Meer met Bodemenergie

Mogelijkheden voor combinatie van WKO met bodemsanering

Overzicht van technieken en nieuwe mogelijkheden

if

Deltares
Enabling Delta Life

WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN UR

bioclear

skb
duurzame
ontwikkeling
ondergrond

Rapport 10 – Mogelijkheden voor combinatie van KWO met bodem-sanering

Overzicht van technieken en nieuwe mogelijkheden

Eindrapport

MMB 26.237/59108/MaK
1 juni 2012

Colofon

Dit is een gezamenlijk rapport van Bioclear, Deltares, IF Technology
en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie.

Opdrachtgever

SKB duurzame ontwikkeling ondergrond
Postbus 420
2800 AK GOUDA
T 0182 – 54 06 90
E info@skbodem.nl
Contactpersoon: Arno Peekel

Auteurs

Erik de Vries, Bioclear
Nanne Hoekstra, Deltares

Datum

1 juni 2012

Goedgekeurd door de Technische Commissie Meer met Bodemenergie

Maurice Henssen, Bioclear
Hans Gehrels, Deltares
Guido Bakema, IF Technology
Tim Grotenhuis, Wageningen Universiteit
Huub Rijnaarts, Wageningen Universiteit

Penvoerder

Marc Koenders, IF Technology

Secretariaat

Marion Hetterscheid, IF Technology

Website

www.meermetbodemenergie.nl

Copyright © cover Identim 2012

Copyright © MMB 2012
Delen uit dit rapport mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding:
‘Meer met Bodemenergie (MMB), de titel van de publicatie en jaar van uitgave’.

Participanten

Agentschap NL / Bodem+
Arcadis
Brabant Water - Hydreco
Eneco
Essent
gemeente Almelo
gemeente Amersfoort
gemeente Apeldoorn
gemeente Den Bosch
gemeente Deventer
gemeente Haarlem
gemeente Hengelo
gemeente Tilburg
gemeente Utrecht
gemeente Zwolle
Havenbedrijf Rotterdam
NVOE
Productschap Tuinbouw
provincie Drenthe
provincie Flevoland
provincie Friesland
provincie Gelderland
provincie Groningen
provincie Limburg
provincie Noord-Brabant
provincie Noord-Holland
provincie Overijssel
provincie Utrecht
provincie Zeeland
provincie Zuid-Holland
SKB
Stichting Bodemsanering NS
Vewin
Vitens
Waterschap Groot Salland
Waterschap Regge en Dinkel

Samenvatting

Introductie
De toenemende vraag naar bodemenergie in Nederland legt een druk op de ondergrondse ruimte. Enerzijds kan dit leiden tot tegenstrijdige belangen tussen het toepassen van bodemenergiesystemen en het saneren en beheersen van verontreinigingen. Anderzijds biedt dit juist de kans om bodemenergie en bodemsaneringen te combineren. In dit rapport “Mogelijkheden voor combinatie van WKO met bodemsanering” is de gefragmenteerde kennis op het gebied van combinatieconcepten samengebracht, uitgebreid met praktijkwaarnemingen, afgewogen en uitgewerkt in kansrijke combinatieconcepten.

Sanerings- en beheersconcepten met bodemenergie
Grondwatersaneringsmaatregelen en energieopslag zijn beiden afhankelijk van de mogelijkheden van de ondergrond. De doelstelling en meestal ook de technische uitgangspunten van beide technieken zijn verschillend. Bodemenergiesystemen zijn gericht op de betrouwbare levering van voldoende en betaalbare warmte en/of koude aan de afnemers terwijl saneringsmaatregelen gericht zijn op het kosteneffectief beheren of verwijderen van verontreinigingen. Deze uitgangspunten kunnen soms conflicteren. Bij het combineren van deze twee is het daarom van belang om vast te stellen welke doelstelling leidend is. Deze vaststelling geeft randvoorwaarden aan de keuze van saneringsmethoden en bodemenergiesystemen.
In dit onderzoek is een overzicht gemaakt van beschikbare saneringsmethoden en bodemenergiesystemen. Vervolgens zijn potentiële combinatieconcepten getoetst aan de volgende criteria:
- behoud van energierendement;
- halen van de saneringsdoelstelling;
- kostenefficiëntie;
- lange levensduur (het uitblijven van putverstopping).

Op basis van de bovenstaande criteria zijn 12 kansrijke concepten geselecteerd die onder te verdelen zijn in vier categorieën. Bij alle concepten geldt dat het energierendement van het bodemenergiesysteem gegarandeerd blijft. Het saneringsrendement verschilt per combinatieconcept.

1. Bodemenergie en beheersing

Met name een recirculatiesysteem is geschikt voor beheersing van een verontreiniging. Met dit systeem kan bij een hydrologisch goeddoordacht ontwerp de grondwaterstroming om de verontreiniging heen geleid worden waardoor de verontreiniging tot wel 80% beheerst kan worden. De verontreiniging wordt echter niet actief verwijderd. Mogelijk treedt er natuurlijke afbraak op de locatie op, in dat geval heeft beheersing het voordeel dat er meer tijd beschikbaar is om natuurlijke afbraak op te laten treden.

2. Bodemenergie en natuurlijke afbraak

Door het combineren van een bodemenergiesysteem met een zone waar natuurlijke afbraak optreedt kan de afbraak van de verontreiniging mogelijk worden versneld. Een bodemenergiesysteem kan de natuurlijke afbraak van een verontreiniging op twee manieren beïnvloeden: door het verhogen van de grondwaterdynamiek en door het (lokaal) verhogen van de temperatuur. Door het rondpompen van grondwater worden al aanwezige stoffen, bijvoorbeeld organische koolstof, en micro-organismen in het watervoerende pakket enigszins gemengd. Hierdoor kan een groter volume van de ondergrond geschikt worden voor natuurlijke afbraak processen van bijvoorbeeld VOCl of BTEX. Het omgekeerde kan ook optreden. Door het rondpompen van grondwater kunnen de lokaal aanwezige gunstige condities voor natuurlijke afbraak teniet worden gedaan. Een verhoging van de temperatuur leidt tot een versnelling van de afbraak. In de praktijk zal bij een energiebalans echter nauwelijks een positief effect te verwachten zijn omdat de afbraaksnelheden bij een temperatuurverlaging ook weer afnemen.

3. Bodemenergie met reactieve zone

Indien op de locatie geen gunstige condities voor natuurlijke afbraak heersen kan het aanleggen van een reactieve zone door additie van hulpstoffen uitkomst bieden om de verontreiniging in zijn geheel te saneren. In het onderzoek is selectie van de meest geschikte hulpstoffen en toepassingsmethoden gemaakt waarbij rekening is gehouden met de kosten, huidige stand van de techniek en risico's zoals putverstoppingsrisico's. Gegevens uit de literatuur, aangevuld met labtesten, tonen aan dat VOCl-afbrekende microorganismen en ethanol toegepast kunnen worden in of direct rondom de WKO-putten om VOCl af te breken zonder putverstoppingsrisico's te veroorzaken. Chitine of (geëmulgeerde) plantaardige olie zijn geschikt om als reactief scherm op afstand van de WKO-putten aan te leggen om VOCl af te breken. De ondergronds ontijzeren-techniek kan, afhankelijk van de bodemeigenschappen van de locatie, gebruikt worden om zowel BTEX als VC en CIS af te breken.

4. Bodemenergie en bovengrondse zuivering

Indien de verontreiniging niet volledig verwijderd hoeft te worden maar wel volledige beheersing gewenst is kan het water dat wordt opgepompt door het bodemenergiesysteem bovengronds gezuiverd te worden. Indien er bovengronds water nodig is voor bijvoorbeeld beekherstel of proceswater kan bovengrondse zuivering met een stripper uitkomst bieden. Indien er bovengronds geen water nodig is dient het water weer geïnfiltreerd te worden. Om infiltratie mogelijk te maken dient bovengronds gezuiverd te worden met een duurdere vacuümstripper of stikstofgasstripper. Indien de locale RWZI nog capaciteit over heeft kan eventueel nagedacht worden over het lozen van het verontreinigde water op het riool.

Ieder combinatieconcept blijkt verschillende voor- en nadelen te hebben waardoor niet één meest kansrijk combinatieconcept aan te wijzen is. Om het meest geschikte combinatieconcept voor een specifieke locatie te vinden, zal een afweging gemaakt moeten worden tussen de verschillende bovengenoemde combinatieconcepten, waarin het bovengronds watergebruik en de doestelling aangaande sanerings- en energierendement relevant zijn. Vervolgens zal moeten blijken of het combinatieconcept voordeliger is dan het apart uitvoeren van het bodemenergiesysteem en de sanering. Uit de kostenramingen die voor een hypothetische case zijn uitgewerkt, blijkt dat het combineren van een open bodemenergiesysteem en een sanering kosteneffectiever kan zijn dan een los bodemenergiesysteem en een losse sanering.

Inhoudsopgave

Samenvatting 4

1 Inleiding 10
1.1 Algemeen over combinatieconcepten 10
1.2 Onderzoeksvragen 10
1.3 Aanpak 11

2 Selectie kansrijke combinatieconcepten 12
2.1 Inleiding 12
2.2 Beschikbare saneringstechnieken 12
2.3 Beschikbare WKO-systemen 14
2.3.1 Gesloten WKO-systeem 14
2.3.2 Open WKO-systeem (doublet en monobron) 14
2.3.3 Open WKO-systeem (recirculatiesysteem) 15
2.3.4 WKO-afvoersysteem 15
2.4 Randvoorwaarden combinatieconcepten 15
2.4.1 Randvoorwaarden in verband met putverstoppingsrisico's 16
2.4.2 Randvoorwaarden in verband met materiaalkeuze 17
2.5 Kansrijke combinatieconcepten 18

3 WKO en beheersing 20
3.1 Inleiding 20
3.2 WKO-doubletsysteem en beheersing van de verontreiniging 20
3.3 WKO-recirculatiesysteem en beheersing van de verontreiniging 21

4 WKO en natuurlijke afbraak 24
4.1 Inleiding 24
4.2 Achtergrond biologische afbraak 24
4.2.1 Biologische afbraak vluchtige organische chloorkoolwaterstoffen (VOCl) 24
4.2.2 BTEX 25
4.3 Stimulatie van natuurlijke afbraak door WKO-systeem 26
4.3.1 Effect van verhoogde grondwaterdynamiek 26
4.3.2 Effect van temperatuurverhoging op biologische afbraak van VOCl 27
4.4 Open WKO-systemen in combinatie met natuurlijke afbraak 29
4.5 Gesloten WKO-systeem in combinatie met natuurlijke afbraak 30
4.6 Combinatie WKO met transport van verontreiniging naar natuurlijke afbraak zone 31
4.7 WKO in combinatie met warmtetransport 32

5 WKO en in-situ verwijdering met gestimuleerde afbraak (reactieve zone) 34
5.1 Open WKO-systeem in combinatie met reactieve zone 34
5.2 Sanering door een absorberende zone 34
5.3 Sanering met een oxidatieve zone 35

5.3.1 Chemische oxidatie ... 35
5.3.2 Stimulatie van aerobe natuurlijke afbraak ... 35
5.3.3 Aandachtpunten bij het gebruik van oxidatieve hulpstoffen ... 35
5.4 Sanering met een reducerende zone ... 36
5.4.1 Selectie van de meest geschikte reducerende hulpstoffen ... 36
5.4.2 Afbraaktesten met reducerende hulpstoffen en dechlorerende bacteriën 37
5.4.3 Hulpstof ethanol ... 38
5.4.4 Hulpstoffen chitine en (geëmulgeerde) plantaardige olie ... 38
5.5 Sanering door het toedienen van dechlorerende bacteriën ... 39
5.6 Afbraak van VOCl door licht en elektriciteit ... 39
5.6.1 Elektrokinetische remediatie ... 40
5.6.2 Fotokatalytische remediate ... 40
5.7 De locatie van de reactieve zone ten opzichte van het WKO-systeem ... 41
5.7.1 Reactieve zone in de omstorting ... 42
5.7.2 Reactieve zone door hulpstoffen toe te dienen aan WKO-infiltratiewater 43
5.7.3 Reactieve zone op enige afstand van de WKO-putten ... 44
5.7.4 Reactieve zone op een andere locatie ... 44
5.8 Meest kansrijke combinatieconcepten met een reactieve zone ... 44
5.8.1 Hulpstoffen toegediend in het WKO-infiltratiewater of vlakbij de WKO-infiltratiefilters ... 45
5.8.2 Reducerende hulpstoffen toegediend op relatief grote afstand van de WKO-putten ... 45
5.8.3 Reducerende hulpstoffen toegediend op een andere locatie dan de WKO-locatie ... 46
5.8.4 Reducerende hulpstoffen toevoegen aan het 'Triplet' ... 47
5.8.5 Oxidatieve hulpstoffen toevoegen aan WKO-infiltratiewater (ondergronds beluchten) ... 49

6 WKO en bovengrondse verwijdering van de verontreiniging ... 52
6.1 Combinatie WKO met bovengronds zuiveren en herinfiltratie ... 52
6.2 Combinatie WKO met bovengrondse zuivering en lozing van het water ... 53

7 Overzicht meest kansrijke combinatie- concepten ... 55

8 Kostenraming combinatieconcepten voor een specifieke locatie ... 60
8.1 Hypothetische case ... 60
8.2 Kostenramingen voor de hypothetische case ... 61
8.2.1 Referentie kostenramingen voor de bodemsanering ... 61
8.2.2 Kostenramingen voor de combinatieconcepten ... 62

9 Conclusies en aanbevelingen ... 65
9.1 Conclusies ... 65
9.2 Aanbevelingen ... 69

Literatuur ... 71

Bijlage I Overzicht bodemsaneringtechnieken LXXIII

Bijlage II Risico's combinatieconcepten LXXVII

Bijlage III Brainstormsessie LXXIX

Bijlage IV Onderzoek naar alternatieve hulpstoffen bij de combinatie van in-situ saneren en WKO LXXXIV

Bijlage V Aanvullende informatie over nulwaard ijzer LXXXV

Bijlage VI Aanvullende informatie over elektrokinetische remediatie LXXXVI

Bijlage VII Afbraaktesten gestimuleerde biologisch afbraak door toediening hulpstoffen LXXXVII

Bijlage VIII Details hypothetische locatie LXXXVIII

Bijlage IX Gedetailleerde kostenramingen combinatie-concepten XC

1 Inleiding

1.1 Algemeen over combinatieconcepten

Als een WKO-systemen in verontreinigd grondwater gerealiseerd wordt, ligt het voor de hand om ook te kijken naar de kansen om gelijktijdig de verontreiniging aan te pakken. In het literatuuronderzoek van MMB is de achtergrondinformatie over mogelijke combinatieconcepten verzameld en geordend (MMB-rapport 2 - Literatuurstudie). Het blijkt dat er in de praktijk nog beperkte ervaring is met combinatieconcepten. Grootste technische bottlenecks bij het toepassen van combinatieconcepten zijn:

- De toegepaste debieten zijn bij WKO-systemen vaak groter dan bij saneringen. Bij het combineren van een WKO-systeem met een sanering is het daarom van belang om een concept te ontwikkelen waarbij het verschil in debieten wordt overbrugd.
- Een WKO-systeem verandert de temperatuur van het grondwater en de snelheid en richting van de grondwaterstroming, waardoor menging optreedt. Het is onbekend in hoeverre deze factoren een positief effect hebben op de afbraak van verontreinigingen.
- Putten bij een sanering worden over het algemeen minder intensief en minder lang gebruikt dan WKO-putten. Bij het toepassen van een sanering in of nabij WKO-putten zal daarom rekening gehouden moeten worden met de WKO-putten en zal verstopping van de WKO-putten tot een minimum beperkt moeten worden om een duurzaam WKO-systeem te waarborgen.
- Actieve saneringen worden vaak niet dieper dan 20 tot 30 meter beneden maaiveld uitgevoerd. WKO-systemen zijn daarentegen over het algemeen aanwezig in bodempakket dieper dan 30 meter beneden maaiveld. Bij het toepassen van combinatieconcept om bijvoorbeeld diepe VOCl verontreinigingen te saneren zullen bestaande saneringstechnieken mogelijk aangepast moeten worden. Om ondiepe verontreinigingen met behulp van combinatieconcepten te saneren zal het WKO-systeem waarschijnlijk aangepast moeten worden, onder andere om de putverstopping door opmenging van ondiep niet-homogeen grondwater te voorkomen.

1.2 Onderzoeksvragen

Om combinatieconcepten te ontwikkelen die rekening houden met de bovenstaande technische bottlenecks zijn in het Meer met Bodemenergie-projectvoorstel onderzoeksvragen opgesteld. Deze onderzoeksvragen zijn hieronder nogmaals weergegeven.

1. Welke bestaande saneringstechnieken kunnen in combinatie met bodemenergie gebruikt worden (chemische reductie, biologische reductie)?

2. Kan de sanerende werking van een open bodemenergiesysteem worden verhoogd door een aangepast technisch ontwerp (temperatuur, debiet, locatie infiltratie en onttrekkingsfilters)?
3. Wat is de impact van koolstofbron, nano-ijzer dosering, etc. bij stimulatie van biologische/ chemische afbraak op het bodemenergiesysteem (verstoppingen etc.)?
4. Met welke risico's van verstopping of corrosie van putten en leidingwerk dient rekening gehouden te worden (ontwerpcriteria)?
5. Hoe kunnen problemen met het aantrekken van verschillende grondwaterkwaliteiten worden voorkomen?
6. Welke positieve effecten op de saneringsduur heeft de optredende bovengrondse menging van verontreinigingen, brandstof en nutriënten op het saneringsrendement (principe StrijpS in Eindhoven)?
7. Wat is de optimale temperatuur voor een sanerende werking van een open bodemenergiesysteem?

1.3 Aanpak

Om bovenstaande onderzoeksvragen te beantwoorden zijn een aantal stappen doorlopen.

De eerste stap van het onderzoek is een literatuurstudie. De resultaten van de literatuurstudie zijn opgenomen in 'Literatuurstudie Meer met Bodemenergie' (SKB, 30 maart 2012). In hoofdstuk 9 van het literatuuronderzoek wordt antwoord gegeven op onderzoeksvragen 3 en 4 die betrekking hebben op putverstoppingsproblematiek.

De tweede stap bestaat uit aanvullend onderzoek en het uitwerken van de meest kansrijke combinatieconcepten. De tweede stap is opgedeeld in drie fasen. In de eerste fase is een inventarisatie uitgevoerd van bestaande saneringstechnieken en WKO-systemen die toegepast kunnen worden in een combinatieconcept. Vervolgens zijn randvoorwaarden voor succesvolle toepassing van combinatieconcepten vastgesteld en is een lijst met combinatieconcepten opgesteld die voldoen aan de randvoorwaarden. Tevens is per combinatieconcept aangegeven wat de toepassingsmogelijkheden en potentiële risico's zijn. Op basis van deze lijst heeft een overleg plaatsgevonden tussen verschillende experts waarin de combinatieconcepten met de meeste potentie zijn geselecteerd. In fase twee zijn kennishiaten geïdentificeerd op het gebied van ontwerp en toepassing van de combinatieconcepten. Om een deel van de kennishiaten in te vullen zijn labtesten uitgevoerd. De resultaten van de labtesten zijn vervolgens gebruikt om het ontwerp en de toepassing van de combinatieconcepten met de meeste potentie nader in te vullen. In de derde fase is één specifieke locatie omschreven en wordt een afweging gemaakt tussen de verschillende combinatieconcepten op basis van het saneringsrendement, energierendement, risico's en de kosten.

In de onderliggende rapportage zijn onderzoeksvraag 1, 2, 5 en 6 beantwoord. Onderzoeksvraag 6 is beantwoord in Meer met Bodemenergie deelrapportrapport 9, 'Effecten op sanering'.

2 Selectie kansrijke combinatieconcepten

2.1 Inleiding

De lijst van combinatieconcepten, waaruit de meest kanrijke concepten worden geselecteerd, wordt samengesteld door alle beschikbare saneringstechnieken en WKO-systemen met elkaar te combineren. In het onderzoek is specifiek voor bodemsaneringstechnieken gekozen omdat verwacht wordt dat hiermee de meest kansrijke combinatieconcepten te maken zijn. Vervolgens kan aan de hand van randvoorwaarden waar een combinatieconcept aan moet voldoen een selectie worden gemaakt van de meest kansrijke combinatieconcepten. De beschikbare saneringstechnieken, de beschikbare WKO-systemen, de randvoorwaarden en de selectie is in de onderstaande paragrafen nader uitgewerkt.

2.2 Beschikbare saneringstechnieken

Een overzicht van de beschikbare saneringstechnieken is gegeven in tabel 2.1. Uit de Meer met Bodemenergie literatuurstudie komt naar voren dat de meest voorkomende grondwaterverontreinigingen beneden de circa 10 meter beneden maaiveld bestaan uit BTEX en vluchtige oplosmiddelen (VOCl). Daarom wordt in dit onderzoek gefocust op saneringstechnieken die worden gebruikt om VOCl en BTEX verontreinigingen te saneren.

tabel 2.1 Overzicht van beschikbare bodemsaneringstechnieken

Saneringstechniek	Werkingsprincipe	Toepassingsgebied
Biologische technieken		
Natuurlijke afbraak	Afbraak zonder menselijke interventie	- Natuurlijke afbraak
Gestimuleerde aerobe afbraak	Biologische afbraak door zuurstoftoediening	- In-situ verwijdering
Gestimuleerde anaerobe afbraak	Biologisch afbraak door hulpstof en/of micro-organismen toediening	- In-situ verwijdering
Chemische technieken		
Chemische Oxidatie	Chemische afbraak door toediening oxidatoren	- In-situ verwijdering
Fotolytische afbraak	Afbraak van verontreiniging onder invloed van licht	- Bovengrondse verwij-dering
Elektrolytische afbraak	Afbraak onder invloed van elektrische spanning	- In-situ verwijdering - Bovengrondse verwij-dering
Fysische technieken		
Pump&treat	Onttrekken en bovengronds zuiveren	- Beheersing - Natuurlijke afbraak - Bovengrondse verwij-dering
Bodemlucht-extractie	Afzuigen van vervluchtigde verontreiniging	- In-situ verwijdering - Bovengrondse verwij-dering
Perslucht-injectie	Injecteren van lucht en afzuigen van vervluch-tigde verontreiniging	- In-situ verwijdering - Natuurlijke afbraak
In situ extractie	Oppompbaar maken verontreiniging door warm-te of hulpstoffen	- In-situ verwijdering - Natuurlijke afbraak
Bodemverhitting	Oppompbaarheid, de-sorptie of biologische afbraak verhogen door warmte	- Natuurlijke afbraak - In-situ verwijdering
Toepassingsvorm van chemische/biologische techniek		
Reactieve schermen	Chemische of biologische afbraak in een reac-tieve zone	- In-situ verwijdering - Natuurlijke afbraak

Voor meer informatie over de verschillende saneringstechnieken wordt verwezen naar bijlage 1.

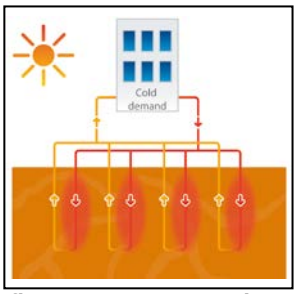
Opmerking bij tabel 2.1: alle genoemde saneringstechnieken zijn geschikt om zowel een VOCl als BTEX verontreinigingen te saneren, met uitzondering van fotolytische- en elek-trolytischeafbraak. Deze technieken zijn voor zover bekend alleen toepasbaar om VOCl verontreinigingen te saneringen. Deze twee technieken zijn tevens de enige twee tech-nieken die zich nog in een experimenteel stadium bevinden.

2.3 Beschikbare WKO-systemen

WKO-systemen die mogelijk gecombineerd kunnen worden met een saneringstechniek zijn gesloten WKO-systemen, open WKO-systemen en WKO-afvoersystemen.

2.3.1 Gesloten WKO-systeem

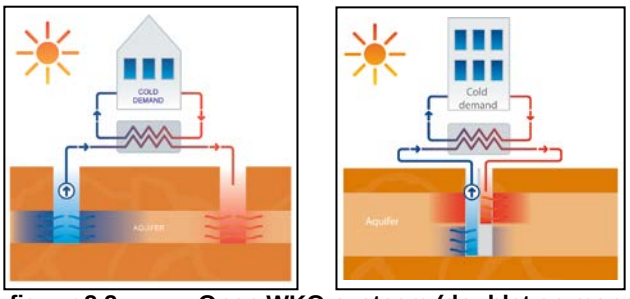
Bij gesloten systemen wordt er geen grondwater onttrokken en geretourneerd maar worden er lussen in de ondergrond aangebracht die gevuld worden met een vloeistof die energie kan opnemen en afstaan. De lussen met vloeistof fungeren als warmtewisselaar, waarbij energie wordt overgedragen aan de omringende bodemmatrix en het grondwater.



figuur2.1 Gesloten WKO-systeem

2.3.2 Open WKO-systeem (doublet en monobron)

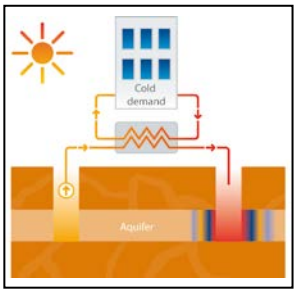
Bij doubletsystemen wordt grondwater onttrokken en geïnfiltreerd uit een diep gelegen watervoerend bodempakket. Een systeem dat uit één doublet bestaat, werkt met een combinatie van één koude en één warme bron. In de zomer stroomt het water richting warme bron, in de winter wordt de stromingsrichting omgekeerd en stroomt het water richting koude bron.
Bij een monobronsysteem wordt grondwater onttrokken en geïnfiltreerd uit een koude bron en een warme bron die in één boorgat boven elkaar zijn geplaatst. De warme bron wordt hierbij boven de koude bron geplaatst. De watervoerende pakketten waar de warmte of koude in wordt opgeslagen zijn in veel gevallen fysiek gescheiden door een slecht doorlatende bodemlaag.
Omdat er geen principieel verschil is tussen een doublet en een monobron wordt in dit onderzoek gefocust op de meest gangbare doubletsystemen.



figuur 2.2 Open WKO-systeem (doublet en monobron)

2.3.3 Open WKO-systeem (recirculatiesysteem)

Bij een recirculatiesysteem wordt grondwater onttrokken en geïnfiltreerd uit het watervoerend pakket. Bij een recirculatiesysteem stroomt het water altijd één richting op, de stromingsrichting wordt tijdens de winter of zomer niet omgewisseld.



figuur 2.3 Open WKO-systeem (recirculatie)

2.3.4 WKO-afvoersysteem

Een variant op een open WKO-systeem is het WKO-afvoersysteem. Dit is een open WKO-systemen waarbij (een deelstroom van) het onttrokken grondwater niet geïnfiltreerd wordt. In plaats daarvan wordt dit water, na onttrekking van warmte of koude en bovengrondse zuivering, geloosd of voor een andere toepassing gebruikt.

2.4 Randvoorwaarden combinatieconcepten

Bij het beoordelen van de combinatieconcepten op potentie is gebruikgemaakt van een lijst met randvoorwaarden waar een kansrijk combinatieconcept aan zou moeten voldoen.

Op basis van de onderstaande randvoorwaarden zullen meerde combinatieconcepten als kansrijk worden beoordeeld. Om te bepalen welk combinatieconcept het meest geschikt is voor een specifieke locatie zullen aanvullende randvoorwaarden gesteld moeten worden die locatie specifiek zijn. Gedacht moet worden aan randvoorwaarden die beïnvloed worden door de bodemopbouw, verontreinigingssituatie, WKO-systeemwensen en het heersende beleid. Bij dit laatste punt kan een gebiedsgerichtbeleid bijvoorbeeld verspreiding van de verontreiniging binnen grenzen toelaten terwijl bij een gevalsgerichte aanpak het combinatieconcept de verontreiniging waarschijnlijk volledig zal moeten beheersen.

Op basis van een brainstormsessie gehouden met experts op het gebied van bodemsaneringen en WKO-systemen zijn de potentiële risico's en financiële en milieutechnische aantrekkelijkheid vertaald naar de onderstaande randvoorwaarden voor een succesvol combinatieconcept. Voor een verslag van de brainstormsessie wordt verwezen naar bijlage 3.

- WKO is leidend. Het concept mag niet leiden tot een verhoogd risico op putverstopping van het WKO-systeem;
- De verhouding energieopbrengst en beheersing/verwijdering van verontreiniging moet in balans zijn;
- Het concept moet bij voorkeur simpel en robuust zijn;

- Het concept moet in een stedelijke setting, rekening houdend met een beperkte toegang tot de verontreiniging, toepasbaar zijn.
- De kosten voor aanleg en bedrijfsvoering moeten beperkt zijn;
- Het concept mag geen humane en ecologische risico's veroorzaken als gevolg van het verpompen van verontreinigd grondwater.

2.4.1 Randvoorwaarden in verband met putverstoppingsrisico's

Het voorkomen van putverstoppingsrisico's is een belangrijke randvoorwaarde, vandaar dat de putverstoppingsrisico's hieronder nader uitgewerkt zijn.

In het kader van het project 'Combinatie van bodemenergie en saneren in Apeldoorn' (SKB project PT 8441, d.d. 24 december 2009) is door een groep van experts een overzicht opgesteld van de meest belangrijke putverstoppingsrisico's die te verwachten zijn bij combinatieconcepten. Voor het complete overzicht van de risico's wordt verwezen naar bijlage 2. Deze risico's zijn hieronder samengevat.

- Verstopping van onttrekkingsbronnen en bovengronds systeem door biologisch versnelde ijzeroxidatie, vaak met slijmvorming, als gevolg van menging van ijzerrijk anaeroob grondwater met (sub)oxisch (aeroob tot nitraatreducerend) grondwater;
- Verstopping van infiltratiebronnen door fysisch-chemische neerslagen van ijzeroxiden, ijzercarbonaten, calciumcarbonaten en magnesiumcarbonaten;
- Verstopping van infiltratie- en onttrekkingsputten door de vorming van ijzersulfideneerslagen in het geval reducerende hulpstoffen aan het grondwater worden gedoseerd ten behoeve van gestimuleerde biologische afbraak;
- Vermindering van de doorlatendheid van de bodem als gevolg van gestimuleerde bacteriegroei. Dit speelt met name indien dosering van hulpstoffen ter stimulering van de biologische afbraak plaatsvindt;
- Gasverstopping van infiltratieputten door het verpompen van water met verhoogde gasconcentraties. Bij saneringen is het soms noodzakelijk ook gasrijk grondwater (met name methaan) te verpompen of kunnen verhoogde methaanconcentraties ontstaan door biologische afbraak van toegevoegde reducerende hulpstoffen.

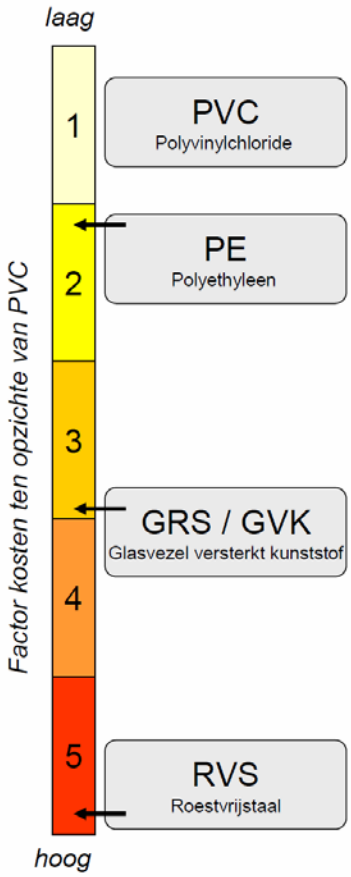
Meer informatie over putverstopping is te vinden in hoofdstuk 9 van 'Literatuurstudie Meer met Bodemenergie' (SKB, 30 maart 2012). Voor aanvullend rapport over biofouling in WKO-putten wordt verwezen naar het rapport 'Van der Linden *et al*., 2011, Quantifying biological well clogging in Aquifer Thermal Energy Storage combined with Groundwater Remediation', Environmental Project Studies, WUR) en 'Veldhoen (2010) Shedding light on the risk of clogging in combined ATES and soil remediation technology, Thesis, WUR).

2.4.2 Randvoorwaarden in verband met materiaalkeuze

Als een WKO-systeem in een verontreinigd gebied wordt gerealiseerd, bestaat de kans dat de verontreiniging het materiaal waar het WKO-systeem van is gemaakt wordt aangetast. Bij het ontwerpen van een WKO-systeem in een verontreiniging zal daarom materiaal gebruikt moeten worden dat resistent is voor de aanwezige verontreiniging. In de Handleiding BOEG (Arcadis, 074598965:01, d.d. 6 april 2010) is de materiaalselectie van WKO-systemen in verontreinigd gebied nader uitgewerkt. Hieronder zijn de relevante bevindingen beschreven.

Het filtermateriaal voor de onttrekkingsbronnen en infiltratiebronnen van WKO-systemen bestaat meestal uit PVC. Veelgebruikte materialen voor de terreinleidingen zijn PVC en PE. PVC is minder goed bestand tegen oplosmiddelen zoals VOCl. Ook zijn PE en in mindere mate PVC gevoelig voor minerale oliën als benzine en diesel.
In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de verschillende materialen die gebruikt kunnen worden voor een WKO-systemen. Per materiaaltype is aangegeven wat de voor en nadelen van het gebruik van dit materiaal zijn en in hoeverre het materiaal bestand is tegen verontreinigingen (Arcadis 2010).

tabel 2.2 Voor en nadelen van verschillende type materialen voor WKO-systemen (bron: Arcadis, 2010)



Toepassing	Voordelen	Nadelen
Reguliere WKO wordt standaard PVC toegepast	Relatief goedkoop	Kan verweken / oplossen in aanwezigheid concentraties oplosmiddelen (VOCl) groter dan enkele mg/l
Drinkwaterleidingen Bodemsanering bronzones	Relatief goedkoop Redelijk bestand tegen verontreinigingen	Plasticiteit leidt tot vervorming bij hoge drukken Minimale filterspleet diameter 1 mm Materiaal is permeabel voor verontreinigingen PE minder geschikt bij grote diepten
Rioleringen, industrie, chemie	Sterk materiaal. Bestand tegen chemicaliën / verontreinigingen	Hoge kosten
Zeer divers	Corrosiebestendig. Bestand tegen chemicaliën / verontreinigingen	Zeer hoge kosten

De meest voorkomende verontreinigingen in het diepere grondwater zijn VOCl (oplosmiddelen) en BTEX. BTEX is onder andere afkomstig uit benzine en diesel. Een verontreiniging kan zowel in opgeloste als in puur product vorm voorkomen. Puur product benzine of diesel is lichter dan water en vormt drijflagen op de grondwaterspiegel. Puur product VOCl is zwaarder dan water en kan zich via een grillig patroon hebben verspreid naar de diepte. De impact op het materiaal van een verontreiniging in oplossing met een concentratie van enkele microgrammen per liter is volledig anders dan de impact van puur product (Arcadis 2010).

Indien de verontreiniging aanwezig is in het bodempakket waar ook de WKO-filters aanwezig zijn, wordt verwacht dat na het in werking treden van een WKO-systeem de verontreinigingsconcentraties relatief snel uitvlakken. Volgens de huidige inzichten is het een reële afweging om het regulier toegepaste PVC in te zetten bij een VOCl-concentratie van minder dan 1 mg/l in het grondwater. Daarnaast zijn de meerkosten voor een chemisch bestendiger materiaal als GRS/GVK of RVS dermate hoog, dat het herplaatsen van een aantal filters van PVC kan worden overwogen (Arcadis 2010).

Indien de verontreiniging aanwezig is in het bodempakket waar geen grondwater wordt verpompt, maar waar wel een deel van het WKO-systeem aanwezig is, kan langdurige bloostelling van het leidingwerk aan de verontreiniging optreden . Deze situatie kan zich met name voordoen op locaties waar een WKO-systeem is gerealiseerd in het bodempakket direct onder een grondwaterverontreiniging, waarbij de putten en stijgbuizen door de verontreinigde zone lopen. Aantasting van het leidingwerk kan in die gevallen wordt voorkomen door het directe contact tussen de verontreiniging en het WKO-systeem te vermijden. Een eerste optie om contact te voorkomen is het aanbrengen van een niet-doorlatende omstorting rondom het leidingwerk op de diepte waar de verontreiniging aanwezig is. Een tweede optie is het saneren van de verontreiniging (Arcadis 2010).

2.5 Kansrijke combinatieconcepten

In een overleg tussen experts op het gebied van bodemsaneringen en WKO-systemen zijn aan de hand van de verschillende bodemsaneringstechnieken, WKO-systemen en randvoorwaarden de onderstaande combinatieconcepten als meest kansrijk beoordeeld (voor het verslag van het overleg zie bijlage 3).

De kansrijke combinatieconcepten zijn onderverdeeld in vier groepen op basis van de gebruikte saneringstechniek. Deze vier groepen zullen nader besproken worden in de hierop volgende hoofdstukken.

- **WKO en beheersing**
  - WKO-doubletsysteem en beheersing van de verontreiniging
  - WKO-recirculatiesysteem en beheersing van de verontreiniging
- **WKO en natuurlijke afbraak**
  - Open WKO-systemen in combinatie met natuurlijke afbraak
  - Gesloten WKO-systeem in combinatie met natuurlijke afbraak

- Combinatie WKO met transport van verontreiniging naar natuurlijke afbraak zone
- WKO in combinatie met warmtetransport

- **WKO met gestimuleerde afbraak**
  - WKO met reducerende hulpstoffen, oxiderende hulpstoffen of verontreinigingafbrekende bacteriën
  - Hulpstoffen toegepast in, nabij of op afstand van de WKO-putten
- **WKO en bovengrondse verwijdering van de verontreiniging**
  - WKO en bovengrondse zuivering met herinfiltratie
  - WKO en bovengrondse zuivering met lozing

3 WKO en beheersing

3.1 Inleiding

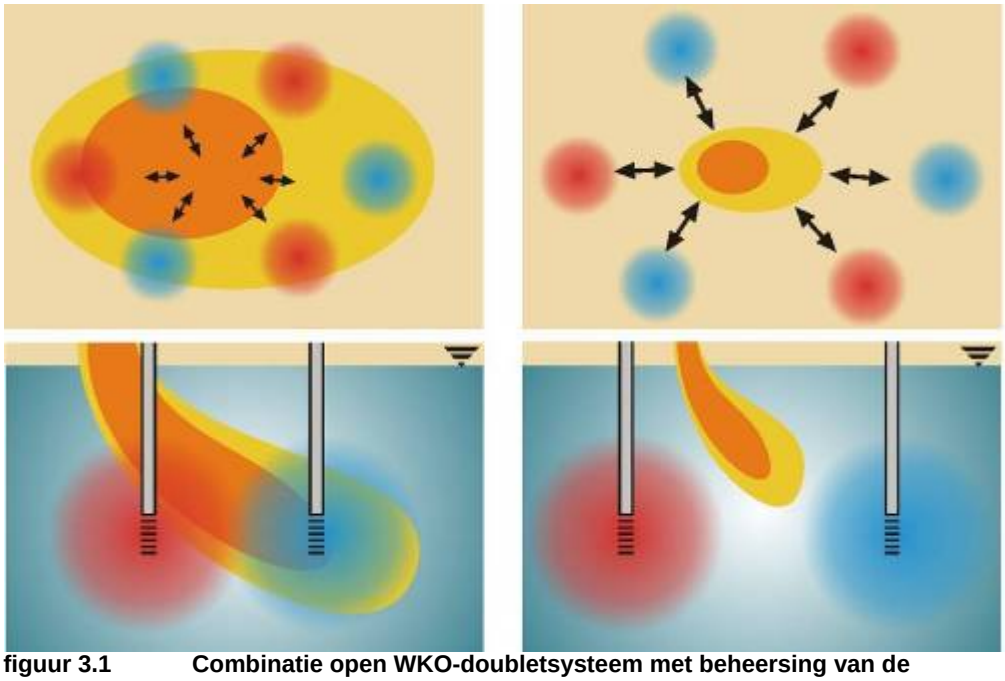
Een WKO-systeem kan voor een beheersing van de verontreiniging zorgen doordat het WKO-systeem ervoor zorgt dat de heersende grondwaterstromingsrichting zodanig wordt beïnvloed dat de verontreiniging zich minder snel verspreidt. In de onderstaande paragrafen wordt het beheersen van een verontreiniging met een WKO-doubletsysteem en een WKO-recirculatiesysteem besproken.

Een algemeen voordeel van het beheersen van een verontreiniging met een open WKO-systeem is dat er slechts beperkte saneringsmaatregelen uitgevoerd hoeven te worden, het is bijvoorbeeld niet nodig om hulpstoffen toe te voegen of het grondwater bovengronds te zuiveren.

Bij het toepassen van beheersing door een open WKO-systeem wordt waarschijnlijk een hoog energierendement en een laag saneringsrendement behaald. Het sanerende effect is mogelijk het gevolg van natuurlijke afbraak, voor de werking van natuurlijke afbraak zie hoofdstuk vier.

3.2 WKO-doubletsysteem en beheersing van de verontreiniging

Met een WKO-doubletsysteem wordt een aanzienlijke hoeveelheid grondwater verpompt tussen de warme en koude bron. Het beheersende effect op de verontreiniging kan bereikt worden door het WKO-systeem zodanig te ontwerpen dat het verontreinigd grondwater niet of nauwelijks van de locatie af stroomt en aanstromend grondwater om de verontreinigde locatie heen wordt geleid. Deze verandering in grondwaterstroming kan bereikt worden door netto aan de stroomopwaartse kant grondwater te onttrekken en aan de stroomafwaartse kant te infiltreren. Het onttrekkings- en infiltratiedebiet dient te worden afgestemd op de natuurlijke grondwaterstroming. De plaatsing van de WKO-putten dient afgestemd te worden op de omvang van de verontreiniging, de putten kunnen zowel buiten de verontreiniging als in de verontreinigingscontour worden geplaatst.

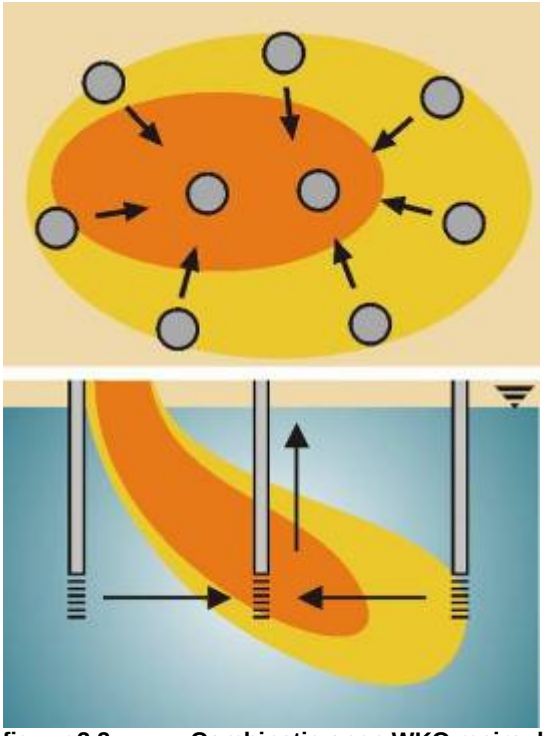


figuur 3.1 **Combinatie open WKO-doubletsysteem met beheersing van de verontreiniging (bovenaanzicht en zijaanzicht)**

Een nadeel is dat, indien de putten binnen de verontreinigingscontour worden geplaatst, er netto verplaatsing van verontreinigd grondwater in stroomopwaartserichting op kan treden. Indien de putten buiten de verontreiniging worden geplaatst is het mogelijk dat het verontreinigde grondwater terecht komt in één van de WKO-putten, die bij aanvang niet verontreinigd was. Op het moment dat dit gebeurt zal via het WKO-systeem een aanzienlijke verspreiding van de verontreiniging optreden. Deze problemen kunnen voor een deel voorkomen worden door een gedegen hydrologisch model.

