

# SV-080 LINER-gasinjectie

**Een nieuw concept voor de stimulering van de  
biologische CKW-afbraak**

Resultaten pilotproeven in Epe en Zwolle

ir. H.Tonnaer (Tauw bv)  
dr. ir. E.C.L. Marnette (Tauw bv)  
dr. ir. P.A. Alphenaar (Tauw bv)  
ir. C.H.J.E. Schuren (Tauw bv)  
K.M.J. van den Brink (Tauw bv)

maart 2001

Gouda, CUR/SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

### **Auteursrechten**

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van CUR/SKB.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"LINER-gasinjectie - Een nieuw concept voor de stimulering van de biologische CKW-afbraak", maart 2001, CUR/SKB, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

CUR/SKB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en CUR/SKB sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens CUR/SKB en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

**Titel rapport**

LINER-gasinjectie  
Een nieuw concept voor de stimulering van de  
biologische CKW-afbraak

Resultaten pilotproeven in Epe en Zwolle

**CUR/SKB rapportnummer**

SV-080

**Project rapportnummer**

SV-080

---

**Auteur(s)**

ir. H.Tonnaer  
dr. ir. E.C.L. Marnette  
dr. ir. P.A. Alphenaar  
ir. C.H.J.E. Schuren  
K.M.J. van den Brink

**Aantal bladzijden**

**Rapport:** 26  
**Bijlagen:** 31

---

**Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)**

AGA Gas B.V. (ir. R. Nijhuis, 010-4353864)  
Provincie Zuid Holland (C.G.M. Kester, 070-4417097)  
Provincie Gelderland (ir. D. Coppel, 026-3598838)  
Philips PMF Nederland B.V. (F.B. Melgert en M.L.M. van Lierop (Philips CEEO))  
Tauw bv (dr. ir. P.A. Alphenaar, dr. ir. E.C.L. Marnette, ir. H. Tonnaer en ir. C.H.J.E. Schuren 0570-699911)

---

**Uitgever**

CUR/SKB, Gouda

---

**Samenvatting**

In het voorliggende onderzoek is bekeken of met de LINER-gasinjectietechniek verontreinigingen met chloorhoudende koolwaterstoffen efficiënter kunnen worden gesaneerd dan met de meer conventionele saneringstechnieken. LINER staat voor LIquid Nitrogen Enhanced Remediation. Met deze nieuwe techniek wordt substraat in de vorm van een stabiele nevel in de bodem gebracht, waarbij stikstof als dragergas fungeert. De techniek is toepasbaar tot grote diepten. Uit de resultaten blijkt dat verontreinigingen met de nieuwe techniek beter beschikbaar worden gemaakt en dat tevens afbraak kan worden gestimuleerd waarbij volledige omzetting tot etheen en ethaan kan worden bereikt. Veel van de praktijkproblemen die zich bij voordoen bij de meer conventionele methoden voor het inbrengen van substraat blijken met de nieuwe techniek opgeheven te worden. Zo blijkt een betere verspreiding van het substraat bewerkstelligd te worden, worden verontreinigingen beter beschikbaar gemaakt en blijkt verstopping van infiltratiemiddelen niet op te treden.

---

**Trefwoorden****Gecontroleerde termen:**

biodegradatie  
invloedstraal  
stimulatie  
substraat  
VOCI

**Vrije trefwoorden:**

gasinjectie  
LINER  
LINER-gasinjectie

---

**Titel project**

LINER-gasinjectie

**Projectleiding**

Tauw bv  
(dr. ir. P.A. Alphenaar, 0570-699911)

---

Dit rapport is verkrijgbaar bij:  
CUR/SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

# INHOUD

		SAMENVATTING	IV
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Algemeen	1
	1.2	Opbouw rapport	3
Hoofdstuk	2	DOELSTELLING EN ALGEMENE ONDERZOEKSOPZET	4
	2.1	Doelstelling	4
	2.2	Onderzoeksopzet en rapportage	4
Hoofdstuk	3	MOBILISATIE VAN CHLOORHOUDENDE OPLOSMIDDELEN (LOCATIE EPE)	6
	3.1	Beknopte beschrijving locatie	6
	3.2	Specifieke doelstellingen	7
	3.3	Beschrijving injectiesysteem en onderzoeksopzet	7
	3.3.1	Algemeen	7
	3.3.2	Pilotopstelling	7
	3.3.3	Uitvoering van de pilot	8
	3.4	Resultaten en discussie eerste injectietest	9
	3.4.1	Concentratieverloop	9
	3.4.2	Drukverloop	11
	3.4.3	PID-metingen	12
	3.5	Resultaten en discussie tweede injectietest	12
	3.5.1	Concentratieverloop	12
	3.5.2	Drukverloop	14
	3.5.3	Concentratieverloop tracer	14
	3.5.4	PID-metingen	14
	3.6	Conclusies	15
Hoofdstuk	4	STIMULERING BIOLOGISCHE AFBRAAK (LOCATIE ZWOLLE)	16
	4.1	Beknopte beschrijving locatie	16
	4.2	Specifieke doelstellingen	17
	4.3	Beschrijving injectiesysteem en onderzoeksopzet	17
	4.3.1	Algemeen	17
	4.3.2	Pilotopstelling	17
	4.3.3	Uitvoering van de pilot	19
	4.3.4	Keuze substraat	19
	4.3.5	Inzet van kennis uit de pilot-test in Epe	19
	4.4	Uitgevoerde werkzaamheden	19
	4.4.1	Vastleggen nulsituatie en redoxcondities	19
	4.4.2	Bepalen injectieregime	20
	4.4.3	Bepaling verspreidingspatroon substraat en biologische afbraak	20
	4.4.4	Bodemluchtmetingen	20
	4.5	Resultaten en discussie	20
	4.5.1	Verspreiding substraat	20
	4.5.2	Biologische afbraak	21
	4.5.3	Redoxsituatie	23
	4.5.4	Bodemluchtmetingen	24
	4.6	Conclusies	24

Hoofdstuk	5	OVERALL CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	26
BIJLAGE	A	VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL GEDURENDE DE EERSTE INJECTIETEST, TABELLEN	
BIJLAGE	B	VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL GEDURENDE DE EERSTE INJECTIETEST, GRAFIEKEN	
BIJLAGE	C	VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL GEDURENDE DE TWEEDE INJECTIETEST, TABELLEN	
BIJLAGE	D	VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL GEDURENDE DE TWEEDE INJECTIETEST, GRAFIEKEN	
BIJLAGE	E	LOCATIE PILOTOPSTELLING	
BIJLAGE	F	ANALYSERESULTATEN NULSITUATIE, REDOXSITUATIE EN MONITORING, TABELLEN	
BIJLAGE	G	GRAFISCHE WEERGAVE BIOLOGISCHE AFBRAAK	

## **SAMENVATTING**

### **LINER-gasinjectie**

#### **Een nieuw concept voor de stimulering van de biologische CKW-afbraak**

In het voorliggende onderzoek is bekeken of met de LINER-gasinjectietechniek verontreinigingen met chloorhoudende koolwaterstoffen efficiënter kunnen worden gesaneerd dan met de meer conventionele saneringstechnieken. LINER staat voor LIquid Nitrogen Enhanced Remediation. Met deze nieuwe techniek wordt substraat in de vorm van een stabiele nevel in de bodem gebracht, waarbij stikstof als dragergas fungeert. De techniek is toepasbaar tot grote diepten. Uit de resultaten blijkt dat verontreinigingen met de nieuwe techniek beter beschikbaar worden gemaakt en dat tevens afbraak kan worden gestimuleerd waarbij volledige omzetting tot etheen en ethaan kan worden bereikt. Veel van de praktijkproblemen die zich bij voordoen bij de meer conventionele methoden voor het inbrengen van substraat blijken met de nieuwe techniek opgeheven te worden. Zo blijkt een betere verspreiding van het substraat bewerkstelligd te worden, worden verontreinigingen beter beschikbaar gemaakt en blijkt verstopping van infiltratiemiddelen niet op te treden.

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

#### 1.1 Algemeen

In Nederland zijn een groot aantal locaties verontreinigd met chloorhoudende koolwaterstoffen (CKW). Deze stoffen werden en worden veelvuldig gebruikt bij metaalverwerkende bedrijven en het chemisch reinigen van textiel. Chloorhoudende koolwaterstoffen als "puur product" zijn zwaarder dan water en kunnen daarom tot diep in het grondwater doordringen. Doordat de stoffen onder natuurlijke condities slechts langzaam worden omgezet kan verontreinigd grondwater zich over grote afstanden en tot grote diepte verspreiden (zie figuur 1).

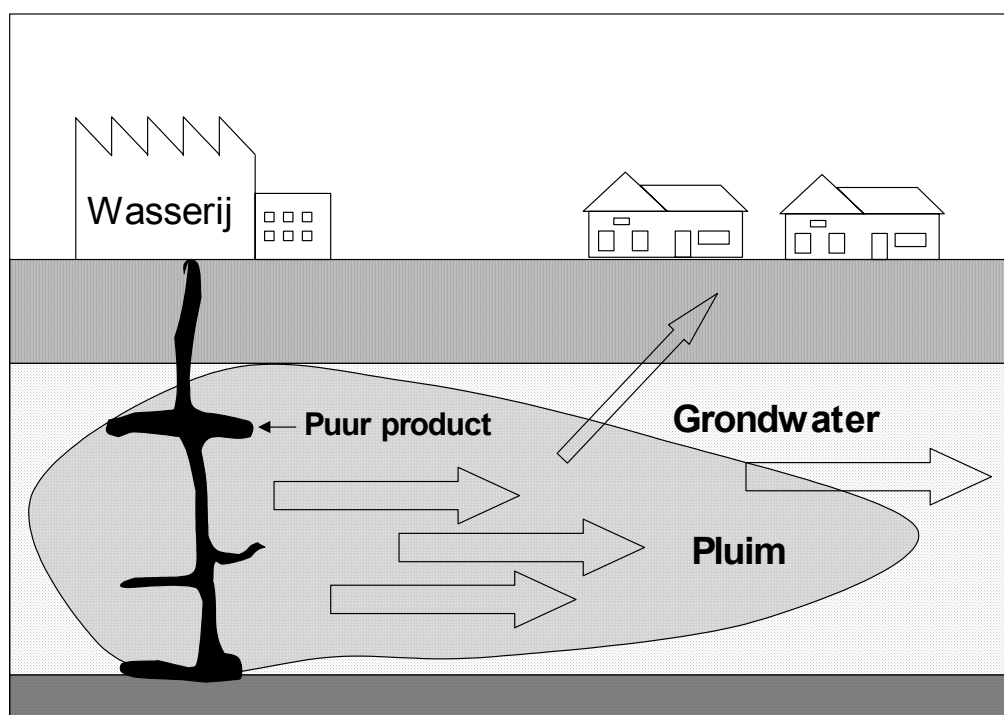


Fig. 1. Verspreiding verontreinigd grondwater.

#### "Conventionele", fysische verwijdering

Er zijn meerdere mogelijkheden om met CKW-verontreinigde locaties te saneren. Mogelijkheden hiervoor zijn:

- "pump and treat" (grondwater oppompen en bovengronds reinigen);
- infiltratie van (grond)water waaraan substraat wordt toegevoegd;
- natuurlijke afbraak;
- strippen door middel van persluchtinjectie;
- electroreclamatie;
- stoominjectie.

De eerste drie genoemde saneringsmethoden worden in de praktijk het meest toegepast, waarbij pump and treat en infiltratie twee technieken zijn waarbij actief wordt ingegrepen (dit zijn de meest conventionele technieken). Afgezien van de vaak beperkte efficiëntie van de meer

conventionele technieken wordt het oppompen van grondwater in toenemende mate verboden in het kader van het anti-verdrogingsbeleid.

Voor relatief ondiepe verontreinigingen (tot circa 10 à 20 meter) is het in-situ strippen middels persluchtinjectie (wellicht ondersteund door technieken als stoominjectie, elektroreclamatie etcetera) een alternatief.

In geval van zaklagen/puur product of bij de aanwezigheid van minder goed doorlatende lagen in de bodem, levert conventionele sanering via grondwateronttrekking geen goede resultaten op. Zeker bij diepere verontreinigingen zijn de bovengenoemde alternatieven weinig effectief; het gericht verwijderen van een zaklaag is problematisch omdat veelal niet bekend is waar deze zich exact bevindt.

