

PT04.121

## Demonstratieproject ijzerschermb Wassenaarseweg Katwijk

Fase 1: Rapportage keuze, dimensionering en aanleg ijzerschermb



2 april 2007

Gouda, SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem



Stichting  
Kennisontwikkeling  
Kennisoverdracht  
Bodem

**Auteursrechten**

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron, [SKB, Gouda](#), op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt. "©"

[Demonstratieproject ijzerscherm Katwijk. Fase 1: Rapportage keuze, dimensionering en aanleg ijzerscherm](#)", 2 april 2007, SKB, Gouda.

**Aansprakelijkheid**

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

**Copyrights**

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of SKB.

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©" [Demonstration project Iron PRB Katwijk. Phase 1: Choice, dimensioning and construction PRB, 2 April 2007, SKB, Gouda, The Netherlands.](#)

**Liability**

SKB and all contributors to this publication have taken every possible care by the preparation of this publication. However, it can not be guaranteed that this publication is complete and/or free of faults. The use of this publication and data from this publication is entirely for the user's own risk and SKB hereby excludes any and all liability for any and all damage which may result from the use of this publication or data from this publication, except insofar as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of SKB and/or the contributors.

**Titel rapport**

Demonstratieproject ijzerscherm Wassenaarseweg Katwijk  
Fase 1: Keuze, dimensionering en aanleg ijzerscherm

**SKB rapportnummer**

**Project rapportnummer**  
**PT04.121**

**Auteur(s)**

Ir. C.M. Soeter  
Ing. W.J.M. Havermans

**Aantal bladzijden**

**Rapport: 48**  
**Bijlagen: 10**

**Uitvoerende organisaties (consortium)**

Grontmij Nederland (C.M. Soeter, 030-6344612)  
NTP Milieu (W.J.M. Havermans, 053-461 49 05)  
TNO (N.K. Hoekstra, 055-549 36 98)  
ETI Canada (S. O'Hannesin, 00.1.519.746.2204)  
Provincie Zuid Holland (M. de Jongh, 070-4416470)

**Uitgever**

SKB, Gouda

**Samenvatting**

In de Verenigde Staten worden ijzerschermen al ruim 15 jaar met succes toegepast, echter in Nederland zijn ijzerschermen nog geen proven technology. Met dit demonstratieproject is er een goede kans dat de implementatie van ijzerschermen in Nederland van de grond komt. Het demonstratieproject heeft als doel de toepassing van een ijzerscherm binnen de Nederlandse bodemsaneringsmarkt te introduceren, de goede werking ervan aan te tonen en de opgedane kennis en ervaring generiek beschikbaar maken voor ontwerpers, eindgebruikers en bevoegd gezag. De demonstratie in Katwijk betreft het eerste ijzerscherm in Nederland, dat in de bodem is aangebracht en volledig is gevuld met een mix van reactief ijzergranulaat en zand. Het principe van een ijzerscherm berust op het in-situ afbreken van chloorkoolwaterstoffen (VOCI) door oxidatie van ijzer. Bij het doorstromen van het scherm worden de VOCI-componenten omgezet naar onschadelijke reststoffen. Na de installatie zijn de energiekosten voor het in stand houden van het systeem nihil. De natuurlijke stroomsnelheid van het water is de drijvende kracht achter het systeem. In vergelijking met andere saneringsconcepten worden op deze wijze de saneringskosten met wel 30 tot 50% gereduceerd. Het ijzerscherm in Katwijk is aangelegd om een volkstuintencomplex te beschermen tegen de instroom van VOCI via het grondwater. Circa 100 m stroomopwaarts van het volkstuintencomplex bevond zich in het verleden een vatenspoelerij aan de Wassenaarseweg. Door de spoelerij is het grondwater in de loop der tijd verontreinigd met VOCI. Het ijzerscherm is met een kettinggraver aangelegd over een lengte van 180 m en tot een diepte van 5,5 m.

Het consortium heeft met dit demonstratieproject aangetoond dat het mogelijk is om een VOCI-verontreiniging op innovatieve en kosteneffectieve wijze te beheersen middels een ijzerscherm. De eerste monitoringsronde geeft aan dat er al afbraak van CIS en VC na een maand in het ijzerscherm optreedt. Verwacht wordt dat wanneer de goede werking van het ijzerscherm op de lange termijn wordt aangetoond eindgebruikers en bevoegde gezagen gemakkelijker zullen kiezen voor de toepassing van een ijzerscherm.

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

Bodemsanering, chloorkoolwaterstoffen,  
fysisch-chemisch zuiveren, ijzer

**Vrije trefwoorden:**

ijzerscherm, Permeable  
Reactive Barrier. PRB

**Titel project**

Demonstratieproject ijzerscherm  
Wassenaarseweg Katwijk

**Projectleiding**

Grontmij Nederland  
(C.M. Soeter, 030-6344612)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

## VOORWOORD

In Katwijk is in opdracht van de provincie Zuid-Holland op innovatieve wijze een volkstuinencomplex beschermd tegen de instroom van een verontreiniging met chloorkoolwaterstoffen (VOCI). Een traditionele aanpak met pump & treat bleek niet kosteneffectief om de VOCl-verontreiniging te beheersen.

Het reactief ijzerschermbat in Katwijk is gerealiseerd is voor Nederlandse begrippen vernieuwend. Het is namelijk het eerste ijzerschermbat in Nederland dat in de bodem is aangebracht en volledig gevuld is met een mix van ijzergranulaat en zand.

In 2004 voerde Grontmij een studie naar beheersmaatregelen voor de locatie Katwijk uit. Hieruit bleek dat toepassing van een reactief ijzerschermbat een kansrijke optie vormde. In een vroeg stadium legde Grontmij contact met aannemer NTP Milieu die net bij de licentieverstrekker voor ijzerschermbaten ETI (EnviroMetal Technologies Inc.) in Canada op bezoek was geweest. Voor de realisatie van het ijzerschermbat heeft Grontmij samen met NTP Milieu in 2005 een ontwerp en uitvoeringsplan opgesteld om het ontwerp en de uitvoering van het ijzerschermbat goed op elkaar aan te laten sluiten. De kolomtest die VITO in België heeft uitgevoerd leverde de noodzakelijke gegevens voor het ontwerp en de dimensionering van het ijzerschermbat.

Aangezien de VOCl-verontreiniging in Katwijk niet zo diep aanwezig is, namelijk tot circa 4 m –mv, is deze locatie zeer geschikt om hier een permeabel ijzerschermbat aan te leggen. Vooral ook omdat zich op geringe diepte op circa 5,5 m –mv een kleilaag bevindt die het schermbat aan de onderkant kan afsluiten. Daarnaast bevinden er zich geen obstakels in de ondergrond zoals kabels en leidingen, zodat een kettinggraver relatief eenvoudig kon worden ingezet om het ijzerschermbat te realiseren.

Wanneer eenmaal de plannen gereed zijn en de opdrachtverlening in juni 2006 rond is blijkt dat de aanleg van een ijzerschermbat zeer snel kan worden gerealiseerd. In 1 dag is 125 ton reactief ijzergranulaat en 200 ton zand gemengd in de juiste verhoudingen. Vervolgens is in circa 2,5 dag het ijzerschermbat en het folieschermbat aangelegd over een afstand van 180 m met een kettinggraver. Dat is een snelheid van circa 10 m/uur. Het werk is niet alleen snel uitgevoerd maar ook met de nodige precisie.

NTP Milieu heeft voor aanvang van het project een garantie op de werking van het ijzerschermbat gegeven voor een periode van 15 jaar. Bij de uitvoering is ETI vanuit Canada overgevlogen om technische ondersteuning te leveren. ETI ondersteunt ijzerschermbat projecten wereldwijd op vakkundige wijze. Grontmij heeft de gehele uitvoering van het ijzerschermbat begeleid en op video vastgelegd. De video trok op de on-site dag van 5 oktober 2006 veel belangstelling en is daarom door SKB toegevoegd aan het Cahier Reactieve Schermen.

De verwachting is dat na dit demonstratieproject meer ijzerschermbaten in Nederland aangelegd zullen worden. Ook op grotere diepten van 10 of 20 m kan een ijzerschermbat naar verwachting als een kosteneffectieve beheersing worden toegepast. Als consortium willen we hier graag een bijdrage aanleveren.

April 2007

## INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD .....	II
INHOUDSOPGAVE .....	III
SAMENVATTING .....	VI
NOTATIES .....	IX
1. INLEIDING .....	10
1.1 Algemeen .....	10
1.2 Probleemstelling .....	10
1.3 Doelstelling project .....	10
1.4 Samenstelling consortium .....	10
1.5 Leeswijzer .....	11
2. TOTSTANDKOMING IJZERSCHERM KATWIJK .....	12
2.1 Algemeen .....	12
2.2 Toelichting op de locatie .....	12
2.3 Bodemopbouw en geohydrologie .....	13
2.4 Verontreinigingssituatie .....	14
2.5 Omstandigheden biologische afbraak .....	14
2.6 Aanleiding beheersmaatregelen .....	16
2.7 Doelstelling beheersmaatregelen .....	16
2.8 Reactieve schermen .....	16
2.9 Evaluatie keuze voor ijzerscherm .....	17
2.10 Uitgangspunten en randvoorwaarden ijzerscherm .....	18
2.10.1 Uitgangspunten .....	18
2.10.2 Randvoorwaarden .....	18
3. ONTWERP EN DIMENSIONERING .....	19
3.1 Inleiding .....	19
3.2 Afbraakmechanisme ijzerschermen .....	19
3.3 Toelichting op de techniek .....	19
3.4 Selectie reactief ijzer .....	20
3.5 Haalbaarheidstest .....	20
3.5.1 Doelstelling kolomtest .....	21
3.6 Dimensionering ijzerscherm .....	22
3.6.1 Vertaling kolomtest naar dimensionering in praktijk .....	22
3.6.2 Mengverhouding ijzer/zand .....	22
3.7 Ontwerp ijzerscherm .....	23
3.8 Modelberekeningen .....	23
3.9 Fall back scenario .....	23
3.10 Resultaten review ontwerp .....	24
3.11 Definitief ontwerp .....	24
3.12 Functionaliteit ijzerscherm .....	25
3.13 Garantstelling ijzerscherm .....	25

4.	EVALUATIE AANLEG IJZERSCHERM .....	26
4.1	Uitvoeringsperiode .....	26
4.2	Voorbereiding .....	26
4.3	Uitvoering van boringen langs tracé ijzerschermer .....	26
4.4	Inrichting werkterrein en tijdelijke depots .....	27
4.5	Leveranties van ijzer en zand en kwaliteitsspecificaties .....	27
4.6	Mengen van ijzer en zand .....	27
4.7	Aanleg ijzerschermer .....	28
4.8	Aanleg folieschermer .....	29
4.9	Verwerkte hoeveelheden materialen .....	30
4.10	Veiligheid .....	31
5.	NULMETING MONITORING IJZERSCHERM .....	32
5.1	Algemeen .....	32
5.2	Monitoringstrategie .....	32
5.3	Uitbreiding monitoringsmeetnet .....	32
5.4	Bemonsterings- en analyseprogramma .....	33
5.5	Monitoring macrochemie .....	34
5.6	Bemonsteringsfrequentie en ijkmomenten .....	34
5.7	Waterpassing en opname grondwaterstanden .....	35
5.9	Resultaten nulmeting verontreiniging .....	35
5.9.1	Monitoring verontreiniging bron en pluim .....	35
5.9.2	Monitoring verontreiniging ijzerschermer .....	35
5.10	Resultaten nulmeting macrochemie .....	36
5.10.1	Monitoring macrochemie in bron en pluim .....	36
5.10.2	Monitoring macrochemie ijzerschermer .....	37
5.11	Resultaten nulmeting grondwaterstanden .....	39
6.	GENERIEKE ONTWERPRICHTLIJNEN EN -CRITERIA .....	40
6.1	Inleiding .....	40
6.2	Checklist voor toepassing van een ijzerschermer .....	40
6.3	Methoden voor plaatsing van een ijzerschermer .....	43
6.3	Stappenplan voor ontwerp en dimensionering .....	44
6.3	Stappenplan voor ontwerp en dimensionering .....	45
7.	CONCLUSIES .....	47

BIJLAGE 1 UITGANGSSITUATIE VOCL-VERONTREINIGING .....	49
BIJLAGE 2 REFERENTIEPROJECTEN.....	50
BIJLAGE 3 SAMENVATTING KOLOMTEST.....	51
BIJLAGE 4 DOORLATENDHEIDSMETINGEN .....	52
BIJLAGE 5 ONTWERPREGELS ETI CANADA.....	53
BIJLAGE 6 ONTWERP IJZERSCHERM .....	54
BIJLAGE 7 MODELBEREKENINGEN .....	55
BIJLAGE 8 GEGEVENS IJZERGRANULAAT EN DRAINZAND.....	56
BIJLAGE 9 NULMETING VOCL-VERONTREINIGING .....	57
BIJLAGE 10 GRONDWATERSTANDEN EN ISOHYPSEN .....	58

## SAMENVATTING

### Demonstratieproject ijzerscherm Katwijk

#### Inleiding

In de Verenigde Staten worden ijzerschermen al ruim 15 jaar met succes toegepast, echter in Nederland zijn ijzerschermen nog geen proven technology. Met dit demonstratieproject is er een goede kans dat de implementatie van ijzerschermen in Nederland van de grond komt. Het demonstratieproject heeft als doel de toepassing van een ijzerscherm binnen de Nederlandse bodemsaneringsmarkt te introduceren, de goede werking ervan aan te tonen en de opgedane kennis en ervaring generiek beschikbaar maken voor ontwerpers, eindgebruikers en bevoegd gezag. De demonstratie in Katwijk betreft het eerste ijzerscherm in Nederland, dat in de bodem is aangebracht en volledig is gevuld met een mix van reactief ijzergranulaat en zand.

Het principe van een ijzerscherm berust op het in-situ afbreken van chloorkoolwaterstoffen (VOCI) door oxidatie van ijzer. Het scherm bevat nulwaardig ijzer in granulaire vorm, die de VOCI reduceren. Bij het doorstromen van het scherm worden de VOCI-componenten omgezet naar onschadelijke reststoffen. Na de installatie zijn de energiekosten voor het in stand houden van het systeem nihil. De natuurlijke stroomsnelheid van het water is de drijvende kracht achter het systeem. In vergelijking met andere saneringsconcepten worden op deze wijze de saneringskosten met wel 30 tot 50% gereduceerd.

#### Totstandkoming ijzerscherm Katwijk

Aan de Wassenaarseweg in Katwijk bevond zich in het verleden een vatenspoelierij. Door de vatenspoelierij is het grondwater verontreinigd met chloorkoolwaterstoffen. Ongeveer honderd meter stroomafwaarts van de locatie ligt een volkstuintencomplex dat door de verontreinigingspluim wordt bedreigd. Door het plaatsen van een ijzerscherm wordt het volkstuintencomplex tegen de instroom van chloorkoolwaterstoffen beschermd. Het project en de techniek is voor Nederlandse begrippen vernieuwend, aangezien dit het eerste scherm in Nederland is, dat volledig gevuld is met granulair ijzer.

Ter plaatse van de saneringslocatie worden in het grondwater de interventiewaarden overschreden voor cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride. Op grond hiervan is de Provincie Zuid-Holland over gegaan tot het nemen van een beheersmaatregel om verdere verspreiding te voorkomen en het volkstuintencomplex te beschermen.

Ijzerschermen zijn prima geschikt voor de aanpak van bodemverontreinigingen met chloorkoolwaterstoffen, zoals per en tri. Deze ontvettingsmiddelen opgelost in het grondwater zijn vanwege de langdurige nalevering moeilijk te saneren door middel van een pump & treat-systeem. Met een ijzerscherm, geplaatst stroomafwaarts van de bronzone van de verontreiniging, wordt de verontreiniging begrensd en wordt de grondwaterverontreiniging achter het scherm verschoond.

In april 2004 heeft Grontmij een studie naar beheersmaatregelen verricht om het volkstuintencomplex te kunnen beschermen tegen de instroom van chloorkoolwaterstoffen. Hierbij is gekeken naar de mogelijkheden om een reactief scherm te plaatsen loodrecht in de stroombaan van de verontreiniging.

Uit de studie naar beheersmaatregelen is gebleken dat het toepassen van een volledig permeabel ijzerscherm op deze locatie een interessante en kansrijke optie is. Ten opzichte van een geohydrologisch scherm of een bioscherm heeft een ijzerscherm als voordeel dat er geen actieve maatregelen, zoals pompen, zuivering etc. noodzakelijk zijn waardoor de instandhoudingskosten relatief laag zijn (alleen monitoring). Daar komt bij dat de levensduur van een ijzerscherm langer is dan van een grondwateronttrekkingsstelsel voor een geohydrologisch scherm of een substraatinjectiesysteem voor een bioscherm.

Uit een vergelijking van de kosten van verschillende type beheersmaatregelen blijkt ook dat de totale kosten voor een ijzerschermbij een instandhoudingsduur van 30 jaar bijna een factor 2 lager zijn ten opzichte van een geohydrologische beheersing of een bioschermbij.

Op basis van de bovenstaande argumenten gaat de voorkeur uit naar de toepassing van een ijzerschermbij. Hierbij is gekozen voor de meest eenvoudige uitvoering, namelijk een volledig permeabel ijzerschermbij. Dit type is wereldwijd het meest toegepast en heeft tot op heden het minste onderhoud. Daarmee is de duurzaamheid van dit schermbijtype het grootst.

Het volledig permeabele ijzerschermbij kan langs de terreingrens met het volkstuintencomplex worden aangebracht. Hierdoor wordt de verspreiding van verontreinigingen in het middeldiepe grondwater in de richting van het beschermd gebied voorkomen.

### **Ontwerp en dimensionering**

In juli 2005 heeft Grontmij een ontwerp- en uitvoeringsplan opgesteld in samenwerking met NTP Milieu. In dit ontwerp en uitvoeringsplan is de toepassing van het ijzerschermbij tot een concreet plan uitgewerkt, waarbij de uitvoering van het schermbij is afgestemd op de lokale situatie. Voor het ontwerp en de dimensionering is een kolomtest door VITO uitgevoerd om de haalbaarheid van een ijzerschermbij vast te stellen. In deze kolomtest is grondwater van de locatie geleid door een met ijzergranulaat gevulde kolom. Daarnaast zijn doorlatendheids metingen door Grontmij verricht om de stroomsnelheid van het grondwater nauwkeurig te bepalen.

Aan de hand van de uitgevoerde kolomtest is door VITO geconcludeerd dat een reactief ijzerschermbij haalbaar is voor de locatie in Katwijk. De kolomtest heeft aangetoond dat de belangrijkste VOCI-componenten CIS en VC in het grondwater kunnen worden afgebroken tot onder de gestelde normen na een gemiddelde verblijftijd van 67uur in een 100% reactief ijzerschermbij. De levensduur van het ijzerschermbij is op basis van macrochemische analyses in de kolomtest en de stroomsnelheid van het grondwater naar verwachting minstens 20 jaar volgens ETI te Canada.

De dikte van het ijzerschermbij is op basis van de verblijftijd en de stroomsnelheid van 1,6 m/jaar gedimensioneerd op circa 2,2 cm voor een schermbij met 100% ijzer. Wanneer een sleuf met een breedte van 30 cm wordt opgevuld met 20% ijzer en 80% drainagezand is de effectieve dikte van het ijzer gelijk aan:  $30 \text{ cm} \times 0,20 = 6 \text{ cm}$ . Het ijzerschermbij heeft dan een overdimensionering van een factor 2,7.

Om een maximale zekerheid te garanderen is in de haard van de verontreiniging een ijzer/zand mengsel gebruikt van 40:60 vol.%. De effectieve dikte van het ijzer is dan gelijk aan:  $30 \text{ cm} \times 0,40 = 12 \text{ cm}$ . Het ijzerschermbij heeft in de haard dan een overdimensionering van een factor 5,4. Geconcludeerd kan worden dat deze extra overdimensionering een maximale zekerheid levert voor de werking van het ijzerschermbij.

### **Evaluatie aanleg ijzerschermbij in Katwijk**

Voor het aanbrengen van het ijzerschermbij is met een kettinggraver een sleuf gegraven van circa 5,5 m diep en 30 cm breed. Via een trechter is deze sleuf, gelijktijdig met het graven, gevuld met het mengsel van zand en ijzergranulaat. In de haard van de verontreinigingspluim is het ijzerschermbij over een lengte van 30 m gevuld met het zand/ijzer mengsel in de verhouding 40:60 vol %. Aansluitend is het ijzerschermbij over een lengte van 90 m gevuld met het zand/ijzer mengsel in de verhouding 20:80 vol %.

Na het aanbrengen van het ijzerschermbij is de breedte van het ijzerschermbij gecontroleerd en bleek dat de gerealiseerde breedte 22 cm was. De gerealiseerde breedte vormt echter geen risico voor de werking van het ijzerschermbij, aangezien nog steeds sprake is van een ruime overdimensionering van een factor 4.

Aan beide zijden van het ijzerschermbaan is een folieschermbaan aangebracht over een lengte van circa 30 m. Door de toepassing van het folieschermbaan kon de hoeveelheid ijzer beperkt worden tot 120 m. Het LDPE-folie is aan de noordzijde met het ijzerschermbaan gekruist in een hoek van 120°. Aan de zuidzijde is het LDPE-folie noodgedwongen evenwijdig langs het ijzerschermbaan getrokken in verband met de nabijheid van de sloot. Dit heeft overigens geen gevolgen voor de werking van het ijzerschermbaan.

#### **Nulmeting monitoring ijzerschermbaan**

Na aanleg van het ijzerschermbaan is het monitoringnetwerk met peilbuizen uitgebreid en is een nulmeting verricht. Over het algemeen blijkt dat de gehalten aan VOCl lager zijn dan bij voorgaande monitoringronden. Dit kan mogelijk samenhangen met de regen die in de periode van de bemonstering is gevallen. In het volkstuintencomplex zijn voor VOCl enkele streefwaarde overschrijdingen en een tussenwaarde overschrijding waargenomen. Verder zijn hier geen verhoogde gehalten aan VOCl aangetoond.

Om de werking van het ijzerschermbaan goed te kunnen volgen zijn 2 raaien met peilbuizen (C1 t/m C6) voor, in en achter het ijzerschermbaan geplaatst. Ter plaatse van de peilbuizen C1 t/m C6 blijkt dat in het ijzerschermbaan al een afname van CIS en VC na 1 maand is opgetreden. Direct achter het ijzerschermbaan zijn nog gehalten aangetoond die de interventiewaarden overschrijden. Naar verwachting doven de verhoogde gehalten achter het ijzerschermbaan binnen enkele jaren uit door de werking van het scherm. Aan de onderzijde van het ijzerschermbaan zijn geen verhoogde gehalten aangetroffen. Samenvattend kan gesteld worden dat de monitoring een positief beeld van de verontreinigingssituatie oplevert zoals die zich nu ontwikkelt.

Voor een goede evaluatie van de werking van het ijzerschermbaan zijn meerdere monitoringronden benodigd. Na een jaar monitoren zal de werking van het ijzerschermbaan voor SKB geëvalueerd worden in het tweede SKB-rapport met de titel 'Fase 2: Evaluatierapport werking ijzerschermbaan Katwijk'.

#### **Generieke ontwerprichtlijnen en -criteria**

Voor het ontwerpen en dimensioneren van ijzerschermbaanen zijn generieke richtlijnen en criteria opgesteld welke zijn gebaseerd op de richtlijnen uit de VS. Tevens is voor de verankering van de toepassingsmogelijkheden van ijzerschermbaanen een checklist opgesteld die het bevoegd gezag en eindgebruikers kunnen gebruiken om te beoordelen of toepassing van een ijzerschermbaan mogelijk is op een met VOCl verontreinigde locatie. Tevens is op de website van SKB informatie beschikbaar gesteld over het demonstratieproject, de on-site dag, de presentaties en publicaties. Verwacht wordt dat wanneer de goede werking van het ijzerschermbaan in Katwijk wordt aangetoond bevoegde gezagen gemakkelijker zullen kiezen voor een innovatieve en kosteneffectieve beheersing van een VOCl-verontreiniging middels een ijzerschermbaan.

## NOTATIES

PER	Tetrachlooretheen
TRI	Trichlooretheen
CIS	Cis 1,2-dichlooretheen
VC	Vinylchloride
pH	Zuurgraad
EC	Elektrische geleidbaarheid
Eh	Redoxpotentiaal
$t_{1/2}$	Halfwaardetijd
C	Concentratie
T	Temperatuur
PV	Poriënvolume
Fe	IJzer
PRB	Permeable Reactive Barrier
VOCl	Chloorkoolwaterstoffen
m .mv.	Meter beneden maaiveld
NAP	Nieuw Amsterdams Peil
v	Stroomsnelheid
k	Doorlatendheid
i	grondwaterverhang
$\theta$	Porositeit
D	Schermdikte
t	Verblijftijd
Cl	Chloride
NA	Natuurlijke afbraak
DOC	Dissolved Organic Carbon

# 1. INLEIDING

## 1.1 Algemeen

Reactieve ijzerschermen worden al ruim 15 jaar met succes beproefd in de VS en Canada voor de beheersing van verontreinigingspluimen. In Europa worden ijzerschermen de laatste 5 jaar toegepast in ondermeer in Duitsland, Engeland en Denemarken. Nederland loopt nog enigszins achter bij de toepassing van ijzerschermen en dat terwijl Nederland met haar bodemsaneringbeleid voortdurend voorop loopt. IJzerschermen zijn in Nederland nog geen proven technology. Met dit demonstratie-project is er echter een goede kans dat de implementatie van ijzerschermen in Nederland van de grond komt. De demonstratie in Katwijk betreft het eerste ijzerscherm in Nederland, dat volledig wordt gevuld met een mix van reactief ijzergranulaat en zand.

## 1.2 Probleemstelling

De toepassing van het ijzerscherm op de locatie in Katwijk is een unieke gelegenheid voor bodemsanerend Nederland. Nog niet eerder is deze techniek in deze vorm toegepast in Nederland, dit terwijl in enkele andere landen binnen Europa alsmede in de Verenigde Staten, Canada, Australië en Japan deze techniek reeds langer wordt toegepast. Onbekendheid met de materie weerhoudt adviseurs ervan om eindgebruikers en bevoegde gezagen te adviseren over de toepassing van ijzerschermen. Daarnaast kiezen eindgebruikers en bevoegde gezagen niet gemakkelijk voor een saneringstechniek die nog niet eerder in Nederland is toegepast. Er dient dus nog draagvlak voor deze techniek in Nederland te worden gecreëerd.

## 1.3 Doelstelling project

De algemene doelstelling van het demonstratieproject betreft het introduceren van de toepassing van een ijzerscherm binnen de Nederlandse bodemsaneringsmarkt, de goede werking ervan aan te tonen en verdere bekendheid te geven aan het systeem.

### Specifieke doelstellingen van de demonstratie

De doelstellingen van de demonstratie zijn meerledig:

- bekendheid geven aan de techniek van ijzerschermen in het algemeen;
- demonstratie van de toepassingsmogelijkheden van ijzerschermen voor de aanpak van grondwaterverontreinigingen met VOCl;
- een nadere dimensionering van de sanering te bepalen uitgaande van de resultaten van een kolomexperiment met ijzer, en de doorlatendheidsmetingen;
- het evalueren van de aanleg van het ijzerscherm op de locatie in Katwijk;
- het verankeren van de toepassingsmogelijkheden van deze techniek bij het bevoegd gezag.

## 1.4 Samenstelling consortium

De samenstelling van het consortium voor het demonstratieproject ijzerscherm Katwijk is in onderstaand overzicht weergegeven en wordt hieronder nader toegelicht.

**Tabel 1.1 Samenstelling consortium demonstratieproject ijzerscherm**

Grontmij	Ir. C.M. Soeter	Adviesbureau/penvoerder
Provincie Zuid Holland	Ing. M.R. de Jongh	Eindgebruiker
NTP Milieu	Ing. W.J.M. Havermans	Techniekaanbieder
ETI	S. O'Hannesin M.Sc.	Licentieverstrekker
TNO	Ir. N.K. Hoekstra	Expert

Het demonstratieproject wordt inhoudelijk getrokken door Grontmij en NTP Milieu. Binnen het consortium treedt Grontmij op als penvoerder en adviesbureau. Grontmij is in de loop der jaren bij zeer veel locaties met VOCL-verontreinigingen betrokken, zowel in de onderzoeksfase als in de saneringsfase. Momenteel is Grontmij adviseur van de Provincie Zuid-Holland voor de locatie in kwestie. De provincie Zuid Holland vervult in het demonstratieproject een controlerende en

sturende functie. Zij heeft als eindgebruiker van de locatie het belang de bescherming van het volkstuintencomplex tot stand te brengen. Aannemer NTP-Milieu treedt binnen het project op als techniekaanbieder en beschikt over een licentie van Envirometal Technologies Inc. (ETI) in Canada voor het plaatsen van ijzerschermen in Nederland. ETI te Canada controleert als licentieverstrekker het ontwerp en de dimensionering van het ijzerscherm. Tot slot zorgt TNO voor een objectieve review van het ontwerp van het ijzerscherm dat Grontmij en NTP-Milieu samen ontwikkelen.

## **1.5 Leeswijzer**

De rapportage is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2: Totstandkoming ijzerscherm Katwijk. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de saneringslocatie in Katwijk, de aanleiding tot de beheersmaatregelen en de totstandkoming van het ijzerscherm.
- Hoofdstuk 3: Ontwerp en dimensionering. In dit hoofdstuk wordt het ontwerp en de dimensionering van het ijzerscherm besproken.
- Hoofdstuk 4: Evaluatie aanleg ijzerscherm. In dit hoofdstuk wordt de aanleg van het ijzerscherm geëvalueerd.
- Hoofdstuk 5: Nulmeting monitoring ijzerscherm. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de resultaten van de nulmeting die vlak na de aanleg van het ijzerscherm is uitgevoerd.
- Hoofdstuk 6: Generieke ontwerprichtlijnen en –criteria. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op generieke ontwerprichtlijnen en –criteria voor het toepassen van ijzerschermen op andere locaties.
- Hoofdstuk 7: Conclusies. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de conclusies die getrokken kunnen worden uit dit demonstratieproject.

## 2. TOTSTANDKOMING IJZERSCHERM KATWIJK

### 2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt de totstandkoming van het ijzerscherm op de locatie in Katwijk besproken. Als eerste wordt een toelichting gegeven op de locatie, de bodemopbouw en geohydrologie, de verontreinigingssituatie en de afbraakomstandigheden. Vervolgens wordt de aanleiding en de doelstelling voor het treffen van de beheersmaatregelen besproken. Tot slot wordt ingegaan op reactieve schermen, de evaluatie van de keuze van het ijzerscherm en de uitgangspunten en randvoorwaarden voor de toepassing van het ijzerscherm op de locatie.

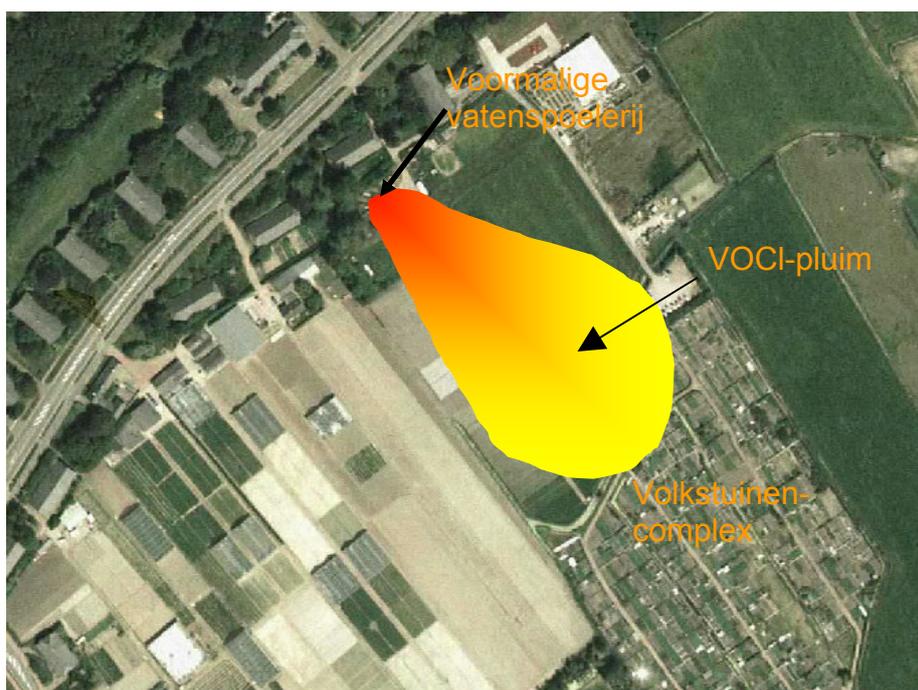
### 2.2 Toelichting op de locatie

De locatie betreft een voormalig vatenopslagterrein dat zich aan de Wassenaarseweg te Katwijk bevindt nabij het Marinevliegkamp Valkenburg. De geografische ligging van de locatie is in onderstaande figuur weergegeven.



***Figuur 2.1 Geografische ligging locatie***

In figuur 2.2 is een luchtfoto van de locatie met de aangrenzende percelen en de aanwezige verontreiniging weergegeven. Ter plaatse van de locatie Wassenaarseweg te Katwijk en in de directe omgeving hiervan is sprake van een grond- en grondwaterverontreiniging. Het ondiepe en middeldiepe grondwater is tot een afstand van circa 100 m buiten de perceelsgrens van het voormalig vatenopslagterrein overwegend licht tot sterk verontreinigd met chloorkoolwaterstoffen (VOCI) en vluchtige minerale olie. Op circa 100 m stroomafwaarts van de locatie bevindt zich een volkstuintencomplex dat door de verontreinigingspluim met VOCl wordt bedreigd. Het volkstuintencomplex dient tegen de instroom van VOCl beschermd te worden.



**Figuur 2.2** Luchtfoto locatie met aangrenzende percelen en verontreinigingspluim

### 2.3 Bodemopbouw en geohydrologie

#### Bodemopbouw

Op basis van de grondwaterkaart van Nederland (kaartblad 30 West, Den Haag) en de uitgevoerde boringen is de bodemopbouw geschematiseerd, welke in tabel 2.1 is weergegeven.

**Tabel 2.1** Geschematiseerde bodemopbouw

Diepte (m -mv)	Samenstelling	Geohydrologische eenheid	Indeling grondwater
0-0,5	Matig fijn zand	Deklaag	Ondiep grondwater
0,5-1,5	Siltige klei		
1,5-2,5	Matig fijn zand		
2,5-3,5	Venige klei		
3,5-5,5	Matig fijn zand		Middeldiep grondwater
5,5-6,5	Siltige klei		
6,5-54	Matig fijn zand	1 <sup>e</sup> watervoerend pakket	Diep grondwater
54-64	Klei	1 <sup>e</sup> scheidende laag	1 <sup>e</sup> scheidende laag

De deklaag bestaat afwisselend uit lagen matig fijn zand en siltige klei. Dikte van deze lagen varieert sterk. Op een diepte van circa 5,5 à 6,5 m -mv bevindt zich bij de meeste boringen een uiterst siltige kleilaag met een dikte van variërend van circa 0,5 tot 1,5 m.

Vanaf 6,5 tot 54 m -mv bevindt zich het watervoerend pakket bestaande uit matig fijn zand met naar de diepte toe grof zand. Het watervoerend pakket heeft een dikte van circa 47 m met een doorlaatvermogen van circa 1000 m<sup>2</sup>/d. Hieronder bevindt zich de eerste scheidende laag met een dikte van circa 10 m, die als hydrologische basis kan worden beschouwd.

#### Geohydrologie

##### Kwel/infiltratie

Uit de grondwaterstandgegevens van 2005 blijkt dat ter plaatse van het voormalig vatenopslagterrein sprake is van een lichte infiltratiesituatie. Stroomafwaarts kwelt het water echter

op richting de sloot die gelegen is op de grens met het volkstuintencomplex. Op het volkstuintencomplex vindt tevens drainage plaats waardoor de kwelsituatie hier wordt versterkt.

Vanwege de slechte ontwatering van het terrein, is het mogelijk dat de freatische grondwaterstanden tijdens de winter stijgen waardoor een infiltratiesituatie kan ontstaan ter plaatse van het voormalig vatenopslagterrein. In de zomer, wanneer door verdamping de freatische grondwaterstanden dalen, kan vervolgens een kwelsituatie ontstaan.

#### *Stromingsrichting*

De grondwaterstroming in het ondiepe en middeldiepe grondwater is in beeld gebracht aan de hand van de gemeten grondwaterstanden in de peilbuizen. Op basis hiervan, blijkt dat in de deklaag sprake is van een zuidoostelijke grondwaterstroming.

De grondwaterstroming in het diepe grondwater of te wel het eerste watervoerend pakket blijkt op basis van de grondwaterkaart van Nederland (kaartblad 30 West, Den Haag) ook zuidoostelijk gericht te zijn.

## **2.4 Verontreinigingssituatie**

De verontreinigingssituatie is in deze paragraaf beknopt weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de grond- en grondwaterverontreiniging.

### **Grond**

De puinhoudende bovengrond van de onderzoekslocatie is licht tot sterk verontreinigd met zware metalen, PAK, minerale olie, PCB's en drins (som), HCB en HCH. De onderzochte onderliggende bodemlagen zijn niet verontreinigd met genoemde stoffen, met uitzondering van een lokale verontreiniging met arseen in de veenlaag.

### **Ondiep en middeldiep grondwater**

Het ondiepe en middeldiepe grondwater in de deklaag (tot circa 5,0 m –mv) is licht tot sterk verontreinigd met cis 1,2-dichlooretheen en vinylchloride. Met name in het front van de pluim nabij het volkstuintencomplex komen sterk verhoogd gehalten aan cis 1,2-dichlooretheen voor, die de interventiewaarden overschrijden. In bijlage 1 is de verontreinigingssituatie voor het ondiepe en middeldiepe grondwater weergegeven.

### **Diep grondwater**

Het diepe grondwater (tot circa 8,0 à 10,0 m -mv) op en stroomafwaarts van het voormalig vatenopslagterrein is niet verontreinigd met chloorkoolwaterstoffen. In bijlage 1 is de verontreinigingssituatie van het diepe grondwater weergegeven.

### **Extra monitoringsronde**

Op 7 juni 2004 is een extra monitoringsronde van het grondwater uitgevoerd om de noodzaak voor plaatsing van het ijzerscherm te controleren. Uit deze extra monitoringsronde is opnieuw gebleken dat de verontreinigingspluim zich tot onder het volkstuintencomplex heeft verspreid. Teven is op de grens met volkstuintencomplex nu ook sprake van een interventieoverschrijding voor vinylchloride naast de al bekende interventieoverschrijding voor cis-1,2-dichlooretheen. Op grond hiervan heeft Provincie Zuid-Holland besloten dat er beheersmaatregelen moeten worden getroffen om het volkstuintencomplex te beschermen.

## **2.5 Omstandigheden biologische afbraak**

Voor het vaststellen van de omstandigheden voor biologische afbraak zijn in het middeldiepe grondwater de in tabel 2.2 aangegeven macrochemische parameters bepaald. De bevindingen van de metingen en analyses worden hieronder samengevat.