3.3 WKO-recirculatiesysteem en beheersing van de verontreiniging

Net als een WKO-doubletsysteem kan een WKO-recirculatiesysteem gebruikt worden om een verontreiniging te beheersen. Het minimaliseren van het verontreinigde grondwater is onder andere mogelijk door een ‘kooi’ aan onttrekkingsfilters om de verontreiniging aan te leggen. Het verontreinigde grondwater wordt op deze manier door de onttrekkingsfilters opgevangen en weer naar het midden van de ‘kooi’ getransporteerd (zie figuur 3.2).

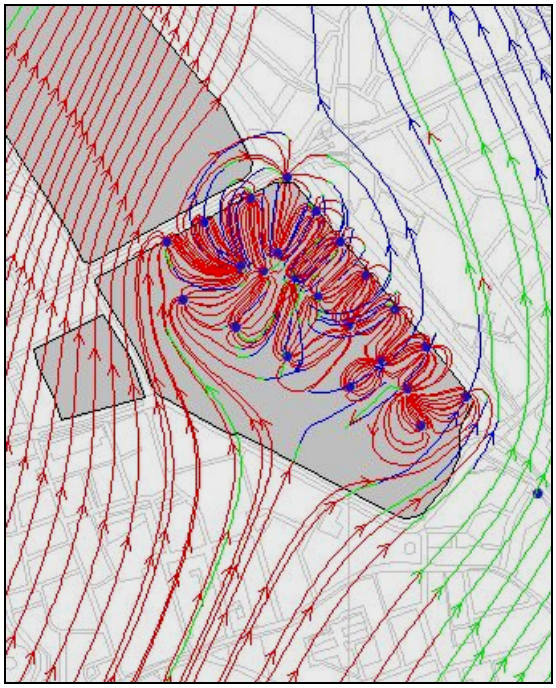


figuur 3.2 Combinatie open WKO recirculatiesysteem met beheersing (bovenaanzicht en zijaanzicht)

Vanuit hydrologisch perspectief is het eenvoudiger om een verontreiniging de beheersen met een WKO-recirculatiesysteem dan met een WKO-doubletsysteem. Ondanks een vrijwel sluitende 'kooi' is het echter niet uit te sluiten dat het systeem verontreinigd water lekt.

Een praktijklocatie waar een WKO-recirculatiesysteem is gecombineerd met de beheersing en mogelijke stimulering van de natuurlijke afbraak van een VOCl verontreiniging is de locatie StrijpS te Eindhoven. Figuur 3.3 geeft het hydrologische model weer waaruit volgt op welke wijze het water gevangen zit in de 'kooi' van WKO-putten. het beheerseffect van de natuurlijke grondwaterstroming is hier bepaald op ongeveer 80%. Voor meer informatie over de locatie StrijpS wordt verwezen naar hoofdstuk 11 van het Meer met Bodemenergie literatuuronderzoek (SKB, 30 maart 2012).

Voor meer (procesmatige) informatie over het opstellen van een combinatieconcept waarbij beheersing met behulp van een WKO-systeem centraal staat wordt verwezen naar Handleiding BOEG (Arcadis, 074598965:01, d.d. 6 april 2010).



figuur 3.3 **Locatie StrijpS: beheersing VOCl verontreiniging door een WKO-systeem. Bron: Arcadis**

4 WKO en natuurlijke afbraak

4.1 Inleiding

Natuurlijke afbraak is een term die diverse natuurlijke processen omvat zoals chemische en biologische afbraak, verdunning en hechting aan gronddeeltjes. Natuurlijke afbraak is over het algemeen een langzaam proces. Omdat WKO-systemen een lange levensduur hebben kan een WKO-systeem de natuurlijke afbraak van een verontreiniging voor lange termijn beïnvloeden wat op termijn mogelijk voldoende is om een verontreiniging qua omvang stabiel te maken of te doen laten krimpen.

Omdat biologische afbraak in veel gevallen het meeste bijdraagt aan natuurlijke afbraak wordt in de volgende paragraaf van dit hoofdstuk ingegaan op het werkingsprincipe van biologische afbraak. Vervolgens wordt aangegeven op welke manieren een WKO-systeem de biologische afbraak van een verontreiniging kan stimuleren. In de laatste paragrafen worden verschillende combinatieconcepten besproken waarin natuurlijke afbraak een hoofdrol speelt.

4.2 Achtergrond biologische afbraak

4.2.1 Biologische afbraak vluchtige organische chloorkoolwaterstoffen (VOCl)

In veel gevallen zijn VOCl verontreinigingen veroorzaakt door lekkage van tetrachlooretheen (PER) en/of trichlooretheen (TRI). Chloorkoolwaterstoffen zijn zwaarder dan water en kunnen daardoor ook voorkomen op grote diepte. In sommige gevallen zijn deze verontreinigingen buiten het bereik van gestimuleerde afbraak en kan alleen natuurlijke afbraak (NA) leiden tot verwijdering van deze verontreinigingen. PER en TRI kunnen door middel van anaerobe reductieve dechlorering, via DCE (dichlooretheen) en VC (vinylchloride), worden afgebroken tot de onschadelijke afbraakproducten etheen en ethaan. Voor het optreden van reductieve dechlorering moet in de bodem gelijktijdig aan de volgende randvoorwaarden worden voldaan:

- Er dienen sterk gereduceerde redoxomstandigheden te heersen (bij voorkeur methanogeen);
- Er dient voldoende electrondonor (reducerende hulpstof) aanwezig te zijn (zoals organisch koolstof);
- Er dienen specifiek VOCl-afbrekende micro-organismen aanwezig te zijn.

De optimale temperatuur voor de afbraak van VOCl via reductieve dechlorering is circa 30 °C.

Cis-DCE en VC kunnen ook via aerobe oxidatie afgebroken worden. Zelfs bij zuurstofconcentraties van 0,3 mg/l kan aerobe oxidatie van cis-DCE en VC plaatsvinden (micro-aerofiele afbraak) (Gossett. 2010. Sustained Aerobic Oxidation of Vinyl Chloride at Low Oxygen Concentrations. Environ. Sci. Technol. Vol 44, p. 1405–1411). Omdat zuurstofconcentraties van 0,3 mg/l nog tot een diepte van enkele tientallen meters in de bodem aanwezig kunnen zijn zou micro-aerofiele afbraak van VOCl bij kunnen dragen aan de afbraak van verontreinigingen die aanwezig zijn in WKO-systemen. De snelheid van micro-aerofiele afbraak is naar verwachting lager dan die van reductieve dechlorering. Meer informatie over deze afbraaktesten zijn te vinden in deelrapport 9 'Effecten op sanering. Onder aerobe condities kunnen TRI, CIS en VC ook co-metabool worden afgebroken in aanwezigheid van co-substraten zoals tolueen, propaan of methaan.

4.2.2 BTEX

Vluchtige aromaten als benzeen, tolueen, ethylbenzeen, xylenen en naftaleen (beter bekend als BTEXN) kunnen onder aerobe omstandigheden snel worden afgebroken tot koolstofdioxide en water. De dichtheid van BTEXN is lager dan die van water. Bij de aanwezigheid van puur product kan daardoor een drijflaag gevormd worden. Door oplossen in water kunnen BTEXN verontreinigingen ook op grotere diepte worden aangetroffen. |n de regel komen BTEXN verontreinigingen minder diep voor dan VOCl. BTEXN kan ook onder omstandigheden worden afgebroken waar elektronacceptoren zoals ijzer (III), sulfaat of nitraat aanwezig zijn, dit gaat in de regel langzamer. Anaerobe afbraak van benzeen en naftaleen blijkt niet in alle gevallen op te treden en gaat soms erg langzaam. De anaerobe afbraak van benzeen kan tevens beïnvloed worden door de aanwezigheid van TEX. Afbraak van benzeen en naftaleen treedt pas op nadat TEX afgebroken zijn.
In de onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van de natuurlijke afbraak potentie onder verschillende redoxcondities. Op optimale temperatuur voor aerobe biologische afbraak van BTEX is 25 tot 35 °C.

tabel 4.1 Natuurlijke afbraakpotentie VOCl en BTEX(N)

Redoxconditie	aeroob	Nitraat reducerend	ijzer reducerend	sulfaat reducerend	methanogeen
Elektron-acceptor	O_2	NO_3^-	Fe^{3+}	SO_4^{2-}	CO_2
PER, TRI	-[1]	-	+/-	+	++
CIS, VC	+[1]	-	+/-	+/-	+
BTEX (N)	++	+	+	+	+/-

+/++: afbraak (goed) mogelijk
+/-: afbraak mogelijk maar onvolledig (VOCl) of niet altijd en vaak langzaam (BTEX)
-: afbraak niet mogelijk
[1] : TRI, CIS en VC kunnen onder aerobe condities ook co-metabool worden afgebroken onder de aanwezigheid van cosubstraten als bijvoorbeeld propaan en methaan.

4.3 Stimulatie van natuurlijke afbraak door WKO-systeem

4.3.1 Effect van verhoogde grondwaterdynamiek

Als gevolg van de grondwaterdynamiek die door een WKO-systeem wordt veroorzaakt is het mogelijk dat de condities voor natuurlijke afbraak van de verontreiniging veranderen. Effecten door menging zijn voornamelijk te verwachten als de oorspronkelijke grondwatersamenstelling een sterke variatie in bijvoorbeeld redoxcondities, organisch koolstofgehalte, verontreinigingsconcentraties of aanwezigheid van verontreinigingafbrekende bacteriën vertoont.

In de praktijk blijkt dat in het geval van VOCl verontreinigingen de natuurlijke afbraak vaak wordt beperkt door de afwezigheid van voldoende organisch stof. WKO-systemen worden toegepast in zandpakketten in verband met de goede waterdoorlatendheid. Uit ervaring blijkt dat in zandpakketten op grote diepte vaak weinig organische stof aanwezig is. Verwacht wordt dat door opmenging het gehalte aan organisch stof niet structureel verhoogd wordt waardoor de natuurlijke afbraak van VOCl door alleen opmenging maar in beperkte mate gestimuleerd wordt. Deze hypothese is getoetst in het kader van Meer met Bodemenergie met labtesten. Hierbij is nagegaan hoeveel organische stof er maximaal vrij kan komen uit de bodemmatrix door het effect van mengen. Behalve naar het vrijkomen van organische stof is ook het vrijkomen van de nutriënten ammonium en *ortho*-fosfaat onderzocht. Deze nutriënten zijn noodzakelijk voor de groei en activiteit van bacteriën.

Bij de testen zijn grondmonster-slurries intensief geschud met een organisch stofgehalte van 6% en minder dan 0,5%. Het grondmonster met minder dan 0,5% organisch stof is representatief voor een zandpakket waar WKO-systemen vaak in worden geplaatst. Voor de gedetailleerde omschrijving van de labtesten worden verwezen naar MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond.

Uit de resultaten blijkt dat het organisch stof gehalte in beide grondmonsters ongeveer verdubbeld door het 7 dagen te schudden bij 150 rpm (rounds per minute). De gehaltes ammonium en *ortho*-fosfaat bleven vrijwel gelijk. Hieruit kan worden geconcludeerd dat schudden tot een verhoogde beschikbaarheid van het organisch koolstofgehalte in de waterfase kan leiden. De concentraties aan nutriënten worden niet verhoogd door het schudden. Door het schudden van de grondmonsters in slurries werd duidelijk dat in principe een toename van organische stof door een toename van de grondwaterdynamiek mogelijk is.

De conclusie is dat een verhoogde grondwaterdynamiek mogelijk tot verhoogde organisch stof gehalten leidt. Indien het organisch stofgehalte de limiterende factor is voor natuurlijke afbraak van VOCl kan de verhoogde grondwaterdynamiek voor een stimulatie van de natuurlijke afbraak zorgen.

Voor BTEX verontreinigingen geldt dat de natuurlijke afbraak in de praktijk vaak wordt geremd door de afwezigheid van elektronenacceptoren zoals zuurstof, nitraat of sulfaat. Omdat veel bodempakketten in Nederland waar WKO systemen worden toegepast vaak één of meerdere van deze elektronenacceptoren bevatten, wordt de natuurlijke afbraak van BTEX door opmenging waarschijnlijk in gestimuleerd (Wilson *et al*, *CORONA*, University of Cheffield & TNO, 2005).

4.3.2 Effect van temperatuurverhoging op biologische afbraak van VOCl

Door de temperatuur van het grondwater te verhogen wordt in theorie de beschikbaarheid van de voedingsstoffen voor de micro-organismen vergroot en de biologische activiteit verhoogd.

Uit het literatuuronderzoek van Meer met Bodemenergie (SKB, 30 maart 2012) blijkt dat de optimale temperatuur voor biologische afbraak van VOCl rond de 30°C ligt. Uit een onderzoek waarin de afbraak via anaerobe reductieve dechlorering van VOCl bij verschillende temperaturen is onderzocht, bleek de afbraak van DCE te stagneren bij temperaturen lager dan 4 à 10 °C. Bij een temperatuur hoger dan 60 °C werd TRI niet meer afgebroken en bij 40 à 50 °C stagneerde de afbraak van DCE en VC. Op basis van ervaring met electrobioreclamatie, waarbij de bodem is opgewamd tot 40 ºC, zijn toenamen van de eerste orde afbraakconstanten met een factor 4 voor VC en een factor 100 voor PER waargenomen. Ook bleek de verontreiniging die geadsorbeerd was aan organisch materiaal sneller vrij te komen.

Het Meer met Bodemenergie literatuur onderzoek laat verder zien dat een toename in temperatuur zelden resulteert in een toename van het totale aantal micro-organismen in het grondwater waar een WKO-systeem actief is. Belangrijkste reden hiervoor is dat in het diepe grondwater onder de daar normaal heersende omstandigheden niet of nauwelijks assimileerbaar organisch koolstof aanwezig is dat micro-organismen kunnen gebruiken om te groeien. In dat geval is niet de temperatuur de snelheidsbeperkende factor, maar de beschikbaarheid van een geschikte koolstofbron. Omdat temperatuursveranderingen in WKO-systemen met lage temperatuur (<25 °C) nauwelijks effect hebben op de macrochemie wordt verwacht dat het gehalte aan assimileerbaar organisch koolstof ook nauwelijks zal toenemen. Deze hypothese is bevestigd met schudproeven die zijn uitgevoerd in het kader van Meer met Bodemenergie (voor een uitgebreid verslag van deze labtesten zie deelrapport 3). Een toename van temperatuur tot 30°C leidt niet tot een verhoging in beschikbaarheid van het organisch koolstofgehalte in de waterfase, wat overeenkomt met de bevindingen in de literatuurstudie. Een toename in de temperatuur tot 50°C leidt wel tot een toename van het organisch koolstofgehalte in de waterfase.

Indien de concentratie aan assimileerbaar organisch koolstof verhoogd kan worden kan een verhoging van de bodemtemperatuur leiden tot een verhoogde biologische afbraaksnelheid. Vuistregel is dat bij een verhoging van tien graden de activiteit twee keer zo hoog is. Bij een toename van 10 °C (normale bodemtemperatuur) tot een optimale groeisnelheid van VOCl afbrekende bacteriën van 30 °C betekent dit dat de biologische afbraaksnelheid van VOCl in theorie met een factor vier versneld kan worden.

In het kader van MMB zijn afbraaktesten uitgevoerd om vast te stellen wat het effect is van verschillende temperaturen op de afbraaksnelheid in VOCl verontreinigde bodempakketten die gebruikt kunnen worden voor WKO systemen. Daarnaast is ook gekeken wat het effect is op een aantal specifieke genen die betrokken zijn afbraak van VOCl, hierbij is onderscheid gemaakt tussen het anaerobe reductieve dechloreringsproces en het micro-aerofiele oxidatie proces.

De afbraaktesten zijn bij vier verschillende temperaturen uitgevoerd, respectievelijk 6, 10, 18 en 30°C. De temperaturen zijn gekozen omdat zij model staan voor een aantal relevante praktijk condities: 6 graden als ondergrens in een groot aantal WKO systemen, 10 graden als representatie van de gemiddelde bodemtemperatuur, 18 graden iets boven de gemiddelde boventemperatuur in WKOs maar model voor een significante verhoging ten opzichte van de basistemperatuur en 30 °C als optimum temperatuur voor veel microorganismen en boven de wettelijke grens van 25 °C die nu wordt toegestaan. De batchexperimenten zijn ingezet met grond en grondwater van de met VOCl-verontreinigde locatie Strijp-S in Eindhoven.

Uit de resultaten van de afbraaktesten blijkt dat er in de geteste monsters geen sprake is van reductieve dechlorering. Er vindt geen toename van VC of productie van etheen plaats. Daarnaast is de dechlorerende bacterie (*Dehalococcoides* spp), die onder anaerobe omstandigheden in staat is tot de volledige afbraak van VOCl, niet aangetroffen.

Gedurende de looptijd van de test is echter wel een afname in *cis*-DCE, VC en etheen waargenomen. Mogelijk dat deze afname in VOCl wordt veroorzaakt door een ander afbraakproces genaamd micro-aerofiele oxidatie. Micro-aerofiele oxidatie van cis-DCE, VC en etheen kan onder zeer lage zuurstofconcentraties plaatsvinden. De overige analyseparameters bevestigen het feit dat in deze testen mogelijk sprake is van microaerofiele condities. Dit is bijvoorbeeld te zien in de sulfaatconcentraties, deze nemen gedurende de looptijd van het project toe. Daarnaast is het gen dat betrokken is bij de micro-aerofiele afbraak van VC en etheen in de monsters aangetroffen. In de 6 graden test is daarnaast ook de bacterie *Polaromonas* aangetroffen. Deze bacterie is in staat is om *cis*-DCE onder micro-aerofiele condities af te breken.

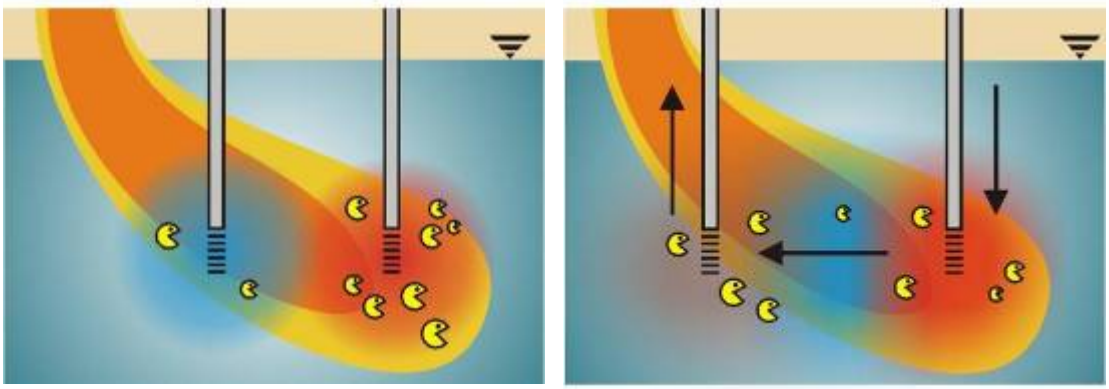
Op de locatie StrijpS lijkt lokaal dus sprake te zijn van micro-aerofiele afbraak van *cis*-DCE, VC en etheen. Deze afbraak lijkt het snelst te verlopen in de test bij 6, 10 en 18 °C.

Een bevestiging van een toename van de afbraaksnelheid met een toename in de temperatuur, zoals bij reductieve dechlorering, lijkt dus niet op te treden in het geval van microaerofiele afbraak (Slenders, et al., TNO-MEP rapport R99, November 1999; meervoudige eigen observaties Bioclear).

De conclusies uit de literatuurstudie en de afbraaktesten is dat een verhoogde temperatuur waarschijnlijk tot een versnelde VOCl afbraak via reductieve dechlorering leidt indien er geen beperkingen voor reductieve dechlorering zijn. De optimale temperatuur voor reductieve dechlorering is 30°C. Het verhogen van de temperatuur tot 30°C zorgt er echter niet voor dat er meer assimileerbaar organisch stof vrijkomt, daarvoor zal de temperatuur verhoogd moeten worden naar 50°C. 50°C is echter een suboptimale temperatuur voor de reductieve dechlorering. Als er op de locatie van nature geen reductieve dechlorering van VOCl optreedt, door een gebrek aan de juiste micro-organismen of ongunstige redoxcondities, zal het verhogen van de temperatuur de natuurlijke afbraak niet stimuleren omdat het verhogen van de temperatuur niet voor de juiste micro-organismen of redoxcondities kan zorgen. Het verhogen van de temperatuur boven de 18°C heeft mogelijk een negatief effect op micro-aerofiele afbraak van VOCl.

4.4 Open WKO-systemen in combinatie met natuurlijke afbraak

In een WKO-doubletsysteem en WKO-recirculatiesysteem is sprake van een verhoogde grondwaterdynamiek en van een (plaatselijke) verhoging van de grondwatertemperatuur. Indien op de locatie een BTEX verontreiniging aanwezig is, is het waarschijnlijk dat de natuurlijke afbraak door de verhoogde grondwaterdynamiek wordt versneld (zie paragraaf 4.3.1). In het geval van een VOCl verontreiniging geldt dat een WKO-systeem de VOCl afbraak kan stimuleren, kan afremmen of geen effect kan hebben (zie paragraaf 4.3) (zie figuur 4.1).



figuur 4.1 **Combinatie van open WKO-systeem en natuurlijke afbraak (links WKO-doubletsysteem en rechts WKO-recirculatiesysteem)**

Indien een verontreiniging met natuurlijke afbraak wordt gesaneerd hoeven er geen aanpassingen aan het WKO-systeem doorgevoerd te worden. Indien het WKO-systeem ook wordt gebruikt om de verontreiniging te beheersen zal de verontreiniging zich minder snel verspreiden en is er meer tijd beschikbaar om (langzame) natuurlijke afbraak plaats te laten vinden.

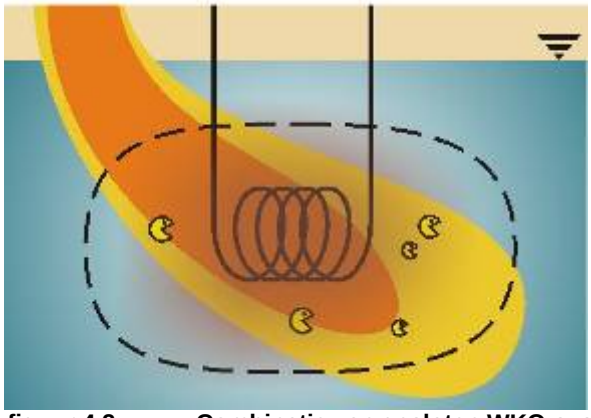
Een mogelijk nadeel van het concept om natuurlijke afbraak toe te passen is dat het vaak onbekend is in welke mate natuurlijke afbraak optreedt. Afbraaktesten zouden mogelijk uitkomst kunnen bieden om te bepalen of op de locatie natuurlijke afbraak plaatsvindt. Om er zeker van te zijn dat afbraak van de verontreiniging plaatsvindt kan gebruikt gemaakt worden van technieken die de afbraak stimuleren, zie hoofdstuk zes.

Een praktijkvoorbeeld waarin WKO-doubletsystemen actief zal zijn in een verontreiniging en waar de natuurlijke afbraak voor een afname van de verontreinigingsconcentraties moet zorgen is het ontwerp van de 'biowasmachine' van de gemeente Utrecht. Besloten is om het beheer van de individuele bodemverontreinigingen los te laten en over te gaan op gebiedsgericht beheer. Dit houdt in dat bij het plaatsen van WKO installaties verspreiding van verontreinigingen vanuit de regelgeving geen onoverkomelijk probleem meer is. Aanname bij deze aanpak is dat door het verpompen van het grondwater de natuurlijke afbraak van de verontreinigingen versneld wordt en verspreiding daardoor wordt voorkomen. Om de verspreiding te monitoren is een uitgebreid grondwatermeetnet in de binnenstad aangelegd. Of de biowasmachine daadwerkelijk voor stimulatie van de natuurlijke afbraak zorgt is nog onbekend.

Een praktijkvoorbeeld waarin een open WKO-recirculatiesysteem wordt ingezet om de verspreiding van de verontreiniging te beheersen en de natuurlijke afbraak te stimuleren is de locatie StrijpS te Eindhoven, zie paragraaf 3.3. Of op deze locatie daadwerkelijk natuurlijke afbraak is onderzocht in het kader van deelrapport 9 'Effecten op sanering'.

4.5 Gesloten WKO-systeem in combinatie met natuurlijke afbraak

Het gesloten WKO-systeem bestaat vaak uit een groot aantal lussen in de bodem die als warmtewisselaars dienen. In een gesloten WKO-systeem wordt geen grondwater verpompt en wordt de grondwaterdynamiek dus niet tot nauwelijks verhoogd. Dit betekent dat er alleen eventuele stimulering van de natuurlijke afbraak plaatsvindt door verwarming van het grondwater in de zomer (zie figuur 4.2). Dit systeem is voornamelijk interessant bij WKO systemen waarbij bovengronds meer vraag is naar koeling waardoor het warmteoverschot gebruikt kan worden om de ondergrond op te warmen.



figuur 4.2 Combinatie van gesloten WKO-systeem en natuurlijke afbraak

Er moet rekening gehouden worden met het feit dat een gesloten WKO-systeem alleen te verkiezen is boven een open WKO-systeem op locaties waar een lage energiebehoefte is aangezien een gesloten WKO-systeem maar een beperkte hoeveelheid energie op kan wekken.

Voordeel van dit combinatieconcept is dat het gesloten WKO-systeem niet de grondwaterstroming beïnvloed en daarom geen extra verspreiding van de verontreiniging veroorzaakt. Tweede voordeel is dat in een gesloten WKO-systeem geen putten aanwezig zijn die door chemische of biologische reacties voor putverstoppingen kunnen zorgen. Dit betekent dat, rekening houdend met het materiaal waar het WKO-systeem van is gemaakt, het mogelijk is om op dezelfde locatie als het WKO-systeem een in-situ sanering uit te voeren.

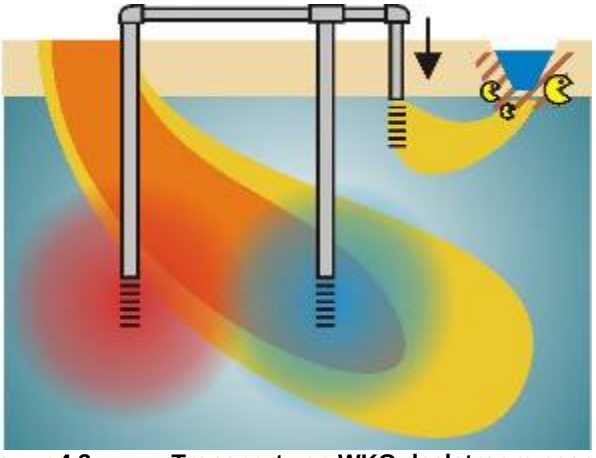
Aandachtpunt is dat een gesloten systeem uit veel diepe lussen bestaat die mogelijk door een scheidende bodemlaag heen zijn gezet, dit kan verticale verspreiding van de verontreiniging veroorzaken.

In de praktijk is nog geen ervaring met het combineren van een gesloten WKO-systeem met natuurlijke afbraak.

4.6 Combinatie WKO met transport van verontreiniging naar natuurlijke afbraak zone

Indien het niet waarschijnlijk is dat op een specifieke locatie een WKO-systeem voor stimulering van de natuurlijke afbraak zorgt, kan gedacht worden aan het transporteren van het meest verontreinigde grondwater uit het WKO-systeem naar een (gestimuleerde) zone waar wel natuurlijke afbraak plaats vindt. Dit geldt met name voor VOCl-verontreinigingen omdat gunstige condities voor natuurlijke afbraak van VOCl over het algemeen beperkt voorkomen.

Zones waar natuurlijke afbraak van VOCl optreedt worden gekenmerkt door de aanwezigheid van sterk gereduceerde redoxomstandigheden, voldoende koolstofbron en dechlorerende bacteriën (zie tabel 4.1). Dergelijke locaties zijn in de praktijk beperkt aanwezig. Het vinden van een locatie waar natuurlijke afbraak van VOCl plaats vindt heeft het meeste kans in de nabijheid van veenlagen omdat op deze locaties veel organisch koolstofaanwezig is en vaak sterk gereduceerde redoxcondities heersen. Ook op locaties waar het grondwater opkwelt in een waterlichaam zijn mogelijk zones met natuurlijke afbraak aanwezig. Tijdens het opkwellen stroomt het verontreinigde grondwater door een relatief organisch koolstofrijke slib laag waar sterk gereduceerde condities heersen en waarin VOCl volledig wordt afgebroken, zie figuur 4.3 (http://wwwa.vito.be/sedbarcah).



figuur 4.3 Transport van WKO deelstroom naar kwellocatie waar natuurlijke afbraak optreedt

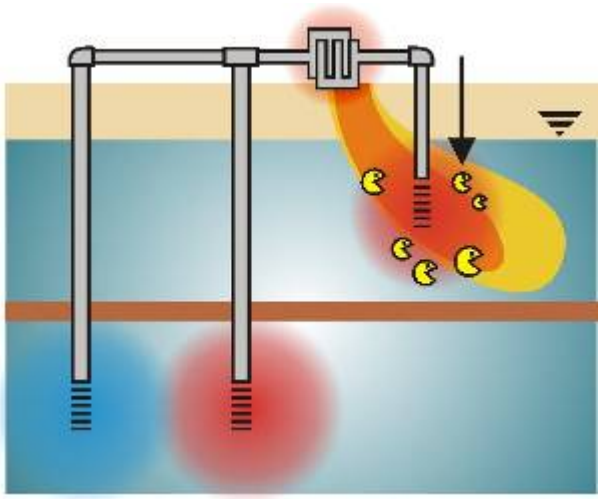
Voordeel van het transporteren van verontreinigd grondwater naar een locatie waar natuurlijke afbraak plaatsvindt, is dat de verontreiniging wordt afgebroken door natuurlijke afbraak ondanks dat er op de WKO locatie geen gunstige condities heersen voor natuurlijke afbraak. Dit kan voor een reductie in kosten zorgen omdat de putten en pompen van het WKO-systeem gebruikt kunnen worden om het grondwater te transporteren.

Nadeel van deze aanpak is op de eerste plaats het vinden van een zone waar natuurlijke afbraak wel plaatsvindt. Op de tweede plaats wordt op deze manier een niet verontreinigde locatie verontreinigd.

Er is nog geen praktijkervaring met het combineren van een WKO-systeem en het transport van verontreinigd grondwater naar een zone waar natuurlijke afbraak optreedt.

4.7 WKO in combinatie met warmtetransport

Indien op een locatie natuurlijke afbraak van een verontreiniging optreedt kan dit proces versneld worden door de temperatuur op de locatie te verhogen. Dit kan gedaan worden door warmte aan een WKO-systeem te onttrekken en toe te voegen aan een bodempakket waar natuurlijke afbraak plaatsvindt (zie figuur 4.4).



figuur 4.4 Transport van WKO warmte naar locatie waar natuurlijke afbraak plaats vindt

Voordeel van dit combinatieconcept is dat het WKO-systeem en sanering gescheiden zijn en de saneringsactiviteiten geen putverstoppingsrisico's opleveren. Daarnaast heeft een gescheiden systeem het voordeel dat zodra de sanering is afgelopen de saneringsmodule afgekoppeld kan worden en het WKO-systeem weer optimaal kan functioneren.

Nadeel van dit combinatieconcept is dat het energierendement van het WKO-systeem wordt verlaagd omdat een deel van de warmte wordt afgestaan aan de sanering. Dit combinatieconcept zou met name geschikt zijn op een locatie waar bovengronds voornamelijk vraag naar koude is en een warmte overschot gebruikt kan worden voor de sanering. Een tweede nadeel is dat met het inbrengen van schoon warm water de verontreiniging uit elkaar wordt gedreven. Mogelijk kan de toepassing van een gesloten WKO-systeem hier uitkomst bieden.

Op de locatie IJsbaan te Hoogezand-Sappemeer is een plan opgesteld om warmte uit een nog aan te leggen WKO-systeem te gebruiken om de afbraak ter plekke van de VOCl-verontreiniging te stimuleren (zie literatuurstudie Meer met Bodemenergie, SKB, 30 maart 2012). Het geprognotiseerde voordeel van het combinatieconcept is dat de saneringsduur van de actieve biologische sanering door de opwarming van 2 naar 1,5 jaar terug gebracht kan worden.

5 WKO en in-situ verwijdering met gestimuleerde afbraak (reactieve zone)

5.1 Open WKO-systeem in combinatie met reactieve zone

De essentie van de combinatie tussen een WKO-systeem en een reactieve zone is dat het grondwater dat rondgepompt wordt door het WKO-systeem door een reactieve zone stroomt waarin de verontreiniging wordt afgebroken. De effectiviteit van dit combinatie-concept is in hoge mate afhankelijk van het type hulpstof dat wordt gebruikt. Om een reactieve zone te creëren kunnen absorberende, oxiderende en reducerende hulpstoffen of dechlorerende bacteriën aan de bodem worden toegevoegd. Het is theoretisch ook mogelijk om met behulp van licht of elektrische spanning verontreinigingen af te breken. Vanuit de bodemsaneringwereld is veel kennis beschikbaar over de eigenschappen van verschillende hulpstoffen. In de onderstaande paragrafen worden in meer detail verschillende de hulpstoffen besproken waarbij aandacht wordt geschonken aan de toepasbaarheid van de hulpstoffen in combinatieconcepten.

De hulpstoffen waarmee een reactieve zone gecreëerd kan worden kunnen op verschillende locaties ten opzichte van de WKO-putten aan de bodem worden toegevoegd. De hulpstoffen kunnen in, nabij of op grote afstand van de putten worden toegevoegd. De meest geschikte afstand ten opzichte van het WKO-systeem om de verschillende hulpstoffen te doseren is in grote mate afhankelijk van het putverstoppingsrisico die de hulpstoppen veroorzaken.

In de onderstaande paragrafen worden de verschillende typen hulpstoffen besproken die gebruikt kunnen worden om een reactieve zone te creëren. Vervolgens worden de verschillende opties besproken wat betreft de locatie van de reactieve zone ten opzichte van de WKO putten. In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk worden de meest kansrijke combinatieconcepten met een reactieve zone in detail besproken.

5.2 Sanering door een absorberende zone

De werking van absorberende hulpstoffen is gebaseerd op het inbrengen van stoffen waar de verontreiniging aan absorbeert. Voorbeelden van absorberende hulpstoffen zijn actief kool of zeolieten.

Voordeel van absorberende stoffen is dat de redoxomstandigheden in de bodem niet of nauwelijks veranderen waardoor putverstopping door neerslagvorming minimaal is.

Nadeel van absorberende stoffen is dat ze maar een beperkte capaciteit hebben. Dit betekent dat een absorberende hulpstof regelmatig vervangen moet worden wat hoge kosten (aanvoer en afvoer) met zich meebrengt. Het bovengronds toepassen van absorberende stoffen zou deze kosten mogelijk kunnen beperken. Voor bovengrondse zuivering zie hoofdstuk 6.

5.3 Sanering met een oxidatieve zone

Oxiderende hulpstoffen zorgen voor het ontstaan van aerobe omstandigheden (zie tabel 4.1). Oxiderende hulpstoffen worden gebruikt voor chemische oxidatie of voor gestimuleerde natuurlijke afbraak.

5.3.1 Chemische oxidatie

Bij chemische oxidatie worden sterk oxiderende omstandigheden in de bodem gecreëerd waardoor PER, TRI, CIS, VC, BTEX en andere organische verontreinigingen chemische worden afgebroken. chloraat, permanganaat, fenton's, ozon en persulfaat zijn voorbeelden van oxidatoren die gebruikt kunnen worden bij chemische oxidatie.

In de praktijk is veel ervaring opgedaan met chemische oxidatie. Chemische oxidatie wordt in de praktijk voornamelijk gebruikt om zones met zeer hoge verontreinigingsconcentraties te saneren.

5.3.2 Stimulatie van aerobe natuurlijke afbraak

Oxidatoren kunnen gebruikt worden om de natuurlijke afbraak van CIS, VC en BTEX te stimuleren. Sterke oxidatoren gebruikt voor chemische oxidatie zijn ongeschikt om primair de natuurlijke afbraak te stimuleren. Minder sterke oxidatoren kunnen wel voor dit doel worden gebruikt. Zuurstof kan de aerobe afbraak van CIS en VC stimuleren. Voor de stimulatie van BTEX kunnen naast zuurstof ook nitraat en sulfaat worden gebruikt.

In de praktijk is veel ervaring opgedaan met het stimuleren van aerobe natuurlijke afbraak.

5.3.3 Aandachtpunten bij het gebruik van oxidatieve hulpstoffen

Indien rekeningen gehouden wordt met de eigenschappen van de oxidatieve hulpstoffen kunnen deze gebruikt worden in combinatieconcepten. Enkele eigenschappen waar specifiek naar gekeken dient te worden zijn de levensduur, putverstoppingsrisico's en biofoulingrisico's.

Zuurstof, chloraat, permanganaat, fenton's, ozon en persulfaat hebben een korte levensduur (uren tot maximaal een week), uitgezonderd permanganaat dat langer dan drie maanden in de bodem actief kan zijn. Vanwege de korte levensduur van oxidatoren is het voor enkele jaren in stand houden van een oxiderende zone kostbaar omdat vrijwel continue injectie nodig is. Specifiek nadeel van permangnaat is dat bij de chemische reactie mangaanoxide wordt gevormd dat de doorlaatbaarheid van de bodem negatief kan beïnvloeden of voor putverstopping kan zorgen (EPA, In-Situ Chemical Oxidation, 2006).

Zuurstof is vergeleken met de andere oxidatoren het goedkoopst, een zuurstofscherm zou daarom vanwege de kosten de meest aangewezen oxidator zijn.

Aandachtpunt bij het gebruik van zuurstof en oxidatoren die zuurstof afgeven is dat deze stoffen ervoor kunnen zorgen dat de redoxconditie van het bodempakket locaal aeroob worden. Dit kan tot gevolg hebben dat zuurstofrijk grondwater gemengd wordt met ijzer(II)rijk grondwater waardoor ijzer(hydr)oxides kunnen neerslaan die vervolgens putverstoppingen kunnen veroorzaken. Indien sulfaat wordt toegediend in een methanogeen bodempakket kan opmenging van ijzer(II)rijk en sulfiderijk grondwater plaatsvinden waardoor ijzersulfideneerslagen kunnen ontstaan. In de praktijk worden WKO-systemen zodanig ontworpen dat er geen zuurstofrijk water wordt aangetrokken. In systemen waar wel zuurstofrijk water wordt aangetrokken kunnen problemen optreden als gevolg van ijzerhydroxide neerslagen. Problemen met ijzersulfideneerslagen komen in de praktijk nauwelijks voor.

Laatste aandachtspunt geldt voor de toepassing van ‘milde’ oxidatoren zoals zuurstof, nitraat of sulfaat die voor een lange periode worden gebruikt. Indien er voldoende organisch koolstof aanwezig is kan er biomassavorming op treden. Biomassavorming kan tot putverstoppingen als gevolg van biofouling leiden.

5.4 Sanering met een reducerende zone

Het toedienen van reducerende hulpstoffen aan de bodem zorgt voor het ontstaan van meer gereduceerde omstandigheden. Door de sterk gereduceerde omstandigheden te creëren (methanogene condities, zie tabel 4.1) kan de biologische afbraak van VOCl door middel van reductieve dechlorering gestimuleerd worden. Veel reducerende hulpstoffen bevatten daarnaast organische koolstof die als electrondonor kan dienen voor de afbraak van VOCl. Er bestaat een grote verscheidenheid aan reductieve hulpstoffen. Enkele voorbeelden zijn melasse, protamylasse, lactaat, plantaardige oliën en nulwaardig ijzer.

Vergeleken met oxiderende hulpstoffen hebben reducerende hulpstoffen over het algemeen een langere levensduur. Protamylasse, plantaardige oliën en nulwaardig ijzer zijn bijvoorbeeld tot wel drie jaar in de bodem actief.

5.4.1 Selectie van de meest geschikte reducerende hulpstoffen

Om een selectie te maken uit de grote verscheidenheid aan reducerende hulpstoffen is een uitgebreide afweging gemaakt tussen de verschillende hulpstoffen. Voor de volledigheid is ook een bacteriekweek van dechlorerende bacteriën (DHC-kweek) in de afweging meegenomen. Voornaamste aandachtpunten bij het toepassen van reducerende hulpstoffen in een combinatieconcept zijn de verstoppingsrisico’s, de kosten en manier waarmee de hulpstof toegediend kan worden. De resultaten van deze studie zijn toegevoegd als bijlage 4. Voor het onderzoek naar nulwaardig ijzer wordt verwezen naar bijlage 5. Hieronder volgt een samenvatting van de bevindingen.

In het onderzoek naar de toepasbaarheid van verschillende hulpstoffen in combinatie-concepten zijn de volgende hulpstoffen onderzocht: melasse, lactaat/acetaat mengsel, brenntaplus VP1, wei, methanol, ethanol, glucosestroop, protamylasse, plantaardige olie (CAP 18), geëmulgeerde olie (EOS), geëmulgeerde olie (ENNA), HRC, chitine, waterstof, nulwaardig nano-ijzer, nulwaardig micro-ijzer en dechlorerende biomassa (DHC).

Deze hulpstoffen zijn vervolgens getoetst op de volgende zes eigenschappen: kans op putverstopping door redox-veranderingen, risico op biofouling in WKO putten, kans op gasvorming, snelheid waarmee hulpstof in de bodem wordt verbruikt, eenvoud van toe-diening in het diepe bodempakket en de kosten.

Uit de resultaten van dit onderzoek volgt dat de hulpstoffen ethanol en DHC-kweek het meest geschikt zijn om te gebruiken in een combinatieconcept waarbij de hulpstoffen aan het WKO-infiltratiewater wordt toegevoegd of geïnfiltreerd wordt in separate infiltratieput-ten rondom de WKO-putten. Chitine en (geëmulgeerde) plantaardige olie zijn het meest geschikt om een reactieve zone aan te leggen op ruime afstand van het WKO-systeem. Op basis van een aanvullende onderzoek naar nulwaardig ijzer bleek dat deze hulpstof niet bruikbaar is om toe te passen in combinatieconcepten vanwege de kosten en het feit dat nog veel onderzoek nodig is naar effectieve injectie daarvan in aquifers (zie bijlage 5).

5.4.2 Afbraaktesten met reducerende hulpstoffen en dechlorerende bacteriën

Om aanvullende informatie te verzamelen over de hulpstoffen die mogelijk geschikt zijn voor de combinatieconcepten zijn afbraaktesten uitgevoerd. De testen zijn uitgevoerd met VOCl-verontreinigde grond en grondwater monsters van locatie Strijp-S te Eindhoven. Aan deze testen zijn ethanol, lactaat/acetaat, DHC-kweek of chitine toegevoegd om het reductieve dechloreringsproces van VOCl te stimuleren. Aan de ethanol, chitine en lac-taat/acetaat test is ook een geringe hoeveelheid DHC-kweek toegevoegd. Deze biomas-sa is toegevoegd om mogelijke belemmeringen (afwezigheid DHC) voor het optreden van reductieve dechlorering op te heffen. Als negatieve controle is een afbraaktest ingezet waar geen dechlorerende bacteriën aan toegevoegd zijn (intrinsieke test). De lactaat-acetaat test is als positieve controle meegenomen aangezien er reeds veel ervaring is met het doseren van dit mengsel om de afbraak van VOCl te stimuleren.