### **Biologische in-situ sanering**

Steeds meer wordt duidelijk dat biologische processen een prominente rol (moeten) vervullen bij de sanering van CKW. Sanering is niet langer een kwestie van zo veel mogelijk onttrekken van verontreinigingen. Veel meer wordt de efficiëntie van een sanering bepaald door de vraag of, en zo ja hoe de juiste stoffen op de juiste plaats in de bodem kunnen worden gebracht ter stimulering van de biologische afbraak.

Stimulatie van biologische afbraak van CKW door middel van substraattoediening is bij een aantal (proef)saneringen succesvol gebleken. Er blijken echter drie belangrijke beperkingen van de methode te bestaan:

1. De verdeling van het substraat in de bodem.  
De "invloedstraal" bij het toedienen van vloeibaar substraat wordt gelimiteerd door (slechts beperkt te beïnvloeden) factoren als grondwaterstromsnelheid, substraatafbraak (niet direct gerelateerd aan omzetting van CKW) en een geringe menging van het geïnjecteerde volume met grondwater. Netto resultaat is dat voor een effectieve biostimulatie een vaak dicht (horizontaal én verticaal) netwerk van infiltratiemiddelen noodzakelijk is. Met name voor verontreinigingen op grote diepte is dit financieel niet haalbaar.
2. Duurzaamheid van de injectiemiddelen.  
Een belangrijk probleem blijkt dat chemische en biologische processen vaak leiden tot het dichtslibben van de infiltratiemiddelen. Infiltratie wordt hierdoor technisch gecompliceerd.
3. De geringe "biobeschikbaarheid/mobiliseerbaarheid" van als puur product of zaklaag in de bodem aanwezige verontreiniging vormt een aspect dat de efficiëntie van een biologische sanering verlaagt.

### **LINER-gasinjectie**

Binnen het SKB project "Gasinjectie" wordt een techniek onderzocht waarbij de bovengenoemde beperkingen naar verwachting niet optreden. De nieuwe techniek heeft in de loop van het project een naam gekregen: *LINER-gasinjectie*. LINER staat voor Liquid Nitrogen Enhanced Remediation.

Met de nieuwe LINER-gasinjectie-techniek wordt substraat in de bodem gebracht waarbij stikstof als dragergas fungeert. Het substraat wordt in de vorm van een stabiele aërosol via een stikstofstroom in de bodem gebracht.

De LINER-gasinjectietechniek dient, om succesvol te zijn, ten opzichte van substraatinfiltatie via bijvoorbeeld grondwater de volgende voordelen te hebben:

1. Een betere verspreiding van substraat.
2. Het mobiliseren van puur en geadsorbeerd product waardoor deze beter beschikbaar worden voor (biologische) verwijdering.
3. Een aanzienlijk lager risico op verstopping van infiltratiemiddelen.



## 1.2 **Opbouw rapport**

In hoofdstuk 2 wordt het doel en de onderzoeksopzet besproken. In hoofdstuk 3 en 4 worden de subdoelen, onderzoeksopzet en de resultaten van respectievelijk de locatie Epe en Zwolle besproken. Het rapport wordt afgesloten in hoofdstuk 5 waarin de overall conclusies en aanbevelingen worden gegeven.

### DOELSTELLING EN ALGEMENE ONDERZOEKSOPZET

#### 2.1 Doelstelling

##### Algemeen

Door de biologische afbraak te stimuleren via toediening van substraat kunnen CKW verontreinigingen zonder grootschalige onttrekkingen en kostbare zuiveringen gesaneerd worden. Een technisch probleem van dit concept is het realiseren een goede verspreiding van substraat in de bodem en de duurzaamheid van de infiltratiemiddelen (verstopping). Onderhavig projectplan betreft een onderzoek naar de mogelijkheden van gasinjectie als techniek om deze problemen op te lossen.

##### Hoofddoelstelling

De doelstelling van het project is het in de praktijk aantonen of substraatinjectie middels een (drager)gas een bruikbaar alternatief is voor de gebruikelijke in-situ saneringsmethoden voor CKW. Meer in het bijzonder, het project dient aan te tonen dat gasinjectie inderdaad de beperkingen die aan de huidige in-situ technieken voor CKW kleven kan opheffen (zie paragraaf 1.1).

##### Specifieke doelen van het project

De specifieke doelstellingen betreffen het verkrijgen van een antwoord op de volgende vragen:

1. Wat is het effect van gasinjectie op de beschikbaarheid van verontreinigingen (door het losmaken van de verontreiniging)?
2. Wat is de meest geschikte wijze van substraattoediening?
3. Hoe groot is het invloedsgebied en wat is het verspreidingspatroon van substraat bij gasinjectie?
4. Kan met deze nieuwe techniek ook daadwerkelijk de biologische afbraak worden gestimuleerd?

#### 2.2 Onderzoeksopzet en rapportage

De knelpunten voor het uitvoeren van substraatinjectie bevinden zich op het gebied van de bodemheterogeniteit op grote schaal, die van invloed is op het verspreidingsgedrag van substraat in de bodem. Dit verspreidingsgedrag is alleen in een praktijksituatie goed te bepalen. De effectiviteit van de nieuwe substraat-gasinjectietechniek kan daarom alleen maar op praktijkschaal in een pilot-proef worden getoetst.

Bij de voorbereidingen van dit SKB-project deed de unieke situatie zich voor dat de nieuwe techniek op drie verschillende locaties met verschillende bodemopbouw, verschillende verontreinigingssituaties en gekoppeld aan saneringsoperaties met verschillende doelstellingen kon worden uitgetest. Door de testen achtereenvolgend op de locaties uit te voeren kon de opgedane kennis van de proef op de ene locatie gebruikt worden op de volgende locatie. De opzet van het onderzoek is daardoor bijzonder geschikt voor een praktische bepaling van de geschiktheid van gasinjectie als verspreidingstechniek van substraat.

De drie locaties betreffen:

1. Achterste Molen te Epe (probleemhebber: provincie Gelderland).
2. Voormalige chemische Wasserij te Wassenaar (probleemhebber: provincie Zuid-Holland).
3. Voormalige Amefo Locatie te Zwolle (probleemhebber: Philips).

De opzet van het project was om de meest relevante onderzoeksaspecten (zie bovenstaande paragraaf) op één of meerdere locaties aan de orde te laten komen. Met het clusteren van de drie onderzoeken wordt een grotere synergie nagestreefd dan op grond van drie afzonderlijke pilots kan worden verkregen. Het SKB-onderzoek is samengesteld uit drie duidelijk te onderscheiden deelonderzoeken op (drie verschillende) locaties, gekoppeld aan een concrete vraagstelling gericht op sanering van de betreffende locatie.

Combinatie van de drie deelonderzoeken levert op deze wijze een goed overzicht van mogelijkheden en knelpunten van de gasinjectietechniek op. Belangrijk voor de synergie is dat als het SKB-onderzoek succesvol verloopt, de gasinjectietechniek als "bewezen" in de markt kan worden gezet.

Het eerste pilotonderzoek is uitgevoerd op de locatie in Epe. Dit onderzoek heeft zich met name gericht op de eerste specifieke doelstelling: het effect van gasinjectie op het losmaken van verontreinigingen. De opzet was om als tweede testlocatie Wassenaar te nemen. Op deze locatie zou met name gekeken worden naar de meest geschikte wijze om substraat in de bodem te brengen. De mogelijkheden hiervoor zijn:

1. Door middel van het direct in de bodem brengen van substraat in injectiefilters en vervolgens "na te blazen" met stikstof.
2. Door middel van verneveling.

Echter door een aantal buiten de macht van het consortium liggende oorzaken is deze proef uitgesteld tot medio 2001. Om de voortgang in het gasinjectieproject niet te belemmeren is ervoor gekozen om de proef op de Zwolle-locatie te starten met de in de ogen van het consortium, meest belovende methode om het substraat in de bodem te brengen: door middel van verneveling. De tweede specifieke doelstelling: het bepalen van de meest efficiënte methode (het testen van alternatieven) is derhalve naar achter verschoven en valt buiten de scope van dit rapport.

De reden dat nu al een samenvattende rapportage wordt uitgebracht is dat de twee pilots die in Epe en Zwolle zijn uitgevoerd, zo succesvol waren dat SKB samen met het consortium het wenselijk achtte de resultaten zo snel mogelijk bekend te maken. Voor de locatie in Wassenaar zal na afronding van de pilot in 2001 een additioneel rapport worden uitgebracht.

## MOBILISATIE VAN CHLOORHOUDENDE OPLOSMIDDELEN (LOCATIE EPE)

### 3.1 Beknopte beschrijving locatie

De belangrijkste voorwaarde waaraan de testlocatie moest voldoen voor de gasinjectietest was dat er vrij product (NAPL) aanwezig dient te zijn. Het onderzoek richt zich immers hoofdzakelijk op het effect van gasinjectie op het mobiliseren van NAPL. Verder is het wenselijk dat de NAPL op geringe diepte aanwezig is zodat kosten voor diepe boringen bespaard kunnen worden.

De locatie aan de Achterste Molenweg te Epe voldoet aan bovengenoemde criteria. Een belangrijk argument om deze locatie als test site te gebruiken is tevens, dat in het ontwerp voor het saneringssysteem dat op deze locatie zal worden aangelegd, in een eerste fase een grondwateronttrekking zal gaan plaatsvinden. Indien blijkt dat gasinjectie het rendement van deze grondwateronttrekking kan verhogen, dan kan worden overwogen de grondwateronttrekking te ondersteunen met gasinjectie. In een tweede fase zal anaërobe biologische afbraak van CKW door middel van substraattoediening plaatsvinden. Om anaërobe condities in de bodem te handhaven, wordt met stikstofgas geïnjecteerd.

Zowel in het ondiepe grondwater (3-4 m -mv) als het diepe grondwater op de bronlocatie worden lokaal zeer hoge concentraties CKW, met name per, aangetroffen (zie figuur 2). De hoogste concentratie is 220.000  $\mu\text{g}$  per/l, hetgeen wijst op de aanwezigheid van puur product. Door de grote verschillen in horizontale en verticale doorlatendheden in de bodem, de grote diepte van voorkomen en de onbekendheid met de exacte locatie van de bron, is het vrijwel onmogelijk om deze zaklaag reëel aan te tonen. Op basis van gegevens in het saneringsonderzoek is een scheiding in het watervoerend pakket gemaakt: grondwater tot 60 m -mv en grondwater vanaf 60 m -mv tot de hydrologische basis op 150 m -mv.

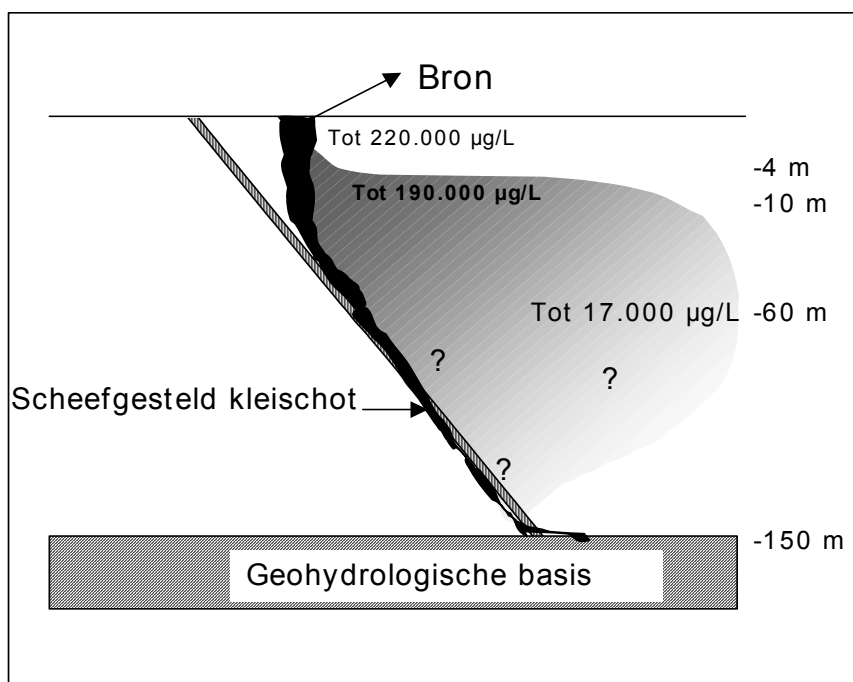


Fig. 2. Overzicht situatie locatie Epe.