**Tabel 2.2 Macrochemische parameters d.d. 8 maart 2004**

	instromend	bron	Pluim
Peilbuisnummer	1	5	33
Filtertraject (m -mv)	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00
Zuurstof (O <sub>2</sub> ) (in mg/l)	0,50	0,64	0,71
Redox (in mV)	-80	-80	-198
nitraat (mg/l)	2,3	<0,2	4,7
Nitriet (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1
IJzer (2+) (mg/l)	18	6,9	12
sulfaat (mg/l)	72	100	94
sulfide (vrij) (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1
Etheen (µg/l)	<0,25	<0,25	8,5
Ethaan (µg/l)	<0,25	<0,25	1,4
Methaan (µg/l)	<25	<25	260
bicarbonaat (mg/l)	430	540	730
vrij koolzuur (mg/l)	83	130	190
ammonium (mgN/l)	0,7	0,8	0,6
(ortho) fosfaat (mgP/l)	<0,1	0,4	0,7

#### *Redox en zuurstof*

Op basis van de in het grondwater op de locatie gemeten redoxpotentialen en zuurstofgehalten kan worden gesteld dat sprake is van anaërobe omstandigheden. Dit zijn in principe gunstige omstandigheden voor de natuurlijke afbraak van chloorkoolwaterstoffen.

#### *Nitraat/nitriet*

De gehalten aan nitraat zijn licht verhoogd in het instroom en pluimgebied. Nitriet wordt echter niet aangetroffen. Naar verwachting speelt nitraatreductie dan ook geen grote rol. Indien nitraat in hoge concentraties zou worden aangetroffen zou dit een remmende werking kunnen hebben op de afbraak van gechloreerde koolwaterstoffen, aangezien nitraat dan als electronenacceptor gebruikt kan worden.

#### *IJzer<sup>3+</sup>/ijzer<sup>2+</sup>*

Voor het aantonen van ijzer<sup>3+</sup> reducerende reacties kan gekeken worden naar het verdwijnen van driewaardig ijzer of het ontstaan van ijzer<sup>2+</sup> als eindproduct. De gemeten ijzer<sup>2+</sup> gehalten geven aan dat ijzerreductie plaatsvindt, daar de gehalten vanaf het instroomgebied richting het pluimgebied toenemen.

#### *Sulfaat/sulfide*

Variaties in het sulfaatgehalte in het grondwater binnen en buiten de verontreiniging kunnen een indicatie zijn voor het optreden van sulfaatreductie. Bij deze afbraakomstandigheden wordt sulfaat verbruikt en sulfide gevormd. De sulfaatgehalten in de peilbuizen zijn relatief hoog en dit wijst er op dat sulfaatreductie kan optreden. De sulfidegehalten blijken bij alle peilbuizen onder de detectielimiet te liggen. Naar verwachting worden de sulfides wel geproduceerd, echter door dat deze makkelijk complexen vormen met zware metalen komen deze mogelijk niet in oplossing voor. Onder sulfaatreducerende omstandigheden is afbraak van gechloreerde koolwaterstoffen goed mogelijk.

#### *Etheen, ethaan, methaan*

Etheen, ethaan en methaan zijn eindproducten in de anaërobe afbraakroute van PER en TRI. Deze eindproducten zijn alleen in de pluim aangetroffen en geven aan dat volledige afbraak mogelijk is. Gezien de relatief geringe concentraties kan gesteld worden dat de afbraak tot etheen, ethaan en methaan relatief langzaam verloopt. Methaan kan daarnaast ook vrijkomen bij vergistingsprocessen indien veel organisch stof voorkomt in de bodem bijvoorbeeld door aanwezigheid van veenlagen. De relatief geringe concentraties aan methaan wijzen niet op methanogene omstandigheden of te wel methanogenese.

#### *Bicarbonaat/vrij koolzuur*

Vrij koolzuur wordt over het algemeen bij methanogenese omgezet in methaan. Bicarbonaat wordt ondermeer gevormd bij aërobe afbraak. Gezien de relatief hoge koolzuurgehalten en de geringe gehalten aan methaan treedt methanogenese nauwelijks op.

### *Ammonium/fosfaat*

Ammonium en fosfaat vormen de nutriënten die nodig zijn voor de groei van micro-organismen. De gehalten worden voldoende geacht voor het laten verlopen van natuurlijke afbraak.

### **Resumé**

In het middeldiepe grondwater op de locatie is sprake van anaërobe afbraakomstandigheden met waarschijnlijk overwegend ijzerreducerende en sulfaatreducerend omstandigheden. Naar verwachting speelt nitraatreductie geen grote rol. Het aantreffen van de afbraakparameters (afbraakproducten) cis 1,2-dichlooretheen, vinylchloride, etheen, ethaan en methaan duidt er op dat in het grondwater op de locatie sprake is van biologische afbraak van PER en TRI. Echter de natuurlijke afbraak zorgt niet voor een volledige afbraak van alle VOCI-componenten.

### **2.6 Aanleiding beheersmaatregelen**

Aanleiding tot het treffen van beheersmaatregelen vormen de resultaten van de uitgevoerde grondwatermonitoringen op de locatie en de geconstateerde ontoelaatbare verspreiding van chloorkoolwaterstoffen in het middeldiepe grondwater in de richting van het volkstuintencomplex.

### **2.7 Doelstelling beheersmaatregelen**

Voor bescherming van het volkstuintencomplex dienen zodanige beheersmaatregelen te worden getroffen dat verdere verspreiding van de verontreiniging richting het volkstuintencomplex wordt tegengegaan. Hierbij wordt gestreefd naar een functiegerichte en kosteneffectieve aanpak van de verontreinigingspluim die past bij het gebruik van de locatie. De toepassing van reactieve schermen dient aan te sluiten bij deze doelstelling.

### **2.8 Reactieve schermen**

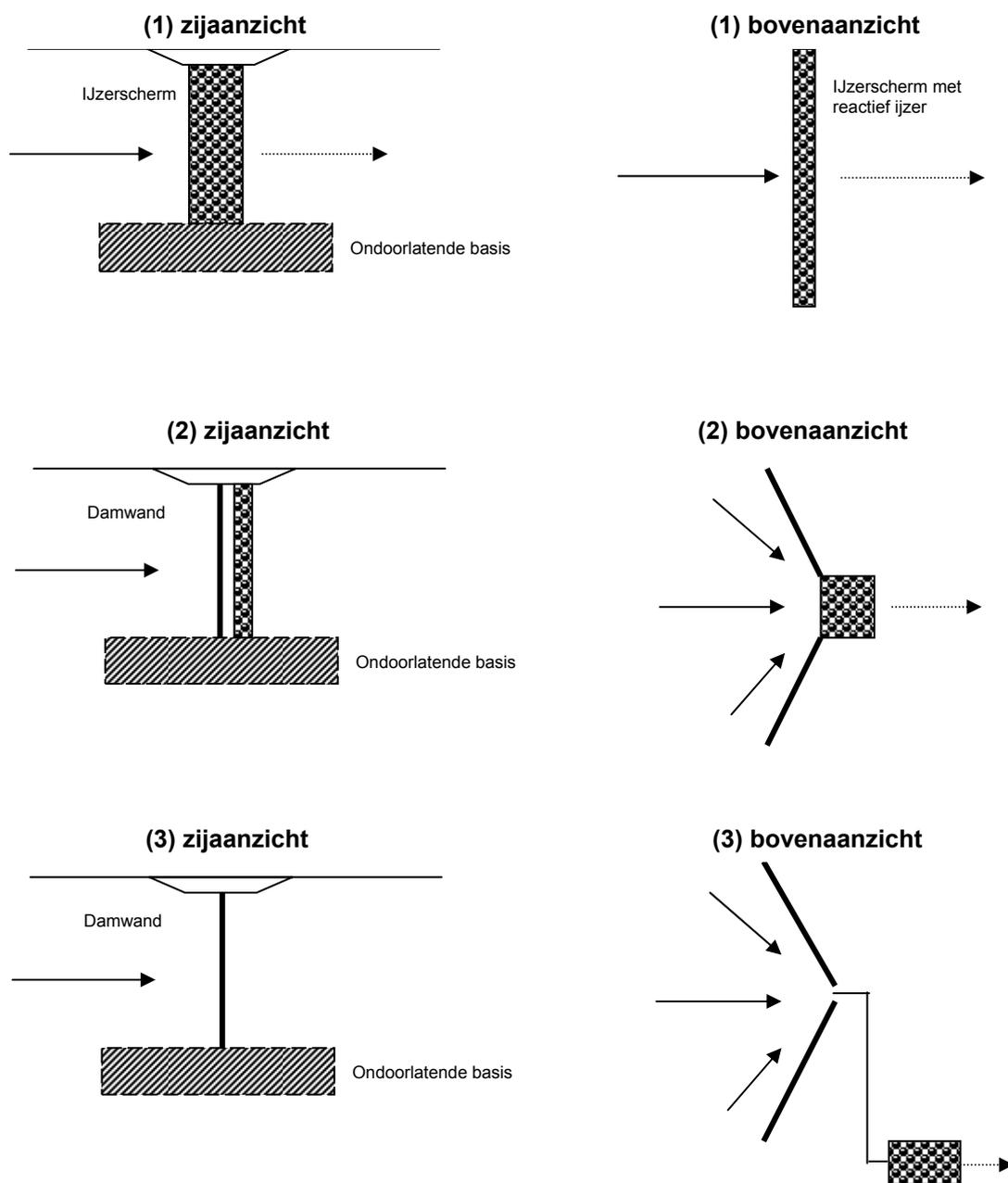
In april 2004 heeft Grontmij een studie naar beheersmaatregelen<sup>1</sup> verricht om het volkstuintencomplex te kunnen beschermen tegen de instroom van chloorkoolwaterstoffen. Hierbij is gekeken naar de mogelijkheden om een reactief scherm te plaatsen loodrecht in de stroombaan van de verontreiniging. Een reactief scherm kan meerdere vormen hebben. Hieronder zijn enkele voorbeelden genoemd:

- Permeabel scherm bestaande uit reactief ijzer (1). Het principe van dit type scherm berust op het in-situ afbreken van de VOCI door oxidatie van ijzer. Het scherm bevat nulwaardig ijzer in granulaire vorm, die de gechloreerde koolwaterstoffen reduceren. Bij het doorstromen van de wand worden de VOCI-componenten omgezet naar onschadelijke componenten (etheen/ethaan). Het systeem is passief en het levert geen risico's op voor uitloging van zware metalen. Het ijzer in het scherm heeft een relatieve lange levensduur. Na het aanbrengen is het niet nodig water op te pompen of te zuiveren. Toepassing van een 'ijzerscherm' kan in verschillende variaties. Naast het permeabel scherm is het ook mogelijk een funnel & gate aanpak te volgen waarbij de waterstroom via damwanden wordt geconcentreerd naar enkele openingen waar reactief ijzer is aangebracht (2). Indien de hydrologische situatie dit toelaat is het ook mogelijk het water af te vangen via een damwand en te leiden naar een separate zuivering bestaande uit reactief ijzer (3). Deze drie mogelijkheden zijn in figuur 2.3 visueel toegelicht.
- Biologisch scherm. Nog meer dan een ijzerscherm berust het principe van een biologisch scherm op het creëren van ideale omstandigheden voor de biologische afbraak van verontreinigingen. De meeste biologische schermen bereiken dit door het injecteren van stoffen die direct of indirect de afbraak stimuleren. Voor de aanpak van VOCI verontreinigingen is het creëren van methanogene condities in samenhang met een goede voedsel voorziening de meest gekozen oplossing. In tegenstelling tot een reactief ijzerscherm is voor dit type scherm onderhoud noodzakelijk.

---

<sup>1</sup> Studie beheersmaatregelen Wassenaarseweg te Katwijk, Toepassing van een ijzerscherm, Grontmij Nederland bv, 13/99047100/CS, 5 april 2004.

Dit onderhoud bestaat meestal uit het circuleren van substraat. Een recente ontwikkeling betreft het toepassen van dragermateriaal in een scherm waarop zich biologie ontwikkelt. Indien dit systeem zich succesvol ontwikkelt, worden de kosten voor instandhouding sterk gereduceerd en vergelijkbaar aan een ijzerscherm.



**Figuur 2.3** *Verschillende vormen van een reactief ijzerscherm*

## 2.9 Evaluatie keuze voor ijzerscherm

Uit de studie naar beheersmaatregelen is gebleken dat het toepassen van een volledig permeabel ijzerscherm op deze locatie een interessante en kansrijke optie is. Ten opzichte van een geohydrologisch scherm of een bioscherm heeft een ijzerscherm als voordeel dat er geen actieve maatregelen, zoals pompen, zuivering etc. noodzakelijk zijn waardoor de instandhoudingskosten relatief laag zijn (alleen monitoring). Daar komt bij dat een ijzerscherm over het algemeen een lange levensduur heeft.

Uit een vergelijking van de kosten van verschillende type beheersmaatregelen blijkt ook dat de totale kosten voor een ijzerschermbij een instandhoudingsduur van 30 jaar bijna een factor 2 lager zijn ten opzichte van een geohydrologische beheersing of een bioschermbij.

Op basis van de bovenstaande argumenten gaat de voorkeur uit naar de toepassing van een ijzerschermbij. Hierbij is gekozen voor de meest eenvoudige uitvoering, namelijk een volledig permeabel ijzerschermbij.

Dit type is wereldwijd het meest toegepast en heeft tot op heden het minste onderhoud. Daarmee is de duurzaamheid van dit schermtypet het grootst.

In de Verenigde Staten en Canada worden ijzerschermbij al meer dan 10 jaar met succes toegepast voor het afdammen van verontreinigingspluimen met VOCl. In de meeste demonstratieprojecten bleek dat de ijzerschermbij een lange levensduur hebben (> 15 jaar) en in principe geen onderhoud vergen.

Het volledig permeabele ijzerschermbij kan langs de terreingrens met het volkstuintencomplex worden aangebracht. Hierdoor wordt de verspreiding van verontreinigingen in het middeldiepe grondwater in de richting van het beschermde gebied voorkomen.

## **2.10 Uitgangspunten en randvoorwaarden ijzerschermbij**

### **2.10.1 Uitgangspunten**

Voor de beheersing middels het ijzerschermbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Het voorgenomen bodemsaneringsbeleid zoals dat is verwoord in het rapport 'Van trechter naar zeef, afwegingsproces saneringsdoelstelling' (oktober 1999) en het eindrapport 'Doorstart A-5'.
- Het Gezamenlijk Bodemsaneringsbeleid van de provincie Zuid-Holland en de gemeenten Dan Haag, Dordrecht, Leiden, Rotterdam en Schiedam (BOBEL) 2003.
- De verontreinigingssituatie, de bodemopbouw en geohydrologie zoals weergegeven in hoofdstuk 2.
- Op basis van de in 2003 en 2004 uitgevoerde monitoringen is geconstateerd dat sprake is van horizontale verspreiding van CIS en VC in het middeldiepe grondwater tot onder het volkstuintencomplex.
- De beheersmaatregelen dienen er voor te zorgen dat conform IBC er geen verdere verspreiding richting het volkstuintencomplex kan optreden.
- Voor de terugsaneerwaarden in het gebied stroomafwaarts van het ijzerschermbij wordt uitgegaan van de tussenwaarde ( $\frac{1}{2}$  (S+I)) voor CIS (10 µg/l) en VC (2,5 µg/l), deze komen overeen met de signaalwaarden uit voorgaande saneringsaanpak met FEB.
- Het eindresultaat van de beheersmaatregelen komt overeen met trede 5 in de saneringsladder.
- Gedurende de beheersing zullen voldoende ijkmomenten ingebouwd moeten worden om het verloop van de beheersing te kunnen volgen.

### **2.10.2 Randvoorwaarden**

De volgende randvoorwaarden zijn gehanteerd voor de beheersing:

- De uitvoering van de beheersmaatregelen dient afgestemd te worden met de gebruiker/eigenaar van de locatie.
- Bij de uitvoering van de beheersmaatregelen moet de hinder en overlast voor de omgeving zoveel als redelijkerwijs mogelijk is, beperkt worden.
- Voor de instandhouding van het reactieve scherm dient de huidige natuurlijke grondwaterstromingsrichting en de kwelsituatie gehandhaafd te blijven op de locatie.
- Er mag als gevolg van de beheersmaatregel geen (onherstelbare) schade optreden aan panden in de omgeving van de locatie.

### 3. ONTWERP EN DIMENSIONERING

#### 3.1 Inleiding

In juli 2005 heeft Grontmij een ontwerp- en uitvoeringsplan<sup>2</sup> opgesteld in samenwerking met NTP Milieu. Het ontwerp en de dimensionering van het ijzerscherm wordt in dit hoofdstuk nader omschreven. Als eerste wordt ingegaan op het reactiemechanisme van ijzerschermen, waarna een toelichting op de techniek wordt gegeven. Vervolgens wordt het ontwerp en de dimensionering van het ijzerscherm besproken waarbij gebruik wordt gemaakt van de resultaten van de in september 2004 tot december 2004 door Vito<sup>3</sup> uitgevoerde kolomtest<sup>4</sup> en de doorlatendheidsmetingen.

#### 3.2 Afbraakmechanisme ijzerschermen

Onder anaërobe (zuurstofloze) omstandigheden verloopt de afbraak van PER en TRI volgens onderstaande afbraakroute:



PER            TRI            CIS            VC            Etheen    Ethaan

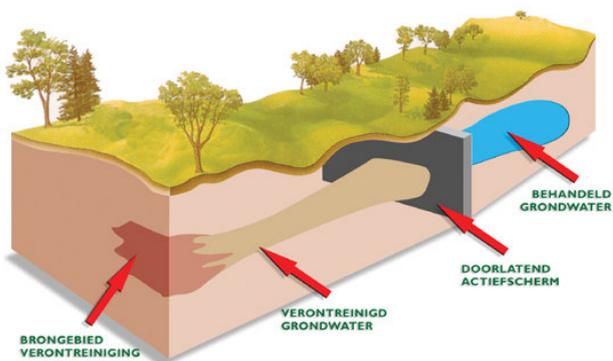
Deze natuurlijke afbraak verloopt in de praktijk relatief langzaam. Wanneer de chloorkoolwaterstoffen in het grondwater met het nulwaardige ijzer in aanraking komen kunnen de volgende redoxreacties optreden:



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

#### 3.3 Toelichting op de techniek

Ijzerschermen zijn prima geschikt voor de aanpak van bodemverontreinigingen met chloorkoolwaterstoffen, zoals per en tri. Deze ontvettingsmiddelen opgelost in het grondwater zijn vanwege de langdurige nalevering moeilijk te saneren door middel van een pump & treat-systeem. Met een ijzerscherm, geplaatst stroomafwaarts van de bronzone van de verontreiniging, wordt de verontreiniging begrensd en wordt de grondwaterverontreiniging achter het scherm verschoond.



**Figuur 3.1 Schematische weergave ijzerscherm**

<sup>2</sup> Ontwerp- en uitvoeringsplan Wassenaarseweg te Katwijk, Toepassing van een ijzerscherm, Grontmij Nederland bv, 13/99059029/CS, 1 juli 2005.

<sup>3</sup> Vlaamse Instelling voor Technologische Onderzoek.

<sup>4</sup> "Haalbaarheidstest zerovalent ijzer voor de behandeling van grondwater verontreinigd met VOC's (Katwijk, NL)", Vito, kenmerk 2005/MPT/R/018, maart 2005.

Na de eenmalige installatie zijn de energiekosten voor het in stand houden van het systeem nihil. Daar waar bij andere saneringsconcepten grondwater wordt onttrokken, gezuiverd en geloosd wordt bij een ijzerscherm gebruik gemaakt van de natuurlijke stroomsnelheid van het grondwater, de drijvende kracht achter het systeem.

Voor het aanbrengen van een ijzerscherm wordt voor de aanpak van dit geval in het ondiepe grondwater met een kettingfreesmachine een sleuf gegraven van circa 5,5 meter diepte en 30 centimeter breed. Via een trechter wordt deze sleuf, gelijktijdig met het graven, met een mengsel van zand en ijzergranulaat gevuld, waardoor een scherm ontstaat. Het ijzergranulaat betreft ijzer in pure vorm, zogenaamd nulwaardig ijzer (Fe-0). Zodra de chloorkoolwaterstoffen in aanraking komen met het ijzer ontstaat een oxidatiereactie en worden de stoffen omgevormd tot onschadelijke reststoffen zoals etheen, ethaan en opgelost ijzerchloride. Op een diepte van 5,5 m –mv wordt het scherm aangesloten op een slecht doorlatende kleilaag, die het scherm aan de onderzijde afsluit.

Het op deze wijze toepassen van een ijzerscherm is uniek voor de Nederlandse bodemsaneringsmarkt. De techniek, die onder licentie wordt verstrekt door EnviroMetal Technologies Inc. (ETI) gevestigd in Waterloo, Canada, wordt inmiddels wereldwijd op meer dan 100 locaties toegepast. Met de eerste projectreferentie is inmiddels zo'n 15 jaar van goede functionaliteit aangetoond. In de referentielijst in bijlage 2 zijn een groot aantal van de toegepaste ijzerschermen weergegeven, met een doorverwijzing naar beschrijving op een website. Voor toepassing van de techniek in Nederland is sinds oktober 2003 een licentie verstrekt aan NTP Milieu te Enschede.



***Figuur 3.2 Aanleg ijzerscherm in de VS***

### **3.4 Selectie reactief ijzer**

Voor het ijzerscherm dient gebruik te worden gemaakt van ijzergranulaat met een hoge reactiviteit. Het is van belang dat zuiver ijzer wordt gebruikt met meer dan 95% nulwaardig ijzer en een geringe hoeveelheid koolstof. Geschikte ijzersoorten zijn:

- Conelly iron uit de VS;
- Metalpulver FeA4 van Gotthart Maier uit Duitsland.

Het Conelly iron uit de VS heeft de hoogste reactiviteit, echter dit ijzer is relatief duur vanwege het overzeese transport. Het ijzer van Gotthart Maier heeft op Conelly iron na de hoogste reactiviteit en wordt in Europa al veel toegepast in ijzerschermen. Dit ijzer wordt speciaal voor deze toepassing door Gotthart Maier geproduceerd. Het heeft een groot specifiek oppervlak en een hoge doorlatendheid. Gezien de goede ervaringen met dit type ijzer uit Duitsland gaat voor de aanleg van het ijzerscherm de voorkeur uit naar dit ijzer.

### **3.5 Haalbaarheidstest**

Ten behoeve van het ontwerp van het ijzerscherm en voor het vaststellen van de juiste dimensionering is in september 2004 tot december 2004 door Vito een haalbaarheidstest uitgevoerd. De haalbaarheidstest bestaat uit een kolomtest, waarmee op laboratoriumschaal het ijzerscherm is nagebootst. In deze kolomtest is grondwater van de locatie geleid door een met

ijzergranulaat gevulde kolom. Op verschillende plaatsen langs de kolom zijn periodiek de VOCl-concentraties gemeten. Op basis hiervan zijn de halfwaardetijden van de verschillende stoffen afgeleid. Aan de hand van de halfwaardetijden, de concentraties in het grondwater en de terugsaneeerwaarden van de VOCl is een inschatting van de benodigde verblijftijd in het ijzerscherm gegeven. Deze verblijftijd vermenigvuldigd met de stroomsnelheid van het grondwater bepaald de minimaal benodigde dikte van het ijzerscherm. Een juiste bepaling van de verblijftijd en de stroomsnelheid is dus van cruciaal belang voor het vaststellen van de benodigde dikte van het ijzerscherm vast te stellen. Tevens kan aan de hand van de kolomtest de benodigde verhouding van ijzer en zand in het ijzerscherm worden vastgesteld. Uit onderzoek van ETI blijkt dat er sprake is van een lineair verband tussen de halfwaardetijd van TRI en het benodigde percentage ijzer<sup>5</sup>. De kolomtesten worden door VITO daarom standaard uitgevoerd met 100% ijzer.

In bijlage 3 zijn de resultaten van de kolomtest samengevat. De resultaten van de kolomtest vormen het uitgangspunt voor de dimensionering van het ijzerscherm. Hieronder wordt kort ingegaan op de doelstelling en de conclusies van de kolomtest.

### 3.5.1 Doelstelling kolomtest

De kolomtest is uitgevoerd met grondwater van de locatie Katwijk en heeft de volgende drie doelstellingen:

- Bepaling van de afbraaksnelheden van VOCl die bereikt kunnen worden met het te gebruiken (granulaire) ijzer voor het ijzerscherm.
- Berekening van de benodigde verblijftijd van het grondwater in het ijzerscherm op basis van de kolomtest.
- Vaststellen in welke mate neerslagen (precipitaties) van mineralen kunnen ontstaan die het afbraakproces kunnen beïnvloeden.

### 3.5.2 Conclusies kolomtest

Op basis van de chemische samenstelling van het water en de resultaten van de uitgevoerde kolomtest heeft Vito geconcludeerd dat een reactief ijzerscherm haalbaar is voor de locatie in Katwijk. Vito heeft experimenteel vastgesteld dat de belangrijkste VOCl-componenten in het grondwater (CIS en VC) kunnen worden afgebroken tot onder de gestelde normen na een gemiddelde verblijftijd van  $67 \pm 12,5$  uur in reactief scherm met 100 % ijzer.

De halfwaardetijden en de verblijftijden die voor de verontreiniging met CIS en VC zijn bepaald, vallen over het algemeen gunstiger uit dan de literatuurwaarden die in de studie beheersmaatregelen beschikbaar waren voor het ijzer uit Duitsland. De kolomtest is langer uitgevoerd dan voorzien, waarbij extra meetrondes zijn verricht om tot betrouwbare concentratieprofielen te komen.

Vito heeft de dikte van het ijzerscherm indicatief berekend op circa 2 cm voor een scherm met 100% ijzer en 10 cm voor een scherm met 20% ijzer. De berekening is gebaseerd op een stroomsnelheid van 2,4 m/jaar, die Grontmij indicatief heeft berekend in de studie beheersmaatregelen. Op basis van de doorlatendheidsmetingen van Grontmij, die in bijlage 4 zijn weergegeven, kan een nauwkeurigere berekening worden gemaakt van de dikte van het scherm.

De levensduur van een ijzerscherm wordt ondermeer bepaald door de anorganische samenstelling van het grondwater en de stroomsnelheid van het grondwater door het ijzerscherm. Het grondwater in Katwijk is tamelijk rijk aan opgeloste stoffen en heeft een relatief hoge alkaliniteit, wat de levensduur op termijn kan beperken. De levensduur van het ijzerscherm wordt zonder onderhoud geschat op minstens 10 tot 15 jaar door Vito en ETI op basis van de anorganische analyses van het grondwater en uitgaande van een stroomsnelheid van 6 m/jaar. Bij een lagere stroomsnelheid is de levensduur naar verwachting minstens 20 jaar.

---

<sup>5</sup> TN 3.07 Rationale for the use of Iron/Sand mixtures in PRB installations en publicatie Effect on Temperature and Iron Content on PRB design, May 2004, Fourth International Congress on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey California (zie bijlage 2)

### 3.6 Dimensionering ijzerscherm

Op basis van de kolomtest en de uitgevoerde doorlatendheidsmetingen kan een nauwkeurige dimensionering van het ijzerscherm worden uitgevoerd. De resultaten van de kolomtest worden daarbij opgeschaald naar een full scale toepassing van het ijzerscherm.

#### 3.6.1 Vertaling kolomtest naar dimensionering in praktijk

Voor de opschaling van de resultaten van de kolomtest naar een full scale toepassing van het ijzerscherm zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- de afbraakkinetiek van CIS en VC verloopt volgens kolomexperiment;
- de stroomsnelheid van het grondwater volgt uit de doorlatendheidsmetingen en wordt niet beïnvloed door het volledig permeabele ijzerscherm;
- de doorlatendheid en porositeit van het ijzerscherm is groter dan die van de deklaag waar de verontreiniging zich in bevindt;
- de verontreinigingsgraad van het grondwater kan variëren;
- voor de terugsaneerwaarden achter het scherm is uitgegaan van de tussenwaarden ( $\frac{1}{2}(S+1)$ ), welke overeenkomen met 10 µg/l CIS en 2,5 µg/l VC.

Op grond van de bovenstaande uitgangspunten kan de benodigde dikte van het ijzerscherm worden berekend uit de in het kolomexperiment bepaalde verblijftijd en de stroomsnelheid van het grondwater. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$D = v \cdot t \quad \text{waarin:}$$

D = schermdikte	m
v = gemiddelde stroomsnelheid	m/uur
t = verblijftijd	uur

De schermdikte is berekend voor de gemiddelde en maximale verblijftijd en stroomsnelheid. In tabel 3.1 is de dimensionering weergegeven. De maximale waarden zijn in alle berekeningen van Vito en Grontmij voor elke parameter gebaseerd op het gemiddelde plus de standaarddeviatie.

**Tabel 3.1 Dimensionering ijzerscherm**

Parameter	Gemiddelde	Maximum
Stroomsnelheid	1,6 ± 0,8 m/jr	2,4 m/jr
Verblijftijd	67 ± 12,5 uur	79,5 uur
Schermdikte 100 % ijzer	1,2 ± 1,0 cm	2,2 cm

Uit de dimensionering blijkt dat de benodigde dikte voor een ijzerscherm gevuld met 100% ijzer slechts 2,2 cm bedraagt. In de praktijk kan een dergelijk dun ijzerscherm niet worden ingegraven. De minimale sleufbreedte die voor een ijzerscherm gehanteerd kan worden bedraagt 30 cm. Het ijzer zal daarom met zand opgemengd worden waarna het in een sleuf kan worden aangebracht.

#### 3.6.2 Mengverhouding ijzer/zand

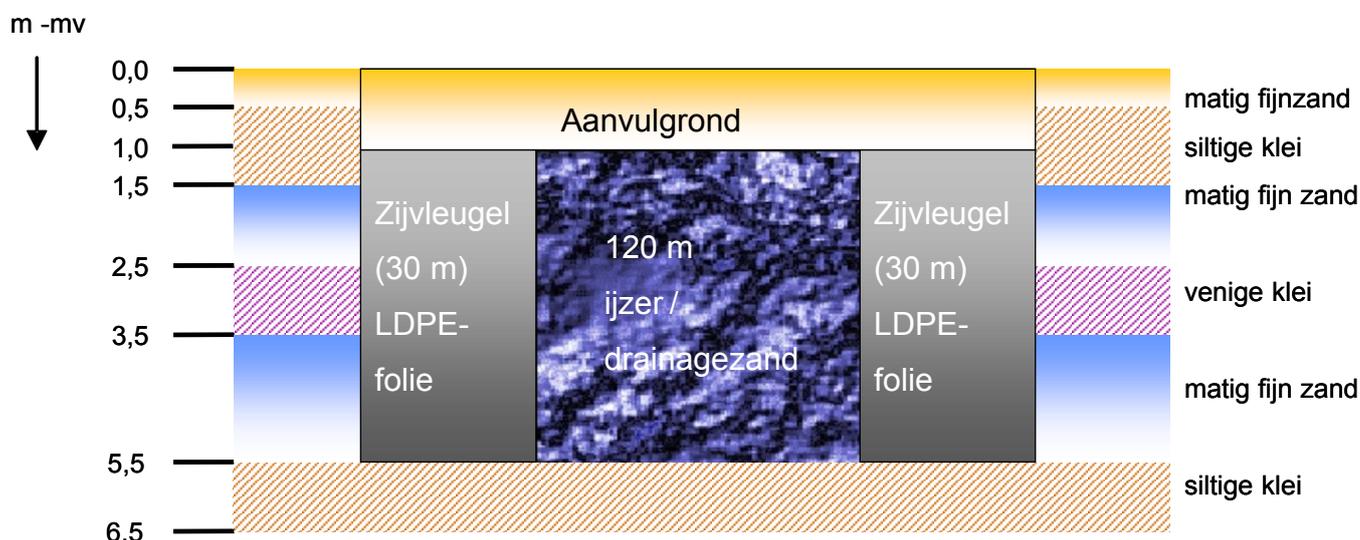
Voor een effectieve werking van het ijzerscherm dient volgens ETI te Canada tenminste 20% ijzer in het scherm verwerkt te worden. De 20 vol.% Ontwerpregel van ETI is opgenomen in bijlage 5 in het Technical 3.13, Specification for construction of a granular Iron PRB using Trenching methods. Hieruit volgt dat indien minder dan 20% ijzer in het scherm zou worden toegepast, de kans bestaat dat verontreinigingsdeeltjes het scherm passeren zonder dat deze in contact komen met de ijzerdeeltjes. Voor het opmengen van het ijzer dient bij voorkeur grof drainagezand gebruikt te worden, zodat de doorlatendheid van het scherm hoog blijft.

Wanneer een sleuf met een breedte van 30 cm wordt opgevuld met 20% ijzer en 80% drainagezand is de effectieve dikte van het ijzer gelijk aan: 30 cm x 0,20 = 6 cm. Uit tabel 3.1 blijkt dat bij deze verhouding de effectieve schermdikte in principe voldoende is. Het ijzerscherm heeft dan een overdimensionering van een factor 2,7.

Het reactieve ijzer dient opgemengd te worden met drainagezand dat een laag kalkgehalte heeft. Dit is van belang om eventuele neerslagen met calcium op het ijzer tot een minimum te beperken en de levensduur te kunnen waarborgen. De levensduur van het ijzerscherm wordt uitgaande van de samenstelling van het grondwater en een gemiddelde stroomsnelheid van 1,6 m/jaar geschat op minstens 20 jaar.

### 3.7 Ontwerp ijzerscherm

Het ijzerscherm dient over een lengte van 180 m langs de terreingrens te worden aangelegd om de pluim geheel af te kunnen vangen. Voor het ontwerp van het ijzerscherm wordt uitgegaan van een volledig permeabel scherm. Dit is de meest eenvoudige toepassing van het ijzerscherm met de minste hydrologische ingrepen. In bijlage 6 is de ligging van het ijzerscherm langs de aanwezige sloot op de grens met het volkstuinencomplex weergegeven. In dit ontwerp zijn zijvleugels bestaande uit LDPE-folie met een lengte van 30 m opgenomen om de hoeveelheid ijzer te beperken tot een lengte van 120 m. Het grondwater wordt hierdoor aan de randen van het scherm licht afgebogen naar het midden. Het ijzerscherm en het foliescherm kan middels een kettinggraver worden ingegraven in de middeldiepe zandlaag (traject circa 1,0 tot 5,5 m -mv). De kettinggraver vult na het trekken van de sleuf deze weer direct op met een mengsel van ijzer en zand ter plaatse van het beoogde ijzerscherm. In figuur 3.3 is het ontwerp van het ijzerscherm in een dwarsdoorsnede weergegeven.



**Figuur 3.3** Ontwerp ijzerscherm in dwarsdoorsnede

### 3.8 Modelberekeningen

Ter onderbouwing van de beheersmaatregel zijn geohydrologische berekeningen uitgevoerd, waarmee de grondwaterstroming door het scherm kan worden beschouwd. Deze zijn in bijlage 7 weergegeven. Hieruit blijkt dat er geen gevaar is voor een onderstroom van verontreiniging via het eerste watervoerend pakket. In bijlage 7 zijn tevens stoftransportberekeningen opgenomen om inzicht te krijgen in de werking van het ijzerscherm op de verontreiniging met ondermeer CIS.

### 3.9 Fall back scenario

De werking van het ijzerscherm zal periodiek worden gemonitord. Op de in het monitoringsplan aangegeven ijkmomenten wordt in overleg met het bevoegd gezag de werking geëvalueerd. Hierdoor wordt het mogelijk om, indien noodzakelijk, de beheersing bij te sturen en in het uiterste geval een fall back scenario in werking te stellen.

Voor de beheersing middels het ijzerscherm is voorzien in het volgende fall back scenario. Wanneer een passieve beheersing met het ijzerscherm niet leidt tot een daling van de gehalten tot onder de terugsaneerwaarde stroomafwaarts van het scherm kan gekozen worden voor een

actieve beheersing met behulp van het ijzerscherm. In dat geval kan een geringe hoeveelheid grondwater worden onttrokken achter het scherm en circa 150 m stroomopwaarts weer geïnfiltreerd worden in het brongebied. Het grondwater wordt dan een tweede keer door het scherm geleid. Bijkomend voordeel is dat hiervoor geen bovengrondse zuivering nodig is. Een ander mogelijk fall back scenario kan zijn het versterken van biologische afbraak achter het ijzerscherm door toediening van een geschikt substraat. De kans op een fall back scenario wordt gering geacht aangezien er een haalbaarheidstest (kolomexperiment) is uitgevoerd en een overdimensionering heeft plaatsgevonden.

### 3.10 Resultaten review ontwerp

Het ontwerp van het ijzerscherm is door ETI in Waterloo Canada en TNO in Apeldoorn gereviewd.

#### Commentaar van TNO op het ontwerp:

Op 14 juni 2005 is het ontwerp met TNO besproken. Uit dit overleg met TNO is als belangrijkste commentaar naar voren gebracht dat een combinatie van onzekerheden, ondanks het feit dat met de 20 vol-%-ontwerpregel een ruime veiligheidsfactor is ingebouwd, er plaatselijk mogelijk toch onvoldoende ijzer in het scherm zit om te voldoen aan de terugsaneerwaarde. Het betreft met name het effect van de optelling van mogelijke afwijkingen door:

- lokale verschillen in grondwatersnelheden en concentraties aan Cis en VC in het grondwater;
- kleinere schermbreedte als gevolg van instabiliteit van de bodem;
- verschillen in de mengverhouding tussen de hoeveelheden aan ijzer en zand.

Op basis van de optelling van deze afwijkingen adviseert TNO de mengverhouding te verhogen, in ieder geval ter plaatse van het verspreidingsgebied met de hoogst gemeten concentraties.

#### Commentaar van ETI op het ontwerp:

Op 25 juli 2005 is door ETI schriftelijk commentaar gegeven op het ontwerp voor de toepassing van een ijzerscherm aan de Wassenaarseweg te Katwijk. De opmerkingen die door ETI gemaakt zijn betreffen:

- Op basis van een eerder gepresenteerd ontwerp is de ligging van het ijzerscherm aangepast met meer afgeronde vormen;
- Als gevolg van de ondoorlatende secties van het scherm kunnen ter plaatse hogere stroomsnelheden in de grondwaterstroming ontstaan. Dit is met name een punt van aandacht in de directe omgeving van peilbuis 40, daar waar de hoogste concentraties in het grondwater gemeten zijn;
- Met de 20 vol-% aan ijzer in het scherm, en een theoretische schermdikte van 6 cm, wordt ruimschoots voldaan aan de minimaal benodigde hoeveelheid aan ijzer in het scherm;
- Het ijzer dient te worden opgemengd met zand van een vergelijkbare korrelgrootteverdeling als het ijzer.
- Vanaf het moment van mengen van het ijzer en zand en bij blootstelling aan de buitenlucht dient het mengsel binnen 3 dagen te worden aangebracht.

### 3.11 Definitief ontwerp

Uitgaande van het Ontwerp- en Uitvoeringsplan en het commentaar van TNO en ETI is het definitief ontwerp door NTP Milieu vastgesteld. In het definitief ontwerp is gekozen voor de uitvoering van de secties Fe/zand en de ondoorlatende secties (zijvleugels) op de volgende wijze:

#### - Sectie met mengverhoudingen Fe/zand in totaal 120 m:

Voor de uitvoering van het ijzerscherm teneinde een maximale zekerheid te garanderen zal het ijzerscherm over een lengte van 30 m, ter plaatse van peilbuis 40 worden gevuld met een mengsel van ijzer/zand in de verhouding 40:60 vol.% en voor het overige deel over een lengte van 90 m in de verhouding 20:80 vol.%. Einddiepte van het scherm is 5,5 m -mv. bij een breedte van 0,3 m. Bij toepassing van een mengverhouding van 40:60 vol.% is de effectieve dikte van het ijzer gelijk aan:  $30 \text{ cm} \times 0,40 = 12 \text{ cm}$ . Er is dan sprake van een overdimensionering van een factor 5,4. Gesteld kan worden dat deze extra overdimensionering een maximale zekerheid levert voor de werking van het ijzerscherm.