De looptijd van de afbraaktesten was maximaal 20 weken. De flessen zijn bij 18 graden ingezet. Gedurende de test zijn analyses uitgevoerd voor het bepalen van relevante fysi-sche en biologische parameters. Voor een gedetailleerde omschrijving van de uitvoering en resultaten van de afbraaktesten wordt verwezen naar bijlage 7.

Uit de resultaten van de afbraaktesten blijkt dat in alle gestimuleerde afbraaktesten volle-dige afbraak van VOCl plaatsvindt. De resultaten van de testen met de hulpstoffen etha-nol, chitine en alleen DHC-kweek laten zien dat deze goed toegepast kunnen worden in een combinatieconcept. De details van de hulpstoffen en de resultaten van de afbraak-testen voor deze hulpstoffen zijn in de volgende paragrafen per hulpstof nader uitge-werkt.

5.4.3 Hulpstof ethanol

Ethanol is relatief goedkoop. Het is verkrijgbaar in pure vorm en is goed oplosbaar in water, dit maakt langdurige infiltratie zonder verstopping als gevolg van zwevende delen mogelijk. Vanwege het hoge gehalte aan organisch koolstof en het gemak waarmee deze organische stof door bacteriën wordt gebruikt, is er echter een risico op putverstopping als gevolg van redoxverandering en biofouling.

Uit de resultaten van de afbraaktest blijkt de snelheid waarmee ethanol VOCl afbreekt vergelijkbaar is met de VOCl-afbraaksnelheid van het goed afbreekbare acetaat/lactaat (positieve controle). Het betreft hier een zeer snelle afbraak. De toegediende ethanol zorgt voor een verandering in redoxcondities, sulfaat wordt verwijderd en er ontstaan methanogene condities.

Door de aangetoonde snelle afbraak van ethanol kan putverstopping in de infiltratieputten ontstaan. Dit risico kan mogelijk verkleind worden door een pulsgewijze doseringsstrategie van zeer hoge concentraties te hanteren. De snelle afbraaksnelheid van ethanol kan mogelijk gebruikt worden om putverstopping bij de onttrekkingsputten te minimaliseren. Door ervoor te zorgen dat het geïnfiltreerde grondwater minimaal een half jaar onderweg is naar de onttrekkingsputten is de ethanol volledig verbruikt waardoor het niet in de onttrekkingsputten terecht komt en voor biofouling kan zorgen. Om putverstopping tegen te gaan kan ook gedacht worden aan het uitspreiden van de ethanoldosering over de levensduur van het WKO-systeem (20 tot 30 jaar).

5.4.4 Hulpstoffen chitine en (geëmulgeerde) plantaardige olie

Uit de onderzoeksresultaten blijkt dat chitine en (geëmulgeerde) plantaardige olie het meest geschikt zijn om een reactieve zone aan te leggen. De voornaamste voordelen van deze hulpstoffen zijn ten eerste de kosten, ten tweede de beperkte verspreidingsnelheid waardoor de hulpstoffen op de geselecteerde locatie blijven en zich niet naar de WKO-putten verspreiden en ten derde de lage verbruiksnelheid waardoor de reactieve zone jaren actief blijft. Het vierde voordeel van chitine is dat de verbruiksnelheid zo laag wordt geacht dat er maar een beperkte hoeveelheid biomassa wordt gevormd die voor biofouling kan zorgen.

Omdat met chitine nog nauwelijks praktijk ervaring is opgedaan is een afbraak ingezet. Uit de resultaten van de labtest volgt dat chitine, zoals verwacht, per tijdseenheid een beperkte hoeveelheid assimileerbaar koolstof naar het water afgeeft. Deze koolstofafgifte is voldoende om het VOCl-afbraakproces te stimuleren, dit proces gaat echter wel langzamer dan is gemeten bij de toevoeging van ethanol en lactaat/acetaat. Door het toedienen van chitine veranderen, net als in het geval van toediening van ethanol, de redoxcondities en treedt er methaanvorming op nadat het dechloreringsproces is gestopt.

Door de trage verbruiksnelheid van chitine blijft deze hulpstof na toediening aan het bodempakket lang koolstof afgeven waardoor voor een lange periode gunstige condities creëert om VOCl af te breken. Deze hulpstof is daarmee zeer geschikt om toegepast te worden in biologisch actieve zones die meerder jaren actief moeten blijven.

5.5 Sanering door het toedienen van dechlorerende bacteriën

Het toedienen van dechlorerende bacteriën (DHC-kweek) is meegenomen in een afweging tussen een groot aantal hulpstoffen (zie paragraaf 5.4.1). Uit deze afweging blijkt dat DHC-kweek, (zonder toevoeging van koolstofbron) in theorie zeer geschikt is om te gebruiken in een combinatieconcept waarbij DHC-kweek aan het WKO-infiltratiewater wordt toegevoegd of geïnfiltreerd wordt in separate infiltratieputten rondom de WKO-putten.

Uitgangspunt is dat geïnfiltreerde dechlorerende bacteriën een restactiviteit hebben en in afwezigheid van een koolstofbron nog een aanzienlijke hoeveelheid VOCl af kunnen breken voordat ze afsterven. Voordeel van deze toepassing is dat er geen extra stimulerende middelen aan de bodem worden toegevoegd die voor putverstoppingen kunnen zorgen als gevolg van redoxveranderingen. De DHC-kweek zelf bevat geen zwevende delen en maar een zeer beperkte hoeveelheid aan organisch koolstof waardoor putverstopping door biofouling naar verwachting minimaal zal zijn.

Om aanvullende informatie te verzamelen over de effectiviteit van het toevoegen van DHC-kweek zonder koolstofbron zijn afbraaktesten uitgevoerd, voor de opzet van de testen wordt verwezen naar paragraaf 5.4.2.

In de test is geen koolstofbron toegediend maar alleen DHC-kweek aan grond en grondwater van de locatie StrijpS. Uit de resultaten blijkt dat het toedienen van alleen DHC-kweek voor snelle volledige afbraak van VOCl zorgt. Aan de afbraaktest is meerdere malen extra VOCl toegevoegd, in alle gevallen werd de toegevoegde VOCl volledig afgebroken. De laatste VOCl toevoeging is uitgevoerd 6 maanden na het toevoegen van de DHC-kweek. Hieruit blijkt dat de DHC-kweek in de afbraaktest tot wel 6 maanden in leven blijft en VOCl af kan breken zonder dat er koolstofbron wordt toegevoegd. Uit de afbraaktest bleek verder dat sulfaatreductie en methanogenese niet werd gestimuleerd. Waarschijnlijk is er voor deze processen te weinig assimileerbaar koolstofbron aanwezig. Hierdoor vindt er dus nagenoeg geen verandering in redoxcondities plaats waardoor putverstoppingsrisico's als gevolg van neerslagvorming minimaal zullen zijn. Ook voor de groei van DHC is waarschijnlijk te weinig assimileerbaar koolstofbron aanwezig. Het risico op putverstopping door biofouling is hierdoor laag. Voor een gedetailleerde omschrijving van de uitvoering en resultaten van de afbraaktesten wordt verwezen naar bijlage 7.

5.6 Afbraak van VOCl door licht en elektriciteit

In theorie is het mogelijk om een VOCl verontreiniging te saneren met behulp een elektrisch potentiaalverschil of door licht. Deze technieken worden slechts in beperkte mate gebruikt in de bodemsaneringswereld. In het onderliggende onderzoek worden deze technieken besproken omdat deze technieken, in het licht van een combinatieconcept, mogelijk voordelen bieden ten opzichte van conventionele saneringstechnieken.

5.6.1 Elektrokinetische remediatie

Het saneringsprincipe van elektroreclamatie of elektrokinetische remediatie is gebaseerd op de, vaak gecombineerde, werking van ionmigratie, elektrische osmose (het toepassen van gelijkstroom), en opwarming van de bodem (bij het toepassen van wisselstroom).

Electro-osmose in combinatie met ionmigratie zorgt er, bij de gelijkstroomtoepassing, voor dat positief geladen ionen zich sneller verplaatsen dan negatief geladen ionen in een andere richting, dit proces kan zowel in een goed doorlatend zandpakket optreden als een slechtdoorlatende kleilaag. Door het transport van ionen (o.a. H+ and OH -) door de bodem zullen chemische reacties optreden. VOCl kan bijvoorbeeld chemisch worden afgebroken als het in contact komt met H_2 (waterstof). Het beïnvloedingsgebied zal echter zeer gering zijn.

Door gebruik van wisselstroom zal de bodem worden opgewarmd. Bij sommige toepassingen kan de temperatuur wel oplopen naar plaatselijk 80 graden Celsius. Hogere temperaturen verhogen de oplosbaarheid van componenten vanuit puur product naar de waterfase en kan ook de biologische afbraak stimuleren (al zal deze bij temperaturen boven 40 graden Celsius juist weer geremd worden).

Elektrokinetische sanering kan vooral behulpzaam zijn bij het mobiliseren en transporteren van geladen verontreinigende stoffen en reactanten in slecht doorlatende lagen. Open WKO's staan juist in goed doorlatende lagen en de meest relevante verontreinigingen, chloorkoolwaterstoffen, zijn niet geladen. In aquifers is mobilisatie en transport van verontreinigingen en reactanten veel efficiënter met WKO te bevorderen dan met elektrokinetiek. Wel zijn elektroden geschikt om via het opwarmen van de bodem de afbraak te stimuleren. Dat gebeurt echter al met WKO, minder sterk dan mogelijk is met elektrodes, maar het kost ook veel minder energie. Ook wordt aan de kathode uit water waterstof gevormd: de voor de reductieve dechlorering van chloorethenen noodzakelijke elektronendonor. Aan de anode ontstaat zuurstof, dat als elektronenacceptor kan dienen voor de oxidatieve afbraak van laaggechloreerde chloorkoolwaterstoffen.

Door de relatief hoge kosten, en beperkte meerwaarde en het risico op putverstopping door de chemische reacties kan worden geconcludeerd dat inzet van elektrokinetische remediatie in combinatie met een WKO-systeem momenteel te prematuur is, maar waarschijnlijk nooit zal renderen. Voor meer details over elektrokinetische remediatie wordt verwezen naar bijlage 6.

5.6.2 Fotokatalytische remediate

Bij fotokatalytische afbraak wordt gebruik gemaakt van halfgeleidend materiaal als katalysator. Bij absorptie van UV-straling raken in deze materialen atomen in aangeslagen toestand waardoor elektronen ontsnappen en een positief geladen gat achterblijft. Zowel het elektron als dat gat kunnen gelijktijdig met nabije moleculen van anderen stoffen reageren, hetgeen resulteert in een sterk oxiderende werking. TiO_2-oppervlaktes hebben bijvoorbeeld een oxidatiepotentiaal van 3,0 eV. Toepassingsmogelijkheden zijn cement en verf met fotokatalytische eigenschappen voor het zuiveren van stadslucht en het schoon houden van gevels.

Relevant voor een mogelijke toepassing bij bodemsanering is onderzoek van Rodríguez et al. De belangrijkste bevindingen zijn (Chemosphere 58 (2005) 391-398):

- Zonlichtgestimuleerde chemische oxidatie met TiO_2 en Photo-Fenton is mogelijk.
- Dichloormethaan kon met TiO_2 zowel in een aeroob als een anaeroob systeem goed worden afgebroken. Trichloormethaan kon alleen in een anaeroob systeem zonder verliezen naar de atmosfeer worden behandeld. Maar onder anaerobe condities treedt geen volledige afbraak op en kunnen $CHCl_3$ en CCl_4 worden gevormd.
- Met Photo-Fenton verloopt de afbraak veel beter, maar die katalysator is alleen in een open tank getest om te hoge drukopbouw te voorkomen. Uit een test met dichloormethaan, trichloormethaan en dichloorethaan blijkt dat voldoende ijzer (56 mg/l) moet worden gebruikt om verliezen naar de atmosfeer te voorkomen.
- Eerder onderzoek verricht in luchtdichte, vaak gekoelde systemen wordt door de auteurs voor grootschalige toepassing in grote afvalwaterbehandelingssystemen te kostbaar geacht.

Aangezien de door de chemische oxidatie gewijzigde redoxtoestand tot een groot risico op verstoppingsproblemen in de WKO-filters zal leiden als het water na gebruik weer wordt geïnfiltreerd in de bodem, komt alleen behandeling van een niet in de bodem te retourneren deelstroom in aanmerking. Het voordeel van een nog te ontwikkelen zuiveringsinstallatie op basis van fotokatalytisch afbraak ten opzichte van conventionele zuivering is vooralsnog niet duidelijk. Het systeem is niet getest met chloorethenen, maar de resultaten met chloorethanen zijn weinig hoopgevend. Terwijl de onderzoekers voor waterafvalbehandeling op een open systeem uitkomen, is in een combinatie met een WKO-systeem juist een gesloten systeem vereist.

Fotokatalystische behandeling van afvalwater verkeert nog in een experimenteel stadium. Verder onderzoek naar een experimentele combinatie met WKO brengt een groot afbreukrisico met zich mee. Op basis van de geïnventariseerde onderzoeksresultaten is fotokatalytische afbraak in combinatie met een WKO-systeem niet haalbaar.

5.7 De locatie van de reactieve zone ten opzichte van het WKO-systeem

Hulpstoffen die een reactie zone kunnen creëren hebben verschillende eigenschappen. Dit betekent ook dat de meest optimale toepassingsvorm in een combinatieconcept per hulpstof verschilt. In de onderstaande paragrafen zijn de verschillende toepassingsvormen van hulpstoffen beschreven.

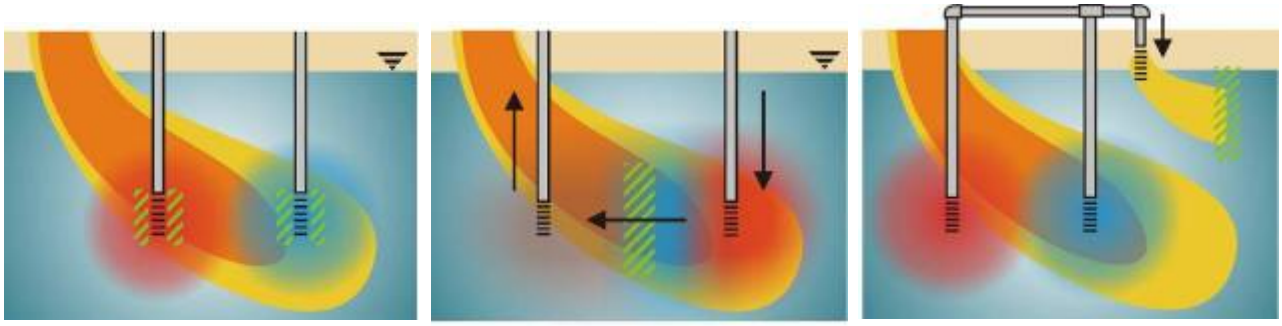
De meest geschikte toepassingsvorm van de verschillende hulpstoffen wordt in grote mate beïnvloed door de putverstoppingsrisico's die de hulpstof in potentie kan veroorzaken. De meest waarschijnlijke mechanismen waardoor putverstopping wordt veroorzaakt zijn:

- Door het mengen van zuurstof- of nitraatrijk grondwater met ijzer(II)rijk grondwater ontstaan ijzer(hydr)oxides neerslagen.
- Door het mengen van ijzer(II)rijk en sulfiderijk grondwater en door het mengen van sulfaat- en methaanrijk grondwater kunnen neerslagen van ijzersulfides ontstaan.

- Door grondwater met organisch koolstof aan te trekken kan biomassavorming optreden. BTEX en in beperkte mate CIS en VC kunnen ook als koolstofbron dienen en voor biomassavorming zorgen.

Om te voorkomen dat hulpstoffen in het WKO-systeem terecht komen of dat grondwater met verschillende redoxcondities gemengd wordt dient een afweging gemaakt te worden met betrekking tot de locatie en de timing van de hulpstof toediening.

De reactieve zone kan gecreëerd worden door hulpstoffen toe te voegen aan de omstorting van de WKO putten, aan het WKO-water, in een zone op enige afstand van de WKO putten en op een volledig andere locatie (zie figuur 5.1).



figuur 5.1 WKO in combinatie met een reactieve zone

5.7.1 Reactieve zone in de omstorting

De reactieve zone in de omstorting van een WKO-put kan gecreëerd worden door de omstorting te vullen met reactief materiaal. Zodra de WKO-putten verontreinigd grondwater aantrekken, wordt de verontreiniging deels afgebroken in de reactieve omstorting.

Voordeel van een reactieve zone in de omstorting van de putten is dat de reactieve omstorting tegelijkertijd met het WKO-systeem aangelegd kan worden. Het gelijktijdig aanleggen is waarschijnlijk goedkoper is dan het apart aanleggen van het WKO-systeem en een reactieve zone op enige afstand van de WKO-putten.

Nadeel is dat eventuele chemische of biologische reacties in de omstorting meteen tot putverstoppingen kunnen leiden omdat de reactieve zone zo dicht op de filters zitten. Tweede nadeel is dat de omvang van de reactieve zone vaak beperkt is waardoor de reactieve zone ook maar een beperkte omvang kan hebben. Derde nadeel is dat het grondwater met hoge snelheid door de reactieve zone stroomt waardoor de verblijftijd van het verontreinigde grondwater in deze zone beperkt is.

In de praktijk is er geen ervaring met het toevoegen van hulpstoffen aan de omstorting. Vanwege de nadelen wordt niet verwacht dat het toedienen van hulpstoffen aan de omstorting een kansrijk combinatieconcept is.

5.7.2 Reactieve zone door hulpstoffen toe te dienen aan WKO-infiltratiewater

Het doseren van vloeibare hulpstoffen in de WKO-infiltratieputten is mogelijk door bovengronds een hulpstofdoseringssysteem te koppelen aan een WKO-systeem. Het WKO-systeem zorgt vervolgens voor de verspreiding van de hulpstof over de gehele locatie.

Bij het doseren van hulpstoffen aan het te infiltreren WKO-water hoeven geen extra infiltratieputten of reactieve schermen aangelegd te worden om de hulpstoffen te doseren. Er zal echter wel een bovengrondse doseringsinstallatie aangelegd moeten worden.

Nadeel van deze manier van hulpstoffen toedienen is de kans op putverstopping in de infiltratieputten door biofouling of chemische afzettingen. Om putverstopping in de infiltratieputten niet in de hand te werken dient de te gebruiken hulpstof geen zwevende delen te bevatten. Om putverstopping tegen te gaan kan een aangepast doseringsregiem gehanteerd worden waarbij pulsgewijs de hulpstof in hoge concentraties wordt geïnfiltreerd. Door pulsgewijze dosering komt de infiltratieput maar voor een beperkte tijd in aanraking met de hulpstof. De hoge concentratie van de hulpstof werkt in het geval van bijvoorbeeld ethanol en methanol zelfs antibacterieel. Tweede nadeel is de kans op putverstopping tijdens het onttrekken van het beïnvloedde grondwater. Indien over een lange periode oxiderende of reducerende hulpstoffen aan het grondwater zijn toegevoegd zullen respectievelijk oxide- of sulfideneerslagen kunnen ontstaan in de WKO-putten. Mogelijk kunnen deze neerslagen worden tegengegaan door de hulpstof in de bodem uit te laten reageren voordat het grondwater weer wordt opgepompt. In een WKO-doubletsysteem zouden bijvoorbeeld aan het begin van het infiltratieseizoen voor de betreffende WKO-put hulpstoffen kunnen worden toegevoegd die uitgereageerd zijn als het onttekkingsseizoen weer begint. In het geval van een WKO-recirculatiesysteem is het water waarschijnlijk enkele maanden onderweg van de infiltratieputten naar de onttrekkingsputten waardoor de hulpstoffen zijn uitgereageerd. Om zowel putverstopping aan de onttrekkings- als infiltratiezijde te verminderen kan ook besloten worden om de toediening van de benodigde hulpstoffen uit te smeren over de gehele levensduur van het WKO-systeem (20 tot 30 jaar).

Ondanks deze maatregelen is het mogelijk dat op de lange termijn oxides en sulfides in de WKO-putten terecht komen. Om deze neerslagen zo veel mogelijk te verwijderen kan de bedrijfsvoering van het WKO-systeem worden aangepast door bijvoorbeeld de frequentie van mechanisch onderhoud te verhogen (bijvoorbeeld terugspoelen en spuien). Indien putregeneratie in verband met oxide neerslagen nodig is kan het systeem gereinigd worden met zoutzuur. Indien er sprake is van biofouling of sulfide neerslagen dient chloorbleekloog of peroxide toegepast te worden. Bij het regenereren van de putten dient rekening gehouden te worden met het feit dat de putten niet voor 100% geregenereerd kunnen worden en dan niet een oneindig maal geregenereerd kan worden.

5.7.3 Reactieve zone op enige afstand van de WKO-putten

Door hulpstoffen op enige afstand van WKO putten te injecteren kan een reactieve zone worden gecreëerd waar het verontreinigde grondwater doorheen stroomt en waarin de verontreiniging wordt afgebroken. De reactieve zone kan ten eerste gecreëerd worden door gebruikt te maken van infiltratiefilters enkele meters rondom de WKO-infiltratiefilters. De tweede manier is de aanleg van een reactief scherm op relatief grote afstand van de WKO-putten.

Het voordeel van het toepassen van een reactieve zone op enkele meters van de WKO-putten of op relatief grote afstand van de WKO putten is dat de hulpstof niet in de WKO-infiltratieputten terecht komt en er minder kans is op putverstopping. Hierbij moet echter wel opgemerkt worden dat bij de onttrekkingsputten nog wel putverstoppingsrisico's kunnen ontstaan indien de hulpstoffen nog niet geheel zijn weggereageerd.

Een nadeel van het aanbrengen van een reactieve zone op afstand van de WKO-infiltratieputten zijn de kosten. Met name indien een reactieve zone op grote diepte gecreëerd dient te worden zullen de kosten aanzienlijk zijn.

5.7.4 Reactieve zone op een andere locatie

Een reactieve zone kan aangelegd worden op enige afstand van een WKO-systeem. Het verontreinigde grondwater (bijvoorbeeld een deelstroom) kan vervolgens uit het WKO-systeem worden onttrokken en naar de aangelegde reactieve zone getransporteerd worden waar de verontreiniging wordt afgebroken.

Voordeel van een reactieve zone op afstand van het WKO-systeem is dat er minimale putverstoppingsrisico's voor het WKO-systeem zijn. Tweede voordeel is dat de reactieve zone in een relatief ondiep bodempakket kan worden aangelegd waardoor de kosten voor het aanleggen van de reactieve zone lager zijn dan wanneer die in een diep bodempakket zou moeten worden aangelegd.

Nadeel van deze methode is dat er een transportleiding aangelegd moet worden. Tweede nadeel is dat een schoon gebied ingericht zal worden als reactieve zone en mogelijk licht verontreinigd zal raken.

5.8 Meest kansrijke combinatieconcepten met een reactieve zone

In de bovenstaande paragrafen zijn verschillende hulpstoffen en verschillende manieren van het doseren van hulpstoffen besproken. In de onderstaande paragrafen worden de meest kansrijke combinaties van hulpstoffen en doseermethodes nader uitgewerkt.

5.8.1 Hulpstoffen toegediend in het WKO-infiltratiewater of vlakbij de WKO-infiltratiefilters

Uit het Meer met Bodemenergie literatuuronderzoek blijkt dat er in de praktijk nog geen ervaring is met het doseren van hulpstoffen aan het WKO-systeem of in het bodempakket nabij een WKO-systeem. Wel zijn er enkele projecten bekend waarin dosering van hulpstoffen als optie voor in de toekomst wordt gezien. In de 'Biowasmachine' in het centrum van Utrecht en bij 'Sanergy' te Eindhoven wordt het doseren van reducerende hulpstoffen genoemd als mogelijke optie indien de natuurlijke afbraak van VOCl op de locatie in onvoldoende mate optreedt. Over de wijze van dosering is in deze projecten niets bekend.

Op basis van de resultaten uit paragraaf 5.4.3, 5.5 en 5.7.2 kan een combinatieconcept worden ontworpen waar een WKO-systeem wordt gecombineerd met dosering van reducerende hulpstoffen in de WKO-infiltratieputten. Dit combinatieconcept kan toegepast worden bij zowel een nieuw als bestaand open WKO-systeem. Het concept is gebaseerd op het pulsgewijs ethanol of DHC-kweek toedienen aan de WKO-infiltratieputten.
Om putverstopping door ethanol te voorkomen dient bij een WKO-doubletsysteem de ethanol aan het begin van de infiltratieperiode van de betreffende WKO-put toegediend te worden. Bij een recirculatiesysteem kan het hele jaar pulsgewijs ethanol geïnfiltreerd worden, zolang de afstand tussen de infiltratie en onttrekkingsputten maar groot genoeg is om alle ethanol uit te laten reageren. In het geval van ethanol dosering zal in de onttekkingsputten een risico op putverstopping door sulfide neerslagen zijn. Om dit te voorkomen kan het toedienen van ethanol uitgesmeerd worden over een maximale periode van 20 tot 30 jaar (levensduur van een WKO-systeem). Indien toch putverstopping optreedt zal frequent mechanisch onderhoud of (kostbare) periodieke regeneratie van de putten met chloorbleekloog of peroxide de putverstopping teniet moeten doen. Ethanoldosering is in de praktijk reeds toegepast bij bodemsaneringen, het is nog nooit toegepast in combinatie met een WKO-systeem.
Bij het toedienen van DHC-kweek worden geen risico's op putverstopping verwacht. De kennis en techniek om dechlorerende bacteriën op te kweken bestaat en wordt reeds toegepast bij biologische in-situ saneringen. Het toepassen van dechlorerende bacteriën zonder koolstofbron in een WKO-systeem is in de praktijk nog niet toegepast.

5.8.2 Reducerende hulpstoffen toegediend op relatief grote afstand van de WKO-putten

Op basis van de resultaten uit paragraaf 5.4.4 en 5.7.3 kan een combinatieconcept worden ontworpen waarbij een WKO-systeem gecombineerd wordt met de dosering van een reducerende hulpstof op relatief grote afstand van de WKO-putten. Het creëren van een dergelijke reducerende zone kan het meest efficiënt worden aangelegd door het injecteren van chitine of het infiltreren van (geëmulgeerde) plantaardige olie.

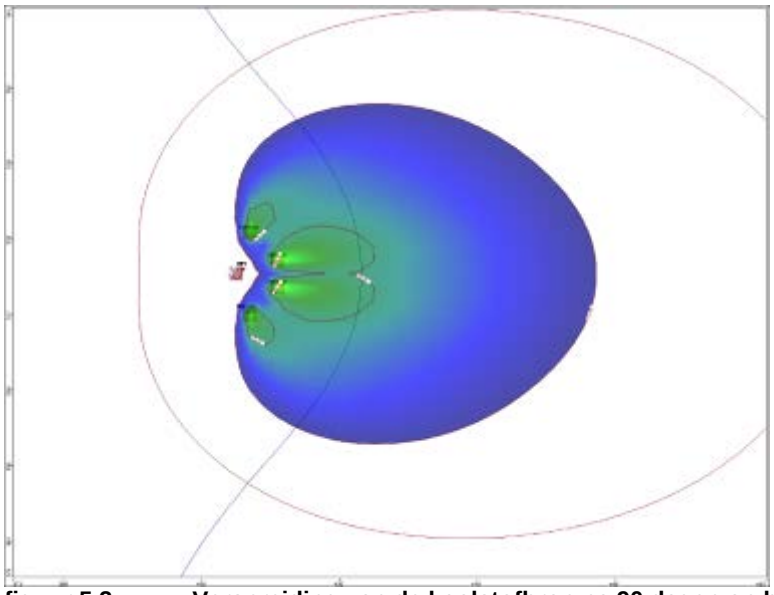
Doel is om de reactieve zone de verontreiniging wordt afgebroken maar dat de hulpstof in het beïnvloedde grondwater uitgereageerd is voordat het de WKO-onttrekkingsput bereikt en eventueel voor putverstopping kan zorgen. Bij open WKO-doublet- en recirculatiesysteem kan het putverstoppingsrisico mogelijk worden verkleind door de reactieve zone aan te leggen op een locatie waar het grondwater bijvoorbeeld minimaal een jaar onderweg is naar de onttrekkingsputten. Indien onverhoopt toch neerslagen in de WKO-putten ontstaan door bijvoorbeeld ijzersulfides kunnen de putten geregenereerd worden met een sterk zuur.

Een beperking van Chitine is dat het als slurrie alleen toegepast kan worden met behulp van directe injecties tot een diepte van maximaal 40 m-mv. Daarnaast is chitine nog slechts in beperkte mate in de praktijk gebruikt. (Geëmulgeerde) plantaardige olie kan toegepast worden middels infiltratie tot een grotere diepte (>100 m-mv). Bij het aanleggen van het actief scherm geldt dat hoe breder en dieper het scherm moet worden, hoe hoger de kosten zijn. Het toepassen van een actief scherm ligt daardoor het meest voor de hand in relatief ondiepe bodempakketten.

5.8.3 Reducerende hulpstoffen toegediend op een andere locatie dan de WKO-locatie

De combinatie van een WKO-systeem met transport van het meest verontreinigde grondwater naar een gestimuleerde natuurlijke afbraak zone is als één van de kansrijke combinatieconcepten naar voren gekomen in een afweging van combinatieconcepten die voor de locatie Kanaalzone te Apeldoorn is gemaakt (zie literatuurstudie Meer met Bodemenergie of Combinatie van bodemenergie en saneren in Apeldoorn, SKB project PT 8441, d.d. 24 december 2009).

Voor de locatie Kanaalzone te Apeldoorn is een voorontwerp gemaakt voor een combinatieconcept waar koolstofbron (reducerende hulpstof) wordt gedoseerd stroomafwaarts van de WKO-bronnen. Door de hoge grondwatersnelheid (50 m/jaar in het freatisch pakket en 180 m/jaar in het eerste watervoerende pakket) is gekozen voor een systeem met onttrekking en stroomafwaartse infiltratie. Om verstoppingsrisico's door het doseren van koolstofbron bij de infiltratieputten te voorkomen, zijn vier infiltratieputten direct stroomafwaarts van de WKO-infiltratieput geplaatst. De koolstofbron creëert stroomafwaarts een zone van 60 bij 40 meter waarin reductieve dechlorering van VOCl plaats kan vinden, zie figuur 5.2.



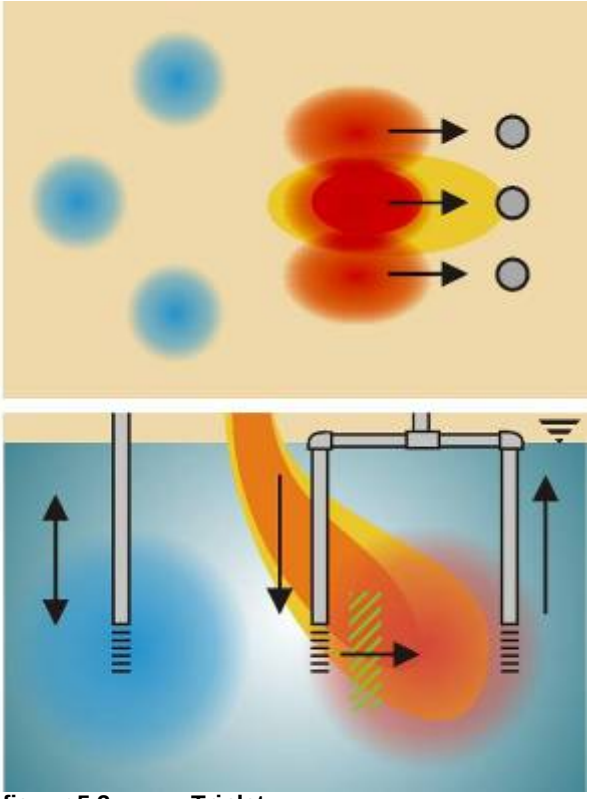
figuur 5.2 **Verspreiding van de koolstofbron na 90 dagen op basis van modellering – bovenaanzicht. Het blauwe gebied geeft een concentratie TOC (totaal organisch koolstof) aan die groter is dan 10 mg/l**

Door de hoge grondwaterstromingssnelheid komt de geïnfiltreerde koolstofbron niet in contact met de WKO filters en blijft een goede werking van het WKO-systeem gegarandeerd. Om het combinatieconcept op de locatie Kanaalzone bij een eventuele toepassing in de praktijk te controleren is in het voorontwerp al een aanzet gegeven tot een monitoringsprogramma. In dit monitoringsprogramma wordt de kwaliteit van het infiltratiewater, biomassa, koolstofbron en grondwater in de reactieve zone gecontroleerd en de putcapaciteit gemonitord.

5.8.4 Reducerende hulpstoffen toevoegen aan het 'Triplet'

Om door middel van het toedienen van hulpstoffen een sanerend effect te bereiken, is voor een effectieve behandeling van de grondwaterverontreiniging een gelijkmatige doorstroming van de verontreinigde zone wenselijk. Voor een klassieke warmte/koude-opslag, in de vorm van een monobron of van een doublet, waarbij warme en koude bellen ontstaan, is dit moeilijk te realiseren. Bij een recirculatiesysteem is een gelijkmatige doorstroming wel te realiseren maar is geen warme bel aanwezig die het energierendement verhoogd en de biologische afbraak extra kan stimuleren. Om in één systeem profijt te halen uit een gelijkmatige doorstroming en een warme bel is het triplet ontworpen.

Een triplet, zoals schematisch weergegeven in figuur 5.3, bestaat uit één (normale) gecombineerde infiltratie- en onttrekkingsbron en twee bronnen waarbij infiltratie- en onttrekking van grondwater is gescheiden. Om te kunnen profiteren van een hogere afbraaksnelheid door temperatuursverhoging ligt het voor de hand de warmtebron te kiezen voor de gesplitste bron. Zo worden, net zoals bij reguliere warmte- en koude -opslag, een koude en een warme zone gecreëerd, maar de warme reactieve zone wordt gelijkmatig doorstroomd zoals bij recirculatie.



figuur 5.3 Triplet

Bij het ontwerpen is het belangrijk dat de warme en de koude zones niet interfereren en dat verontreinigingen die in de koude bron worden geïnfiltreerd zich niet verspreiden. Ongewenste verspreiding zal meestal te voorkomen zijn door de koudebron stroomopwaarts van de warme reactieve zone te positioneren. Bij voldoende omvang kan de koudebron ook binnen de verontreinigingsvlek worden geplaatst.
Omdat een redelijk omvangrijke warme zone nodig is, gedacht moet worden aan een afstand tussen de infiltratie- en onttrekkingsfilters van enkele tientallen meters, zal bij WKO's met maar één of een paar bronnen door de grondwaterstroming relatief veel verlies van weggestroomde en niet meer terug te winnen warmte optreden. Bij een kleine WKO kan daarom een variant met juist een reactieve koudezone energetisch gunstiger zijn. Uiteraard staat daar tegenover dat de afbraak van verontreinigingen dan niet gunstig wordt beïnvloed door de temperatuur. Voor concrete situaties zal met modelberekeningen voor transport van warmte en koude en de afbraak van verontreinigingen moeten worden vastgesteld wat het optimale ontwerp is.

De reducerende hulpstof kan aan het systeem worden toegevoegd door de hulpstof bovengronds toe te voegen aan het WKO-infiltratiewater of de hulpstof te doseren in speciale aangelegde infiltratieputten nabij de WKO-putten, zie paragraaf 5.7.2.

Als in een gebied verschillende verontreinigingsvlekken aanwezig zijn, kan worden volstaan met één reactieve zone in bijvoorbeeld de grootste vlek waar het verontreinigde water uit de kleinere vlekken naar toe wordt getransporteerd.

Nadeel van dit systeem is dat een extra WKO-put geplaatst moeten worden en dat het energierendement de eerste jaren beperkt is omdat het langer – gedacht moet worden aan enkele jaren – duurt voordat de warmte weer wordt ontrokken; voor de koude geldt dat overigens niet. Een triplet is daarom vooral interessant als behandeling van de verontreiniging met hulpstoffen noodzakelijk wordt geacht. De extra kosten vallen onder het benodigde budget voor de sanering (inclusief beheersing). Dit systeem in nog niet in de praktijk toegepast.

5.8.5 Oxidatieve hulpstoffen toevoegen aan WKO-infiltratiewater (ondergronds beluchten)

Dichlooretheen (DCE) en vinylchloride (VC) kunnen aeroob worden afgebroken. Ook BTEX kan aeroob worden afgebroken. Omdat veel VOCl verontreinigingen in het diepe pakket voornamelijk uit DCE en VC bestaan is het mogelijk om de verontreiniging met een aerobe zone te verwijderen. Een aerobe zone kan gecreëerd worden door zuurstofrijk water in het WKO-systeem te infiltreren. Het infiltreren van zuurstofrijk water wordt al langer toegepast in de drinkwatersector ten behoeve van ondergrondse ijzerverwijdering.

Dit combinatieconcept is eenmaal in de praktijk uit nood toegepast op een WKO-systeem waar problemen waren met ijzeroxides. In dit systeem is zuurstof uit hogedruk gastanks toegevoegd aan een WKO-waterreservoir. Vanwege omstandigheden is dit combinatieconcept nooit goed draaiende geweest. Men was reeds van de ijzeroxide problemen af maar had vervolgens te kampen met mangaanoxides. Ook de mangaanoxide neerslagen zouden op den duur verdwijnen maar zoveel tijd had de opdrachtgever niet. Indien bewust gekozen wordt voor de combinatie tussen een WKO-systeem en een aerobe zone en voldoende tijd wordt geraamd, wordt verwacht dat dit combinatieconcept in de praktijk toepasbaar is.

Er zijn verschillende ondergrondse beluchtingssystemen op de markt. Een veel toegepast systeem is het Vyredox-systeem. In Nederland wordt het systeem op de markt gebracht onder de naam Fermanox. Met deze systemen wordt grondwater bovengronds ontlucht en vervolgens met zuurstof verzadigd. Vervolgens wordt het zuurstofrijke water geïnfiltreerd in de bron. Een alternatieve manier om het water van voldoende zuurstof te voorzien is ontwikkeld in de drinkwatersector. Deze aanpak bestaat uit het vullen van een groot reservoir dat in contact staat met de buitenlucht, nadat het water zuurstofrijk is geworden wordt het na een zandfilterstap geïnfiltreerd. Omdat voor deze methode een groot reservoir nodig is kan deze techniek waarschijnlijk niet toegepast worden in sterk bebouwd gebied.

Eenmaal in de bodem reageert het zuurstof met onder andere ijzer en mangaan tot ijzer en mangaanoxides die in de bodem neerslaan. In deze aerobe zone is ook de afbraak van DCE, VC en BTEX mogelijk. Bij zuurstofconcentraties van enkele milligrammen per liter zal de afbraak van DCE en VC relatief snel verlopen, bij zeer lage zuurstofconcentraties tot 0,3 mg/l is micro-aerofiele afbraak mogelijk. Deze verloopt in de regel zeer langzaam. Na het infiltreren van zuurstofrijk water kan weer een periode grondwater onttrokken worden uit dezelfde put ten behoeve van het WKO-systeem. De verhouding te infiltreren water ten opzichte van het te onttrekken water is sterk afhankelijk van de kwaliteit van het grondwater. Bij grondwaterpakketten met beperkte concentraties aan componenten die met zuurstof reageren, zoals methaan, ammonium en ijzer, kunnen verhoudingen van 1 op 3 tot 1 op 100 worden gehaald (Technische commissie bodembescherming, Advies ondergrondsbeluchten, d.d. 12 november 1997). Hoe hoger de concentraties aan componenten die met zuurstof reageren, hoe ongunstiger de verhouding wordt. Het systeem wordt als niet toepasbaar geacht indien de methaan en ammonium concentraties in het grondwater respectievelijk boven de 5 en 3 mg/l uitkomen (bron: persoonlijk contact met Flierman Techniek).

Uit onderzoek is gebleken dat mangaan oxidatie niet meer plaatsvindt bij een temperatuur lager dan 8°C. Bij temperaturen lager dan 8°C is het mogelijk dat mangaan het WKO-systeem instroomt en voor verstopping kan zorgen. Het ondergrondsbeluchting is daardoor alleen toepasbaar bij WKO-doubletsystemen waarbij de koude bron niet kouder wordt dan 8°C. Ondergronds beluchten bij recirculatiesystemen is mogelijk als het onttrokken water niet kouder is dan 8°C. Aangezien het grondwater in Nederland over het algemeen een temperatuur van 10°C heeft worden bij recirculatiesystemen geen problemen verwacht met mangaanverstopping (Bron: persoonlijk contact met Flierman techniek).

Vanwege het in de bodem neerslaan van ijzer en mangaan bevat het opgepompte water geen ijzer en mangaan en vindt geen putverstopping door ijzer of mangaanoxides plaats. In het rapport Advies Ondergrondsbeluchten wordt gesproken van een vermindering van het porievolume door neerslagvorming van 0,5% per jaar. In 25 tot 50 jaar neemt het porie volume mogelijk af van 33% naar 25% (Technische commissie bodembescherming, Advies ondergrondsbeluchten, d.d. 12 november 1997). Indien rekening wordt gehouden met de afname van het porie volume tijdens de dimensionering van het WKO-systeem zijn er geen verstoppingsproblemen te verwachten. Een langdurige probleemloze werking van het systeem moet mogelijk zijn aangezien ondergrondse ontijzeringssystemen in de drinkwatersector en de Fermanox-systemen ook jarenlang zonder problemen blijven functioneren.

Dit combinatieconcept is het enige concept waar een aerobe zone wordt gecreëerd. Dit heeft als voordeel dat naast DCE, VC en BTEX mogelijk ook andere oxideerbare verontreinigingen verwijderd kunnen worden. Tevens is dit, naast het gesloten WKO-systeem, de enige techniek waarmee een WKO-systeem in een aeroob bodempakket of bodempakket met wisselende redoxcondities kan worden bedreven.

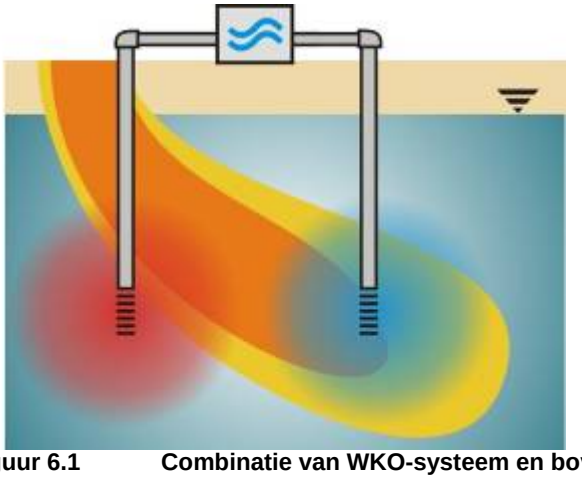
Nadeel van het combinatieconcept is dat het nog niet succesvol in de praktijk is toegepast, er is dus nog geen ervaring mee. Tweede nadeel is dat er in de bodem in de loop van de tijd ijzer-, mangaan- en arseenneerslagen ophopen in de ondergrond. Vanuit milieukundig oogpunt kan dit ongewenst zijn.

6 WKO en bovengrondse verwijdering van de verontreiniging

De combinatie tussen WKO en een bovengrondse verwijdering is een systeem waarbij de verontreiniging in het grondwater van het WKO-systeem bovengronds verwijderd. In de onderstaande paragrafen worden twee varianten besproken: bovengronds zuiveren en herinfiltreren en bovengronds zuiveren en lozen.