Het front van de verontreiniging verplaatst zich naar de diepte. Op een afstand van 320 meter ten noorden van de bron is op een diepte van 61,5 m -mv 17.000 µg per/l aangetoond. Het verontreinigd oppervlak in het middeldiepe grondwater is op basis van het nader onderzoek geschat op circa 1,85 ha en voor het diepe grondwater op een oppervlak van circa 8 ha. Er dient uitgegaan te worden van circa 4 à 5 miljoen m<sup>3</sup> verontreinigd grondwater. Er wordt van uitgegaan dat de Formatie van Tegelen (op ongeveer 150 m -mv) een ondoorlatende laag vormt, waardoor de verontreiniging niet verder naar de diepte is verplaatst.

### 3.2 Specifieke doelstellingen

Op de met CKW verontreinigde locatie Achterste Molen te Epe is een saneringssysteem ontworpen waarbij in een eerste fase door middel van grondwateronttrekking zoveel mogelijk vracht aan verontreinigingen zal worden onttrokken. In een tweede fase zal worden overgegaan op stimulering van biologische afbraak.

Het doel van het voorliggende eerste deelonderzoek dat is uitgevoerd binnen dit SKB-project is tweeledig:

1. Het kunnen doen van een uitspraak of gasinjectie een mobilisatie van vrij product bewerkstelligt, zodat het rendement van een eventuele grondwateronttrekking of substraatinjectie vergroot kan worden.
2. Het leren van de uitvoering van de injectietest, zodat belangrijke aspecten meegenomen kunnen worden in de nog uit te voeren deelonderzoeken binnen dit SKB-project. Het betreft met name de volgende aspecten:
  - wat is het meest efficiënte injectieregime?
  - bestaat er substantiële uitdamping van CKW als gevolg van gasinjectie?
  - hoeveel substraat moet er worden toegediend om een meetbare verspreiding te verkrijgen?

### 3.3 Beschrijving injectiesysteem en onderzoeksopzet

#### 3.3.1 Algemeen

Het onderzoek bestond uit de uitvoering van twee stikstofinjectietesten. In de eerste test is éénmaal geïnjecteerd gedurende een bepaalde periode, waarop het concentratieverloop in het grondwater werd gevolgd.

In de tweede test is bekeken wat de invloed is van meerdere achter elkaar uitgevoerde gasinjecties op de concentratie van CKW in het grondwater. Hierbij is tevens in het injectiefilter bromide als een vloeibare tracer ingebracht om te onderzoeken of de tracer door gasinjectie verspreid wordt in het grondwater.

Voor het bepalen van een optimaal injectieregime is gedurende de injectietesten de druk in het grondwater geregistreerd. Hierop wordt in paragraaf 3.4.2 nader ingegaan.

In het onderstaande overzicht worden de testen in detail beschreven.

#### 3.3.2 Pilotopstelling

Het concentratieverloop in het grondwater is op verschillende dieptes en op verschillende afstanden van het injectiefilter gevolgd.

De testopstelling bestond uit één injectiefilter en negen monitoringsfilters (filterlengte 20 cm, Ø 3 cm). De monitoringsfilters zijn op drie verschillende afstanden en dieptes geplaatst (zie figuur 3). Codering van de filters is als volgt: filter 288-3 is geplaatst op 3,4 m afstand van het injectiefilter op een diepte van 7,8 m -mv.

Gedurende beide testen zijn PID-meters in de onverzadigde zone geïnstalleerd om te onderzoeken of de gasinjectie leidde tot vervluchtiging van CKW naar de onverzadigde zone. De uitdamping van koolwaterstoffen is continue geregistreerd.

Voorts zijn gedurende de injectietest één of twee monitoringsfilters aangesloten op een drukmeter om het effect van de injectie op de druk in de bodem te kunnen volgen. Drukgegevens zijn belangrijk wanneer bepaald moet worden wanneer een volgende injectie kan plaatsvinden. Het "wassende" effect van een gasinjectie is het grootst wanneer de lucht van een eerdere injectie zoveel mogelijk uit de luchtkanalen in de bodem verdwenen is. Het zich weer vereffenen van de druk in de bodem op een niveau van voor de eerste injectie, is een indicatie dat de lucht voor het grootste deel ontsnapt is naar de onverzadigde zone.

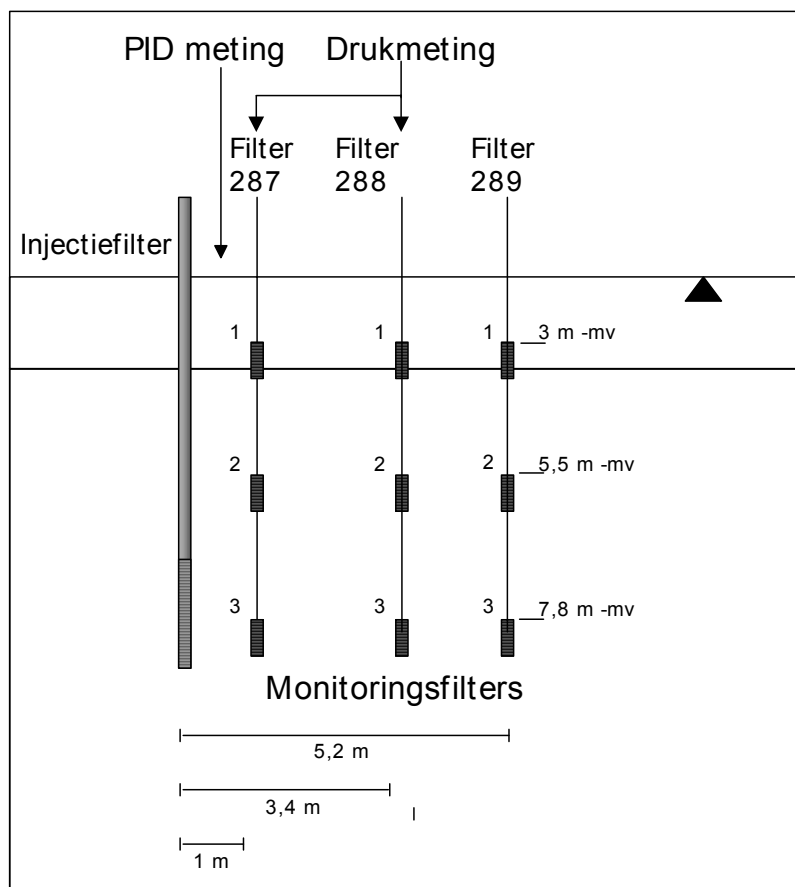


Fig. 3. Pilotopstelling.

### 3.3.3 Uitvoering van de pilot

#### Uitvoering test 1

##### Bepaling van spreiding in analyses

Om een inzicht te verkrijgen in de spreiding van de CKW analyses zijn filter 287 (5,5-5,7) en filter 289 (7,6-7,8) drie keer bemonsterd; de dag voorafgaand aan de injectie 's morgens vroeg en 's avonds ( $t=0(1)$  en  $t=0(2)$ , bijlage A) en juist voorafgaand aan de injectie ( $t=0(3)$ ). De monsters zijn geanalyseerd op CKW.

#### *De injectietest*

- Een U-buis is op filter 287-1 (3-3,2) geplaatst voor het monitoren van de druk;
- Twee PID meters met verloren punt zijn in de lijn van de monitoringsfilters op een afstand van 0,5 m vanaf injectiepunt op 1,3 m -mv en 1,5 m vanaf het injectiepunt op 1 m -mv geïnstalleerd;
- Alle filtertjes (9) zijn vlak voorafgaand aan de gasinjectie bemonsterd en geanalyseerd op CKW en bromide (tijdstip 0). Deze concentraties worden als referentie beschouwd;
- Het stikstofgas is één keer in een puls van 10 minuten met 20 m<sup>3</sup>/uur geïnjecteerd;
- Na de injectie zijn alle filtertjes bemonsterd (t=1) en geanalyseerd op CKW en bromide;
- Diezelfde dag zijn alle filtertjes drie maal bemonsterd (t=2, en 3, bijlage A) en geanalyseerd op CKW. Daarna volgt nog een bemonstering ruim een dag na de start van de injectie (t=4) en ruim twee weken na de start van de injectie (t=5).

### **Uitvoering test 2**

#### *Bepaling van spreiding in analyses*

Om een inzicht te verkrijgen in de spreiding van de CKW-analyses zijn filter 287 (5,5-5,7) en filter 289 (7,6-7,8) de dag voorafgaand aan de injectie 's morgens vroeg en 's avonds bemonsterd (t=0(1) en t=0(2), bijlage C) en geanalyseerd op CKW.

#### *De injectietest*

- Twee U-buizen zijn op filter 287-1 (3-3,2m -mv) en 288-1 (3-3,2 m -mv) geplaatst voor het monitoren van de druk;
- Twee PID meters met verloren punt zijn in de lijn van de monitoringsfilters op een afstand van 0,5 m vanaf het injectiepunt op 1,3 m -mv en 1,5 m vanaf injectiepunt op 1 m -mv geïnstalleerd;
- Voorafgaand aan de eerste injectie is 75 g Kaliumbromide opgelost in 1 L in de injectielans ingebracht;
- Alle filtertjes (9) zijn voorafgaand aan de gasinjectie bemonsterd en geanalyseerd op CKW en bromide (tijdstip 0). Deze concentraties worden als referentie beschouwd;
- Het stikstofgas is vier keer in pulsen van 5 minuten met 20 m<sup>3</sup>/uur geïnjecteerd. Elke nieuwe injectie is weer gestart als de druk vrijwel vereffend is;
- Na de laatste injectie zijn alle filtertjes bemonsterd (t=1) en geanalyseerd op CKW en bromide;
- Diezelfde dag zijn alle filtertjes driemaal bemonsterd (t=2, 3 en 4, bijlage 3) en geanalyseerd op CKW. Daarna volgde nog een bemonstering ruim een dag na de start van de injectie (t=5) en ruim vier dagen na de start van de injectie (t=6).

### **3.4 Resultaten en discussie eerste injectietest**

#### **3.4.1 Concentratieverloop**

In bijlagen A en B zijn in tabelvorm respectievelijk in grafiekvorm het concentratieverloop van per, tri, cis en CKW totaal weergegeven. In de grafieken is uitgedrukt het percentage toename van de betreffende component ten opzichte van de concentraties op t=0 (voorafgaand aan de gasinjectie). Ter illustratie is één grafiek opgenomen in de hoofdtekst (zie figuur 4).

Uit de grafieken blijkt dat zowel voor per, tri en cis er een significant effect is van de gasinjectie. Met name circa 8 uur na de start van de injectie treedt er een toename op in concentratie. Er is echter in een aantal gevallen ook een afname waar te nemen. Dit treedt met name op in de filters die het meest ver van het injectiefilter gelegen zijn (filters 288-1, 289-1 en 289-2). Bij deze filters is de invloed van de injectie zelfs tegengesteld: er vindt een afname plaats van de CKW-concentratie.

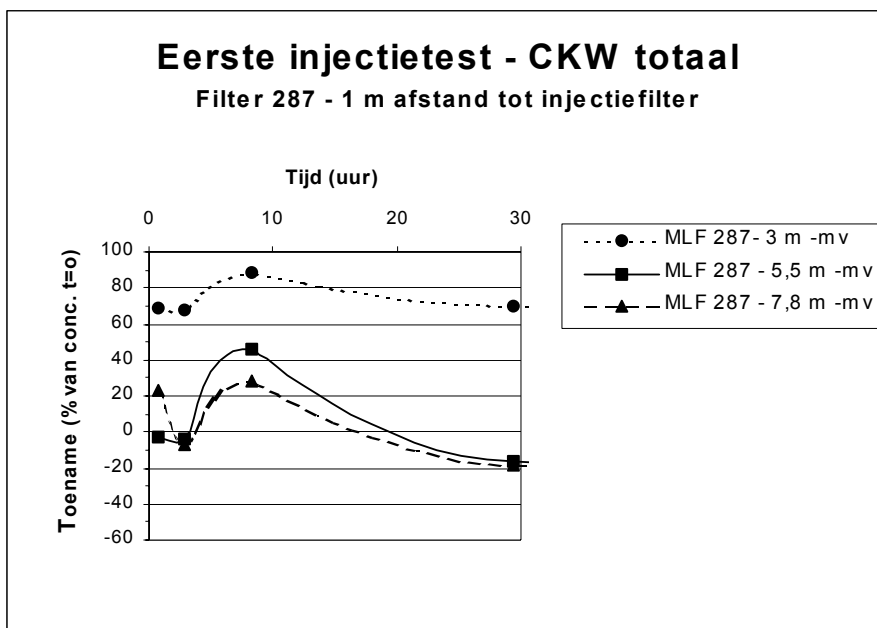


Fig. 4. Concentratieverloop CKW-totaal tijdens eerste injectietest.