- Ondoorlatende secties:

Voor de ondoorlatende secties is gekozen voor het aanbrengen van een foliescherm over beide buitensecties, over een lengte van ieder 30 m. Het foliescherm wordt voor beide secties voorzien van een LDPE-folie met een dikte van 1 mm. Dit folie laat geen water door, heeft een goede hoogwaardige chemische bestendigheid en een lange levensduur. Het folie wordt aangebracht van 0,5 tot 5,5 m -mv. en doorkruist het aangelegde ijzerscherm. De holle ruimte naast het folie wordt aangevuld met schone grond uit het depot, en ter plaatse van de doorkruising met het ijzerscherm over een breedte van ca. 1 m aangevuld met het ijzer/zandmengsel.

In figuur 3.4 is schematisch het definitief ontwerp van het ijzerscherm met dimensies weergegeven.

**Ijzerscherm:**

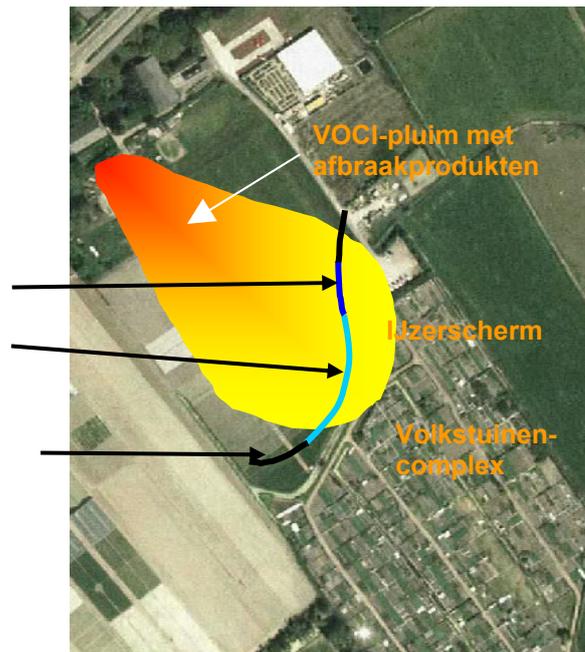
- 180 m totale lengte
- 30 cm breed
- 5,5 m diep

**Ijzer/zand verhoudingen:**

- 30 m 40/60 in de haard
- 90 m 20/80 overig deel

**Foliescherm:**

- 2 x 30 m aan beide zijden



**Figuur 3.4 Schematisch ontwerp ijzerscherm**

### 3.12 Functionaliteit ijzerscherm

Na de oplevering van het ijzerscherm wordt de functionaliteit of te wel de werking gemonitord met behulp van monitoringspeilbuizen C1 tot en met C6, die voor in en achter het ijzerscherm worden geplaatst. De functionaliteit van het ijzerscherm is aangetoond op het moment dat de concentraties aan CIS en VC in het ijzerscherm zijn afgenomen tot beneden de tussenwaarde (T-waarde: 10 µg/l voor CIS en 2,5 µg/l voor VC). Het ijzerscherm dient binnen een maximale termijn van 4 jaar ná oplevering te voldoen aan bovengenoemde concentraties.

### 3.13 Garantstelling ijzerscherm

Op 11 januari 2006 heeft NTP Infra bv namens NTP Milieu verklaard dat zij aansprakelijk zal zijn voor de goede en functionele werking van het ijzerscherm aan de Wassenaarseweg te Katwijk voor een periode van 15 jaar bij gelijkblijvende bodemcondities. In geval van een verminderde functionaliteit van het ijzerscherm binnen deze periode van 15 jaar, is NTP Infra BV nog aansprakelijk voor het uitvoeren van eventuele herstelwerkzaamheden van het ijzerscherm en het toepassen van een aanvullende en/of alternatieve techniek.

## 4. EVALUATIE AANLEG IJZERSCHERM

### 4.1 Uitvoeringsperiode

De werkzaamheden voor de aanleg van het ijzerscherm zijn gestart op 6 juli 2006 en afgerond op 13 juli 2006. Het terrein is geëgaliseerd in de periode van 20 juli t/m 24 juli 2006 en vervolgens opgeleverd op 28 augustus 2006.

### 4.2 Voorbereiding

Alvorens daadwerkelijk met de aanleg van het ijzerscherm begonnen kon worden zijn op de locatie de volgende werkzaamheden verricht en voorzieningen getroffen:

- Vooroverleg met de eigenaar en gebruiker van de locatie;
- Taxatie van de gewasschade die ontstaat door de aanleg van het ijzerscherm op het papaver- en sierdistelveld van eigenaar en gebruiker;
- Uitzetten van het tracé van het ijzerscherm en het foliescherm;
- Uitvoering van een Klic-melding voor het uitvoeren van graafwerkzaamheden. Hierbij is opnieuw geconstateerd dat er geen kabels en leidingen in het werkgebied zich bevinden;
- Frezen van het terrein ter plaatse van het tracé van het foliescherm.

### 4.3 Uitvoering van boringen langs tracé ijzerscherm

Voor de start van de uitvoering van het ijzerscherm zijn 3 boringen op 3 juli 2006 langs het tracé van het ijzerscherm verricht ter controle van de bodemopbouw. De boringen zijn uitgevoerd tot een diepte van circa 9 m –mv. In tabel 4.1 zijn alle boringen langs het ijzerscherm van noord naar zuid uitgezet tegen de diepte van de kleilaag aan de onderzijde van het ijzerscherm, de verontreinigingsgraad en het schermtracé.

**Tabel 4.1 Boringen langs ijzerscherm van noord naar zuid**

Boring	B1	39	40 <sup>1)</sup>	B2 / 32	B3 / 42	43
Diepte kleilaag aan onderzijde ijzerscherm (m –mv)	-	5,7-6,3	5,5 - 6,5	4,9-5,3	4,9-5,9	4,5-9,0
Verontreinigingsgraad	< S	> S < T	> I	< S	> S < T	> S < T
Schermtracé	Folie	folie	40:60	20:80	20:80	folie

1) Gebruikt voor dimensionering ijzerscherm

Uit tabel 4.1 blijkt dat aan de noordzijde de kleilaag ontbreekt ter plaatse van het foliescherm. Hier is echter geen verontreiniging aanwezig. In de haard van de verontreiniging ter plaatse van peilbuis 40 is de kleilaag aanwezig op een diepte vanaf 5,5 m –mv. Naar de zuidzijde komt de kleilaag voor op een diepte vanaf 4,9 en 4,5 m –mv. De aanwezige kleilaag vormt een slecht doorlatende basis die het ijzerscherm aan de onderzijde grotendeels afsluit. De variatie in de kleilaag levert geen risico op voor de werking van het ijzerscherm, aangezien er ook sprake is van een kwelsituatie. De sloot en de drainage op het volkstuintencomplex zorgen in dit geval voor de opwaartse stroming van het grondwater door het ijzerscherm.

#### **4.4 Inrichting werkterrein en tijdelijke depots**

De inrichting van het werkterrein en de tijdelijke depots is weergegeven in bijlage 6 en bestond uit de volgende werkzaamheden:

- Aanbrengen van tijdelijk hekwerk;
- Plaatsing van een was- en kleedgelegenheid (decontaminatie-unit) bij de inrit van het werkterrein;
- Plaatsing van een schaftgelegenheid op de parkeerplaats van het volkstuintencomplex;
- Aanbrengen van een dam ter plaatse van de sloot bij de inrit van het werkterrein;
- Aanbrengen van rijplaten ter plaatse van de dam;
- Inrichten van een depot voor de levering van het ijzer/zandmengsel. Het betreft een open container van 30 m<sup>3</sup> die half verdiept is aangelegd bij de inrit van het werkterrein;
- Inrichten van een tijdelijk depot voor de tijdelijke opslag van vrijkomende grond. Het depot is voorzien van waterondoorlatende folie.

#### **4.5 Leveranties van ijzer en zand en kwaliteitsspecificaties**

Als uitgangspunt voor de aanleg van het ijzerscherm is door NTP ervoor gekozen om het benodigde zand/ijzermengsel gemengd aan te leveren op de locatie in Katwijk. Het mengen van de benodigde hoeveelheid ijzer met betonzand vond plaats op de asfaltcentrale te Bovenveld, gemeente Ommen. Van daar is het ijzer/zandmengsel getransporteerd naar Katwijk en op locatie in depot gezet.

Het benodigde ijzergranulaat (diameter 0,3-2 mm) is afgeleverd door de firma Gotthart Maier, Rheinfelden Duitsland op de menglocatie, in 213 big bags met een gewicht van circa 0,6 ton per stuk. Het granulaat is van het type FG 0300/2000. De technische gegevens zijn opgenomen in bijlage 8. In totaal is 127,8 ton ijzer geleverd door Gotthart Maier.

NTP heeft de kwaliteitsspecificaties geverifieerd bij de leverancier tijdens productie van het ijzergranulaat. Het ijzergranulaat van dit type is hetzelfde als het ijzergranulaat waarmee door het onderzoekslaboratorium van Vito de kolomtest is uitgevoerd.

In vergelijking met de korrelgrootteverdeling van het ijzergranulaat is door NTP gezocht naar het type zand dat qua verdeling hierbij het beste paste. Voor de menging is uit de directe omgeving geschikt grof zand gevonden afkomstig van de zandexploitatie "Het Hogebroek" te Raalte. Het zand van het type metselzand (0-2 mm) is qua korrelgrootteverdeling het beste vergelijkbaar met de korrelgrootteverdeling van het ijzergranulaat.

In bijlage 8 is een grafiek opgenomen waarin beide grondstoffen nader met elkaar zijn vergeleken. De zandexploitatie 'Het Hogebroek' is gecertificeerd volgens de BRL 9313 "Zand uit dynamische wingebieden". Producten uit dit wingebied voldoen aan de milieutechnische specificatie van het Bouwstoffenbesluit en waarvoor geen nadere beperkingen gelden voor toepassing als schone grond. De specificaties van het drainzand zijn in bijlage 8 weergegeven. Het carbonaatgehalte is bepaald op < 0,5 %. In totaal is 203,44 ton zand geleverd door zandexploitatie 'Het Hogebroek'.

#### **4.6 Mengen van ijzer en zand**

Op 7 juli 2006 is het ijzer en zand in de juiste verhouding gemengd in de asfaltcentrale op de locatie Bovenveld, gemeente Ommen. Menging heeft plaatsgevonden door beide grondstoffen vanuit een voorraadbuffer te leiden over een transportband en deze processtroom te leiden naar een menger. Het zand is voorafgaand aan het mengen gedroogd in een trommeloven. Hiermee is voorkomen dat het ijzer direct na het mengen gaat oxideren. Het uitkomende mengsel is door de kwaliteitsdienst van NTP en samen met Grontmij gecontroleerd op de juiste mengverhouding. De mengverhouding is gecontroleerd door het mengsel te scheiden door middel van een magnetische separatie (zie bijlage 5 Ontwerpregels ETI: TN 3.13 Appendix A Magnetic Separation Testing Procedure).



***Figuur 4.1 Menginstallatie***



***Figuur 4.2 IJzergranulaat***



***Figuur 4.3 Gemengd produkt***



***Figuur 4.4 magnetische separatie van ijzer***

In bijlage 8 zijn de controles van de mengverhoudingen weergegeven. Hieruit blijkt dat het percentage ijzer in de partijen met de mengverhoudingen ijzer/zand van 40:60 vol % en 20:80 vol % in orde is. De mengverhoudingen in de partijen zijn op basis van de controle gemiddeld 22:78 vol % en 42:58 vol %. Ook blijkt dat na het transport van de ijzer/zand mengsels de mengverhouding niet gewijzigd is.

#### **4.7 Aanleg ijzerscherm**

Op basis van het ontwerp is uitgegaan van een totale scherm lengte van 180 m bestaande uit een middensectie met ijzer/zand over een lengte van 120 m en een diepte van 1 tot 5,5 m -mv en met aan beide weerszijden twee ondoorlatende secties van ieder 30 m (foliescherm).

Op maandag 10 juli 2006 is gestart met het aanbrengen van het ijzer/zandmengsel met behulp van de kettinggraver. Hierbij is de sectie van 120 m over een lengte van 30 m, ter plaatse van peilbuis 40, voorzien van een ijzer/zand mengsel in de verhouding 40:60 vol % en voor het overige gedeelte in een verhouding van 20:80 vol %. De kettinggraver die is weergegeven in figuur 4.5 heeft een sleuf gefreesd met een breedte van circa 0,3 m tot een diepte van 5,5 m -mv. De sleuf is aangevuld met behulp van een sleepbak met trechter die achter de ketting door de bodem wordt voortbewogen. Gelijktijdig met het frezen is de sleepbak gevuld door een graafmachine met het ijzer/zand mengsel (zie figuur 4.6).

Op dinsdag 11 juli is het laatste deel van het ijzer/zand mengsel in de verhouding van 20:80 vol % aangebracht. Het ijzerscherm is aan de zuidkant 5 m langer gemaakt aangezien er nog ijzer/zand mengsel over was. Het ijzerscherm is met een gemiddelde snelheid van 10 m/uur gerealiseerd.



**Figuur 4.5** Aanleg ijzerscherm met kettinggraver



**Figuur 4.6** Vullen met ijzer/zand mengsel

Na het aanbrengen van het ijzerscherm is op woensdag 12 juli de breedte van het ijzerscherm gecontroleerd tijdens het voorgraven van het foliescherm (zie figuur 4.7). In figuur 4.8 is te zien dat de gerealiseerde breedte van het ijzerscherm 22 cm is.



**Figuur 4.7** Vrijgraven ijzerscherm



**Figuur 4.8** Opmeten ijzerscherm

Dit komt ondermeer doordat de sleepbak die achter de ketting wordt voortgetrokken enigszins smaller is. Uit controlemetingen is gebleken dat de ketting een breedte heeft van 30 cm en de sleepbak een breedte heeft van 25 cm. Daarnaast is enige verdichting van de grond opgetreden door het gewicht van de kettinggraver op de slappe ondergrond. De gerealiseerde breedte van 22 cm vormt echter geen risico voor de werking van het scherm. De effectieve breedte voor een ijzerscherm met 20% ijzer is namelijk 11 cm ( $= 2,2 / 0,20$ ). De overdimensionering van het ijzerscherm bedraagt nu dus een factor 2 in plaats van een factor 2,7. In de haard van de verontreiniging waar 40% ijzer is toegepast bedraagt de overdimensionering nu een factor 4 in plaats van 5,4.

#### **4.8 Aanleg foliescherm**

Op woensdag 12 juli 2006 is het foliescherm ter plaatse van de twee buitenvleugels over een lengte van 30 m aangelegd. Het tracé van de buitenvleugels is van te voren met een graafmachine voorgegraven, vier meter breed en halve meter diep. Het foliescherm is aangebracht met behulp van de kettinggraver waarop een cassette met een rol LDPE-folie is gemonteerd (zie figuur 4.9). Het LDPE-folie heeft een dikte van 1 mm, laat geen water door, heeft een goede chemische bestendigheid en lange levensduur.

Aan de noordzijde van het ijzerscherm is vanaf de sloot het LDPE-folie getrokken waarbij het ijzerscherm in een hoek van circa  $120^{\circ}$  is gekruist. In de revisietekening in bijlage 6 is de ligging van het ijzerscherm en foliescherm met GPS-metingen in beeld gebracht. Tijdens het trekken van het LDPE-folie kwam veel slappe kleigrond vrij in het voorgegraven tracé (zie figuur 4.10). De totale lengte van het aangebrachte foliescherm bedraagt 29 m.



**Figuur 4.9** Kettinggraver met folie in cassette



**Figuur 4.10** aanbrengen foliescherm

Aan de zuidzijde van het ijzerscherm is het LDPE-folie andersom getrokken van west naar oost. De eerste poging om de kettinggraver in het voorgegraven tracé naar beneden te rijden mislukte vanwege de slappe ondergrond. De aannemer heeft vervolgens circa  $10 \text{ m}^3$  slappe klei ontgraven en circa  $7 \text{ m}^3$  met ijzer/zand mengsel aangevuld. Vervolgens kon de kettinggraver starten met het aanbrengen van het foliescherm. Na de aanleg van circa 10 m LDPE-folie heeft de aannemer een 2<sup>e</sup> rol folie met een lengte van 27 m meelaten draaien. De foliedelen zijn daarbij strak op elkaar gelegd en hebben een overlap van circa 15 m. De folieovergang is zodanig gemaakt dat het grondwater in oostelijke richting goed afstroomt.

Circa 6 m voor de geplande kruising met het ijzerscherm is de kettinggraver weggezakt in de reeds aangebrachte sleuf met het ijzer/zand mengsel. Vervolgens is met een 50 tons kraan de kettinggraver losgetrokken. Het LDPE-folie kon daarbij niet meer het ijzerscherm kruisen vanwege de beperkte ruimte tot de sloot en is daarom circa 12 m langs het ijzerscherm doorgetrokken (zie revisietekening bijlage 6). De afstand tussen het LDPE-folie en het ijzerscherm bedraagt daarbij circa 0,5 m. Gezien de grote overlap van circa 12 m tussen het LDPE-folie en het ijzerscherm en het feit dat de grondwaterstroming in oostelijke richting wordt afgebogen is er geen risico op het ontsnappen van de grondwaterverontreiniging tussen beide schermen. De totale lengte van het aangebrachte foliescherm bedraagt 37 m.

#### 4.9 Verwerkte hoeveelheden materialen

In tabel 4.2 is een overzicht gegeven van de totale hoeveelheden aan vrijkomende en te gebruiken materialen voor het ijzerscherm zoals vermeld in het plan van aanpak. De hoeveelheid ijzer en zand die verwerkt is in het ijzerscherm komt goed overeen met de inschatting die is gemaakt in het plan van aanpak.

**Tabel 4.2** Massabalans aanleg ijzerscherm

Dimensies scherm	Voorgegraven zijvleugels	Kettingfrozen sleuf	Aanvullen ijzerscherm (Fe:zand)		
			20:80 (vol.%)	40:60 (vol.%)	
Lengte (m)	60	120	90	30	
Breedte (m)	4	0,3	0,3	0,3	
Begin (m)	0	0	0,9	0,9	
Einddiepte (m)	0,5	5,5	5,5	5,5	
Volume ( $\text{m}^3$ )	120	198	125	42	
					<b>Totalen ijzerscherm</b>
	Grond in cunet en egaliseren na aanbrengen foliescherm	Grond in depot waarvan aan te vullen sleuf 0 tot 1 m -mv. : ( $\text{m}^3$ )	Fe: 25 $\text{m}^3$	17 $\text{m}^3$	<b>42 <math>\text{m}^3</math> Fe</b>
			Zand: 100 $\text{m}^3$	25 $\text{m}^3$	<b>125 <math>\text{m}^3</math> Zand</b>
			Fe: 75 ton	50 ton	<b>125 ton Fe</b>
			Zand: 160 ton	40 ton	<b>200 ton Zand</b>
		38			

Het volume aan vrijgekomen grond die in depot is gezet bedraagt circa 203 m<sup>3</sup> en heeft een gewicht van circa 365 ton. Deze partij grond is gekeurd volgens het Bouwstoffenbesluit door adviesbureau Certicon. Uit het keuringsrapport blijkt dat de partij is beoordeeld als schone grond en deze multifunctioneel toepasbaar is. De schone grond is derhalve in overleg met de eigenaar gebruikt voor het egaliseren van het werkterrein.

#### **4.10 Veiligheid**

Voor de aanleg van het ijzerscherm zijn door de aannemer in het draaiboek de veiligheidsklasse opgenomen. Op basis van de aard en de omvang van de verontreiniging is door ACTA de veiligheidsklasse vastgesteld op 3T en 1F.

Ter controle van de omgevingslucht zijn luchtmetingen verricht met een PID-meter die het totaal gehalte aan koolwaterstoffen meet. Er zijn geen verhoogde gehalten aan koolwaterstoffen vastgesteld tijdens de aanleg van het ijzerscherm. De benodigde veiligheidsmaatregelen en persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM's) zijn hierop afgestemd door de aannemer.

## 5. NULMETING MONITORING IJZERSCHERM

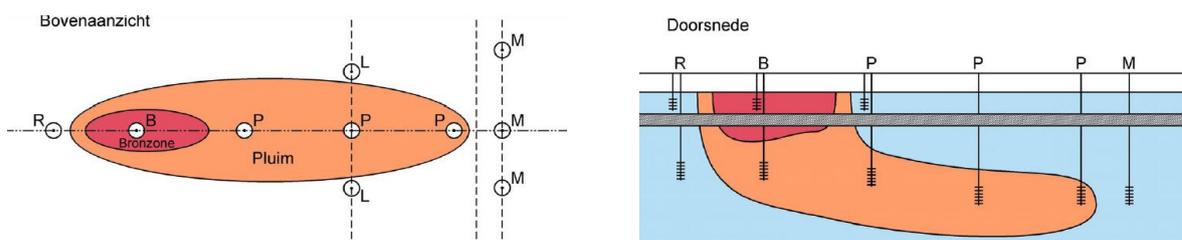
### 5.1 Algemeen

De monitoring heeft als doel om enerzijds de werking van het ijzerscherm aan te tonen en anderzijds de concentraties in de bron en de pluim van de verontreiniging te volgen. In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de resultaten van de nulmeting die een maand na de aanleg van het ijzerscherm is uitgevoerd.

### 5.2 Monitoringstrategie

De monitoring is gericht op het toetsen van de pluimontwikkeling aan de voorspellingen. In figuur 5.1 is volgens het praktijkdocument ROSA<sup>6</sup> de te volgen monitoringsstrategie aangegeven. Tevens is rekening gehouden met de richtlijnen van ETI<sup>7</sup> en OVAM<sup>8</sup> voor het monitoren van een ijzerscherm. Het monitoringsnetwerk is opgebouwd uit een aantal monitoringspeilbuizen:

- in de bronzone (B) om de afname van de bronconcentraties te bepalen;
- in de pluimzone (P) om de ontwikkeling van de concentraties over de lengte-as van de pluim te monitoren;
- die loodrecht of lateraal (L) op de pluim zijn gesitueerd, om mogelijke afwijkingen in de verspreidingsrichting te kunnen bepalen;
- die het front of de monitoringlijn (M) van de pluim controleren;
- die als referentie (R) dienen om stroomopwaarts te controleren of geen andere verontreinigingen instromen.



**Figuur 5.1** Monitoringsstrategie (Bron: ROSA)

De meetresultaten van de monitoring worden gebruikt voor:

1. het aantonen van de werking van het ijzerscherm;
2. het volgen van de concentraties in bron en pluim om vast te stellen of eventuele uitdoving van de verontreiniging plaatsvindt;
3. het beschermen van de omgeving door controle van het front van de pluim. Dit is direct stroomafwaarts van het ijzerscherm;
4. het eventueel bijsturen van de beheersing middels het ijzerscherm.

### 5.3 Uitbreiding monitoringsmeetnet

Voor het vaststellen van de nulsituatie op het volkstuinencomplex en voor de monitoring van het ijzerscherm is het monitoringsnetwerk uitgebreid. Ten behoeve van de uitbreiding van het meetnet van peilbuizen zijn de in tabel 5.1 vermelde peilbuizen geplaatst in het middeldiepe grondwater (3-4 m -mv).

<sup>6</sup> RObuust SAneren: Handreiking voor het maken van keuzes en afspraken bij mobiele verontreinigingen september 2005.

<sup>7</sup> Monitoring of Iron Permeable Reactive Barriers Technical note 4.01 van Envirometal Technologies Inc. (ETI) Canada

<sup>8</sup> Code van de Goede praktijk Reactieve ijzerwanden van OVAM Vlaanderen

**Tabel 5.1 Uitbreiding meetnet**

Peilbuisnummer	Locatie	Motivatie
51 en 56	2 peilbuizen op uiteinde ijzerscherm	Controle of er geen verontreinig om het scherm heen stroomt
52 t/m 55	4 peilbuizen in volkstuintencomplex	Nulsituatie vastleggen en controle benedenstroms van het ijzerscherm
C1 t/m C6	2 raaien met totaal 6 peilbuizen voor, in en achter ijzerscherm	Monitoring werking ijzerscherm

Om de werking van het ijzerscherm goed te kunnen volgen, zijn de peilbuizen C1 t/m C6 in twee raaien op 1 m afstand van elkaar geplaatst vanwege de geringe grondwaterstroming van gemiddeld 1,6 m/jr. De peilbuizen zijn afgewerkt met een stalen beschermkoker.

Ter controle van de onderzijde van het ijzerscherm is bij peilbuis C1 een tweede peilbuis C1-2 met filterstelling 5,5-6,5 m -mv geplaatst. Voor de plaatsing van de peilbuizen C2 en C5 in het ijzerscherm is het scherm direct na aanleg vrij gegraven. Vervolgens zijn de peilbuizen midden in het ijzer/zand mengsel geplaatst. Het uitkomende materiaal is gecontroleerd en bleek in beide geval te bestaan uit het ijzer/zand mengsel. In figuur 5.2 zijn de peilbuizen C1 t/m C6 weergegeven.



**Figuur 5.2 Foto peilbuizen C1 t/m C6 ter plaatse van het ijzerscherm**

Voor de bemonstering van de peilbuizen C2 en C5 in het ijzerscherm is speciale bemonsteringswijze van toepassing. De peilbuizen mogen bij bemonstering niet voorgepompt worden om te voorkomen dat grondwater van buiten het scherm wordt aangetrokken. Tevens dienen deze peilbuizen met een lage flow bemonsterd te worden.

#### **5.4 Bemonsterings- en analyseprogramma**

Voor de monitoring van de verontreiniging is de in tabel 5.2 vermelde selectie van peilbuizen gemaakt. De grondwatermonsters worden op VOCl inclusief vinylchloride en op vluchtige oliën geanalyseerd. Voor de situering van de monitoringspeilbuizen wordt verwezen naar bijlage 6.

**Tabel 5.2 Monitoringprogramma VOCl**

Peilbuisnummer	Grondwater	Motivatie
5 en 6	Middeldiep	Verificatie concentraties bronzone (B)
11-1, 19-2, 37	Middeldiep	Verificatie concentraties midden in de pluimzone (P)
39-2, 40-2, 42 en 44	Middeldiep	Verificatie langs het scherm in de pluimzone (P)
51 en 56	Middeldiep	Verificatie concentraties lateraal (L)
38, 52, 53, 54 en 55	Middeldiep	Verificatie monitoringlijn (M) in volkstuintencomplex
1	Middeldiep	Verificatie referentiefilter (R)
C1 t/m C6	Middeldiep	Verificatie werking ijzerscherm

### 5.5 Monitoring macrochemie

De monitoring van de macrochemie is enerzijds gericht op de monitoring van de afbraakomstandigheden in de bron en pluim en anderzijds gericht op het volgen van de werking van het ijzerscherm. Hierbij is uitgegaan van de volgende macrochemische parameters:

- pH, geleidbaarheid, zuurstof en redoxpotentiaal (veldmetingen);
- nitraat/nitriet, ijzer totaal/ijzer<sup>2+</sup>, sulfaat/sulfide, bicarbonaat/ vrij koolzuur, DOC en chloride;
- etheen, ethaan, methaan.

Voor de monitoring van de afbraakparameters is de in tabel 5.3 vermelde selectie van peilbuizen gemaakt.

**Tabel 5.3 Monitoringsprogramma**

Peilbuisnummer	Grondwater	Motivatie
5	Middeldiep	Verificatie afbraak bronzone (B)
40	Middeldiep	Verificatie afbraak langs het scherm in de pluimzone (P)
52	Middeldiep	Verificatie monitoringlijn (M) in volkstuintencomplex
1	Middeldiep	Verificatie referentiefilter (R)
C1 t/m C6	Middeldiep	Verificatie werking ijzerscherm

### 5.6 Bemonsteringsfrequentie en ijkmomenten

In de eerste jaren van de beheersing is het wenselijk om met hoge frequentie de peilbuizen te monitoren. Dit heeft als voordeel dat snel inzicht wordt verkregen in de werking van het ijzerscherm. In de fasen daarna kan de frequentie van de metingen worden teruggebracht. In tabel 5.4 zijn bemonsteringsfrequenties en ijkmomenten aangegeven zoals die in ROSA zijn aangegeven.

**Tabel 5.4 Bemonsteringsfrequentie peilbuizen en ijkmomenten (Bron: ROSA)**

Jaar (tijdens sanering)	Bemonsteringsfrequentie	Ijkmoment ( op x jaar)
1-5	1-2x	1 en 5
5-10	1-2x	5-10
10-30 en > 30	1x tot 1x/2-3 jaar	Elke 5 jaar

Op de aangegeven ijkmomenten wordt in overleg met het bevoegd gezag de werking van de beheersmaatregel geëvalueerd en kan de beheersing en/of het monitoringsprogramma eventueel worden bijgesteld. De voortgang van de beheersing wordt vastgelegd in een voortgangsrapport.

Conform het Ontwerp- en uitvoeringsplan wordt voor de monitoring op VOCl in de peilbuizen serie 1-56 uitgegaan van een bemonsteringsfrequentie van tweemaal in het eerste jaar en vervolgens eenmaal per jaar gedurende de eerste 10 jaar. Daarna wordt uitgegaan van een monitoring van eenmaal per 2 jaar.

De peilbuizen C1 t/m C6 die direct voor, in en achter het ijzerscherf zijn geplaatst, worden viermaal in het eerste jaar gemonitord op VOCl. Deze peilbuizen leveren directe informatie over de werking van het ijzerscherf.

Voor de monitoring op vluchtige olie en macrochemie in de peilbuizen serie 1-56 wordt uitgegaan van een monitoringsfrequentie van eenmaal per jaar. Voor de monitoring van de macrochemie in de peilbuizen C1 t/m C6 wordt uitgegaan van een monitoringsfrequentie van tweemaal per jaar.

In tabel 5.5 is de bemonsteringsfrequentie met het aantal analyses voor het eerste jaar na de aanleg samengevat.

**Tabel 5.5 Bemonsteringsfrequentie peilbuizen en aantal analyses eerste jaar**

Monitoring	Nulmeting (stuks)	Frequentie (1 x per jaar)	Frequentie (2 x per jaar)	Frequentie (4 x per jaar)	Totaal per jaar (stuks)	Totaal incl. nulmeting (stuks)
peilbuizen serie 1-56 op VOCl	17		X		34	51
peilbuizen C1 t/m C6 op VOCl	6			X	24	30
Totaal VOCL	23				58	81
peilbuizen serie 1-56 op vluchtige olie	17	X			17	34
peilbuizen serie 1-56 op macrochemie	4	X			4	8
peilbuizen C1 t/m C6 op macrochemie	6		X		12	18
Totaal macrochemie	10				16	26

## 5.7 Waterpassing en opname grondwaterstanden

Om inzicht te verkrijgen in de lokale geohydrologische situatie, ondermeer achter het ijzerscherf, zijn alle nieuw geplaatste peilbuizen gewaterpast ten opzichte van NAP. De grondwaterstanden worden tijdens de monitoringronden opgenomen. Op basis hiervan wordt het grondwaterstromingspatroon in beeld gebracht.

## 5.9 Resultaten nulmeting verontreiniging

De analyseresultaten van de nulmeting zijn getoetst aan de toetsingswaarden die door het Ministerie van VROM, in het kader van de Wet bodembescherming zijn vastgelegd in de circulaire "Streefwaarden en interventiewaarden bodemsanering" en bijbehorende aanvullingen. De getoetste waarden van de VOCl-verontreiniging zijn op tekening weergegeven in bijlage 9 en worden hieronder besproken.

### 5.9.1 Monitoring verontreiniging bron en pluim

Over het algemeen blijkt dat de gehalten aan VOCl lager zijn dan bij voorgaande monitoringronden. Dit kan mogelijk samenhangen met de regen die in de periode van de bemonstering is gevallen. In het volkstuinencomplex zijn voor VOCl enkele streefwaarde overschrijdingen (peilbuis 54 en 55) en een tussenwaarde overschrijding (peilbuis 53) waargenomen. Verder zijn hier geen verhoogde gehalten aan VOCl aangetoond. Ook zijn er in het volkstuinencomplex geen gehalten aan vluchtige olie waargenomen.

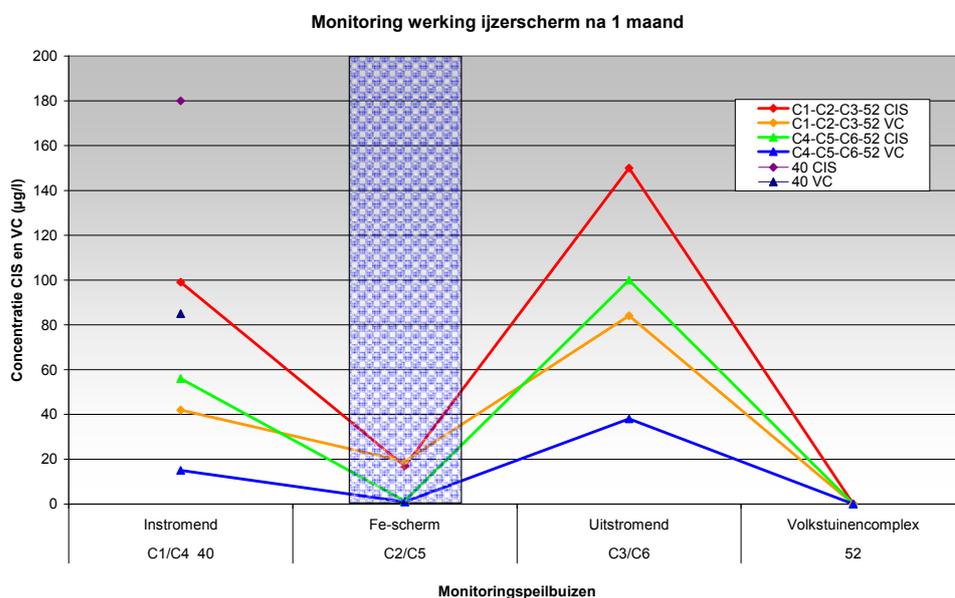
### 5.9.2 Monitoring verontreiniging ijzerscherf

De resultaten van de peilbuizen C1 t/m C6 voor, in en achter het ijzerscherf zijn in tabel 4.3 vermeld en weergegeven in figuur 5.6.

**Tabel 5.6 Analyseresultaten VOCl ijzerscherf d.d. 11-08-2006**

Positie bij ijzerscherf	Voor	In	Achter
Peilbuisnummer	C1	C2	C3
Filtertraject (m -mv)	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00
CIS	99	17	150
VC	42	19	84
Peilbuisnummer	C4	C5	C6
Filtertraject (m -mv)	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00
CIS	56	1,4	100
VC	15	0,95	38

Uit de tabel en figuur 5.3 blijkt dat er al een afname van CIS en VC in het ijzerscherf na 1 maand is opgetreden. Direct achter het ijzerscherf zijn in C3 en C6 nog gehalten aangetoond die de interventiewaarden overschrijden. Naar verwachting zullen de verhoogde gehalten achter het ijzerscherf binnen enkele jaren uitdoven door de werking van het scherm. Aan de onderzijde van het ijzerscherf zijn in C1-2 geen verhoogde gehalten aangetroffen. Samenvattend kan gesteld worden dat de monitoring een positief beeld van de verontreinigingssituatie oplevert zoals die zich nu ontwikkelt.



**Figuur 5.3 Monitoring gehalten CIS en VC ijzerscherf**

## 5.10 Resultaten nulmeting macrochemie

De macrochemie is in beeld gebracht om enerzijds de afbraakomstandigheden in de bron en pluim te monitoren en anderzijds de werking van het ijzerscherf te volgen.

### 5.10.1 Monitoring macrochemie in bron en pluim

Voor het vaststellen van de afbraakomstandigheden in de bron en pluim zijn de in tabel 5.7 aangegeven macrochemische parameters over een stroombaan bepaald.

**Tabel 5.7 Macrochemische parameters over stroombaan d.d. 11-08-2006**

	Instromend	Bron	Pluim	Uitstromend
Peilbuisnummer	1	4	40	52
Filtertraject (m -mv)	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00
Zuurgraad (pH)	6,86	6,75	6,78	7
Geleidbaarheid (mS/m)	960	2660	1210	1200
Zuurstof (O <sub>2</sub> ) (in mg/l)	1)	1)	1)	1)
Redox (in mV)	-43	-58	-56	-96
Nitraat (mg/l)	<0,2	<1	<0,2	<0,2
Nitriet (mg/l)	<0,1	<0,5	<0,1	<0,1
Ijzer (2+) (mg/l)	0,1	3,2	<0,01	0,4
Ijzer totaal (µg/l)	6400	3000	9100	11000
Sulfaat (mg/l)	<2	140	99	37
Sulfide (vrij) (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Etheen (µg/l)	<0,25	<0,25	17	<0,25
Ethaan (µg/l)	<0,25	0,90	0,75	0,61
Methaan (µg/l)	62	1400	260	98
Bicarbonaat (mg/l)	440	550	650	550
Vrij koolzuur (mg/l)	47	61	120	110
Ammonium (mgN/l)	1,4	5,0	1,3	2,9
D.O.C. (mg/l)	35	58	38	25

1) In verband met regen tijdens de bemonstering kon geen juiste zuurstofmeting worden verricht

Uit de macrochemie in tabel 5.7 kan worden opgemaakt dat:

- de pH in de stroombaan vrij neutraal is;
- de geleidbaarheid in de bronzone hoger is dan in de omgeving;
- gezien de negatieve redoxpotentiaal er sprake is van anaërobe omstandigheden;
- nitraat afwezig is en er geen nitraatreductie kan optreden;
- er overwegend sprake is van ijzer- en sulfaatreducerende omstandigheden;
- door de geringe gehalten aan de eindproducten etheen en ethaan de biologische afbraak relatief langzaam verloopt;
- er sprake is van enige methaanvorming in de bronzone;
- bicarbonaat en vrijkoolzuur vrij constant zijn in de stroombaan;
- het DOC van nature tamelijk hoog is door het voorkomen van veen en klei.