6.1 Combinatie WKO met bovengronds zuiveren en herinfiltratie

Bij een combinatie tussen een WKO-systeem en een bovengronds zuiveringsysteem wordt een deelstroom van het WKO-systeem door een zuiveringsinstallatie geleidt. Nadat het water is gezuiverd wordt het water weer geïnfiltreerd, zie figuur 6.1.



figuur 6.1 Combinatie van WKO-systeem en bovengronds zuiveren en herinfiltratie

Om de risico's op putverstopping, als gevolg van redoxveranderingen, te vermijden dient de zuivering te voldoen aan de volgende voorwaarden:

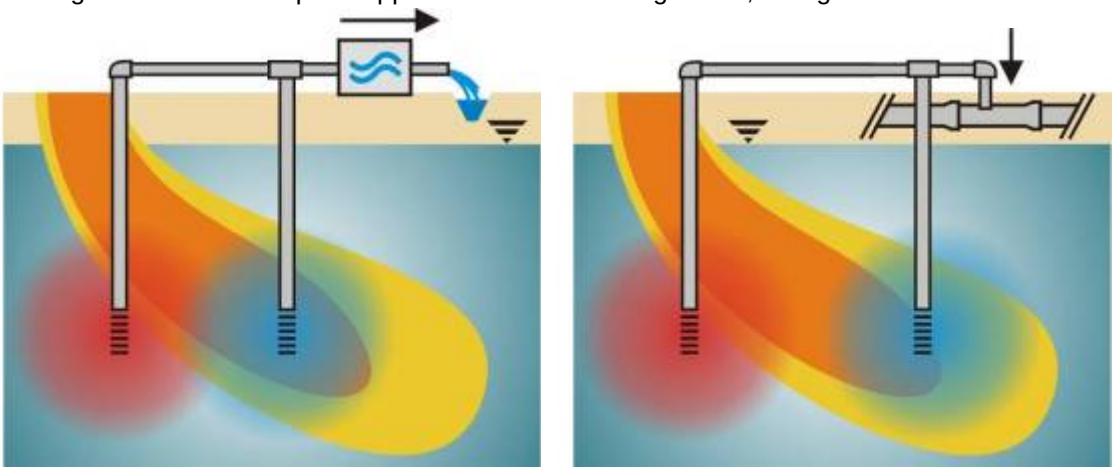
- De zuivering moet luchtdicht zijn en de zuivering moet anaeroob worden bedreven. Zuurstofindringing leidt tot risico's op vorming van neerslagen en biomassa (slijm).
- De zuivering moet onder relatief hoge druk opereren omdat anders ontgassing plaats kan vinden. De infiltratiefilters kunnen verstopt raken indien grondwater met gasbelletjes wordt geïnfiltreerd.
- De zuivering mag geen neerslagen of zwevende delen produceren.
- De zuivering hoeft niet het gehele debiet van het WKO-systeem aan te kunnen maar zou wel enkele kubieke meters grondwater per uur moeten kunnen zuiveren om ingezet te kunnen worden als beheersvariant.

Een standaard zuiveringsysteem zoals een striptoren is niet geschikt omdat het niet onder druk bedreven kan worden en omdat het grondwater in contact komt met zuurstof.

Een zuiveringstechniek die mogelijk wel aan deze voorwaarden voldoet is het gebruik van strippen met een inert gas of vacuümstrippen. Het gestripte gas wordt vervolgens over een actiefkoolfilter geleid. Nadeel van deze techniek is dat actiefkool maar een verperkte capaciteit heeft om VOCl te binden. Om gedurende een lange periode dit zuiveringssysteem in stand te houden zijn relatief hoge kosten verbonden aan de dagelijkse energiekosten en aan de kosten voor het verversen van het actiefkool.

6.2 Combinatie WKO met bovengrondse zuivering en lozing van het water

Een WKO-systeem kan gecombineerd worden met een sanering door netto grondwater uit het WKO-systeem te onttrekken en dit grondwater vervolgens te zuiveren en te lozen. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen een systeem waarbij het grondwater wordt geloosd op het riool en een systeem met een zuiveringssysteem op de locatie en waarvan het gezuiverde water op het oppervlakte water wordt geloosd, zie figuur 6.2.



figuur 6.2 Combinatie WKO-systeem en bovengrondse zuivering van een deelstroom

Een voordeel ten opzichte van het combinatieconcept waarbij het gezuiverde water weer wordt geïnfiltreerd is dat er geen putverstopping op kan treden door neerslag vorming als gevolg van opmenging van grondwater met verschillende kwaliteit. Tweede voordeel is dat het netto onttrekken van grondwater een beheersend effect heeft. Door de WKO putten in of om een verontreiniging te plaatsen is het in theorie mogelijk om de omvang van de verontreiniging te beheersen of zelfs te verkleinen.

Nadeel van het combinatieconcept waarbij zuivering en lozing op oppervlaktewater wordt toegepast zijn de kosten die gemaakt worden voor het in stand houden van een bovengrondse zuivering. Indien grondwater met een VOCl-verontreiniging wordt opgepompt is over de lange termijn een striptoren in combinatie met een zandfilter en luchtfilter de meest voor de hand liggende techniek. Indien grondwater verontreinigd is met BTEX dient voor een lange periode waarschijnlijk een biologische zuiveringsreactor in stand gehouden worden.

Het lozen van een aanzienlijke hoeveelheid grondwater kan zowel voordelen als nadelen hebben. Het grondwater kan bijvoorbeeld goed gebruikt worden om de waterhuishouding van natuurgebieden te verbeteren of het kan gebruikt worden als proceswater. Nadeel kan de kwaliteit van het opgepompte grondwater zijn. Grondwater met veel opgelost ijzer dient voordat het bijvoorbeeld op het riool of op het oppervlaktewater wordt geloosd ontijzerd te worden. Dit brengt extra kosten met zich mee.

In verscheidende projecten in Nederland (Spoorzone Woerden, Spoorzone Tilburg, Kanaalzone Apeldoorn, en StrijpS Eindhoven, zie literatuurstudie Meer met Bodemenergie) is de combinatie WKO en bovengrondse zuivering genoemd als mogelijk kosteneffectieve combinatievariant.

In Nederland is op de locatie Parelhoender te Apeldoorn een zuiveringssysteem in praktijk gebracht. In dit systeem wordt ongeveer 40 m^3/u grondwater opgepompt en met behulp van een zandfilter en een striptoren gezuiverd. Na de zuivering wordt het water door de warmtewisselaar geleid waar energie uit het grondwater wordt gehaald voor de verwarming en koeling van huizen. Uiteindelijk wordt al het grondwater geloosd op het oppervlaktewater met als doel om de waterhuishouding van de gemeente Apeldoorn te verbeteren. Omdat in het grondwater veel ijzer zit wordt voor de lozing het grondwater ontijzerd.

Een dergelijk combinatieconcept is ook uitgewerkt voor de locatie Kanaalzone te Apeldoorn (Combinatie van bodemenergie en saneren in Apeldoorn, SKB project PT 8441, d.d. 24 december 2009).

In plaats van het ter plaatse zuiveren van het onttrokken verontreinigde grondwater uit het WKO-systeem kan het grondwater ook geloosd worden op het riool. Via het riool wordt het water vervoerd naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie waar de verontreiniging wordt afgebroken.

In de gemeente Zwolle heeft dit idee in 2005 een prijsvraag gewonnen (Prijsvraag grondwater Zwolle, 11 oktober 2005). De extra watertoevoer naar de RWZI werd in dit idee gecompenseerd door een deel van het regenwater van de stad Zwolle van het riool af te koppelen. Door het afkoppelen zou er genoeg capaciteit in de RWZI's ontstaan om het verontreinigd grondwater te kunnen verwerken.

7 Overzicht meest kansrijke combinatie-concepten

In tabel 7.2 is een overzicht gemaakt van de combinatieconcepten die het meest kansrijk worden geacht. In de tabel zijn het WKO-rendement, saneringsrendement en de mogelijke toepassingsgebieden van het combinatieconcept weergegeven. Op basis van deze tabel kan een eerste indruk gekregen worden welke mogelijkheden de combinatieconcepten bieden. De tabel biedt echter geen kant-en-klare oplossing voor specifieke locaties. Iedere locatie is uniek waardoor ook specifieke eisen aan het combinatieconcept gesteld worden. Bij het selecteren van een combinatieconcept voor een specifieke locatie kunnen de beschreven combinatieconcepten wel als uitgangspunt dienen bij een locatie specifieke afweging.

Voor de overzichtelijkheid is ervoor gekozen om in tabel 7.2, tabel 7.3 en tabel 7.4 geen onderscheid te maken tussen WKO-doubletsystemen, WKO-recirculatiesystemen en het WKO-triplet. Een onderscheid dat betrekking heeft op het energierendement en de toepasbaarheid van verschillende saneringstechnieken is daardoor niet zichtbaar. In tabel 7.1 is dit onderscheid voor de volledigheid weergegeven.

Over het algemeen geldt dat een WKO-doubletsysteem een hoger energierendement heeft dan een WKO-recirculatiesysteem. Het WKO-triplet ligt qua energierendement hier tussenin.

Het WKO-recirculatiesysteem is naar verwachting beter dan een WKO-doubletsysteem te combineren met saneringstechnieken die gebaseerd zijn op beheersing, natuurlijke afbraak, het toevoegen van hulpstoffen om de natuurlijke afbraak te stimuleren of bovengronds zuiveren met herinfiltratie. De reden hiervoor is dat voor het merendeel van de locaties een WKO-recirculatiesysteem vanuit geohydrologisch oogpunt geschikter is om een verontreiniging te beheersen (zie hoofdstuk 3). Het beheersen van de verontreiniging betekent dat de verontreiniging zich minder snel verspreidt waardoor er meer tijd beschikbaar is voor natuurlijke afbraak of bovengrondse zuivering met herinfiltratie. Een WKO-recirculatiesysteem maakt het, in tegenstelling tot een WKO-doubletsysteem, mogelijk om een redelijk voorspelbare gelijkmatige doorstroming te realiseren. Een gelijkmatige doorstroming is te prefereren bij een saneringsontwerp waarbij hulpstoffen aan de ondergrond worden toegevoegd. Het WKO-triplet ligt qua toepassingsmogelijkheden met saneringstechnieken naar verwachting tussen het WKO-recirculatiesysteem en het WKO-doubletsysteem in.

Indien een combinatieconcept met bovengrondse zuivering wordt overwogen (beheersing door het netto onttrekken van grondwater) is het ontwerp van het WKO-systeem minder relevant. In dat geval ligt het meest voor de hand om deze saneringstechniek te combineren met het WKO-systeem met de hoogste energieopbrengst: het WKO-doubletsysteem.

tabel 7.1 Energierendement en toepasbaarheid van saneringstechnieken per WKO-systeem

Type WKO-systeem	Energierendement	Toepasbaarheid van saneringstechnieken gebaseerd op beheersing, natuurlijke afbraak, toevoegen van hulpstoffen en bovengronds zuiveren en herinfiltreren
WKO-doubletsysteem	Hoog	Middel (hoog, bij bovengronds zuiveren en lozen)
WKO-triplet (zie § 5.8.4)	Hoog/middel	Hoog/middel
WKO-recirculatiesysteem	Middel	Hoog

tabel 7.2 Overzicht meest kansrijke combinatieconcepten

combinatie-concept	WKO-rende-ment	sanerings-rendement	toepassingsmogelijkheid
WKO en beheer-sing (zonder na-tuurlijke afbraak)	Hoog	Zeer laag, de verontreiniging wordt beheerst waardoor verspreidings-risico´s worden vermin-derd.	Dit concept is toepasbaar op locaties waar volledige verwijdering van de verontrei-niging op korte termijn niet noodzakelijk is en afremming van de verspreiding van de verontreiniging gewenst is. Een combinatie met natuurlijke afbraak ligt voor de hand, de natuurlijke afbraak compenseert mogelijk voor de beperkte verspreiding.
WKO en natuurlij-ke afbraak in een open WKO-systeem	Hoog	Laag, natuurlijke afbraak is over het algemeen een lang-zaam proces. Zonder beheersmaatregelen zal er waarschijnlijk versprei-ding van de verontreiniging optreden.	Dit concept is toepasbaar op locaties waar een lange periode beschikbaar is waar-op de verontreiniging afgebroken kan worden en beperkte verspreiding van de verontreiniging geaccepteerd wordt om uiteindelijk een stabiele eindsituatie te be-reiken. Een combinatie met beheersing ligt voor de hand om de verspreiding verder te beperken.
WKO en natuurlij-ke afbraak in een gesloten WKO-systeem	Hoog, energie opbrengst is echter klein	Laag, natuurlijke afbraak is over het algemeen een lang-zaam proces. Zonder beheersmaatregelen zal er waarschijnlijk versprei-ding van de verontreiniging optreden.	Dit concept is toepasbaar op locaties waar maar een beperkte energievraag (aan koude) is en natuurlijke afbraak al optreedt. Er dient een lange periode beschikbaar te zijn waarop de verontreiniging door warmte gestimuleerd kan worden en beperk-te verspreiding van de verontreiniging dient geaccepteerd te worden om uiteindelijk een stabiele eindsituatie te bereiken.
WKO in combina-tie met warmte transport	Hoog	Laag, natuurlijke afbraak is over het algemeen een lang-zaam proces. Zonder beheersmaatregelen zal er waarschijnlijk versprei-ding van de verontreiniging optreden.	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar het WKO-systeem en de verontrei-nigde locatie (waar al natuurlijke afbraak optreedt) op enige afstand van elkaar gesitueerd zijn. Er dient een lange periode beschikbaar te zijn waarop de natuurlijke afbraak van de verontreiniging door de warmte gestimuleerd kan worden en be-perkte verspreiding van de verontreiniging dient geaccepteerd te worden om uitein-delijk een stabiele eindsituatie te bereiken.

tabel 7.3 Overzicht meest kansrijke combinatieconcepten

combinatie-concept	WKO-rende-ment	sanerings-rendement	toepassingsmogelijkheid
WKO met trans-port naar natuurlij-ke afbraak zone	Hoog	Laag, natuurlijke afbraak is over het algemeen een lang-zaam proces.	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar in de buurt van de verontreiniging een zone aanwezig is waar van nature afbraak optreedt. In het geval van VOCl kan dit een organisch stof rijke bodemlaag zijn. In het geval van BTEX kan dit bijvoorbeeld een sulfaatrijke bodemlaag zijn. Verspreiding van de verontreiniging naar een nog niet verontreinigd gebied dient mogelijk te zijn.
WKO met reactie-ve zone rondom de WKO-infiltratiefilters	Hoog	Hoog (alleen VOCl)	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar volledige verwijdering van de VOCl verontreiniging gewenst is. Ethanol of dechlorerende bacteriën kunnen in de WKO-putten of nabij de WKO-putten toegediend te worden. Dechlorerende bacteriën ver-oorzaken hoogstwaarschijnlijk geen putverstopping. Om putverstopping als gevolg van ethanol dosering te voorkomen dient een weloverwogen toedieningsschema gehanteerd te worden.
WKO met reduc-tieve zone op grote afstand van de WKO-filters	Hoog	Hoog (alleen VOCl)	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar volledige verwijdering van de VOCl verontreiniging gewenst is. Om putverstopping te voorkomen worden de hulpstoffen zoals (Geëmulgeerde) plantaardige olie en chitine op grote afstand van de WKO-putten toegediend. Vanwege de kosten om een dergelijke zone op grote diepte aan te leggen ligt het voor de hand om relatief ondiepe verontreinigingen op deze wijze te saneren.
WKO en aerobe zone	Hoog	Hoog (alleen voor BTEX, CIS en VC, niet voor PER en TRI)	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar volledige verwijdering van BTEX, CIS, VC of andere oxideerbare verontreinigingen gewenst is. Installatie van het WKO-systeem in zuurstofrijke lagen is, in tegenstelling tot alle andere combinatieconcep-ten, geen probleem. De locatie mag op de diepte van het WKO-systeem geen veen-lagen bevatten in verband met ongewenst zetting door oxidatie.

tabel 7.4 Overzicht meest kansrijke combinatieconcepten

combinatie-concept	WKO-rende-ment	sanerings-rendement	toepassingsmogelijkheid
WKO met trans-port naar gestimu-leerde afbraak zone	Hoog	Middel, bij onttrekking blijft er vrijwel altijd een restveront-reiniging achter	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar volledige beheersing van de veront-reiniging gewenst. Om de beheersing te bereiken is het toedienen van hulpstoffen nabij het WKO-systeem niet gewenst. In de buurt van het WKO-systeem dient een gebied aanwezig te zijn waar een gestimuleerde afbraak zone aangelegd kan wor-den of al aanwezig is in verband met de sanering van een andere verontreiniging.
WKO en boven-gronds zuiveren en herinfiltreren	Hoog	Middel, met onttrekking blijft er vrijwel altijd een restveront-reiniging achter	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar volledige beheersing van de veront-reiniging gewenst is. Bovengronds is er geen mogelijkheid of behoefte om het opge-pompte grondwater te gebruiken. Het grondwater wordt bovengronds gereinigd en weer geherinfiltreerd.
WKO en boven-gronds zuiveren en lozen (van een deelstroom)	Hoog	Middel, met onttrekking blijft er vrijwel altijd een restveront-reiniging achter	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar volledige beheersing van de veront-reiniging gewenst is. Bovengronds is er een goede mogelijkheid om het opgepompte grondwater te gebruiken in de vorm van proceswater of om de waterhuishouding van een gebied positief te beïnvloeden.
WKO en lozen op riool (van een deelstroom)	Hoog	Middel, met onttrekking blijft er vrijwel altijd een restveront-reiniging achter	Dit concept is toepasbaar op een locatie waar volledige beheersing van de veront-reiniging gewenst is en waar natuurlijke afbraak onvoldoende is om deze beheersing te bereiken. De plaatselijke rioolwaterzuiveringsinstallatie heeft capaciteit over (door bijvoorbeeld afkoppeling van hemelwaterafvoer) waardoor een deelstroom van het verontreinigde water uit het WKO-systeem op het riool geloosd kan worden.

8 Kostenraming combinatieconcepten voor een specifieke locatie

In de bovenstaande hoofdstukken zijn de voordelen, nadelen en toepassingsmogelijkheden van de verschillende combinatieconcepten gegeven. Om een goede afweging te kunnen maken, dienen ook de kosten van de combinatieconcepten bekend te zijn. De kosten van de verschillende combinatieconcepten zijn echter in hoge mate afhankelijk van locatiespecifieke eigenschappen. Om toch een indruk te krijgen van de kosten van de verschillende combinatieconcepten zijn deze in dit hoofdstuk voor de verschillende combinatieconcepten geraamd voor een hypothetische case.

Om het nut van deze kostenafweging zo hoog mogelijk te maken, is bij het selecteren van de hypothetische case getracht een situatie te schetsen die zoveel mogelijk overeenkomsten vertoont met locaties zoals Paleiskwartier te Den Bosch, Evenblij te Hoogeveen, Grote Oever te Meppel, Ridsterrein te Haarlem, Utrecht-Centrum, StrijpS te Eindhoven, Kanaaloever te Apeldoorn, Parelhoender te Apeldoorn, Stationsgebied te Woerden en IJsbaan te Hoogezand-Sappemeer en met eventueel toekomstige locaties waar een combinatieconcept een optie zou kunnen zijn.

Doel van de kostenraming is om een globale indruk te krijgen van de financiële haalbaarheid van de verschillende combinatieconcepten. Vanwege het globale karakter en de grote invloed van locatiespecifieke factoren op de kosten kan deze kostenraming niet gebruikt worden om een combinatieconcepten-afweging te maken voor specifieke locaties.

Voor de kostenramingen zijn offertes aangevraagd bij verschillende partijen en zijn aannamen gedaan op basis van praktijkervaringen van IF Technology en Bioclear.

8.1 Hypothetische case

De WKO-systemen die in de kostenraming worden gebruikt, zijn standaard uitvoeringen van een WKO-doubletsysteem en een WKO-recirculatiesysteem. Tevens is een nieuw type WKO-systeem opgenomen, het WKO-triplet. Uitgegaan is van een sluitende energiebalans. In de praktijk is er bij woonhuizen vaak netto meer warmtevraag en bij kantoren en industrie netto meer koudevraag; het corrigeren voor deze eventuele onbalans door extra verwarmings- of koelcapaciteit is niet in de berekening opgenomen.

Er is gekozen voor de meest voorkomende verontreiniging in de diepe bodempakketten: VOCl. Tevens is gekozen voor een locatie waar twee watervoerende pakketten aanwezig zijn, één relatief ondiep watervoerende laag waar de grootste verontreinigingsvracht aanwezig is en onder de scheidende laag het tweede watervoerende pakket waar een meer diffuse verontreiniging aanwezig is. De eigenschappen van de hypothetische locatie zijn weergegeven in bijlage 8.

8.2 Kostenramingen voor de hypothetische case

8.2.1 Referentie kostenramingen voor de bodemsanering

Om een referentiekader voor de kosten van de combinatieconcepten te schetsen, zijn berekeningen uitgevoerd op referentiesituaties.

De meest geschikte bodemsaneringstechniek om de verontreiniging op de hypothetische locatie zowel in het 1^{e} als 2^{e} watervoerend pakket binnen korte tijd volledig te saneren is gestimuleerde biologische afbraak. Er is voor deze techniek gekozen omdat het een bewezen kosteneffectieve saneringsmethode is voor diffuse VOCl verontreinigingen van tientallen tot maximaal enkele honderden meters in lengte in goed doorlatende bodempakketten. Met deze saneringstechniek is op basis van ervaringen van Bioclear een saneringsrendement van 99% te behalen. Diffuse verontreinigingen grote dan enkele honderden meters in omvang worden vanwege de kosten meestal niet verwijderd maar beheerst.
Voor de beheersvariant is uitgegaan van een pump&treat installatie voor zowel het eerste als tweede watervoerend pakket. Pump&treat is een bewezen saneringstechniek om een verontreiniging te beheersen of deels te verwijderen. Praktijkervaring leert dat pump&treat in veel gevallen eeuwigdurend is omdat vaak een grote restverontreiniging achterblijft.
Indien voldoende natuurlijke afbraak op zou treden, kan hiermee beheersing en op lange termijn verwijdering van de verontreiniging worden gerealiseerd. Door in te zetten op de monitoring van natuurlijke afbraak is een minimale saneringsinspanning noodzakelijk die bestaat uit het aanleggen van een monitoringsnetwerk en het uitvoeren van monitoringen. Met het uitvoeren van een sanering gebaseerd op monitoring van natuurlijke afbraak is de vrachtreductie over meerdere jaren zeer gering en doordat in de meeste watervoerende pakketten de condities voor natuurlijk afbraak van vooral chloorkoolwaterstoffen niet optimaal zijn, zal de verontreinigingsomvang op de hypothetische locatie waarschijnlijk toenemen. De kosten van de referentievarianten zijn in tabel 8.1 weergegeven. De kostenberekeningen zijn bijgevoegd in bijlage 9.

8.2.2 Kostenramingen voor de combinatieconcepten

Op basis van de hypothetische case zijn de verschillende combinatieconcepten uitgewerkt en op kosten gezet. Om de kosten te ramen zijn verschillende aannamen gedaan. Zowel de kostenberekeningen als de aannamen zijn bijgevoegd in bijlage 9. De meest belangrijke aannamen zijn:

- De combinatieconcepten die gebaseerd zijn op natuurlijke afbraak laten een grote restverontreiniging achter. De natuurlijke afbraak is een traag proces dat verspreiding op de hypothetische locatie niet kan voorkomen, de afbraak is mogelijk wel voldoende om op termijn een stabiele eindsituatie te bereiken.
- In de combinatieconcepten waarbij een actieve in-situ saneringstechniek wordt gebruikt, wordt de verontreiniging in het 2^{e} watervoerend pakket volledig verwijderd met het combinatieconcept. De verontreiniging in het 1^{e} watervoerend pakket, dat te ondiep is voor een efficiënt WKO-systeem, wordt gesaneerd door middel van een standaard biologische sanering.
- In de combinatieconcepten die gebruik maken van beheersing door middel van grondwateronttrekking en bovengrondse zuivering wordt de verontreinigingsomvang in zowel het eerste als tweede watervoerend pakket beheerst. Een groot deel van de verontreiniging wordt verwijderd, er blijft echter wel een restverontreiniging achter.

Vanwege de eigenschappen van de hypothetische case ligt het toepassen van de combinatieconcepten ‘Transport van warmte of verontreinigd grondwater naar een andere locatie’ en ‘stimulatie van natuurlijke afbraak door een gesloten WKO-systeem’ niet voor de hand, deze combinatieconcepten zijn daarom niet opgenomen in tabel 8.1. Op basis van de gegevens die in bijlage 9 zijn opgenomen kunnen de kosten voor deze varianten eventueel wel voor een specifieke locaties berekend worden.

tabel 8.1 Overzicht van kostenramingen voor een hypothetische case

referentie/ combinatieconcept	totale kosten sanering	terug-verdientijd WKO-doublet incl. sanerings-kosten	terug-verdientijd WKO-recirculatie incl. sanerings-kosten	terug-verdientijd WKO-triplet incl. sanerings-kosten
standaard WKO-systeem	N.v.t.	1,3 jaar *	3,4 jaar *	2,2 jaar *
Monitoring natuurlijke afbraak	€ 340.000,-	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Beheersing door pump&treat	€ 870.000,-	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Volledige verwijdering door biologische bo-demsanering	€ 1.300.000,-	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
WKO en monitoring natuurlijke afbraak	€ 340.000,-	1,8 jaar	4,0 jaar	2,8 jaar
WKO en infiltratie DHC-kweek	€ 730.000	6,0 jaar	8,7 jaar	7,2 jaar
WKO en infiltratie etha-nol in de WKO-put	€ 784.000	6,8 jaar	9,5 jaar	8,0 jaar
WKO en infiltratie etha-nol in infiltratie putten	€ 824.000	7,1 jaar	9,9 jaar	8,4 jaar
WKO en reactief ENNA scherm	€ 836.000	7,4 jaar	10,2 jaar	8,7 jaar
WKO en aeroob scherm	€ 730.000	6,0 jaar	8,7 jaar	7,2 jaar
WKO en bovengronds zuiveren en herinfiltre-ren	€ 980.000	3,9 jaar	6,6 jaar	5,1 jaar
WKO en bovengronds zuiveren en lozen	€ 830.000	3,7 jaar	6,3 jaar	4,8 jaar
WKO en lozen op riool	€ 825.640 **	2,4 jaar	5,2 jaar	3,7 jaar

*** : De terugverdientijd van de WKO-systemen zijn relatief kort. Dit komt doordat de locatie eigenschappen gunstig zijn en uit is gegaan van een WKO-systeem dat optimaal draait. In de praktijk blijken vaak langere terugverdientijden gehaald te worden van gemiddeld 5 jaar.**
**** : Exclusief kosten voor hemelwaterafkoppeling à ca. € 7 miljoen.**

Op basis van tabel 8.1 blijkt dat de kosten van de natuurlijke afbraak en beheersconcepten het laagst zijn. De concepten die uitgaan van bovengronds zuivering van grondwater en de concepten waarbij de verontreiniging volledig wordt verwijderd zijn het duurst. Daartegenover staat dat deze concepten wel voor het grootste saneringsrendement zorgen.

Indien de verontreiniging in het 2^{e} watervoerend pakket (20-50 m-mv) geen kwetsbare objecten bedreigd en zich mag verspreiden in het kader van bijvoorbeeld gebiedgericht grondwaterbeheer kan gekozen worden voor de goedkoopste (eeuwigdurende) combinatieconcepten die gebruik maken van beheersing of natuurlijke afbraak.

Indien verspreiding van de verontreiniging in het 2e watervoerend pakket ongewenst is maar het verwijderen van de volledige verontreiniging niet noodzakelijk/mogelijk wordt geacht kan gedacht worden aan het bovengronds zuiveren (van een deelstroom) van het verontreinigde WKO-water. De saneringskosten van de combinatieconcepten met bovengrondse zuivering zijn lager dan die van pump&treat omdat er geen extra onttrekkingsputten geplaatst hoeven te worden. Een Bovengrondse zuivering zal eeuwig in stand gehouden moeten worden. Het eeuwig in stand houden van een onttrekking brengt dermate hoge kosten met zich mee dat een volledige verwijdering van de verontreiniging goedkoper is. Indien de duur van de bovengrondse zuivering of het debiet van de onttrekking verlaagd kunnen worden zullen de kosten voor bovengronds zuiveren ook dalen. Indien volledige verwijdering van de verontreiniging in het 2e watervoerend pakket gewenst dan/wel noodzakelijk is zijn verschillende combinatieconcepten op de hypothetische locatie goedkoper dan een afzonderlijke sanering. Het meest kosteneffectieve combinatieconcept is het toevoegen van DHC-kweek aan het WKO-infiltratiewater en het creëren van een aerobe zone. Voordat deze combinatieconcepten toegepast kunnen worden zal aanvullend onderzoek uitgevoerd dienen te worden. Voor het concept met een aerobe zone zullen de kansen en beperkingen nader bekeken moeten worden. Voor het toevoegen van een DHC-kweek zal een DHC-kweekreactor ontworpen moeten worden die groot genoeg is om voldoende dechlorerende biomassa te verkrijgen. In principe heeft het toevoegen van DHC-kweek alle elementen in zich voor een kosteneffectief combinatieconcept: geen dreiging voor verstopping van de WKO putten, een hoog verwijderingsrendement van de verontreiniging en een relatief eenvoudig systeem dat tegen acceptabele kosten gerealiseerd kan worden.

Voor het verwijderen van de verontreiniging in het 1e watervoerend pakket (0-18 m-mv) is geen combinatieconcept gevonden dat de sanering aanzienlijk goedkoper zal maken. Omdat in dit watervoerend pakket geen WKO-putten staan zullen alle saneringsactiviteiten die ondernomen worden grotendeels dezelfde kosten hebben als een aparte sanering. Het aanleggen van een gesloten bodemwarmtewisselaarsysteem om het 1e watervoerende pakket te verwarmen en de natuurlijke afbraak te stimuleren wordt niet kosteneffectief geacht.

9 Conclusies en aanbevelingen

De conclusies die uit het onderliggende onderzoek getrokken kunnen worden zijn hieronder, onderverdeeld in de onderzoeksvragen, weergegeven.

9.1 Conclusies

1. Welke bestaande saneringstechnieken kunnen in combinatie met bodemenergie gebruikt worden?

Uit het onderzoek blijkt dat er meerdere saneringstechnieken gecombineerd kunnen worden met een WKO-systeem. De meest kansrijke combinatieconcepten zijn:
- WKO en beheersing
- WKO en natuurlijke afbraak in een open WKO-systeem
- WKO en natuurlijke afbraak in een gesloten WKO-systeem
- WKO in combinatie met warmtetransport
- WKO met transport naar natuurlijke afbraak zone
- WKO met reactieve zone met dechlorerende bacteriën of ethanol rondom de WKO-infiltratiefilters
- WKO met reductieve zone van chitine of (geëmulgeerde) plantaardige olie op grote afstand van de WKO-filters
- WKO en een aerobe zone
- WKO met transport naar gestimuleerde afbraak zone
- WKO en bovengronds zuiveren en herinfiltreren
- WKO en bovengronds zuiveren en lozen (van een deelstroom)
- WKO en lozen op riool (van een deelstroom)

Ieder combinatieconcept heeft verschillende voor- en nadelen waardoor er niet één meest kansrijk combinatieconcept aan te wijzen is. Om het meest geschikte combinatieconcept voor een specifieke locatie te vinden zal daarom een afweging gemaakt moeten worden tussen de verschillende bovengenoemde combinatieconcepten. Vervolgens zal moeten blijken of het combinatieconcept voordeliger is dan het apart uitvoeren van het WKO-systeem en de sanering. Uit de kostenramingen die voor een hypothetische case zijn uitgewerkt, blijkt dat het combineren van een WKO-systeem en een sanering kosteneffectiever kan zijn dan een los WKO-systeem en een losse sanering.

2. Wat is de optimale temperatuur voor een sanerende werking van een open bodemenergiesysteem?

Op basis van de literatuurstudie en labtesten blijkt dat de optimale temperatuur voor reductieve dechlorering van VOCl rond de 30°C ligt. Indien op een locatie geen limitaties voor natuurlijke afbraak zijn, kan het verhogen van de temperatuur van 10°C naar 30°C de afbraak theoretisch met een factor vier versnellen. Het verhogen van de temperatuur tot 30 °C zorgt niet voor een significante toename van het organisch koolstofgehalte. Indien op een locatie het organische koolstofgehalte limiterend is voor de natuurlijke afbraak (wat op relatief veel locaties het geval is) zal een verhoging van de temperatuur naar 30°C niet tot een significante toename van de natuurlijke afbraaksnelheid leiden omdat de organisch koolstofimitatie niet wordt opgeheven.
Naast reductieve dechlorering kan VOCl ook worden afgebroken door middel van micro-aerofiele afbraak. Aangenomen wordt dat micro-aerofiele afbraak langzamer gaat dan reductieve dechlorering. Micro-aerofiele afbraak kan in tegenstelling tot anaerobe dechlorering echter wel plaatsvinden onder redoxcondities die minder gereduceerd zijn dan methanogene redoxcondities. Uit de labtesten blijkt dat micro-aerofiele afbraak bij 6°C, 10°C en 18°C sneller verloopt dan bij 30°C, de exacte redenen voor deze bevinding zijn nog niet bekend.

3. Kan de sanerende werking van een open bodemenergiesysteem worden verhoogd door een aangepast technisch ontwerp (temperatuur, debiet, locatie infiltratie en onttrekkingsfilters)?

Het effect van temperatuur op de sanerende werking van een open WKO-systeem is in de bovenstaande onderzoeksvraag beantwoord.
Uit labtesten blijkt dat het rondpompen van grondwater tot een kleine verhoging van het organisch stof gehalte kan leiden. Dit betekent dat de conditie voor natuurlijke afbraak voor reductieve dechlorering gunstiger wordt. Het is niet bekend wat de optimale stromingssnelheid is om de organisch koolstofgehaltes toe te laten nemen. Indien op een locatie gunstige redoxcondities heersen (methanogeen) en dechlorerende bacteriën aanwezig zijn, kan de kleine toename van organisch stof leiden tot een stimulering van de reductieve dechlorering van VOCl. Indien op de locatie geen gunstige redoxcondities heersen of geen dechlorerende bacteriën aanwezig zijn, zal een lichte toename van het organisch stof als gevolg van het rondpompeffect niet tot een stimulering van de natuurlijke afbraak leiden.
Een effect dat ook op kan treden door het rondpompen van grondwater is het uitbreiden van lokaal gunstige condities voor natuurlijke afbraak door verspreiding van bijvoorbeeld koolstofbron. Het omgekeerde kan ook optreden. Door het rondpompen van grondwater kunnen de lokaal aanwezige gunstige condities voor natuurlijke afbraak teniet worden gedaan.

Het ontwerp van een WKO-systeem (anders dan temperatuur en debiet) heeft geen direct effect op de afbraaksnelheid maar wel op de verspreiding van de verontreiniging. Een WKO-systeem kan zodanig worden ontworpen dat de verspreiding van de verontreiniging grotendeels wordt tegengegaan. Door de beheersing van de verontreiniging is er ook meer tijd beschikbaar om natuurlijke afbraak op te laten treden. Van de verschillende WKO-systemen is het WKO-recirculatiesysteem het meest geschikt om een verontreiniging te beheersen. Ondanks een gedegen hydrologisch ontwerp dient bij combinatieconcepten rekening gehouden te worden met (beperkte) verspreiding van de verontreiniging, tenzij er netto grondwater wordt onttrokken of tenzij de natuurlijke of gestimuleerde afbraak voldoende is om de verspreiding tegen te gaan.
Indien hulpstoffen aan het WKO-systeem worden toegevoegd is een WKO-recirculatiesysteem of een energetisch gunstiger WKO-triplet het meest geschikt vanwege de grotere voorspelbaarheid van de stroombanen. Het WKO-triplet heeft als bijkomend voordeel dat de relatief gelijkmatige stromingspatronen gecombineerd worden met een ‘warme bel’ waarin de natuurlijke afbraak mogelijk gestimuleerd wordt.

4. Met welke risico’s van verstopping of corrosie van putten en leidingwerk dient rekening gehouden te worden (ontwerpcriteria)? En wat is de impact van koolstofbron, nano-ijzer dosering, etc. bij stimulatie van biologische/ chemische afbraak op het bodemenergiesysteem (verstoppingen etc.)?

De putverstoppingsrisico’s die voor combinatieconcepten gelden zijn uitgebreid beschreven in hoofdstuk negen van het Meer met Bodemenergie literatuuronderzoek. Samengevat kunnen de volgende putverstoppingsrisico’s optreden:

- Opmenging van grondwater met verschillende redoxcondities (al dan niet veroorzaakt door het toevoegen van hulpstoffen zoals koolstofbron en nano-ijzer) kan tot neerslagvorming in de WKO-putten leiden.
- Het opmengen van grondwater met verschillende concentraties aan organisch stof in de vorm van bodemeigen materiaal, de verontreinigingscomponenten of toegevoegde organisch stofrijke hulpstoffen kunnen bacteriegroei in de hand werken. Bacteriegroei kan putverstopping door biofouling veroorzaken.
- Het toevoegen van organisch stofrijke hulpstoffen kan tot methaanvorming leiden. WKO-systemen zijn normaalgesproken zodanig gedimensioneerd dat gasverstopping, als gevolg van ontgassing in het WKO-systeem, niet op kan treden. De verhoogde methaanconcentraties brengen echter een verhoogd gasverstoppingsrisico met zich mee.

5. Hoe kunnen problemen met het aantrekken van verschillende grondwaterkwaliteiten worden voorkomen?

In de combinatieconcepten die gebruik maken van beheersing, natuurlijke afbraak of bovengrondse zuivering wordt een grote hoeveelheid grondwater rondgepompt. Er worden geen hulpstoffen toegevoegd die mogelijk een invloed hebben op de redoxconditie of het gehalte aan organisch stof. Desalniettemin kan het onttrekken van grondwater uit verschillende bodemlagen of het verspreiden van verontreinigd grondwater leiden tot opmenging van grondwater met verschillende grondwaterkwaliteit, zie onderzoeksvraag 4. Potentiële oplossingen voor dit probleem zijn gegeven in hoofdstuk negen van het Meer met Bodemenergie literatuuronderzoek. Samengevat kunnen de volgende oplossingen voor putverstoppingen worden geïdentificeerd:

- Regeneratietechnieken kunnen ingezet worden om de verstopping te beheersen (bijvoorbeeld hoogfrequent schoonmaken van de bronnen);
- Er kan gebruik gemaakt worden van terugspoelbare of eenvoudig vervangbare filters om het infiltratiewater voorafgaande aan de infiltratie te filteren en daarmee verstopping van de bronnen te beperken;
- Er kan een aangepast ontwerp gemaakt worden gericht op het minimaliseren van de problematiek, bijvoorbeeld overdimensionering of gescheiden onttrekking door gebruik te maken van separate filters op verschillende dieptes.

Indien hulpstoffen aan het WKO-systeem worden toegevoegd kunnen de redoxcondities plaatselijk veranderen of kan de groei van bacteriën gestimuleerd worden, resulterend in neerslagvorming of biofouling in de WKO-putten. In de onderstaande opsomming staan de voor een combinatieconcept meest bruikbare hulpstoffen, de toedieningwijze van deze hulpstoffen en de manieren om putverstopping als gevolg van deze hulpstoffen zoveel mogelijk te vermijden. Voor al deze hulpstoffen geldt dat ze nog niet in de praktijk in combinatie met een WKO-systeem zijn toegepast en dat nog onbekend is in welke mate putverstopping in de praktijk optreedt.

- Ethanol is geschikt om de reductieve dechlorering van VOCl te stimuleren door het in of nabij de WKO-putten toe te voegen. Om neerslagvorming of biofouling te voorkomen kan de ethanol pulsgewijs, in hoge concentraties en verspreidt over een (zeer) lange periode gedoseerd te worden. Op deze wijze komen de filters slechts kort in aanraking met ethanol en kan de WKO-infiltratieput tussendoor weer schoon spoelen. De periode tussen de infiltratie en onttrekking van het grondwater dient lang genoeg te zijn om alle ethanol uit te laten reageren en geen putverstopping in de onttrekkingsfilters te veroorzaken.
- Chitine en (geëmulgeerde) plantaardige olie kan gebruikt worden om een reactief scherm aan te leggen waarin de VOCl via reductieve dechlorering wordt afgebroken. Om putverstopping te voorkomen, dient het water dat door het scherm stroomt lang genoeg onderweg te zijn naar de onttrekkingsputten om alle chitine of (geëmulgeerde) plantaardige olie uit te laten reageren.

- Zowel voor ethanol, chitine als (geëmulgeerde) plantaardige olie geldt dat periodieke regeneratie van de WKO-putten mogelijk nodig is. Indien door het toevoegen van ethanol, chitine of (geëmulgeerde) plantaardige olie de concentraties methaan in het onttrokken grondwater te hoog worden kan gedacht worden aan het ontgassen van het grondwater door een vacuümstripper om gasverstopping tegen te gaan.
- Vanwege de putverstoppingsproblematiek is gezocht naar een hulpstof die voor minimale verstoppingsrisico's zorgt. Deze hulpstof is gevonden in de vorm van een kweek van dechlorerende bacteriën (DHC-kweek). Deze heldere DHC-kweek wordt zonder koolstofbron toegediend aan het WKO-infiltratiewater. Uit labtesten blijkt dat de bacteriën een half jaar na toediening aan een bodemmonster met sulfaatreducerende redoxcondities nog steeds actief VOCl afbreken. Het toevoegen van DHC-kweek veroorzaakt geen redoxverandering. Omdat de dechlorerende bacteriën geen plakkende biofilm vormen zorgen ze ook niet tot nauwelijks voor biofouling (zie paragraaf 5.5).
- BTEX, CIS en VC kunnen aeroob afgebroken worden door zuurstof aan het bodempakket toe te voegen. Om verstopping van het WKO-systeem door oxideneerslagen te voorkomen, wordt gebruikt gemaakt van ondergronds beluchten. Bij deze techniek vormen de neerslagen zich in het bodempakket en niet in het WKO-systeem.

6. Welke positieve effecten op de saneringsduur heeft de optredende bovengrondse menging van verontreinigingen, brandstof en nutriënten op het saneringsrendement (principe StrijpS in Eindhoven)?

Voor het antwoord op deze onderzoeksvraag wordt verwezen naar deelrapport 9 'Effecten op sanering' waarin verslag wordt gedaan van een uitgebreid onderzoek dat op de locatie StrijpS is uitgevoerd.

9.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:
- In het onderliggende onderzoek zijn een aantal nieuwe kansrijke combinatieconcepten geïdentificeerd. De combinatieconcepten waar ethanol, DHC-kweek en chitine wordt toegevoegd zijn ook in het lab getest. Deze en andere kansrijke combinatieconcepten zijn echter nog niet in de praktijk getest of toegepast. De kloof tussen labtesten en full-scale toepassing in de praktijk is dermate groot dat wordt aanbevolen om de combinatieconcepten eerst te testen op pilot-scale. De pilottesten dienen zodanig ontworpen worden dat de energielevering van het WKO-systeem gegarandeerd blijft. De combinatieconcepten waarvan op basis van een expert opinion van de onderzoekers wordt aanbevolen om ze op pilot-scale te testen zijn:
  - VOCl afbraak door DHC-kweek toevoeging aan het WKO-infiltratiewater;
  - VOCl afbraak door ethanol toevoeging aan het WKO-infiltratiewater of in aparte infiltratiefilters;
  - Afbraak van BTEX, CIS, VC of een andere organische verontreiniging door het creëren van een aerobe zone door middel van ondergronds beluchten;
  - Chitine of plantaardige olie in een reactieve zone met behulp van het WKO-triplet.