Opvallend is dat in vrijwel alle filters de concentratietoename in de loop van de tijd minder wordt en dat er na 30 uur soms zelfs sprake kan zijn van een uiteindelijke afname van de concentratie ten opzichte van de concentratie van vóór de gasinjectie. Het concentratieverloop van de drie verschillende componenten vertoont in het algemeen een zelfde trend.

Bovenstaand fenomeen kan worden veroorzaakt door twee zaken. De eerste is de lokale spreiding van concentraties aan verontreinigingen rondom het injectiefilter. De concentraties zullen op lokaal niveau heterogeen verdeeld zijn. Door het wegdrukken en vervolgens terugstromen van het grondwater als gevolg van de injectie kan grondwater met ofwel hogere ofwel lagere concentraties ter plaatse van de monitoringsfilters terecht komen. Hierdoor kunnen bij de monitoring zowel hogere als lagere concentraties worden gevonden. Als er meerdere injecties worden uitgevoerd zal binnen het invloedsgebied een steeds betere menging optreden waardoor laatstgenoemd effect steeds minder zal worden. Daarnaast zal als gevolg van de injectie puur product worden gemobiliseerd. Nadat de injectie is afgelopen zal het grondwater de lucht weer verdringen en zal gemobiliseerd product langzaam in oplossing gaan. Dit effect zal een toename van de concentraties aan CKW veroorzaken. Dat beide effecten optreden blijkt uit de resultaten van de tweede injectietest (zie paragraaf 3.5).

In figuur 5 zijn de procentuele concentratieveranderingen (ten opzichte van de concentraties van vóór de gasinjectie) als gevolg van gasinjectie in alle monitoringsfilters gesommeerd en uitgezet als functie van de tijd. De figuur geeft dus de netto verandering van CKW totaal op basis van de metingen in alle filters.



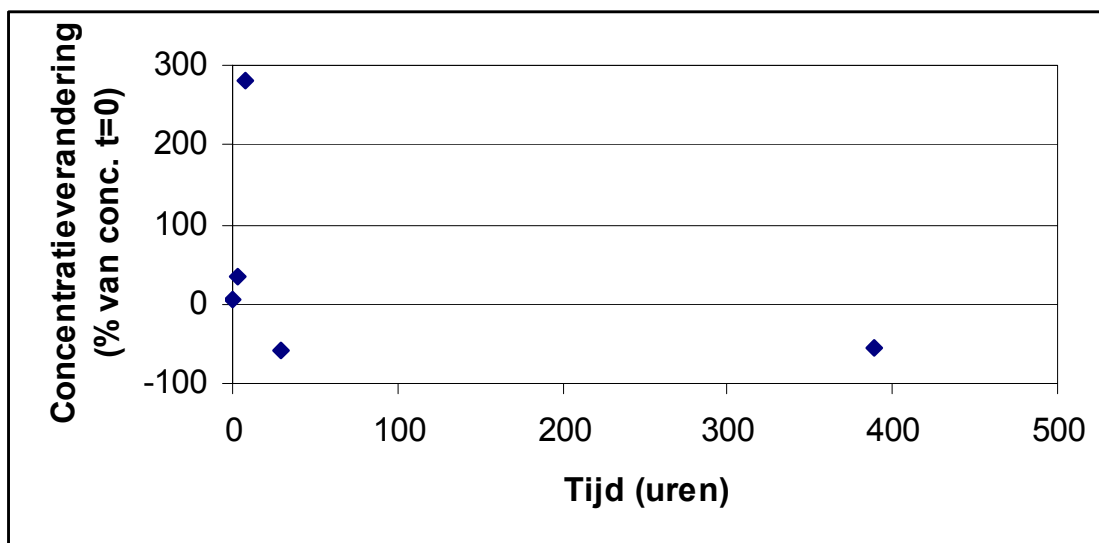


Fig. 5. Procentuele concentratieverandering (ten opzichte van concentratie vóór de gasinjectie) van CKW-totaal op verschillende tijdstippen van bemonstering ná gasinjectie.

Het blijkt dat, na een significante netto toename van CKW-totaal concentraties, er na verloop van tijd (ruim een dag) een netto afname plaatsvindt van CKW-totaal concentraties.

Het fluctueren van de concentraties geeft duidelijk aan dat er na de injectie (op kleine schaal) bewegingen in het grondwater plaatsvinden. Deze bewegingen zijn het gevolg van het voortdurend weer vollopen van poriën die tijdens de injectie waren gevuld met stikstofgas en het omhoog bewegen van het gas.

Dit "wassende" effect van gasinjectie zal naar vermoeden zich manifesteren in concentraties in grondwater wanneer de injectie gecombineerd wordt met grondwateronttrekking. De kans dat het vrije product zich in een grondwateronttrekkingsbaan bevindt (gezien op kleine schaal) zal door de voortdurende verplaatsing op kleine schaal door de luchtinjecties, vergroot worden. Grondwateronttrekking zal naar verwachting hierdoor, in combinatie met gasinjectie, beduidend efficiënter zijn.

### 3.4.2 Drukverloop

In figuur 6 is het drukverloop weergegeven in filter 287-1. Uit het verloop blijkt dat voor het stopzetten van de injectie, de druk afneemt. Dit betekent dat het stikstofgas reeds door de grondwaterspiegel is gebroken, waardoor de weerstand afneemt en een drukafname plaatsvindt. Tijdens injectie vindt er dus een geringe ophoging plaats van de grondwaterspiegel. Na het stopzetten van de injectie daalt de grondwaterspiegel als gevolg van het uitwijkende gas en er ontstaat zelfs een onderdruk als gevolg van de "golfbeweging" die het grondwater maakt door het plotseling wegvallen van de injectiedruk. Deze (gedempte) golfbeweging is duidelijk in figuur 6 waar te nemen.

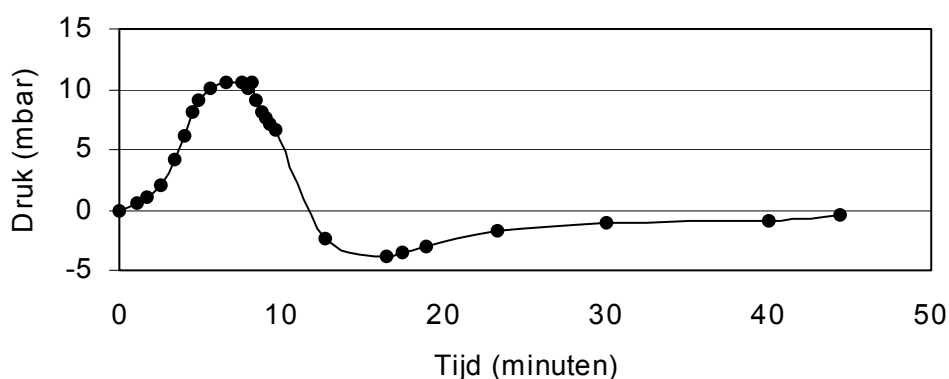


Fig. 6. Drukverloop eerste injectietest (filter 288-1).

Het beste tijdstip om een nieuwe injectie te starten is wanneer het grootste deel van de preferentiële luchtkanalen weer met water is gevuld. Wanneer de tweede injectie al zou worden uitgevoerd wanneer een groot deel van de kanalen nog met gas is gevuld, is het "wassende" effect van de injectie beduidend geringer en de injectie minder efficiënt in het verplaatsen/losmaken van puur product. Een indicatie voor het moment waarop de meeste kanalen weer zijn gevuld met water is wanneer de druk weer vereffend is. Figuur 6 geeft aan dat dit na ongeveer 40 minuten het geval is.

### 3.4.3 PID-metingen

PID-metingen zijn uitgevoerd om te bepalen of er substantiële uitdamping plaatsvindt in de onverzadigde zone. In het bemonsteringspunt op 0,5 m afstand (1,5 m -mv) van het injectiefilter is een uur na de injectie 320 ppm isobutyleen gemeten. Dit komt overeen met ongeveer  $3,9 \text{ g/m}^3$  per, hetgeen een aanzienlijke concentratie is. Uitdamping als gevolg van strippen van de verontreiniging uit het grondwater vindt dus evident plaats. Op 1,5 m afstand van het injectiefilter vond een beduidend geringere uitdamping plaats: circa 20 ppm isobutyleen (ongeveer  $0,2 \text{ g/m}^3$  per).

## 3.5 Resultaten en discussie tweede injectietest

### 3.5.1 Concentratieverloop

In bijlage C en D zijn in tabelvorm respectievelijk in grafiekvorm het concentratieverloop van per, tri, cis en CKW-totaal weergegeven. In de grafieken is uitgedrukt het percentage toename van de betreffende component ten opzichte van de concentraties op  $t=0$  (voorafgaand aan de gas-injectie). Ter illustratie is één van de grafieken weergegeven (figuur 7).

Gedurende de tweede injectietest heeft 40 minuten na de eerste injectie een tweede injectie plaatsgevonden. Vervolgens zijn daarna met tussenpozen van 80 minuten een derde en een vierde injectie uitgevoerd.

Het concentratieverloop voor de verschillende componenten gedurende de eerste injectietest ziet er anders uit dan die in de tweede test (bijlage D). De algemene trend is dat de verhoging in de concentraties na meerdere keren injecteren geringer is dan bij een enkele keer injecteren. Verder valt op dat de hogere concentraties na meerdere keren injecteren langer in stand blijven. Bijvoorbeeld: tijdens de eerste test in filter 287-2 (5,5 m -mv) vindt een verhoging plaats van per tot 50% van de initiële concentratie na circa 8 uur, waarna de concentratieverandering na 30 uur overgaat tot een afname van circa 20%.

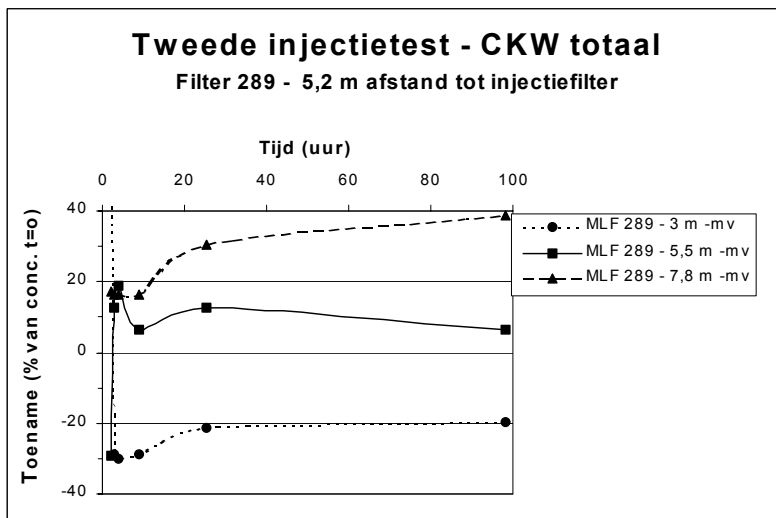


Fig. 7. Concentratieverloop CKW-totaal tijdens eerste injectietest.

Tijdens de tweede test neemt de concentratieverhoging toe tot circa 20% na een dag en blijft vrijwel constant tot na circa 100 uur. Een mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat er door het uitvoeren van meerdere injecties een betere menging plaatsvindt van puur product met het omgevingswater. Hierdoor zijn de uiteindelijke concentratieveranderingen wat lager, echter, door de goede mixing blijven de concentraties ook constanter. Het uitvoeren van injecties kort achter elkaar (40-80 minuten) lijkt dan ook efficiënter te zijn dan de uitvoering van een enkele injectie.

In figuur 8 wordt het bovenstaande nogmaals geïllustreerd. Hierin zijn de procentuele concentratieveranderingen (ten opzichte van de concentraties van vóór de gasinjectie) als gevolg van gasinjectie in alle monitoringsfilters gesommeerd en uitgezet als functie van de tijd.