### 5.10.2 Monitoring macrochemie ijzerscherm

Voor het volgen van de werking van het ijzerscherm zijn de in tabel 5.8 aangegeven macrochemische parameters bepaald. Uit de tabel kan worden opgemaakt dat in het ijzerscherm:

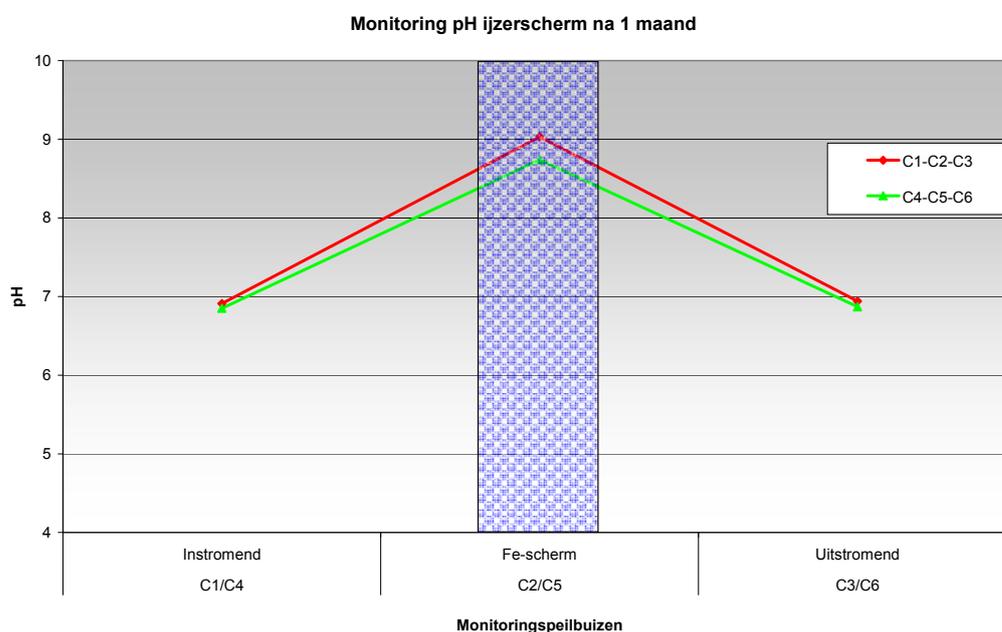
- de pH gestegen is tot circa 9 als gevolg van hydrolyse van water (OH<sup>-</sup> vorming);
- de geleidbaarheid lager is door het verdwijnen van ionen mogelijk als gevolg neerslagvorming;
- de redoxpotentiaal zeer laag is en duidt op sterk reducerende omstandigheden, wat gunstig is voor afbraak van VOCl;
- het opgelost ijzer gehalte is afgenomen door vorming van ondermeer ijzerhydroxiden (Fe(III)(OH)<sub>3</sub> die kunnen ontstaan bij de hoge pH;
- het sulfaatgehalte enigszins is afgenomen door sulfaatreductie;
- de gehalten aan eindproducten etheen en ethaan zijn gestegen door afbraak van CIS en VC;
- de gehalten aan bicarbonaat en vrijkoolzuur zijn afgenomen, waarbij mogelijk ijzercarbonaat wordt gevormd;
- het gehalte aan DOC is toegenomen mogelijk als gevolg van veranderingen in de pH waarbij organisch materiaal wordt gemobiliseerd.

**Tabel 5.8 Macrochemische parameters peilbuizen ijzerscherm d.d. 11-08-2006**

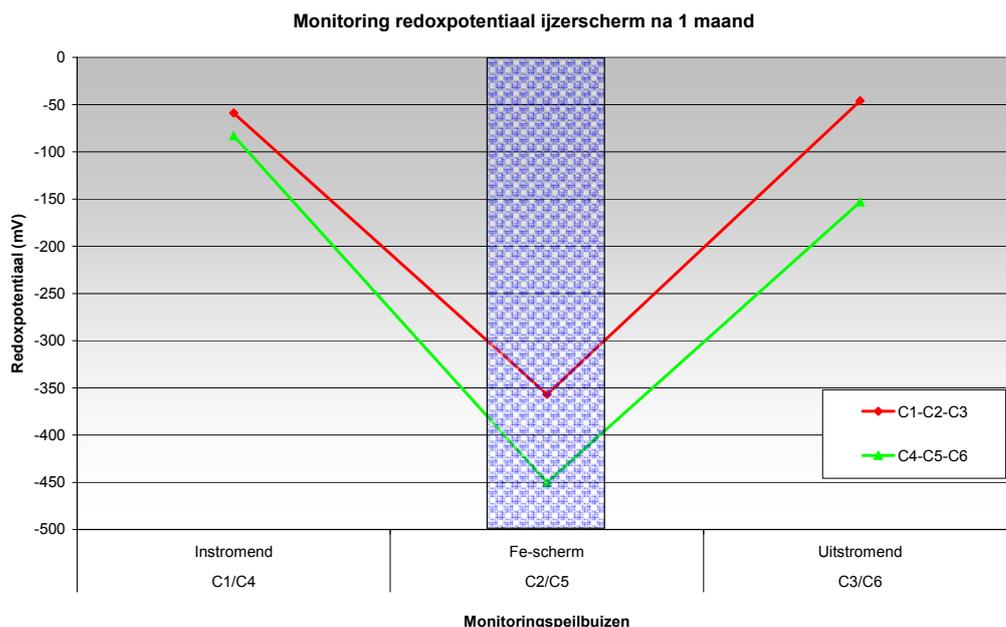
Positie bij ijzerscherm	Voor	In	Achter	Voor	In	Achter
Peilbuisnummer	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Filtertraject (m -mv)	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00
Zuurgraad (pH)	6,91	9,03	6,94	6,85	8,74	6,87
Geleidbaarheid (mS/m)	1290	634	1090	1230	680	1290
Zuurstof (O <sub>2</sub> ) (in mg/l)	1)	1)	1)	1)	0,79	1)
Redox (in mV)	-59	-357	-46	-83	-450	-153
Nitraat (mg/l)	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Nitriet (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ijzer (2+) (mg/l)	<0,01	<0,01	0,1	13	0,2	17
Ijzer totaal (µg/l)	10000	170	9800	9100	110	12000
Sulfaat (mg/l)	95	24	130	72	60	65
Sulfide (vrij) (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Etheen (µg/l)	6,2	55	62	1,2	20	5,7
Ethaan (µg/l)	0,92	54	6,4	1,1	29	2,0
Methaan (µg/l)	220	580	900	400	140	680
Bicarbonaat (mg/l)	670	110	380	620	85	600
Vrij koolzuur (mg/l)	310	16	100	330	63	450
Ammonium (mgN/l)	1,2	0,8	0,8	1,3	1,0	1,1
D.O.C. (mg/l)	34	56	34	31	58	33

1) In verband met regen tijdens de bemonstering kon geen juiste zuurstofmeting worden verricht

In figuur 5.4 en 5.5 is de toename in de pH en de afname van de redoxpotentiaal in het ijzerscherm weergegeven. Deze bevestigen beide de werking van het ijzerscherm.



**Figuur 5.4 Monitoring PH ijzerscherm**



**Figuur 5.5 Monitoring redoxpotentiaal ijzerscherf**

### 5.11 Resultaten nulmeting grondwaterstanden

De grondwaterstanden en isohypsen van de nulmeting in het middeldiepe grondwater zijn weergegeven in bijlage 10. Hieruit blijkt dat sprake is van een zuidoostelijke grondwaterstroming zowel voor als achter het ijzerscherf. De grondwaterstanden in de peilbuizen C1 t/m C6 ter plaatse van het ijzerscherf zijn weergegeven in tabel 5.8. Hieruit blijkt dat de grondwaterstanden voor, in en achter het scherm vrijwel gelijk te zijn. Dit betekent dat het permeabele ijzerscherf de grondwaterstroming niet beïnvloed.

**Tabel 5.8 Grondwaterstanden in peilbuizen ijzerscherf d.d. 11-08-2006**

Positie bij ijzerscherf	Voor	In	Achter	Voor	In	Achter
Peilbuisnummer	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Filtertraject (m -mv)	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00
Bovenkant pb (m+ NAP)	0,89	0,79	0,74	0,89	0,90	0,88
Maaiveld (m + NAP)	0,17	0,12	0,08	0,24	0,21	0,19
Grondwaterstand (m t.o.v. NAP)	-0,48	-0,49	-0,48	-0,49	-0,48	-0,50

## 6. GENERIEKE ONTWERPRICHTLIJNEN EN -CRITERIA

### 6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op generieke richtlijnen en criteria voor het ontwerpen en dimensioneren van ijzerschermen. Het consortium heeft een checklist opgesteld die eindgebruikers en bevoegd gezag kunnen gebruiken om te beoordelen of toepassing van een ijzerschermbaan mogelijk is op een met VOCl verontreinigde locatie. Aansluitend hierop is een stappenplan opgesteld voor het ontwerpen en dimensioneren van ijzerschermen. De checklist voor toepassing van een ijzerschermbaan en het stappenplan voor ontwerp en dimensionering van een ijzerschermbaan zijn gebaseerd op de richtlijnen uit de VS<sup>8</sup>.

### 6.2 Checklist voor toepassing van een ijzerschermbaan

De checklist vormt een eerste beoordeling om vast te stellen of een locatie geschikt is voor een ijzerschermbaan. In figuur 6.1 is de checklist voor toepassing van een ijzerschermbaan weergegeven. Hieronder worden de verschillende factoren toegelicht die bij besluitvorming van belang zijn. Hoewel een ongunstig antwoord op een van de volgende factoren een ijzerschermbaan niet kan uitsluiten, betekent dit wel dat de toepassing ingewikkelder wordt en kostbaarder.

- **Type verontreiniging**

Is het type verontreiniging afbreekbaar met reactief ijzer volgens de literatuur? In tabel 6.1 zijn de type verontreinigingen aangegeven die afgebroken kunnen worden met reactief ijzer volgens de Amerikaanse literatuur<sup>9</sup>. Verontreinigingen zoals PER en TRI kunnen in principe tot zeer hoge concentraties worden aangepakt met een ijzerschermbaan. Van belang is hierbij wel dat met het reactief ijzer een economisch haalbare halfwaardetijd voor de verontreiniging kan worden bereikt.

**Tabel 6.1 Type verontreinigingen voor afbraak met reactief ijzer**

Ethenen	Ethanen	Methanen	Andere componenten	Niet afbreekbare componenten
Tetrachlooretheen	Hexachloorethaan	Tetrachloormethaan	Trichloortrifluorethaan (freon 113)	Dichloormethaan
Trichlooretheen	1,1,2,2-Tetrachloorethaan	Trichloormethaan	Trichloorfluormethaan (freon 11)	1,4-dichloorbenzeen
1,1-dichlooretheen	1,1,1,2-Tetrachloorethaan	Chloroform	1,2,3-Trichloorpropaan	1,2-dichloorethaan
Trans-1,2-Dichlooretheen	1,1,1-Trichloorethaan	Bromoform	1,2 Dichloorpropaan	Chloormethaan
Cis-1,2-Dichlooretheen	1,1,2-Trichloorethaan	Tribroommethaan	1,3-Dichloorpropaan	
Vinylchloride	1,1-Dichloorethaan		1,2-Dibroom-3-chloorpropaan	
	1,2-Dibroommethaan		n-Nitrosodimethylamine (NDMA)	
			Nitrobenzeen	
			Lindaan	
			Hexachloorbutadieen	

- **Omvang pluim en verspreiding**

Is de pluim erg breed of erg diep? Hele brede of diepe pluimen zullen zorgen voor een toename in de kosten voor toepassing van een ijzerschermbaan. Echter er zijn verscheidene ijzerschermen wereldwijd geïnstalleerd met een lengte van meer dan 300 m. In vergelijking met de kosten van een pomp en treat systeem kan een ijzerschermbaan economisch vaak nog steeds haalbaar zijn om een brede pluim te beheersen. De diepte van een pluim is vaak meer van invloed op de kosten voor toepassing van een ijzerschermbaan. In de volgende paragraaf is per diepte aangegeven welke methoden voor plaatsing van een ijzerschermbaan beschikbaar zijn.

<sup>9</sup> Permeable Barriers for Groundwater Remediation Design, Construction and Monitoring, Gavaskar et al. Batelle press 1998, 174 pag., ISBN 1-57477-036-5.

- **Diepte van scheidende laag**

Is er op geringe diepte een scheidende laag aanwezig? Een scheidende laag op geringe diepte tot circa 7 m –mv kan als afsluitende laag gebruikt worden aan de onderzijde van een ijzerschermb. Indien de scheidende laag en de pluim dieper dan 7 m -mv voorkomt, worden de installatiekosten voor een ijzerschermb hoger. Indien er op grote diepte geen scheidende laag aanwezig is, kan een hangend ijzerschermb worden overwogen. Voorwaarde is wel dat een maximale vracht van de verontreiniging door het ijzerschermb wordt weggenomen.

- **Grondwatersnelheid**

Is de grondwatersnelheid hoog? Als de snelheid van het grondwater hoog is, zal de benodigde dikte van het ijzerschermb relatief groot zijn om een voldoende lange verblijftijd te bereiken en wordt het plaatsen van een ijzerschermb kostbaar. Echter er zijn al ijzerschermben op locaties in de VS geplaatst met een grondwatersnelheid van 500 m/jaar.

- **Geotechnische aspecten**

Zijn er obstakels in de ondergrond aanwezig? Als er kabels en leidingen, gesteente, funderingsresten etc. voorkomen wordt de plaatsing van een ijzerschermb complexer. In veel gevallen kan een kabel en leiding tracé dat dwars door het geplande ijzerschermb loopt worden opgevuld met cement/bentoniet. Een deel van het ijzerschermb wordt dan als een ondoorlatende barrière uitgevoerd. Indien er kabels en leidingen evenwijdig langs het geplande ijzerschermb lopen, kan overwogen worden om het water af te vangen met een damwand en te leiden naar een separate zuivering met reactief ijzer (zie optie 3 in figuur 2.3 verschillende vormen van een reactief schermb).

### **Beschikbare onderzoeksgegevens**

Wanneer uit de eerste toetsing blijkt dat de locatie geschikt is voor een ijzerschermb, dient vastgesteld te worden of er voldoende onderzoeksgegevens zijn om het ijzerschermb te ontwerpen. Dit wordt gecontroleerd aan de hand van de onderzoeksvragen die in de checklist zijn aangegeven. Indien noodzakelijk wordt aanvullend bodemonderzoek verricht voor het ontwerp van het ijzerschermb.

### **Selectie geschikt reactief ijzer**

Wanneer voldoende onderzoeksgegevens zijn verkregen kan gezocht worden naar geschikt reactief ijzer. Aanbevolen wordt om gebruik te maken van reactief ijzer dat al eerder goed getest is in kolomproeven. Bij de selectie van reactief ijzer dient gelet te worden op de volgende factoren:

- **Reactiviteit:** Hoe korter de halfwaardetijd is des te beter het ijzer is;
- **Doorlatendheid:** Voor een hoge reactiviteit is een kleine korrelgrootte nodig (groter specifiek oppervlak), terwijl voor een hoge doorlatendheid een grote korrelgrootte is benodigd;
- **Stabiliteit:** Het ijzer dient gedurende lange tijd zijn reactiviteit en doorlatendheid te behouden ook wanneer neerslagvorming vanuit de macrochemie optreedt.
- **Zuiverheid:** Het ijzer dient zuiver te zijn en mag dus geen hoge gehalten aan andere zware metalen bevatten.
- **Beschikbaarheid en prijs:** Het ijzer dient in grote hoeveelheden beschikbaar te zijn voor een redelijke prijs. Hierbij dient tevens gelet te worden op de transportkosten.

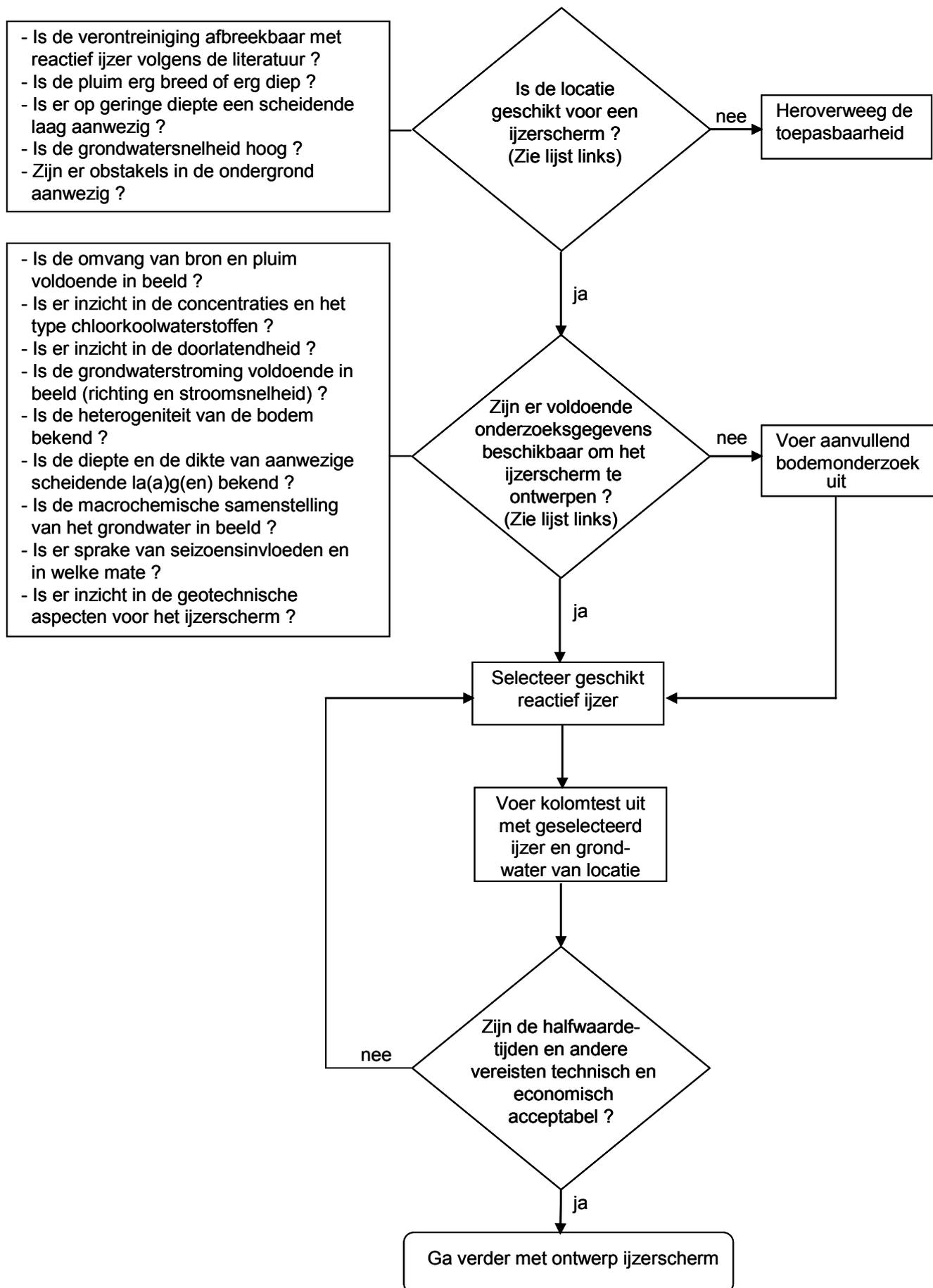
### **Uitvoering kolomtest**

Op basis van een kolomtest kan de haalbaarheid voor een ijzerschermb vastgesteld worden. De kolomtest dient uitgevoerd te worden met het geselecteerde ijzer en met grondwater van de locatie door een laboratorium dat voldoet aan de eisen van ETI te Canada. Voor beschrijving van de kolomtest wordt verwezen naar bijlage 3.

### **Controle halfwaardetijden**

De halfwaardetijden uit de kolomtest en andere vereisten dienen technisch en economisch acceptabel te zijn. De halfwaardetijden dienen zodanig gunstig te zijn dat volledige afbraak tot onschadelijke eindproducten mogelijk is.

# Checklist toepassing ijzerschermb



**Figuur 6.1** Checklist toepassing ijzerschermb

### 6.3 Methoden voor plaatsing van een ijzerscherm

Aan de hand van de diepte van de verontreiniging en de bodemopbouw kan een keuze worden gemaakt uit verschillende methoden voor het aanbrengen van ijzerschermen. Hieronder is per diepte aangegeven op welke wijze een ijzerscherm aangelegd kan worden:

- **Ijzerscherm < 7 m -mv: kettinggraver**

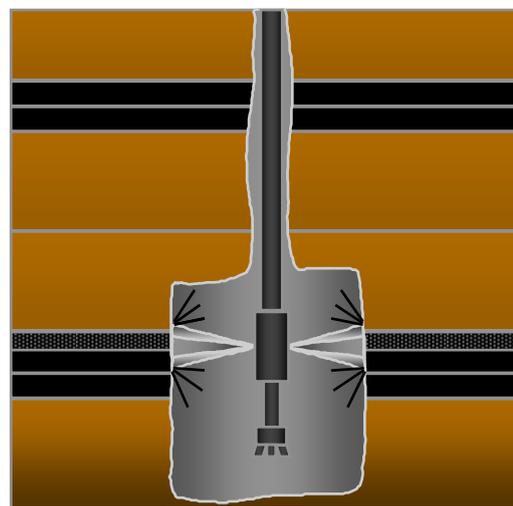
In Nederland kan tot een diepte van 7 m –mv een ijzerscherm geplaatst worden met een kettinggraver. Een kettinggraver heeft als voordeel dat gelijktijdig met het graven van de sleuf deze gevuld kan worden met reactief ijzer. De benodigde werkruimte is relatief groot. Er dient langs het ijzerscherm over een breedte van circa 20 m ruimte gereserveerd te worden voor een kettinggraver en een shovel die zorgt voor de aanvoer van het ijzergranulaat.

- **Ijzerscherm > 7 m –mv: diverse methoden**

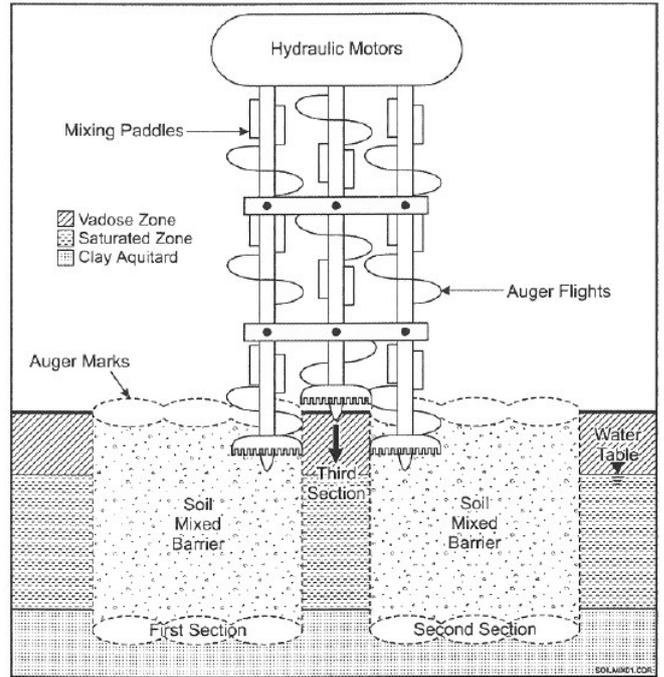
Voor de plaatsing van een ijzerscherm dieper dan 7 m –mv zijn verschillende methoden beschikbaar. Hierbij kan reactief ijzer met een (goed afbreekbare) biopolymeer slurry in de grond aangebracht door middel van de volgende technieken.

- **Injectietechnieken:** Onder hoge druk kan ijzerpoeder in een slurry worden geïnjecteerd met behulp van een slaghamersysteem of een jetsysteem. Het ijzerpoeder wordt aangeduid als nanoscale ijzer en heeft een grootte van 100-200 nm. De levensduur van nanoscale ijzer is wel korter dan van ijzergranulaat. Nanoscale ijzer heeft een gemiddelde levensduur van 3 tot 5 jaar afhankelijk van de samenstelling van het grondwater. Het ijzerscherm wordt meestal gevormd door twee of drie aaneengesloten rijen van injectiepunten. Tot op heden is bij de aanleg van een ijzerscherm met injectietechnieken een diepte van 18 m –mv bereikt.
- **Holle avegaarboringen:** Reactief ijzergranulaat kan met behulp van holle avegaarboringen in de bodem worden aangebracht. Met deze techniek wordt de grond naar het maaiveld geschroefd. Vervolgens wordt onder geleidelijk trekken van de avegaar het ijzer door de centrale buis naar beneden gepompt. Tot op heden is bij de aanleg van een ijzerscherm met holle avegaarboringen een diepte van 17 m –mv bereikt.
- **Hydrofracturing:** Onder extreme druk wordt water of lucht in de bodem geïnjecteerd, waardoor horizontale scheuren (fracturen) in de bodem worden gecreëerd. Deze techniek wordt in de olie-industrie veel toegepast. Vervolgens kan een slurry met nanoscale ijzer worden geïnjecteerd in de scheuren. Tot op heden is bij de aanleg van een ijzerscherm met hydrofracturing een diepte van 37 m –mv bereikt.
- **Diepwandtechnieken:** Met behulp van diepwand knijpers kan een ijzerscherm worden aangelegd. Hierbij wordt een biopolymeer slurry als steunvloeistof gebruikt. Na het graven van de sleuf wordt deze opgevuld met ijzergranulaat en wordt de vrijkomende steunvloeistof afgevoerd. Tot op heden is bij de aanleg van een ijzerscherm met diepwandtechnieken een diepte van 21 m –mv bereikt.

Bij toepassing van bovengenoemde technieken is het vooral belangrijk om vast te stellen tot welke diepte een ijzerscherm economisch nog haalbaar is. Over het algemeen vormen injectietechnieken en holle avegaarboringen de meest rendabele opties voor het aanbrengen van reactief ijzer op grote diepten.



**Figuur 6.2** Ijzerscherm aanbrengen door injectie met een jetsysteem (Bron: ETI)



***Figuur 6.3 IJzerscherm aanbrengen met avegaarboringen tot 17 m Japan 2002 (Bron: ETI)***



***Figuur 6.4 IJzerscherm aanbrengen met diepwandtechnieken Turijn 2004 (Bron: ETI en NTP Milieu)***

### 6.3 Stappenplan voor ontwerp en dimensionering

Wanneer op basis van de checklist blijkt dat de locatie geschikt is voor een ijzerschermbaan kan gestart worden met het ontwerp en de dimensionering van het ijzerschermbaan. In figuur 6.5 is hiertoe een stappenplan weergegeven.

Aan de hand van het uitgevoerde bodemonderzoek en indien nodig het aanvullend onderzoek wordt inzicht verkregen in de volgende aspecten:

- **Karakteristieken watervoerend pakket**

De karakteristieken van het watervoerend pakket omvatten de stijghoogte, diepte en dikte van de scheidende laag, doorlatendheid en porositeit van de verschillende lagen, stroomsnelheid van het grondwater, de omvang en de verspreiding van de pluim. De informatie is benodigd voor de geohydrologische modellering en het ontwerp van het ijzerschermbaan.

- **Samenstelling grondwaterverontreiniging**

De informatie over de concentraties en type chloorkoolwaterstoffen wordt gebruikt voor de selectie van geschikt reactief ijzer, het uitvoeren van kolomproeven en het bepalen van de halfwaardetijden en de dikte van het ijzerschermbaan.

- **Samenstelling macrochemie**

De macrochemische samenstelling is benodigd om de levensduur van het ijzerschermbaan te bepalen en het geschikte reactief ijzer te selecteren. Kennis van de aanwezigheid van de macrochemie kan gebruikt worden om te evalueren of mogelijk neerslagen kunnen ontstaan, die de reactiviteit en de doorlatendheid van het ijzerschermbaan kunnen beïnvloeden. Ook veldparameters zijn goede indicatoren om de condities voor eventuele neerslagen vast te stellen.

Belangrijke macrochemische parameters zijn hierbij:

- pH, Ec, redoxpotentiaal en zuurstof (veldmetingen)
- nitraat, ijzer, sulfaat, methaan, chloride, calcium en magnesium (laboratoriumanalyses)

- **Permeabel scherm of funnel & gate**

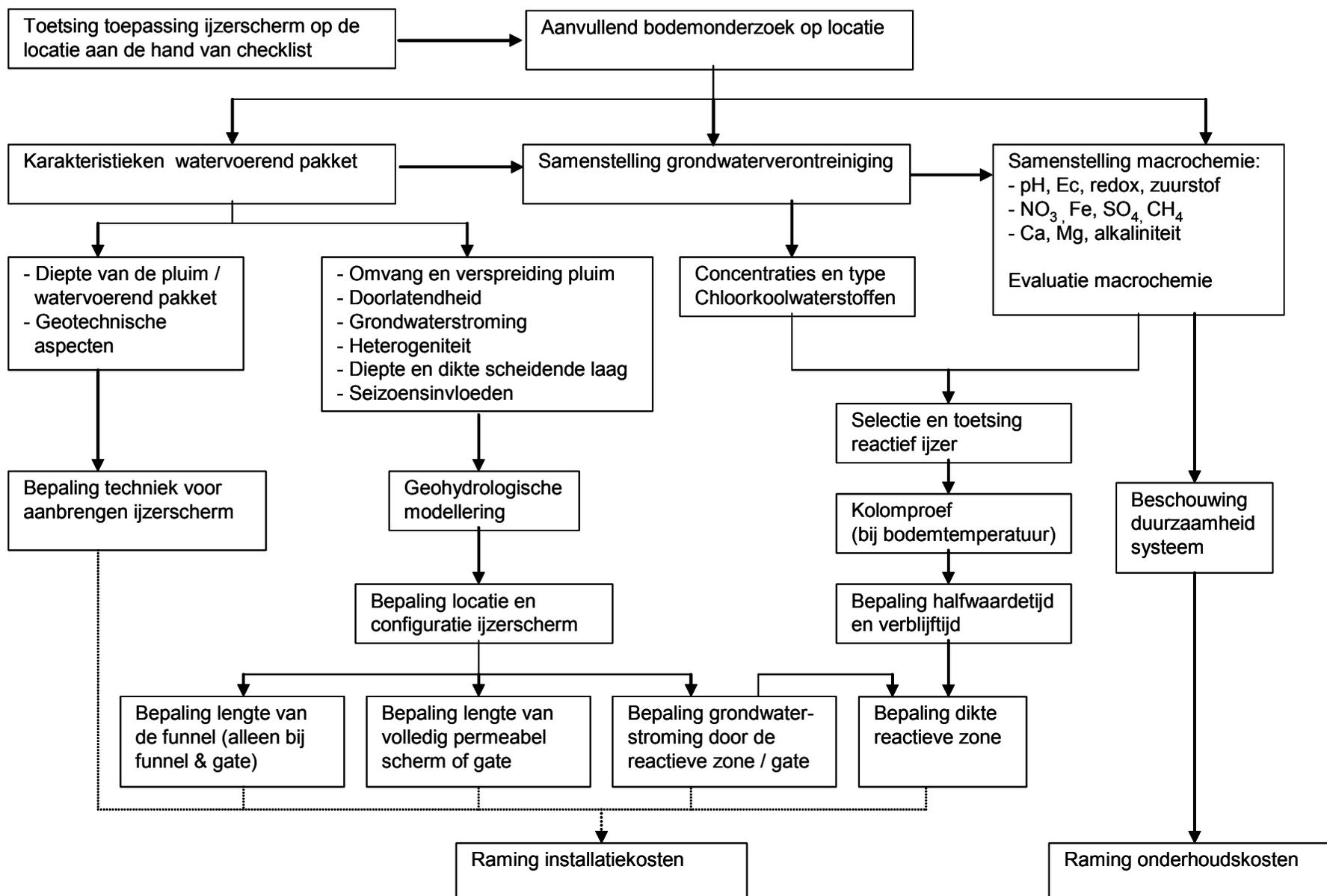
In het stappenplan wordt onderscheid gemaakt tussen een permeabel scherm of een funnel & gate. Hierbij geldt dat een permeabel ijzerschermbaan het meest eenvoudig is uit te voeren. Dit type ijzerschermbaan is wereldwijd het meest toegepast en heeft tot op heden het minste onderhoud. Daarmee is de duurzaamheid van dit schermbaan type het grootst.

Bij funnel & gate systemen (trechter en poort) wordt de waterstroom via damwanden geconcentreerd naar enkele openingen waarin reactief ijzer is aangebracht (Zie figuur 2.3). Het voordeel is dat op deze wijze de hoeveelheid reactief ijzer beperkt kan worden. Tevens kan het reactieve ijzer als een cassette in de gate aangebracht worden, waardoor het ijzer relatief gemakkelijk te vervangen is. Het nadeel van een funnel & gate systeem is dat het leidt tot opstuwning van het grondwater in de gate. Dit betekent dat het scherm breder moet zijn dan de pluim om te voorkomen dat de verontreiniging om het scherm heen stroomt. Daarnaast kan de relatief grote snelheid in de gate leiden tot nadelige effecten zoals verstoppingen met fijn materiaal.

Voor een funnel & gate is daarom een nauwkeurige geohydrologische modellering van groot belang om tot het juiste ontwerp en dimensionering te komen. Op basis van het ontwerp en de dimensionering van het ijzerschermbaan kan een raming worden gemaakt van de installatiekosten en eventuele onderhoudskosten.

# Stappenplan ontwerp en dimensionering ijzerscherm

Figuur 6.5 Stappenplan ontwerp en dimensionering ijzerscherm



## 7. CONCLUSIES

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van de doelstellingen voor de demonstratie ingegaan op conclusies die getrokken kunnen worden uit dit demonstratieproject.

### **Bekendheid geven aan de techniek van ijzerschermen**

Bij de aanleg van het ijzerscherm in Katwijk is het consortium er in geslaagd om landelijke bekendheid te geven aan de techniek van ijzerschermen. Er zijn diverse artikelen over de realisatie van het ijzerscherm in Katwijk verschenen in het Technisch weekblad, de Telegraaf, het Leids Dagblad en de Katwijkse post. Ook zijn door TV Oost TV opnamen gemaakt van de aanleg van het ijzerscherm welke zijn uitgezonden in de nieuwsuitzending van TV Oost.

### **Demonstratie van de toepassingsmogelijkheden voor ijzerschermen**

De demonstratie in Katwijk betreft het eerste ijzerscherm in Nederland, dat volledig is gevuld met een mix van reactief ijzergranulaat en zand. Met dit demonstratieproject heeft het consortium het ijzerscherm op de Nederlandse Bodemsaneringsmarkt geïntroduceerd. De toepassingsmogelijkheden voor ijzerschermen zijn gedemonstreerd aan de hand van de presentaties die door Grontmij en NTP zijn gegeven op ondermeer Bodem Breed in 2005 en de on-site bijeenkomst Reactieve Schermen op 5 oktober 2006 in Katwijk. Op de on-site bijeenkomst is ter demonstratie een video over de aanleg van het ijzerscherm vertoond en zijn de bezoekers op de locatie langs het ijzerscherm geleid. De demonstratie van het ijzerscherm op de on-site bijeenkomst is met veel belangstelling gevolgd door de ruim 65 bezoekers.

### **Nadere dimensionering van ijzerscherm aan de hand van kolomexperiment**

Aan de hand van de uitgevoerde kolomtest is door VITO geconcludeerd dat een reactief ijzerscherm haalbaar is voor de locatie in Katwijk. De kolomtest heeft aangetoond dat de belangrijkste VOCI-componenten CIS en VC in het grondwater kunnen worden afgebroken tot onder de gestelde normen na een gemiddelde verblijftijd van 67uur in een 100% reactief ijzerscherm. De levensduur van het ijzerscherm is op basis van macrochemische analyses in de kolomtest en de stroomsnelheid van het grondwater naar verwachting minstens 20 jaar volgens ETI te Canada.

De dikte van het ijzerscherm is op basis van de verblijftijd en de stroomsnelheid van 1,6 m/jaar gedimensioneerd op circa 2,2 cm voor een scherm met 100% ijzer. Wanneer een sleuf met een breedte van 30 cm wordt opgevuld met 20% ijzer en 80% drainagezand is de effectieve dikte van het ijzer gelijk aan:  $30 \text{ cm} \times 0,20 = 6 \text{ cm}$ . Het ijzerscherm heeft dan een overdimensionering van een factor 2,7.

Om een maximale zekerheid te garanderen is in de haard van de verontreiniging een ijzer/zand mengsel gebruikt van 40:60 vol.%. De effectieve dikte van het ijzer is dan gelijk aan:  $30 \text{ cm} \times 0,40 = 12 \text{ cm}$ . Het ijzerscherm heeft in de haard dan een overdimensionering van een factor 5,4. Geconcludeerd kan worden dat deze extra overdimensionering een maximale zekerheid levert voor de werking van het ijzerscherm.

### **Evaluatie aanleg ijzerscherm in Katwijk**

Voor het aanbrengen van het ijzerscherm is met een kettinggraver een sleuf gegraven van circa 5,5 m diep en 30 cm breed. Via een trechter is deze sleuf, gelijktijdig met het graven, gevuld met het mengsel van zand en ijzergranulaat. In de haard van de verontreinigingspluim is het ijzerscherm over een lengte van 30 m gevuld met het zand/ijzer mengsel in de verhouding 40:60 vol %. Aansluitend is het ijzerscherm over een lengte van 90 m gevuld met het zand/ijzer mengsel in de verhouding 20:80 vol %.

Na het aanbrengen van het ijzerscherp is de breedte van het ijzerscherp gecontroleerd en bleek dat de gerealiseerde breedte 22 cm was. De gerealiseerde breedte vormt echter geen risico voor de werking van het ijzerscherp, aangezien nog steeds sprake is van een ruime overdimensionering van een factor 4.

Aan beide zijden van het ijzerscherp is een foliescherp aangebracht over een lengte van circa 30 m. Door de toepassing van het foliescherp kon de hoeveelheid ijzer beperkt worden tot 120 m. Het LDPE-folie is aan de noordzijde met het ijzerscherp gekruist in een hoek van 120°. Aan de zuidzijde is het LDPE-folie noodgedwongen evenwijdig langs het ijzerscherp getrokken in verband met de nabijheid van de sloot. Dit heeft overigens geen gevolgen voor de werking van het ijzerscherp.

#### **Nulmeting monitoring ijzerscherp**

Na aanleg van het ijzerscherp is het monitoringnetwerk met peilbuizen uitgebreid en is een nulmeting verricht. Over het algemeen blijkt dat de gehalten aan VOCl lager zijn dan bij voorgaande monitoringronden. Dit kan mogelijk samenhangen met de regen die in de periode van de bemonstering is gevallen. In het volkstuintencomplex zijn voor VOCl enkele streefwaarde overschrijdingen en een tussenwaarde overschrijding waargenomen. Verder zijn hier geen verhoogde gehalten aan VOCl aangetoond.

Om de werking van het ijzerscherp goed te kunnen volgen zijn 2 raaien met peilbuizen (C1 t/m C6) voor, in en achter het ijzerscherp geplaatst. Ter plaatse van de peilbuizen C1 t/m C6 blijkt dat in het ijzerscherp al een afname van CIS en VC na 1 maand is opgetreden. Direct achter het ijzerscherp zijn nog gehalten aangetoond die de interventiewaarden overschrijden. Naar verwachting doven de verhoogde gehalten achter het ijzerscherp binnen enkele jaren uit door de werking van het scherm. Aan de onderzijde van het ijzerscherp zijn geen verhoogde gehalten aangetroffen. Samenvattend kan gesteld worden dat de monitoring een positief beeld van de verontreinigingssituatie oplevert zoals die zich nu ontwikkelt.

Voor een goede evaluatie van de werking van het ijzerscherp zijn meerdere monitoringronden benodigd. Na een jaar monitoren zal de werking van het ijzerscherp voor SKB geëvalueerd worden in het tweede SKB-rapport met de titel 'Fase 2: Evaluatierapport werking ijzerscherp Katwijk'.

#### **Het verankeren van de toepassingsmogelijkheden van de techniek bij bevoegd gezag**

Voor de verankering van de toepassingsmogelijkheden van ijzerscherpen is een checklist opgesteld die het bevoegd gezag en eindgebruikers kunnen gebruiken om te beoordelen of toepassing van een ijzerscherp mogelijk is op een met VOCl verontreinigde locatie. Tevens is op de website van SKB informatie beschikbaar gesteld over het demonstratieproject, de on-site dag, de presentaties en publicaties. Verwacht wordt dat wanneer de goede werking van het ijzerscherp in Katwijk wordt aangetoond bevoegde gezagen gemakkelijker zullen kiezen voor een innovatieve en kosteneffectieve beheersing van een VOCl-verontreiniging middels een ijzerscherp.