- Het maken van een keuze tussen de verschillende combinatieconcepten voor een specifieke locatie is niet eenvoudig. In tabel 7.2, tabel 7.3 en tabel 7.4 is een eerste aanzet gegeven om aan te geven welke combinatieconcepten toegepast kunnen worden op welk type locaties. Dit overzicht is echter verre van compleet. Aanbevolen wordt om (eventueel na het uitvoeren van de pilots) een aanvullende notitie te schrijven waarin aan de hand van eigenschappen die van locatie tot locatie verschillen zoals gebiedsgerichte/locatiegerichte aanpak, bodemopbouw, omvang van de verontreiniging, redoxconditie van het bodempakket, etc. een goed onderbouwde keuze gemaakt kan worden voor één combinatieconcept. In de wandelgangen wordt tevens gesproken over een ‘WKO-tool plus’, waarin niet alleen wordt aangegeven welke mogelijkheden op het gebied van WKO-systemen er zijn maar ook de mogelijkheden op het gebied van combinatieconcepten zichtbaar worden.

Literatuur

Bron: persoonlijk contact met Flierman Techniek.

Chemosphere 58 (2005) 391-398.

Combinatie van bodemenergie en saneren in Apeldoorn, SKB project PT 8441, d.d. 24 december 2009.

EPA, In-Situ Chemical Oxidation, 2006.

Gossett. 2010. Sustained Aerobic Oxidation of Vinyl Chloride at Low Oxygen Concentrations. Environ. Sci. Technol. Vol 44, p. 1405–1411.

Handleiding BOEG (Arcadis, 074598965:01, d.d. 6 april 2010).

IF Technology (2002). Well and Borehole Failures in UTESS. State of the Art 2000. Nr. 2/9805/GW, d.d. oktober 2002.

IF Technology (2004). Temperatuureffecten op grondwaterkwaliteit. Samenvatting bestaande kennis. Rapport in opdracht van NOVEM. Nr. 1/53232/GW, d.d. 2 augustus 2004.

Lieten, S. en Dinkla, I. (2011). Literatuurstudie Meer met Bodemenergie, Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom bodemenergie. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

NOBIS rapport 96-3-06.

Prijsvraag grondwater Zwolle, 11 oktober 2005.

Slenders, et al., TNO-MEP rapport R99, November 1999; meervoudige eigen observaties Bioclear.

Technische commissie bodembescherming, Advies ondergrondsbeluchten, d.d. 12 november 1997.

‘Van der Linden *et al*., 2011, Quantifying biological well clogging in Aquifer Thermal Energy Storage combined with Groundwater Remediation’, Environmental Project Studies, WUR) en ‘Veldhoen (2010) Shedding light on the risk of clogging in combined ATES and soil remediation technology, Thesis, WUR).
http://www.vito.be/sedbarcah

Wilson *et al*, *CORONA*, University of Cheffield & TNO, 2005).

Bijlage I
Overzicht bodemsaneringtechnieken

Biologische technieken:

- **Natuurlijke afbraak**
  Onder natuurlijke afbraak (natural attenuation, NA) wordt verstaan dat de verontreinigingsgraad in alle bodemcompartimenten – grond, grondwater en bodemlucht – wordt gereduceerd door natuurlijke processen zonder menselijke interventie, en dit binnen een redelijke termijn in vergelijking met meer actieve ingrepen. Deze processen kunnen van fysische, chemische of biologische aard zijn. Hierdoor nemen de concentratie, de massa, het volume, de mobiliteit en/of de toxiciteit van de verontreiniging in het grondwater en/of de bodem af.
- **Gestimuleerde aërobe afbraak**
  Grond en grondwater verontreinigd met stoffen die onder aërobe condities microbiologische afbreekbaar zijn (o.a. cis-dichlooretheen, vinylchloride en BTEX) kunnen worden gereinigd door zuurstof in de bodem te brengen. Het stimuleren van biologische afbraak door toediening van zuurstof is de oudste en de meest toegepaste vorm van biologische in-situ sanering. Zuurstof kan op verschillende manieren in de bodem worden gebracht.
  In het verzadigde deel van de bodem is biosparging veruit de meest toegepaste methode om zuurstof in te brengen. Dit gebeurt door het injecteren van perslucht. Het ontwerp wordt daarbij afgestemd op het zo efficiënt mogelijk inbrengen van zuurstof met zo weinig mogelijk kans op ongewenste processen als vervluchtiging. Bij alternatieven voor biosparging wordt zuurstof ingebracht via de waterfase of via een vaste stof die langzaam zuurstof afgeeft.
- **Gestimuleerde anaërobe afbraak**
  Bij gestimuleerde reductieve afbraak wordt de natuurlijke afbraak gestimuleerd van alle organische verontreinigingen die reductief kunnen worden omgezet (o.a. VOCl en (B)TEX). Voor de stimulering van de anaërobe afbraak worden koolstofbron en eventueel nutriënten en/of een geschikte bacteriepopulatie (bioaugmentatie) in de bodem gebracht. Methoden om de hulpstoffen in de bodem te brengen zijn een infiltratiesysteem of een directe injectie methode. Er zijn zeer veel stoffen die in principe geschikt zijn als koolstofbron.

Chemische technieken

- **Chemische oxidatie**
  Bij in-situ chemische oxidatie (ISCO) wordt een sterk oxidatiemiddel als vaste stof, of opgelost in water in de bodem gebracht. Wanneer het oxidatiemiddel in de bodem in contact komt met de verontreiniging wordt deze via chemische weg afgebroken (geoxideerd) tot onschuldige verbindingen waaronder water, koolstofdioxide, chloride en sulfaat. Deze methode is vooral geschikt voor hoge concentraties verontreiniging (bronzone).Voor een succesvolle toepassing van de techniek dient het oxidatiemiddel in voldoende concentratie lang genoeg met de verontreiniging in contact te worden gebracht om deze te oxideren. Hiervoor is het belangrijk dat de verontreiniging in de waterfase aanwezig is.

- **Fotolytische afbraak (experimentele techniek)**
  VOCl kan onder invloed van licht en een katalysator zoals titaniumoxide worden afgebroken tot onschadelijke afbraakproducten (voor meer informatie zie hoofdstuk 5).
- **Elektrolytische afbraak (experimentele techniek)**
  Elektrodes met een potentiaal van bijvoorbeeld 10 volt creëren condities die reductie of oxidatie van verontreinigingen (o.a. VOCl) mogelijk maken (voor meer informatie zie bijlage 6).

Fysische technieken

- **Pump&treat**
  Een bodemverontreiniging kan worden gesaneerd door het onttrekken van verontreinigd grondwater. Het verontreinigde grondwater wordt in veel gevallen bovengronds gezuiverd en eventueel weer geïnfiltreerd.
- **Bodemluchtextractie**
  Bodemluchtextractie is een techniek waarmee door het aanleggen van een onderdruk in de onverzadigde bodem verversing van de bodemlucht wordt bewerkstelligd. Door bodemluchtextractie treedt vervluchtiging en gestimuleerde aerobe afbraak van de verontreiniging op.
- **Persluchtinjectie**
  In situ strippen (persluchtinjectie) is een techniek waarbij (onder hoge druk) lucht wordt geïnjecteerd onder de grondwaterspiegel. Door deze luchtinjectie treedt vervluchtiging, toename van beschikbaarheid en gestimuleerde aerobe afbraak van de verontreiniging op.
- **In situ extractie**
  Het principe van *in situ* extractietechnieken is gericht op het uitspoelen van verontreinigingen door het vergroten van de oplosbaarheid of de beschikbaarheid van de verontreiniging. Via infiltratiefilters of -drains worden toeslagstoffen of warmte in de bodem gebracht waardoor de mobiliteit of de oplosbaarheid van de verontreinigingen in het grondwater wordt verbeterd. De verontreinigingen worden vervolgens samen met de toeslagstoffen onttrokken of in de bodem afgebroken. De onttrokken spoelvloeistof wordt, alvorens te worden geloosd, gezuiverd van verontreinigingen en additieven.
- **Bodemverhitting**
  Bodems verontreinigd met vluchtige componenten (o.a. VOCl, BTEX) kunnen in situ worden gesaneerd door deze bodem te verhitten met bijvoorbeeld electroreclamatie of stoominjectie. Het effect van bodemverhitting is dat bodemprocessen (transport van puur product in de bodem, biologische afbraak, diffusie, oplosbaarheid,verdamping) worden versneld of dat de verontreinigingen uit de bodem worden verwijderd. In veel gevallen dient boven de grondwaterspiegel met behulp van bodemluchtonttrekking een dampmengsel te worden opgevangen dat water bevat (stoom) en een grote vracht aan organische verontreinigingen die uit de bodem worden verwijderd.

Combinatie van biologische/chemische en fysische technieken

- **Reactieve schermen**
  Een reactief scherm is een techniek die wordt toegepast om horizontale verspreiding van een verontreiniging in een watervoerende laag tegen te gaan door de verontreiniging in een scherm te adsorberen, chemisch te immobiliseren of om te zetten of biologisch af te breken. Verschillende typen schermen zijn: vaste fase-schermen met bijvoorbeeld compost-/houtsnippertrench of ijzer(0), zuurstofschermen of anaerobe infiltratie schermen.

De bovenstaande informatie is afkomstig van bodemrichtlijn.nl, uitgezonderd fotolytische en elektrolytische afbraak. Voor meer informatie over de bovenstaande saneringstechnieken kan deze site geraadpleegd worden.

Bijlage II
Risico’s combinatieconcepten

HOOFDGROEPEN	SUBGROEP 1	SUBGROEP 2	SPECIFIEK TECHNISCH RISICO, lit. ref.
Hoofdgroep 1. Risico's onttrekkingszijde	Aantrekken redoxgrens	Biologisch	**1A.** Bronverstopping door biologisch versnelde ijzer oxidatie (bij lage zuurstof spanning) vaak met slijmvorming
		Fysisch-Chemisch	**1B.** Bronverstopping door neerslag van ijzer(II)(hydr-)oxiden of ijzercarbonaten (bij infiltratie is dit een groter risico dan bij onttrekken) IF rapport nr. 2/9805/GW
	Verhoging dynamiek door stroming en menging	Biologisch / Che-misch	**1C.** Als gevolg van het onttrekken kunnen versnelde redoxreacties plaatsvinden, met name ijzerreductie en / of sulfaatreductie. Dit leidt tot een toename van het ijzergehalte en / of het sulfide gehalte en vergroot de kans op verstopping van het onttrekkingsfilter
		Chemisch	**1D.** Als gevolg van het onttrekken kan menging plaatsvinden van waterstromen met verschillende chemische kwaliteit (o.a., pH, hard-heid, temperatuur, druk). Hierdoor kunnen neerslagen worden gevormd (bijvoorbeeld Calcium of magnesium carbonaat)
	Invloed temperatuurschommelingen	Biologisch	**1E.** Een toename van de temperatuur kan een versnelde groei van micro-organismen veroorzaken {1,2,3,4} IF rapport nr. 1/53232/GW
Hoofdgroep 2. Risico's bovengronds	Risico's van de bovengrondse zuiveringstechniek	Zandfiltratie	**2A.** Te laag verwijderingsrendement van VOCl
			2B. Hoog ijzergehalte van het grondwater, vorming ijzerslib
		Strippen	**2C.** Hoog rendement benodigd (grote stripper), ijzer neerslagen (fouling)
	Fouling van leidingen, kleppen en systemen	Biologisch	**2D.** Biologisch gevormde ijzeroxides / slijmvorming bij lage zuurstof spanning (gallionella of leptothrix) IF rapport nr. 2/9805/GW
		Chemisch	**2E.** Fouling door neerslag van ijzer (II)(hydr-)oxiden
			2F. Overige neerslagen (calcium, magnesium, aluminium,fosfaten etc)
		Gassen	**2G.** Ontgassing door drukval achter regelkleppen
Hoofdgroep 3. Risico's afvoerzijde	Putverstopping op filterspleet / boorgatwand	Organisch	**3A.** Biomassa groei ter plaatse
			3B. Biomassa aanvoer met onttrekkingswater (micro-organismen zoals bacteriën, algen, schimmels, virussen etc)
			3C. Biologisch gevormde ijzeroxides / slijmvorming (gallionella of leptothrix)
			3D. Gasbellen ter plaatse biologisch gevormd (methaan); NOBIS rapport 96-3-06
		Anorganisch	**3E.** Metaalsulfides (ter plaatse gevormd); NOBIS rapport 96-3-06
			3F. Zwevende stof (deeltjes aangevoerd met INF water) IF rapport nr. 2/9805/GW
			3G. Gasbellen (aanvoer methaan) IF rapport nr. 2/9805/GW
			3H. Neerslag van ijzer(II)(hydr-)oxiden door menging van ijzer- en mangaanhoudend water met nitraat- en-/of zuurstofhoudend water een significant risico IF rapport nr. 2/9805/GW
			3I. Calcium, Fosfaat, aluminium, mangaan en magnesium neerslagen (ter plaatse gevormd)
	Verstopping van de bodem	Organisch	**3J.** Biomassa groei; NOBIS rapport 96-3-06
			3K. Biologische vorming van metaalsulfides (ter plaatse); NOBIS rapport 96-3-06
			3L. Methaan ter plaatse biologische gevormd (gasbellen) IF rapport nr. 2/9805/GW
		Anorganisch	**3M.** Deeltjes (colloïden), zoals klei, roestdeeltjes
	Invloed temperatuurschommelingen	Biologisch	**3N.** Een toename van de temperatuur kan een versnelde groei van micro-organismen veroorzaken IF rapport nr. 1/53232/GW
		Fysisch	**3O.** Thermale verstopping. Als gevolg van verschillen in viscositeit kan "verstopping"ontstaan
Hoofdgroep 4. Geologische risico's	Onzekerheid in bodemopbouw door stuwing	Aanwezigheid kleischotten	**4A.** De aanwezigheid van verticale kleischotten zorgt voor een heterogeen karakter van het bodemenergiesysteem
		Onzekere zanddikte	**4B.** Door stuwing is de beschikbare zanddikte onzeker en variabel
	Bodemheterogeniteit	Menging	**4C.** Voorkeursstromingen, als gevolg van doorlatendheidsverschillen, onvoldoende menging
	Onzekerheid in aanwezigheid Eem klei		**4D.** De Kanaalzone ligt op een grensgebied waar de Eem klei plaatselijk wel en niet voorkomt. Waar de Eem klei ontbreekt is het risico op bronverstopping in de onttrekkingsfilters groter
Hoofdgroep 5. Risico's door keuze concept	Concept keuze voor horizontale bronnen	Schoonpompen	**5A.** Moeilijker schoon te pompen en te regenereren, problemen met boorspoeling
	Concept keuze voor onttrekken, zuiveren en lozen op kanaal of beken	Zuiveren	**5B.** Zeer grote capaciteit nodig voor bovengrondse zuiveringsinstallatie, voldoen aan specifieke eisen (temperatuur, ijzer, ecologie)
	Concept keuze voor bioscherm	Menging	**5C.** Verkrijgen van voldoende menging van koolstofbron, biomassa en verontreiniging
	Luchtdichtheid systeem, bedrijf systeem	Zuurstof intrede	**5D.** Neerslagen en biologische activiteit agv zuurstofintrede
	Systeemkeuzes	Keuze C-bron	**5E.** Zwevende deeltjes
			5F. pH effecten
		Keuze nutriënten	**5G.** Fosfaatneerslagen
	Onvoldoende dechlorering in de bodem	Biologisch	**5H.** Ontbreken dechloreerders
			5I. Onvoldoende reductie van de bodem
			5J. Onvoldoende C-bron

Bijlage III
Brainstormsessie

Concerns	Minutes meeting 25-8-2010 ATES combination concepts
Author	E. de Vries
participants	B. Drijver (IF), N. Hoekstra (Deltares), N. Hartog (Deltares) , J.E. Dijkhuis (Bioclear), E. De vries (Bioclear)
Date	14-9-2010

Background information

The goal of the meeting was the initiation of work package 3.2 ‘combination concepts between ATES and soil remediation’. Work package 3.2 is part of the project ‘More with ATES’ and research in this work package aims for the following results:

1. Overview of criteria that combination concepts have to comply to;
2. Identification of the most promising combination concepts;
3. Identification of knowledge gaps;
4. Case study: working out one combination concept for a case location.

Aim of the meeting was a discussion about the criteria that combination concepts have to comply to and a brainstorm to identify the most promising combination concepts.

These minutes are in English because the PhD student at the Wageningen University that will do research on this topic is from China.

Overview of criteria

During the meeting several criteria that combination concepts have to comply to have been suggested. From the discussions it can be concluded that the combination concepts should preferably be:

1. simple and robust;
2. cheap;
3. able to run with a minimum of effort and energy;
4. able to remove a substantial amount of contamination;
5. causing no well clogging risks;
6. causing no humane or environmental risks;
7. requiring a limited amount of space for installation;
8. aiming for containment or removal of the contamination;
9. focusing on chlorinated ethenes and BTEX as contaminants.

Brainstorm session

The goal of the brainstorm session was to make an inventory of possible combinations, to prioritize them and to identify the most promising combination concept. The brainstorm started with an individual brainstorm of 10 minutes. Then, all the ideas were written down and discussed. The next step was prioritizing the ideas and selecting the most promising concepts. All the ideas and the prioritizing is given in table 1.

tabel B1 Result of the brainstorm session

Combination concept	Priority
Above ground remediation of the contamination (including all techniques that can be applied above ground).	1
Fytoremediation. Divert a contaminated groundwater bleed stream from the ATES to a constructed wetland. This wetland can degrade the contamination and serve as source for biomass production.	
Pump & treat. Divert a contaminated groundwater bleed stream from ATES to an active coal filter to remove the contamination.	5
Open doublet ATES or recirculation ATES system combined with natural attenuation. Heated groundwater, increased stirring of groundwater and increased groundwater flow velocity may result in increased natural attenuation.	1
Electrolytic degradation. Electrodes with a potential of 5 or 10 volts can degrade chlorinated ethenes. A contaminated groundwater bleed stream could be treated this way. Potential disadvantage is scaling on the electrodes which might cause clogging problems.	5
Reactive zone with nano-iron. Zero-valent iron can chemically degrade chlorinated ethenes. By injecting zero-valent iron as a screen perpendicular to the groundwater flow the contamination can be treated.	4
Reactive zone with air bubbles. BTEX, vinylchloride and cis-dichloroethene are biologically degradable in the presence of oxygen. By injecting air as a screen perpendicular to the groundwater flow the contamination can be treated.	
Biological active zone. Chlorinated ethenes are biologically degradable under methanogenic conditions. By injecting a carbon source these conditions can be created. This technique will however result in biomass formation which could cause well clogging. By selecting slow-release carbon sources or hydrogen gas it could be possible to stimulate biodegradation with minimal biomass growth and minimal clogging risks.	2
Pump & treat. Divert a contaminated groundwater bleed stream from ATES to an reactive zone (different technologies possible) which is constructed on the most optimal location.	
Regional groundwater management. Groundwater with contamination degrading capacity might be available near a contamination. The ATES system could mix this groundwater with groundwater of the contaminated area, resulting in natural attenuation. If natural attenuation is insufficient, local stimulation of the degradation process could be considered.	5
Closed ATES system and stimulated natural attenuation. Closed ATES systems make use of closed water loops. Unlike open ATES systems, which are build in very deep water bearing layers, closed ATES systems are build in relative undeep water bearing layers. The occurrence of contaminations in undeep layers is much higher than in very deep water baring layers. This makes it more likely that contaminations will come in contact with closed ATES compared with closed ATES. Closed ATES systems could be used for remediation by utilized the increased temperature to increase the biological degradation rate.	4

Combination concept	Priority
Utilization of (open) ATES warmth. Warmth of open ATES systems could be (transported and) injected in a contaminated area. The increased temperature will increase the biological degradation rate. This combination concept makes it also possible to implement ATES and the soil remediation in separated areas.	5
Utilization of (open) ATES warmth. This concept combines doublet and recirculation ATES. The infiltration of warm water is on one side of the contaminated area, the extraction of warm water is on the other side of the contamination, resulting in a warm water recirculation system at the location of the contamination. The cold water injection and extraction is outside the contaminated zone. The increased temperature will increase the biological degradation rate.	5
Fotolytic degradation. Chlorinated ethenes can be degraded by light. If the transported groundwater of the ATES is exposed to light the contamination could be degraded. Exposure to light may be possible in solar collectors on the roofs of houses. The solar collectors can also be used to add warmth to the ATES system and to keep the warm groundwater/ cold groundwater storage in balance. A potential disadvantage is algae growth and subsequent clogging.	3
Groundwater flow alteration. By altering the groundwater flow of the contaminated area by ATES it may be possible to push the contamination upwards to rivers or canals. The VOH contamination degrades in the anaerobic sediment layers that are present before entering the surface water (NLO-concept).	
Solvents. Adding solvents to the ATES groundwater stream may help dissolve free phase contaminants. If for instance ethanol is used, the biological degradation of the contamination is also stimulated.	
Chemical oxidation. Adding reactive substances to the ATES groundwater stream could oxidize the contaminants.	
Contamination containment. By using different tools from the field of geo-hydrology, natural attenuation, pump&treat, etc. it could be possible to contain the contamination and prevent further migration.	5

Conclusion from the brainstorm:

- The combination concepts with the highest priority are ‘above ground remediation techniques (no specific technique)’ and ‘open ATES combined with natural attenuation’.
- The concepts with second and fourth highest priority are reactive zones with respectively a non-biomass forming carbon source and nano-iron.
- The concept with the third highest priority was above ground remediation with photolytic degradation combined with open ATES.

Reactive zones with non-biomass forming carbon source or nano-iron and novel techniques like electrolytic and photolytic degradation have not yet been combined with ATES. Because of their high potential the feasibility of these techniques will be further investigated (desk study).

Expected Results

All the above mentioned combination concepts have to be included in the final report. It has to be clear why some concepts will be researched in MMB and why others are not.

The above mentioned combination concepts can all be sorted out into different groups or modules. This modular set-up will be used as backbone to describe the different combination concepts. This modular set-up will also make is easy to find the most suitable combination concept for a specific location. The groups defined during the brainstorm are:

1. combination of soil remediation with ATES for warmth / increased stirring of groundwater / increased groundwater flow velocity / groundwater circulation system / other;
2. combination concept designed to contain contamination / remove contamination;
3. combination concept above ground level / below ground level;
4. ATES and soil remediation on the same location / ATES and soil remediation combined but both are on a different location;
5. Combine soil remediation with a mono well ATES system / open doublet ATES system / open recirculation ATES system / closed ATES system;
6. Combination concept in a deep water baring layer / undeep water baring layer;
7. Combination concept in an urban area / rural area.

Tasks

The brainstorm session ended with dividing the tasks of work package 3.2. The tasks are divided as follows:

- Bioclear will make a first design for the final report on combination concepts and will send a chapter lay-out which can be used by Deltares and IF to insert their parts.
- Deltares will perform a literature study on the possibilities to combine photolytic reduction, nano-iron injection and electrolytic reduction with ATES.
- Bioclear will perform a literature study on de possibilities to combine a non-biomass forming carbon source with ATES.
- IF technology, Deltares and Bioclear will work out the most promising combination concepts for a selected case study. This will include an design and financial calculation for a situation with and without the combination concept.

The set-up of batch experiments to verify the new combination concept or will be discussed in a later stage of the research project.

Bijlage IV
Onderzoek naar alternatieve hulpstoffen bij de combinatie van in-situ saneren en WKO

Betreft	Onderzoek naar alternatieve hulpstoffen bij de combinatie van in-situ saneren en WKO
Datum	Maart 2011

1. Meer met Bodemenergie

In het kader van werkpakket 3 van het project Meer met Bodemenergie wordt onderzocht of het mogelijk is om bodemenergiesystemen te combineren met bodemsaneringen.
Een bodemsaneringstechniek die mogelijk te combineren is met een WKO systeem is de in-situ sanering waarbij de verontreiniging in de bodem volledig wordt afgebroken door het optimaliseren van de afbraakomstandigheden in de bodem. Stimulatie vind daarbij plaats door het toedienen van een hulpstof.

Doel van het in deze notitie beschreven bureauonderzoek is het uitzoeken of er een hulpstof bestaat die gebruikt kan worden bij een combinatie tussen een in-situ sanering en WKO-systeem.

Uitgangspunt
Belangrijk uitgangspunt van deze notitie is de focus op hulpstoffen die de reductieve afbraak stimuleren van gechloreerde ethenen (VOCl). Er is voor deze focus gekozen omdat VOCl de meest veelvoorkomende verontreiniging is in bodempakketten waar ook WKO-systemen in aanwezig zijn.

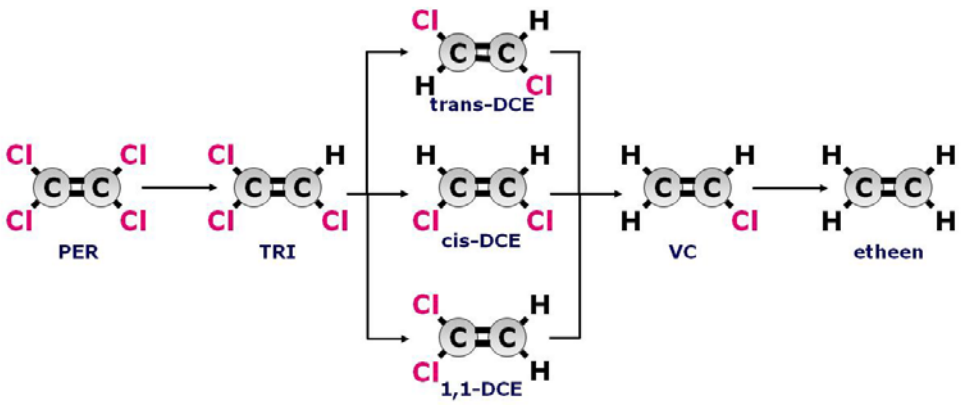
Tweede uitgangspunt is de redoxconditie van het bodempakket waar de hulpstof aan wordt toegevoegd. De redoxconditie van de bodem kan ruwweg ingedeeld worden in (van aeroob naar sterk gereduceerd) aeroob, nitraatreducerend, ijzerreducerend, sulfaatreducerend en methanogeen. Omdat WKO-systemen vanwege putverstoppingsrisico's vrijwel nooit in aerobe bodempakket worden aangelegd wordt niet gefocust op bodempakketten met aerobe redoxcondities. WKO-systemen worden wel vaak in nitraatreducerende, ijzerreducerende sulfaatreducerende of methanogene bodempakketten aangelegd. Voor het onderliggend onderzoek wordt daarom gefocust deze redoxcondities.

Leeswijzer
In deze notitie wordt eerst een overzicht gegeven van de verschillende hulpstoffen. Vervolgens worden deze hulpstoffen getoetst aan randvoorwaarden waaraan de hulpstoffen moeten voldoen om niet voor putverstopping te zorgen. Uiteindelijk wordt een hulpstof geselecteerd met de meeste potentie. Indien de resultaten van het onderzoek daar aanleiding toe geven worden aanbevelingen gedaan om labtesten uit te voeren om de bruikbaarheid van enkele hulpstoffen te verifiëren.

2. Achtergrond biologische VOCl afbraak

Onder sterk gereduceerde omstandigheden wordt VOCl afgebroken door middel van reductieve dechlorering. Bij reductieve dechlorering van PER en TRI wordt stapsgewijs waterstof als elektrondonor gebruikt en een chlooratoom afgesplitst en ontstaan lager gechloreerde ethenen, zoals cis-DCE en VC. Uiteindelijke wordt volledige afbraak bereikt met als onschadelijke eindproducten etheen en/of ethaan (zie figuur 1).

Figuur 1, reductieve dechlorering van PER



Onder aërobe of nitraatreducerende omstandigheden treedt nagenoeg geen afbraak op van PER en TRI, onder ijzer- of sulfaatreducerende omstandigheden treedt onvolledige afbraak van PER en TRI op tot cis-DCE. Volledige afbraak tot etheen en/of ethaan treedt alleen op onder methanogene omstandigheden. Methanogene omstandigheden worden gekenmerkt door de afwezigheid van zuurstof (<1 mg/l), nitraat (<1 mg/l) en sulfaat (<20 mg/l). Indien deze condities niet in de bodem heersen kunnen deze condities gecreëerd worden door een hulpstof aan de bodem toe te voegen.

3. Hulpstoffen

Er zijn verschillende producten op de markt beschikbaar om reductieve dechlorering van VOCl te stimuleren, voor het gemak samengevat onder de term hulpstoffen. In de onderstaande paragrafen is een onderscheid gemaakt tussen hulpstoffen waar via biologische omzetting waterstof wordt gevormd (de organische koolstofbronnen), hulpstoffen waar via een andere weg waterstof wordt gevormd en tot slot het toedienen van ‘dechlorerende biomassa’.

3.1. Organische koolstofbronnen

Goed oplosbare koolstofbronnen

Deze koolstofbronnen worden vrijwel altijd via de waterfase ingebracht. Dit is de klassieke vorm van dosering die het meest wordt toegepast. Om een goede verspreiding te bewerkstelligen wordt de koolstofbron meestal via een grondwater circulatiesysteem ingebracht, maar directe injectie onder hoge druk is ook mogelijk. Voordelen zijn de relatief goede horizontale verspreiding en de ruime ervaring met de techniek. Mogelijke nadelen zijn het risico op verstoppingen van de infiltratieapparatuur en de verdringing van verontreinigd grondwater. In een goed gedimensioneerd systeem kunnen veel van deze nadelen worden weggenomen. Het optreden van verstoppingen is op den duur moeilijk te voorkomen en in de praktijk wordt daarom bij langdurige instandhouding van een systeem rekening gehouden met periodieke (preventieve) regeneratie van de injectie- en onttrekkingsflters. De onderstaande vloeibare hulpstoffen zijn geschikt voor de stimulatie van anaërobe afbraak van VOCl. Onderscheid is gemaakt in enkelvoudige koolstofbronnen die vaak in zuivere vorm beschikbaar zijn en complexe koolstofbronnen die vaak reststoffen of mengsels zijn.

- Enkelvoudige koolstofbronnen: methanol, ethanol, lactaat, acetaat, butyraat, formiaat.
- Complexe koolstofbronnen: gistextract, wei, melasse, protamylasse, compostextract.

Van de bovengenoemde koolstofbronnen wordt in de praktijk vaak protamylasse gebruikt. Stoffen die in mindere mate in de praktijk worden toegepast zijn bijvoorbeeld lactaat/acetaat en melasse.

Een voordeel van het gebruik van enkelvoudige koolstofbronnen is dat zij in hogere concentraties kunnen worden aangeleverd waardoor de kosten voor transport en opslag relatief laag zijn. Het voordeel van complexe koolstofbronnen is dat het veelal afvalproducten zijn waardoor de aanschafkosten in het algemeen laag zijn. Bovendien bevatten veel complexe koolstofbronnen alle benodigde nutriënten – naast stikstof en fosfaat ook sporenelementen – zodat toedieningen van nutriënten niet nodig is.

Slow-release koolstofbronnen

Slow release hulpstoffen worden vaak in vloeibare vorm via een infiltratiesyteem of directe injectie in de bodem worden gebracht. Het uitgangspunt hier is dat de hulpstoffen gedurende langere tijd – maanden tot jaren – in de bodem aanwezig blijven en langzaam vrijkomen voor het stimuleren van de biologische afbraak van VOCl. Voordeel van het langdurige effect is dat op de lange termijn geen of slechts enkele malen herdosering nodig is. Voorbeelden van slow release hulpstoffen zijn plantaardige oliën, geëmulgeerde plantaardige olie en hydrogen release compound (HRC®), dat hoofdzakelijk uit lactaatpolymeren bestaat (www.bodemrichtlijn.nl).

Vaste koolstofbronnen
Vaste koolstofbronnen zijn stoffen zoals compost en chitine. Door het langzaam vrijkomen van organisch materiaal uit de vaste fase hebben deze hulpstoffen een lage verbruiksnelheid (www.bodemrichtlijn.nl). Deze stoffen worden in praktijk slechts in beperkte mate toegepast. Het inbrengen van vaste koolstofbronnen kan aan de hand van een gegraven sleuf, holle avegaarboringen of een diepwandtechniek tot een diepte van 15 tot 20 meter (SKB 2007). Mogelijk is deze diepte voor een combinatie met een WKO-systeem ontoereikend. Van chitine is bekend dat deze ook in de vorm van een emulsie toegediend kan worden. Een emulsie zou onder hoge druk met behulp van directe injecties mogelijk tot een diepte van 40 meter te injecteren zijn (SKB 2007).

3.2. Koolstofarme hulpstoffen

Gasvormige hulpstof
Via de gasfase kan waterstof in gasvorm of als een stabiele nevel in de bodem worden gebracht. Vooral in weinig gelaagde grondwaterpakketten heeft deze manier van inbrengen van een hulpstof voordelen met betrekking tot de verspreiding van de hulpstof. Daarnaast kan het inbrengen van gas een eventuele residuele verontreiniging mobiliseren. Bij het mobiliseren moet er wel op gelet worden dat er geen vervluchtiging van de verontreiniging tot aan het maaiveld optreed. Waterstofgas is een geschikte hulpstof voor reductieve dechlorering van VOCl waarmee op laboratorium- en veldschaal ervaring is opgedaan. Bij de LINER® techniek (Marnette et al 2004) wordt de hulpstof in een nevel in de bodem gebracht waarbij stikstof als dragergas wordt gebruikt. Nadelen van deze techniek zijn de vrij complexe technologie en de relatief hoge energiekosten, met name bij diepe verontreinigingen (www.bodemrichtlijn.nl).

Nulwaardig ijzer
Nulwaardig ijzer kan gebruikt worden voor chemische reductie van VOCl. Toepassing van nulwaardig ijzer kan in de vorm van een doorlatend reactief scherm tot een diepte van 15 tot 20 meter (SKB 2007). Tijdens passage door natuurlijke stroming wordt het grondwater ontdaan van VOCl. Het nulwaardige ijzer, met een deeltjesgrootte van >50 µm, wordt daarbij geoxideerd en de verontreiniging gereduceerd. Het granulaat gaat ongeveer 30-100 jaar mee. Nulwaardig ijzer kan ook toegepast worden in de vorm van nanodeeltjes (< 1 µm) met een grotere reactiviteit en de inzetbaarheid als slurry (emulsie met olie) (www.soilpedia.nl). Deze emulsie kan onder hoge druk met behulp van directe injecties tot een diepte van maximaal 40 meter geïnjecteerd worden (SKB 2007), er is echter nog weinig ervaring met deze techniek.

Bij de chemische reactie van nulwaardig ijzer wordt waterstofgas geproduceerd. Omdat waterstof door dechlorerende bacteriën wordt gebruikt om VOCl af te breken zorgt nulwaardig ijzer, mits de omstandigheden gunstig zijn, ook voor de stimulatie van de biologische afbraak van VOCl.

3.3. Dechlorerende biomassa

Dechlorerende biomassa is een fundamenteel andere ‘hulpstof’ dan de hulpstoffen beschreven in de voorgaande paragrafen.

Dehalococcoides sp. (DHC) is de enige bacteriesoort waarvan bekend is dat ze de verontreinigingen PER en TRI in de bodem volledig kan afbreken tot etheen en ethaan. Voor een overzicht van de condities waaronder DHC VOCl afbreekt wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Op de markt is DHC-kweek verkrijgbaar die ingezet kan worden bij in-situ saneringen op locaties waar van nature niet of nauwelijks DHC aanwezig is.

In Nederland is ruime ervaring opgedaan met het stimuleren van de biologische afbraak van VOCl door koolstofbron in combinatie met DHC-kweek te infiltreren/injecteren.

Indien de omstandigheden in een bodempakket ongunstig zijn voor reductieve dechlorering is het injecteren van alleen DHC, zonder koolstofbron, waarschijnlijk op de lange termijn niet effectief omdat de DHC zich niet kunnen handhaven. Wat het VOCl-afbrekende effect van de injectie van DHC op de korte termijn is, is nog onbekend. Indien de geïnfiltreerde DHC een restactiviteit hebben en op de korte termijn nog een aanzienlijke hoeveelheid VOCl afbreken zijn periodieke herinjecties van DHC een serieuze saneringsvariant. Mogelijk voordeel van deze toepassing is dat er geen extra stimulerende middelen aan de bodem worden toegevoegd die voor putverstoppingen kunnen zorgen.

De bovengenoemde saneringsvariant is echter nog nooit toegepast in de praktijk en bestaat alleen nog op de tekentafel. Onderzoeksvragen die nog open staan zijn: hoeveel restactiviteit heeft dechlorerende biomassa als het wordt geïnjecteerd zonder extra hulpstoffen en wat zijn de kosten om een aanzienlijke hoeveelheid dechlorerende biomassa op te kweken en te injecteren.

3.4. Overzicht hulpstoffen

In het onderstaande overzicht zijn alle hulpstoffen, inclusief de specifieke eigenschappen, weergegeven. Omdat alle hulpstoffen direct of indirect waterstof als elektrondonor produceren (met uitzondering van dechlorerende biomassa) is voor alle hulpstoffen aangegeven wat de prijs per geproduceerde kilo waterstof is.

Tabel 1. Overzicht hulpbronnen

Koolstofbron	Oplosbaar-heid in water	Snelheid waarmee hulpstof in de bodem wordt verbruikt	Kans op verspreiding (als functie van oplosbaarheid en verbruiksnelheid)	Toediening in het diepe bodempakket	TOC gehalte (kg/l)	Waterstof productie kg/kg	Prijs in euro per kg	Prijs per kilo waterstof
Koolstofbronnen in vloeibare fase								
Melasse (50% suikers)	Goed oplosbaar	Middelmatig [16]	Veel kans op verspreiding	Injectie als vloeistof	0,21 (bij benadering [10])	0,023 [10]	0,15	6,5
Lactaat/acetaat mengsel (40:60)	Goed oplosbaar	Middelmatig [16]	Veel kans op verspreiding	Infiltratie als vloeistof	0,23 (bij benadering)	0,06 (bij benadering [10])	0,7	11,7
Brenntaplus VP1	Goed oplosbaar	Middelmatig	Veel kans op verspreiding	Injectie als vloeistof	0,33 [2]	0,024 (bij benadering [1])	0,35	14,6
Wei (6% droge stof)	Goed oplosbaar	Middelmatig [16]	Veel kans op verspreiding	Injectie als vloeistof	0,025 [3]	0,004 (grove schatting[10])	0,3 – 0,9 [11]	75 – 225
Methanol (97%)	Goed oplosbaar	Snel [16]	Veel kans op verspreiding	Infiltratie als vloeistof	0,37 (bij benadering)	0,19 [10]	0,25-0,65 [1]	1,3 – 3,4
Ethanol (60%)	Goed oplosbaar	Snel [16]	Veel kans op verspreiding	Infiltratie als vloeistof	0,31 (bij benadering)	0,05 [10]	0,40-0,50	8,0-10
Glucosestroop (50% suiker)	Goed oplosbaar	Middelmatig [16]	Veel kans op verspreiding	Injectie als vloeistof	0,2 (bij benadering)	0,024 [10]	0,40-0,60	17-25
Protamylasse	Goed oplosbaar	Middelmatig [17]	Veel kans op verspreiding	Injectie als vloeistof	0,2	0,04 (grove schatting[10])	0,40	10
Plantaardige olie (CAP 18)	Slecht oplosbaar	Langzaam [16]	Beperkte kans op verspreiding	Injectie als emulsie	0,4 [4] (bij benadering)	0,105 [13]	3,0 [13]	29
Geëmulgeerde olie (EOS, 60% olie)	Slecht oplosbaar	Langzaam [16]	Beperkte kans op verspreiding	Injectie als emulsie	0,4 [5] (bij benadering)	0,07 [10]	4,0 [11]	57

Tabel 1. Vervolg overzicht hulpbronnen

Koolstofbron	Oplosbaar-heid in water	Snelheid waarmee hulpstof in de bodem wordt verbruikt	verspreiding (als functie van oplosbaarheid en verbruiksnelheid)	Toediening in het diepe bodempakket	TOC gehalte (kg/l)	Waterstof productie kg/kg	Prijs in euro per kg	Prijs per kilo waterstof
Geëmulgeerde olie (ENNA, 15% olie)	Slecht oplosbaar	Langzaam [16]	Beperkte verspreiding	injectie als emulsie	0,06 [14] (bij benadering)	0,017 [14]	0,38 [14]	22
HRC	Matig oplosbaar	Langzaam [16]	Matige verspreiding	injectie als vloeistof	0,24	0,054 [10]	10 [10]	185
Vaste fase koolstofbronnen								
Chitine	Slecht oplosbaar	Langzaam [16]	Nauwelijks kans op verspreiding	Injectie als emulsie	0,3 (bij benadering [6])	0,04 (grove schatting[10])	1,0 [6]	25
Hulpstoffen zonder koolstof								
Waterstofgas	Slecht oplosbaar	Snel [16]	Beperkte verspreiding door snelle afbraak	Continue injectie als gas	Nvt	1,0	20 [7]	20,0
Nulwaardig nano-ijzer (emulsie)	Slecht oplosbaar	Middelmatig	Nauwelijks kans op verspreiding	Injectie als emulsie (beperkte praktijk ervaring)	Nvt	0,036 (bij benadering)	75 – 95 [8]	2.000-2.600
Nulwaardig micro-ijzer	Niet oplosbaar	Langzaam	Nauwelijks kans op verspreiding	Injectie als emulsie (beperkte praktijk ervaring)	Nvt	0,036 (bij benadering)	1,0 [8]- 30 [9]	28 – 830
Overige hulpstoffen								
dechlorerende biomassa ($5*10^7$ cellen per ml)	Goed oplosbaar	Middelmatig (grove schatting)	Veel kans op verspreiding	Infiltratie van vloeistof	Nvt	Nvt	265 [15]	Nvt

1) Bron: Stowa, alternatieve C-bronnen voor nageschakelde denitrificatie, 2010
2) http://www.brenntag-specialties-europe.com/en/
3) Feijoo et al. Use of cheese whey as a substrate to produce manganese peroxidase by Bjerkandera sp BOS55, Journal of industrial microbiology & biotechnology Volume 23, Number 2, 86-90
4) Bryant, D. (European remediation Technologies), CAP18, eigenschappen en werking, 2005.
5) http://www.eosremediation.com/
6) Newcombe, C. Thesis, effective and low-cost treatment of acid mine drainage using chitin as a fractional amendment to compost, 2009.
7) Crystal Energy Projects BV, rijden op waterstof in Overijsel, 2010.
8) Muller, N. C., ObservatoryNANO focus report 2010, Nano zero valent iron – THE solution for water and soil remediation?
9) http://kremer-pigmente.de/shopint/index.php?cat=010110&lang=NLD&product=54660, bezocht op 5 januari 2011.
10) Raymond, R.L., Cost Implications of Hydrogen Donor Selection for In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents, 2003) http://www.terrasystems.net/Published_Papers/1Raymondetal2003.pdf
11) ESTCP, Edible Oil Barriers for Treatment of Chlorinated Solvent and Perchlorate-Contaminated Groundwater, 2010.
12) http://www.jsonline.com/business/29363744.html en http://future.aae.wisc.edu/
13) Telefonisch contact met European Remediation Technologies op 5 januari 2011.
14) Telefonisch contact met HMVT op 5 januari 2011.
15) www.bioclear.nl, bezocht op 5 januari 2011.
16) www.bodemrichtlijn.nl
17) Ervaring Bioclear

4. Randvoorwaarden voor hulpstoffen

De verschillende typen hulpstoffen hebben ieder hun voor- en nadelen. Voor standaard in-situ bodemsaneringen, zonder combinatie met een WKO-systeem, valt de keuze voornamelijk op goedkope hulpstoffen die voor volledige afbraak van de verontreiniging zorgen. Voor hulpstoffen die gebruikt gaan worden voor combinatie-concepten gelden echter andere voorwaarden.