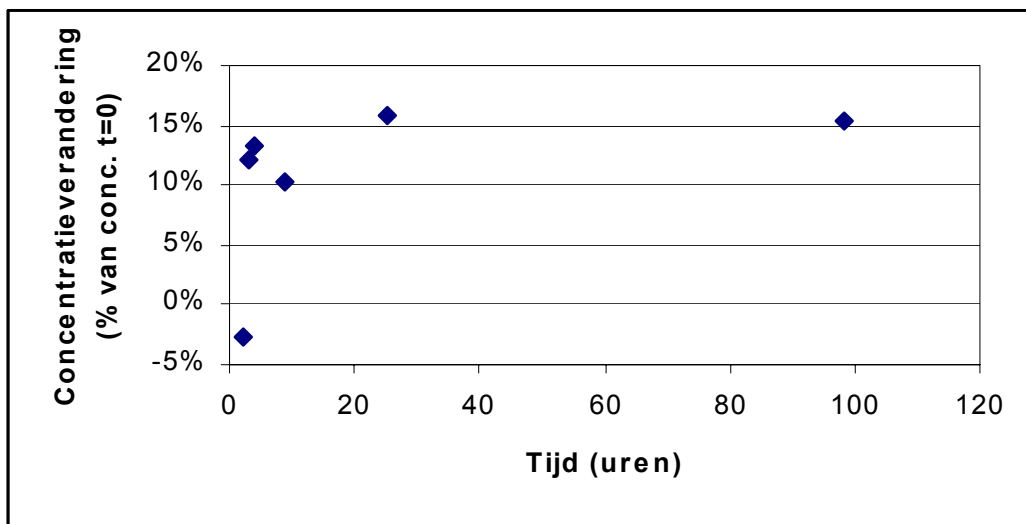


Fig. 8. Procentuele concentratieverandering (ten opzichte van concentratie vóór de gasinjectie) van CKW-totaal op verschillende tijdstippen van bemonstering ná de laatste gasinjectie.

Het betreft de tijd na de start van de laatste gasinjectie. De figuur geeft dus de netto verandering van CKW-totaal op basis van de metingen in alle filters na de laatste gasinjectie. Op langere termijn blijkt er een vrij stabiele concentratieverhoging in het grondwater te zijn opgetreden (circa 15% ten opzichte van de uitgangskonzentratie).

### 3.5.2 Drukverloop

In figuur 9 is het drukverloop weergegeven. Uit het verloop blijkt dat er dicht bij het injectiefilter op 3 m -mv een drukopbouw plaatsvindt. Dit fenomeen kan wijzen op het voorkomen van een minder goed doorlatende laag op deze diepte, waardoor het gas niet goed naar de onverzadigde zone kan ontwijken. Na circa twee uur is de range waarbinnen de U-buis kan meten overschreden.

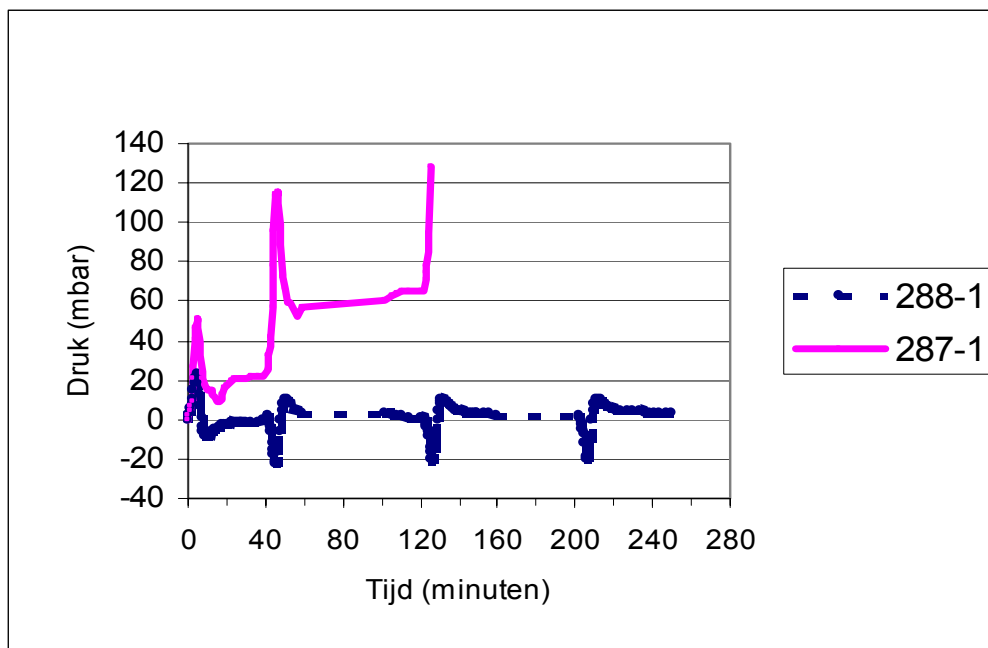


Fig. 9. Drukverloop tijdens de tweede injectietest. Start van de pieken corresponderen met de start van de injecties.

### 3.5.3 Concentratieverloop tracer

Voorafgaande aan de injecties zijn de achtergrondwaarden van bromide in de filters bepaald. Achtergrondconcentraties van bromide lagen alle beneden de detectielimiet van 0,05 mg/L. Na de vier injecties zijn een dag later in alle filters analyses uitgevoerd op bromide. De analyses tonen aan dat er geen verspreiding van het tracer tot in de filters heeft plaatsgevonden. Een verklaring hiervoor kan zijn dat het mixeffect van de gasinjectie toch niet voldoende is om een dermate kleine hoeveelheid (1L) aan tracer te doen verspreiden tot in de filters.

### 3.5.4 PID-metingen

Ook tijdens de tweede test zijn PID-metingen uitgevoerd om te bepalen of er substantiële uitdamping plaatsvindt in de onverzadigde zone. Er is op twee punten gemeten: op 0,5 m afstand (1,5 m -mv) en op 1,5 m afstand (1 m -mv) van het injectiefilter. Een uur na de injectie is op 0,5 m afstand van het injectiefilter 452 ppm isobutyleen gemeten, in het punt op 1,5 m afstand 272 ppm. Dit komt respectievelijk overeen met ongeveer 5,8 g/m<sup>3</sup> en 3,5 g/m<sup>3</sup> per.

Ook uit deze meting blijkt dat uitdamping plaats vindt en een goede bodemluchtexttractie essentieel is wanneer een sanering door middel van gasinjectie zal plaatsvinden.

### 3.6 Conclusies

Uit de twee injectietesten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Er bestaat een significant effect van een enkele gasinjectie op concentratieveranderingen in het grondwater. Op enkele filters na, die op grotere afstand van het injectiefilter zijn gelegen, vindt na een bepaalde periode een significante toename in concentraties van per, tri en cis plaats. Deze toename wordt in de loop van de tijd na de injectie echter geringer en kan zelfs resulteren in een afname;
- Wanneer meerdere injecties worden uitgevoerd, vinden er eveneens concentratieveranderingen plaats. Deze veranderingen zijn geringer dan bij een enkele injectie, echter de verhoogde concentraties nemen in de loop van de tijd na de injecties minder af en blijven hoger dan de uitgangssituatie;
- Op basis van de testresultaten kan worden gesteld dat het uitvoeren van gasinjectie in combinatie met grondwateronttrekking een verhoging kan opleveren van de hoeveelheid onttrokken vracht aan verontreinigingen. Het uitvoeren van meerdere injecties kort achter elkaar (40 à 80 minuten) blijkt efficiënter te zijn dan de uitvoering van een enkele injectie.

Met betrekking tot de nog uit te voeren (substraat-)gasinjectietesten zijn er enkele belangrijke resultaten die worden meegenomen in de uitvoering van de pilot-proeven op de andere twee locaties (deels bij Zwolle en deels bij Wassenaar):

- Na de meervoudige gasinjecties is geen opgeloste tracer (bromide) gemeten in de monitoringsfilters. Een mogelijke verklaring is dat de hoeveelheid tracer (1L) te weinig is geweest om voldoende verspreiding te bewerkstelligen. In volgende testen zal daarom een veelvoud aan hoeveelheid tracer ingebracht dienen te worden om het in nabij gelegen monitoringsfilters te kunnen detecteren;
- Voor het bepalen van het optimale tijdsinterval tussen de injecties is het essentieel om drukmetingen uit te voeren;
- Het is belangrijk om rekening te houden met CKW-emissies als gevolg van gasinjectie. Bij een full scale sanering zal dan ook rekening dienen te worden gehouden met maatregelen om deze emissie af te vangen (bijvoorbeeld bodemluchtexttractie).

## HOOFDSTUK 4

### STIMULERING BIOLOGISCHE AFBRAAK (LOCATIE ZWOLLE)

#### 4.1 Beknopte beschrijving locatie

Op de locatie is een bedrijf gevestigd dat onder andere onderdelen voor airbags fabriceert. In het verleden is hoofdzakelijk als gevolg van het 'overkoken' van een per-installatie een aanzienlijke grond- en grondwaterverontreiniging ontstaan.

De geohydrologie op de locatie kenmerkt zich door een deklaag van circa 0 tot 4 m -mv die bestaat uit een mengsel van klei, zand en veenlagen. Onder de deklaag bevindt zich het watervoerend pakket tot circa 80 m -mv (matig tot grof zand). In onderstaande figuur is de bodemopbouw op de locatie en de verontreinigingssituatie geschematiseerd weergegeven.

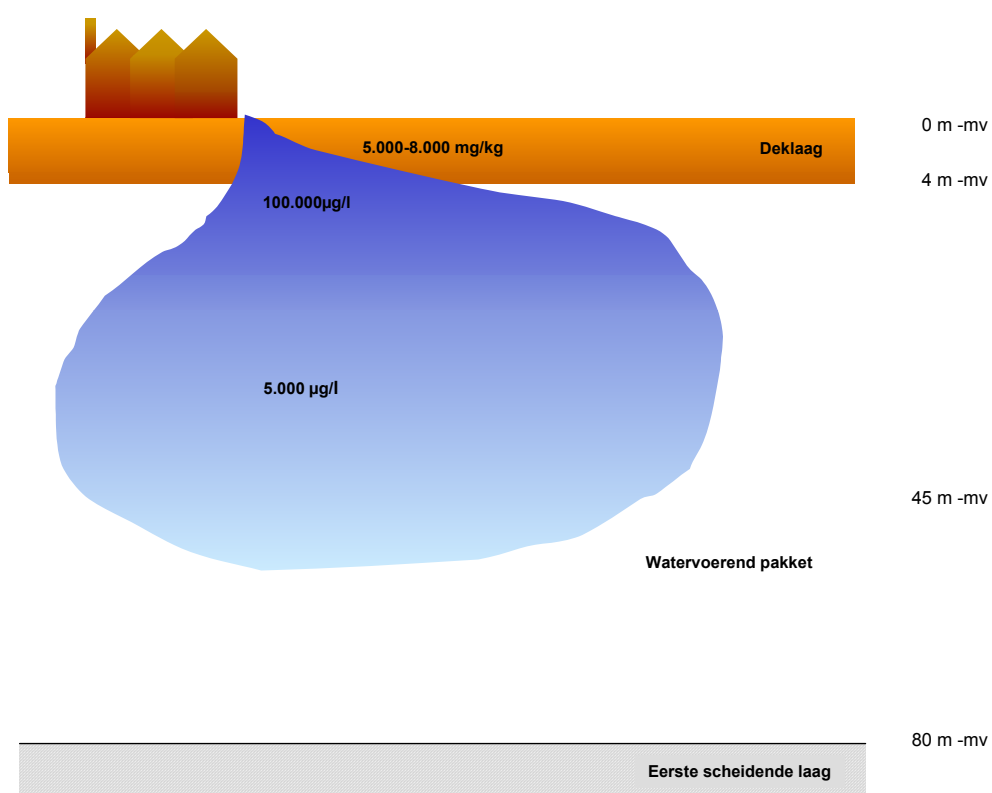


Fig. 10. Dwarsdoorsnede locatie Zwolle.

De grond in de deklaag is verontreinigd met CKW (per) in gehalten tot 5.000-8.000 mg/kg d.s. In het grondwater in zowel de deklaag als het watervoerend pakket bevinden zich gehalten aan per, tri, cis en VC tot enkele tienduizenden µg/l. De hoogste concentraties aan CKW bevinden zich tot circa 40 m -mv.

Op de locatie is in 1998 een uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar het optreden van natuurlijke afbraak. Uit dit onderzoek blijkt dat er een sterke mate van biologische activiteit in de bodem is waardoor de verontreinigingen omgezet worden (reductieve dechlorering).

Uit het onderzoek naar natuurlijke afbraak bleek tevens dat de grondverontreiniging in de deklaag (nabij laad- en losplaats) nog steeds nalevert naar het watervoerend pakket.

