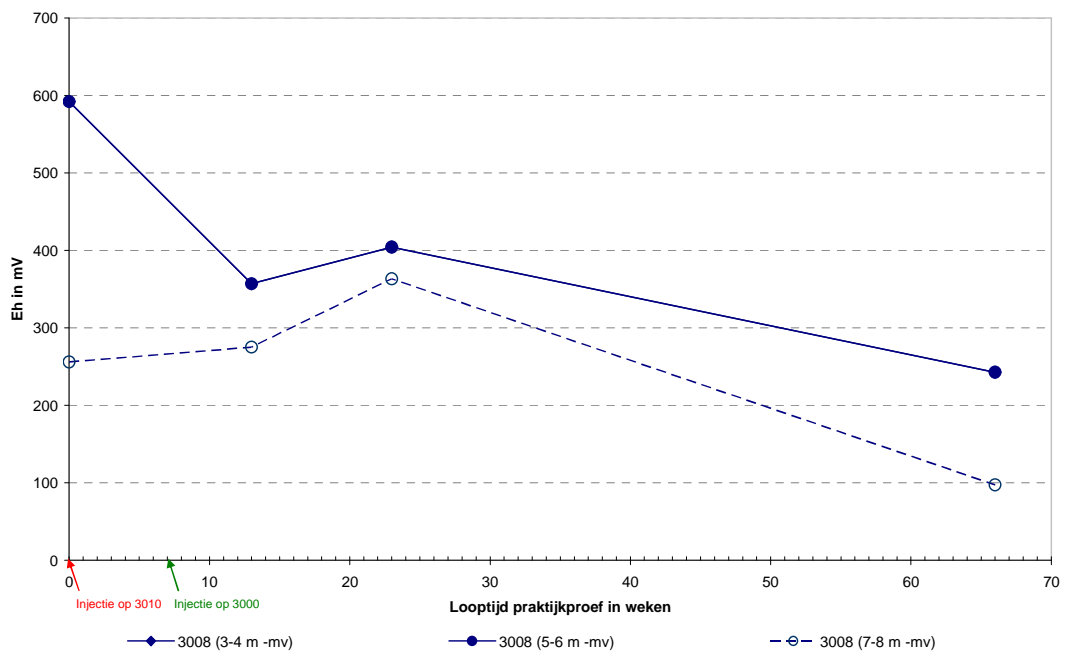
Figuur B12.5 IJzerconcentratie (Fe) in referentiepeilbuis 3008



Figuur B12.6 Zinkconcentratie (Zn) in referentiepeilbuis 3008



Figuur B12.7 Cadmiumconcentratie (Cd) in referentiepeilbuis 3008



Figuur B12.8 Redoxpotentiaal (Eh) in referentiepeilbuis 3008