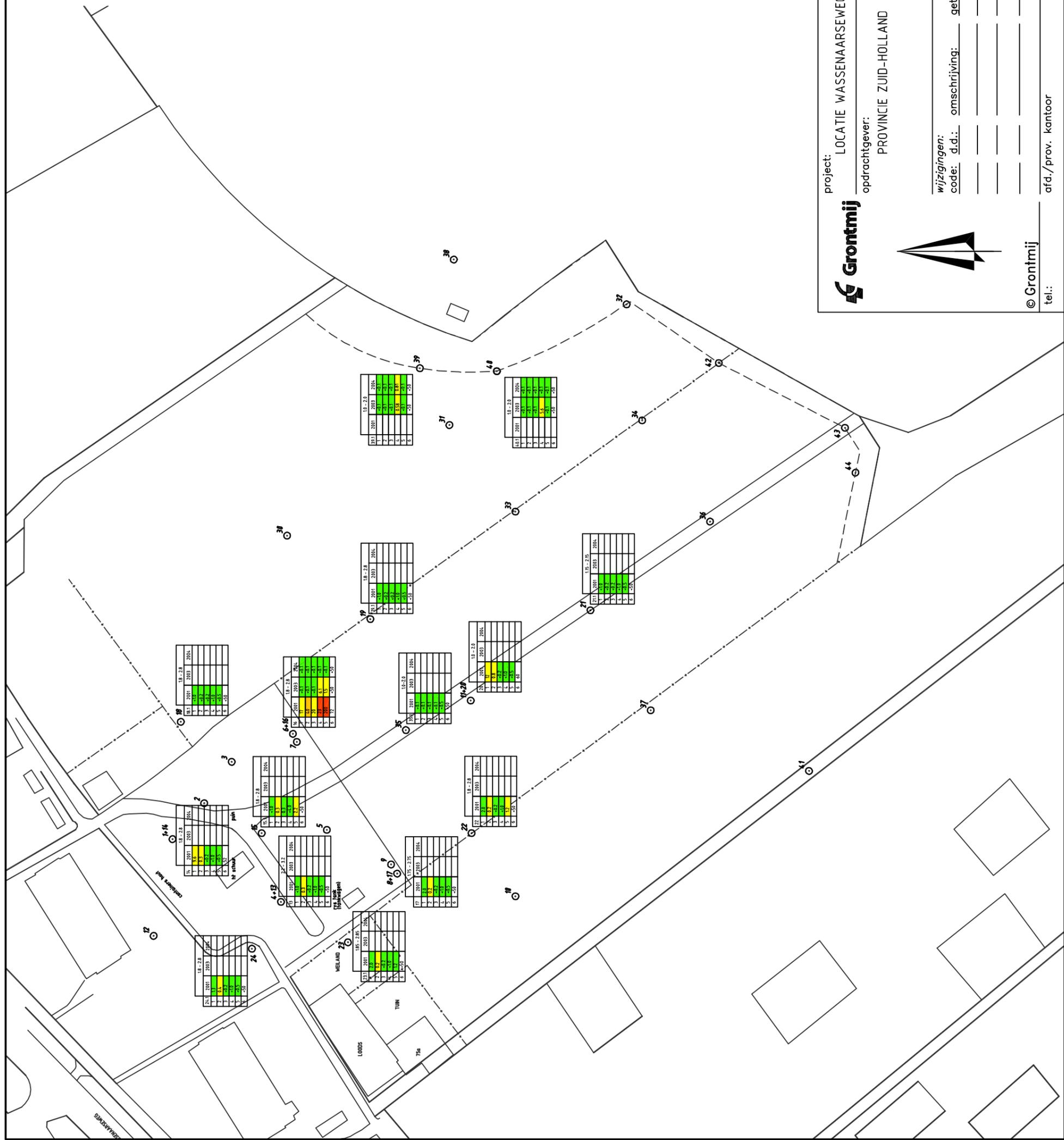
## **BIJLAGE 1 UITGANGSSITUATIE VOCL-VERONTREINIGING**

VERKLARING

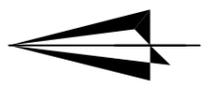
-  BORING MET PEILBUIS
-  LIMIETGREN
-  INTERVENTIEGREN
-  NET VERONTREINGD < STREEFWAARDE
-  LICHT VERONTREINGD = STREEFWAARDE
-  MATIG VERONTREINGD > 1/2 (s-1)
-  STERK VERONTREINGD > INTERVENTIEWAARDE

FLITERJAET	N.M.	N.V.
1	ST. SCHILDBREIWMAN	
2	ST. SCHILDBREIWMAN	
3	ST. SCHILDBREIWMAN	
4	OS 12 - SCHILDBREIWMAN	
5	VINYLLOORDE	
6	VLUCHTIGE OLE	

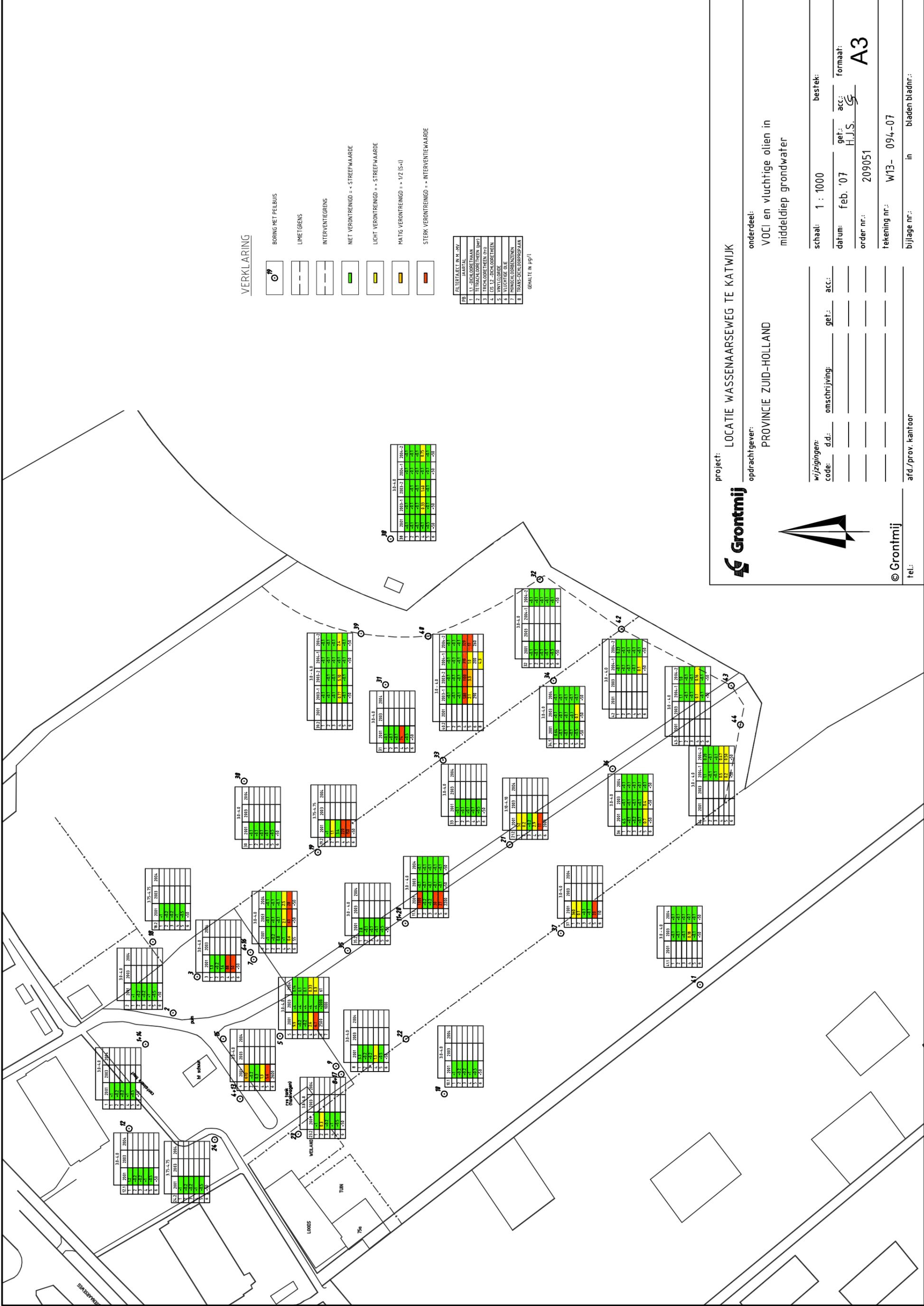
GEHALTE IN MG/L




**Grontmij**  
 project: LOCATIE WASSENAARSEWEG TE KATWIJK  
 opdrachtgever: PROVINCIE ZUID-HOLLAND  
 onderdeel: VOC en vluchtige olien in ondiep grondwater  
 wijzigingen: \_\_\_\_\_  
 code: d.d.: \_\_\_\_\_ omschrijving: \_\_\_\_\_ get.: \_\_\_\_\_ acc.: \_\_\_\_\_  
 datum: feb. '07 H.J.S. acc.: \_\_\_\_\_ formaat: A3  
 order nr.: 209051  
 tekening nr.: W13- 093-07  
 bijlage nr.: \_\_\_\_\_ in \_\_\_\_\_ bladen bladnr.: \_\_\_\_\_  
 afd./prov. kantoor: \_\_\_\_\_  
 tel.: \_\_\_\_\_



© Grontmij  
tel.: \_\_\_\_\_



**VERKLARING**

- BORING MET PELBUIJS
- LIMIETGRENZ
- INTERVENTIEGRENZ
- NIET VERONTREINGD = + STREEFWAARDE
- LICHT VERONTREINGD = + STREEFWAARDE
- MATIG VERONTREINGD = + 1/2 (S+I)
- STERK VERONTREINGD = + INTERVENTIEWAARDE

PH	JAARTAL	3.0-4.0	2001	2002	2003	2004	2005
1	1.1-DICHTLORETHAAN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	TETRACHLORETHAAN (DNP)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	TETRACHLORETHAAN (DPO)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	OS. 1,2-DICHLORETHAAN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	OS. 1,1-DICHLORETHAAN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	VLUCHTIGE OLE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	MONICHLORBENZENEN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	TRANS-DICHLOROPROPAAN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

GEHALTE IN PG/1

**Grontmij**

project: **LOCATIE WASSENAARSEWEG TE KATWIJK**

opdrachtgever: **PROVINCIE ZUID-HOLLAND**

onderdeel: **VOC en vluchtige olien in middeldiep grondwater**

schaal: 1 : 1000      bestek:

datum: feb. '07      get.: H.J.S.      acc.:      formaat: **A3**

order nr.: 209051

rekening nr.: W13- 094-07

bijlage nr.:      in      bladen bladnr.:

wijzigingen:      omschrijving:      get.:      acc.:

code: d.d.:      d.d.:      d.d.:      d.d.:

afd./prov. kantoor:      rel.:      © Grontmij

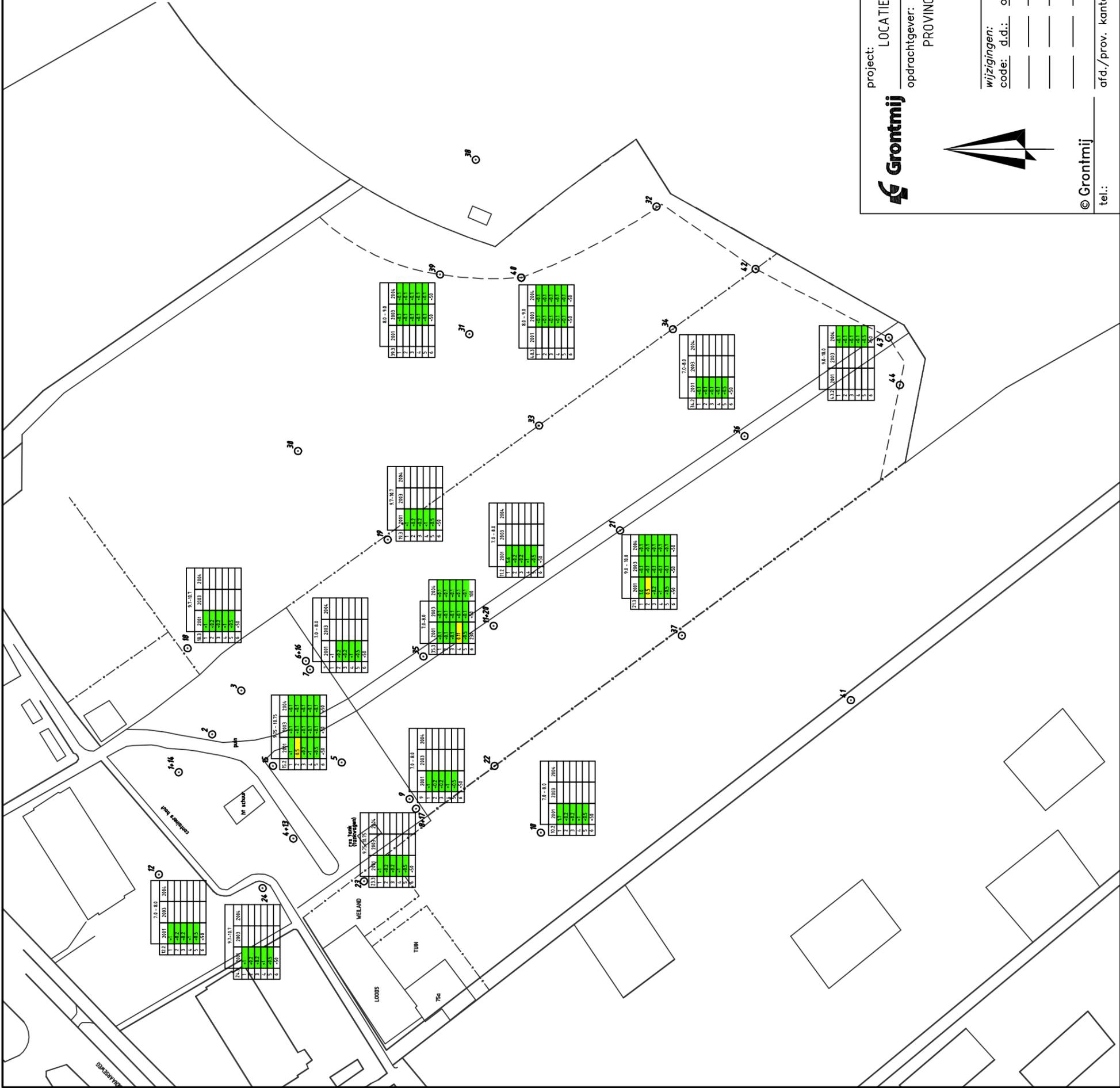


**VERKLARING**

- BORING MET PEILBUIS
- LIMIETGRENIS
- INTERVENTIEGRENIS
- NET VERONTREINIGD = + STREEFWAARDE
- LICHT VERONTREINIGD = + STREEFWAARDE
- MATIG VERONTREINIGD = + 1/2 (S-I)
- STERK VERONTREINIGD = + INTERVENTIEWAARDE

PF	JAARJAAL	1	2	3	4	5	6
	1	11	12	13	14	15	16
	2	17	18	19	20	21	22
	3	23	24	25	26	27	28
	4	29	30	31	32	33	34
	5	35	36	37	38	39	40
	6	41	42	43	44	45	46
	7	47	48	49	50	51	52

GEHALTE IN µG/L



project: **LOCATIE WASSENAARSEWEG TE KATWIJK**

opdrachtgever: **PROVINCIE ZUID-HOLLAND**

onderdeel: **VOC en vluchtige olie in diep grondwater**

wijzigingen: \_\_\_\_\_  
 code: d.d.: \_\_\_\_\_ omschrijving: \_\_\_\_\_ get.: \_\_\_\_\_ acc.: \_\_\_\_\_  
 datum: feb. '07 \_\_\_\_\_ get.: \_\_\_\_\_ acc.: \_\_\_\_\_  
 order nr.: 209051 \_\_\_\_\_  
 tekening nr.: W13- 092-07 \_\_\_\_\_  
 bijlage nr.: \_\_\_\_\_ in \_\_\_\_\_ bladen bladnr.: \_\_\_\_\_

bestek:

format: **A3**



© Grontmij  
 tel.: \_\_\_\_\_

## BIJLAGE 2 REFERENTIEPROJECTEN

# Referentielijst toepassingen ijzerschermen Wereldwijd

## Existing references world wide;

### • Full-Scale Projects

- [Aircraft Maintenance Facility, Southern Oregon, OR](#)
- [Caldwell Trucking, Northern New Jersey, NJ](#)
- [Copenhagen Freight Yard, Copenhagen, Denmark](#)
- [F.E. Warren Air Force Base, Cheyenne, WY](#)
- [Federal Highway Administration Facility, Lakewood, CO](#)
- [Former Industrial Site, Brunn am Gebirge, Austria](#)
- [Former Manufacturing Site, Seattle, WA](#)
- [Former Manufacturing Site, Fairfield, NJ](#)
- [Haardkrom Site, Kolding, Denmark](#)
- [Industrial Site, SC](#)
- [Industrial Site, Coffeyville, KS](#)
- [Industrial Site, Belfast, Northern Ireland, Ireland](#)
- [Intersil Semiconductor Site, Sunnyvale, CA](#)
- [Kansas City Plant, Kansas City, MO](#)
- [Lowry Air Force Base, CO](#)
- [Rocky Flats Environmental Technology Site \(East Trenches Plume\), Golden, CO](#)
- [Rocky Flats Environmental Technology Site \(Mound Site\), Golden, CO](#)
- [Seneca Army Depot Activity, Romulus, NY](#)
- [Shaw Air Force Base, Sumter, SC](#)
- [Somersworth Sanitary Landfill Superfund Site, Somersworth, NH](#)
- [Vapokon Petrochemical Works, Sønderød, Denmark](#)
- [Watervliet Arsenal, Watervliet, NY](#)

### • Pilot-Scale Projects

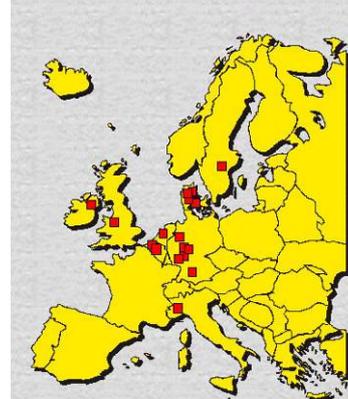
- [Alameda Point, Alameda, CA](#)
- [Area 5, Dover Air Force Base, Delaware, DE](#)
- [Borden Aquifer, Ontario, Canada](#)
- [Cape Canaveral Air Station, FL](#)
- [DuPont, Oakley, CA](#)
- [DuPont, Kinston, NC](#)
- [Former Dry-Cleaning Site, Rheine, Westphalia, Germany](#)
- [Launch Complex 34, Cape Canaveral Air Force Station, Cape Canaveral, FL](#)
- [Massachusetts Military Reservation CS-10 Plume, Falmouth, MA](#)
- [Moffett Federal Airfield, Mountain View, CA](#)
- [SAFIRA Test Site, Bitterfeld, Germany](#)
- [Savannah River Site TNX Area, Aiken, SC](#)
- [U.S. Coast Guard Support Center, Elizabeth City, NC](#)
- [X-625 Groundwater Treatment Facility, Portsmouth Gaseous Diffusion Plant, Piketon, OH](#)

## More than 125 PRBs installed worldwide

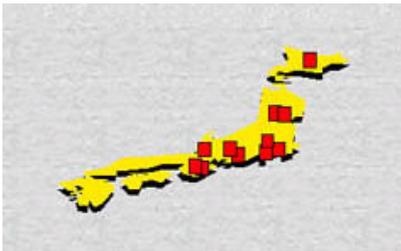
### - United States



### Europe



### - Japan



### Australia



## Over Fifteen-Year Performance Of The Borden Iron Wall

By Tamra J. Reynolds, M.Sc. Candidate, University of Waterloo, Waterloo, Ontario

The first field demonstration of a granular iron permeable reactive barrier (PRB) was installed in 1991 at CFB Borden, Ontario, downgradient from a source of dissolved PCE and TCE. The iron wall consists of 22% non-commercial granular iron by weight mixed with 78% coarse sand, and has dimensions 5.5 x 1.6 x 2.2 m (l x w x h). The performance of the wall was evaluated throughout 5 years of operation (O'Hannesin, 1993; O'Hannesin and Gillham, 1998). Though the source of PCE and TCE was removed in 1998, the wall remains in place. Now, ten years after the initial installation, further tests are in progress to evaluate the in situ reactivity of the iron. In the current work, an In Situ Microcosm (ISM) technique (Gillham et al., 1990) is being used to determine half lives for TCE, which are then compared with those measured previously. The ISM is a stainless steel cylinder that isolates about 5 L of the iron/sand wall and contains valves and tubing to allow amendment and sampling of groundwater from the ground surface with only minimal disturbance of the in situ material.

The initial field study gave a TCE half life of 117 hours, assuming the kinetics of degradation to be pseudo-first order. After 5 years, the TCE half life was found to be 142 hours, while the current study, using the results from ISMs installed in the iron/sand wall, gave an average TCE half life of 139 hours. Considering the uncertainty typical of field data, the TCE half lives are remarkably similar. Core material was also collected from various locations across the iron wall and used in laboratory columns. The columns were maintained at 10°C to simulate field conditions, and Borden groundwater, amended with 10 mg/L TCE, was pumped through the columns at a velocity of approximately 20 cm/day. The nine columns indicated an average TCE half life of 20 hours compared to 8 hours in the control column consisting of 22% original iron source and 78% coarse sand. These results are similar to the control column results reported in O'Hannesin, 1993 (19.7 hour TCE half life for a column flow velocity of 32 cm/day) and O'Hannesin and Gillham, 1998 (55 hour TCE half life for a column flow velocity of 8.9 cm/day). The results of the field and laboratory experiments provide evidence of consistent performance of the iron over the past 15 years. Although the results of the present study are preliminary and site specific, they provide promising evidence regarding the long term performance of permeable reactive barriers.

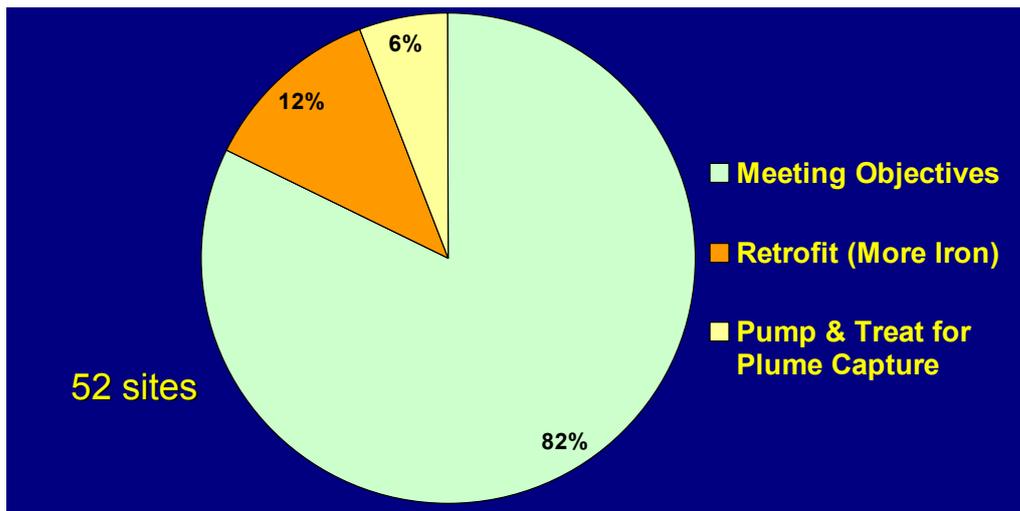
#### References:

- Gillham, R.W., Starr, R.C. and Miller, D.J., 1990. A Device for In Situ Determination of Geochemical Transport Parameters. 2. Biochemical Reactions. *Groundwater*, V.28, no. 6, pp. 858-862.
- O'Hannesin, S.F., 1993. A field demonstration of a permeable reaction wall for the in situ abiotic degradation of halogenated aliphatic organic compounds. M.Sc. diss., Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- O'Hannesin, S.F. and Gillham, R.W., 1998. Long-Term performance of an In Situ "Iron Wall" for Remediation of VOCs. *Groundwater*, V.36, no. 1, pp. 164-169.



*Construction of the First Research PRB at Borden, ON*

**Are PRBs meeting regulatory objectives; an evaluation of 52 full-scale applications**



**Evaluation by ETI, Waterloo, Ontario, Canada**

- most PRB applications are meeting regulatory objectives;
- system hydraulics and unexpected concentration levels are the main cause of inadequate performance;
- ongoing refinement/improvement of construction methods is minimizing adverse impacts due to construction.

More specific evaluated data on PRBs are published by the U.S. Environmental Protection Agency:

- Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation (EPA/600R-98/125, September 1998).

## **BIJLAGE 3 SAMENVATTING KOLOMTEST**

# Samenvatting kolomtest

## 1 Haalbaarheidstest

Ten behoeve van het ontwerp van het ijzerscherm en voor het vaststellen van de juiste dimensionering is in september 2004 tot december 2004 door Vito een haalbaarheidstest uitgevoerd. De haalbaarheidstest bestaat uit een kolomtest, waarmee op laboratoriumschaal het ijzerscherm is nagebootst. In deze kolomtest is grondwater van de locatie geleid door een met ijzergranulaat gevulde kolom. Op verschillende plaatsen langs de kolom zijn periodiek de VOCl-concentraties gemeten. Op basis hiervan zijn de halfwaardetijden van de verschillende stoffen afgeleid. Aan de hand van de halfwaardetijden, de concentraties in het grondwater en de terugsaneerwaarden van de VOCl is een inschatting van de benodigde verblijftijd in het ijzerscherm gegeven. Deze verblijftijd vermenigvuldigd met de stroomsnelheid van het grondwater bepaald de minimaal benodigde dikte van het ijzerscherm. Een juiste bepaling van de verblijftijd en de stroomsnelheid is dus van cruciaal belang voor het vaststellen van de benodigde dikte van het ijzerscherm vast te stellen. Tevens kan aan de hand van de kolomtest de benodigde verhouding van ijzer en zand in het ijzerscherm worden vastgesteld. Uit onderzoek van ETI blijkt dat er sprake is van een lineair verband tussen de halfwaardetijd van TRI en het benodigde percentage ijzer<sup>1</sup>. De kolomtesten worden door VITO daarom standaard uitgevoerd met 100% ijzer.

Hieronder zijn de resultaten van de kolomtest samengevat aan de hand van de eindrapportage van Vito: "Haalbaarheidstest zerovalent ijzer voor de behandeling van grondwater verontreinigd met VOCl (Katwijk, NL)", kenmerk 2005/MPT/R/018, maart 2005). De resultaten vormen het uitgangspunt voor de dimensionering van het ijzerscherm.

### 1.1 Doelstelling

De kolomtest is uitgevoerd met grondwater van de locatie Katwijk en heeft de volgende drie doelstellingen:

- Bepaling van de afbraaksnelheden van VOCl die bereikt kunnen worden met het te gebruiken (granulaire) ijzer voor het ijzerscherm.
- Berekening van de benodigde verblijftijd van het grondwater in het ijzerscherm op basis van de kolomtest.
- Vaststellen in welke mate neerslagen (precipitaties) van mineralen kunnen ontstaan die het afbraakproces kunnen beïnvloeden.

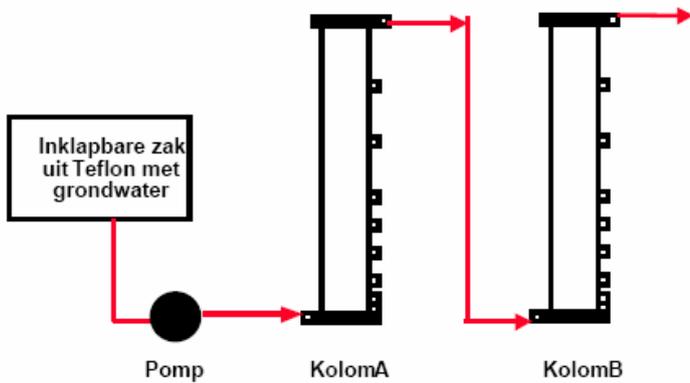
### 1.2 Uitvoering

Voor de kolomtest is gebruik gemaakt van twee kolommen (L=50 cm, D= 4 cm) die in serie geschakeld zijn. De kolommen zijn gevuld met 100 % ijzergranulaat uit Duitsland (type FeA4, 0,3-2,0 mm, Gotthart Maier) met een specifiek oppervlak van 0,7 m<sup>2</sup>/g. De gemiddelde porositeit en doorlatendheid in de kolommen bedroeg respectievelijk 0,53 en 20,6 m/dag. In figuur 1.1 is de opstelling van de kolomtest weergegeven. Beide kolommen zijn voorzien van monsternapenpunten aan de in- en uitgang en op 7 intermediaire hoogten.

Gedurende 3 maanden is grondwater van de locatie in Katwijk door de met ijzer gevulde kolommen geleid met een snelheid van 50 cm/dag. Hierbij zijn circa 95 poriënvolumes (PV) door de kolommen verpompt, hetgeen overeenkomt met circa 31 l water (0,330 l x 95 PV). Voor de kolomtest is circa 50 l grondwater bemonsterd uit peilbuis 40-2 (diepte 3-4 m –mv), die ter plaatse van het beoogde scherm is gelegen. De gemiddelde concentraties van het grondwater bedroegen 717 µg/l aan CIS en 32 µg/l aan VC. Voor de kolomtest is de concentratie aan CIS verhoogd tot ongeveer 2000-3000 µg/l om een nauwkeurige bepaling van de halfwaardetijden te kunnen realiseren. Bij een lagere startconcentratie is namelijk een afname door afbraak minder duidelijk zichtbaar. Het verhogen van de concentratie heeft overigens geen nadelig effect op de resultaten en berekeningen.

---

<sup>1</sup> TN 3.07 Rationale for the use of Iron/Sand mixtures in PRB installations en publicatie Effect on Temperature and Iron Content on PRB design, May 2004, Fourth International Congress on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey California (zie bijlage 2)



**Figuur 1.1** Schematische weergave en foto van de kolomtest

In functie van de tijd werd de kolom bemonsterd tot steady state concentratieprofielen verkregen werden. De volgende analyses en metingen zijn verricht op de grondwatermonsters:

- VOCl-analyses op verschillende hoogten bij elke bemonstering;
- Redoxpotentiaal en pH op verschillende hoogten bij elke bemonstering;
- Anorganische analyses op het influent en effluent na 65 PV

### 1.3 Resultaten

#### Concentratieprofielen

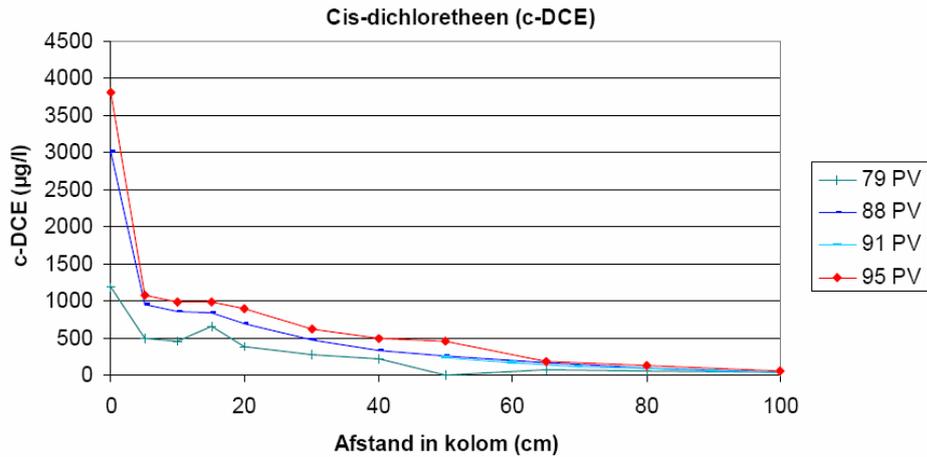
In figuur 1.2 en 1.3 is een selectie van de concentratieprofielen van CIS en VC weergegeven na 65 PV, die gebruikt zijn voor de berekeningen van de halfwaardetijden. De kolomtest is langer uitgevoerd dan voorzien, waarbij extra meetrondes zijn verricht om tot betrouwbare concentratieprofielen te komen.

De concentratie aan de CIS daalde zeer snel in de eerste 5 cm van de kolom. Daarna werd een tragere daling vastgesteld. De eerste snelle daling was niet verwacht en is mogelijk toe te schrijven aan biologische afbraak juist voor of in de eerste cm van de kolom. Tussen 5 en 100 cm daalde de concentratie zeer geleidelijk met aan de uitgang van de kolom een restconcentratie van 30-50  $\mu\text{g/l}$ .

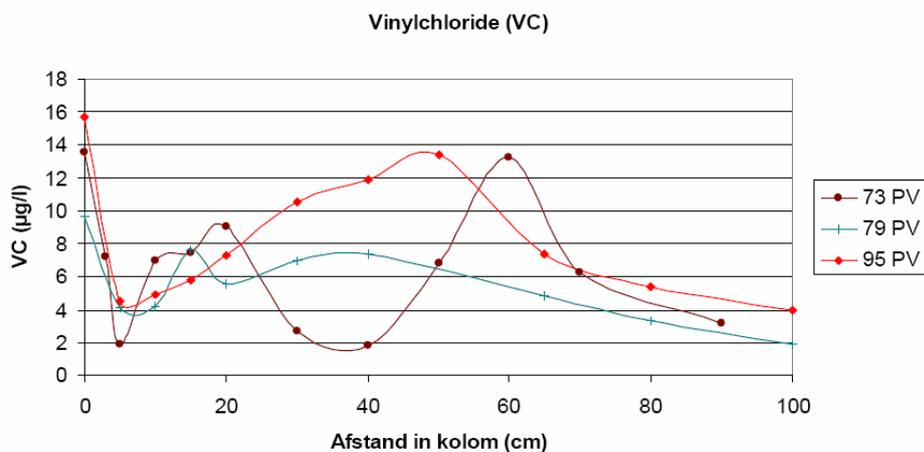
De concentratieprofielen van vinylchloride vertonen een grillig verloop. De in het influent aanwezig VC-concentratie werd gereduceerd in de eerste 5 cm van de kolom. De stijging die tussen 5 en 40-50 cm in de kolom werd vastgesteld is verklaarbaar door de afbraak van CIS waarbij VC wordt gevormd. De piekwaarde die bereikt werd bedroeg maximaal 13  $\mu\text{g/l}$ . De gevormde VC werd nadien verder afgebroken in de kolom.

Aan de uitgang van de kolom bedroeg de VC-concentratie 2 tot 6  $\mu\text{g/l}$ . Bij de afbraak van CIS (ook wel cDCE) werd dus een tijdelijke accumulatie van VC vastgesteld.

De sterke schommeling die na 73 PV werden gezien zijn waarschijnlijk verklaarbaar door het fragiele evenwicht tussen vorming en afbraak van VC. Verder kunnen artefacten tijdens monsternamen en analyse ook niet volledig uitgesloten worden gezien de vluchtigheid van VC.



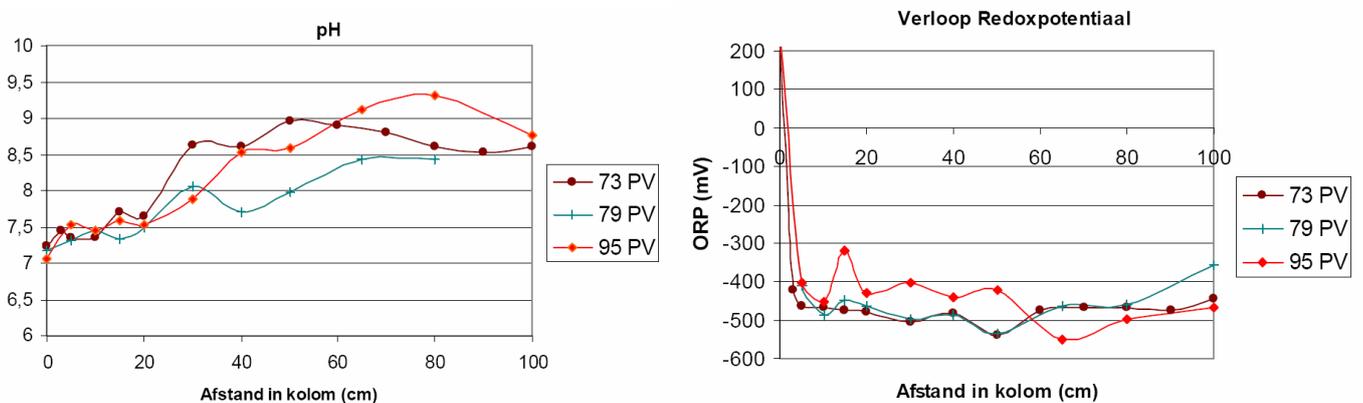
**Figuur 1.2 Concentratieprofielen CIS**



**Figuur 1.3 Concentratieprofielen VC**

**pH- en redoxmetingen**

In figuur 1.4 is het verloop van de pH- en redoxmetingen weergegeven. Hieruit blijkt dat over de kolommen een sterke daling in redox en stijging in pH werd gemeten. De redoxpotentiaal ten opzichte van de waterstof referentie electrode (Ag/AgCl) daalde van meer dan 200 mV tot een -500 mV. Er heersten duidelijk reducerende condities in de kolommen. In de kolom met FeA4 werd een pH-stijging tot een waarde hoger dan pH 9.0 waargenomen. De pH-stijging houdt verband met de hydrolyse van water, waarbij OH<sup>-</sup>-ionen vrijkomen.



**Figuur 1.4 Gemeten verloop van pH- en redoxmetingen**

## Halfwaardetijden

Op basis van de concentratieprofielen van CIS en VC zijn afbraakcoëfficiënten en halfwaardetijden berekend gebruikmakend van een eerste-orde kinetisch model. In tabel 1.1 zijn de halfwaardetijden weergegeven die berekend werden op basis de in figuur 1.2 en 1.3 weergegeven steady state concentratieprofielen. Hiervoor werd zowel gebruik gemaakt van lineaire regressie van ln-getransformeerde data als van fitting via de kleinste kwadraat methode.

Voor CIS is de variatie op de halfwaardetijd relatief gering. Voor VC is de variatie hoger. De hoge correlatiecoëfficiënten die verkregen werden, geven aan dat de benadering van de afbraak via een eerste-orde kinetiek correct was. De vermelde halfwaardetijden zijn bepaald op basis van de verhoogde concentratie aan CIS en gelden ook voor de werkelijke concentraties in het grondwater. Bij de berekening van de halfwaardetijden is de influentconcentratie aan het begin van de kolom buiten beschouwing gelaten, aangezien het vermoeden bestond dat in de eerste cm van de kolom sprake was van biologische afbraak en dit tot een overschatting van de halfwaardetijden zou kunnen leiden.

**Tabel 1.1 Halfwaardetijden berekend op basis van resultaten kolomtest**

Component	Halfwaardetijden Vito-kolom <sup>a</sup> (h)	Correlatiecoëfficiënt r <sup>2</sup> (range)
<b>Lineaire regressie<sup>a</sup>:</b>		
Cis-1.2 dichlooretheen (CIS)	8,9 ± 0,5	0,933 – 0,995
Vinylchloride (VC)	11,0 ± 3,0	0,950 – 0,960
<b>Kleinste kwadratenmethode<sup>b</sup>:</b>		
Cis-1.2 dichlooretheen (CIS)	11,9 ± 1,1	0,850 – 0,968
Vinylchloride (VC)	8,6 ± 1,6	0,717 – 0,819

<sup>a</sup> Gemiddelde berekend op basis van 3 tot 4 steady state concentratieprofielen

<sup>b</sup> Gemiddelde berekend op basis van 2 tot 3 steady state concentratieprofielen

De halfwaardetijden en de verblijftijden die voor de verontreiniging met CIS en VC zijn bepaald, vallen gunstiger uit dan de referentiewaarden die in de studie beheersmaatregelen beschikbaar waren voor het ijzer uit Duitsland (referentiewaarden ETI: 21 h CIS en 30 h VC).