Als gevolg van deze nalevering komen er steeds "verse" verontreinigingen in het watervoerend pakket. Deze verontreinigingen moeten met behulp van natuurlijk in de bodem aanwezig substraat (onder andere humuszuren) omgezet worden tot etheen. Als gevolg hiervan zal er minder substraat overblijven voor de omzetting van de reeds in het grondwater aanwezige CKW. Dit kwam ook naar voren in het onderzoek naar natuurlijke afbraak. De beschikbaarheid van substraat is hoogstwaarschijnlijk de limiterende factor bij de omzetting van de gechloroerde koolwaterstoffen in het watervoerend pakket.

In 1998 is door de provincie een beschikking afgegeven om gedurende tien jaar vast te stellen of de grondwaterverontreiniging als gevolg van natuurlijke afbraak beheerst dan wel gesaneerd wordt. De mogelijke substraatlimitatie, het feit dat er wel volledige dechlorering plaatsvindt en de grote omvang van de verontreiniging, maakt de locatie bijzonder geschikt voor het uitvoeren van een pilot-proef naar het inbrengen van substraat door middel van gasinjectie.

#### **4.2 Specifieke doelstellingen**

Het doel van de pilot-test op de voormalige bedrijfslocatie van Amefo is tweeledig:

1. Het vaststellen van de efficiëntie van substraatinjectie met behulp van stikstof (invloedstraal en verspreidingspatroon).
2. Het vaststellen van de effectiviteit van ingebracht substraat op de afbraak van CKW.

De resultaten van het onderzoek zullen generieke informatie leveren over bovengenoemde twee punten (doelstellingen). Daarnaast zal meer locatiespecifiek kunnen worden vastgesteld of gasinjectie (kosten-)technisch gezien interessant is. In het geval dat natuurlijke afbraak niet leidt tot het beheersen/saneren van de grondwaterverontreiniging, kan gasinjectie een goed alternatief zijn om de chloorhoudende koolwaterstoffen op de locatie te verwijderen.

#### **4.3 Beschrijving injectiesysteem en onderzoeksopzet**

##### *4.3.1 Algemeen*

De pilot-test is opgedeeld in twee deelactiviteiten die overeenkomen met de tweeledige doelstelling:

- het vaststellen van de efficiëntie van substraatinjectie met behulp van stikstof (deelactiviteit 1);
- het vaststellen van de invloed van ingebracht substraat op de afbraaksnelheid (deelactiviteit 2).

##### *4.3.2 Pilotopstelling*

Op de locatie wordt het substraat in de vorm van een stabiele nevel in de bodem gebracht. Stikstof fungeert als dragergas voor het substraat en zorgt ervoor dat de bodem anaëroob blijft. De pilot is opgesteld ter plaatse van het brongebied op de locatie.

De stikstof wordt in een voorraadtank onder hoge druk vloeibaar gehouden. Middels een verdampert wordt de vloeibare stikstof in gasvormige toestand gebracht. Het manifold regelt de substraat- en stikstofdebieten en tevens wordt hier de nevel (stabiele aërosol) gecreëerd. De totale gasstroom wordt op een diepte van 44 m -mv geïnjecteerd. In figuur 11 is de bovengrondse installatie weergegeven.

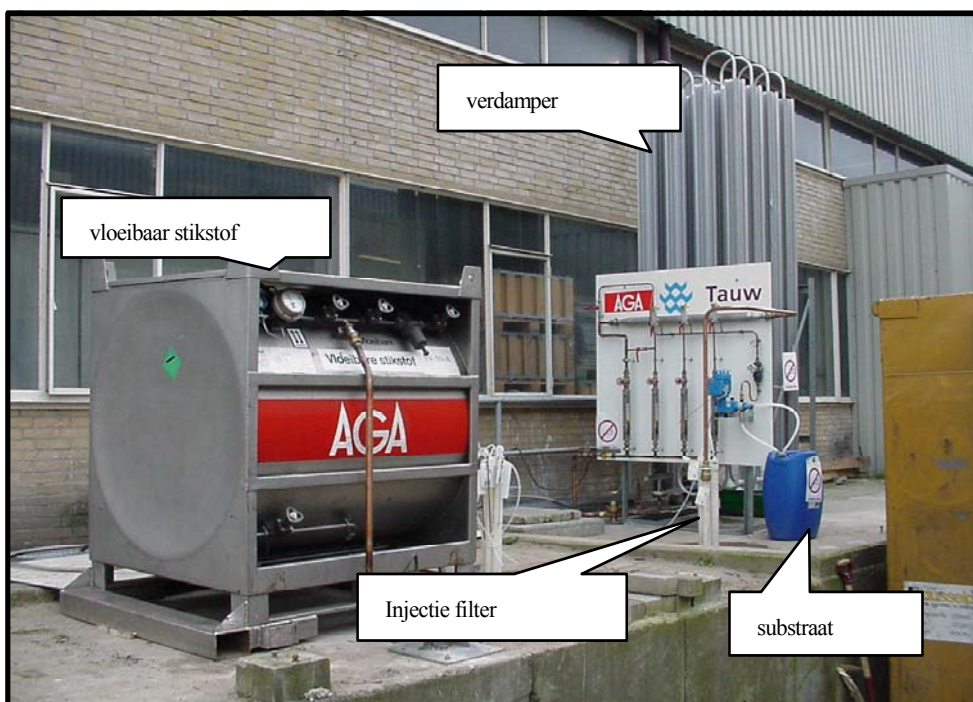


Fig. 11. Bovengrondse installatie LINER-gasinjectie systeem.

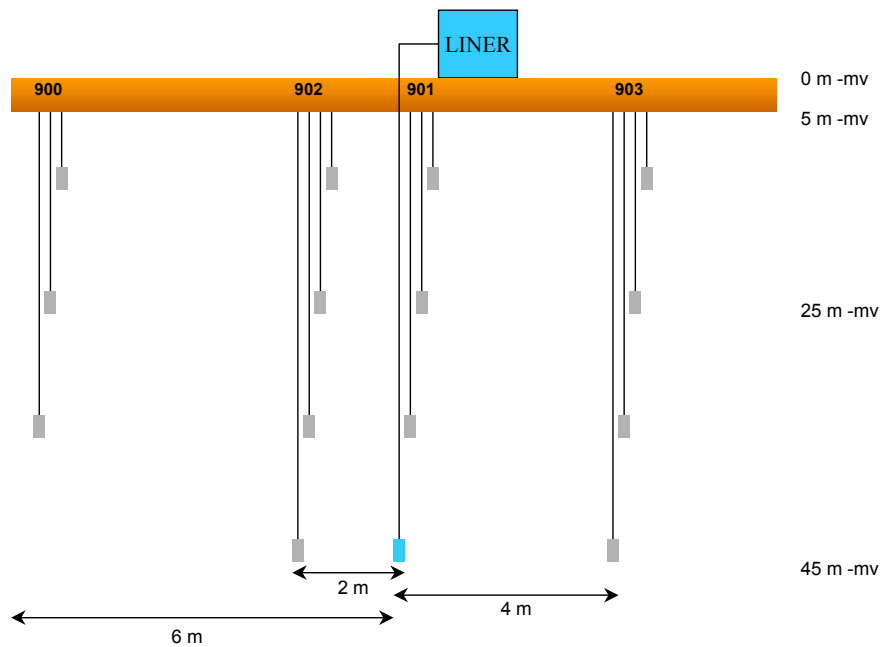


Fig. 12. Schematische weergave van monitoringsfilters en injectiefilter.



#### 4.3.3 *Uitvoering van de pilot*

De bulk van de grondwaterverontreiniging bevindt zich tot een diepte tot 40-45 m -mv. Het injectiefilter is geplaatst op 44 m -mv in het brongebied.

Om het systeem goed te kunnen monitoren zijn zowel horizontaal als verticaal verschillende monitoringfilters geplaatst. Horizontaal op 2, 4 en 6 meter van het injectiefilter en verticaal op 15, 25 en 35 m -mv. De filters op verschillende diepten zijn per horizontale afstand in één boorgat geplaatst. De filterlengte van alle filters is 1 meter. Om het geperforeerde deel van de filters is een grindomstorting aangebracht. Tussen de verticale filters is een bentonietafdichting aangebracht om kortsluitstromingen te voorkomen.

In figuur 12 is de plaatsing van de monitoringsfilters en het injectiefilter schematisch weergegeven. In bijlage E is de locatie van de pilot aangegeven.

#### 4.3.4 *Keuze substraat*

Tijdens de eerste twee maanden van de pilot is alleen methanol als substraat toegepast, daarna is een mengsel van methanol en ethyllactaat gebruikt. Methanol is een relatief goedkoop substraat. Er zijn intussen echter aanwijzingen gevonden dat met name in de beginfase van de opbouw van biomassa methanol niet ideaal is om de groei goed op gang te brengen. Van lactaat is bekend dat dit een beter substraat is voor de opbouw van biomassa, maar is echter veel duurder. Lactaat is in verschillende vormen verkrijgbaar. Eén van deze vormen is ethyllactaat (een ester van ethanol en melkzuur). Als ethyllactaat in contact met water komt zal het langzaam weer uitéén vallen in ethanol en lactaat, waardoor het beschikbaar komt voor biologische omzetting. Vanwege de kosten is toch gekozen om de proef te starten met methanol.

Omdat de afbraak in de beginfase niet goed op gang leek te komen is er op een gegeven moment voor gekozen de substraatsamenstelling te wijzigen. Hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 4.5. Het ethyllactaat is ter beschikking gesteld door Purac Biochem te Gorinchem (producent van melkzuur en melkzuurderivaten).

#### 4.3.5 *Inzet van kennis uit de pilot-test in Epe*

Uit de pilot die in Epe is uitgevoerd zijn een aantal vragen en aanbevelingen naar voren gekomen (zie paragraaf 3.6) die in het onderzoek op de locatie in Zwolle zijn meegenomen. Deze vragen en aanbevelingen betreffen:

1. De inzet van tracers bij het bepalen van de invloedstraal en verspreidingspatroon van het substraat. In de pilot in Zwolle is ervoor gekozen om direct substraat te meten in plaats van tracers. Dit omdat de injectie van het substraat goed werkt en het een veel directer beeld geeft (zie paragraaf 4.5.1).
2. Het gebruik van drukmetingen voor het bepalen van het injectieregime. Hierop wordt ingegaan in paragraaf 4.4.2.
3. Het besteden van aandacht aan het optreden van stripeffecten in verband met de noodzaak om maatregelen te nemen om eventueel gestripte verontreinigingen af te vangen. Hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 4.5.4.

### 4.4 **Uitgevoerde werkzaamheden**

#### 4.4.1 *Vastleggen nulsituatie en redoxcondities*

Nadat alle filters geplaatst zijn, is de nulsituatie van de verontreinigingen vastgelegd door het analyseren van de CKW en afbraakproducten in het grondwater.

In alle filters is de sulfaatconcentratie gemeten. Door eerdere onderzoeken op de locatie was de redoxconditie bij aanvang van de pilot al bekend. Uit deze resultaten komt naar voren dat het

grondwater zich globaal onder sulfaatreducerende omstandigheden bevindt. De sulfaatconcentraties liggen in de orde grootte van 60-70 mg/l. Door deze relatief hoge concentraties kan competitie optreden tussen de omzetting van sulfaat en de CKW. Hierdoor kan met name de omzetting van cis naar vinylchloride, etheen en ethaan geremd worden. De sulfaatconcentraties zijn tijdens de pilot een aantal malen gemeten om de verandering hierin vast te leggen en om te bepalen of sulfaat inderdaad een remmende invloed op de omzetting heeft (zie paragraaf 4.5.3). De analysesresultaten van de nulsituatie en redoxsituatie zijn opgenomen in bijlage F.

#### 4.4.2 *Bepalen injectieregime*

In de opstartfase zijn de injectietijden, injectie-interval en injectiedruk bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de kennis uit de pilot-proef in Epe. Op het injectiefilter is een drukmeter geplaatst, waarop het drukverloop tijdens de injectie is af te lezen. Bij de start van een injectie loopt de druk in het injectiefilter op. Zodra de eerste luchtkanalen zich in de bodem beginnen te vormen neemt de druk weer langzaam af totdat deze na enige tijd op een vast niveau stabiliseert. Op dat moment staan alle luchtkanalen open. Als het injectiesysteem wordt uitgezet sluiten de kanalen zich weer langzaam. Door met verschillende intervallen weer te gaan injecteren kan bepaald worden bij welke interval het initiële drukverloop wordt terugverkregen; dit is een indicatie dat alle kanalen weer gesloten zijn en dat een nieuwe injectie het meest efficiënt is.