Voorwaarde één is dat toepassing van de hulpstof geen putverstoppingsrisico's veroorzaakt als gevolg van biomassavorming of neerslagvorming. Voorwaarde twee is dat de prijs voor aanschaf en toepassing acceptabel is. Derde voorwaarde is dat de hulpstof met een bestaande techniek bovengronds toegediend kan worden aan het water van het WKO systeem of ondergrond op grote diepte kan worden toegediend door infiltratie of injectie.

Om putverstoppingsrisico's te minimaliseren dienen bij de selectie van de hulpstoffen de oorzaken van putverstoppingen in acht genomen te worden. De oorzaken voor putverstoppingen zijn in verschillende projecten onderzocht (Bioclear, 2009 en Veldhoen, 2010). De oorzaken voor verstoppingsrisico's zijn hieronder opgesomd.

- Verstopping van onttrekkingsbronnen, bovengronds systeem of infiltratiebronnen door biologisch versnelde ijzeroxidatie, vaak met slijmvorming, als gevolg van menging van ijzerrijk anaeroob grondwater met (sub)oxisch (aeroob tot nitraatreducerend) grondwater;
- Verstopping van infiltratiebronnen door fysisch-chemische neerslagen van ijzeroxiden en/of ijzercarbonaten;
- Verstopping van infiltratieputten door de vorming van ijzersulfideneerslagen in het geval koolstofbronnen aan het grondwater worden gedoseerd;

- Vermindering van de doorlatendheid van de bodem als gevolg van gestimuleerde bacteriegroei of neerslagvorming. Dit speelt met name indien dosering van veel koolstofbron ter stimulering van de afbraak plaatsvindt;
- Gasverstopping van infiltratieputten door het verpompen van water met verhoogde gasconcentraties. Bij saneringen is het soms noodzakelijk ook gasrijk grondwater (met name methaan) te verpompen of kunnen verhoogde methaan concentraties ontstaan door biologische afbraak van toegevoegde koolstofbron.
- Verstopping van filters met de slecht oplosbare delen van de hulpstof.

De maximale termijn waarin de hulpstof kan worden toegediend aan het WKO-systeem is afhankelijk van de levensduur van het WKO-systeem, de levensduur van een WKO-systeem wordt over het algemeen geschat op 20 tot 30 jaar.

5. Selectie van meest geschikte hulpstof

Om te bepalen of de hulpstoffen genoemd in hoofdstuk drie voldoen aan de randvoorwaarden genoemd in hoofdstuk vier is een afwegingstabel gemaakt. Een min in de tabel geeft aan dat gebruik van de hulpstof af te raden is, een plus betekent dat de hulpstof goed toepasbaar is.

Uitleg over de afwegingstabel is gegeven in de paragrafen die volgen op de afwegingstabel.

Tabel 2. Afwegingstabel van de meest geschikte hulpstof.

	Kans op putverstopping door redox-veranderingen	Risico op biofouling in WKO putten	Kans op gasvorming	Snelheid waarmee hulpstof in de bodem wordt verbruikt	Eenvoud van toediening in het diepe bodempakket	Kosten
Koolstofbronnen in vloeibare fase						
Melasse (50% suikers)	— —	— —	—	0	—	+
Lactaat/acetaat mengsel (40:60)	— —	— —	—	0	0	0
Brenntaplus VP1	— —	— —	—	0	—	0
Wei (6% droge stof)	— —	— —	—	0	—	— —
Methanol (97%)	—	—	—	—	—	+
Ethanol (60%)	—	—	—	—	0	+
Glucosestroop (50% suiker)	— —	— —	—	0	—	0
Protamylasse	— —	— —	—	0	—	0
Plantaardige olie (CAP 18)	—	—	—	+	—	0
Geëmulgeerde olie (EOS)	—	—	—	+	—	—
Geëmulgeerde olie (ENNA)	—	—	—	+	—	0
HRC	—	—	—	+	—	— —
Vaste fase koolstofbronnen						
Chitine	—	0	—	+	—	0
Hulpstoffen zonder koolstof						
Waterstof	—	0 [1]	— —	—	—	0
Nulwaardig nano-ijzer	—	0 [1]	—	0	—	— —
Nulwaardig micro-ijzer	—	0 [1]	—	+	— —	— —
Overige hulpstoffen						
Dechlorerende biomassa(DHC)	0	0	0	—	0	— —

— — : Hulpstof niet geschikt

— : Hulpstof niet aan te raden

0 : neutraal

+ : Hulpstof aan te raden

[1] : in een koolstofarm bodempakket

5.1. Kans op putverstopping door verandering van de redoxcondities

Met uitzondering van dechlorerende biomassa (DHC) zorgen alle hulpstoffen uit tabel 2 ervoor dat het bodempakket wordt gereduceerd (uitzondering hierop is het toevoegen van reducerende hulpstoffen aan een methanogeen bodempakket). Door het reduceren van het bodempakket wordt de kans op menging van grondwater met verschillende redoxcondities in de WKO-putten vergroot. Hierdoor kunnen neerslagen van ijzersulfides en ijzeroxides/ijzercarbonaten ontstaan die weer tot putverstoppingen kunnen leiden.

Naar verwachting wordt het bodempakket door het toevoegen van een DHC-kweek, waar een beperkte hoeveelheid assimileerbaar organisch koolstof in zit, nauwelijks gereduceerd en zijn de risico's op putverstoppingen als gevolg van redoxveranderingen laag.

Indien grondwater met verschillende redoxcondities wordt opgemengd in de WKO-putten is er een grote kans op putverstoppingen. Indien het opmengen van grondwater met verschillende redoxcondities op grote afstand van de putten plaatsvindt, vormen de neerslagen zich waarschijnlijk niet in de putten maar in de bodem en wordt zodoende de kans op putverstopping beperkt. Voorwaarde voor deze aanpak is dat de hulpstoffen op relatief grote afstand van de putten in een op voorhand geselecteerde locatie gereduceerde bodemomstandigheden creëren. Hulpstoffen die hiervoor mogelijk in aanmerking komen zijn hulpstoffen die een hoge verbruiksnelheid hebben zoals methanol, ethanol en waterstof en hulpstoffen die niet mobiel zijn zoals (geëmulgeerde) plantaardige oliën, chitine en nulwaardig ijzer. Hulpstoffen die mobiel zijn en lang in de bodem aanwezig blijven zijn niet geschikt aangezien deze stoffen zich over grote afstanden kunnen verspreiden. Hierdoor is het mogelijk dat relatief hoge concentraties aan hulpstoffen voor langere tijd in contact komen met de WKO put wat voor putverstopping door biologische of fysische putverstopping kan leiden.

5.2. Biofouling

Als gevolg van de toediening van een hulpstof die veel assimileerbaar organisch koolstof bevat, kan er biomassagroei optreden. Als de biomassa in of nabij de WKO-putten wordt gevormd kan er putverstopping optreden. De hulpstoffen bestaande uit vloeibare of vaste koolstofbron bevatten een aanzienlijke hoeveelheid assimileerbaar organisch koolstof en kunnen daarom voor putverstopping als gevolg van biomassa groei zorgen.

Om biomassavorming nabij de WKO-putten te voorkomen zouden hulpstoffen mogelijk op relatief grote afstand van de putten in een op voorhand geselecteerde locatie ingebracht kunnen worden. Hulpstoffen die hiervoor in aanmerking komen zijn hulpstoffen die niet mobiel zijn/sterk geretardeerd worden zoals (geëmulgeerde) plantaardige oliën en chitine.

Biomassavorming nabij de WKO-putten is mogelijk ook te voorkomen door een hulpstof te gebruiken die periodiek gedoseerd kan worden (kort contact met de infiltratieput) en die snel afbreekt zodat het de onttrekkingsput niet bereikt. Hulpstoffen die hiervoor in aanmerking komen zijn methanol, ethanol en waterstof. Extra voordeel van het toepassen van ethanol en methanol is dat zij, indien toegepast in voldoende hoge concentraties, een sterk remmende werking hebben op de bacteriële groei.

Waterstof en nulwaardig nano- en microijzer bevatten geen assimileerbaar organisch koolstof. Assimileerbaar organisch koolstof wordt door bacteriën als ‘bouwsteen’ gebruikt en zonder deze stof kunnen ze niet groeien. Als het bodempakket nauwelijks koolstof bevat, zal bij de injectie van bijvoorbeeld nulwaardig ijzer waarschijnlijk wel VOCl-afbraak plaatsvinden (chemische en eventueel biologische afbraak) maar zal er nauwelijks biomassagroei optreden.

Een DHC-kweek bevat een hoge dichtheid aan dechlorerende bacteriën, de hoeveelheid assimileerbaar organisch koolstof in de kweek is beperkt. Indien de DHC-kweek wordt geïnfiltreerd in een bodem die van nature weinig assimileerbaar organisch koolstof bevat, wordt verwacht dat het aantal DHC niet zal toenemen en dat er geen extra biomassagroei zal optreden. Indien ongunstige condities heersen voor de groei van DHC, wat in een groot deel van de Nederlandse bodem het geval is, zal het aantal DHC in de tijd afnemen.

5.3. Gasverstopping

Hulpstoffen met hoge concentraties assimileerbaar organisch koolstof stimuleren de biologische activiteit waardoor mogelijk methaan en waterstof wordt geproduceerd. Nulwaardig ijzer kan waterstof produceren door de chemische reactie met water. Indien grondwater met hoge concentraties aan gas wordt opgepompt kan er ontgassing plaats vinden en kan er gasverstopping optreden.

Omdat waterstof in de bodem waarschijnlijk direct wordt omgezet door chemische of bacteriologische reacties is het niet waarschijnlijk dat door het infiltreren van hulpstoffen waterstofgasophoping in de bodem op zal treden. Uitzondering hierop is waterstof, dat als gasfase, indien het relatief dicht bij de WKO-putten wordt geïnfiltreerd, wel tot gasverstopping in de WKO-putten zou kunnen leiden.

Methaan blijft vergeleken met waterstof langer in de bodem aanwezig en kan daardoor eerder voor gasverstopping zorgen. Toch wordt methaanontgassing niet als een groot probleem gezien. Zolang de methaanconcentraties niet zo hoog zijn dat ontgassing in de ondergrond plaatsvindt, zal er ook geen ontgassing in het WKO-systeem plaatsvinden omdat WKO-systemen onder druk gehouden worden om ontgassing te voorkomen.

5.4. Verbruiksnelheid van de hulpstof

Bij een WKO-systeem wordt het grondwater in de loop van de jaren meerdere malen rond- of heen en weer gepompt. Waarschijnlijk is het niet mogelijk om met bijvoorbeeld een reactieve zone, die aangelegd is in het kader van een in-situ sanering, al het grondwater na één keer rond- of heen en weer pompen gesaneerd te hebben. Dit betekent dat de reactieve zone waarschijnlijk meerdere jaren in stand gehouden moet worden om een hoog saneringsrendement te behalen. Het gebruik van hulpstoffen met een lage verbruiksnelheid zoals slow-release koolstofbronnen en nulwaardig ijzer hebben daarom de voorkeur omdat door één of enkele infiltratie/injectieronden een reactieve zone meerdere jaren in stand gehouden kan worden. Het gebruik van hulpstoffen met een snelle verbruiktijd zoals methanol, ethanol en waterstof is minder gunstig omdat deze stoffen mogelijk meerdere keren per jaar gedoseerd zouden moeten worden wat extra kosten met zich mee brengt.

5.5. Eenvoud van toediening in het diepe bodempakket

De eenvoud van het toedienen van de hulpstoffen is afhankelijk van de ‘fase’ waarin de hulpstof verkeerd, de diepte waarop het wordt gedoseerd en het veiligheidsrisico dat het met zich mee brengt.

Nulwaardig ijzer kan door middel van een gegraven sleuf, holle avegaarboringen of een diepwandtechniek tot een maximale diepte van 15 tot 20 meter worden ingebracht (SKB 2007). Nulwaardig nano-ijzer en chitine kunnen als emulsie met directe injecties mogelijk tot een diepte van 40 m-mv worden geïnjecteerd (SKB 2007). De verspreiding van emulsies met directe injecties is beperkt, voor een vlakdekkende beïnvloeding zijn relatief veel injectiepunten noodzakelijk. Het direct injecteren van emulsies geeft een relatief grote kans op verstoppingen van de injectie-apparatuur.

Hulpstoffen die voorkomen als vloeistoffen zijn door middel van directe injecties of infiltratie aan de bodem toe te dienen. Directe injecties kunnen iedere vloeibare hulpstof injecteren tot ongeveer 40 m-mv. Alleen stoffen die in zuivere vorm verkrijgbaar zijn en goed oplossen in water kunnen geïnfiltreerd worden zonder op de lange termijn putverstopping door zwevende delen te veroorzaken. Infiltratieputten kunnen tot zeer grote dieptes worden aangelegd (>100 m-mv). Hulpstoffen die in aanmerking komen om geïnfiltreerd te worden zijn ethanol, methanol, lactaat en acetaat.

Bij langdurige continue infiltratie van koolstofrijke hulpstoffen bestaat een kans op putverstoppingen door biomassavorming. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is periodieke infiltratie van de hulpstof en de putten geruime tijd naspoelen met ‘schoon’ water.

Waterstof wordt toegediend in de vorm van een gas dat ook met behulp van infiltratieputten kan worden gedoseerd. Specifiek nadeel van waterstofgas is de noodzaak om extra veiligheidsmaatregelen te nemen vanwege ontploffingsgevaar. Het nadeel van de noodzaak voor extra veiligheidsmaatregelen geldt ook voor het toxische methanol.

5.6. Kosten

Dechlorerende bacteriën gebruiken waterstof om VOCl af te breken. De kosten van de hulpstoffen opgenomen in tabel 1 zijn daarom omgerekend naar kosten per geproduceerde kilogram waterstof. De waardering van de kosten in tabel 2 is als volgt:

Tabel 2. Waarderingstabel kosten hulpstoffen

Kosten (€ per kg waterstof)	Waardering
< 10	+
>10 en <30	0
>30 en <100	—
>100	— —

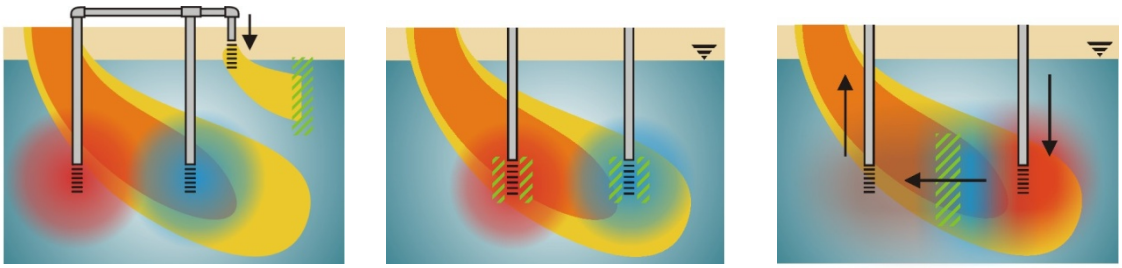
De kosten voor een DHC kweek die zijn opgenomen in tabel 1 zijn gebaseerd op de huidige DHC prijzen. Indien DHC kweek op grote schaal nodig is wordt verwacht dat de prijzen aanzienlijk zullen dalen. Omdat onbekend is in hoeverre de kosten zullen dalen, zijn de kosten voor een DHC kweek gewaardeerd met een dubbele min.

6. Conclusies

6.1. Toepassingsmogelijkheden in de praktijk

In deelrapport 1 van werkpakket 3.2 ‘Mogelijkheden voor combinatie van WKO met bodemsanering’ zijn verschillende toepassingsmogelijkheden geïdentificeerd om een in-situ sanering van oplosmiddelen zoals VOCl te combineren met een WKO-systeem, zie figuur 2.

Figuur 2. Conceptuele voorstellingen in-situ sanering in combinatie met een WKO-systeem



Van de bovenste drie combinatieconcepten stelt het concept op het eerste plaatje, de in-situ sanering op een andere locatie dan het WKO systeem, geen specifieke eisen aan de hulpstoffen om putverstopping te voorkomen. In een dergelijk combinatieconcept kunnen standaard hulpstoffen zoals protamylasse worden gebruikt.

6.2. Hulpstoffen toegepast nabij de WKO putten

In het tweede plaatje van figuur 2 bevindt de reactieve zone zich in de omstorting van de WKO-putten of nabij de WKO putten. Naar aanleiding van het onderliggende stuk kan geconcludeerd worden dat er geen hulpstoffen in vaste vorm bestaan die toegevoegd kunnen worden aan de omstorting om voor langere tijd de reductieve dechlorering te stimuleren zonder te leiden tot biologische groei of fysische reacties die mogelijk tot putverstopping kunnen leiden.

Het doseren van vloeibare hulpstoffen in de WKO infiltratieputten of het infiltreren van hulpstoffen in separate infiltratieputten rondom de WKO infiltratieputten is in theorie mogelijk, dit stelt echter wel specifieke eisen aan de te gebruiken hulpstof en aan het doseringsregiem. Naar aanleiding van de resultaten van het onderliggende onderzoek blijkt ethanol en DHC-kweek hier het meest geschikt voor.

DHC kweek is de enige hulpstof die niet tot nauwelijks voor putverstopping als gevolg van redoxveranderingen of biofouling zorgt aangezien het een oplossing is zonder zwevende delen en er een beperkte hoeveelheid aan organisch koolstof in aanwezig is. Mogelijk nadeel is de prijs.

Ethanol kan gebruikt worden om het nitraatreducerend, ijzerreducerend of sulfaatreducerend bodempakket te reduceren en gunstige methanogene condities te creëren. Als de methanogene condities aanwezig zijn dient de ethanol als koolstofbron voor de dechlorerende bacteriën bij de reductieve afbraak van VOCl. Ethanol is verkrijgbaar in pure vorm en is goed oplosbaar in water, dit maakt langdurige infiltratie zonder verstopping als gevolg van zwevende delen mogelijk. Vanwege het hoge gehalte aan organisch koolstof en het gemak waarmee deze organische stof door bacteriën wordt gebruikt, is er echter een groot risico op putverstopping als gevolg van redoxverandering en biofouling. In de infiltratieputten kan dit risico mogelijk verkleind worden door een pulsgewijze doseringsstrategie van zeer hoge concentraties te hanteren. Door eenmaal per maand in enkele uren een grote hoeveelheid ethanol of methanol te doseren en dit vier weken na te spoelen met ‘schoon’ water komen de infiltratieputten en de nabije omgeving van de infiltratieputten slechts kort in contact met ethanol of methanol. Hierdoor wordt er waarschijnlijk geen neerslag of biomassa gevormd in of nabij de infiltratieputten.

Indien er grote hoeveelheden ethanol worden gedoseerd is het verstoppingsrisico in de onttrekkingsputten waarschijnlijk minder makkelijk te voorkomen. Doordat een grote hoeveelheid aan organisch materiaal in de bodem is gebracht is het grondwater over een groot gebied gereduceerd en bevat het mogelijk organisch koolstof. Indien de onttrekkingsputten langdurig met dit grondwater in contact komt kan er putverstopping optreden doordat het gereduceerde grondwater in de onttrekkingsput mengt met minder gereduceerd grondwater of doordat de organische stof biofouling in de onttrekkingsput stimuleert. Om deze risico's te verkleinen dient het met hulpstof beïnvloedde grondwater voordat het wordt opgepompt in voldoende mate in de bodem met 'schoon' grondwater gemengd te worden. Het vooraf mengen moet er voor zorgen dat neerslag vorming en eventuele biomassavorming in de bodem op afstand van de WKO-putten plaats vindt. Om het grondwater voldoende tijd te geven om te mengen kan gebruik gemaakt worden van een WKO-recirculatiesysteem waarbij het beïnvloedde grondwater minimaal een jaar onderweg is voordat het de onttrekkingsputten bereikt. Bij het toepassen van een WKO-doublet zou de hulpstof kunnen worden ingebracht vanaf het moment dat de pomprichting niet meer wordt omgekeerd (bijvoorbeeld aan het begin van het zomerseizoen of winterseizoen en niet in het tussenseizoen), zodat de hulpstof van de put wordt weggeduwd en pas maanden later weer wordt aangetrokken. Het grondwater wordt dan minimaal enkele maanden opgemengd voordat het weer wordt onttrokken. Het risico op putverstopping na enkele maanden opmenging is waarschijnlijk groter dan het risico na enkele jaren van opmenging zoals in een recirculatiesysteem het geval is. Het toedienen van ethanol kan uitgesmeerd worden over een maximale periode van 20 tot 30 jaar (levensduur van een WKO-systeem)

Om een VOCl verontreiniging effectiever aan te pakken kan gedacht worden aan het combineren van het toedienen van ethanol en DHC-kweek.

6.3. Hulpstoffen toegepast als reactief scherm

In het derde plaatje van figuur 2 wordt een reactieve zone geïnstalleerd tussen de onttrekking- en infiltratieputten van het WKO-systeem.

Het nitraat-, ijzer-, en sulfaatrijke grondwater dat door het actieve scherm stroomt zal door het reactieve scherm gereduceerd worden waardoor methanogene condities ontstaan die gunstig zijn de reductieve dechlorering van VOCl. Tevens levert het scherm koolstofbron dat door de dechlorerende bacteriën gebruikt wordt om de VOCl af te breken. Uit het onderliggende onderzoek blijkt dat chitine en (geëmulgeerde) plantaardige olie het meest geschikt zijn om een reactief scherm aan te leggen. De voornaamste voordelen van deze hulpstoffen zijn ten eerste de kosten, ten tweede de beperkte verspreidingsnelheid waardoor de hulpstoffen op de geselecteerde locatie blijven en zich niet naar de WKO-putten verspreiden en ten derde de lage verbruiksnelheid waardoor het reactieve scherm jaren actief blijft. Het vierde voordeel van chitine is dat de verbruiksnelheid zo laag wordt geacht dat er maar een beperkte hoeveelheid biomassa wordt gevormd die voor biofouling kan zorgen.

Indien het gereduceerde grondwater in de WKO-putten terecht komt en opgemengd wordt met minder gereduceerd grondwater kan putverstopping optreden. Om deze putverstopping te voorkomen wordt de reactieve zone zodanig geplaatst dat de grondwaterstromingsnelheid ter plaatse van de reactieve zone door het WKO-systeem wordt beïnvloed maar dat het grondwater nog wel enkele 'maanden' verwijderd is van de onttrekkingsputten. Een dergelijke toepassing is haalbaar bij een WKO-recirculatiesysteem. Deze aanpak is ook mogelijk bij een WKO-doublet als het scherm tussen de warme en koude bron wordt geplaatst. Het beïnvloedde grondwater wordt eerst enkele seizoenen heen en weer verplaatst voordat het grondwater in de WKO-putten terecht kan komen.

Een beperking van Chitine is dat het als slurrie alleen toegepast kan worden met behulp van directe injecties tot een diepte van maximaal 40 m-mv. Daarnaast is chitine nog slechts in beperkte mate in de praktijk gebruikt en zal uit een aanvullende test moeten blijken in hoeverre het bruikbaar is. (Geëmulgeerde) plantaardige olie kan toegepast worden middels infiltratie tot een grotere diepte (>100 m-mv). Bij het aanleggen van het actief scherm geldt dat hoe breder en dieper het scherm moet worden, hoe hoger de kosten zijn. Het toepassen van een actief scherm ligt daardoor het meest voor de hand in relatief ondiepe bodempakketten.

Het toepassen van bijvoorbeeld ethanol in een reactief scherm is in theorie ook mogelijk. Vanwege de hoge verbruiksnelheid van deze hulpstoffen zullen ze echter frequenter toegediend moeten worden wat hogere kosten met zich meebrengt.

Om een VOCl verontreiniging effectiever aan te pakket kan gedacht worden aan het combineren van een reactief scherm met een DHC-kweek.

7. Gebruikte literatuur

- www.soilpedia.nl, bezocht op 19 mei 2010
- Bioclear, 2009, Combinatie van bodemenergie en saneren in Apeldoorn – Inventarisatie en onderzoek naar risico's en oplossingen voor combinatiesystemen van bodemenergie en bodemsanering – Kanaalzone Apeldoorn, referentie SKB (PT 8441).
- Marnette ECL, Schuren CHJE, Van den Brink KMJ & Dyer M (2004). Full-scale stimulation of reductive dechlorination using the LINER® technique. in: Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Proceedings of the Fourth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (Eds. AR Gavaskar & ASC Chen), May 2004, Monterey, California, USA.
- SKB, 2007, Demonstratieproject ijzerscherm Wassenaarseweg Katwijk Fase 1: Rapportage keuze, dimensionering en aanleg ijzerscherm, referentie SKB (PT04.121)

Bijlage V
Aanvullende informatie over nulwaard ijzer

1 Onderzoek naar nulwaardig ijzer als hulpstof

1.1 Werkingsprincipe van nulwaardig ijzer

Wanneer chloorkoolwaterstoffen in het grondwater met nulwaardig ijzer in aanraking komen, kunnen de volgende redoxreacties optreden:

$Fe^{0} \rightarrow Fe^{2+} + 2\ e^{-}$	(1) Oxidatie van ijzer
$C_2Cl_4 + 4H^{+} + 8\ e^{-} \rightarrow C_2H_4 + 4Cl^{-}$	(2) Reductie van PER tot etheen
$2\ H_20 + 2\ e^{-} \rightarrow H_2 + 2\ OH^{-}$	(3) Hydrolyse van water

Uit de reactievergelijkingen blijkt dat de sequentiële reductie van PER tot etheen spontaan plaatsvindt in aanwezigheid van nulwaardig ijzer, zonder dat additieven of energie moet worden toegevoegd. Uit
ervaringen met ijzerschermen in vooral de Verenigde Staten en Canada is gebleken dat volledige afbraak van PER tot etheen mogelijk is onder invloed van het nulwaardige ijzer en dat deze relatief snel verloopt.

IJzerschermen vertegenwoordigen grotendeels uitontwikkelde technologie, al is er nog onduidelijkheid over de rol van bijkomende biologische afbraak. Voor diepe toepassingen zijn traditionele ijzerschermen uit praktische en financiële overwegingen niet geschikt en zullen injecties van 0-waardig ijzer nodig zijn. Hiervoor zijn ijzerdeeltjes verkrijgbaar in de grootte van nanometers en micrometers, in het vervolg respectievelijk nano-ijzer en micro-ijzer genoemd. In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van beschikbare literatuur die een indruk kan gegeven van de huidige stand techniek voor ijzerinjecties aan de hand van delen uit de Proceedings van het in 2010 in Antwerpen gehouden symposium ‘Permeable Reactive Barriers & Reactive Zones’.

1.2 Toepassing nulwaardig ijzer in combinatie met WKO systeem

Traditionele ijzerschermen kunnen alleen relatief ondiep in de bodem worden aangebracht. Combinatie daarvan met een WKO-systeem is alleen relevant als een deelstroom in de ondiepe bodem of zelfs bovengronds behandeld zou kunnen worden, maar dat zal niet rendabeler dan een conventionele zuivering. Bij behandeling van verontreinigingen op de diepte van WKO-systemen moet worden gedacht aan nano-ijzer of micro-ijzer. Micro-ijzer blijft lang in de bodem actief en reduceert het grondwater pakket mogelijk in beperkte mate waardoor putverstopping wellicht kan worden voorkomen. Nano-ijzer is vele malen reactiever dan micro-ijzer en ook dat kan interessant zijn: als het is uitgereageerd voordat het weer in een filter terechtkomt, zal het geen putverstoppingen veroorzaken. Het overwegen van een bovengrondse toepassing van nano- en micro-ijzer lijkt niet zinvol, omdat daarvoor ook goedkoper vormen van o-waardig ijzer volstaan; de kleine deeltjes zijn immers alleen van belang om op grote diepte te kunnen doseren.

De technologie voor zowel injectie van micro- als van nano-ijzer bevindt zich nog in het experimentele stadium. In één veldschaal-pilot-studie is micro-ijzer gebruikt vanwege geobserveerde aggregatie van nano-ijzer en de kosten. De injectie van micro-ijzer bleek echter problematisch: slechte oplosbaarheid, neerslagvorming, klontering. Het is duidelijk dat nog verder onderzoek nodig is naar de praktische toepasbaarheid van injectiemengsels. Ook bleken in de bodem voorkeursstromen te ontstaan, hetgeen pleit voor nader onderzoek naar de optimale injectiedruk en naar welke grootte van ijzerdeeltjes past bij welke bodemtextuur. Mogelijk is nano-ijzer uiteindelijk toch geschikter. Het emulgeren van nano-ijzer in een suspensie met plantaardige olie is mogelijk een oplossing om aggregaatvorming tegen te gaan. Uit laboratoriumonderzoek blijkt dat geëmulgeerd nano-ijzer mobieler is maar minder reactief. Dat laatste hoeft geen probleem te zijn, omdat voor grondwatersanering in combinatie met WKO tientallen jaren ter beschikking staan. Een ander alternatief waarmee in het laboratorium hoopgevende resultaten zijn verkregen is geëmulgeerd ijzersulfide.

Naast een chemische reactie mag, als gevolg van de productie van de elektronendonor waterstof (uit de hydrolyse van water in de aanwezigheid van ijzer) een biologische reactie worden verwacht. Hoeveel in welke omstandigheden biologisch en hoeveel chemisch wordt omgezet, is nog onderwerp van onderzoek, maar zal sterk afhankelijk zijn van de aanwezigheid van organische stof om de groei van de micro-organismen mogelijk te maken. Het idee was juist biomassavorming zoveel mogelijk te voorkomen, maar groei van de juiste organismen is wel nodig om voldoende omzetting te krijgen. Microbiële groei is geen probleem zolang deze niet in het filter plaatsvindt. Het lijkt niet waarschijnlijk dat de dikwijls niet goed afbreekbare hoeveelheid organische stof in watervoerende pakketten daarvoor volstaat. Voor significante biologische afbraak zal daarom vaak alsnog organische-stof dosering nodig zijn. Bij toepassing van geëmulgeerd ijzer kan de plantaardige olie als koolstofbron dienen.

1.3 Potentiële risico's

Toediening van mobiel ijzer verhoogt de kans op vorming van ijzersulfiden met het risico van putverstopping. Toediening van in plantaardige olie geëmulgeerd ijzer, dat mogelijk beter kan worden gedoseerd en bovendien een combinatie van chemische met biologische afbraak mogelijk maakt, kan veroorzaken dat de olie bij de put aan de bodem gaat plakken waardoor deze, in combinatie met biomassavorming, dicht slaat.

Het belangrijkste probleem is dat combinatie van WKO met een experimentele techniek grote risico's met zich meebrengt. Hiervoor is eerst langdurig onderzoek nodig; vanwege de nog openstaande kennisvragen aanvankelijk zonder het WKO-aspect.

1.4 Haalbaarheid

Een combinatie van WKO met dosering van nulwaardig ijzer lijkt potentie te hebben. Hiervoor is echter nog veelvuldig onderzoek nodig naar effectieve injectie daarvan in aquifers. Pas als die technologie verder ontwikkeld is, kan worden nagedacht over een combinatie met WKO.

2 Gebruikte literatuur

Proceedings PRB/RZ 2010, July 6-8
From: Chemical Reduction of PCE by Zero Valent Iron Colloids Comparison of Batch and Column Experiments. C.V. de Boer, N. Klaas, and J. Braun Proceedings PRB/RZ 2010, July 6-8

Proceedings PRB/RZ 2010, July 6-8
From: *In situ* remediation of a chlorinated ethene contaminated source zone by injection of zero-valent iron: from lab to field scale. Uyttebroek M., Baillieul H., Vermeiren N., Scholiers R., Devleeschauwer P., Gemoets J. and L. Bastiaens

Proceedings PRB/RZ 2010, July 6-8
Use of different zero-valent iron particles for CAHs degradation. Velimirovic, M., Simons, Q., Seuntjens P., and L. Bastiaens.

Proceedings PRB/RZ 2010, July 6-8
Impact of microbiology on performance of Zero Valent Iron based Permeable Reactive Barriers andReactive Zones: A comparative study. Naresh Kumar, Fabienne Battaglia-Brunet, Romain Millot, Vanbroekhoven Karolien, Ludo Diels, Leen Bastiaens.

Proceedings PRB/RZ 2010, July 6-8
Emulsified metallic nano- and micro-iron particles for in-situ Remediation of Chlorinated Ethenes in Groundwater. J. Gemoets, Q.Simons, R. van Roten, P. Vanderauwera, L. Bastiaens.

Bijlage VI
Aanvullende informatie over elektrokinetische remediatie

1 Onderzoek aan combinatieconcept met elektrokinetische remediatie

1.1 Werkingsprincipe van elektrokinetische remediatie

Het gebruik van een elektrisch potentiaalverschil bij een bodemsanering is een techniek die elektroreclamatie of elektrokinetische remediatie wordt genoemd en al veelvuldig is toegepast. Een groot voordeel van de techniek is dat de werking nauwelijks wordt beïnvloed door de bodemsamenstelling en daardoor efficiënt kan worden ingezet bij sterk heterogene bodems met slecht doorlatende lagen, met bijvoorbeeld een hoog kleigehalte. Het saneringsprincipe is gebaseerd op de, vaak gecombineerde, werking van ionmigratie, elektrische osmose en opwarming van de bodem. Geconcentreerd in elektrolytvloeistof worden verontreinigingen veelal bovengronds verwerkt.

1.1.1 Toepassing van gelijkstroom

Door het opleggen van een elektrisch potentiaalverschil tussen twee elektroden in de bodem zullen de volgende processen plaatsvinden:

Elektrolyse

Bij de elektroden vinden de volgende reacties plaats:

$$2H_2 0 - 4e^- \rightarrow O_2\ (g) + 4\,H^+ (anode)$$

$$4H_2 0 + 4e^- \rightarrow H_2\ (g) + 4\,OH^- (kathode)$$

Ionmigratie

Door het opgelegde spanningsverschil in de bodem desorberen en mobiliseren geladen deeltjes. Positief geladen ionen – metalen, ammonium en sommige organische componenten – bewegen zich naar de kathode en de negatief geladen ionen - chloride, cyanide, fluoride, nitraat en sommige organische componenten – naar de anode. Hierdoor ontstaat een pH-gradiënt tussen de anode en de kathode, die vaak verloopt tussen de 2 en de 10 indien er geen extra maatregelen worden genomen. De ionische mobiliteit verschilt significant per ion. Deze ligt volgens literatuur voor zware metalen vaak in de orde van 3 10^{-4} cm^2/V s. Bij een spanningsverschil van 1 V/cm levert dit een ion-stroomsnelheid op van 26 cm/dag.

Elektrische osmose

Indien zich een kleilaag tussen de elektroden bevindt, heeft deze een sterke invloed op de migratie van negatief geladen ionen. Doordat de kleimineralen een negatieve lading hebben (dit kan echter wijzigen onder invloed van de pH-verandering) zal het omringende poriewater vooral positief geladen ionen bevatten en zullen minder negatief geladen ionen voorkomen. Dit verhindert het transport van de negatief geladen ionen. De positief geladen ionen zullen wel door de kleilaag stromen en trekken daarbij ook het grondwater mee. Hierdoor ontstaat er een netto grondwaterflux van de anode naar de kathode, waardoor ook ongeladen opgeloste moleculen worden meegevoerd. Dit effect heet elektrische osmose en treedt behalve bij klei ook wel bij fijne zanden op. Een groot voordeel van het proces is dat de weerstand tegen deze osmotische opgewekte grondwaterstroming nauwelijks wordt beïnvloed door de bodemgelaagdheid. De grondwaterstroming die veroorzaakt wordt door een elektrisch potentiaalverschil kan worden bepaald met de volgende formule:

$$Q = k_e \frac{V}{L} A$$

Waarbij Q het grondwaterdebiet; k_e de elektrisch osmotische permeabiliteit, V het spanningsverschil over afstand L, en A de oppervlakte van de dwarsdoorsnede. De elektrisch osmotische permeabiliteit varieert vrijwel niet voor verschillende grondsoorten in tegenstelling tot de hydraulische doorlaatbaarheid, zie figuur 2. Bij een potentiaalverschil van 100 V/m zal dan een grondwaterstroming van ongeveer 2,5 mm/dag worden gecreëerd. Bij recentelijk uitgevoerde proeven op bentoniet en op klei van een locatie in Olst is trouwens een veel hogere elektrisch osmotische permeabiliteit gevonden van minimaal 1,9 cm^2/V s (Guus Loch, Universiteit Utrecht, persoonlijke combinatie).

Electro-osmose in combinatie met ion migratie zorgt ervoor dat positief geladen ionen zich sneller verplaatsen dan negatief geladen ionen in de andere richting. Indien de anode in een kleilaag staat en de kathode zich in een bovenliggende zandlaag bevindt, zullen de negatief geladen ionen zich verplaatsen tot de overgang naar de kleilaag.

Chemische reacties

Door het transport van ionen (o.a. H+ and OH -) door de bodem zullen chemische reacties optreden. In klei zullen de H+ ionen andere kationen van de adsorptieplaatsen verwijderen. Het ontstaan van zure condities zal zo het mobiliseren van vooral geadsorbeerde metalen versterken. De kationen kunnen mogelijk weer neerslaan als hydroxide.

1.1.2 Toepassing van wisselstroom

Door gebruik van wisselstroom zal de bodem worden opgewarmd. Bij sommige toepassingen kan de temperatuur wel oplopen naar plaatselijk 80 graden Celsius. Hogere temperaturen verhogen de oplosbaarheid van componenten vanuit puur product naar de waterfase en kunnen ook de biologische afbraak stimuleren (al zal deze bij temperaturen boven 40 graden Celsius juist weer geremd worden).

1.1.3 Hulpmiddel bij andere saneringstechnieken

Naast het verwijderen van zware metalen (de meest bekende toepassing), vooral door ion migratie, kunnen elektrische potentiaalverschillen ook als innovatief hulpmiddel worden toegepast bij andere bodemsaneringstechnieken, zoals bij:

1. grondwateronttrekking en bodemluchtextractie door toenemende oplosbaarheid, desorptie, vervluchtiging en afbraak, vooral gericht op slechtdoorlatende lagen;
2. in-situ chemische oxidatie door verbeterde verspreiding van geïnjecteerde chemische oxidatiemiddelen;
3. gestimuleerde biologische afbraak door verbeterde verspreiding van geïnjecteerde nutriënten en verhoging van temperatuur.

1.2 Toepassing elektrokinetische sanering in combinatie met WKO systeem

Elektrokinetische sanering kan vooral behulpzaam zijn bij het mobiliseren en transporteren van geladen verontreinigende stoffen en reactanten in slecht doorlatende lagen. Open WKO's staan juist in goed doorlatende lagen en de meest relevante verontreinigingen, chloorkoolwaterstoffen, zijn niet geladen. In aquifers is mobilisatie en transport van verontreinigingen en reactanten veel efficiënter met WKO te bevorderen dan met elektrokinetiek. Wel zijn elektroden geschikt om via het opwarmen van de bodem de afbraak te stimuleren. Dat gebeurt echter al met WKO, minder sterk dan mogelijk is met elektrodes, maar het kost ook veel minder energie. Ook wordt aan de kathode uit water waterstof gevormd: de voor de reductieve dechlorering van chloorethenen noodzakelijke elektronendonor. Aan de anode ontstaat zuurstof, dat als elektronenacceptor kan dienen voor de oxidatieve afbraak van laaggechloreerde chloorkoolwaterstoffen.

Bij de Lasagna™-techniek wordt tussen de elektroden een reactieve zone met actief kool of reactief ijzer (zie hoofstuk 3) geplaatst, waarin de verontreinigingen adsorberen of afbreken. Deze methodiek is vooral gebaseerd op elektrische osmose maar werkt ook in combinatie met ionmigratie indien de verontreiniging uit ionen bestaat. De techniek is wel toegepast bij een PER-verontreiniging (Ho et al., 1997), maar hierbij worden vraagtekens gezet of de pure PER-fase wel is verwijderd (Alshawabkeh, 2001). Bovendien is de techniek duur en duurt de sanering relatief lang.

Gelijksoortige conclusies worden getrokken in http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA520569. Na succesvolle laboratoriumstudies vielen de resultaten van een veldproef met een elektrolytische barrière op het Pueblo Chemical Depot (PCD) tegen. Hoewel dit mogelijk mede te maken heeft met locatiespecifieke omstandigheden, concluderen de auteurs dat een elektrolytische barrière altijd duurder zal blijven dan andere schermconstructies, zoals ijzerschermen (zie hoofdstuk 3). Opgemerkt wordt dat de betreffende veldproef is gedaan met een barrière tot circa 5 m –mv, een heel ander dieptetraject dan wat bij WKO relevant is. Wel zou een deelstroom in de ondiepe bodem of zelfs bovengronds behandeld kunnen worden, maar op basis van de onderzoeksresultaten zal dat niet rendabeler zijn dan een conventionele zuivering.

1.3 Potentiële risico's

Belangrijkste nadelen van een combinatie van elektrokinese en WKO:

- Voor het behalen van enige effectiviteit zal meestal een groot aantal elektrodes nodig zijn, hetgeen vooral op WKO-diepte zeer hoge kosten met zich meebrengt.
- Door de vorming van zuurstof ontstaan neerslagen in de bodem. Een mogelijke oplossing voor dit probleem zou wellicht kunnen zijn de anode juist bovengronds te positioneren voor de aparte behandeling van een niet naar de bodem te retourneren deelstroom.
- Andere neerslagen, door allerlei niet precies te voorspellen chemische reacties in de bodem, die putverstoppingen kunnen veroorzaken, zijn echter niet te voorkomen.
- De techniek is behoorlijk duur en vraagt veel energie. Het lijkt niet erg logisch om enerzijds energie te besparen met WKO en anderzijds een energievretende saneringstechniek toe te passen. Wel zou energie kunnen worden bespaard door zonnecellen te gebruiken. Dit is echter in de PCD-proef ook al gedaan, op basis waarvan de auteurs toch op te hoge kosten uitkomen. Bovendien zijn de omstandigheden voor zonnecellen in Nederland zijn minder ideaal dan in Colorado, vanwege het kleinere aantal zonne-uren.

De drie eerstgenoemde bezwaren gelden in principe niet voor een bovengrondse toepassing, het laatstgenoemde echter wel waardoor het voordeel ten opzichte van een conventionele zuivering vervalt.

1.4 Haalbaarheid

Op basis van het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat inzet van elektrokinetische remediatie in combinatie met WKO momenteel in ieder geval nog te prematuur is, maar waarschijnlijk nooit zal renderen.

Bijlage VII
Afbraaktesten gestimuleerde biologisch afbraak door toediening hulpstoffen

1. Introductie

1.1 Proefopzet

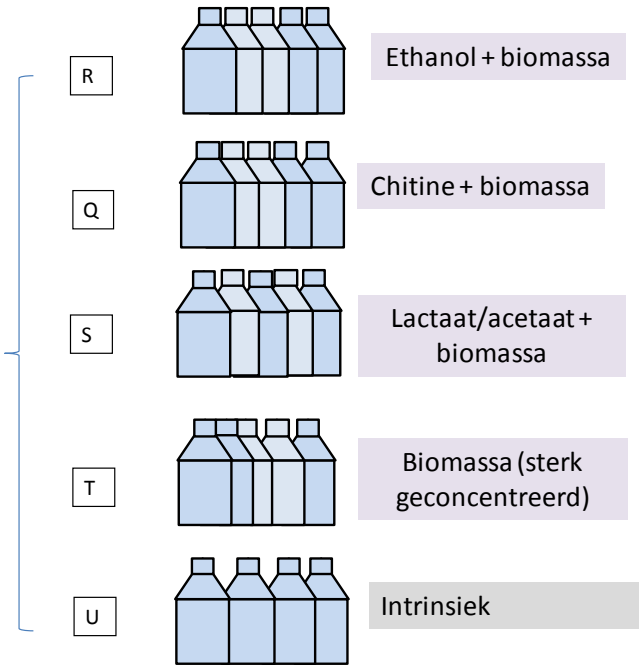
Binnen het MMB project zijn gestimuleerde biologische afbraaktesten uitgevoerd die als input dienen voor de te ontwikkelen nieuwe combinatieconcepten van sanering en warmte-koude opslag. De testen zijn uitgevoerd met VOCl-verontreinigde grond en grondwater monsters van locatie Strijp-S. Aan deze testen zijn verschillende toevoegingen gedaan om het reductieve dechloreringsproces van VOCl (het meest bekende biologische afbraakproces van VOCl) te stimuleren. Als controle test is daarnaast ook een niet gestimuleerde afbraaktest gemonitord. De anaerobe batchexperimenten zijn uitgevoerd conform protocol beschreven in het NOBIS rapport (code 97-4-04). Dit protocol is in het kader van het Nederlands Onderzoeksprogramma voor Biotechnologische In-situ Sanering (NOBIS) ontwikkeld en gevalideerd. Bioclear heeft reeds jarenlange ervaring met het uitvoeren van anaerobe batchexperimenten.