## Anorganische analyses

Bij steady state werd de anorganische samenstelling na 65 PV van het influent en het effluent vergeleken. De concentraties aan natrium, kalium, ammonium en sulfaat bleven constant. Anderzijds werd een daling in het effluent van barium, calcium, magnesium, mangaan, ijzer, DOC, DIC, bicarbonaten en de buffercapaciteit (pH 4,3) vastgesteld.

Dit alles, als ook de sterke daling in de droogrest, wijst erop dat carbonaat- en hydroxide-precipitaten gevormd werden in de kolom die op termijn de permeabiliteit en reactiviteit van de ijzerwand negatief kunnen beïnvloeden.

Tijdens het kolomexperiment, waarbij 95.5 PV door de kolom werden gepompt, werden geen duidelijke indicaties van een dalende reactiviteit vastgesteld. Door de dechlorering stijgt normaal de concentratie aan chloride bij het doorlopen van de kolom. Aangezien in de kolomtest relatieve lage concentraties van laag gechlorideerde verbindingen aanwezig waren, werd echter geen verhoging van chloride gemeten.

Op basis van de resultaten van de anorganische analyses werd een theoretische inschatting gemaakt van de levensduur van een reactieve ijzerwand in Katwijk.

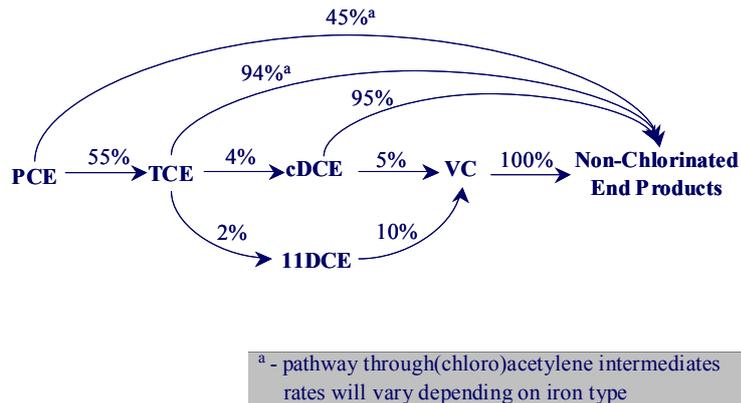
- Uitgaande van (i) het feit dat 96 PV efficiënt behandeld werden in de kolom, en (ii) een stroomsnelheid van het grondwater in situ van 6 m/jaar (+/- 10 PV per jaar), kan afgeleid worden dat de wand voor minstens 10 jaar reactief zal zijn, en vermoedelijk nog langer. Voor een stroomsnelheid van 1,6 m/jaar zal dit vermoedelijk minstens 20 jaar zijn.
- De anorganische samenstelling van het grondwater werd vergeleken met een 3-tal terreinen waar reeds een wand werd geïnstalleerd. ETI schat in dat de wand in Katwijk gedurende minstens 10 tot 15 jaar zal kunnen opereren zonder onderhoud.

### Benodigde verblijftijd van grondwater in het ijzerscherm

Aan de hand van de halfwaardetijden zijn door Vito simulaties uitgevoerd om de benodigde verblijftijd in het ijzerscherm te berekenen. Hierbij is uitgegaan van:

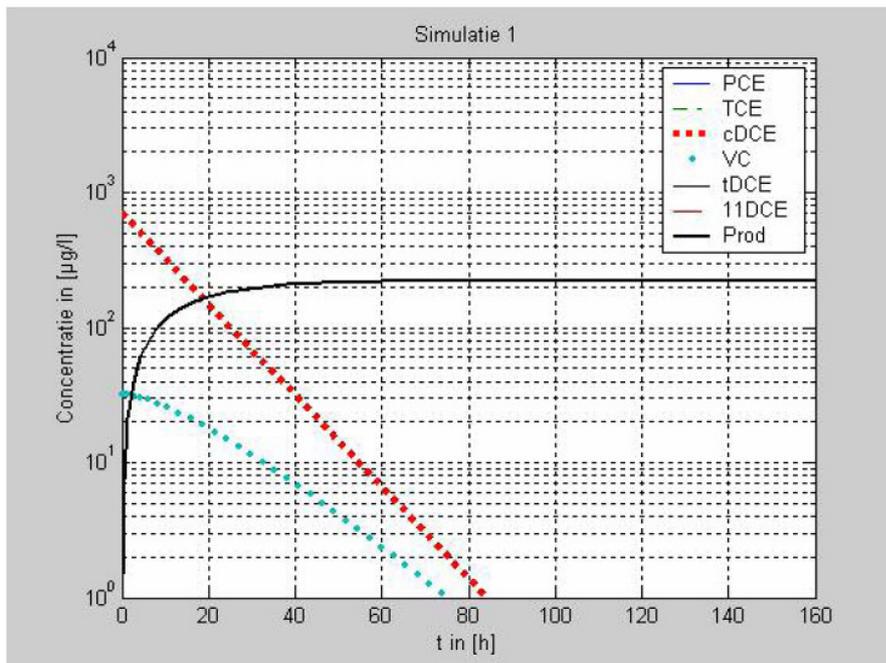
1. een eerste orde afbraakkinetiek;
2. een molair conversiemodel waarbij 5 % van CIS via VC wordt afgebroken (zie figuur 1.5);
3. de concentraties die in het scherm verwacht worden;
4. de in de kolomtest bepaalde halfwaardetijden en
5. de van toepassing zijn de terugsaneerwaarden.

Voor de terugsaneerwaarden is uitgegaan van de tussenwaarde ( $\frac{1}{2}(S+1)$ ) voor de VOCl-componenten. Deze komt overeen met de signaalwaarde uit het monitoringsplan van 2002.



**Figuur 1.5 Molair conversiemodel (ETI, Canada)**

In totaal zijn 8 simulaties uitgevoerd, 4 gebruikmakend van halfwaardetijden die verkregen zijn via lineaire regressie en 4 met halfwaardetijden die verkregen zijn via de kleinste kwadraat methode. In de simulaties zijn telkens de gemiddelde halfwaardetijden en de halfwaardetijden vermeerderd met 1 standaarddeviatie. Andere variabelen zijn de verwachte concentraties aan CIS en VC die het scherm instromen. Er zijn simulaties uitgevoerd met de VOCl-concentraties die oorspronkelijk in het opgepompte grondwater van peilbuis 40-2 zijn gemeten en met de voor de kolomtest verhoogde concentraties. In figuur 1.6 is ter illustratie de verblijftijd in relatie tot de concentratie voor simulatie 1 weergegeven.



**Figuur 1.6 Resultaten simulatie 1 verblijftijd in relatie tot concentraties VOCl**

In tabel 1.2 zijn de benodigde verblijftijden van het grondwater in een scherm met 100 % ijzer weergegeven van de 8 simulaties die Vito heeft uitgevoerd.

**Tabel 1.2 Benodigde verblijftijden in uren, berekend op basis van de kolomtest**

	Simulatie 1	Simulatie 2	Simulatie 3	Simulatie 4	Simulatie 5	Simulatie 6	Simulatie 7	Simulatie 8
Berekening	Lineaire	Lineaire	Lineaire	Lineaire	Kleinste	Kleinste	Kleinste	Kleinste
halfwaardetijd	regressie	regressie	regressie	regressie	kwadraten	kwadraten	kwadraten	kwadraten
Halfwaardetijd	Gemiddeld	Gemiddeld	Gemiddeld	Gemiddeld	gemiddeld	Gemiddeld	Gemiddeld	Gemiddeld
		+ SD <sup>1</sup>		+ SD <sup>1</sup>		+ SD <sup>1</sup>		+ SD <sup>1</sup>
Concentraties	Werkelijk <sup>2</sup>	Werkelijk <sup>2</sup>	Verhoogd <sup>3</sup>	Verhoogd <sup>3</sup>	Werkelijk <sup>2</sup>	Werkelijk <sup>2</sup>	Verhoogd <sup>3</sup>	Verhoogd <sup>3</sup>
Terugsaneerwaarde CIS < 10 µg/l	<b>55</b>	<b>58</b>	68	72	<b>74</b>	<b>81</b>	91	99
Terugsaneerwaarde VC < 2,5 µg/l	<b>59</b>	<b>73</b>	75	91	<b>52</b>	<b>61</b>	70	80

<sup>1)</sup> gemiddelde vermeerderd met standaard deviatie

<sup>2)</sup> werkelijke concentraties op locatie 717 µg/l CIS en 32 µg/l VC

<sup>3)</sup> verhoogde concentraties in kolomtest 2000 µg/l CIS en 50 µg/l VC

De verblijftijden die bepaald zijn voor de werkelijke concentraties op de locatie in de simulaties 1, 2, 5 en 6 variëren tussen 55 en 81 uur voor CIS. Deze verblijftijden worden maatgevend geacht voor de dimensionering van het ijzerscherm. De gemiddelde verblijftijd voor CIS bedraagt  $67 \pm 12,5$  uur.

De verblijftijden die bepaald zijn voor de verhoogde concentraties in de kolomtest met gehalten van 2.000 µg/l CIS en 50 µg/l VC zijn niet relevant voor de dimensionering van het ijzerscherm, aangezien deze concentraties op de locatie niet voorkomen.

## Conclusies

Op basis van de chemische samenstelling van het water en de resultaten van de uitgevoerde kolomtest heeft Vito geconcludeerd dat een reactief ijzerscherm haalbaar is voor de locatie in Katwijk. Vito heeft experimenteel vastgesteld dat de belangrijkste VOCl-componenten in het grondwater (CIS en VC) kunnen worden afgebroken tot onder de gestelde normen na een gemiddelde verblijftijd van  $67 \pm 12,5$  uur in reactief scherm met 100 % ijzer.

De halfwaardetijden en de verblijftijden die voor de verontreiniging met CIS en VC zijn bepaald, vallen over het algemeen gunstiger uit dan de literatuurwaarden die in de studie beheersmaatregelen beschikbaar waren voor het ijzer uit Duitsland. De kolomtest is langer uitgevoerd dan voorzien, waarbij extra meetrondes zijn verricht om tot betrouwbare concentratieprofielen te komen.

Vito heeft de dikte van het ijzerscherm indicatief berekend op circa 2 cm voor een scherm met 100 % ijzer en 10 cm voor een scherm met 20% ijzer.

De berekening is gebaseerd op een stroomsnelheid van 2,4 m/jaar, die Grontmij indicatief heeft berekend in de studie beheersmaatregelen. Op basis van doorlatendheidsmetingen, die in de volgende paragraaf worden besproken, kan een nauwkeurigere berekening worden gemaakt van de dikte van het scherm.

De levensduur van een ijzerscherm wordt ondermeer bepaald door de anorganische samenstelling van het grondwater en de stroomsnelheid van het grondwater door het ijzerscherm. Het grondwater in Katwijk is tamelijk rijk aan opgeloste stoffen en heeft een relatief hoge alkaliniteit, wat de levensduur op termijn kan beperken. De levensduur van het ijzerscherm wordt zonder onderhoud geschat op minstens 10 tot 15 jaar door Vito en ETI op basis van de anorganische analyses van het grondwater en uitgaande van een stroomsnelheid van 6 m/jaar. Bij een lagere stroomsnelheid is de levensduur naar verwachting minstens 20 jaar.



---

## Rationale for the Use of Iron/Sand Mixtures in PRB Installations

---

Under highly reducing conditions and in the presence of metallic iron surfaces, certain dissolved chlorinated organic compounds in groundwater will degrade to non-toxic compounds such as ethene, ethane and chloride (Gillham and O'Hannesin, 1994; Gillham, 1996). Degradation occurs via abiotic reductive dehalogenation, with the metal serving to lower the solution redox potential (Eh) and as the electron source in the reaction. Using granular iron as the reactive metal, degradation rates are commonly several orders of magnitude higher than those measured under natural conditions. This means that iron zones, only inches in thickness, can be placed below ground to treat chlorinated solvent plumes.

As the process is surface area dependent (Johnson et al., 1996), a given mass of granular iron will treat the same mass flux of contaminants regardless of whether or not the iron is mixed with sand. Unpublished work completed by the University of Waterloo with iron-sand mixtures ranging from 5% to 100% iron by weight confirms this. As an example Focht (1994), evaluated the applicability of metallic iron for above-ground remediation of 1,2,3-trichloropropane (123TCP). The study involved comparison of 123TCP degradation in columns containing iron-sand mixtures with 20%, 50% and 100% iron by weight. The apparent half lives determined for the 20%, 50% and 100% iron columns were 17.6, 6.6 and 3.0 hr, respectively, and the iron surface area to solution volume ratio was calculated to be 1.16, 3.70 and 8.00 m<sup>2</sup>/mL, respectively. In other words, the half-lives decreased with increasing iron percentage, as expected. However, when the half-lives are normalized to 1.0 m<sup>2</sup>/mL, the normalized half-lives become 20.4, 24.4 and 24.0 hours for the 20%, 50% and 100% iron columns, respectively (i.e. very close to one another). Similar results were obtained for degradation of TCE in recent multiple iron-sand column study conducted by ETI (O'Hannesin et al., 2004). The TCE half lives normalized to 1.0 m<sup>2</sup>/mL in 25%, 50%, 75% and 100% iron-sand columns by weight were 3.2, 3.0, 2.8 and 3.2 hrs, respectively. Therefore, regardless of the ratio of iron to sand, the same surface area of iron produced the same degradation rates.

There have been numerous permeable reactive barriers (PRBs) containing iron-sand mixtures installed. Most of these PRBs were designed based on 100% iron treatability testing data. The thickness (and volume) of iron needed was based on the data obtained from 100% iron column data. The PRBs were constructed using native sand that was mixed with the required amount of granular iron to increase the volume of backfill material to fill the minimum excavation achievable by the construction width. To date, all of these sites exhibit the reactivity predicted by the design. Samples retrieved from backfilled material showed no

evidence of segregation of the granular iron and sand into distinct layers. However, designs involving the placement of iron-sand mixtures at greater depths, especially involving biopolymer slurry techniques, may want to consider means of minimizing potential segregation of the two materials.

Maintaining the hydraulic characteristics of these iron-sand mixtures is also important. In the field, ETI recommends using a local native sand of similar grain size as the iron, which when mixed with the iron should give similar porosity and hydraulic conductivity as the 100% iron material. ETI's Technical Note 3.08 describes magnetic separation tests which can be used as a QA/QC procedure on emplaced materials.

#### References

- Focht, R.M., 1994. Bench-scale treatability testing to evaluate the applicability of metallic iron for above-ground remediation of 1,2,3-trichloropropane contaminated groundwater. M.Sc. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, pp. 55.
- Gillham, R.W., 1996. In-Situ Treatment of Groundwater: Metal-enhanced degradation of chlorinated organic contaminants, In: M.M. Aral (ed.), *Advances in Groundwater Pollution Control and Remediation*, Kluwer Academic Publishers, pp. 249-274.
- Gillham, R.W. and O'Hannesin, S.F., 1994. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron. *Ground Water*, Vol. 32, pp. 958-967.
- Johnson, T.L., Scherer, M.M. and Tratnyek, P.G., 1996. Kinetics of halogenated organic compound degradation by iron metal. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 30, No. 8. pp. 2634-2640.
- O'Hannesin, S.F., Przepiora, A. and Gillham, R.W., 2004. Effect of temperature and iron content on iron PRB design. The 4<sup>th</sup> International Conference Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, May 24-27, (in submittal).

O'Hannesin, S.F., Przepiora, A. and Gillham, R.W., 2004. Effect of Temperature and Iron Content on Iron PRB Design. Presented at The Fourth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, California, May 24-27.

## **EFFECT OF TEMPERATURE AND IRON CONTENT ON IRON PRB DESIGN**

*Stephanie O'Hannesin* (sohannesin@eti.ca), Andrzej Przepiora  
(EnviroMetal Technologies Inc., Waterloo, ON, Canada)

Robert Gillham (University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada)

**ABSTRACT:** Granular iron column tests were conducted to confirm the change in granular iron reactivity at various groundwater temperatures and to compare 100% granular iron reactivity to measured reactivities in an iron/sand mixed zone. Half-lives for TCE were measured for iron contents (by weight) of 10%, 25%, 50% and 100% at temperatures of 25, 18, 14 and 9°C. It was observed that the TCE half-lives decreased with temperature exponentially and conformed to the theoretical Arrhenius equation. The temperature correction factors from a reference of 25°C for the 25%, 50% and 100% granular iron were:  $\times 2$  for 18°C,  $\times 3$  for 14°C and  $\times 4$  for 9°C. As expected, the TCE half-lives decreased proportionally to the weight percent in the 25% and 50% iron columns. The TCE half-lives in the 10% iron column were less affected by temperature and had values significantly lower than those predicted by direct scaling based on the iron content.

### **INTRODUCTION**

Permeable reactive barriers (PRBs) constructed of granular iron have are effective passive remediation method for groundwater contaminated with a range of contaminants, mainly halogenated compounds (Gillham and O'Hannesin, 1994). A PRB is a constructed in-situ zone of reactive material placed across the path of contaminated groundwater. Major advantage of PRBs over other groundwater remediation approaches is the lack of above ground structures, no operating costs, low maintenance cost and the enhanced technical efficacy, particularly compared with pump-and-treat systems. There are currently more than 100 iron PRBs installed at volatile organic compound (VOC) contaminated sites (O'Hannesin, 2003).

Design of a granular iron PRB for VOC treatment often involves determination of site-specific degradation rates in a laboratory column test using site groundwater. Typically, laboratory tests are conducted at room temperature (25°C) and results are adjusted to reflect site groundwater temperature. Treatability testing is typically done with columns containing 100% granular iron. In some common construction methods, granular iron is typically mixed with sand due to construction width requirements. Therefore, an additional scaling factor is necessary to account for a decrease in reactivity in an iron/sand zone, compared to data obtained within a 100% iron column. This study was conducted to confirm the temperature and granular iron content scaling factors that are currently used for commercial application of iron PRBs.

### **MATERIALS AND METHODS**

Laboratory studies were undertaken using four columns containing 10%, 25%, 50% and 100% by weight granular iron and a balance of sand. The granular iron (0.25 to 2 mm, -8 to +50 US Standard Mesh size) was obtained from a commercial source used in iron PRB applications. The sand was calcium carbonate-based with grain size gradation

similar to that of granular iron. Hydraulic conductivity values ranged from  $5.8 \times 10^{-2}$  to  $9.2 \times 10^{-2}$  cm sec<sup>-1</sup> for all mixtures. The columns were constructed of Plexiglas™ with a length of 50 cm and an internal diameter of 3.8 cm. Seven sampling ports were positioned along the length at distances of 2.5, 5, 10, 15, 20, 30 and 40 cm from the inlet end in addition to the influent (0 ft; 0 cm) and effluent (50 cm). The columns received 10 mg/L of trichloroethene (TCE) dissolved in organic free distilled water containing 40 mg/L of CaCO<sub>3</sub>. The flow in each column was maintained to obtain a residence time of 20 to 22 hrs.

Four temperatures (9, 14, 18 and 25°C) were selected to encompass a typical range of groundwater temperatures. At each temperature, each column was operated for 70 to 120 pore volumes, with a cumulative flow of about 400 pore volumes. The TCE concentration column profiles were collected periodically throughout the test. First-order TCE half-lives were obtained by fitting the profiles concentration vs. residence time, using a least square method. At steady state (>30 pore volumes), TCE profiles were used to determine half-life values. Due to inconsistencies with initial results obtained for both the 10% and 25% iron columns, additional columns were set up and tested again at the four temperatures. The data presented for the 10% and 25% columns are averages for the duplicate columns.

## RESULTS AND DISCUSSION

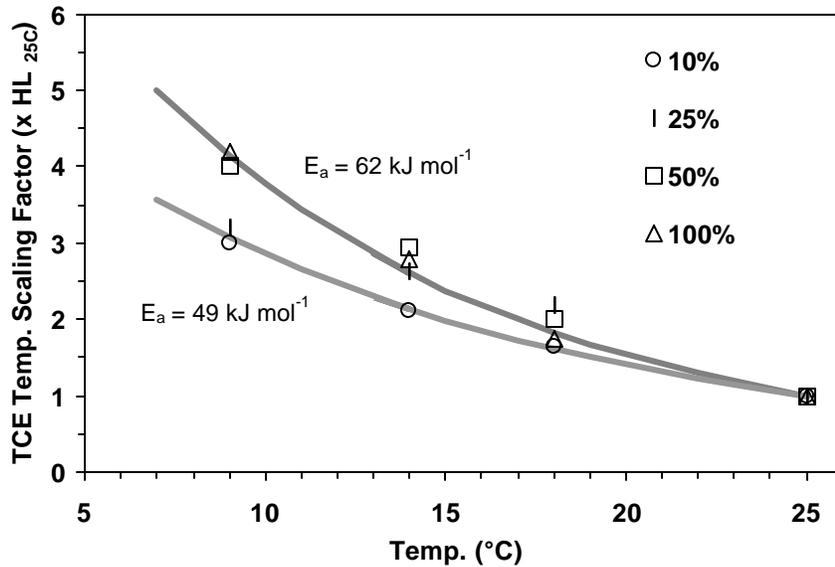
Complete TCE degradation was achieved in all columns in the tested temperature range. Due to dechlorination of TCE, small amounts of cis 1,2-dichloroethene (20 to 60 µg/L, <1% molar of initial TCE) were formed and degraded within the columns. No vinyl chloride was detected. The first-order degradation model provided good fits to the TCE concentration profiles, with  $r^2$  values greater than 0.95. The obtained TCE half-lives are summarized in Table 1. As expected, TCE half-lives increased with both the decreasing temperature and decreasing iron content.

**Table 1. Summary of measured TCE half-lives.**

Temperature (°C)	Column			
	10%	25%	50%	100%
	TCE Half-life <sup>a</sup> (hrs)			
25	2.5 ± 0.3	1.6 ± 0.3	0.75 ± 0.3	0.45 ± 0.1
18	4.1 ± 0.8	3.5 ± 0.4	1.5 ± 0.4	0.87 ± 0.2
14	5.3 ± 0.5	4.2 ± 0.3	2.2 ± 0.3	1.4 ± 0.3
9	7.5 ± 0.7	4.9 ± 0.6	3.0 ± 0.3	2.0 ± 0.3

<sup>a</sup> Average ± standard deviation.

Figure 1 shows the temperature scaling factors for the measured TCE half-lives as a function of temperature, assuming a reference temperature of 25°C. The trends in scaling factors with temperature were similar for the 25%, 50% and 100% iron columns.



**FIGURE 1. TCE half-life temperature scaling factors. The symbols indicate relative increase of TCE half-life in reference to the half-life value obtained at 25° C in each column. The lines represent the fits to the 100% data (activation energy,  $E_a = 62 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) and to the 10% iron data ( $E_a = 49 \text{ kJ mol}^{-1}$ ).**

However, the TCE half-lives obtained for the 10% iron column appeared to be influenced by temperature to a lesser degree.

Several studies have shown that degradation kinetics of VOCs in the presence of granular iron conform to the Arrhenius equation (e.g.: Johnson et al., 1996; Su and Puls, 1999). For two measured reaction rates ( $k_{T1}$  and  $k_{T2}$ ) at temperatures  $T_1$  and  $T_2$  (in °K), the Arrhenius equation can be represented as:

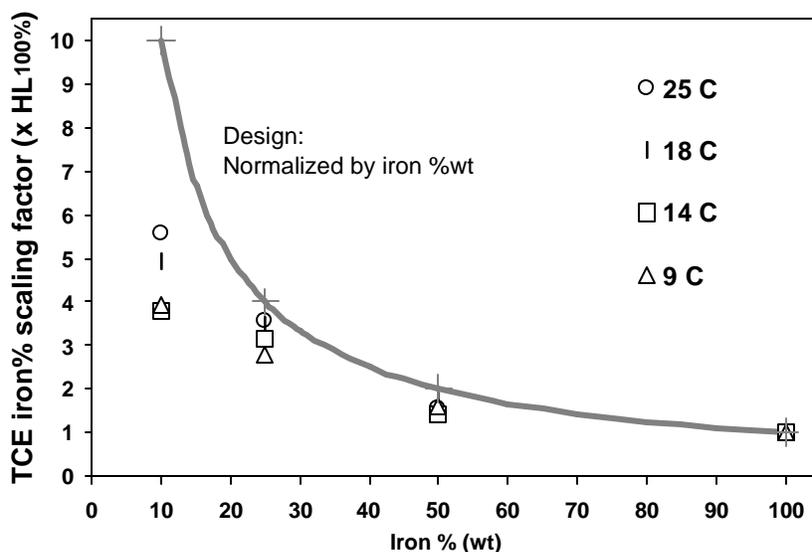
$$\ln\left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}}\right) = \frac{E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (1)$$

where:

- k = first-order reaction rate,
- $E_a$  = activation energy (J/mol),
- R = ideal gas constant (8.314 J/K mol)
- T = absolute temperature (°K)

The Arrhenius equation was used to fit the laboratory data and to develop a general relationship between the relative TCE half-life and temperature. The Arrhenius equation fit to the 25%, 50% and 100% iron column data resulted in an activation energy ( $E_a$ ) value of  $62 \text{ kJ mol}^{-1}$  (Figure 1). For the 10% iron column, a fitted  $E_a$  value of  $49 \text{ kJ mol}^{-1}$  was obtained. The reported values of  $E_a$  vary from  $15 \text{ kJ mol}^{-1}$  to  $55 \text{ kJ mol}^{-1}$ , depending on the type of VOC and the iron source (Tratnyek et al., 2003). For example, an average value of  $35 \text{ kJ mol}^{-1}$  was reported for TCE reacting with both reagent- and construction-grade iron (Su and Puls, 1999).

Figure 2 shows the iron % scaling factors for the measured TCE half-lives as a function of iron content, assuming a reference iron content of 100%. The typical design



**FIGURE 2. TCE half-life iron content scaling factors. The symbols indicate relative increase of TCE half-life in reference to the half-life value obtained for the 100% iron column.**

approach to scaling half-lives from 100% iron is the direct use of iron % as the scaling factor. The design line using this method is shown in Figure 2. The predicted TCE half-lives for 25% and 50% iron were slightly lower than those measured in the laboratory columns. However, the predicted line overestimated the TCE half-lives in the 10% iron column, with the measured value increasing from 100% iron by a factor of 4 to 6, compared to the predicted factor of 10 (Figure 2).

The TCE half-lives in the 10% iron column did not follow the general trends observed in the 25%, 50% and 100% columns. The reason for this discrepancy is currently under investigation. Although this phenomenon is interesting, it may have limited practical implications on the design, because a minimum 25% by weight of iron in iron/sand mixes is typically used in commercial applications. This minimum iron content requirement is used to assure an adequate contact time of VOCs with iron grain surfaces, as contaminated groundwater flows through the iron/sand zone.

## CONCLUSIONS

The TCE half-life decrease with temperature in 100% iron and in iron/sand mixes was exponential and it conformed to the Arrhenius equation. The temperature correction factors from a reference of 25°C for 25%, 50% and 100% iron were:  $\times 2$  for 18°C,  $\times 3$  for 14°C and  $\times 4$  for 9°C. Temperature influence was less pronounced in the 10% iron/sand column. The TCE half-lives decreased proportionally to the weight percent iron for all columns. Linear scaling of 100% iron half-lives according to iron content appears a conservative, but realistic, design approach for use in granular iron PRB applications.

## REFERENCES

Gillham, R.W. and S.F. O'Hannesin. 1994. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron. *Ground Water*. 32:958-967.

Johnson, T.L., Scherer, M.M. and P.G. Tratnyek. 1996. Kinetics of halogenated organic compound degradation by iron metal. *Environmental Science and Technology*. 30:3026-3033.

O'Hannesin, S.F. 2003. "10 Years of North American experience in granular iron PRB technology for VOC groundwater remediation." Presented at *the 8<sup>th</sup> International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, ConSoil 2003, Gent, Belgium, May 12-16, pp. 1568-1571.

Su, C. and R. W. Puls. 1999. Kinetics of trichloroethene reduction by zerovalent iron and tin: pretreatment effect, apparent activation energy, and intermediate products. *Environmental Science and Technology*. 33:163-168.

Tratnyek, P.G., Scherer, M.M., Johnson, T.L., and L.J., Matheson. 2003. "Permeable reactive barriers of iron and other zero-valent metals." In M.A. Tarr (Ed.), *Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants: Environmental and Industrial Applications*, pp. 371-421. Marcel Dekker, New York.

## **BIJLAGE 4 DOORLATENDHEIDSMETINGEN**

# Doorlatendheidsmetingen

## 1 Boorgatproeven

### 1.1 Inleiding

Op de locatie zijn op 24 februari 2005 boorgatproeven uitgevoerd om de doorlatendheid (k-waarde) van het bodemmateriaal te bepalen. Bij een boorgatproef (Engels: "slug test") wordt in een peilbuis of boorgat het herstel van de grondwaterstand gemeten nadat een bepaald volume water plotseling is verwijderd of plotseling is toegevoegd. Bij toevoeging van water wordt gesproken over een omgekeerde boorgatproef. Voor de boorgatproef zijn in de loop der tijd enige tientallen methoden ontwikkeld. Dit betekent dat voor vrijwel alle geohydrologische omstandigheden een passende methode van uitvoering en analyse is opgesteld.

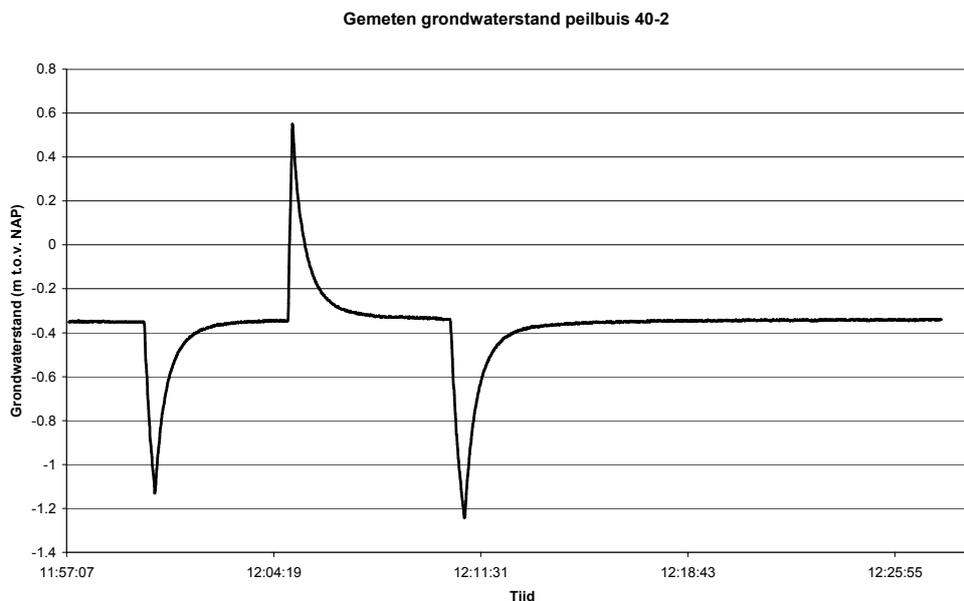
### 1.2 Uitvoering

In totaal zijn in elf peilbuizen op de locatie boorgatproeven uitgevoerd. Er zijn 9 peilbuizen geselecteerd ter plaatse van het beoogde ijzerscherm en 2 peilbuizen in de bronzone. Bij elke peilbuis is 1 of 2 maal water onttrokken (boorgatproef) en 1 of 2 maal water toegevoegd (omgekeerde boorgatproef). Het herstel van de grondwaterstand na onttrekking of toevoeging is geregistreerd met behulp van 'divers'. Een diver is een automatische datalogger waarmee nauwkeurig en met een hoge frequentie de grondwaterstand wordt gemeten. Voor de boorgatproeven in Katwijk is de frequentie ingesteld op 1 meting per seconde.

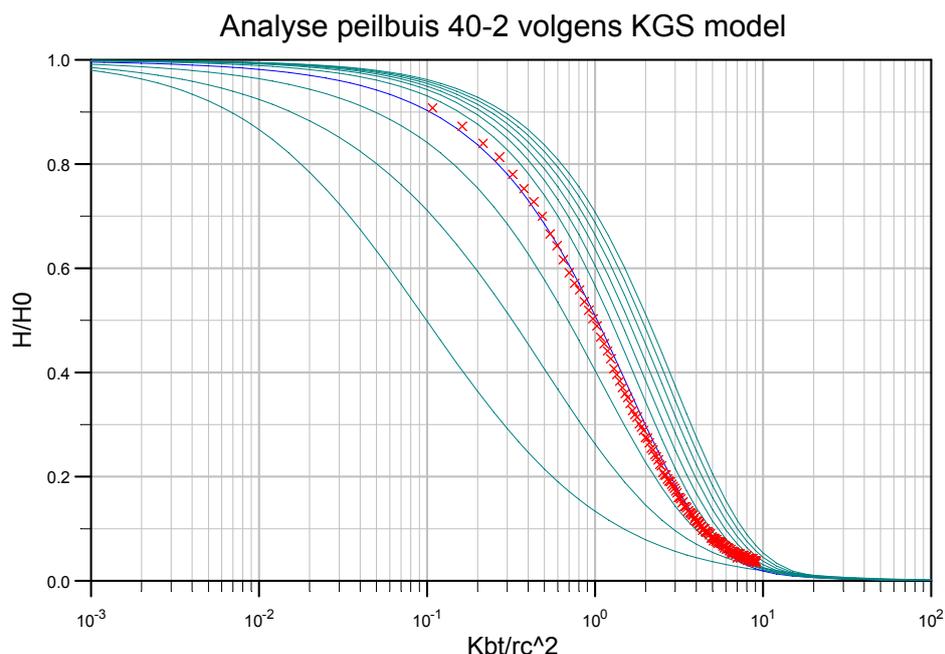
### 1.3 Resultaten

Alle proeven zijn geanalyseerd met behulp van de methode van de Kansas Geological Survey (1994). Deze analysemethode is geschikt voor onvolkomen filters in zowel freatische als gespannen pakketten. Bij de uitwerking wordt de gemeten herstelcurve "gefit" met een standaardcurve.

In figuur 1.1 is voor peilbuis 40-2 de gemeten waterstand weergegeven. Zichtbaar in de grafiek zijn achtereenvolgens een onttrekking, een toevoeging en weer een onttrekking. Vervolgens is in figuur 1.2 de curve fit van de eerste onttrekking weergegeven. Bij de uitwerking is gebruik gemaakt van het programma AquiferWin32 van Environmental Simulations, Inc.



**Figuur 1.1** Gemeten grondwaterstand peilbuis 40-2, met daarin achtereenvolgens een onttrekking, toevoeging en onttrekking.



**Figuur 1.2** Voorbeeld van een curve fit voor peilbuis 40-2, waarbij de stijghoogte/initiële stijghoogte is uitgezet tegen de dimensieloze term volgens KGS-model

In tabel 1.1 zijn de gemiddelde k-waarden weergegeven die met de boorgatproeven zijn bepaald.

**Tabel 1.1 Resultaten doorlatendheden (k) bepaald d.m.v. boorgatproeven**

Peilbuis	Filterdiepte (m -mv)	Materiaal	k proef 1 (m/d)	k proef 2 (m/d)	k proef 3 (m/d)	k gemiddeld (m/d)	Std. dev. (m/d)
39-1 *	1-2	zand, veen, klei	1,64	1,09	2,12	1,62	0,51
39-2 *	3-4	klei, zand	0,49	0,51		0,50	
39-3 *	8-9	Zand	0,65	0,59	0,75	0,66	0,08
40-1 *	1-2	klei, zand	0,31	0,40	0,13	0,28	0,14
40-2 *	3-4	klei, zand	0,21	0,23	0,19	0,21	0,02
40-3 *	8-9	Zand	0,44	0,42	0,33	0,40	0,06
42 *	3-4	zand (kleiig)	0,09	0,08		0,09	
44 *	3-4	zand (kleiig)	0,17	0,20	0,20	0,19	0,02
38 *	3-4	zand (laagjes klei)	0,26	0,19	0,16	0,20	0,05
05 **	3-4	zand (zwak kleihoudend)	0,39	0,49	0,84	0,57	0,23
04 **	3-4	Zand	2,30	1,85		2,07	
Totaal						0,5	0,1
Scherp***						(afgerond)	(afgerond)

\* peilbuis ter plaatse van het beoogde ijzerscherm

\*\* peilbuis in de bronzone van de voormalige vatenspoelierij

\*\*\* totaal berekend over de peilbuizen langs het beoogde scherm

Uit tabel 1.1 kan worden opgemaakt dat de gemiddelde doorlatendheid ter plaatse van het beoogde scherm circa  $0,5 \pm 0,1$  m/d. Tevens blijkt dat de boorgatproeven binnen de afzonderlijke filters relatief weinig spreiding laten zien. De samenstelling van het bodemmateriaal waarin verschillende bijmengingen met klei worden aangetroffen is bepalend voor de doorlatendheid die is afgeleid.

#### 1.4 Stroomsnelheid grondwater

De stroomsnelheid van het grondwater is op basis van de uitgevoerde doorlatendheidsmetingen en het grondwaterverhang in het middeldiepe grondwater bepaald. Uit de opname van de grondwaterstanden over de afgelopen 3 jaar van 13-11-2003, 23-2-2004 en 7-3-2005 blijkt dat het gemiddelde grondwaterverhang  $2,7 \pm 0,6$  m/km bedraagt.

De stroomsnelheid is afgeleid met behulp van de Wet van Darcy:

$$v = \frac{k \cdot i}{\theta} \cdot 365$$

waarin:

v = gemiddelde stroomsnelheid	(m/jr)
k = doorlatendheid	(m/d)
i = grondwaterverhang	(m/m)
$\theta$ = porositeit 0,30	(-)

De stroomsnelheid in het middeldiepe grondwater is met bovenstaande vergelijking berekend op  $1,6 \pm 0,8$  m/jaar.

**BIJLAGE 5 ONTWERPREGELS ETI CANADA**



---

### Specification for Construction of a Granular Iron PRB using Trenching Methods

---

The following are general specifications for construction of a granular iron permeable reactive barrier (PRB) using various trenching methods. For specifications on biopolymer trenching method see TN 3.11. There are some details noted in the specifications that require project specific data. *This information is in [] brackets and in italics is provided as information in preparing the specification and is not intended to be incorporated in the completed specification.*

#### Description

The work described in this section consists of furnishing all labor, equipment, materials, and supervision for installation of a PRB using a trenching technique.

The trenching method for a PRB involves excavating of a trench and simultaneously filling the trench with a reactive material such as granular iron or a granular iron/sand mix. Common trenching methods include continuous trenching, unsupported excavation and supported excavation, such as hydraulic shores, trench box, slip box or cofferdam, etc.

The work shall include, but not be limited to, the following items:

1. Site preparation;
2. Supply of reactive material [*unless granular iron and/or sand is supplied by owner*];
3. Excavation of the trench;
4. Preparation of reactive material [*if required*];
5. Backfilling trench with reactive material;
6. Backfilling material on top of reactive material; and
7. Management of excavated trench spoils.

#### Qualifications

1. The Contractor shall provide written evidence of experience and competence in trench construction, especially in PRB applications.
2. The Contractor shall provide resumes of the following qualified field staff for the project:
  - a. Quality Control Engineer – An on-site quality control engineer with several years experience in construction quality control and/or construction management.