Uiteindelijk is gekomen tot onderstaand injectieregime dat in de vier maanden durende pilot is gehanteerd:

- injectietijd : 4 minuten
- injectiedruk : 5-6 bar
- injectie-interval : 1 maal per dag

Een juiste combinatie van injecteren is belangrijk om een zo groot mogelijk effect te behalen uit één injectie (optimaal 'wassend' effect, zie hoofdstuk 3).

#### 4.4.3 *Bepaling verspreidingspatroon substraat en biologische afbraak*

Na de start is zes maal een monitoringsronde uitgevoerd. De verschillende filters zijn bemonsterd en geanalyseerd op CKW, vinylchloride, etheen, ethaan, substraat en sulfaat. De resultaten van de monitoring zijn opgenomen in bijlage F.

#### 4.4.4 *Bodemluchtmetingen*

Om eventuele optredende stripeffecten te kunnen meten zijn twee bodemluchtfilters geplaatst op 1 m -mv, op 0,8 en 1,1 meter afstand van het injectiefilter. Met behulp van drägerbuisjes en actief koolbuisjes zijn metingen uitgevoerd vóór injectie, tijdens injectie en na injectie.

Daarnaast zijn in de kruipruimte, die naast de onderzoekslocatie ligt, binnenluchtmetingen uitgevoerd om eventuele uitdamping te kunnen meten.

### 4.5 **Resultaten en discussie**

#### 4.5.1 *Verspreiding substraat*

Per injectie is circa 0,7 kg substraat ingebracht.

Om het verspreidingspatroon van het substraat direct vast te kunnen stellen zijn analyses uitgevoerd op methanol, ethanol en ethyllactaat. In eerste instantie is alleen methanol geanalyseerd. Nadat het substraat is gewijzigd in een mengsel van methanol en ethyllactaat is ook regelmatig een analyse op ethyllactaat en ethanol uitgevoerd (zie ook paragraaf 4.3.4). Ethanol is geanalyseerd omdat ethyllactaat langzaam uitéén valt in ethanol en lactaat. De resultaten staan samengevat in de onderstaande tabel.

Tabel 1. Verspreiding van substraat, maximaal aangetroffen concentratie (mg/l).

Filters	Methanol	Ethyllactaat	Ethanol	Lactaat
901 (14-15)	650	1065	440	830
901 (24-25)	750	162	70	123
901 (34-35)	130	228	88	174
902 (14-15)	2,4	-	-	-

In alle filters van 901 is het substraat snel na de start van de pilot aangetroffen. In de andere filters is nauwelijks/geen substraat aangetroffen. Het aantreffen van substraat over de gehele hoogte van het watervoerend pakket geeft aan dat de nevel stabiel blijft. Het niet aantreffen van substraat in de andere filters kan meerdere oorzaken hebben.

De detectiegrens van substraat ligt hoog (2 mg/l). Als relatief lage concentraties substraat zich in het grondwater bevinden die verbruikt worden door de aanwezige micro-organismen, zal het substraat niet aangetoond kunnen worden. Een andere mogelijkheid is dat het substraat niet verder verspreid wordt, al is dit onwaarschijnlijk op basis van de waargenomen afbraak (zie paragraaf 4.5.2). Gesteld kan worden dat met de substraatmetingen geen eenduidig verspreidingspatroon kan worden vastgesteld.

Bij een volgende pilot is het een optie om een tracer aan het substraat toe te voegen, waardoor meer inzicht in het verspreidingspatroon van het substraat kan worden verkregen.

#### 4.5.2 Biologische afbraak

Omdat op basis van de substraatgegevens niet duidelijk het invloedsgebied bepaald kan worden, is besloten intensiever te gaan monitoren op CKW en afbraakproducten. Als er sprake is van duidelijk versterkte biologische afbraak is dit een indirecte indicatie voor de aanwezigheid van substraat.

Om de biologisch afbraak te kunnen bepalen zijn gedurende de pilot zes bemonsteringsronden uitgevoerd. Hierbij is het grondwater uit verschillende filters geanalyseerd op CKW, vinylchloride, etheen en ethaan. De resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage F.

Uit de resultaten blijkt dat binnen een groot deel van het proefgebied afbraak gestimuleerd wordt. Binnen dit gebied wordt zelfs een groot deel van de CKW volledig afgebroken tot etheen en ethaan. Figuur 13 is een kwalitatieve weergave van in welk gebied gedeeltelijke en in welk gebied volledige biologische afbraak is opgetreden.

De grafische weergave van de resultaten van de individuele monitoringsfilters zijn opgenomen in bijlage G. Aan de hand van twee voorbeelden, peilbuis 901 (14-15 m -mv) en peilbuis 903 (43-44), wordt hierna de monitoring van de afbraak besproken. In dit geval zijn in de linker grafieken de concentraties CKW en afbraakproducten weergegeven in  $\mu\text{g/l}$ . Omdat de molmassa van per groter is dan tri, cis enzovoort, heeft per een grotere invloed, waardoor de afname van per sneller lijkt te verlopen. De rechter grafiek geeft de relatieve bijdrage van CKW en afbraakproducten op molbasis aan, gebaseerd op 100% (som CKW). Hierdoor is de afname van CKW en toename van afbraakproducten duidelijk af te lezen.

Opgemerkt wordt dat in bijlage G de concentraties worden uitgedrukt in  $\mu\text{mol/l}$ . Op deze manier worden de massaverschillen van de CKW en afbraakproducten opgeheven, waardoor de totale afname beter in beeld wordt gebracht. De rechter grafiek geeft de relatieve bijdrage van iedere CKW en de afbraakproducten op molbasis aan, gebaseerd op 100%.

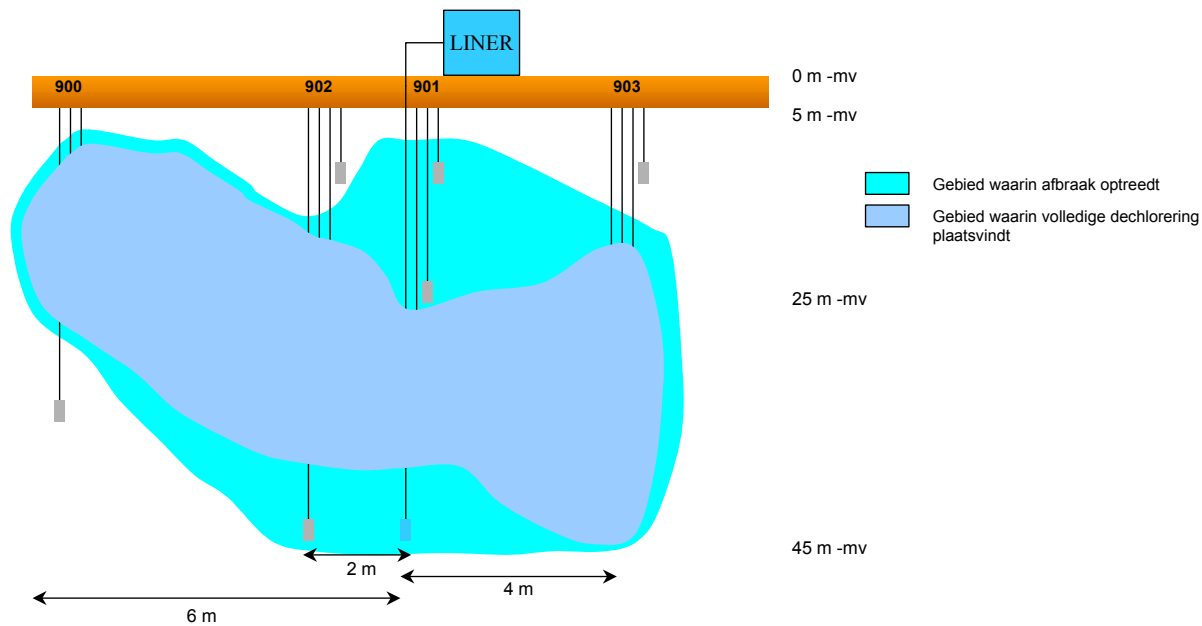


Fig. 13. Kwalitatieve weergave biologische afbraak.

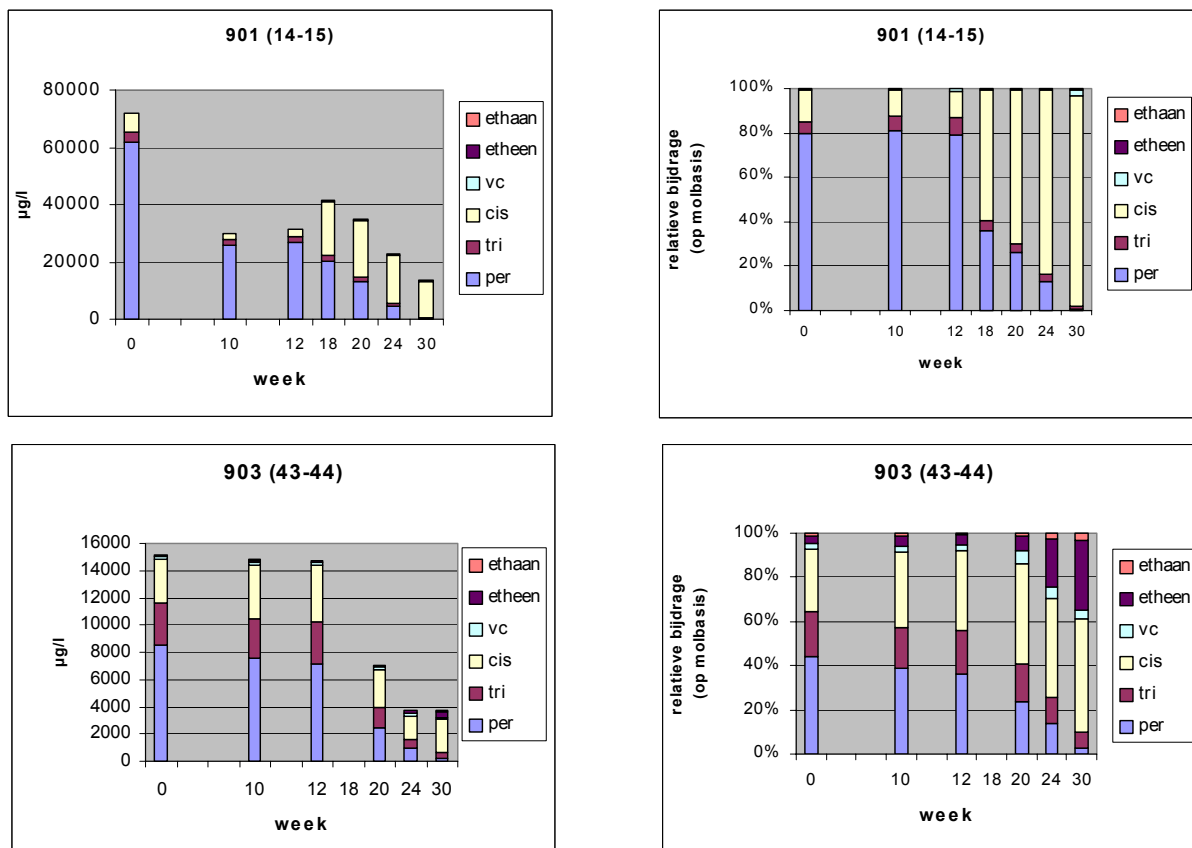


Fig. 14. Grafische weergave resultaten biologische afbraak in twee filters.

Uit figuur 14 blijkt dat in peilbuis 901 (14-15 m -mv) na 12 weken de afbraak op gang is gekomen. Per is aan het einde van de proef nagenoeg geheel afgebroken. De concentratie tri blijft nagenoeg gelijk, wat aangeeft dat de afbraak direct doorgaat naar cis. De afbraak lijkt te stagneren bij cis. De meest waarschijnlijke verklaring hiervoor is dat er nog onvoldoende biomassa aanwezig is die zorgdraagt voor de afbraak naar vinylchloride en etheen/ethaan.

In peilbuis 903 (43-44 m -mv) is na 20 weken een duidelijke afname van per en tri en een toename van etheen waar te nemen. De afbraak in dit filter loopt volledig door tot etheen en ethaan. In vergelijking tot peilbuis 901 (14-15 m -mv) lijkt het een aantal weken langer te duren voordat de afbraak op gang komt.