De flessen die voor de gestimuleerde afbraaktesten gebruikt zijn, hebben gedurende 6 maanden (vanaf 29 augustus 2010 tot en met 13 maart 2011) bij 6°C, 10°C, 18°C en respectievelijk 30°C gestaan. In deze niet gestimuleerde testen is gecontroleerd of er van nature afbraak in deze monsters optreed. Uit de resultaten bleek dat 6 maanden na inzetten nog geen significante afname van VOCl had plaatsgevonden. Om deze reden zijn de flessen van deze intrinsieke afbraaktest omgenummerd en gebruikt voor de test waarbij verschillende toevoegingen zijn getest.

1.2 Uitvoering

Onderstaande toevoegingen zijn gedaan (zie ook figuur 1 en tabel 1):

- Geen toevoeging (U-test): negatieve controle
- Lactaat-acetaat mengsel en dechlorerende biomassa (S-test): positieve controle
- Ethanol en dechlorerende biomassa (R-test)
- Chitine en dechlorerende biomassa (Q-test)
- Sterk geconcentreerde hoeveelheid dechlorerende biomassa (T-test)



Figuur 1. Testopzet

De benaming van de verschillende testen is in figuur 1 weergegeven. Aan de ethanol, chitine en lactaat-acetaat test is ook een geringe hoeveelheid dechlorerende biomassa (Dehalococcoides spp, afgekort DHC) toegevoegd. Deze biomassa is toegevoegd om mogelijke belemmeringen (afwezigheid DHC of verkorten lag-fase) voor het optreden van reductieve dechlorering op te heffen. Als negatieve controle is een afbraaktest ingezet waar geen dechlorerende bacteriën aan toegevoegd zijn (intrinsieke test). De lactaat-acetaat test is als positieve controle meegenomen aangezien er reeds veel ervaring is met het doseren van dit mengsel om de afbraak van VOCl te stimuleren (wordt standaard gebruikt bij in-situ saneringen op basis van het TCE-concept). Verder zijn de twee meest belovende koolstofbronnen getest (chitine en ethanol).

Naast bovengenoemde testen is er ook een test uitgevoerd waarbij alleen dechlorerende biomassa is toegevoegd. Er is een overmaat aan dechlorerende bacteriën toegevoegd (10 ml kweek met een dichtheid van 10^7 cellen/ml). Het idee hierbij is dat de toegevoegde bacteriën de aanwezige VOCl gebruiken zonder te groeien (waarbij ze een electronendonor/koolstofbron nodig hebben).

Figuur 2. chitine

Tabel 1. Toevoegingen aan de verschillende batchtesten

Batch test	*Cis*-DCE 1000 µg/l in batchfles	Koolstofbron 2000 mg TOC/l in batchfles	Biomassa 3E+07 cellen/ml in kweek
Q	X	Chitine	1 ml (7E+05 cellen/ml in batch)
R	X	Ethanol	1 ml (7E+05 cellen/ml in batch)
S	X	Lactaat-acetaat	1 ml (7E+05 cellen/ml in batch)
T	X (meerdere malen, zie grafiek)	-	10 ml (7E+06 cellen/ml in batch)
U	X	-	-

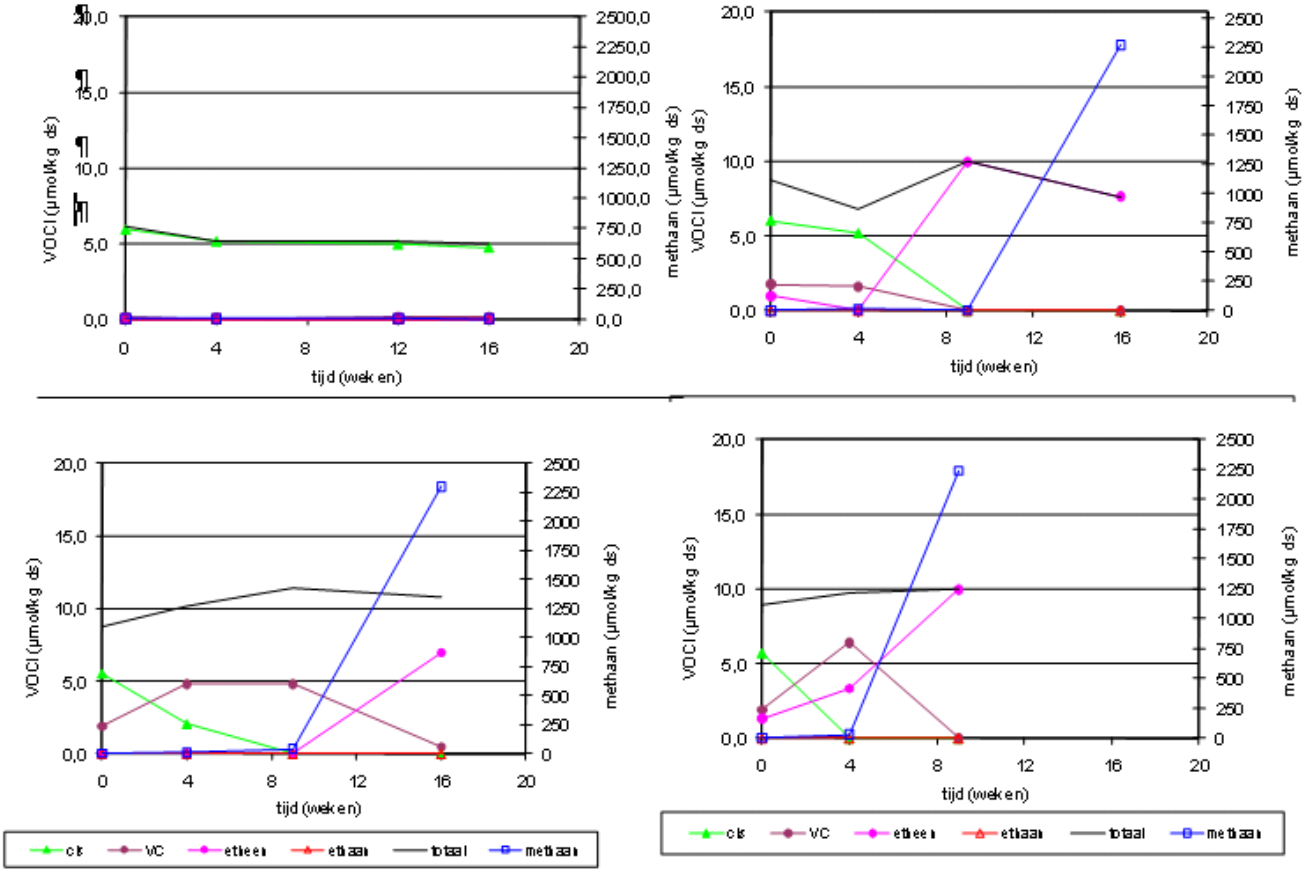
De looptijd van deze test was maximaal 20 weken. De flessen zijn bij 18 graden (in de klimaatkast) weggezet. Gedurende de test zijn analyses uitgevoerd op concentratie VOCl, pH, redoxparameters (sulfaat en methaan), totaal organisch koolstof (TOC) en de microbiologische parameters (algemeen bacteriën, VOCl-afbrekers en specifieke groepen). Van de microbiële parameters zijn zowel DNA- als RNA-analyses uitgevoerd. De DNA-analyses geven een inzicht in de aanwezige potentie voor de bepaalde processen om plaats te vinden. De RNA-analyses geven de daadwerkelijke activiteit weer (welke processen zijn actief). Analyses zijn uitgevoerd op het aantal totaal bacteriën, *Dehalococcoides* spp (dechlorerende bacteriën), *vcr*A (enzym betrokken bij afbraak van VC), *mcr*A (enzym betrokken bij methanogenese), *dsr*A (enzym betrokken bij sulfaatreductie).

2. Resultaten

2.1 Effect type koolstofbron op de afbraak van VOCl (chitine, ethanol, lactaat-acetaat en intrinsieke test)

2.1.1 VOCl

In onderstaande figuur 3 zijn de resultaten (1 fles per test) van de intrinsieke test, chitine test, ethanol test en lactaat-acetaat test weergegeven. In bijlage 1 zijn per test de resultaten van alle drie de GC flessen weergegeven.



Figuur 3. Verloop in concentraties VOCl en afbraakproducten intrinsieke batch (linksboven), chitine batch (rechtsboven), ethanol batch (linksonder), en lactaat-acetaat batch (rechtsonder)

Uit de resultaten blijkt dat in de niet gestimuleerde test geen afbraak van *cis*-DCE plaatsvindt, gedurende de looptijd van de test blijft DCE gelijk.

In alle drie de testen waaraan een koolstofbron is toegevoegd treedt volledige anaerobe reductieve dechlorering van DCE, via VC, naar etheen/ethaan op. Dit duidt erop dat het uitblijven van afbraak in de niet gestimuleerde test het gevolg is van een tekort aan voor de afbraak bruikbare koolstofbron en/of de afwezigheid van specifiek VOCl afbrekende bacteriën.

In alle drie de gestimuleerde afbraaktesten treedt, nadat alle *cis*-DCE en VC is omgezet naar ongechloreerde eindproducten, methaanvorming op. Dit proces (methanogenese), waarbij de toegediende koolstofbron wordt omgezet in methaan, wordt onderdrukt zolang als er VOCl aanwezig is.

De afbraak verloopt het snelst in de positieve controle, de test waarbij een lactaat-acetaat mengsel is toegediend om de afbraak van *cis*-DCE te stimuleren, en in de ethanol test. Opgemerkt dient te worden dat de toegevoegde dechlorerende biomassa ook op acetaat-lactaat is opgegroeid, mogelijk is de kweek hier al aan geadapteerd. De afbraak verloopt het langzaamst in de test met een langzaam vrijkomende koolstofbron (chitine). In deze test is ook sprake (zie bijlage 1) van een langere lagfase, na 16 weken is in Q1 (zie bijlage 1) nog geen afbraak van *cis*-DCE waargenomen. Deze lagfase is het gevolg van de slow-release eigenschappen van chitine (zie resultaten tabel 2) waardoor er bij aanvang nog onvoldoende opgelost organisch materiaal beschikbaar is om de afbraak van VOCl te stimuleren.

In onderstaande tabel 2 zijn de resultaten van de metingen op sulfaat, TOC (totaal organisch koolstof, maat voor beschikbare hoeveelheid electronendonor) en pH.

Tabel 2. Resultaten pH, sulfaat en TOC meting batches Q, R, S en U

Batchtest	Q (Chitine)			R (Ethanol)			S (Lactaat-acetaat)			U (intrinsiek)	
tijd na start	Start	4 wk	16 wk	Start	4 wk	16 wk	Start	4 wk	8 wk	Start	16 wk
sulfaat (mg/l)	238	214	17	238	13	< 8	238	12	< 8	238	259
pH (-)	6,6	6,7	6,4	6,6	6,7	6,5	6,6	6,7	7	6,6	
TOC (mg/l)	6,3	8,4	150	6,3	1.400	734	6,3	790	-	6,3	< 10

Uit de resultaten blijkt dat in de testen waarin de afbraak van VOCl is gestimuleerd (en afbraak ook plaatsvindt) de concentraties sulfaat sterk afnemen. Van circa 240 mg/l bij aanvang tot minder dan 20 mg/l gedurende de test. Deze afname verloopt het snelst in de met ethanol en lactaat-acetaat gestimuleerde testen. In deze testen is direct bij aanvang circa 2.000 mg/l aan TOC aanwezig (de toegediende hoeveelheid). Na vier weken incubatie is de TOC concentratie in deze batches afgenomen tot respectievelijk 790 mg/l (lactaat-acetaat) en 1.400 mg/l (ethanol). Dit is conform verwachting aangezien beide goed oplosbare en snel afbreekbare koolstofbronnen zijn. Deze TOC is gebruikt om de aanwezige sulfaat te reduceren tot sulfide (niet op geanalyseerd) en de aanwezige VOCl af te breken. In de chitine test is de toename in opgelost TOC langzamer en geringer dan in de andere twee testen, dit duidt er op dat de koolstofbron in deze test langzamer vrij komt. De maximaal gemeten TOC concentratie in met chitine gestimuleerde batch bedraagt 150 mg/l, beduidend lager dan in de overige twee batches. In deze test verloopt de afname (reductie) van sulfaat ook langzamer. In de intrinsieke batch (waar geen koolstofbron is gedoseerd en geen afbraak plaatsvindt) blijft de sulfaatconcentratie na 16 weken vergelijkbaar met de concentratie bij start van de test.

In tabel 3 zijn de microbiële parameters van de chitine, ethanol en lactaat-acetaat test weergegeven. Er zijn geen moleculaire metingen direct na toediening van de dechlorerende kweek uitgevoerd. De concentratie *Dehalococcoides* spp bedraagt, op basis van het toevoegen van 1 ml kweek met een dichtheid van 1E+07 cellen/ml, circa 7E+05 cellen/ml in iedere fles. In tabel 3 zijn de resultaten van de DNA- en RNA-analyses weergegeven voor DHC en *vcr*A (gen betrokken bij VC afbraak).

Tabel 3. Resultaten van de microbiële parameters voor de Q, R en S batchtesten

Batchtest	Q-batch (chitine)				R-batch (ethanol)				S-batch (lactaat-acetaat)		
tijd na start	start	4 wk	8 wk	16 wk	start	4 wk	8 wk	16 wk	start	4 wk	8 wk
DNA-analyses											
Totaal bact	1E+07	6E+07	6E+08	-	1E+07	5E+07	2E+08	-	1E+07	7E+06	1E+08
DHC	-[1)]	2E+06	4E+07	-	- [1)]	6E+04	1E+07	-	- [1)]	1E+06	5E+07
vcrA	-[1)]	6E+03	6E+06	-	- [1)]	3E+03	2E+06	-	- [1)]	6E+04	7E+06
RNA-analyses											
DHC		2E+06	4E+07	4E+07		3E+06	7E+06	4E+06		2E+07	1E+08
vcrA		<2E+04	2E+06	6E+05		3E+05	3E+05	2E+05		4E+06	1E+07

-: niet geanalyseerd

< : kleiner dan detectielimiet (indien detectielimiet groter is dan 10^3 is de detectielimiet weergegeven)

Totaal bact: totaal bacteriën

DHC: *Dehalococcoides* spp, bacterie in staat tot volledige afbraak van cis-DCE naar etheen/ethaan via reductieve dechlorering

vcrA: gen betrokken bij afbraak van VC

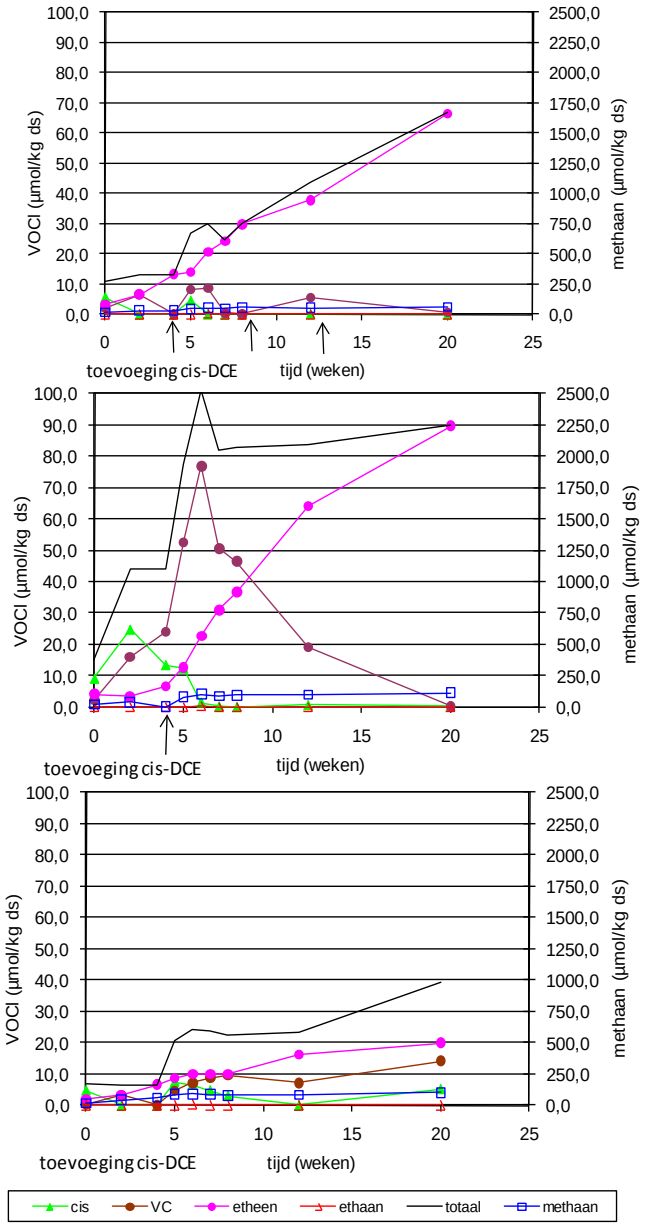
[1)] Op basis van berekening 7E+05 cellen/ml in batch (zie tabel 1)

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat in alle gestimuleerde batches in de beginfase een toename in het aantal specifiek VOCl afbrekende bacteriën (DHC) heeft plaatsgevonden. Alle drie de geteste substraten ondersteunen de groei van een VOCl afbrekende bacteriepopulatie. Daarnaast heeft er ook een duidelijke toename plaatsgevonden van het *vcr*A gen, dit gen is betrokken bij de afbraak van VC. Uit de analyses op het RNA (geeft aan of de cellen actief zijn) blijkt dat in alle testen de dechlorerende bacteriën actief zijn/actiever worden. Uit de meting op het vcrA gen blijkt dat deze in de ethanol en lactaat-acetaat testen ilangzamer op gang komt dan in de ethanol en lactaat-acetaat testen (dit komt overeen met de VOCl data).

2.2 Effect dosering alleen biomassa op afbraak VOCl

In onderstaande figuur zijn de resultaten van de drie afzonderlijke GC flessen van de biomassa batchtest weergegeven (T1, T2 en T3). Aan deze flessen is op verschillende tijdstippen extra verontreiniging (*cis*-DCE) toegevoegd (met een pijl aangegeven in de grafieken). Opgemerkt dient te worden dat bij de T2 fles bij start van test per abuis extra *cis*-DCE is toegevoegd resulterend in een hogere aanvangconcentratie.

In alle drie de flessen treedt sequentiële afbraak van *cis*-DCE, via VC naar etheen plaats. Ook na herhaaldelijk toedienen van DCE (T1 en T3) De afbraaksnelheid van *cis*-DCE en vormingsnelheid van etheen verschilt echter per fles (vooral in T3 is de snelheid beduidend lager). De oorzaak hiervan is niet bekend. In tegenstelling tot de met koolstofbron gestimuleerde batches treedt er in de biomassa batch geen methaanvorming op zodra DCE volledig is afgebroken tot etheen (zie grafiek T1).



Figuur 4. VOCl resultaten T-batch (van boven naar beneden: GC fles T1, T2 en T3)

In tabel 4 zijn de resultaten van sulfaat, TOC en pH meting weergegeven van de biomassa batchtest.

Tabel 4. Resultaten pH, sulfaat en TOC van de T-batch

weken	start	2	4	8	20 *
Sulfaat (mg/l)	238	67	61	-	133
pH	6,6	-	7	-	6,8
TOC (mg/l)	6,3	18	-	13	<10

* gemiddelde van drie flessen (T1, T2 en T3)

-: niet bepaald

Uit de resultaten blijkt dat na twee weken de sulfaatconcentratie sterk is afgenomen van circa 240 mg/l naar circa 60-70 mg/l. Deze concentratie neemt echter in de loop van de batch niet verder af. Uit ervaring blijkt dat indien de afbraak van VOCl wordt gestimuleerd door toevoeging van een koolstofbron en dechlorerende bacteriën de sulfaatconcentratie afneemt tot > 20 mg/l (zie ook paragraf 3.1). In de flessen van de T-batch blijft de concentratie sulfaat hoog (dit blijkt ook uit de meting van de individuele flessen T1, T2 en T3 tijdens de eindmeting (20 weken). Uit de TOC resultaten blijkt dat er in de toegediende kweek nog een geringe hoeveelheid TOC aanwezig was (TOC op 2 weken is 18 mg/l). Uit de resultaten blijkt dat deze TOC langzaam wordt verbruikt, na 20 weken is het TOC gehalte afgenomen tot beneden de detectielimiet van 10 mg/l. Hieruit blijkt dat sulfaatconcentraties > 20 mg/l niet remmend hoeven te werken op de afbraak van VOCl. Het is mogelijk dat de waterstofspanning voldoende hoog is (1,6 nM) voor de omzetting van CIS en VC naar etheen maar te laag is (2,5 nM) voor sulfaat reductie (Hoelen 2003).

Bij start van de test is er net als aan de gestimuleerde batches een kweek met specifiek VOCl afbrekende bacteriën aan de batchflessen toegediend. Het betrof in dit geval een overmaat (factor 10 meer dan aan de overige gestimuleerde batches). In deze bacteriekweek zijn ook andere bacteriën aanwezig (zoals sulfaatreduceerders), er is echter geen moleculaire karakterisatie gemaakt van deze kweek. Ook zijn er geen moleculaire monsters genomen direct na toediening van de kweek. Op basis van de gemeten concentratie DHC in de kweek (1E+7 cellen/ml) is berekend dat het aantal *Dehalococcoides* spp bij aanvang circa 7E+06 cellen/ml bedraagt.

In tabel 8 zijn de resultaten van de DNA-anlyses en RNA-analyses weergegeven. Op tijdstip 8 en 20 weken is het gemiddelde van drie flessen (T1, T2 en T3) weergegeven.

Tabel 5. Resultaten microbiële parameters T-batch (biomassa test)

Weken	0	2	4	8 *	20 *
DNA					
totaal bact	1E+07	2E+06	4E+06	8E+08	-
DHC	-[1)]	6E+05	2E+05	7E+08	6E+08
vcrA	- [1)]	1E+05	2E+04	1E+08	-
RNA					
DHC	-	5E+07	5E+06	4E+08	3E+08
vcrA	-	1E+07	5E+06	3E+07	-

*: gemiddelde van drie flessen: T1, T2 en T3

-: niet geanalyseerd

<: kleiner dan detectielimiet (indien detectielimiet groter is dan 10^3 is de detectielimiet weergegeven)

Totaal bact: totaal bacteriën

DHC: *Dehalococcoides* spp, bacterie in staat tot volledige afbraak van cis-DCE naar etheen/ethaan via reductieve dechlorering

*vcr*A: gen betrokken bij afbraak van VC

[1)] Op basis van berekening 7E+06 cellen/ml in batch (zie tabel 1)

Uit de resultaten van de DNA analyses blijkt dat het aantal DHC gedurende de incubatieperiode van 20 weken vrijwel stabiel is. Dit blijkt ook uit de meting op *vcr*A gen, de expressie blijft met 10^7 gedurende de incubatieperiode hoog. Mogelijk dat in de eerste paar dagen een toename in DHC bacteriën heeft plaatsgevonden (van 10^6 cellen/ml naar 10^8 cellen/ml), maar dit is niet meer te verifiëren omdat de metingen in verschillende flessen is uitgevoerd (heterogeniteit van de flessen onderling). Feit is dat het aantal DHC gedurende lange tijd (minimal vijf maanden) zonder of met zeer weinig TOC kan overleven en actief blijven. Uit de RNA-analyses, welke een maat zijn voor de activiteit (optreden van het desbetreffende proces), blijkt dat *Dehalococcoides* en het vcrA gen gedurende de incubatieperiode) zelfs actiever worden dan bij aanvang van de test.

3. Discussie en conclusies

Uit de resultaten beschreven in hoofdstuk 3 blijkt dat in alle gestimuleerde afbraaktesten volledige afbraak van VOCl plaatsvindt. De resultaten van de testen met ethanol, chitine en alleen biomassa zijn bruikbaar voor het uitwerken van combinatieconcepten. Hieronder zijn de voor en nadelen van de verschillende toevoegingen (op het afbraakproces en op de bodemcondities) kort besproken.

Conform verwachting treedt volledige dechlorering op door toevoeging van ethanol en (geringe) biomassa. De snelheid van het afbraakproces is vergelijkbaar met de snelheid van de afbraak waarbij het goed afbreekbare acetaat-lactaat is toegevoegd (positieve controle). Het betreft hier een zeer snelle afbraak. De toegediende ethanol zorgt voor een verandering in redoxcondities, sulfaat wordt verwijderd. Nadat alle VOCl is verbruikt zorgt de toegediende ethanol daarnaast ook voor methaanvorming. Door het toevoegen van ethanol (net als bij het toedienen lactaat-acetaat) veranderen de redoxcondities.

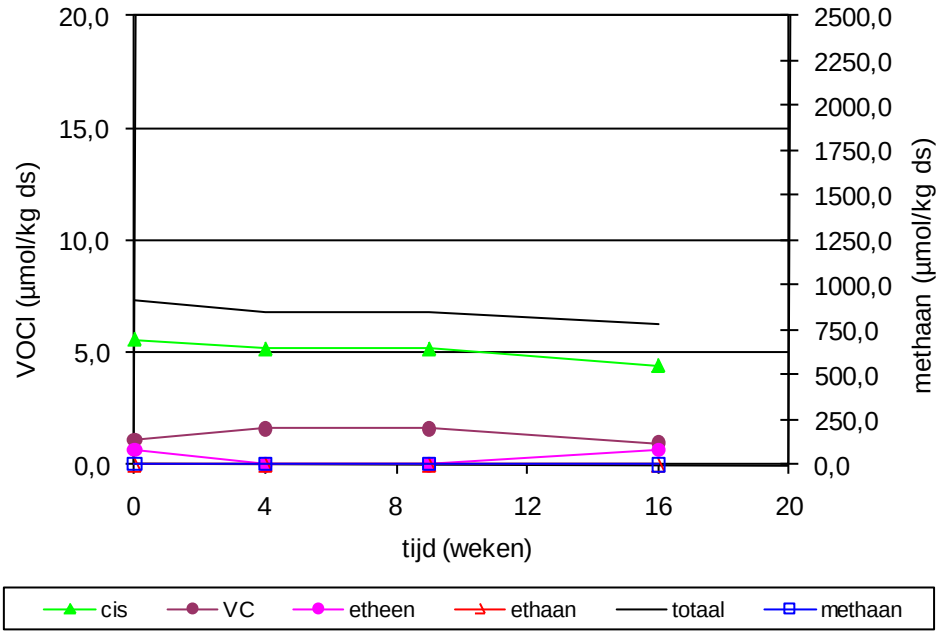
Het voordeel van het toedienen van chitine aan de bodem is dat er per tijdseenheid minder assimileerbaar koolstof in het water terecht komt (langzame afgifte). Hierdoor verloopt het afbraakproces dus langzamer maar ook andere processen kunnen daardoor langzamer verlopen. Maar door het toedienen van chitine veranderen, net als in het geval van toediening van ethanol, de redoxcondities en treedt er methaanvorming op nadat het dechloreringsproces is gestopt.

In de test waarbij alleen biomassa is toegediend blijkt dat door het toedienen van alleen biomassa alleen het dechloreringsproces wordt gestimuleerd. Andere processen zoals sulfaatreductie en methanogenese, die in de ethanol en chitine batch plaatsvinden, worden niet gestimuleerd. Waarschijnlijk is er voor deze processen te weinig assimileerbaar koolstofbron aanwezig. Hierdoor vindt er dus minder groei van bacteriën plaatsen is er nagenoeg geen verandering in redoxcondities. Het risico op fouling is hierdoor laag.

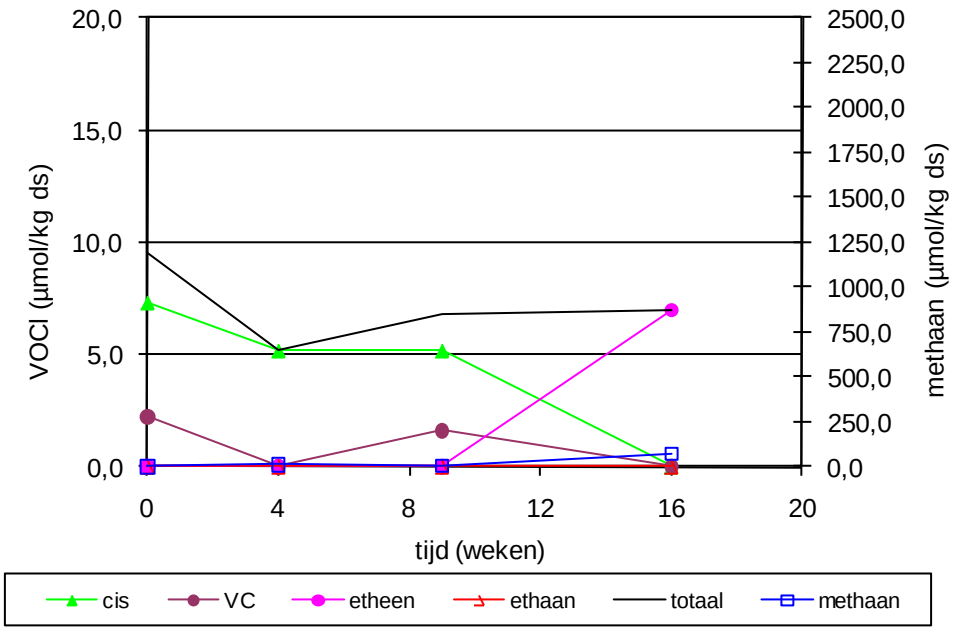
Bijlagen

Bijlage 1 Individuele GC resultaten chitine, ethanol, lactaat-acetaat, biomassa en intrinsieke test

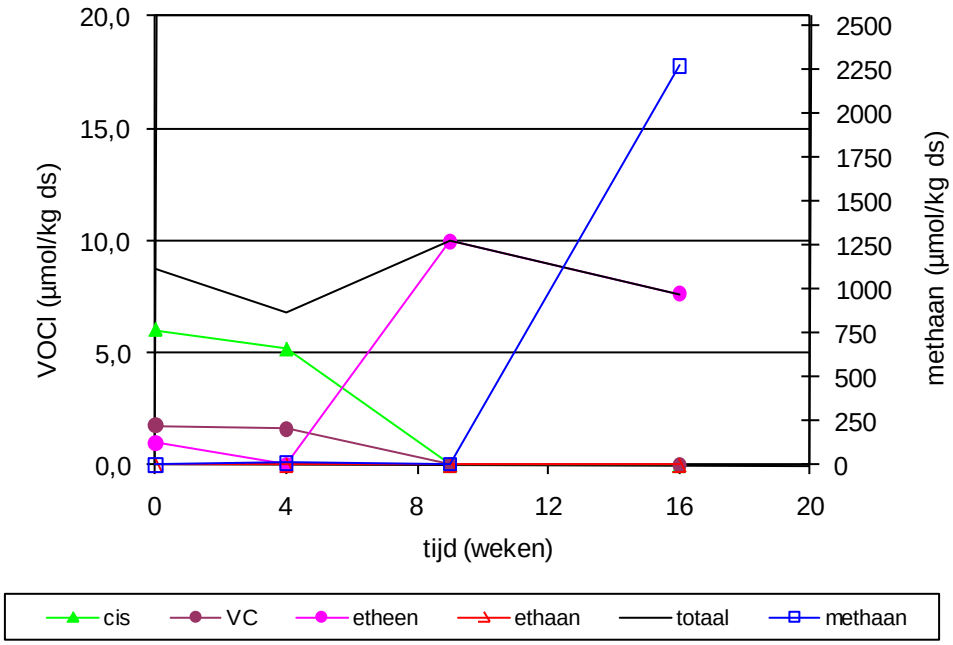
Chitine (Q) batch, flessen Q1, Q2, Q3



Q1

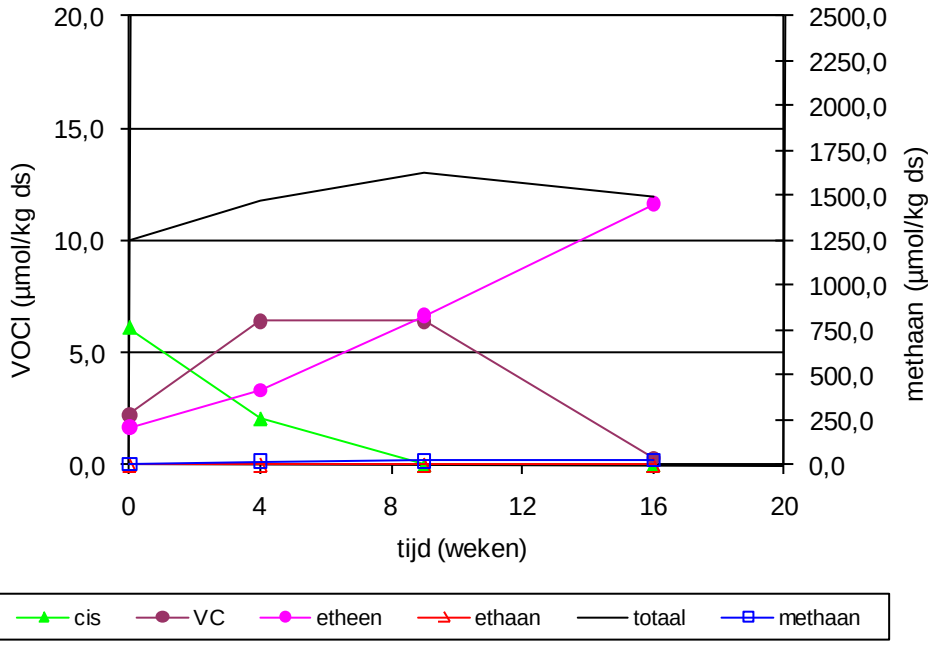

20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
VOCl (µmol/kg ds)
2500,0
2250,0
2000,0
1750,0
1500,0
1250,0
1000,0
750,0
500,0
250,0
0,0
methaan (µmol/kg ds)
0
4
8
12
16
20
tijd (weken)
cis
VC
etheen
ethaan
totaal
methaan

Q2

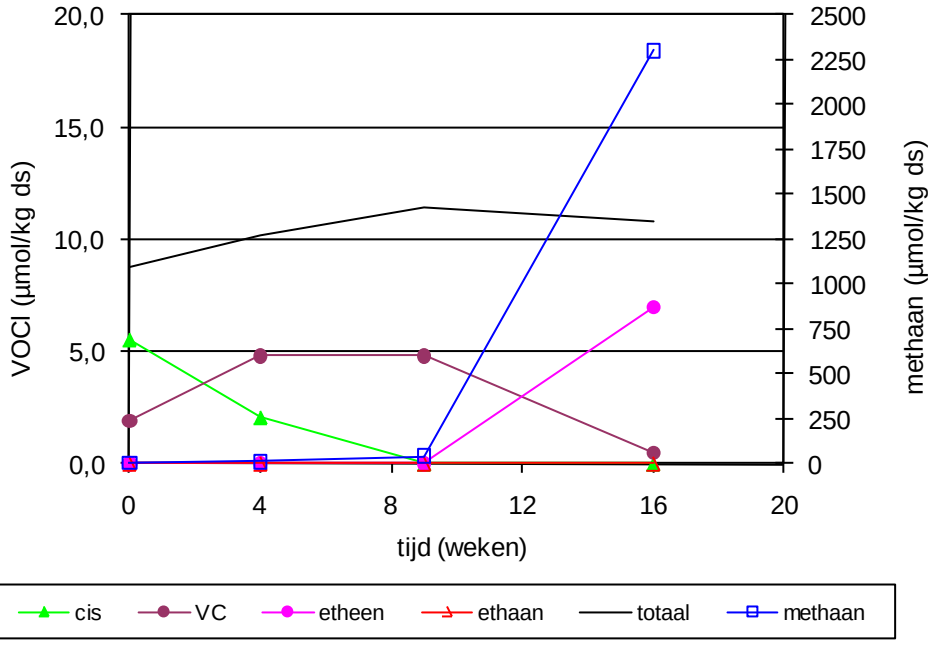

20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
VOCl (µmol/kg ds)
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
methaan (µmol/kg ds)
0
4
8
12
16
20
tijd (weken)
cis
VC
etheen
ethaan
totaal
methaan

Q3

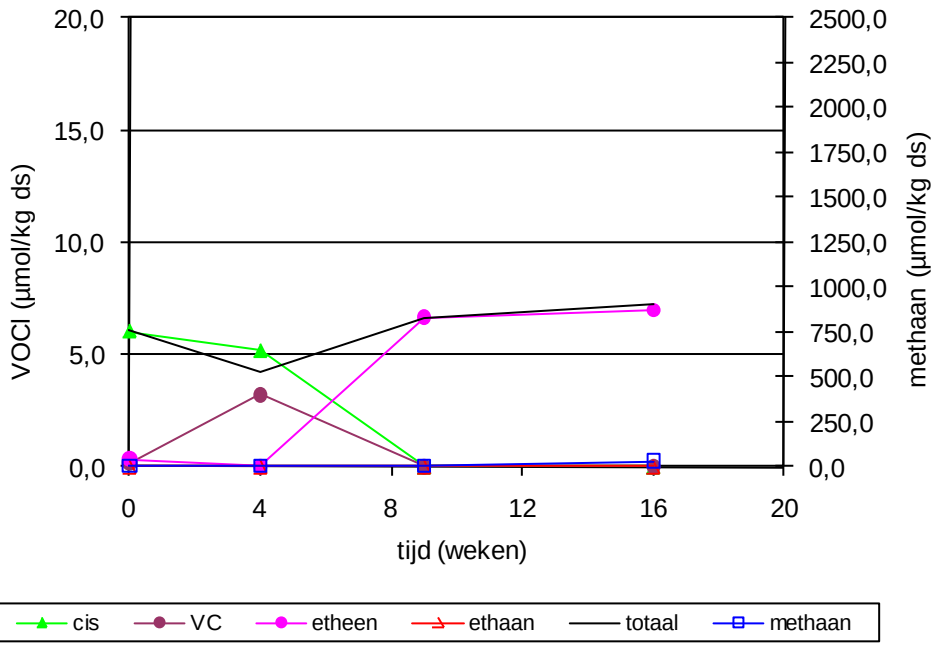
Ethanol (R) batch, flessen, R1, R2, R3



R1

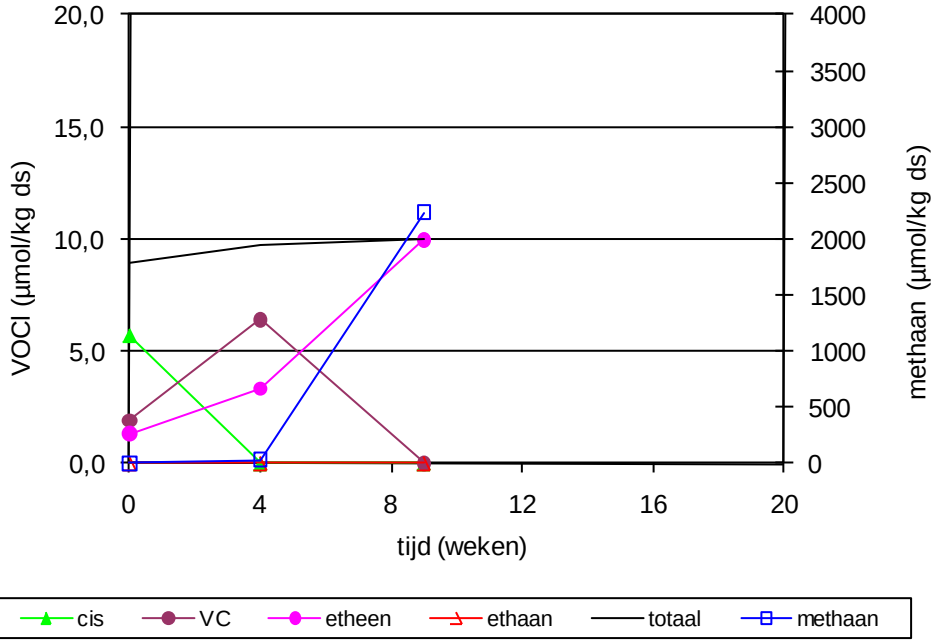


R2

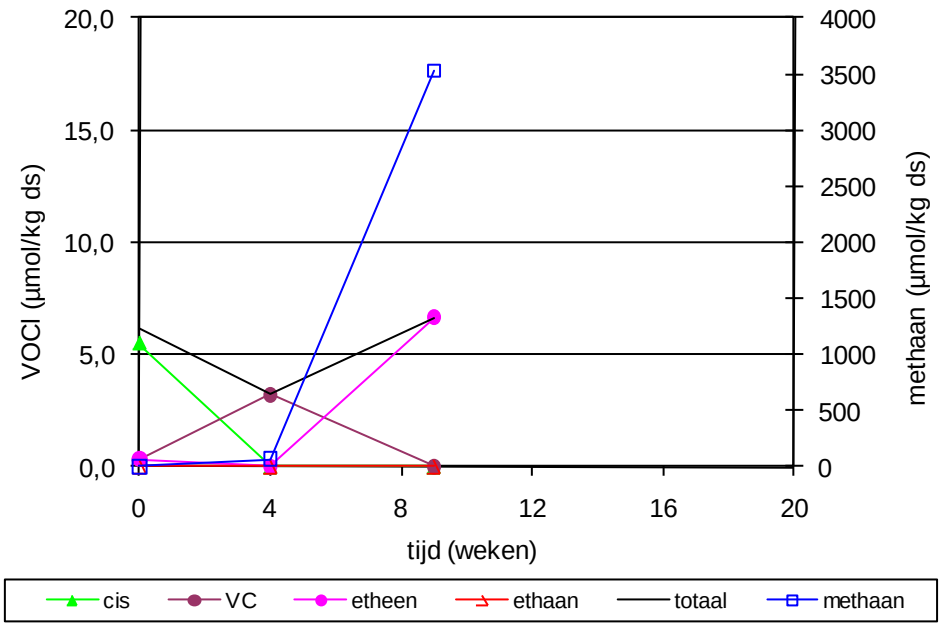


R3

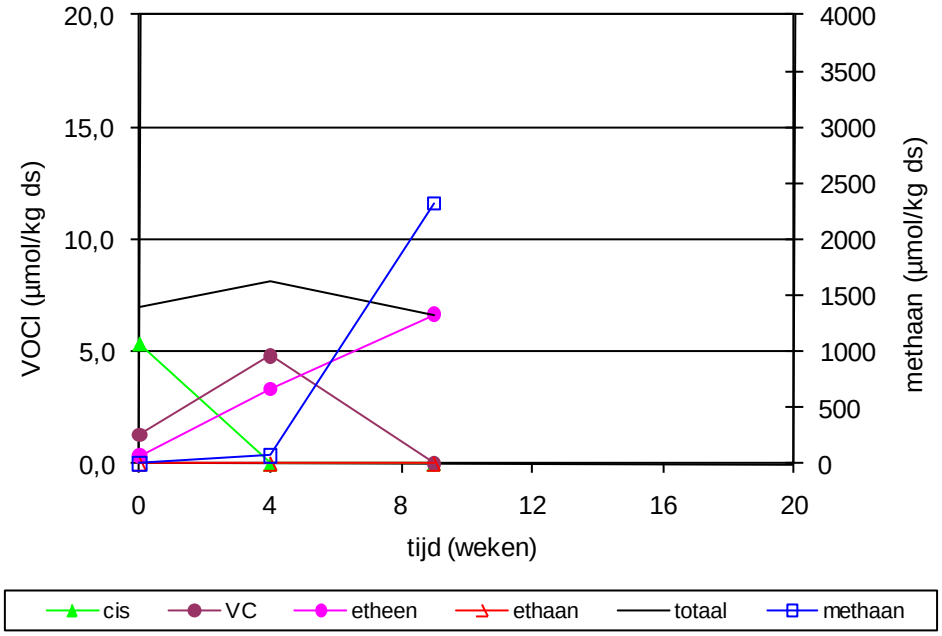
Lactaat-acetaat (S) batch, flessen S1, S2, S3



S1

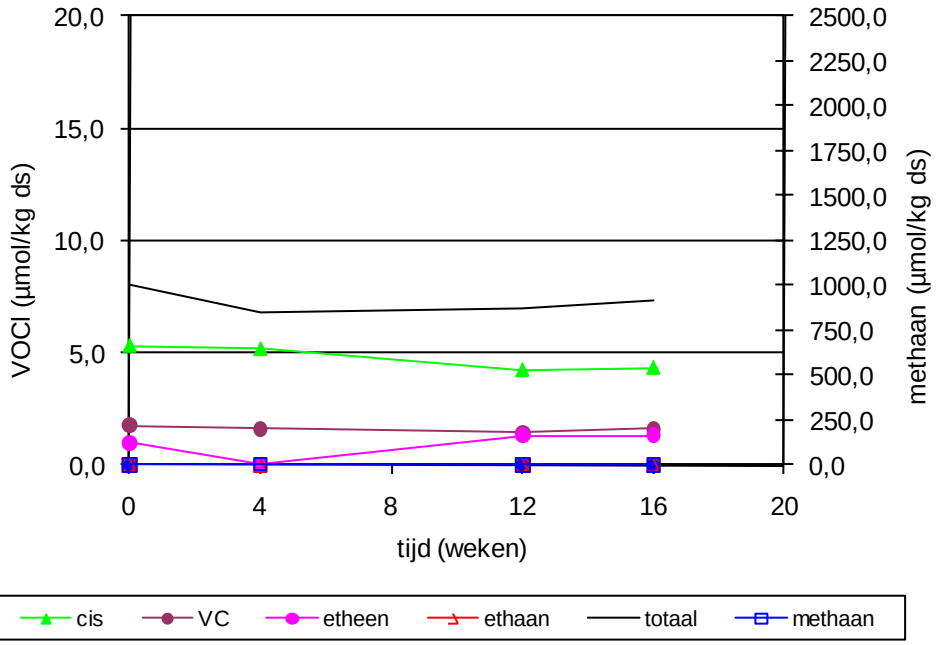

20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
VOCl (µmol/kg ds)
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
methaan (µmol/kg ds)
0
4
8
12
16
20
tijd (weken)
cis
VC
etheen
ethaan
totaal
methaan

S2

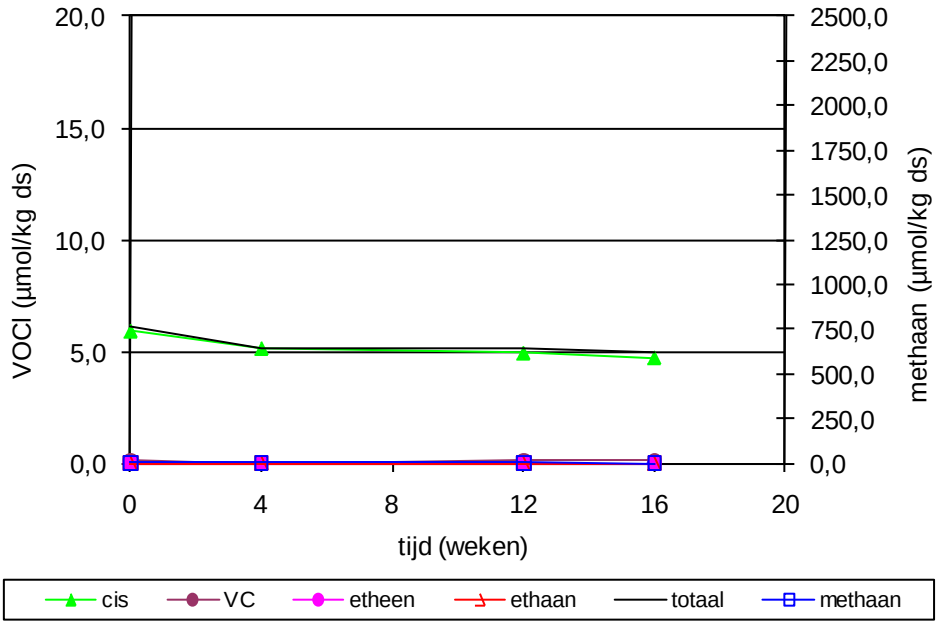

20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
VOCl (µmol/kg ds)
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
methaan (µmol/kg ds)
0
4
8
12
16
20
tijd (weken)
cis
VC
etheen
ethaan
totaal
methaan

S3

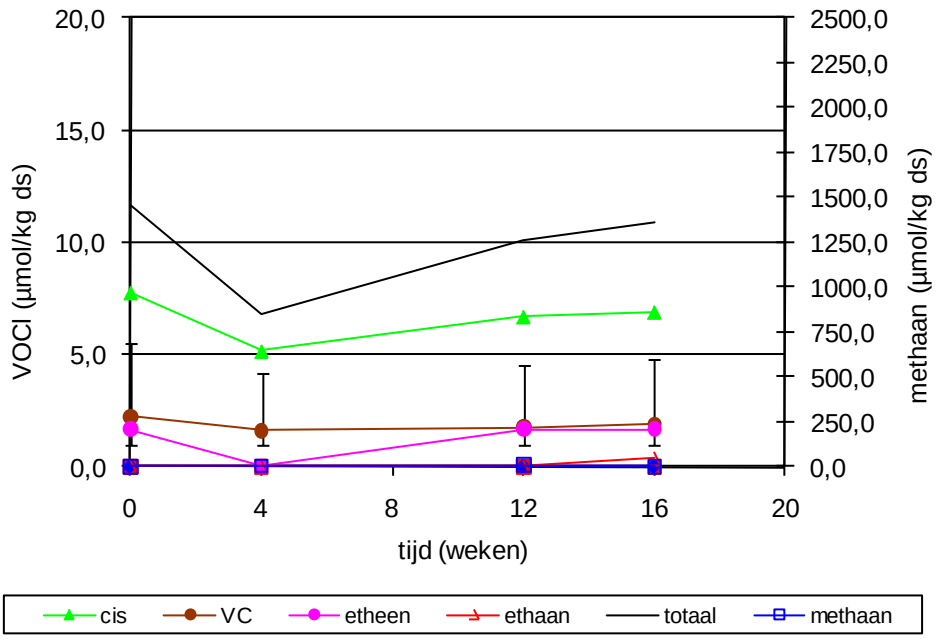
Intrinsieke (U) batch, flessen U1, U2, U3



U1

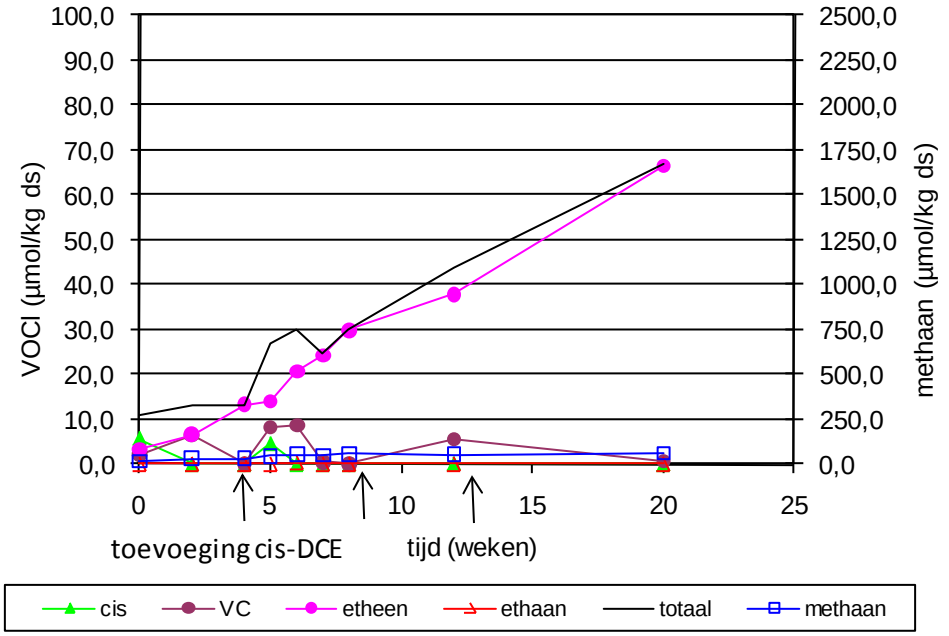


U2

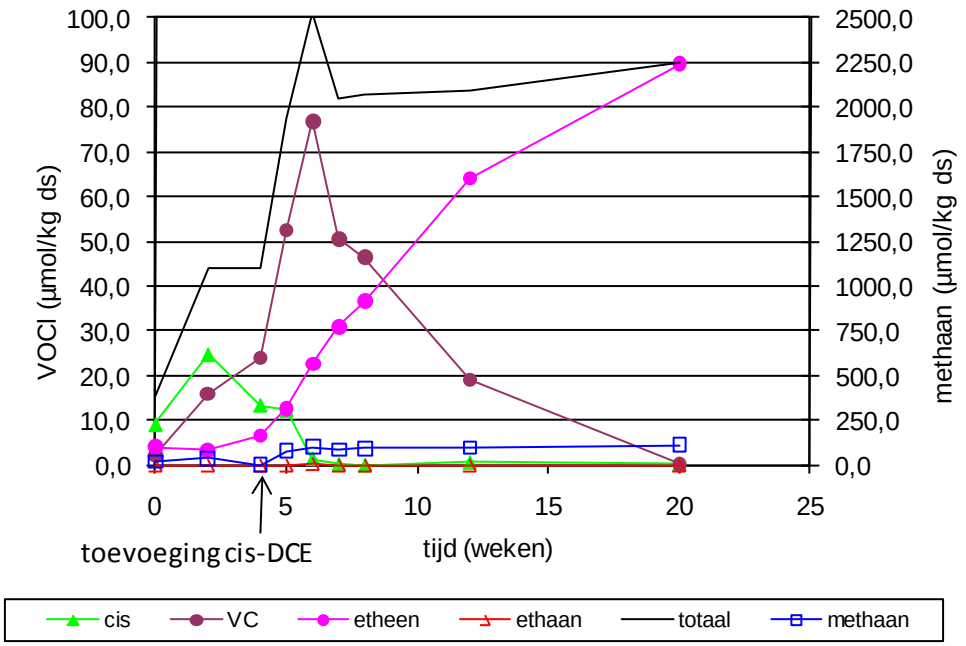


U3

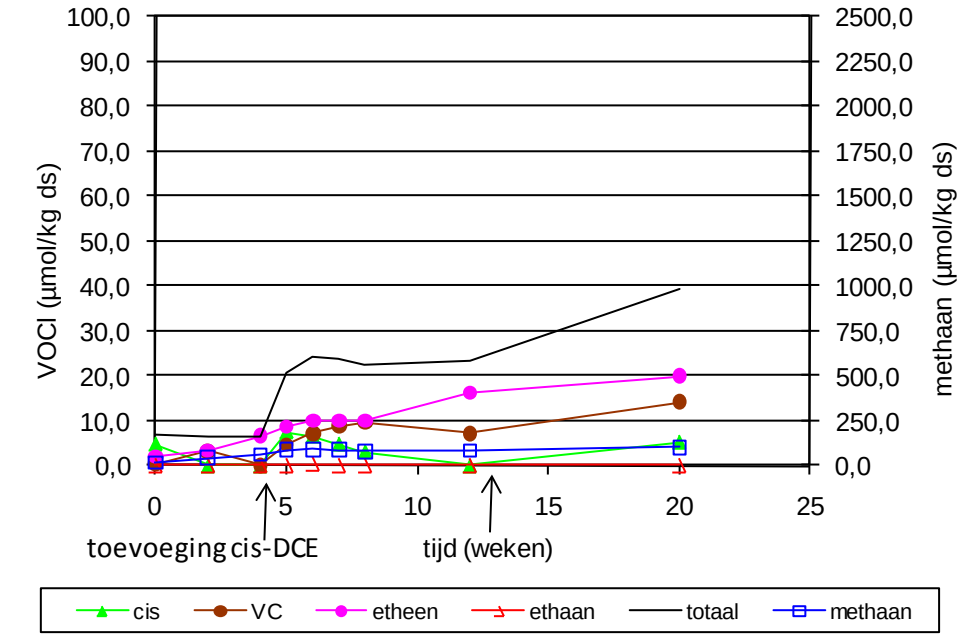
Biomassa (T) batch flessen T1, T2 en T3



T1


100,0
90,0
80,0
70,0
60,0
50,0
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
VOCl (µmol/kg ds)
2500,0
2250,0
2000,0
1750,0
1500,0
1250,0
1000,0
750,0
500,0
250,0
0,0
methaan (µmol/kg ds)
0
5
10
15
20
25
toevoeging cis-DCE
tijd (weken)
cis
VC
etheen
ethaan
totaal
methaan

T2


100,0
90,0
80,0
70,0
60,0
50,0
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
VOCl (µmol/kg ds)
2500,0
2250,0
2000,0
1750,0
1500,0
1250,0
1000,0
750,0
500,0
250,0
0,0
methaan (µmol/kg ds)
0
5
10
15
20
25
toevoeging cis-DCE
tijd (weken)
cis
VC
etheen
ethaan
totaal
methaan

T3

Bijlage VIII
Details hypothetische locatie

tabel B2 Eigenschappen van de hypothetische locatie

Eigenschap	Situatie op de locatie
Bodemopbouw	1e watervoerend pakket: 0-18 m-mv, zand 1e scheidende laag: 18-20 m-mv, klei 2e watervoerend pakket: 20-75 m-mv, zand, doorlatendheid: 30 m/d 2e scheidende laag: 75-80 m-mv, klei Porositeit van de zandlagen is 0,3.
Verontreiniging	Gemiddeld 10.000 µg/l VOCl over een oppervlakte van 50 bij 25 meter tot een diepte van 18 m-mv in het 1e watervoerend pakket, geen puur product Gemiddeld 100 µg/l en maximaal 1000 µg/l VOCl over een oppervlakte van 200 bij 50 meter op een diepte van 20 tot 50 m-mv in het 2e watervoerend pakket
Chemische en biologische eigenschappen grondwater	0 mg/l nitraat, 10 mg/l ijzer, 100 mg/l sulfaat, 0,05 mg/l methaan (sulfaatreducerende redoxcondities), 0,5% organisch stof in de zandlagen. In de bodem vindt natuurlijke afbraak van VOCl plaats en er zijn dechlorerende bacteriën aanwezig maar de natuurlijke afbraak is onvoldoende snel om te voorkomen dat de verontreiniging zich de komende jaren zal verspreiden
WKO-systeem (2 opties)	WKO-systeem voor 25.000 à 30.000 m² bruto vloeroppervlak 1000 vollasturen per jaar WKO-doublet: capaciteit van 200 m³/uur, gemiddelde waterverplaatsing 200.000 m³/seizoen WKO-recirculatie: capaciteit van 350 m³/uur, gemiddelde waterverplaatsing 350.000 m³/seizoen WKO-triplet: dit systeem is nog nooit op de tekentafel in detail uitgewerkt. In het onderzoek wordt uitgegaan van een capaciteit van circa 275 m^3/uur en een gemiddelde waterverplaatsing van 175.000 m^3/seizoen
WKO-putten configuratie (2 opties)	WKO-doublet: 1 doublet met filter van 20 tot 75 m-mv. Afstand tussen warme en koude bron = 150 m. Brondiameter = 700 mm WKO-recirculatie: 4 bronnen met filter van 20 tot 75 m-mv. 2 onttrekkingsbronnen en 2 infiltratiebronnen bij elkaar met 20 tussenafstand. Afstand tussen onttrekkingsbronnen en infiltratiebronnen 225 m. Brondiameter = 800 mm Omdat het Triplet nog nooit in detail is uitgewerkt kunnen we geen uitspraak doen over de exacte ligging en eigenschappen van de putten.

Bijlage IX
Gedetailleerde kostenramingen combinatie-concepten

1.1 Uitwerking referentievarianten

1.1.1 Referenties WKO-systeem

De referentievarianten van het WKO-systeem bestaan uit een standaard verwarming- en koelingsysteem, een standaard WKO-doubletsysteem en een standaard WKO-recirculatiesysteem die allemaal dezelfde hoeveelheid energie kunnen leveren voor 25.000 à 30.000 m² bruto vloeroppervlak. In het overzicht is ook het WKO-triplet toegevoegd (zie paragraaf 6.4.4) om inzicht te krijgen in de meerkosten van een aangepast WKO-ontwerp.

Tabel 5. Kostenraming referentievarianten standaard koeling- en verwarmingsysteem

	standaard koeling en verwarming (€)	WKO-doublet-systeem (€)	WKO-recirculatie-systeem (€)	WKO-triplet (€)
Investeringskosten				
Investeringskosten collectieve ketels en koelmachines incl. droge koelers	582.000			
Grondwatersysteem, incl. warmtepompen, vergunning Waterwet en belastingvoordeel op investeringskosten (EIA) (excl. ontwerp en overige advieskosten)		749.000	995.000	861.000
Exploitatiekosten (jaarlijks)				
Kosten gas en elektriciteit	228.800	93.400	93.400	93.400
Monitoring vergunning Waterwet + onderhoud en beheer energieopwekking	17.500	24.800	30.300	27.300
Terugverdientijd				
Terugverdientijd t.o.v. standaard koeling en verwarming		1,3 jaar *	3,4 jaar *	2,2 jaar *

* De terugverdientijd van de WKO-systemen zijn relatief kort. Dit komt doordat de veronderstelde locatie-eigenschappen gunstig zijn en uit is gegaan van een WKO-systeem dat optimaal draait. In de praktijk blijken vaak langere terugverdientijden gehaald te worden van gemiddeld 5 jaar.

1.1.2 Referentie bodemsanering

De meest geschikte bodemsaneringstechniek om de verontreiniging op de hypothetische locatie volledig te saneren is naast de genoemde factoren sterk afhankelijk van omgevingsfactoren zoals het beleid van het bevoegd gezag (gevalsgerichte benadering of gebiedsgerichte benadering), bodemopbouw, hydrologische situatie en de aanwezigheid van kwetsbare objecten (zoals drinkwaterwinning). Voor situaties dat de verontreiniging zowel in het 1^{e} als 2^{e} watervoerend pakket binnen korte tijd volledig gesaneerd dient te worden, is als referentievariant gekozen voor een sanering door middel van gestimuleerde biologische afbraak.

Er is voor deze techniek gekozen omdat het een bewezen kosteneffectieve saneringsmethode is voor VOCl-verontreinigingen met pluimlengtes van tientallen tot maximaal enkele honderden meters in goed doorlatende bodempakketten. Met deze saneringstechniek is op basis van de ervaringen van Bioclear een saneringsrendement van 99% te behalen. Grote VOCl-pluimen (met lengtes van honderden tot duizenden meters) worden vanwege de kosten tot op heden meestal niet verwijderd maar hoogstens beheerst.
Voor de beheersvariant is uitgegaan van een pump&treat installatie voor zowel het eerste als tweede watervoerend pakket. Pump&treat is een bewezen saneringstechniek om een verontreiniging te beheersen of deels te verwijderen. Praktijkervaring leert dat pump&treat in veel gevallen eeuwigdurend is omdat vaak een grote restverontreiniging achterblijft.
Indien voldoende natuurlijke afbraak op zou treden, kan hiermee beheersing en op lange termijn verwijdering van de verontreiniging worden gerealiseerd. Door in te zetten op monitoring van natuurlijke afbraak is een minimale saneringsinspanning noodzakelijk die bestaat uit het aanleggen van een monitoringsnetwerk en het uitvoeren van monitoringen. Met het uitvoeren van een sanering gebaseerd op monitoring van natuurlijke afbraak is de vrachtreductie over meerdere jaren zeer gering en doordat in de meeste watervoerende pakketten de condities voor natuurlijk afbraak van vooral chloorkoolwaterstoffen niet optimaal zijn, zal de verontreinigingsomvang op de voorbeeldlocatie waarschijnlijk toenemen. De kosten van de referentievarianten zijn in tabel 7 weergegeven.

Tabel 6. Kostenraming referentievarianten bodemsanering 1e en 2e watervoerend pakket

	Kosten (€)
Uitvoering van biologische bodemsanering door toevoeging van lactaat/acetaat, nutriënten en DHC-kweek, inclusief monitoring (middels het TCE-concept à circa € 4,- per m^3 bodemvolume)	1.300.000
Pump&treat met 4 putten in zowel eerste als tweede watervoerend pakket (debiet van 40 m^3/u). Aanleg ontijzeringsinstallatie en VOCl stripper (€ 150.000). Aanleg monitoringspeilbuizen. Monitoring en exploitatie kosten zuivering voor 30 jaar (€ 20.000 per jaar)	870.000
Aanleggen van monitoringsnetwerk (€ 40.000,-) en het uitvoeren van een jaarlijkse monitoringsronde over een periode van 30 jaar ten behoeve van het volgen van natuurlijke afbraak (€ 10.000,- per ronde).	340.000

1.2 Kostenraming WKO en beheersing/ WKO en natuurlijke afbraak

Uitgangspunt bij het combineren van WKO en beheersing is dat een standaard WKO-systeem gebruikt kan worden. Ook voor het combinatieconcept waarbij een WKO-systeem met natuurlijke afbraak wordt gecombineerd wordt er van uit gegaan dat een standaard WKO-systeem volstaat. Met beide combinatieconcepten zal de verontreinigingsvracht in het 2^{e} watervoerend pakket naar verwachting in de loop van jaren slechts in beperkte mate afnemen. Vanwege mogelijke verspreiding of het achterblijven van een grote restverontreiniging wordt het in standhouden van een monitoringsnetwerk over een 30 jaar (oneindig) noodzakelijk geacht.

Tabel 7. Kostenraming combinatieconcept WKO en beheersing/ WKO en natuurlijke afbraak

	Monitoring natuurlijke afbraak WKO-doublet-systeem (€)	Monitoring natuurlijke afbraak WKO-recirculatie-systeem (€)
Investeringskosten		
Grondwatersysteem, incl. warmtepompen, vergunning Waterwet en belastingvoordeel op investeringskosten (EIA) (excl. ontwerp en overige advieskosten)	749.000	995.000
Aanleg monitoringsnetwerk ter plaatse van de verontreiniging (10 bemonsteringspunten met filters op 10, 25 en 40 m-mv en 4 op bemonsteringspunten met een filter op 60 m-mv)	40.000	40.000
Exploitatiekosten (jaarlijks)		
Kosten gas en elektriciteit	93.400	93.400
Monitoring vergunning Waterwet + onderhoud en beheer energieopwekking	24.800	30.300
Monitoringsronde	10.000	10.000
Terugverdientijd		
Terugverdientijd tov standaard koeling en verwarming	1,8 jaar	4,0 jaar
Saneringskosten		
Kosten van de sanering in 30 jaar	340.000	340.000

Belangrijk is om in het achterhoofd te houden dat bij een WKO-recirculatiesysteem het waarschijnlijk eenvoudiger is om de verontreiniging te beheersen. Tevens wordt er in een WKO-recirculatiesysteem meer grondwater rondgepompt waardoor de natuurlijke afbraak mogelijk meer wordt versneld dn in een WKO-doubletssyteem.

Als alternatief combinatieconcept kan gedacht worden aan het aanleggen van een transportleiding om het verontreinigde grondwater te transporteren naar een zone waar natuurlijke afbraak optreedt. De kosten voor het leggen van 125 mm HDPE leiding inclusief signaal- en stroomkabels en doorpersingen onder wegen door worden geraamd op € 35.000,- per kilometer. De eenmalige kosten zijn € 15.000 voor de aansluiting op het WKO-systeem en het zetten van twee infiltratieputten. De doorlopende kosten zijn € 5.000,- om de pomp draaiende te houden. Omdat er geen transport van verontreinigd water nodig is in de hypothetische case is deze variant niet opgenomen in de overzichttabel.

Om de natuurlijke afbraak van de verontreiniging in het 1^{e} watervoerend pakket van 0 tot 18 m-mv te stimuleren door het op te warmen kan een gesloten bodemwarmtewisselaarsysteem worden aangelegd. In de verontreiniging van 50 bij 25 meter zouden bijvoorbeeld 50 bodemwarmtewisselaars aangelegd kunnen worden. De kosten van deze bodemwarmtewisselaars zijn in totaal circa € 30.000,-. De warmte en koude opbrengst van deze bodemwarmtewisselaars is echter dermate laag dat een vergelijking met een standaard WKO-doubletsysteem en het WKO-recirculatiesysteem niet reëel is, deze variant is daarom niet opgenomen in de overzichtstabel.

1.3 Kostenraming WKO in combinatie met een reactieve zone

Voor de raming van de kosten van een combinatieconcept met een WKO-systeem en een reactieve zone is voor de overzichtelijkheid alleen de gedetailleerde uitwerking van het WKO-doubletsysteem weergegeven. Van het WKO-recirculatiesysteem en het WKO-triplet zijn wel de terugverdientijden weergegeven. Voor de combinatieconcepten met een reactieve zone wordt verwacht dat de gehele verontreiniging in het pakket onder de 1^{e} scheidende laag gesaneerd kan worden. De verontreiniging boven de 1^{e} scheidende laag kan niet met deze combinatieconcepten gesaneerd worden en dient daarom met een standaard saneringsmethode aangepakt te worden.

Opgemerkt wordt dat een effectieve reactieve zone zonder neerslagproblemen bij de filters voor WKO-doubletten meestal moeilijk te realiseren zal zijn dan bij een WKO-recirculatiesysteem of WKO-triplet.

1.3.1 Infiltratie DHC-kweek in de WKO-put

Aannames voor de kostenraming:

- Op basis van de afbraaktest die is uitgevoerd in het kader van Meer met Bodemenergie wordt aangenomen dat DHC cellen 6 maanden in leven kunnen blijven nadat ze geïnfiltreerd worden in een bodempakket waar maar een zeer beperkte hoeveelheid organisch koolstof aanwezig is. Op basis van kennis van Bioclear is vervolgens berekend dat 3200 liter DHC kweek nodig is met een dichtheid van $1*10^{9}$ cellen DHC per ml (veiligheidsmarge van een factor 2 aangehouden) om alle VOCl af te breken die in het 2^{e} watervoerende pakket aanwezig is. Omdat het los kopen van zoveel DHC kweek kostbaar is wordt aanbevolen om een kweekreactor op de locatie te plaatsen en daaraan een automatisch doseersysteem te koppelen. Om de 200m^{3}/uur van een WKO-doubletsysteem van voldoende DHC-cellen te voorzien is berekend dat een reactor van circa 20 m^{3} nodig is. Een kweekreactor voor DHC-kweek bestaat al (laboratorium Bioclear) maar niet op de benodigde schaal. De reactor van 20m^{3} zal daarom nieuw ontworpen moeten worden. De kosten voor het bouwen van een 20m^{3} bioreactor worden geschat op € 100.000,-. De doorlopende kosten van bioreactor worden geraamd op € 15.000 per jaar.
- Verwacht wordt dat met het doseren van DHC-kweek een hoog saneringsrendement wordt gehaald en maar 10 jaar monitoringsronden noodzakelijk zijn.
- DHC-kweek veroorzaakt waarschijnlijk geen putverstopping waardoor geen regeneratie van de WKO-putten noodzakelijk is.
- Het 1^{e} watervoerend pakket (0 - 18 m-mv) wordt gesaneerd door middel van een standaard biologische bodemsanering door middel van directe injecties van protamylasse en DHC-kweek. De kosten van deze bodemsanering bedraagt circa 340.000,- (uitgangspunt is circa € 15,- per m^{3} bodemvolume).

1.3.2 Infiltratie ethanol in de WKO-put

Aannames voor de kostenraming:

- Bij de infiltratie van ethanol om het 2e watervoerend pakket te saneren wordt ervan uit gegaan dat het WKO-systeem niet aangepast hoeft te worden, met uitzondering van het installeren van een automatisch doseringssysteem en een voorraadtank voor ethanol (€ 30.000,-). Door het toevoegen van ethanol zullen de DHC-cellen die in de bodem aanwezig zijn zich vermenigvuldigen en de VOCl verontreiniging afbreken.
- Om de hoeveelheid benodigde ethanol te berekenen wordt ervan uitgegaan dat bij het langdurig in stand houden van een gunstige zone voor VOCl afbraak uiteindelijk het gehele pakket waar het WKO-systeem in actief is wordt gereduceerd zodat er methanogene condities ontstaan. Er wordt vanuit gegaan dat de hoeveelheid ethanol die nodig is gelijk is aan de hoeveelheid koolstofbron die normaal bij een biologische bodemsanering wordt gebruikt. Voor onze hypothetische locatie betekent dit dat in totaal 269 m^3 60% alcohol nodig is. De kosten van een kuub 60% alcohol worden geraamd op € 500,-.
- Vermoed wordt dat nutriënten toegediend moeten worden om de groei van DHC te bevorderen. Op basis van een standaard biologische bodemsanering wordt verwacht dat circa € 20.000,- aan ammonium en fosfaat gedoseerd moet worden.
- verwacht wordt dat met het doseren van ethanol een hoog saneringsrendement wordt gehaald en maar 10 jaar monitoring noodzakelijk is.
- Verwacht wordt dat door het doseren van ethanol op den duur regeneratie van de WKO-putten noodzakelijk is. Het mechanisch regenereren en het 3-jaarlijks regenereren met chloorloog of peroxide kost circa € 10.000,- per jaar.
- Het 1e watervoerend pakket (0 - 18 m-mv) wordt gesaneerd door middel van een standaard biologische bodemsanering door middel van directe injecties van protamylasse en DHC-kweek. De kosten van deze bodemsanering bedraagt circa 340.000,- (uitgangspunt is circa € 15,- per m^3 bodemvolume).

1.3.3 Infiltratie ethanol in infiltratieputten nabij het WKO-systeem

De kostenraming is hetzelfde als de kostenraming waarbij ethanol in de WKO-put wordt toegevoegd, met uitzondering van de extra aanleg van 4 infiltratieputten van in totaal € 40.000,- (kosten zijn geraamd door Sialtech).

1.3.4 Reactieve zone met geëmulgeerde olie

Aannames voor de kostenraming:

- De kosten van het aanleggen van een reactieve zone in het 2e watervoerend pakket zijn opgevraagd bij HMVT. HMVT heeft een systeem ontwikkeld waarmee het op een efficiënte manier geëmulgeerde olie (ENNA) kan infiltreren. Het scherm heeft een lengte van 50 meter en is aangebracht op een diepte van 25 tot 50 m-mv (het meest verontreinigde gebied). Er is uitgegaan van een grondwatersnelheid van 45 m/jaar en het scherm wordt 10 jaar in stand gehouden. Voor de dosering van ENNA is een veiligheidsmarge van 6 aangehouden om instromend sulfaatrijk water van buiten het WKO-gebied te reduceren en om voor het verlies aan methanogenese te compenseren. De kosten voor het scherm bedragen € 173.000,-. Na vijf jaar moet het scherm hervult worden, het hervullen van het scherm kost per keer € 83.000,-

- Aangenomen wordt dat de in beperkte mate aanwezige DHC kunnen groeien in het scherm en daarom niet apart toegevoegd hoeven te worden.
- verwacht wordt dat met het reactieve scherm een hoog saneringsrendement wordt gehaald en maar 10 jaar monitoring noodzakelijk is.
- Verwacht wordt dat door het doseren van ENNA op den duur regeneratie van de WKO-putten noodzakelijk is. Het mechanisch regenereren en het 3-jaarlijks regenereren met chloorloog of peroxide kost circa € 10.000,- per jaar.
- Het reactief scherm wordt op geruime afstand van de WKO-putten geplaatst zodat ENNA niet in de WKO-putten terecht komt.
- Het 1^{e} watervoerend pakket (0 - 18 m-mv) wordt gesaneerd door middel van een standaard biologische bodemsanering door middel van directe injecties van protamylasse en DHC-kweek. De kosten van deze bodemsanering bedraagt circa 340.000,- (uitgangspunt is circa € 15,- per m^3 bodemvolume).

1.3.5 Aerobe zone

Aannames voor de kostenraming:
- Bij de firma Flierman techniek is de prijs opgevraagd voor het Fermanox systeem waarmee zuurstofrijk water aangemaakt kan worden ten behoeve van het ondergronds ontijzeren in het 2^{e} watervoerend pakket. Het grootste systeem dat verkocht wordt heeft een capaciteit van 40 m^3 grondwater per uur en kost € 120.000 om aan te leggen. Het WKO-doubletsysteem is ontworpen met een debiet van 200 m^3/u, het WKO-recirculatiesysteem met een debiet van 350 m^3/u. Voor het optimaal laten functioneren van het systeem zijn daarom respectievelijk 5 en 9 fermanoxsystemen nodig. Een alternatieve, goedkopere methode, is het inbrengen van zuurstof in een afgesloten waterbassin met behulp van zuurstofflessen. Deze techniek is omschreven in paragraaf 5.8.5 en kost circa €100.000,-
- verwacht wordt dat met aerobe zone een hoog saneringsrendement wordt gehaald en maar 10 jaar monitoring noodzakelijk is.
- Het 1^{e} watervoerend pakket (0 - 18 m-mv) wordt gesaneerd door middel van een standaard biologische bodemsanering door middel van directe injecties van protamylasse en DHC-kweek. De kosten van deze bodemsanering bedraagt circa 340.000,- (uitgangspunt is circa € 15,- per m^3 bodemvolume).

Tabel8. Kostenraming combinatieconcept WKO-doubletsysteem met reactieve zone (bedragen in euro's)

WKO-doubletsysteem	Infiltratie DHC-kweek in WKO-put (€)	Infiltratie ethanol in de WKO-put (€)	Infiltratie ethanol nabij de WKO-put (€)	Reactief scherm met ENNA (€)	Aerobe zone rondom WKO-putten (€)
Investeringskosten					
Grondwatersysteem, incl. warmtepompen, vergunning Waterwet en belastingvoordeel op investeringskosten (EIA) (excl. ontwerp en overige advieskosten)	749.000	749.000	749.000	749.000	749.000
DHC-kweekreactor en automatische dosering	100.000				
Doseringssysteem en opslag voor ethanol en		50.000	50.000		

WKO-doubletsysteem	Infiltratie DHC-kweek in WKO-put (€)	Infiltratie ethanol in de WKO-put (€)	Infiltratie ethanol nabij de WKO-put (€)	Reactief scherm met ENNA (€)	Aerobe zone rondom WKO-putten (€)
nutriënten					
Kosten ethanol		134.000	134.000		
Kosten nutriënten		20.000	20.000		
Aanleg monitoringsnetwerk ter plaatse van de verontreiniging	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000
Aanleg 4 infiltratieputten			40.000		
Aanleg biologisch actief scherm met ENNA + één keer hervullen van het scherm				256.000	
Installatie om zuurstofrijk water aan te maken en te infiltreren.					100.000
Standaard bodemsanering bodempakket van 0 tot 18 m-mv	340,000	340,000	340,000	340,000	340,000
Exploitatiekosten (jaarlijks)					
Kosten gas en elektriciteit	93.400	93.400	93.400	93.400	93.400
Monitoring vergunning Waterwet + onderhoud en beheer energieopwekking	24.800	24.800	24.800	24.800	24.800
Onderhoud	15.000				5.000
Monitoringskosten	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Regenereren van de WKO-putten		10.000	10.000	10.000	10.000
Terugverdientijd					
WKO-doubletsysteem	6,0 jaar	6,8 jaar	7,1 jaar	7,4 jaar	6,0 jaar
WKO-recirculatiesysteem	8,7 jaar	9,5 jaar	9,9 jaar	10,2 jaar	8,7 jaar
WKO-triplet systeem	7,2 jaar	8,0 jaar	8,4 jaar	8,7 jaar	7,2 jaar
Saneringskosten					
Kosten van de sanering over 30 jaar	730.000	784.000	824.000	836.000	730.000

1.4 Kostenraming WKO in combinatie met bovengrondse zuivering

Het combinatieconcept waarbij bovengronds wordt gezuiverd maakt het mogelijk om zowel de verontreiniging boven de 1^{e} scheidende laag als de verontreiniging onder de 1^{e} scheidende laag te beheersen. Voor de sanering van het pakket van 0 tot 18 m-mv wordt uitgegaan van een systeem dat € 40.000 kost om aan te leggen.

Het onttrekken en zuiveren van een deelstroom is qua techniek hetzelfde als een pump&treat sanering. Pump&treat saneringen verwijderen in de loop van de jaren maar een gedeelte van de verontreiniging en worden in de regel eeuwig durend ingezet om de verontreiniging te beheersen (30 jaar). In het geval van de hypothetische locatie wordt gewerkt met een onttrekking van 40 m^{3}/uur. Indien pump&treat wordt ingezet als beheersingsinstrument waarbij de verontreiniging niet verwijderd hoeft te worden kan het onttrekkingsdebiet mogelijk met een factor 10 worden verlaagd.

1.4.1 Bovengronds zuiveren en herinfiltreren

Bij het bovengronds zuiveren en herinfiltreren van het water dat rondgepompt wordt door het WKO-systeem kan gebruik gemaakt worden van vacuümstrippen. Met het vacuümstrippen wordt de VOCl uit de waterstroom gestript. Na het vacuümstrippen wordt de gasfase waarin de VOCl zit over een actiefkool filter geleid. De kosten voor het systeem worden door het Logisticon Water treatment BV geraamd op € 150.000 voor een installatie die 25 m^3/uur kan zuiveren. De jaarlijkse kosten zijn onbekend, deze bestaan uit energiekosten en het verversen van het actiefkool en worden voor het onderliggende onderzoek geraamd op € 15.000,-.

1.4.2 Bovengronds zuiveren en lozen op het oppervlaktewater

Bij het bovengronds zuiveren en lozen wordt een deel van het totaal opgepompte water gezuiverd. Door het netto onttrekken van grondwater wordt een beheersend effect gecreëerd. Voor de kosten van het bovengronds zuiveren en vervolgens lozen op het oppervlakte water is uitgegaan van de kosten van het systeem dat is gerealiseerd op de Parelhoender te Apeldoorn. In dit systeem wordt 40 m^3 grondwater per uur behandeld met een beluchter en zandfilter om het ijzer eruit te halen en met een stripper en luchtzijdig actiefkoolfilter om de VOCl verontreiniging te verwijderen. Het ijzer dient verwijderd te worden om lozing op het oppervlaktewater mogelijk te maken. De kosten voor de aanschaf van het systeem zijn geschat op basis van de gegevens van J. Pals (SBNS, De (on)zin van gecombineerde koude- warmteopslag met bodemsanering, 25 mei 2010) en Logisticon en bedragen € 150.000,-. De exploitatiekosten van het systeem bedragen € 10.000 per jaar.

1.4.3 Lozen op de riolering

Bij het lozen van verontreinigd WKO-water op het riool wordt uitgegaan van het lozen van een deelstroom van 40 m^3/u. Voor de kosten van het lozen van verontreinigd grondwater op de riolering is uitgegaan van de kosten die zijn geraamd door At Osborne. In het zogenaamde SOGAS-concept dat door AT Osborne is uitgedacht is € 0,05 geraamd per kuub grondwater dat in een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) gezuiverd wordt. De kosten voor het lozen van het verontreinigde WKO-water op het riool bedragen daarmee € 17.520,- per jaar.

Om voor de extra belasting van de RWZI te compenseren kan van een deel van de stad het hemelwater wordt afgekoppeld van de riolering. De kosten voor het afkoppelen en infiltreren van het hemelwater zijn 10 tot 20 euro per m^2. Om 40 m^3/uur te compenseren dient een gebied van 47 hectare afgekoppeld te worden. De kosten voor het afkoppelen bedragen op de hypothetische locatie circa € 7 miljoen euro. In de kostenraming wordt ervan uitgegaan dat de RWZI nog voldoende capaciteit heeft, deze kosten zijn daarom niet meegenomen in de kostenraming. Indien de RWZI onvoldoende capaciteit heeft en gecompenseerd dient te worden door het afkoppelen van het hemelwater is het combinatieconcept waarschijnlijk niet kosteneffectief meer vanwege de hoge kosten die hiermee gemoeid gaan.

Tabel 9. Kostenraming combinatieconcept WKO-doubletsysteem met bovengrondse zuivering (bedragen in euro's)

WKO-doubletsysteem	Zuiveren en infiltreren (€)	Zuiveren en lozen (€)	Lozen op het riool, zonder afkoppeling van hemel-water (€)
Investeringskosten			
Grondwatersysteem, incl. warmtepompen, vergunning Waterwet en belastingvoordeel op investeringskosten (EIA) (excl. ontwerp en overige advieskosten)	749.000	749.000	749.000
Aanleg monitoringsnetwerk ter plaatse van de verontreiniging	40.000	40.000	40.000
Aanleg vacuumstripper of inertgas stripper incl. luchtzijdig actiefkoolfilter	150.000		
Aanleg ontijzeringsinstallatie en VOCl stripper		150.000	
Standaard pump&treat in het bodempakket van 0 tot 18 m-mv	40.000	40.000	40.000
Exploitatiekosten (jaarlijks)			
Kosten gas en elektriciteit	93.400	93.400	93.400
Monitoring vergunning Waterwet + onderhoud en beheer energieopwekking	24.800	24.800	24.800
Monitoringskosten	10.000	10.000	10.000
Exploitatiekosten zuivering	15.000	10.000	
Kosten waterzuivering bij RWZI			17.520
Terugverdientijd			
WKO-doubletsysteem	3,9 jaar	3,7 jaar	2,4 jaar
WKO-recirculatiesysteem	6,6 jaar	6,3 jaar	5,2 jaar
WKO-triplet systeem	5,1 jaar	4,8 jaar	3,7 jaar
Saneringskosten			
Kosten van de sanering over 30 jaar	980.000	830.000	825.640

Deelnemende bedrijven en instanties

Agentschap NL / Bodem+
Arcadis
Bioclear
Brabant Water - Hydreco
Deltares
Eneco
Essent
Gemeente Almelo
Gemeente Amersfoort
Gemeente Apeldoorn
Gemeente Den Bosch
Gemeente Deventer
Gemeente Haarlem
Gemeente Hengelo
Gemeente Tilburg
Gemeente Utrecht
Gemeente Zwolle
Havenbedrijf Rotterdam
IF Technology
Ministerie van Infrastructuur & Milieu
NVOE
Productschap Tuinbouw
Provincie Drenthe
Provincie Flevoland
Provincie Friesland
Provincie Gelderland
Provincie Groningen
Provincie Limburg
Provincie Noord-Brabant
Provincie Noord-Holland
Provincie Overijssel
Provincie Utrecht
Provincie Zeeland
Provincie Zuid-Holland
SBNS
SKB
Vewin
Vitens
Wageningen Universiteit
Waterschap Groot Salland
Waterschap Regge en Dinkel