- b. Operator(s) – The operator(s) for the excavation equipment shall have several years experience with clamshells, backhoe, chisels, and other excavation equipment proposed by the contractor.

### **Work Plan**

1. The Contractor shall submit a detailed operating plan describing the proposed construction methods, equipment, and schedules. This shall include, but not be limited to, the Contractor's plan for each of the following:
  - a. Listing of Supervisory Personnel: Name and experience of the various persons, their role and primary responsibilities.
  - b. Construction Means and Methods: Listing of equipment and capabilities, construction steps, excavation, backfill placement, handling of trench spoil, utility crossings, work platform construction, maintenance and removal.
  - c. Incorporated Materials: Certificates of compliance, test reports and/or catalog cuts and material safety data sheets (MSDS) provided by the manufacturers of the permanent materials that become a part of the final installation.
  - d. Quality Control: The contractor shall provide a detailed quality control program covering all aspects of the installation, i.e. backfill placement controls, granular iron content, trench widths and depth, and corrective measures.
  - e. Clean up: Site restoration, spoils disposal, etc.
  - f. Schedule: Bar chart with starting and ending dates for major segments of the work, estimated production rates, days and hours of operation.

### **Drawings**

State drawings showing PRB design. Items to include in drawings include:

- Limits of PRB including prominent site features (roadways, buildings, access, utilities, water bodies, etc.), location of existing and proposed monitoring wells.
- Profile of PRB showing existing grade, finished grade, high water table, general stratigraphy, granular iron requirements (weight percent for each section if applicable), confining units (if present), location and screened interval of existing and proposed monitoring wells.

### **Reactive Material Specification**

Reactive material includes granular iron, and where used, sand that is mixed with the granular iron.

### **Granular Iron Specifications**

1. The granular iron should consist of approved dry material free from oils, greases, or other foreign organic substances.
2. The granular iron shall be:
  - Connelly-GPM, Inc., 3154 S California Ave., Chicago, IL, 60608-5176  
Tel: 773.247.7231 Fax: 773.247.7239 Web: [www.connellygpm.com](http://www.connellygpm.com)
  - Product ETI-CC1004 (-8 to +50 US Standard Mesh Size)

*[The rate of degradation of VOCs by granular iron varies with iron suppliers and iron gradation. If site-specific treatability testing is undertaken, ETI recommends that the iron source used in the test be the same source used for the field installation, as the degradation rates determined will be specific to the iron source tested. The engineer may consider specifying the purchase of granular iron from that particular source. If a substitute product is proposed, the Contractor shall determine the degradation rates for site groundwater with an approved treatability test to determine the required flow-through thickness of granular iron. Substitutes are subject to approval.]*

3. Suppliers should be queried as to the buyback of reactive material, in the event excess material exists at the end of construction.
4. The gradation of granular iron should approximate the range specified in Table 1, and be approved.

**Table 1: Granular Iron and Sand Gradation Requirements**

Sieve Size		Weight Percent Passing
US Standard Mesh Number	mm	
Number 8	2.4	95 – 100
Number 16	1.2	75 – 90
Number 30	0.6	25 – 45
Number 50	0.3	0 – 10
Number 100	0.15	0 – 5

5. Granular iron should be transported and arrive on site at near ambient temperatures.
6. The granular iron shall not be directly exposed to moisture, mixing with foreign matter during production, shipment or storage.
7. The granular iron unloaded at site should be protected from contact with water at all times. Stored granular iron should be covered with impermeable sheets anchored or tied in place, if stored outdoors. Granular iron should not be stored directly on the ground surface.
8. Protective packaging should not be removed from granular iron until mixing or placement in the PRB. Unused portions of granular iron shall be returned to storage and protected in accordance with the above requirements.

**Sand Materials for Reactive Mixture**

1. The gradation of the sand shall approximate the grain size range specified in Table 1 and be similar in minerology to the native aquifer materials, and be approved.
2. Sand shall be free of stones, clay particles, debris, organic matter, and other foreign material.
3. Sand should be in as dry condition as possible prior to mixing with the granular iron.

## Reactive Material Quality Control

### Granular Iron

1. Grain size sieve analyses are to be completed on representative samples collected a minimum every [ ] tons/kg [*typically up to 10 tests are sufficient*] during the production run in accordance with ASTM D 422, Particle Size Analysis of Soils (only the sieve portion of the test has to be completed). The results are to be within the range specified in Table 1.
2. All involved parties should reserve the right to visit the Manufacturer during the production run to visually inspect the manufacturing process and collect random samples at that time. The Manufacturer should provide reasonable assistance to obtain these samples.

### Sand Material

1. Grain size sieve analyses are to be completed on representative samples collected a minimum every [ ] tons/kg [*typically one to three tests are sufficient*] of sand delivered to the site in accordance with ASTM D 422, Particle Size Analysis of Soils (only the sieve portion of the test has to be completed).

### Granular Iron/Sand Mixing [*If applicable*]

1. The granular iron and sand shall be mixed into a uniform mixture using suitable equipment. Satisfactory means, incorporating weighing, or metering shall be provided to assure the proper ratio of iron to sand is maintained. Equipment such as concrete trucks, mobile concrete mixers (e.g. Elkin Mixer), or stationary concrete mixers (e.g. pug mills) are suitable alternatives. [*The most common and accurate method to mix iron and sand is to pre-weigh sand in concrete trucks and add iron to the concrete trucks when they arrive on site. By using this method, the percent weight is easily determined since the weight of the sand and iron is known. The iron and sand is then mixed in the concrete trucks for a minimum of 10 minutes at high revolutions. Another method for mixing iron and sand is using a stationary or portable mixer such as an Elkin mixer or a pug mill. The Elkin mixer works in such a way that the sand and iron are added to separate open bins and the flow valves are adjusted to correctly add the quantities of sand and iron required in the mix. The iron and sand are then mixed with an auger on the discharge of the auger. Another method of mixing iron and sand would be to mix them by volume. This method involves using an excavator bucket or front end loader bucket of known volume and adding iron bags with a known volume to an empty concrete mixer or other similar machine to achieve the proper iron and sand mixture. All iron and sand mixtures should be verified using the magnetic separation test procedures (Attachment A) before the iron and sand mixture is placed in the trench.*]
2. All equipment should be clean of foreign materials (e.g. concrete mix, soil, stones, etc.).
3. The granular iron/sand mixture shall contain a minimum [ ] percent granular iron by weight dry. [*The specification should specify whether the proportion of granular iron to be used in the mixture is given as a dry weight percent or volume percent. Weight percent*]

*based on trench width is preferred. This requires a determination of the expected in place bulk density of the granular iron and sand.]*

4. The iron/sand ratio shall be based on the actual bulk densities for the granular iron and for the sand. A bulk density of 150 lbs/ft<sup>3</sup> (2,400 kg/m<sup>3</sup>) shall be used for the granular iron and a bulk density of 100 lbs/ft<sup>3</sup> (1,605 kg/m<sup>3</sup>) shall be used for the sand. *[Alternative bulk densities can be proposed by the Contractor and used if approved by the owners representatives.]*
5. *The ratio of granular iron to sand is dependent on the actual excavated width of the trench (Table 2). ETI's minimum recommended amount of iron in an iron/sand mixture is 20% iron by volume. The granular iron/sand ratio shall be based on dry weights. The following are examples of granular iron/sand ratios for a 2 ft (0.6 m) wide trench:*

**Table 2: Examples of Required Iron Thicknesses and Mixtures**

<b>Excavated Trench Width</b>	<b>Required Iron Thickness</b>	<b>Percent Granular Iron by Volume</b>	<b>Percent Granular Iron by Weight <sup>a</sup></b>	<b>Percent Sand by Weight <sup>a</sup></b>
2.0 ft (0.6 m)	0.4 ft (0.12 m)	20%	27%	73%
	1.0 ft (0.3 m)	50%	60%	40%
	2.0 ft (0.6 m)	100%	100%	0%

a - Based on estimated bulk densities of 150 lbs/ft<sup>3</sup> (0.075 ton/ft<sup>3</sup>; 2,400 kg/m<sup>3</sup>) for the granular iron and 100 lbs/ft<sup>3</sup> (0.050 ton/ft<sup>3</sup>; 1,602 kg/m<sup>3</sup>) for the sand. The actual bulk densities must be verified prior to construction.

6. The weights of sand and granular iron mixed in each batch shall be measured with approved methods and recorded.
7. The sand and granular iron shall be mixed to provide a uniform mixture. The uniformity of the mixture shall be determined with a magnetic granular iron separation test as described in Attachment A. The results of the magnetic separation test must be within \_\_ [2%] or greater of the specified ratio.
8. *[If applicable]* If the granular iron/sand mixing is to occur off site, the mixing contractor must be made aware of granular iron handling and storage issues (i.e. keeping it covered and dry). The granular iron/sand mixture must be stored in a manner similar to the granular iron.
9. The granular iron and sand mixture may be stored prior to installation based on the moisture content of the mixture as specified in Table 3.

**Table 3: Granular Iron –Sand Mixture Storage Times**

<b>Granular Iron-Sand Mixture Moisture Content (Weight Percent)</b>	<b>Granular Iron/Sand Mixture Maximum Recommended Storage Times (hr)</b>
0 to 3	72
3 to 6	48
6 to 9	24
greater than 9	8

10. During transport and handling, care should be taken to minimize vertical drop and vibration of the finished product to prevent separation/segregation.
11. Quality control testing of the mixed sand and granular iron materials shall be conducted on every \_\_\_\_\_ [100 cubic yards; 75 m<sup>3</sup>] of material to verify compliance with the specifications.

**Trench Excavation**

1. The Contractor shall provide sufficient numbers and types of excavating equipment to complete the PRB trench to the final depth and complete the project within the schedule. The equipment is to be in good condition with no hydraulic leaks and have been decontaminated prior to mobilization to the site.
2. The Contractor shall maintain the stability of the trench excavation. The Contractor shall control surcharges from excavation and backfill equipment, soil stockpiles, backfill stockpiles, and any other surcharge loads that may affect trench stability.
3. The following tolerances shall apply to the PRB trench dimensions and construction. The tolerances may vary from the designed values if approved by the Owner’s representative.
  - a. The PRB shall be essentially vertical.
  - b. The PRB shall be measured or surveyed to within \_\_\_\_\_ [6-inches; 15 cm] of the desired elevation.
  - c. The PRB trench shall follow the designed alignment within \_\_\_\_\_ [1-foot; 30 cm] of the designated centerline.
  - d. [If applicable] The PRB shall be keyed in the underlying aquitard to a minimum depth of \_\_\_\_\_ [4 inches; 10 cm].
  - e. Construction will not be permitted when severe weather conditions may compromise the quality of the work.
  - f. [If applicable] Monitoring wells shall be installed to within \_\_\_\_\_ [3-feet; 91 cm] of the designated location.
4. In the event the excavated trench is wider than the design thickness (e.g. partial collapse has occurred), the Contractor may increase the ratio of the sand to granular iron to provide an equivalent granular iron flow-through thickness. The calculation of the granular iron/sand ratio shall be based on the minimum measured trench width in the section of concern. Any change must be approved and be no less than 20% by volume of granular iron. Cost for additional supply and placement of granular iron and sand materials and disposal of excess soil shall be the responsibility of the Contractor.

**Backfilling of Reactive Material**

1. The reactive material is typically placed to the historical high water table.

2. a) If the excavated trench is filled with water, the reactive material shall be placed into the trench via a tremie tube with a minimum diameter of 12-inches (30 cm) or other approved method. The base of the tremie tube shall be maintained a distance of not more than 4-ft (1.2 m) above the top of the placed mixture.  
b) If the excavated trench is dry or only small amount of groundwater is present, the backfilled can be placed by freefall, without using a tremie.
3. The Contractor shall excavate a sufficient length of trench to accommodate the slope of the mixture or provide means of preventing the placed mixture from reaching the excavation face.
4. Water from an approved source may be added to the backfill to assist in placement and/or as a dust control measure.
5. Samples of the granular iron/sand backfill are to be collected from the approximate mid depth of the trench a minimum every [ ] ft/m along the trench. The granular iron fraction is to be determined using the magnetic separation test to verify compliance with the specifications.

#### **Backfilling on Top of Reactive Material**

1. After the trench has been filled with the reactive material, a geotextile may be place on top followed by clean native soil or sand, or depending on the site conditions, perhaps a lower conductivity material may be required.

#### **Construction Quality Control**

##### **Granular Iron**

1. Several samples of the granular iron should be collected during the construction. The production number (bag number) and location of placement in the PRB should be logged.

##### **Sand**

1. Several samples of sand should be collected during the construction. The source of the sand and location of placement in the PRB should be logged.

##### **Granular Iron and Sand Mixture**

1. The percent granular iron on a dry weight basis is to be determined with the Magnetic Separation Test as described in Attachment A. The testing should be completed on representative samples collected from the mixing device. The frequency of testing will depend on the potential variability of the mixing method. Typically more testing is completed in the early stages of the mixing and this frequency is reduced if the results are adequate. The percent granular iron must meet a minimum percent specified on a dry weight basis for the project.
2. Where the granular iron and sand is mixed in a batch process, the percent granular iron can be determined on a bulk basis. The mass of sand is to be determined by an approved method such as a truck scale, portable scale or bucket scale. The mass of wet sand must be corrected for moisture content, either with the moisture content determined with the

magnetic separation test of a moisture content test on the sand. This provides assurance that the correct tonnage of granular iron is emplaced.

3. The granular iron sand mixture shall not be stored for periods greater than specified in Table 3.

### **Trenching and Backfilling**

1. Where the confining unit is bedrock, the bottom of the trench shall be verified by scraping the competent bedrock with the excavator bucket in the presence of the Site Owner's representative. Where the confining unit is soil, the bottom of the trench shall be verified by visual inspection of material excavated from the confining unit.
2. The final depth of the trench should be measured a minimum every 10 feet (3 m) along the length of the trench. The depth shall be measured on each side and the middle of the trench and referenced to a benchmark.
3. The mass of granular iron emplaced in the trench shall be recorded. The mass of granular iron emplaced shall be checked against the design mass on as short a trench section as possible (e.g. each panel or defined section, as it is difficult to determine the volume of backfill when a section is not completely filled).
4. Samples of the granular iron/sand backfill are to be collected from the approximate mid depth of the trench a minimum every [ ] ft/m along the trench. The granular iron fraction is to be determined using the magnetic separation test to verify compliance with the specifications.

### **Health and Safety**

1. The Contractor should ensure adequate protection for all on-site personnel and prepare and implement a complete site-specific Health and Safety Plan in accordance with all applicable federal, state, and local regulations. The plan should cover the Contractor, subcontractors, and visitors while on the site.
2. The granular iron material is a dust nuisance and adequate personal protective equipment should be worn at all times while handling or being in close proximity to granular iron material. MSDS data sheets are available from the manufacturer.
3. The contractor should be made aware that mixing of granular iron and sand might cause the temperature of the mixture to increase by several tens of degrees due to friction of the granular particles and oxidation of the granular iron.

### **Attachment A - Magnetic Separation Testing Procedure**

*[Note: The Contractor or Site Owner's Representative, or both may complete this test.]*

1. Weigh the empty containers that the samples will be collected in.
2. Samples (about 250 to 1,000 g) of the iron-sand mixture are collected from the discharge of the mixing device (e.g. shoot of a concrete mixer) and/or from the backfilled material with excavation. The frequency and location of samples is dependent on the objectives of each project.

3. Weigh the sample (empty container and sample) and record the weight. Determine the net weight of the sample by subtracting the empty sample container weight. A suitable weighing device must be used.
4. Dry the sample. If cemented together during drying, lightly breakup, weigh and record the net weight.
5. Spread the sample out in a suitable container (e.g. bowl, pan, cardboard box, etc.).
6. Cover the magnet in a material (such as a plastic bag) to allow the magnetic material to be easily separated from the magnet.
7. Pass the magnet over the sample to remove the magnetic fraction. Care must be taken to minimize the trapping sand particles within the iron grains. The magnetic fraction is removed from the magnet and placed in a container.
8. Continue passing the magnet over the material until no more magnetic material is removed. Mixing of the non-magnetic fraction between passes may be required to obtain all the magnetic particles.
9. The magnetic fraction may contain some non-magnetic (sand) particles. Repeat Steps 5 to 8 should at least three more times to ensure the magnetic and non-magnetic fractions are completely separated. After each separation, the non-magnetic fraction should be added to the non-magnetic fraction from the previous separation.
10. Weight the magnetic and non-magnetic fractions are and weights recorded. The total net weight of the magnetic and non-magnetic fractions should be the same as the weight prior to separation.
11. The dry iron net weight percent is determined by:

$$\text{Dry Iron Net Weight Percent} = \frac{\text{Net Weight of Magnetic Material}}{\text{Total Net Weight of Dry Sample}} \times 100$$

Estimated time to complete the magnetic separation test is about 15 to 25 minutes, depending on how moist the iron/sand sample is.

### **Equipment Required for Magnetic Separation Testing**

1. Sample containers
2. Balance/Scale (battery powered scale if electrical outlet is not available; approximately 500 grams required)
3. Hot plate, if electrical outlet available (or propane camping stove)
4. Frying pan (8 in or 10 in)
5. Large spoon (metal is better than plastic)
6. Disposable aluminum cookie sheet
7. Magnet
8. Ziplock bags
9. Sharpie Pen
10. Worksheets/Log Book

---

## Monitoring of Iron Permeable Reactive Barriers

---

Monitoring of a granular iron permeable reactive barrier (PRB) is typically completed by installing groundwater monitoring wells, collecting and analyzing groundwater samples from these wells. This technical note provides general guidelines for developing a monitoring well network, plan, and monitoring schedule based on site-specific objectives for groundwater remediation. There are many site-specific factors that need to be considered when developing a monitoring plan for a PRB and this technical note only provides a general guideline. Other available references or guidelines are provided by EPA (1998), Battelle (1999) and ITRC (1999).

### Monitoring Well Network

Where the groundwater plume at the site is delineated and monitored over distinct depth intervals or zones, it is recommended that the PRB monitoring network follow the same pattern. The discussion in this technical note assumes only one zone hydrogeological unit and would be repeated for each significant hydrogeological unit

### Continuous PRB

Transects of monitoring wells should be placed along the groundwater flow path, upgradient, within and downgradient of the PRB. The number of transects depend on site-specific objectives but transects are typically placed approximately every 100 ft (30 m) along the alignment or a minimum of three transects across the PRB. The upgradient well should be placed about 5 to 10 ft (1.5 to 3 m) upgradient and the downgradient well about 5 to 10 ft (1.5 to 3 m) downgradient. For hanging PRBs (not keyed into a confining unit), wells may be placed below the PRB on the upgradient or downgradient side to monitor for plume by-pass beneath the PRB.

If possible one or more monitoring wells should be placed within the PRB either during installation or after. The flow-through thickness of the PRB may dictate how many wells can physically be placed in the PRB. If only one well is placed in the PRB in each transect, this well should be placed as close to the downgradient side of the PRB as possible, typically about 6-inches (15 cm) from the downgradient side in excavation based construction. Wells placed in the upgradient portion of the PRB are useful for monitoring the long-term performance of the PRB as they will provide an early warning if conditions (e.g. permeability, reactivity) are changing within the PRB and allow time for corrective measures to be completed if required.

Monitoring wells are placed at each end of the PRB to monitor for plume capture. If possible, these side gradient wells should be installed and sampled prior to PRB construction, to confirm they are indeed clean prior to PRB installation.

### **Funnel and Gate**

Transects of monitoring wells should be placed along the groundwater flow path, upgradient, within and downgradient of the gate. Typically, only one transect per gate is installed unless the gate is relatively long (e.g. more than 50 ft; 15 m). The upgradient well should be placed about 5 to 10 ft (1.5 to 3 m) upgradient and the downgradient of the gate well about 5 to 10 ft (1.5 to 3 m) downgradient.

One or more monitoring wells should be placed within the gate. The flow-through thickness of the gate may dictate how many wells can physically be placed in the gate. If only one well is placed in the gate in each transect, this well should be placed close to the downgradient side of the PRB, typically about 6-inches (15 cm) from the downgradient side. Wells placed in the upgradient portion of the gate are useful for monitoring the long-term performance of the gate as they will provide an early warning if conditions (e.g. permeability, reactivity) are changing within the gate and allow time for corrective measures to be completed if required.

Monitoring wells are placed on the upgradient and downgradient side of each funnel section to monitor the head differential across the funnel sections. Monitoring wells are also placed at each end of the funnel and gate system to monitor for plume capture.

### **Installation of Monitoring Wells**

Monitoring wells outside of the PRB can be installed with conventional techniques.

Wells within the PRB can be placed during construction with certain PRB construction techniques. If wells are installed during backfilling, care must be taken to ensure that the wells are not displaced as backfilling proceeds. For example, potential problems may occur if the well gets pushed against the wall of the excavation. Samples collected from the well will not be representative of groundwater in the PRB. Stiffer well materials (e.g. heavier schedule PVC or stainless steel) or frames may be required to maintain the position of the wells during backfilling. Typically, the wells are 2-inches (5 cm) in diameter.

Wells can be placed within the PRB after backfilling using conventional drilling techniques. It is important to know with relative certainty that the well screens are within the iron and have not been placed against or within the adjacent aquifer material. This typically is more of a concern for deeper well installations. In other words, measuring the plumbness (verticality) of the well is critical. A few degrees of deviation from vertical can result in several inches of horizontal deviation of the well screen at depth. If reactive material is displaced during well installation (e.g. hollow-stem augering) then the well annulus should be backfilled with the reactive mixture.

## Groundwater Sample Collection and Analysis Plan

Sampling of wells close to or within the PRB requires special considerations in order to obtain representative samples. Purging and sampling large volumes of groundwater may result in groundwater from outside the PRB (i.e. the aquifer) being collected resulting in a non-representative sample. There are no set guidelines on the amount or rate at which groundwater should be purged or sampled. This must be determined on a case-by-case basis considering the thickness of the PRB, location of wells, groundwater flow velocity, and well configuration. Typically low flow sampling procedures have been utilized. Recently at some sites, diffusive bag samplers (Vroblesky and Hyde, 1997) have been used to collect samples for VOC analysis.

Standard sampling procedures can be used for wells installed in the aquifer upgradient and downgradient of the PRB, provided the purging and sampling will not influence groundwater flow through the PRB.

It is important to consider the fact that most PRBs are placed across an existing plume, not at the front edge of the plume. For this reason, monitoring wells placed in the aquifer downgradient of the PRB will continue to exhibit VOC concentrations for some time following PRB installation due to the time required to flush the downgradient aquifer and desorption of VOCs from the aquifer solids with treated groundwater from the PRB. This condition must be accounted for in the development of a monitoring plan for the PRB.

Monitoring the potential change in hydraulic performance of a PRB can be accomplished by measuring water levels in the vicinity of the PRB and by completing hydraulic testing on wells within the PRB. Water levels are used to compute hydraulic gradients, which after accounting for seasonal variations, can be used to monitor potential changes in the hydraulic conductivity of a PRB. Water levels can also be used to develop potentiometric maps to assess potential changes in flow through or adjacent to a PRB. Typically, slug tests are completed as it is the change in hydraulic conductivity over time that is typically of interest.

We note that coring and analysis of core material is not usually completed as part of a routine monitoring program.

If the PRB is to be located near a surface water body, it may be prudent to map any groundwater discharge points (seeps) and associated staining prior to PRB construction. These data may be useful to refute any subsequent perception of PRB effluent (i.e., iron in the effluent groundwater) causing staining at the point of discharge.

Table 1, lists the recommended parameters, monitoring frequency, and monitoring location for a groundwater monitoring program. This table is meant to be a guide and should be modified to suit site-specific needs.

**References:**

Battelle Inc., 2000. Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation. Battelle Inc., March, USAF – AFRL Report A012.

Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group, 1999. Regulatory Guidance for Permeable Reactive Barriers Designed to Remediate Chlorinated Solvents. 2<sup>nd</sup> Edition, December, [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org).

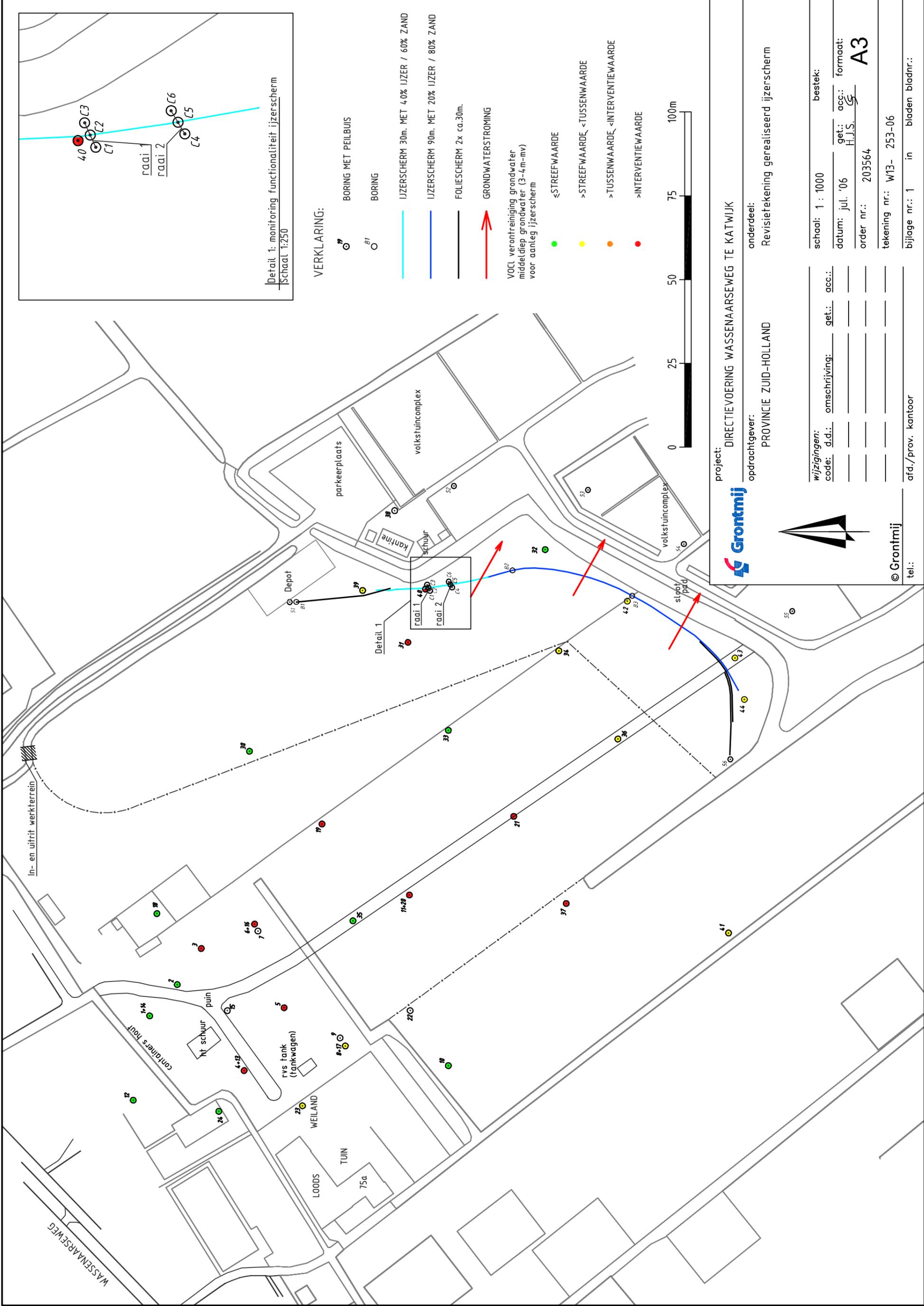
United States Environmental Protection Agency, 1998. Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation. EPA 600/R-98/125, September, [www.clu-in.org](http://www.clu-in.org).

Vroblesky, D.A. and Hyde, H.T., 1997. Diffusion samplers as an inexpensive approach to monitoring VOCs in ground water. Ground Water Monitoring and Remediation, Vol. 17, No. 3, pp. 177-184.

**Table 1: Guide for Monitoring Program**

<b>Parameter</b>	<b>Monitoring Frequency</b>	<b>Monitoring Location</b>
<i>Field Parameters</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Water Level</li> <li>• pH</li> <li>• Groundwater Temperature</li> <li>• Redox Potential</li> <li>• Dissolved Oxygen</li> </ul>	Quarterly for first two years. The frequency may be reduced based on operational stability.	Water level for all wells. Other parameters only for wells that are sampled.
<i>Organic Analytes</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• VOCs (including possible breakdown compounds)</li> </ul>	Quarterly to semi-annually for first two years. The frequency may be reduced based on operational stability.	All wells.
<i>Inorganic Analytes</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcium</li> <li>• Iron, Total</li> <li>• Magnesium</li> <li>• Manganese</li> <li>• Potassium</li> <li>• Silica</li> <li>• Sodium</li> <li>• Alkalinity</li> <li>• Chloride</li> <li>• Nitrate (as N)</li> <li>• Sulphate</li> <li>• Dissolved Organic Carbon</li> <li>• Total Dissolved Solids</li> </ul>	Quarterly to semi-annually for first two years. The frequency may be reduced based on operational stability.	One or two representative transects.
<i>Hydraulic Testing</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Slug tests</li> </ul>	Frequency site specific.	Select monitoring wells within the PRB.

## BIJLAGE 6 ONTWERP IJZERSCHERM



Detail 1: monitoring functionaliteit ijzerscherm  
Schaal 1:250

VERKLARING:

- BORING MET PELBUIJS
- BORING
- IJZERSCHERM 30m. MET 4,0% IJZER / 60% ZAND
- IJZERSCHERM 90m. MET 20% IJZER / 80% ZAND
- FOLIESCHERM 2x ca.30m.
- GRONDWATERSTROMING
- VOCL verontreiniging grondwater middeldiepe grondwater (3-4m-mv) voor aanleg ijzerscherm
- ≤STREEFWAARDE
- >STREEFWAARDE < TUSSENWAARDE
- >TUSSENWAARDE < INTERVENTIEWAARDE
- >INTERVENTIEWAARDE



project: DIRECTIEVOERING WASSENAARSEWEG TE KATWIJK



opdrachtgever: PROVINCIE ZUID-HOLLAND  
onderdeel: Revisietekening gerealiseerd ijzerscherm



© Grontmij  
tel: \_\_\_\_\_

wijzigingen:	code:	d.d.:	omschrijving:	get.:	acc.:	bestek:
						1 : 1000
						datum: jul. '06
						get.: H.J.S.
						acc.:
						formaat: A3
						order nr.: 203564
						tekening nr.: W13- 253-06
						bijlage nr.: 1 in bladen bladnr.:

## BIJLAGE 7 MODELBEREKENINGEN

# Modelberekeningen

## 1 Geohydrologische berekeningen

### 1.1 Inleiding

Ter onderbouwing van de beheersmaatregel zijn geohydrologische berekeningen uitgevoerd, waarmee de grondwaterstroming door het scherm kan worden beschouwd. Om de grondwaterstroming in beeld te brengen is de situatie tweedimensionaal in een dwarsdoorsnede beschouwd. Hiervoor is gebruik gemaakt van het tweedimensionale geohydrologische rekenprogramma SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd., 2001).

### 1.2 Uitgangspunten

De situatie is als volgt geschematiseerd:

- De dwarsdoorsnede is genomen loodrecht op het beoogde scherm in noordwest – zuidoostelijke richting.
- De lengte van de dwarsdoorsnede bedraagt 350 m.
- De diepte van de dwarsdoorsnede bedraagt 54 m. De onderzijde van het model is de onderkant van het eerste watervoerend pakket.
- De celgrootte varieert van 2 x 4 m tot 0,5 x 0,5 m.

Ten aanzien van de bodemopbouw is de volgende schematisatie gehanteerd:

- De ondiepe bodemopbouw is geschematiseerd zoals hiervoor beschreven.
- De siltige klei laag op een diepte van 5,5 tot 6,5 m-mv ontbreekt over een lengte van 90 m (zie figuur 3.14).
- Voor de slecht-doorlatende klei en veen lagen, is uitgegaan van een doorlatendheid van 0,01 m/dag.
- De ondiepe zandlagen in de deklaag hebben een doorlatendheid van 0,5 m/dag gebaseerd op diverse doorlatendheidsmetingen in het veld.
- Het watervoerend pakket heeft een doorlatendheid van 20 m/dag. De bovenste meters hebben een doorlatendheid van 0,5 m/dag zoals gemeten in het veld.

Ten aanzien van de waterhuishouding en grondwaterstanden gelden de volgende uitgangspunten:

- Het stijghoogteverhang in het watervoerend pakket is afgeleid van de grondwaterkaart (TNO, grondwaterkaart 30 West, 1980). Het verhang bedraagt  $4,0 \cdot 10^{-4}$  m/m.
- De stromingsrichting van het grondwater is noordwest – zuidoost en staat loodrecht op het ijzerscherm. Er is sprake van een kwelsituatie.
- Bekend is dat het volkstuintencomplex wordt gedraineerd. Dit is in de simulatie meegenomen middels een vaste stijghoogte van 0,5 m -mv ter plaatse van de volkstuinten.
- Ten aanzien van het verhang in de deklaag is uitgegaan van het gemiddelde van  $2,7 \cdot 10^{-3}$  m/m
- De effectieve voeding bedraagt 0,4 mm/dag.
- De sloot achter het voorgenomen scherm heeft een breedte van 2 m en een diepte van 1 m. Het peil bedraagt 0,5 m -mv.

Ten aanzien van de schematisatie van het ijzerscherm gelden de volgende uitgangspunten:

- Het scherm heeft een breedte van 0,3 m en een diepte van 5,5 m.
- Ten aanzien van het materiaal van het scherm is uitgegaan van een doorlatendheid van 20 m/dag.

De schematisatie is afgebeeld in figuur 1.1.

### 1.3 Resultaten

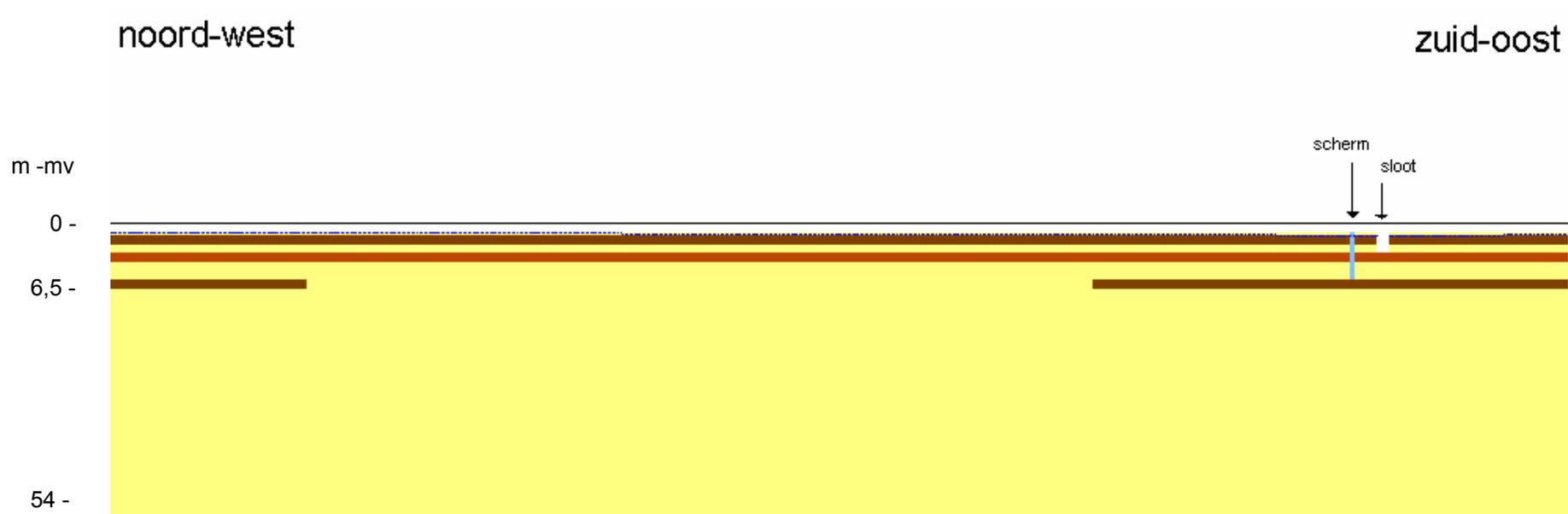
Met het stromingsmodel is de geohydrologische situatie gemodelleerd zoals beschreven in de vorige paragraaf. Figuur 1.2 toont de resultaten van het stromingsmodel.

In figuur 1.3 zijn met groen de stroombanen getekend. Uit de stroombanen is af te leiden dat in het noordwesten het water infiltreert en dat het geïnfiltreerde water richting de sloot opkwelt. Omdat de locatie van het ijzerscherm is voorgenomen ten noordwesten van de sloot, stroomt meer dan 90% van het grondwater door het ijzerscherm voordat het wordt afgevoerd door de sloot.

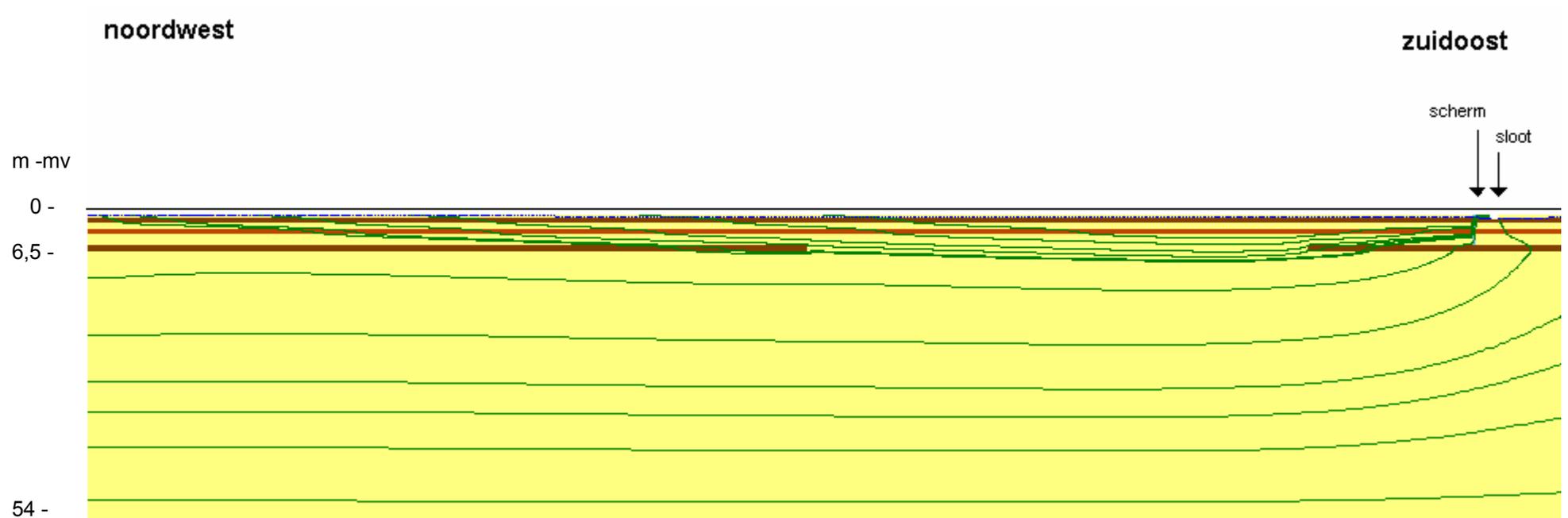
Uit de berekeningen blijkt dat de drainerende werking van de sloot (en eventueel andere ontwateringsmiddelen) van groot belang zijn voor een goede werking van het scherm.