Het algehele beeld in het proefgebied is dat in de meeste peilbuizen de biologische afbraak is gestimuleerd. De incubatietijd voor de afbraak (groei van de biomassa) bedraagt circa 12-20 weken. Uit de grafieken blijkt in peilbuis 901 (34-35 m -mv) direct boven het injectiefilter de grootste, volledige omzetting plaats te vinden. De grafiek van peilbuis 900 (39-40 m -mv), welke het verst verwijderd is van het injectiefilter, laat de minste afbraak zien. In een aantal filters stagneert de afbraak vooralsnog bij cis (met name in 901). Daarnaast vindt in een aantal andere filters de afbraak volledig plaats (met name in 903, zie ook figuur 14). De bovenste filters van 902 en 903 blijven wat betreft de omzetting van CKW naar afbraakproducten achter.

#### 4.5.3 Redoxsituatie

Over de periode van substraattoediening is er geen significante verandering opgetreden in sulfaatconcentraties (zie figuur 15). Alleen in de filters van 901 is een kleine afname van sulfaat waar te nemen. Aan het eind van de pilot is methaan geanalyseerd teneinde vast te stellen of methanogese is opgetreden. De concentraties aan methaan zijn in het algemeen kleiner dan 1 mg/l. Hieruit blijkt dat de redoxcondities nauwelijks veranderd zijn tijdens de pilot.

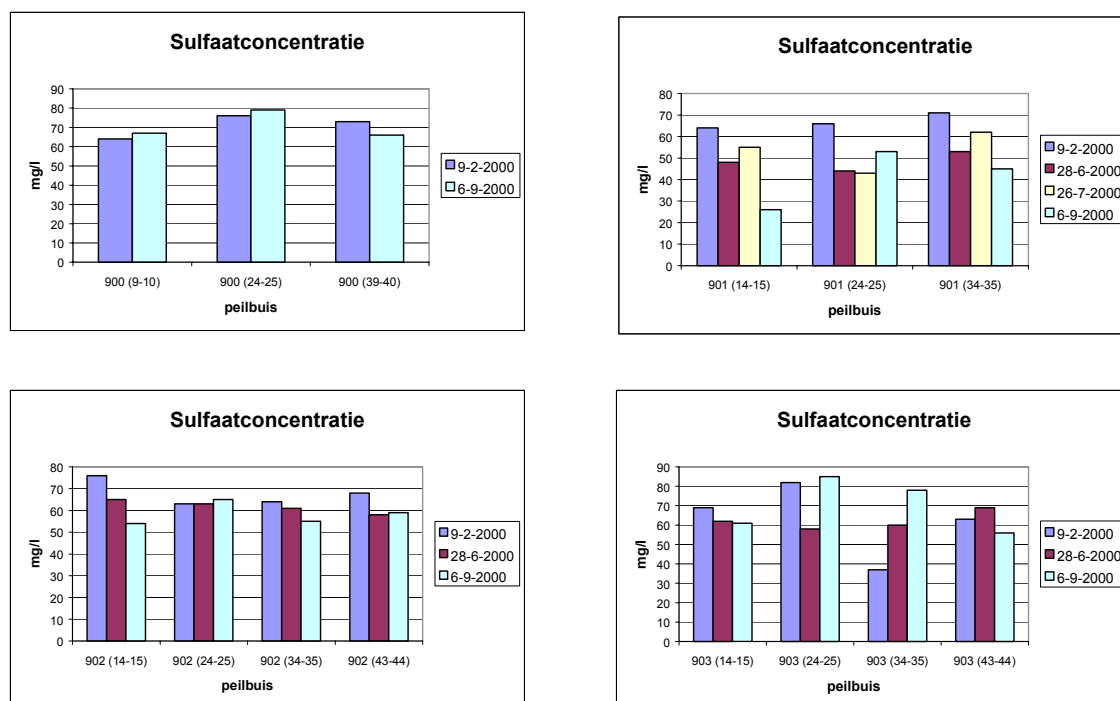


Fig. 15. Grafieken van sulfaatconcentraties tijdens pilot.

Omdat met de toediening van substraat de afbraak sterk gestimuleerd is zonder dat de redoxcondities significant zijn veranderd, kan geconcludeerd worden dat in de natuurlijke situatie

voor de biologische afbraak het te kort aan substraat de remmende factor is en niet de redox-condities.

#### 4.5.4 Bodemluchtmetingen

Er zijn twee bodemluchtfilters geplaatst op 1 m -mv: bodemluchtfilter 1 op 0,8 meter en bodemluchtfilter 2 op 1,1 meter vanaf het injectiefilter 901. Met drägerbuisjes en actief koolbuisjes zijn metingen verricht. In de kruipruimte naast de pilot zijn ook metingen verricht. In tabel 2 zijn de resultaten van luchtmetingen weergegeven.

Tabel 2. Luchtmetingen met drägerbuisjes en actief koolbuisjes.

	Bodemluchtfilter 1			Bodemluchtfilter 2			Kruipruimte
	dräger busjes		a.k. busje	dräger busjes		actief koolbuisjes	
	per (ppm)	methanol (ppm)	per (µg/l)	per (ppm)	methanol (ppm)	per (µg/l)	per (µg/l)
Nulmeting	50-100	0	370	100-200	0	770	1,5
Direct na injectie	50-100	0	380	100-200	0	1.800	350

De hoge beginconcentratie van per wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de aanwezige grondverontreiniging. Direct na injectie wordt een verhoogde concentratie aan per gemeten. De gemeten concentraties zijn waarschijnlijk afkomstig van de grondverontreiniging en niet rechtstreeks van uitdamping uit het grondwater. Het is derhalve niet mogelijk om vast te stellen of er ook daadwerkelijk stripeffecten in het grondwater optreden.

#### 4.6 Conclusies

Het effect van substraatinjectie is na 12 tot 20 weken duidelijk waarneembaar. Vanaf dat moment is de afbraak in het grootste deel van het proefgebied duidelijk op gang gekomen. In een deel van het proefgebied treedt volledige afbraak tot de onschuldige eindproducten etheen en ethaan op. In enkele filters stagneert de afbraak nog bij cis.

Het stagneren van de afbraak bij cis lijkt op basis van de resultaten niet veroorzaakt te worden door competitie met het aanwezige sulfaat. De sulfaatconcentraties zijn nauwelijks veranderd en de afbraak is toch op gang gekomen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de beschikbaarheid van substraat de belangrijkste rol speelt bij de afbraak.

Het bepalen van de invloedstraal door het direct meten van substraat blijkt in de praktijk geen eenduidig beeld te leveren. Detectiegrenzen van de substraatbepaling zijn hoog en het substraat wordt geconsumeerd door bacteriën. Bij een volgende pilot kan het toevoegen van een tracer, bijvoorbeeld bromide, meer inzicht leveren in het verspreidingspatroon. Het direct bepalen van de invloedstraal door middel van tracers is met name zinvol om meer generiek inzicht te krijgen ten behoeve van ontwerp en bedrijfsvoering van full-scale gasinjectietoepassingen. Voor de locatie Zwolle kan gesteld worden dat door middel van het monitoren van de afbraak een redelijk inzicht kan worden verkregen in het werkingsgebied van de substraatinjectie.

De bodemlucht- en kruipruimtemetingen geven geen duidelijk beeld over de uitdamping vanuit het grondwater. Er lijkt wel enige extra uitdamping plaats te vinden als gevolg van de gasinjectie, echter wordt dit waarschijnlijk niet veroorzaakt door het strippen van CKW uit het grondwater, maar eerder door verdamping van puur product uit de deklaag.

In de pilot van Wassenaar, waarbij alleen ter plaatse van de grondwaterverontreiniging gas wordt geïnjecteerd, kan een beter beeld van stripeffecten worden verkregen.

Concluderend kan gesteld worden dat de proef succesvol is geweest en gasinjectie daadwerkelijk ingezet kan worden voor de biologische aanpak van de CKW-verontreinigingen.

### OVERALL CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De hoofddoelstelling van het SKB-project was het in de praktijk aantonen of het inbrengen van substraat in de bodem middels gasinjectie een bruikbaar alternatief is voor de gebruikelijke in-situ saneringsmethoden voor chloorhoudende koolwaterstoffen. Meer specifiek is gekeken naar wat de invloed is van gasinjectie op het beter beschikbaar maken van verontreinigingen en het stimuleren van de afbraak.

Uit de testen die uitgevoerd zijn op de locatie in Epe blijkt duidelijk dat verontreinigingen gemobiliseerd worden als gevolg van gasinjectie. Deze mobilisatie treedt met name op in de beginfase nadat het gasinjectiesysteem is opgestart. Ten aanzien van het ondersteunen van conventionele 'pump and treat' saneringen kan het inzetten van gasinjectie een positief effect hebben op de totale vrachtverwijdering. Voor biologische saneringen zal dit effect als groot voordeel hebben dat verontreinigingen in de vorm van puur product beschikbaar komen voor afbraak. De uiteindelijke vracht die beschikbaar komt voor afbraak wordt groter, waardoor het risico op stagnatie van een biologische sanering wordt verkleind. Tevens kan er meer vracht uit de bodem verwijderd worden waardoor de kosteneffectiviteit van deze techniek hoger is dan bij meer conventionele technieken.

Het stimuleren van de afbraak door het inbrengen van substraat middels gasinjectie is getest op de locatie in Zwolle. Hierbij is het substraat in de vorm van een stabiel aërosol in de bodem gebracht. Tijdens de proef is de afbraak duidelijk op gang gekomen, waarbij in een deel van het invloedsgebied volledige omzetting tot etheen en ethaan optreedt. Het invloedsgebied waarbinnen dit gebeurt is niet geheel eenduidig. Ter plaatse van het injectiefilter wordt over de volledige hoogte tussen het injectiepunt (op 44 m -mv) en de deklaag de afbraak gestimuleerd. Lateraal is de afbraak aangetoond over een afstand van 4 tot 6 meter. In enkele filters (met name vlak onder de deklaag) is geen directe aanwijzing gevonden dat de afbraak op gang is gekomen.

Overall kan op basis van de resultaten geconcludeerd worden dat de afbraak daadwerkelijk gestimuleerd kan worden met het LINER-gasinjectiesysteem en dat tevens de invloedsstraal voldoende groot is om de techniek full-scale te kunnen toepassen. Daarnaast blijkt het systeem zeer stabiel en is er geen verstopping van het injectiefilter opgetreden.

Er blijven nog wel een aantal onderzoeksvragen over die van belang zijn om het systeem in de praktijk optimaal te kunnen bedrijfsvoeren. De belangrijkste hiervan zijn:

1. Is het direct inbrengen van substraat in de bodem en het "na-flushen" met stikstof een alternatief voor het inbrengen van substraat in de vorm van een aërosol? Mogelijk kan de vracht aan substraat die in één keer in de bodem kan worden gebracht aanzienlijk worden verhoogd, waarmee het stikstofverbruik gereduceerd kan worden. De belangrijkste vraag hierbij is of het substraat wel goed in de bodem verspreid kan worden. Tracer-experimenten kunnen hierbij een belangrijk hulpmiddel zijn.
2. Op welke wijze kan het systeem het best worden bedreven? Voor optimalisatie van full-scale toepassingen is er nog weinig bekend over de meest geschikte injectiedrukken en intervallen.
3. In hoeverre treedt het strippen van verontreinigingen uit het grondwater op als gevolg van gasinjectie? Deze vraag is belangrijk voor de vraag of er bij full-scale saneringen additionele systemen (bijvoorbeeld bodemluchtextractie) dienen te worden geïnstalleerd om onacceptabele emissies tegen te gaan.



Voorgesteld wordt om de drie bovenstaande vragen uit te zoeken bij de proef die op de locatie in Wassenaar zal worden uitgevoerd.

BIJLAGE A

**VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL  
GEDURENDE DE EERSTE INJECTIETEST**

**TABELLEN**

Locatie Epe

BIJLAGE B

**VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL  
GEDURENDE DE EERSTE INJECTIETEST**

**GRAFIEKEN**

Locatie Epe

BIJLAGE C

**VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL  
GEDURENDE DE TWEEDE INJECTIETEST**

**TABELLEN**

Locatie Epe

BIJLAGE D

**VERLOOP CONCENTRATIES VAN PER, TRI, CIS EN CKW-TOTAAL  
GEDURENDE DE TWEDE INJECTIETEST**

**GRAFIEKEN**

Locatie Epe

BIJLAGE E

**LOCATIE PILOTOPSTELLING**

Locatie Zwolle

BIJLAGE F

**ANALYSERESULTATEN NULSITUATIE, REDOXSITUATIE EN MONITORING**

**TABELLEN**

Locatie Zwolle

BIJLAGE G

**GRAFISCHE WEERGAVE BIOLOGISCHE AFBRAAK**

Locatie Zwolle