#### **1.4 Conclusie**

Uit de geohydrologische berekeningen blijkt dat hydrologische gezien de toepasbaarheid van het ijzerscherm goed mogelijk is. Er is geen gevaar voor een onderstroom van verontreiniging via het eerste watervoerend pakket.



***Figuur 1.1 Modelschematisatie***



*Figuur 1.2 Stroombanen in noordwest – zuidoostelijke richting.*

## 2 Stoftransportberekeningen

### 2.1 Inleiding

Om inzicht te krijgen in de werking van het ijzerscherm op de CIS-verontreiniging is een stoftransportberekening uitgevoerd. De berekening is uitgevoerd met het programma Ctran/w. Dit is een tweedimensionaal programma waarbij de grondwaterstromings-berekening van Seep/w de basis invoer is. In onderstaande paragrafen is aangegeven welke randvoorwaarden zijn ingevoerd in het model en hoe de pluim zich verplaatst over een periode van 30 jaar.

### 2.2 Randvoorwaarden

#### *Type stoftransport*

De volgende transportprocessen zijn van belang voor de verplaatsing van stoffen in de bodem.

- **Convectie:** Convectief transport is de verplaatsing van opgeloste stof met het stromende grondwater. Convectie is in de meeste gevallen het belangrijkste transportmechanisme (Koopmans, 1994).
- **Diffusie:** Diffusie wordt veroorzaakt door de Brownse beweging van moleculen (S.E.A.T.M. van der Zee, 1991). De drijvende kracht voor de diffuse is de gradiënt van de concentratie. Hierdoor kan ook in niet stromend (grond)water stoftransport plaatsvinden. In dit geval is het effect van diffusie verwaarloosbaar ten opzichte van het effect van de andere processen.
- **Dispersie:** Dispersie betekent letterlijk 'menging'. In het geval van stoftransport door de grond kan deze menging veroorzaakt worden door een drietal processen op microschaal (Bear, 1979):
  1. verschil in poriëndiameter;
  2. de verschillende afmetingen en richting van de poriën;
  3. het nauwer en wijder worden van poriën.
- **Sorptie:** Onder sorptie wordt verstaan: 'de uitwisseling van stofdeeltjes tussen de vloeibare en de vaste fase'. Hierbij wordt de binding van voorheen opgeloste moleculen of ionen aan de vaste fase adsorptie genoemd. Onder desorptie wordt het vrijkomen van voorheen gebonden moleculen of ionen verstaan.
- **Afbraak:** Afbraak is het verdwijnen van een bepaalde stof uit het systeem chemisch dan wel biologisch. Zo zijn bodemorganismen bijvoorbeeld in staat om organische verbindingen af te breken.

In dit stoftransportmodel zijn de processen van dispersie, adsorptie en afbraak gemodelleerd.

#### *Grondwaterstroming*

Voor de grondwaterstroming is uitgegaan van de Seep/w berekening zoals aangegeven in de paragraaf hiervoor.

#### *Modelinvoer*

Voor de verschillende stoftransportprocessen zijn de volgende invoerwaarden gehanteerd.

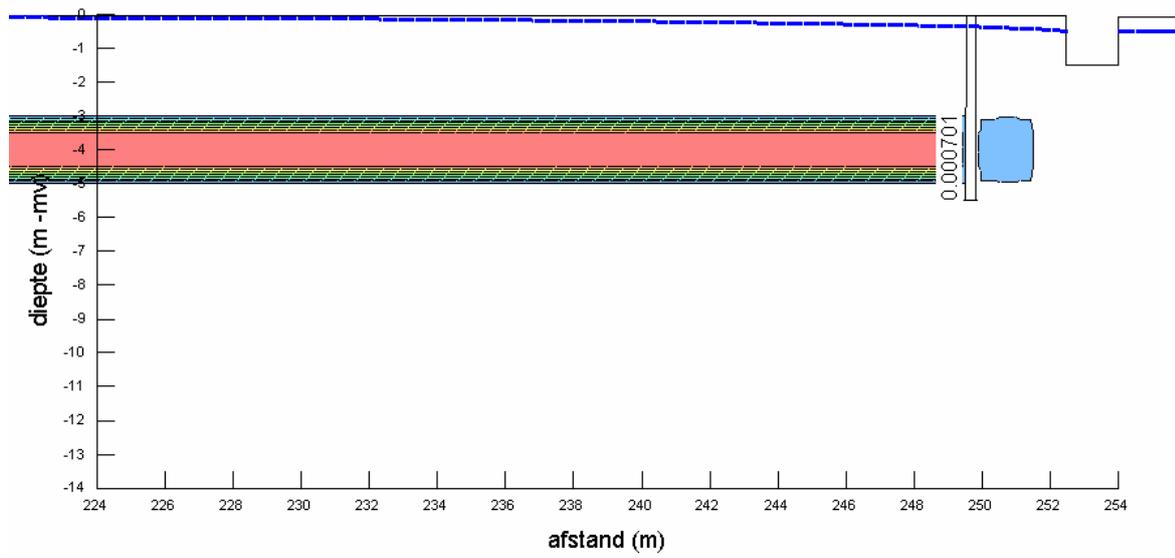
- **Tijdstappen:** 30 tijdstappen van 1 jaar;
- **Longitudinale dispersie:** volgens vuistregel (Appelo): 1/10 van de lengte van de verontreinigingpluim (in m);  
(10 m voor zand, 0,1 m voor klei en veen);
- **Transversale dispersie:** volgens vuistregel (Appelo):  
1/10 van de longitudinale dispersie (in m);  
(1,0 m voor zand, 0,01 m voor klei en veen);
- **Halfwaardetijd CIS:** 2,15 voor ijzerscherm met 20 % ijzer (in dagen)  
gebaseerd op 10,4 uur voor 100 % ijzer uit de kolomtest ( $2,15 = 10,4/24 \cdot 5$ );
- **Bulkdichtheid:** 1700 voor zand, 1500 voor veen (in  $\text{kg/m}^3$ );
- **Adsorptie:**  $K_d = 0,0018$  (in  $\text{m}^3/\text{kg}$ ) voor zand;  
 $K_d = 0,0054$  (in  $\text{m}^3/\text{kg}$ ) voor klei en veen;
- **Randvoorwaarden:** ter plaatse van de sloot is een 'open' grens aangegeven.  
Dit houdt in dat de eventueel verhoogde concentraties uit het model kunnen stromen.

### *Startconcentraties*

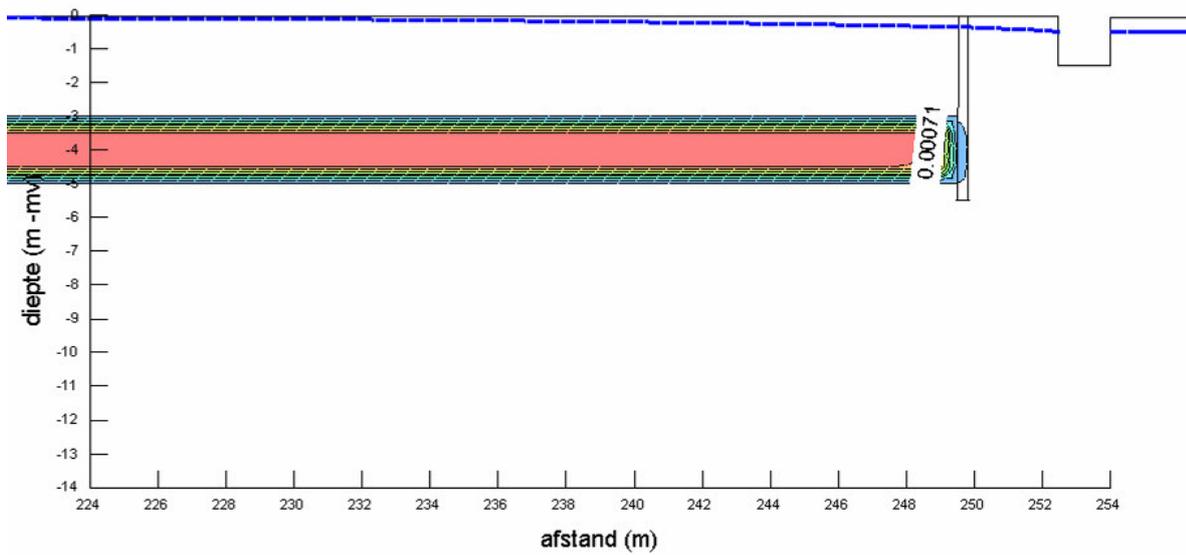
De startconcentratie zijn vastgesteld op basis van de gemiddelde verontreinigingen aangetroffen in het veld. De startconcentratie CIS heeft een maximum van 717 µg/l gebaseerd op peilbuis 40-2 nabij beoogd ijzerscherm. In het model zijn de initiële concentraties ingevoerd als kg/m<sup>3</sup> (ofwel g/l). De achtergrondconcentraties zijn vastgezet op 0 µg/l. In figuur 2.1 zijn de startconcentraties weergegeven.

### **2.3 Resultaten**

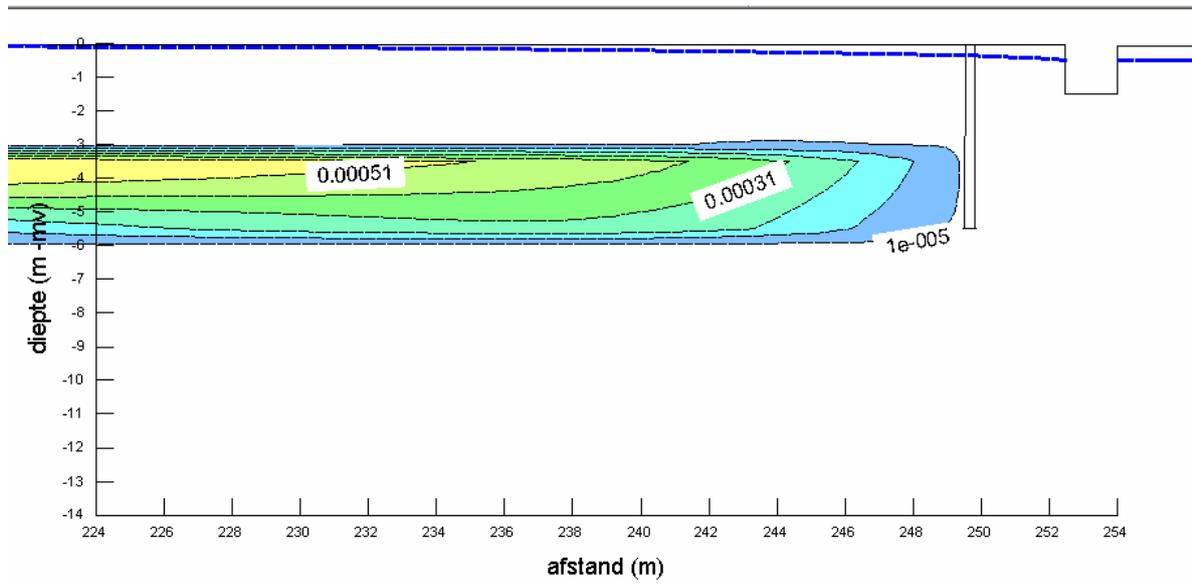
In figuur 2.2 tot en met 2.6 zijn de concentratiecontouren na 1, 5, 10, 20 en 30 jaar weergegeven. De buitengrens van de pluim is aangegeven voor een concentratie van 10 µg/l, dit is de toetsingswaarde voor CIS. Uit de berekeningen volgt dat de pluim zich verbreedt tot aan het ijzerscherm. Door de versnelde afbraak van CIS in dit scherm zal de pluim zich horizontaal niet verder verplaatsen.



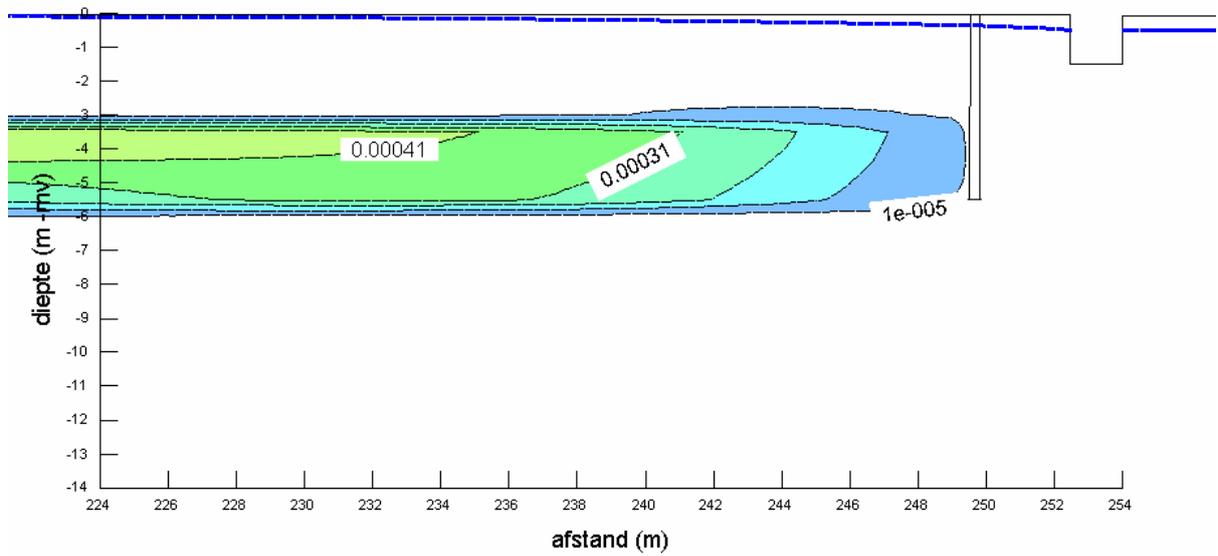
**Figuur 2.1** *Startconcentraties*



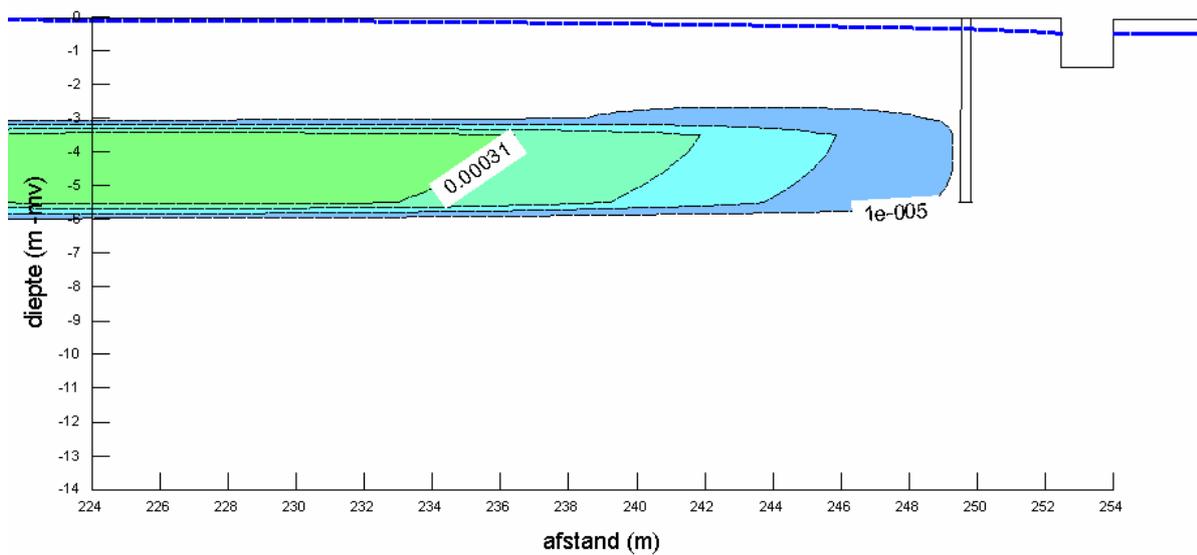
**Figuur 2.2** *Pluim na 1 jaar*



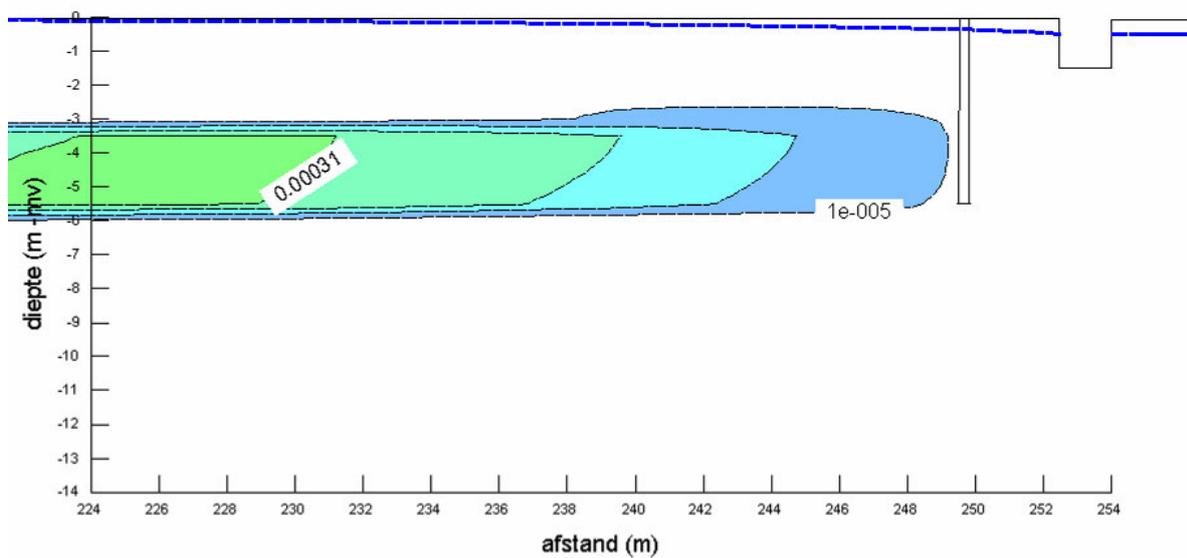
**Figuur 2.3** *Pluim na 5 jaar*



**Figuur 2.4** *Pluim na 10 jaar*



**Figuur 2.5** *Pluim na 20 jaar*



**Figuur 2.6** *Pluim na 30 jaar*

### **3 Vertaling modelberekeningen naar monitoring**

Uit de geohydrologische berekeningen volgt dat het grondwater relatief langzaam stroomt met een gemiddelde snelheid van 1,6 m/jaar. Naar verwachting zal het daarom meer dan een jaar duren voordat de werking achter het scherm zichtbaar wordt. In het scherm en op zeer korte afstand van het scherm zal de werking van het reactieve ijzer op korte termijn makkelijker aan te tonen zijn. De stoftransportberekeningen geven aan dat de VOCl-pluim tijdens de komende 30 jaar wordt tegen gehouden door het ijzerscherm. De afbraakcoëfficiënt van CIS en VC uit de kolomtest blijkt ook in de modelberekeningen voldoende hoog om een snelle afbraak van VOCl in het ijzerscherm mogelijk te maken.

## **BIJLAGE 8 GEGEVENS IJZERGRANULAAT EN DRAINZAND**

**GMM**

Gotthart Maier Metallpulver GmbH  
Gewerbestr. 5  
D-79618 Rheinfelden

Tel.: +49 (0)7623 - 4132  
Fax.: +49 (0)7623 - 40 90 2

---

## TECHNICAL DATA SHEET

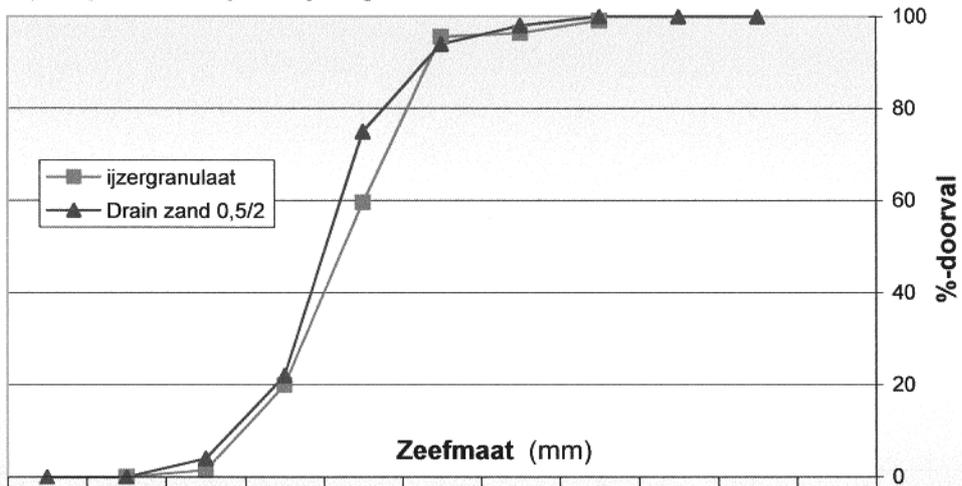
Product: Cast Iron Grit  
Type: FG 0300/2000/.

Granulometrie nominal: 300 µm to 2000 µm  
Colour / Shape : gray-black powder, needle  
shaped particles

Density: 6,7 - 7,2 kg/l  
Apparent Density: 2,5 - 3 kg/l

Chemical Analysis: C 2,8 - 3,2 %  
(typical) Si: 1,8 - 2,1 %  
P: 0,04 - 0,4 %  
Cr: 0,05 - 0,4 %  
Ni: 0,05 - 0,3 %  
Al: 0,01 - 0,1 %  
Fe: 92 % typical

Vergelijking zeefanalyses ijzergranulaat en drainzand



	0,06	0,18	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8
■ ijzergranulaat	0,1	1,5	20	59,6	95,6	96,4	99,1		
▲ Drain zand 0,5/2	0	0	4	22	75	94	98	100	100

**kwartzsand 0/2**  
 conform NEN-EN 12620 voor toepassing in beton  
 conform NEN-EN 13043 voor toepassing in asfalt  
 conform NEN-EN 13139 voor toepassing in mortel  
 conform NEN-EN 13242 voor toepassing in ongebonden en hydraulisch gebonden materialen

**Hogebroek**

Zandbedrijf Hogebroek  
 V.O.F.  
 Postbus 38  
 8100 AA Raalte



zeef volgens ISO 565:1990 R 20	grenswaarden voor doorval			90% van de bepalingen voldoen aan onderstaande grenswaarden voor de doorval
	algemeen	gemiddelde	grens t.o.v. gemiddelde	
4	100	100		100
2,8	95-100			96 - 99
2	85 - 99	91	86 - 96	86 - 98
1		90	70 - 96	53 - 70
0,25		10	0 - 35	4 - 16
0,063		0,2	0 - 5	0,0 - 0,5

12620	13043	13139	13242		12620	13043	13139	13242
4.3	4.1.3		4.3	categorie	G <sub>F</sub> 85	G <sub>F</sub> 85		G <sub>F</sub> 85
4.6	4.1.4	5.5.1	4.6	hoeveelheid fijne deeltjes < 63 µm	f <sub>3</sub>	f <sub>3</sub>	Cat. 1	f <sub>3</sub>
		5.5.2	4.7	kwiteit fijne deeltjes			voldoet	Voldoet
5.5	4.2.7.1	6.2.1	5.4	dichtheid	2,63 kg/m <sup>3</sup>	2,63 kg/m <sup>3</sup>	2,63 kg/m <sup>3</sup>	2,63 kg/m <sup>3</sup>
5.5	4.2.7.2	6.2.2	5.5	waterabsorptie	Npd	Npd	Npd	Npd
5.7.2				volumestabiliteit	voldoet			
5.7.3				ASR gevoeligheid	niet gevoelig			
6.2		7.2		chloridengehalte	< 0,02 %		< 0,02 %	
6.3.1		7.3.1	6.2	in zuur oplosbaar sulfaat	AS <sub>0,2</sub>		AS <sub>0,2</sub>	AS <sub>0,2</sub>
6.3.2		7.3.2	6.3	totaal zwavelgehalte	voldoet		voldoet	
6.4.1		7.4	6.4.1	bindings- en verhardingsvertraging	voldoet		voldoet	voldoet
6.5		5.4.2		carbonaatgehalte/schelpgehalte vrijkomende gevaarlijke bestanddelen	< 0,5 % schone grond	schone grond	schone grond	schone grond

**EG conformiteitsverklaring**

Ondergetekende, verklaart op grond van artikel 9 van de Richtlijn Bouwproducten (89/106/EEG) namens Zandbedrijf Hogebroek V.O.F., gevestigd: Hogebroeksweg 6 te Raalte dat het in dit product specificatieblad genoemde product afkomstig van het zandwingsgebied 'Het Hooge Broek' te Raalte, voldoet aan de eisen in NEN-EN 12620; NEN-EN 13043; NEN-EN 13139 en NEN-EN 13242 voor de eigenschappen genoemd in tabel ZA.1a van bijlage ZA van deze normen.

Het FPC systeem is door de certificatie-instelling BMC beoordeeld en het FPC certificaat met nummer: **0956-CPD-0884**

werd per 1 juni 2004 toegekend

Raalte, 1 juni 2004

getekend:

*Reinders*  
 V.J.H. Reinders  
 directeur

Mengverhoudingen ijzer zand

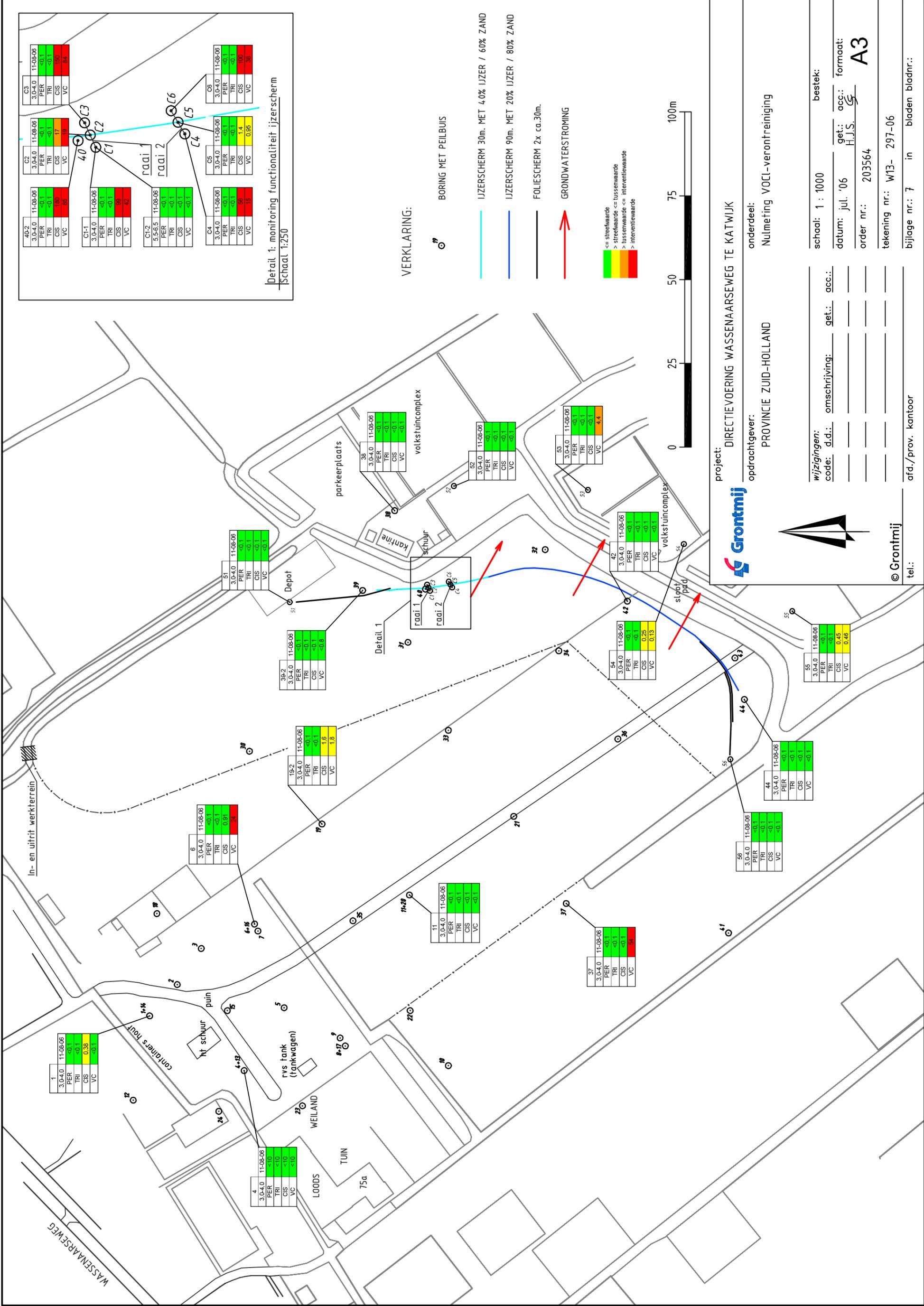
Mengverhoudingen	IJzergranulaat	Soortelijk gewicht
	Zand (0-2, droog)	2,8 kg/l
		1,6 kg/l

40 : 60

20 : 80

Monsternr.	Gewicht na magnetische separatie (kg)	Volume (l)	%	Monsternr.	Gewicht na magnetische separatie (kg)	Volume (l)	%
1	IJzer Zand	3.102,0 2.833,1	1.107,9 1.770,7	6	IJzer Zand	1.429,9 1.869,9	510,7 1.869,9
			38% 62%				21% 79%
2	IJzer Zand	3.245,7 2.673,5	1.159,2 1.670,9	7	IJzer Zand	1.465,1 3.056,1	523,3 1.910,1
			41% 59%				22% 78%
3	IJzer Zand	2.971,9 2.172,0	1.061,4 1.357,5	8	IJzer Zand	1.598,8 3.194,7	571,0 1.996,7
			44% 56%				22% 78%
4	IJzer Zand	3.136,1 2.326,6	1.120,0 1.454,1	9	IJzer Zand	1.507,8 2.991,0	538,5 1.869,4
			44% 56%				22% 78%
5	IJzer Zand	3.097,7 2.182,3	1.106,3 1.363,9	10	IJzer Zand	1.489,1 2.926,1	531,8 1.828,8
			45% 55%				23% 77%
<b>ijzer gemiddeld zand gemiddeld</b>				<b>ijzer gemiddeld zand gemiddeld</b>			
<b>42% 58%</b>				<b>22% 78%</b>			
<b>Check na aankomst in Katwijk</b>							
11	IJzer Zand	3224,2 2502,7	1151,5 1564,2	12	IJzer Zand	1623,9 3211,7	580,0 2007,3
			42% 58%				22% 78%

## **BIJLAGE 9 NULMETING VOCL-VERONTREINIGING**



Detail 1: monitoring functionaliteit ijzerscherm  
Schaal 1:250

40-2	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	180			CIS	150
			VC	85			VC	84

C1-1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	59			CIS	100
			VC	42			VC	38

C1-2	11-08-06	5.5-6.5	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	<-0.1			CIS	1.4
			VC	<-0.1			VC	0.85

C4	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	56			CIS	100
			VC	15			VC	38

VERKLARING:

- BORING MET PEILBUIS
- IJZERSCHERM 30m. MET 4.0% IJZER / 60% ZAND
- IJZERSCHERM 90m. MET 20% IJZER / 80% ZAND
- FOLIESCHERM 2x ca.30m.
- GRONDWATERSTROMING

<=	streefwaarde
>	streefwaarde <= tussenwaarde
>	tussenwaarde <= interventiewaarde
>	interventiewaarde



project: DIRECTIEVOERING WASSENAARSEWEG TE KATWIJK

opdrachtgever: Provincie Zuid-Holland  
onderdeel: Nulmeting VOCL-verontreiniging



wijzigingen: \_\_\_\_\_  
code: d.d.: \_\_\_\_\_ omschrijving: \_\_\_\_\_ get.: \_\_\_\_\_ acc.: \_\_\_\_\_  
bestek: 1 : 1000  
datum: jul. '06 \_\_\_\_\_ get.: \_\_\_\_\_ acc.: \_\_\_\_\_ format: A3  
order nr.: 203564  
tekening nr.: W13- 297-06  
bijlage nr.: 7 in \_\_\_\_\_ bladen bladnr.: \_\_\_\_\_

© Grontmij  
tel.: \_\_\_\_\_

1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	0.38			CIS	1.4
			VC	<-0.1			VC	<-0.1

6	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	0.91			CIS	1.6
			VC	24			VC	1.8

19-2	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	1.6			CIS	1.8
			VC	1.8			VC	1.8

11	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	<-0.1			CIS	<-0.1
			VC	<-0.1			VC	<-0.1

37	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	<-0.1			CIS	54
			VC	54			VC	54

58	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	<-0.1			CIS	<-0.1
			VC	<-0.1			VC	<-0.1

44	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	0.45			CIS	0.46
			VC	0.46			VC	0.46

55	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	0.45			CIS	0.46
			VC	0.46			VC	0.46

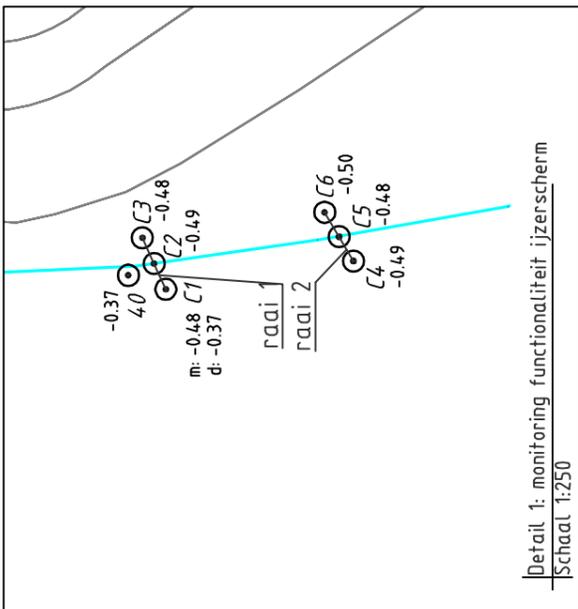
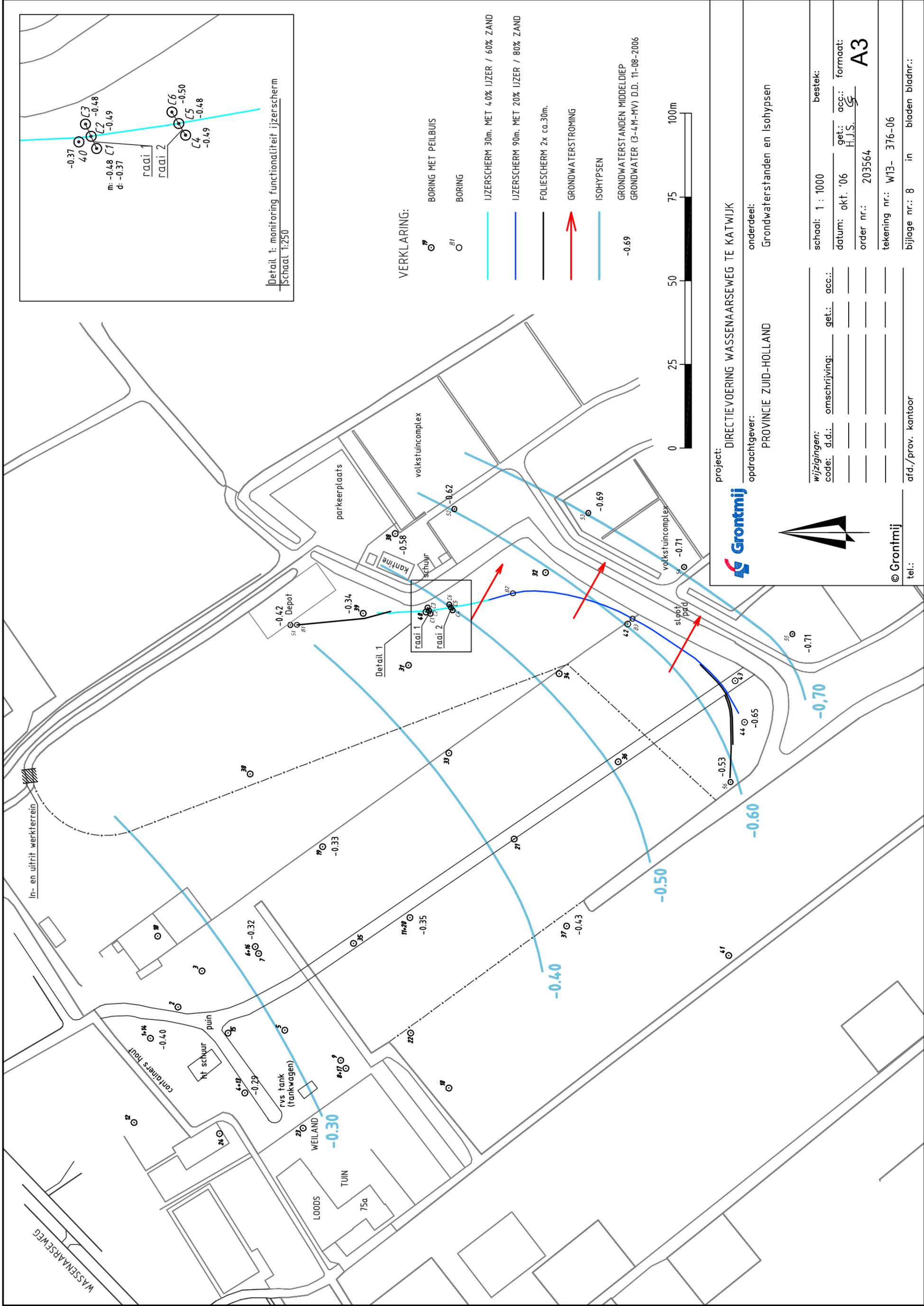
52	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	<-0.1			CIS	<-0.1
			VC	<-0.1			VC	4.4

42	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	0.25			CIS	0.13
			VC	0.13			VC	<-0.1

51	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	<-0.1			CIS	<-0.1
			VC	<-0.1			VC	<-0.1

38	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1	11-08-06	3.0-4.0	PER	<-0.1
			TRI	<-0.1			TRI	<-0.1
			CIS	<-0.1			CIS	<-0.1
			VC	<-0.1			VC	<-0.1

## BIJLAGE 10 GRONDWATERSTANDEN EN ISOHYPSEN



Detail 1: monitoring functionaliteit ijzerscherm  
 Schaal 1:250

VERKLARING:

- BORING MET PEILBUIS
- BORING
- IJZERSCHERM 30m. MET 4.0% IJZER / 60% ZAND
- IJZERSCHERM 90m. MET 20% IJZER / 80% ZAND
- FOLIESCHERM 2x ca.30m.
- GRONDWATERSTROMING
- ISOHYPSEN
- 0.69
- GRONDWATERSTANDEN MIDDELDIEP
- GRONDWATER (3-4M-MV) D.D. 11-08-2006



project: **DIRECTIEVOERING WASSENAARSEWEG TE KATWIJK**  
 opdrachtgever: **PROVINCIE ZUID-HOLLAND**  
 onderdeel: **Grondwaterstanden en Isohypsen**

Grontmij logo  
 © Grontmij  
 tel.: \_\_\_\_\_



wijzigingen:	code:	d.d.:	omschrijving:	get.:	acc.:	bestek:
						1 : 1000
						okt. '06
						H.J.S.
						acc.:
						format: <b>A3</b>
						order nr.: 203564
						tekening nr.: W13- 376-06
						bijlage nr.: 8 in bladen bladnr.: