

SKB SV-224

Reactief ijzerscherp

Fase 1: Ontwerp en dimensionering

ir. A.H. van de Velde (The Three Engineers)
ir. K.R. Weytingh (The Three Engineers)
ir. D. Visscher (The Three Engineers)
ing. A. Peene (Heijmans Milieutechniek)

februari 2003

Gouda, SKB

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 op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Reactief ijzerscherp. Fase 1: Ontwerp en dimensionering", februari 2003, 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, "©"Reactive iron barrier. Phase 1: Design and dimensioning", February 2003, 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

Reactief ijzerschermb
 Fase 1: Ontwerp en dimensionering

SKB rapportnummer**Project rapportnummer**

SV-224

Auteur(s)

Ir. A.H. van de Velde
 Ir. K.R. Weytingh
 Ir. D. Visscher
 Ing. A. Peene

Aantal bladzijden

Rapport: 59

Bijlagen: CD-rom

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Heijmans Milieutechniek (A. Peene, 073-5289784)
 The Three Engineers (K.R. Weytingh, 0570-665870)
 GeoDelft (W. van der Zon, 015-2693639)
 CSG Eemkwartier (D. van den Bergh, 033-4225025)
 Gemeente Amersfoort (P. Camps, 033-4694478)
 Provincie Utrecht (G. van Bergen, 030-258315)
 Universiteit Twente (W. Lengton, 053-4892909)

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

In Noord-Amerika worden sinds enige jaren ijzerschermen toegepast. Een permeabel ijzerschermb wordt geïnstalleerd stroomafwaarts van een bronzone met chloorkoolwaterstoffen (CKW). De CKW's in de pluim worden door het nulwaardig ijzer in het scherm gereduceerd tot onschadelijke producten. Een reactief scherm onderscheidt zich vooral door het feit dat het een duurzaam passief systeem is. Voor de toepassing van een reactief ijzerschermb zijn twee basis uitvoeringsvarianten te onderscheiden: als continu scherm of in een funnel and gate configuratie. Beide systemen hebben voor- en nadelen. Het grote nadeel van een continu scherm is dat de dikte van het scherm bepaald wordt door de hoogste concentraties. Een aanzienlijk deel van het scherm zal daardoor overgedimensioneerd zijn. Om deze reden en vanwege de grotere flexibiliteit (stuurbaarheid) en beheersbaarheid wordt in Nederland vooral het funnel and gate systeem als het best toepasbaar gezien.

Ijzerschermen zijn in Nederland nog geen proven technology, sterker nog, implementatie is nog niet van de grond gekomen. Onbekendheid met de materie weerhoudt adviseurs ervan probleembezitters deze oplossing aan te reiken. Doel van het project is de acceptatie van een reactief ijzerschermb als kosteneffectieve saneringsoplossing door middel van de implementatie van een 'fullscale' ijzerschermb op de locatie van een voormalige chemische wasserij in Amersfoort. Op deze locatie is over een grote oppervlakte puur product (Per en Tri) aanwezig op een kleilaag op circa 13 meter diepte. Achter de verontreiniging heeft zich een pluim van enkele honderden meters gevormd. Circa vijf jaar geleden was al besloten om deze bron te isoleren met behulp van een cementbentoniet-schermb. Deze aanpak levert in het kader van de herinrichting echter nogal wat problemen op. Een ijzerschermb lijkt hier de oplossing te kunnen bieden.

Bij het project in Amersfoort is door het consortium aangetoond dat het mogelijk is een bronzone met chloorkoolwaterstoffen op een kosteneffectieve wijze te beheersen d.m.v. een ijzerschermb. Het ijzerschermb wordt gekenmerkt door relatief hoge installatiekosten, gevolgd door zeer lage onderhoudskosten. Zelfs inclusief alle ontwikkelkosten zijn de kosten van het ontworpen ijzerschermb gelijk aan een conventioneel ontwerp (isolatievariant). De verwachting van het consortium is dan ook dat volgende toepassingen aanzienlijk goedkoper zullen zijn dan de conventionele systemen. Het ontwerp is zodanig ingericht dat een aantal onzekerheden ondervangen kunnen worden door procestechnologische bijsturing. En dit alles onder vrij verval, zodat met recht gesproken kan worden over een duurzaam systeem.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

bodemsanering, chloorkoolwaterstoffen, fysisch-chemisch zuiveren, ijzer, reactoren

Vrije trefwoorden:

DNAPL, funnel and gate, ijzerschermb, Permeable Reactive Barrier, PRB

Titel project

Reactief ijzerschermb

Projectleiding

The Three Engineers
 (Ir. K.R. Weytingh, 0570-665870)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Reactive iron barrier
Phase 1: Design and dimensioning

SKB report number**Project report number**

SV-224

Author(s)

Ir. A.H. van de Velde
Ir. K.R. Weytingh
Ir. D. Visscher
Ing. A. Peene

Number of pages

Report: 59

Enclosures: CD-rom

Executive organisation(s) (Consortium)

Heijmans Milieutechniek (A. Peene, 073-5289784)
The Three Engineers (K.R. Weytingh, 0570-665870)
GeoDelft (W. van der Zon, 015-2693639)
CSG Eemkwartier (D. van den Bergh, 033-4225025)
Gemeente Amersfoort (P. Camps, 033-4694478)
Provincie Utrecht (G. van Bergen, 030-258315)
Universiteit Twente (W. Lengton, 053-4892909)

Publisher

SKB, Gouda

Abstract

Since a couple of years permeable reactive iron barriers have been used in Northern America. A permeable reactive iron barrier is installed downstream of the source area polluted with chlorinated hydrocarbons. The contaminant compounds in the plume are reduced to harmless products by the zero-valent iron in the barrier. A reactive barrier can be distinguished by being a lasting passive system. There are two basic ways to apply a permeable reactive iron barrier: as a continuous wall or in a funnel-and-gate configuration. Both systems have advantages as well as disadvantages. Greatest disadvantage of a continuous barrier is that the thickness of the barrier is determined by the highest concentrations. Large part of the barrier is therefore overdimensioned. For this reason and also because of its higher flexibility and controllability the funnel-and-gate system is regarded as best applicable in the Netherlands.

Reactive iron barriers are not yet proven technology in the Netherlands. Barriers haven't yet been implemented in the Netherlands. Unfamiliarity with this phenomenon prevents consultants to propose this solution to clients. Objective of the project is the acceptance of a permeable reactive iron barrier as a cost effective remediation solution by implementing a full scale iron barrier at the site of a former dry-cleaner in the city of Amersfoort. At this site pure products of PCE and TCE can be found over a large area on a clay layer at a depth of approx. 13 meters. Beyond the pollution a contaminant plume has formed of several hundreds of meters. Approximately 5 years ago it was decided to isolate the source by means of a slurry wall. This approach however, is troubling the redevelopment of the area. A permeable iron barrier could be the right solution in this case. The consortium proved in the project in the city of Amersfoort that it is possible to control in a cost effective way a source zone with chlorinated hydrocarbons by means of an iron barrier. Characteristic of an iron barrier are its high initial installing costs, followed by very low maintenance costs. Even when the development costs are included, the costs of the permeable reactive iron barrier equal the costs of a conventional design (cut-off wall). The consortium expects that further applications of this barrier will be considerably cheaper than conventional systems. The design allows process and technical control to overcome uncertainties. All this with natural gradient, which means a truly lasting system.

Keywords**Controlled terms:**

chlorinated hydrocarbons, iron, physico-chemical
remediation, reactors, soil remediation

Uncontrolled terms

DNAPL, funnel and gate, iron
barrier, Permeable Reactive
Barrier, PRB

Project title Projectmanagement

Reactive iron barrier

The Three Engineers
(Ir K.R. Weytingh, +31-570-665870)

This report can be obtained by: SKB, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Netherlands Centre for Soil Quality Management and Knowledge Transfer (SKB)

VOORWOORD

In Amersfoort wordt, in opdracht van CSG (Centraal StadsGebied) Eemkwartier, op een unieke wijze een verontreiniging te lijf gegaan. De traditionele aanpak van de verontreiniging legde grote beperkingen op aan de herinrichting. In opdracht van CSG heeft een team van specialisten een alternatief uitgewerkt. Voor het eerst in Nederland wordt een ijzerschermbuis gebruikt om een niet te verwijderen bodemverontreiniging duurzaam te beheersen. De uitvoering is volledig geïntegreerd met de herinrichting.

Chloorkoolwaterstoffen (CKW's) zijn lastige verontreinigingen die veel voorkomen, o.a. onder oude wasserijen. Geschat wordt dat er in Nederland zo'n 2.700 van dergelijke locaties zijn. Kenmerkend voor CKW's is dat ze zwaarder zijn dan water. Eenmaal in de bodem zakken de stoffen, in de volksmond 'Per' en 'Tri', door het grondwater. Diep in de bodem vormen ze plassen op slecht doorlatende lagen. Gedurende tientallen jaren lossen Per en Tri vervolgens op in het langsstromende grondwater waardoor lange pluimen verontreinigd grondwater ontstaan. Op de CSG-locatie liggen deze plassen tot 13 meter diep en verspreid over honderden vierkante meters. Afgraven van de verontreiniging is simpelweg niet realiseerbaar. Tot voor kort werd een dergelijk gebied met een ondoorlatende (dam)wand afgesloten en werden grote hoeveelheden grondwater onttrokken om er zeker van te zijn dat er geen pluim meer kon ontstaan. Een niet erg milieuvriendelijke methode om een milieuprobleem op te lossen. Bovendien een oplossing die veel beperkingen oplegt aan de herinrichting van de locatie.

Aannemer Heijmans Milieutechniek, samen met de Gemeente Amersfoort eigenaar van CSG, heeft adviesbureau The Three Engineers gevraagd een alternatief te ontwikkelen. Het resultaat, een ijzerschermbuis in de vorm van een funnel and gate, is interessant, maar wel erg nieuw in Nederland. In Amerika worden zo'n 50 locaties op een dergelijke wijze gesaneerd, in Europa wordt nog nauwelijks gebruik gemaakt van dit concept. The Three Engineers, gespecialiseerd in het ontwerpen van complexe bodemsaneringen, is één van de weinige partijen in Nederland met ontwerpervaring met funnel and gates. Bij een funnel and gate wordt verontreinigd grondwater met behulp van een wand (funnel) naar één punt (de 'gate') geleid, waar de verontreiniging in een ondergrondse reactor wordt verwijderd. De natuurlijke grondwaterstroming is de motor van het systeem. Bij een ijzerschermbuis wordt de gate met ijzervijzel gevuld. De CKW's reageren met het ijzer, waarbij het ijzer als het ware verroest en de Per en Tri chemisch worden omgezet in onschadelijke stoffen.

Voor de uitwerking van het ontwerp werd een consortium opgericht waarin Heijmans, The Three Engineers, GeoDelft, Universiteit Twente, de Provincie Utrecht en de Gemeente Amersfoort deelnamen. In de loop van het project is het Belgische VITO een steeds belangrijkere rol gaan spelen. Met de door hen ingebrachte kennis ten aanzien van laboratoriumexperimenten hebben ze als het ware de titel consortiumlid verdiend. Gesubsidieerd door de SKB (Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem) heeft het team anderhalf jaar intensief aan het ontwerp gewerkt en gemodelleerd.

Het resultaat is een wereldprimeur. Een 250 meter lang damwandschermbuis is als een trechter achter de bron aangebracht. Via een ondergrondse leiding wordt het water naar met 180 m³ ijzervijzel gevulde ondergrondse reactoren geleid onder de parkeerplaatsen van de nieuwe brandweerkazerne. Uit onderzoek van de Universiteit Twente en het VITO blijkt dat het ijzer de eerste 100 jaar niet vervangen hoeft te worden. Voor de zekerheid is deze mogelijkheid wel in het ontwerp ingebouwd. Zelfs inclusief ontwikkelkosten zijn de kosten gelijk aan een conventioneel ontwerp. De verwachting van alle partijen is dan ook dat volgende toepassingen aanzienlijk goedkoper zullen zijn dan de conventionele systemen.

Februari 2003

INHOUD

		VOORWOORD	III
		SAMENVATTING	VII
		SUMMARY	XIII
		NOTATIES.....	XIX
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Algemeen	1
	1.2	Probleemschets	1
	1.3	Een praktijkvoorbeeld: CSG Eemkwartier te Amersfoort	3
	1.4	Uitvoering van het project	5
	1.5	Leeswijzer	7
Hoofdstuk	2	REACTIEVE BARRIÈRES	9
	2.1	Algemeen	9
	2.2	Uitvoeringsvormen	9
	2.3	Werkingsmechanisme reactief ijzer	12
	2.4	Stappenplan ontwerp en dimensionering reactief ijzerschermb.....	15
Hoofdstuk	3	ONTWERPEN	17
	3.1	Algemeen	17
	3.2	Inventarisatie gegevens locatie.....	20
	3.3	Aanvullend onderzoek grondwater	23
	3.4	Geohydrologische modellering	24
	3.5	Selectie en toetsing reactief ijzer	27
	3.6	Ontwerpberekeningen gates.....	36
	3.7	Integratie technisch ontwerp en ruimtelijke inrichting.....	40
Hoofdstuk	4	DIMENSIONERING	43
	4.1	Algemeen	43
	4.2	Funnel.....	44
	4.3	Onttrekkingsputten en transportleiding	47
	4.4	Gates	49
Hoofdstuk	5	CONCLUSIES	55
		LITERATUUR	59

Aparte bijlagen op CD-Rom:

Actualisatie-onderzoek ijzerschermb Amersfoort
 Beschrijving ondoorlatende wanden
 Geohydrologische modellering ijzerschermb Amersfoort
 Kolomexperiment ijzerschermb Amersfoort
 Monitoringsplan ijzerschermb Amersfoort

SAMENVATTING

Reactief ijzerscherm

Inleiding

Een groot aantal locaties in Nederland is verontreinigd met DNAPLs (Dense NonAqueous Phase Liquids) zoals de chloorkoolwaterstoffen Per en Tri. Deze locaties worden gekenmerkt door een bronzone (puur product) en een pluim (opgeloste verontreiniging). Volledige verwijdering van de verontreiniging in de bronzone is met de huidige technieken over het algemeen niet mogelijk. Vooralsnog lijkt in veel gevallen beheersing of isolatie van de bronzone in combinatie met de (biologische) aanpak van de pluim de meest kosteneffectieve aanpak. De bestaande beheers- en isolatievarianten (zie figuur S.1, boven) dragen over het algemeen echter weinig bij aan de kosteneffectiviteit. De milieuverdienste is verwaarloosbaar.

In Noord-Amerika worden sinds enige jaren ijzerschermen toegepast. Een permeabel ijzerscherm wordt stroomafwaarts van de bronzone geïnstalleerd. De gechloreerde koolwaterstoffen in de pluim worden door het nulwaardig ijzer in het scherm gereduceerd tot onschadelijke producten. Een reactief scherm onderscheidt zich met name door het feit dat het een passief systeem is waarbij niet gepompt hoeft te worden. Voor de toepassing van een reactief ijzerscherm zijn twee basis uitvoeringsvarianten te onderscheiden: als continu scherm of in een funnel and gate configuratie (zie figuur S.1 beneden). Beide systemen hebben voor- en nadelen. Het grote nadeel van een continu scherm is dat de dikte van het scherm bepaald wordt door de hoogste concentraties. Een aanzienlijk deel van het scherm zal daardoor overgedimensioneerd zijn. Om deze reden en vanwege de grotere flexibiliteit (stuurbaarheid) en beheersbaarheid wordt in Nederland met name het funnel and gate systeem als best toepasbaar gezien. Zo kan bijvoorbeeld indien gewenst in de gate(s) het reactief medium relatief eenvoudig vervangen of geregenereerd worden.

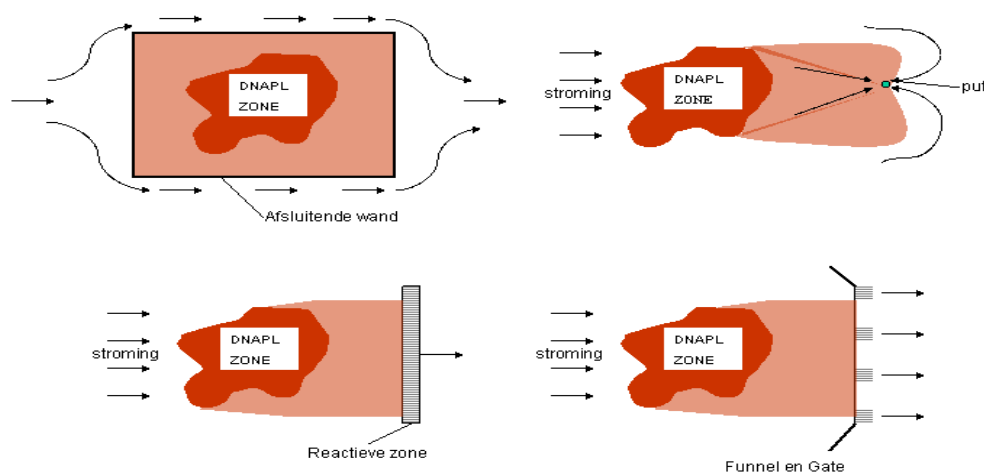


Fig. S.1. Conventionele beheersvarianten en reactieve schermen.

Doelstelling project

Ijzerschermen zijn, in tegenstelling tot Noord-Amerika, nog geen proven technology in Nederland. In Nederland is implementatie nog niet van de grond gekomen. Onbekendheid met de materie weerhoudt adviseurs ervan probleembezitters deze oplossing aan te reiken. Doel van het project is de acceptatie van een reactief ijzerscherm als kosteneffectieve saneringsoplossing bij de CKW-problematiek door middel van de implementatie van een 'fullscale' ijzerscherm op de locatie van een voormalige chemische wasserij in Amersfoort. Op deze locatie is over een grote oppervlakte puur product (Per en Tri) aanwezig op een kleilaag op circa 13

meter diepte. Achter de verontreiniging heeft zich een pluim van enkele honderden meters gevormd. Circa vijf jaar geleden was al besloten om deze bron te isoleren met behulp van een cementbentoniet-scherm. Deze aanpak levert in het kader van de herinrichting echter nogal wat problemen op. Een ijzerscherm lijkt hier de oplossing te kunnen bieden.

Werkingsmechanisme en kinetiek ijzer

Het gebruik van zerovalent ijzer voor de reductieve dehalogenatie van met gechloreerde koolwaterstoffen verontreinigd water, werd uitvoerig bestudeerd aan de Universiteit van Waterloo (Canada). Hoewel er nog heel wat vragen zijn over het exacte werkingsmechanisme is het al wel duidelijk dat gechloreerde koolwaterstoffen onder bepaalde voorwaarden abiotisch gede-chloreerd worden. De dehalogenatie heeft plaats aan de ijzer-water interfase (oppervlakte-reactie). Vele laboratoriumexperimenten hebben aangetoond dat de dehalogenatieve reacties benaderd kunnen worden met een pseudo-eerste orde afbraak kinetiek. Vaak worden echter halfwaardetijden gebruikt om de snelheid van de reactie te beschrijven.

Een halfwaardetijd wordt gedefinieerd als de tijd die nodig is om een bepaalde beginconcentratie aan verontreinigingen te reduceren tot de helft van deze concentratie. De afbraaksnelheid wordt onder andere beïnvloed door het soort ijzer dat gebruikt wordt en de gebruikte hoeveelheid, de temperatuur en de samenstelling van het grondwater. Bepaalde componenten zoals o.a. NO_3^- , CrO_4^{2-} en SO_4^{2-} , evenals zuurstof en water, kunnen bij bepaalde ijzers mogelijk als competitor optreden en het afbraakproces vertragen. Verder kan het ijzer onder invloed van bepaalde componenten geïnactiveerd worden door vorming van niet-geleidende oxidelagen. Een haalbaarheidstest (kolomtest) op laboratoriumschaal met het te saneren grondwater is daarom noodzakelijk ter bepaling van de afbraaksnelheden van de verschillende aanwezige componenten.

Ontwerpen

Het ontwerpen van een Permeable Reactive Barrier (PRB) betekent een systeem bedenken waarmee verontreinigd grondwater door een reactief medium wordt geleid en daarna weer terug in het watersysteem wordt gebracht. Allereerst moet een idee verkregen worden of toepassing van een PRB mogelijk is. Generieke gedachte is het scheiden van bron en pluim met de PRB. Daarnaast moet er een reactief medium zijn dat de verontreiniging die op een locatie aanwezig is, kan wegnemen. Als dat zo is kan rondom dat medium een reactieve barrière worden gebouwd. De toepasbaarheid van een PRB wordt daarbij hoofdzakelijk bepaald door geohydrologie. Het PRB-concept maakt gebruik van de afwisseling tussen slecht en goed doorlatende lagen. Het doel: water móét door (het reactieve deel van) de barrière. Gevaar is daarbij dat het er omheen of onderdoor stroomt. Eronderdoor is te voorkomen door een slecht doorlatende laag als basis te kiezen, eromheen valt te voorkomen door een goede dimensionering van de lengte of breedte of doorlatendheid van de wand. Het ontwerp van een (ijzer)scherm is het combineren van civiel technische kennis, procestechnologie, bodemkunde en geohydrologie. Kortom, niet meer of minder complex dan een "normale" in-situ sanering.

Geohydrologische modellering

De geohydrologische modellering is bij reactieve barrières cruciaal voor een goed ontwerp. Eigenlijk stelt een scherm geen specifieke eisen aan de modellering. Het bijzondere is wellicht de introductie van een 'vreemd' geohydrologisch object: een goed doorlatende reactieve zone, wellicht in combinatie met een funnel of een gate (respectievelijk erg slecht of erg goed doorlatend). De modellering van een scherm is maatwerk. Daar staat tegenover dat het eigenlijk maar één keer per locatie hoeft te worden uitgevoerd. Een goed ontwerp is dermate robuust dat het ongevoelig is voor de meeste wijzigingen in de omgeving. Kenmerk van een funnel and gate is dat de verontreiniging alleen stroomafwaarts wordt afgevangen. De verontreiniging is dus niet geheel omsloten, hetgeen strengere eisen stelt aan de nauwkeurigheid van het geohydrologisch model dat gebruikt wordt bij het ontwerp van het systeem.

De exacte locatie van het scherm in Amersfoort is na veel overleg en het doorrekenen van een groot aantal varianten vastgesteld. Een permanent scherm vraagt namelijk nogal wat van de gebruikers van de locatie. De wand mag, zelfs gedeeltelijk, niet meer worden verwijderd of beschadigd. De wand moet daarom op publiek terrein worden geplaatst en zo min mogelijk kabels en leidingen en kelders kruisen. Daarnaast is bij de modellering veel aandacht besteed aan het minimaliseren van het debiet door het creëren van een “stagnante zone” binnen het scherm. De ligging van het definitieve scherm is weergegeven in figuur S.2. Om al het verontreinigde grondwater uit de bronzone af te vangen wordt 15 m³/dag water onttrokken in de funnel.

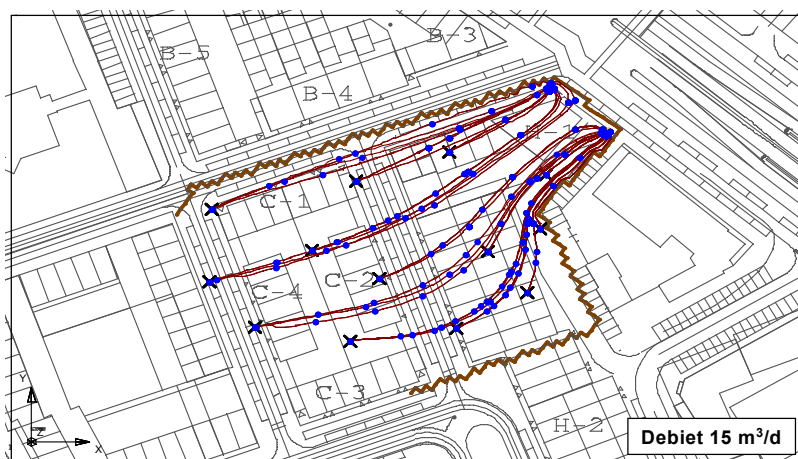


Fig. S.2. Modellering van het scherm.

Selectie ijzer en haalbaarheidsstudie

Op basis van batchexperimenten met een aantal ijzersoorten uit Nederland en Duitsland is besloten de haalbaarheidsstudie uit te voeren met het ijzer “metalpulver” uit Duitsland. Het is één van de meest reactieve ijzers (met een groot specifiek oppervlak) en lijkt, doordat het niet al te fijn is, minder problemen te zullen veroorzaken met betrekking tot verstopping.

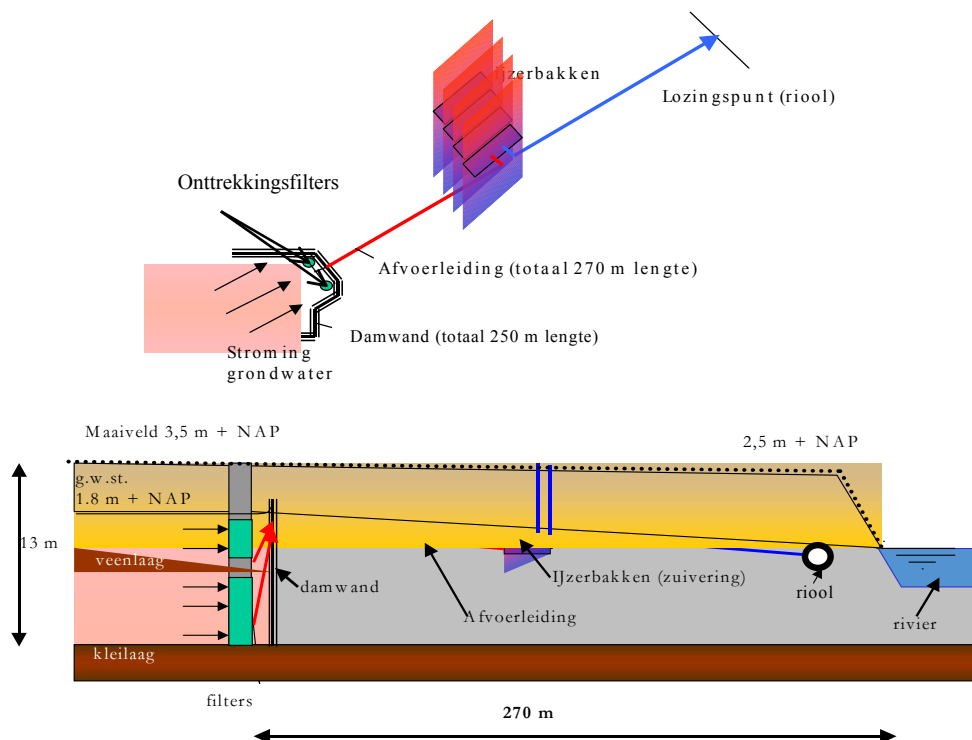
De test werd uitgevoerd in kolommen van plexiglas, volledig gepakt met ijzer (porositeit 0,55). Het kolomexperiment werd opgestart bij 12°C met grondwater uit Amersfoort (2.257 µg/L PCE, 2.072 µg/L TCE, 928 µg/L cDCE en sporen 11DCE, tDCE en VC). In functie van de tijd werd de kolom bemonsterd tot steady state concentratieprofielen verkregen werden. Op de grondwatermonsters zijn VOCl-analyses en redox- en pH-metingen uitgevoerd. Anorganische analyses zijn uitgevoerd op het influent en effluent van de kolommen na 40 poriënvolumes. Op basis van de metingen is vastgesteld dat de chemische samenstelling van het grondwater en de resultaten van de uitgevoerde kolomtest positief zijn voor het gebruik van de reactieve ijzerwanden technologie in Amersfoort. Experimenteel werd vastgesteld dat de belangrijkste VOCl-componenten in het grondwater kunnen worden afgebroken tot onder de gestelde normen (20 µg/L VOCl-totaal) na een contacttijd van een 109-tal uren. De geobserveerde afbraaksnelheden liggen in de lijn van wat in andere kolomexperimenten geobserveerd werd. Minimale hoeveelheden minerale precipitaten zullen waarschijnlijk gevormd worden in de wand, waardoor de reactiviteit en efficiëntie van de wand in de tijd kan afnemen. Er wordt verwacht dat de 'bruikbaarheid van de wand' hierdoor niet met jaren verkort zal worden.

Gates

In het kader van het project zijn een aantal scenarioberekeningen uitgevoerd om inzicht te krijgen in de benodigde hoeveelheden ijzer. Hierbij is uitgegaan van een maximaal debiet (20 m³/dag) en een sterk variërende verontreinigingsgraad van het grondwater (zowel per inlaatfilter als in de tijd). De effluentconcentratie voor VOCl-totaal is in de berekeningen op 20 µg/l gesteld. Voor de dimensionering van de gate is dit een belangrijke parameter. Veranderingen

Het gebruik van ijzer in het systeem kan geoptimaliseerd worden door de configuratie van de influentstromen. Vanuit zuiveringsoogpunt is het mengen van een relatief schone stroom met een relatief sterk verontreinigde stroom nadelig voor de benodigde hoeveelheid ijzer. Het uitgangspunt is dat de meest vervuilde stroom eerst gezuiverd wordt. Daarna wordt de relatief schone stroom bijgemengd. Uit berekeningen blijkt dat vooral bij grote concentratieverschillen de configuratie van het systeem kan bijdragen aan een aanzienlijke besparing van de benodigde hoeveelheid ijzer. Op basis van een worst case verontreinigingssituatie is voor de verdere dimensionering van de gates uitgegaan van een volume ijzer van 180 m³.

Vanwege ruimtegebrek en problemen met aanwezige kabels en leidingen is besloten de gates los te koppelen van de funnel en verder stroomafwaarts te plaatsen (zie figuur S.3). Onder een parkeerplaats is een geschikte locatie gevonden voor de gates, die tevens voldoende groot is om de hoeveelheid ijzer in reactoren onder de grondwaterspiegel aan te brengen. Het verontreinigde water wordt ingevangen tussen de damwanden en wordt afgevoerd via de onttrekkingsputten die daar zijn geplaatst. De filters in deze putten zijn geplaatst ter hoogte van de twee watervoerende pakketten die gescheiden zijn door een veenlaag.



Vanaf deze putten wordt het te zuiveren grondwater via een leidingstelsel afgevoerd naar de zuivering. Deze zuivering bestaat uit een aantal bakken, dat gevuld is met nulwaardig ijzer waarmee de gechloreerde koolwaterstoffen worden omgezet. Vanaf de bakken wordt het gezuiverde water via leidingen getransporteerd naar het lozingspunt.

X

lering nabij de Eem. Het riool heeft ter plaatse een diepe ligging waardoor een potentiaalverschil van 1,5-2,0 meter kan worden gerealiseerd.

Dimensionering

Funnel

Voor de aanleg van de ondoorlatende wand van het ijzerscherp komen op basis van kosten en betrouwbaarheid alleen een stalen damwand en een cement-bentonietwand in aanmerking. Aan de stalen damwand wordt de voorkeur gegeven om de volgende redenen:

- De aansluiting op kelders op de locatie is eenvoudiger te bewerkstelligen. Het waterdicht aansluiten van kelders op cement-bentoniet is op zijn minst moeilijk.
- Doorvoeringen van rioleringen zijn eenvoudiger te realiseren.
- De aanleg van het scherm wordt gefaseerd uitgevoerd. Staal kan gemakkelijk op staal worden aangesloten.

Onttrekkingsputten en transportleiding

Binnen de damwand worden op vier plaatsen onttrekkingsbronnen aangebracht met een diep en een ondiep filter. De bronnen worden onder het grondwaterniveau afgetakt. De bronnen worden tot maaiveld geplaatst en afgewerkt om regeneratie uit te kunnen voeren. Om de intree weerstand zo laag mogelijk te houden is een goede grindomstorting van het onttrekkingsfilter benodigd. De afstand tussen de damwand en het lozingspunt bedraagt circa 270 meter. In verband met de grote hoeveelheid boven- en ondergrondse infrastructuur is het graven van een sleuf technisch en financieel niet haalbaar. Gekozen is voor een horizontaal gestuurde boring tot het lozingspunt nabij de rivier de Eem. De voorkeur is gegeven aan het doortrekken van acht leidingen door een mantelbuis zodat gebruik gemaakt kan worden van verschillende influentstromen om de zuivering te optimaliseren.

Gates

De gates, het reactieve deel van het ijzerscherp, bestaan uit 180 m³ ijzer waar het verontreinigd grondwater gelijkmatig doorheen moet stromen. Daarom is gekozen voor acht verschillende betonnen putten die elk in twee compartimenten zijn verdeeld. Zo stroomt het water als een propstroom door elke put. De putten worden geplaatst onder het grondwaterniveau. De influentleidingen worden voor het reactieve deel verzameld in een besturingsput waarin middels kleppen kan worden bepaald welk water door welk deel van de gate stroomt. Na realisatie van de gates blijft de besturingsput toegankelijk. Het water wordt verzameld via acht leidingen uit acht onttrekkingsputten. Als elke leiding wordt aangesloten op één reactieve put zal die put niet meer functioneren als de leiding of de bron niet functioneert (en andersom). Elke leiding moet eigenlijk op elke put kunnen worden aangesloten maar natuurlijk niet altijd op alle putten tegelijk. Dit vraagt nogal wat van het besturingsstelsel, temeer omdat alle aansluitmogelijkheden van tevoren moeten worden aangebracht. De putten worden ook onderling aangesloten omdat in principe het potentiaalverschil voldoende is om het water in serie door de putten te laten stromen. De stroming van het grondwater en de verdeling over de putten wordt centraal geregeld in de besturingsunit, een betonnen bak waarin het influent- en effluentleidingwerk wordt verzameld. In de besturingsunit worden ook bemonsteringspunten geplaatst en kunnen diverse data worden gelogd. De lage stroomsnelheid is nodig om zo min mogelijk wrijvingverlies te krijgen over het leidingwerk.

Conclusie

Bij het project in Amersfoort is aangetoond dat het mogelijk is een bronzone met chloorkoolwaterstoffen op een kosteneffectieve wijze te beheersen d.m.v. een ijzerscherp. Een ijzerscherp wordt gekenmerkt door relatief hoge installatiekosten, gevolgd door zeer lage onderhoudskosten. Zelfs inclusief ontwikkelkosten zijn de kosten van het ijzerscherp gelijk aan een conventioneel ontwerp (isolatievariant). De verwachting van het consortium is dan

ook dat volgende toepassingen aanzienlijk goedkoper zullen zijn dan de conventionele systemen. Het ontwerp is zodanig ingericht dat een aantal onzekerheden ondervangen kunnen worden door procestechnologische bijsturing. En dit alles onder vrij verval, zodat met recht gesproken kan worden van een duurzaam systeem.

SUMMARY

Reactive iron barrier

Introduction

A large number of sites in the Netherlands is polluted with DNAPLs (Dense NonAqueous Phase Liquids) like the chlorinated hydrocarbons tetrachloroethylene (PCE) and trichloroethylene (TCE). These sites have a source area (pure product) and a contaminant plume. In general, complete removal of the contamination in the source area is not possible with the current techniques. For the time being the control or isolation of the source area, combined with the (biological) approach of the contaminant plume, seems most cost effective. However, the current control and isolation variants (figure S.1, top) add hardly to the cost effectiveness. The effect on the environment is to be neglected.

Since a couple of years permeable reactive iron barriers have been used in North-America. A permeable reactive iron barrier is installed downstream of the source area. The chlorinated hydrocarbons in the contaminant plume are reduced to harmless products by the zero-valent iron in the barrier. A reactive barrier can be distinguished by being a passive system in which pumping is unnecessary. There are two basic ways to apply a permeable reactive iron barrier: as a continuous wall or in a funnel-and-gate configuration (figure S.1, bottom). Both systems have advantages as well as disadvantages. Greatest disadvantage of a continuous barrier is that the thickness of the barrier is determined by the highest concentrations. Large part of the barrier is therefore over dimensioned. For this reason, and also because of its higher flexibility and controllability the funnel-and-gate system is regarded as best applicable in the Netherlands. If needed, the reactive medium in the gate(s) can be replaced relatively easily or regenerated.

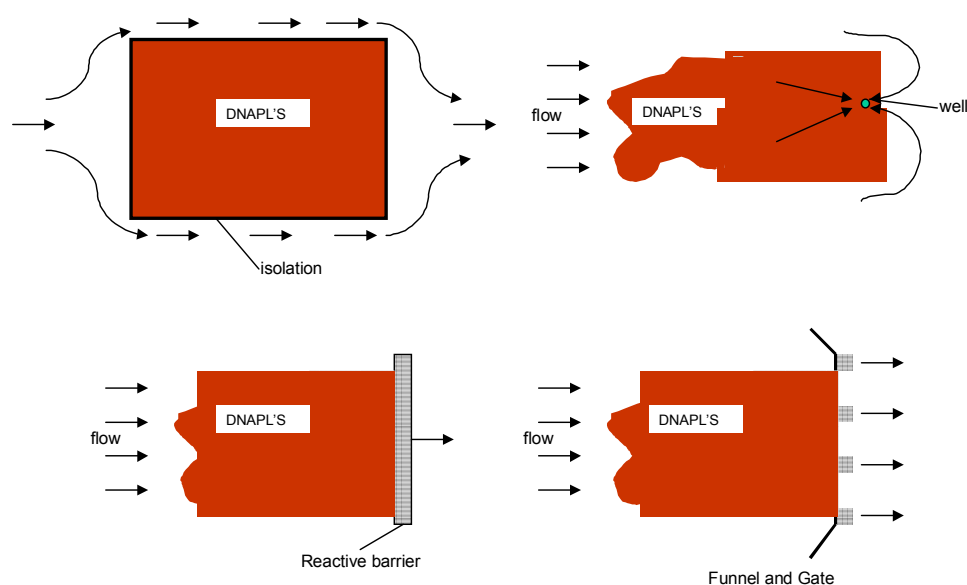


Fig. S.1 Conventional isolation and reactive barriers.

Objective of project

Contrary to Northern America, reactive iron barriers are not yet proven technology in the Netherlands. Barriers haven't yet been implemented in the Netherlands. Unfamiliarity with this phenomenon prevents consultants to propose this solution. Objective of this project is the acceptance of a permeable reactive iron barrier as a cost effective remediation solution for the chlorinated hydrocarbons contamination by implementing a full scale iron barrier at the site of a former drycleaner in the city of Amersfoort. At this site, pure products of PCE and TCE can be found over a large area on a clay layer at a depth of approx. 13 meters. Beyond the pollu-

tion a contaminant plume has been formed of several hundreds of meters. Approximately 5 years ago it was decided to isolate the source by means of a slurry wall. This approach however is troubling the redevelopment of the area. A permeable iron barrier could be the solution.

Working mechanism and kinetics iron

At the University of Waterloo (Canada) an extensive study was carried out to examine the use of zero valent iron to reduce the dehalogenation of water polluted with chlorinated hydrocarbons. Although there are still many questions how the mechanism exactly works, it has become clear that chlorinated hydrocarbons can be dechlorinated abiotic under certain conditions. The dehalogenation takes place at the iron-water interphase (surface reaction).

Many laboratory experiments have showed that the dehalogenation reactions can be approximated with a pseudo first order degradation kinetics. Usually half-life times are used to define the reaction speed. A half-life time is defined as the time necessary to reduce a certain start concentration of contaminant compounds to half to this concentration.

The degradation rate is influenced, amongst others, by the type of iron that is used and by the used amount, the temperature and the composition of the groundwater. Certain components, like NO_3^- , CrO_4^{2-} and SO_4^{2-} , can - just like oxygen and water - act as competitor of certain iron types and slow down the degradation process. Also, under influence of certain components, the iron can be deactivated by forming non-conductive oxide layers. To determine the degradation rates of the various existing components, a feasibility test (column test) of the polluted groundwater in a laboratory is necessary.

Design

Designing a Permeable Reactive Barrier (PRB) means that a system has to be defined that leads polluted groundwater through a reactive medium and then returns the groundwater into the water system. First it has to be studied if application of a PRB is possible. Generic idea of the PRB is the separation of source and plume. Then there has to be a reactive medium that can remove the pollution at a site. If that is the case, a reactive barrier can be built around that medium. For this reason, the applicability of a PRB is mainly determined by geohydrology. The PRB concept uses the variation between layers that are well permeable and almost impermeable. The objective: the water has to go through (the reactive part of) the barrier. Problem is that the water can flow around or underneath the barrier. To prevent the water of flowing underneath the barrier, a layer has to be chosen that is hardly permeable. Preventing the water of flowing around the barrier can be realised by the right sizing of length or width or permeability of the wall. Designing an (iron) barrier means combining civil engineering, process technology, soil science and geohydrology. In fact, it is as complex as any other 'normal' in-situ remediation.

Geohydrological modelling

Crucial for a good design of reactive barriers is geohydrological modelling. There are no specific requirements to model the barrier. Specific is the introduction of a 'strange' geohydrological object: an active, well permeable area, maybe in combination with a funnel or a gate (respectively hardly permeable and well permeable). Modelling the barrier means customisation. However, it only has to be performed once for a site. A good and solid design is not sensitive to most changes in the environment. Characteristic of a funnel and gate solution is that the pollution will only be dealt with downstream. The pollution is not totally encapsulated, which imposes higher requirements on the accuracy of the used geohydrological model.

The exact location of the barrier in the city of Amersfoort was determined after many consultations and calculations of a large number of variants. A permanent barrier is quite demanding for the users of the site. The barrier can't be removed, not even partially, and must not be damaged. Therefore, the barrier must be placed on public grounds, and should cross cables, pipes and cellars least possible. The modelling also took into account minimising the flow by

creating a 'stagnant area' inside the barrier. The exact location of the final barrier is given in figure S.2. In order to catch all the polluted groundwater out of the source area, 15 m³ of water/day is withdrawn in the funnel.

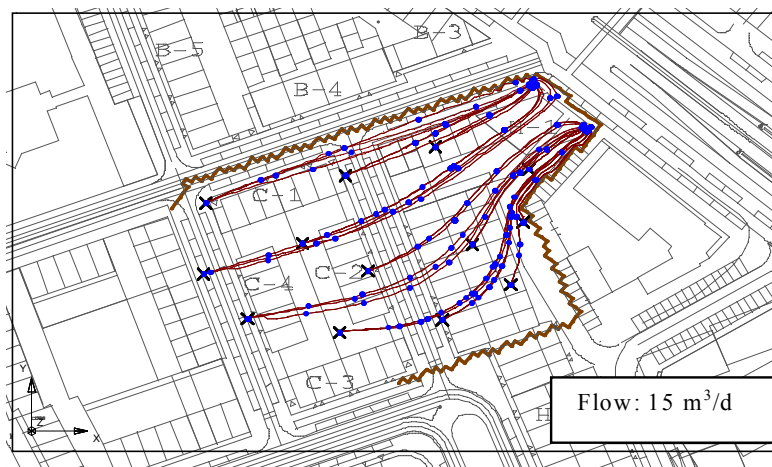


Fig. S.2. Modelling of barrier.

Selecting iron and feasibility study

Based on batch experiments with a number of iron types from the Netherlands and Germany it was decided to perform the feasibility study with the iron called 'metal pulver' from Germany. This iron is one of the most reactive (with a large specific surface) and it will probably cause less problems with clogging because of the grain size being not too fine. The test was set up in columns of Plexiglas fully loaded with iron (porosity of 0.55). The column experiment started at a temperature of 12°C with groundwater from Amersfoort (2.257 µg/L PCE, 2.072 µg/L TCE, 928 µg/L cDCE and trace amounts of 11DCE, tDCE and VC). In function of time the column was sampled until steady state concentration profiles were obtained.

VOC analyses and redox and pH measurements were carried out on the groundwater samples. Inorganic analyses were performed on the influent and effluent of the columns after 40 pore volumes. Based on the measurements it was concluded that the chemical composition of the groundwater and the results of the column test were positive to use the technology of reactive iron barriers in Amersfoort. In experiments it was determined that the most important VOCI-components in the groundwater could be degraded below regulatory limits (20 µg/L VOCI total), after a residence time of 109 hours. The observed degradation rates are in line with observations in other column experiments. It can be expected that minimal amounts of mineral precipitates will be formed on the inside of the barrier, which in time will reduce the reactivity and efficiency of the wall. However, it is not expected that it will reduce the 'usability of the barrier' by years.

Gates

In this project a number of scenario calculations were carried out to know the necessary amounts of iron, based on a maximum flow (20 m³/day) and a highly fluctuating pollution grade of the groundwater (both per inlet filter and in time). The effluent concentration for VOCI total was set at 20 µg/L. This was an important parameter for the dimensions of the gate. Changes in this requirement highly effect the amount of iron and consequently the extensions of the gate. To obtain a reduction of the effluent concentration to 10 µg/L for example, approx. 200 m³ of iron is needed, compared to approx. 170 m³ at an effluent concentration of 20 µg/L.

The use of iron in the system can be optimised by configuring the influent flows. Mixing relatively clean flow with relatively highly polluted flow is disadvantageous in a remediation point of view because of the amount of iron needed. Starting point is that the most contaminated flow is remediated first. Then it is mixed with relatively clean flow. Calculations show that especially in cases where there are great differences in concentrations, a good system configuration

adds to considerable savings in the amount of iron needed. Dimensions of the gates are based on a worst case contamination scenario, with a volume of 180 m³ of iron.

Integrating technical design and spatial planning

Lack of space and problems with existing cables and pipes made it necessary to separate the gates from the funnel and mount these downstream (figure S.3). Under a parking space a suitable location was found for the gates, which was also large enough to pack the amount of iron in the reactors under the groundwater surface. The contaminated water is caught between the sheet piles and is transported via the extraction wells that are placed there. The filters in these wells are placed in line with the 2 aquifer layers, that are separated by a peat layer.

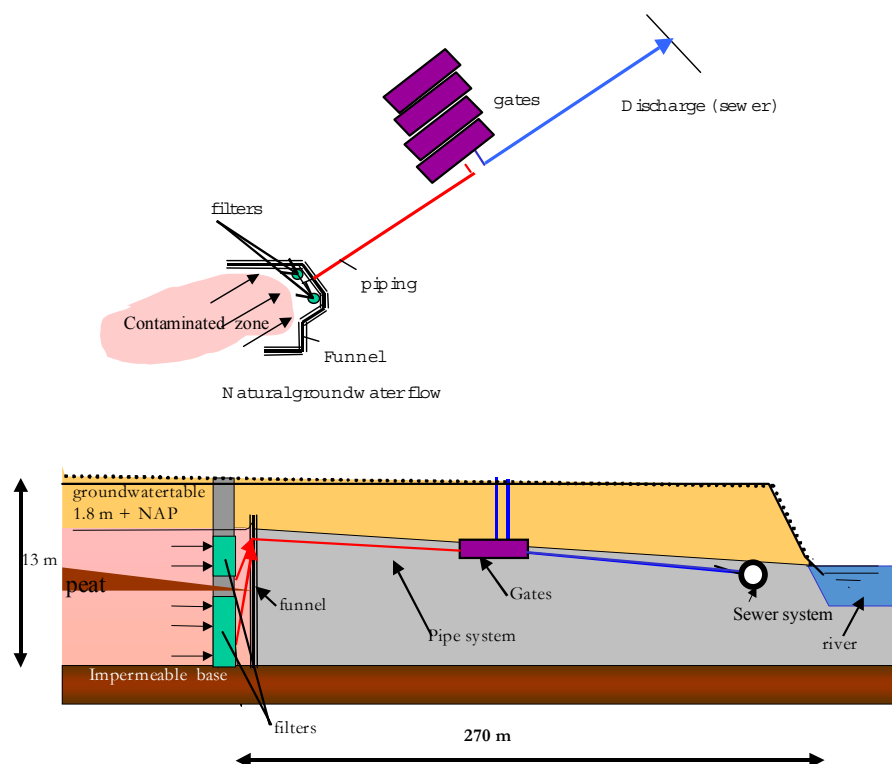


Fig. S.3. Schematic layout reactive iron barrier.

From these wells the polluted groundwater is transported through pipes to the water treatment, which exists of several reactors that are filled with zero valent iron. Here the chlorinated hydrocarbons are degraded. The remediated water is then transported through pipes to the outlet. As the groundwater level at the funnel is higher than the water level at the outlet, and the flows are minimal, this can take place under natural gradients. The outlet point was chosen to give a maximum gradient. The district water board asked the outlet point to be a sewer near the river Eem. This sewer lies deep, which makes a gradient possible of 1.5 to 2 meters.

Dimensioning

Funnel

Based on costs and reliability, the permeable wall of the iron barrier could either be a sheet pile or a slurry wall. The sheet pile was preferred for the following reasons:

- The connection with cellars at this location was easier to accomplish. Watertight connection of cellars to a slurry wall is hard to realise.
- Extensions of sewers are easier to accomplish.
- The construction of the barrier is carried out in phases. Steel can be connected to steel easily.

Extraction wells and transportation piping

Inside the sheet wall, extraction wells were made at 4 places with a deep and a shallow filter. Pipes from the filters were made below groundwater level. The wells were finished at ground level to enable regeneration. To reduce the inlet resistance as much as possible, a good gravelpacking around the filter is necessary. The distance between the sheet pile and the outlet point is approx. 2700 meters. Because of all the infrastructure above and below the ground, it was technically and financially not feasible to dig a trench. Instead, a horizontal drilling was used from the funnel to the outlet point near the river Eem. Preference was given to extend 8 pipes through a casing pipe, to enable the use of several influent flows to optimise the remediation.

Gates

The reactive part of the iron barrier consists of 180 m³ of iron, through which the contaminated groundwater has to flow consistently. Therefore, 8 different concrete reactors were made, each separated into two compartments. This way, the water flows as a plug flow through each reactor. The reactors are placed under groundwater level. The influent pipes for the reactive part come together in a control unit, where with valves it can be controlled which water flows through which part of the gate. After realisation of the gates, the control unit stays accessible. The water is assembled via 8 pipes coming from 8 extraction filters. If each pipe is connected to 1 reactor, this reactor won't function anymore if the pipe or the filter doesn't function (and vice versa). Each pipe should be connected to each reactor, but not to all reactors at the same time. This demands a lot from the control system, also because all connections have to be installed beforehand. The reactors are also connected among themselves because there should be enough gradient to let the water flow in series through the reactors. The flow of the groundwater and the distribution over the reactors is dealt with centrally out of the control unit, which is a concrete "cellar" where the influent and effluent piping is assembled. In the control unit are also sampling points installed and various data loggings. The low flow rate is necessary to reduce friction loss in the piping.

Conclusion

The project in the city of Amersfoort showed that it is possible to design a permeable reactive iron barrier to control in a cost effective way a source zone with chlorinated hydrocarbons. Characteristic of an iron barrier are its high initial installing costs, followed by very low maintenance costs. Even when the development costs are included, the costs of the permeable reactive iron barrier equal the costs of a conventional design (cut-off wall). The consortium expects that further applications of this barrier will be considerably cheaper than conventional systems. The design allows process and technical control to overcome uncertainties. All this with natural gradient, which means a truly lasting system.

NOTATIES

PCE	Tetrachlooretheen, ook wel per genoemd
TCE	Trichlooretheen, ook wel tri genoemd
cDCE	Cis-dichlooretheen, ook wel cis genoemd
tDCE	Trans-dichlooretheen
1,1,2DCE	1,1,2-dichlooretheen
VC	Vinylchloride
pH	Zuurgraad
EC	Elektrische geleidbaarheid
Eh	Redoxpotentiaal
t	Tijd
$t_{1/2}$	Halfwaardetijd
C	Concentratie
T	Temperatuur
DNAPL	Dense NonAqueous Phase Liquid
Fe	IJzer
PRB	Permeable Reactive Barrier
CKW	Chloorkoolwaterstoffen
VOCI	Vluchtige Organische Chloorkoolwaterstoffen
m –mv.	Meter beneden maaiveld
NAP	Nieuw Amsterdams Peil
KV	KiloVolt
CSG	Centraal StadsGebied
k	Doorlatendheid
Cl	Chloride
NA	Natuurlijke afbraak
TOC	Total Organic Carbon
DOC	Dissolved Organic Carbon
DIC	Dissolved Inorganic Carbon

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Algemeen

Het implementeren van een ijzerscherm is nieuw in Nederland. In Noord-Amerika wordt het reeds beschouwd als proven technology, maar omdat de Nederlandse bodemomstandigheden (met name geochemisch) anders zijn, is implementatie in Nederland nog niet van de grond gekomen. Dit is jammer omdat het toepassingsgebied groot is en de kostenreductie voor de gehele bodemsaneringsoperatie groot kan zijn. Algemeen kan geconcludeerd worden dat implementatie van een ijzerscherm een voorbeeldfunctie kan hebben en het gebruik van ijzerschermen onder het motto 'als één schaap over de dam is, volgen er meer' een positieve impuls kan krijgen.

De bovenstaande problematiek komt duidelijk naar voren op een locatie in Amersfoort. In het Centraal Stadsgebied (CSG) te Amersfoort is een herinrichting gaande. Binnen het gebied bevinden zich acht locaties, die in verband met de herinrichting gesaneerd dienen te worden. Eén van deze locaties betreft de voormalige chemische wasserij Actief II. De beoogde aanpak van deze locatie bestond uit civieltechnisch isoleren en is uitgewerkt in een saneringsplan (Heijmans Milieutechniek [1]). Sindsdien is het herinrichtingsplan gewijzigd, hetgeen consequenties heeft voor de uitvoering van de voorgestelde saneringsvariant. Heijmans Milieutechniek heeft vervolgens TTE gevraagd om te onderzoeken of alternatieven mogelijk zijn. Gezamenlijk is vastgesteld dat het toepassen van het ijzerscherm-principe op de locatie Actief II perspectief biedt (Afweging saneringsvarianten [2]). Een ijzerscherm op de locatie Actief II lijkt een optimale oplossing, maar rondom de toepassing zijn nog onzekerheden.

1.2 Probleemschets

Probleemstelling

Een groot aantal locaties in Nederland is verontreinigd met DNAPLs (Dense NonAqueous Phase Liquids) zoals de chloorkoolwaterstoffen Per en Tri. Deze locaties worden gekenmerkt door een bron- en een pluimzone. In de bronzone is puur product aanwezig en in de pluim opgeloste verontreiniging. Verwijdering van de verontreiniging in de bronzone is vooralsnog niet mogelijk. Verwijdering van de verontreiniging in de pluimzone daarentegen wel. Hierbij zijn vooral biologische technieken veelbelovend.

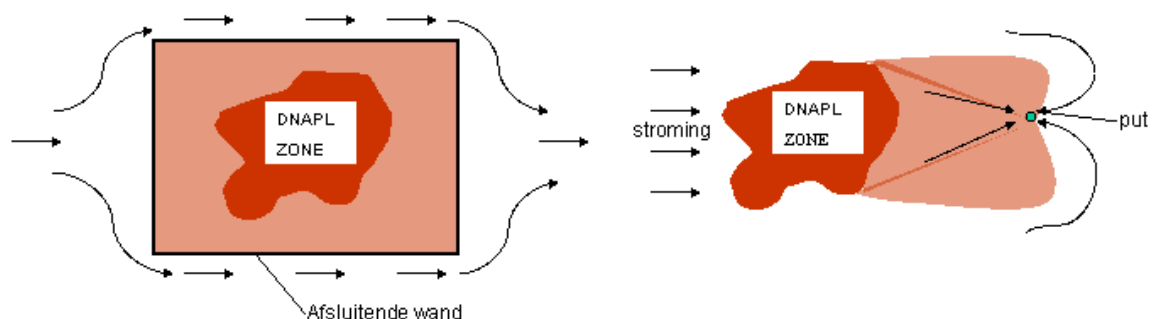


Fig. 1. Conventionele beheers-/isolatievarianten bronzone.

Nalevering van verontreiniging uit de bronzone kan deze technieken echter frustreren, langdurig maken, of op kosten jagen. In het nieuwe beleid is het vooral de kosteneffectiviteit die de saneringsmaatregel bepaalt. Vooralsnog lijkt in veel gevallen beheersing of isolatie van de bronzone in combinatie met de biologische aanpak van de pluimzone de meest kosteneffectieve aanpak. De bestaande beheers- en isolatievarianten (zie figuur 1) dragen over het algemeen echter weinig bij aan de kosteneffectiviteit. De milieuverdienste is verwaarloosbaar.

In Noord-Amerika wordt de laatste jaren geëxperimenteerd met reactieve barrières, met name met ijzerschermen. Deze ijzerschermen hebben een hoog milieurendement en zouden goed aansluiten bij de kosteneffectieve aanpak van verontreinigingen met chloorkoolwaterstoffen (CKW) in Nederland.

Het zijn passieve systemen die zich kenmerken door geen gebruik van grondwater, geen eeuwigdurend energieverbruik, lage exploitatiekosten en geen productie van afvalstoffen.

Een permeabel ijzerscherm wordt geïnstalleerd stroomafwaarts van de bronzone. De verontreinigingen in de pluim reageren met het ijzer in het scherm waarbij deze omgezet worden tot onschadelijke producten (etheen/ethaan, die verder afgebroken worden tot CO_2). Het ijzerscherm bestaat uit nulwaardig ijzer of ijzerhoudende mineralen die de gechloreerde koolwaterstoffen reduceren. De elektronen die vrijkomen bij de oxidatie van het ijzer worden gebruikt om de chloride atomen te verwijderen van de koolwaterstoffen. Een reactief scherm onderscheidt zich met name door het feit dat het een passief systeem is waarbij niet gepompt hoeft te worden.

Voor de toepassing van een reactief ijzerscherm zijn twee basis uitvoeringsvarianten te onderscheiden: als doorgaand scherm of in een funnel and gate configuratie (zie figuur 2). Beide systemen hebben voor- en nadelen. Het grote voordeel van een doorgaand scherm is dat de natuurlijke grondwaterstroming niet noemenswaardig beïnvloed wordt. Hierdoor kan de lengte van het scherm vrijwel even groot zijn als de breedte van de pluim. Bij grotere dieptes wordt het uitvoeringstechnisch gezien moeilijk om te garanderen dat het reactief materiaal op de juiste wijze wordt aangebracht.

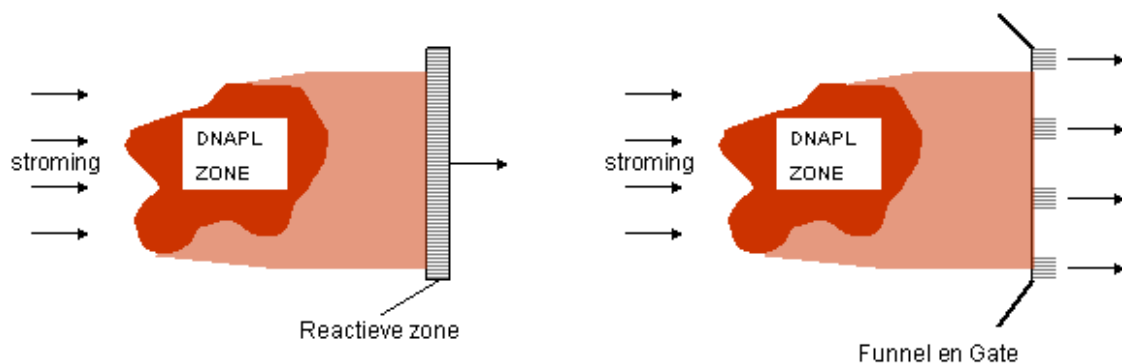


Fig. 2. Reactieve schermen.

Het grote voordeel van een funnel and gate systeem is de flexibiliteit en de beheersbaarheid. Zo kan bijvoorbeeld in de gate(s) het reactief medium relatief eenvoudig vervangen of geregeneerd worden. Het nadeel van een funnel and gate systeem is dat, ten gevolge van opstuwning, het scherm breder moet zijn dan de pluim om langsstroming te voorkomen. Daarnaast kan de relatief grote stroomsnelheid in de gate nadelige effecten veroorzaken.

Het toepassingsgebied voor ijzerschermen ligt vooralsnog op locaties met een DNAPL-verontreiniging tot circa 15 meter diepte. Naar verwachting is deze diepte in de toekomst uit te breiden tot locaties met DNAPL-verontreiniging tot circa 30 meter diepte.

Ijzerschermen zijn vooralsnog geen proven technology in Nederland. Er zijn nog geochemische, civieltechnische, geohydrologische en beleidsmatige knelpunten die grootschalige implementatie tegenhouden. De knelpunten zijn niet onoplosbaar maar onbekendheid weerhoudt adviseurs ervan probleembezitters deze oplossing aan te reiken.

Voor wie een probleem?

In Nederland zijn honderden, misschien wel duizenden locaties verontreinigd met DNAPLs (chemische wasserijen, metaalverwerkingsbedrijven, drukkerijen etc.). Veel van deze locaties hebben karakteristieken, wat betreft verontreiniging en bodemopbouw, die passen binnen het toepassingsgebied. Op al deze locaties is een kosteneffectieve aanpak mogelijk. Ergo, de saneringsoperatie van de BV Nederland zou gebaat zijn bij de acceptatie van ijzerschermen als een betrouwbare saneringsvariant.

Gevolgen en interacties

Het belang van de uitvoering van het project is gelegen in het feit dat er sinds lange tijd gesproken en geschreven wordt over de positieve mogelijkheden van de toepassing van reactieve ijzerbarrières in Nederland, maar de implementatie ervan laat op zich wachten. Dit kan resulteren in verlies van momentum, hetgeen Nederland zich niet kan permitteren. Nederland profileert zich als koploper en trendsetter in de aanpak van bodemsanering en kennisontwikkeling over bodemprocessen en saneringstechnieken.

Echter, in de kennis over het toepassen van ijzerschermen dreigen we te worden ingehaald. In de Verenigde Staten (40 locaties) wordt de techniek al volop toegepast, maar dichterbij bij huis in Ierland (1 locatie), Denemarken (2 locaties) en Duitsland (3 locaties) wordt ook al ervaring opgedaan. Er is zeggezegd een doorbraak in Nederland nodig om de concurrentiepositie te handhaven.

1.3 Een praktijkvoorbeeld: CSG Eemkwartier te Amersfoort

Het Centraal Stadsgebied Eemkwartier, gelegen ten noorden van het station van Amersfoort, is een voormalig industrieterrein met meerdere verontreinigde locaties (figuur 3). Het gebied wordt herontwikkeld tot een locatie met woningen en kantoren. Binnen het gebied bevinden zich acht locaties, die in verband met de herinrichting gesaneerd dienen te worden.



Fig. 3. CSG Eemkwartier.

De grootste verontreiniging binnen het ontwikkelingsgebied bevindt zich op de locatie Actief II. Op deze locatie was voorheen een chemische wasserij gevestigd. De verontreiniging, met Per en Tri, is daar als bron weggezaakt tot een diepte van 13 m -mv. Achter de verontreiniging heeft

zich een pluim gevormd die uitloopt tot aan de rivier de Eem. Voordat gestart kan worden met de aanpak van de pluim moet eerst de bron worden gesaneerd. Daarvoor is in eerste instantie een cementbentoniet-scherm voorgesteld met daarbinnen een permanente onttrekking. Een klassieke IBC-maatregel (zie figuur 4).

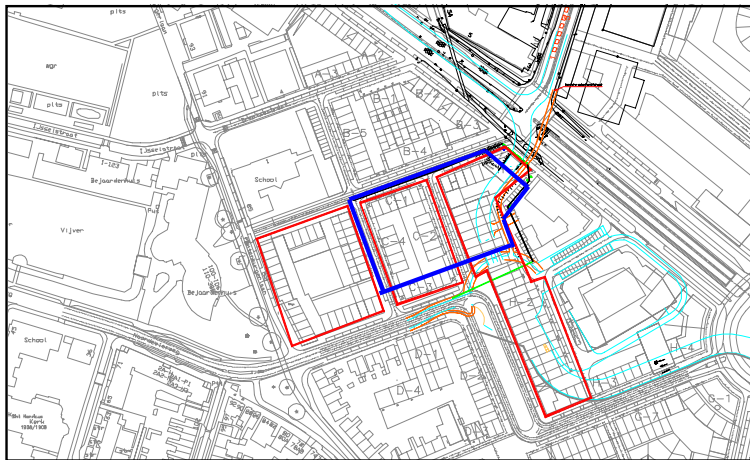


Fig. 4. Ligging isolatiescherm (blauw) geprojecteerd op de nieuwe inrichting met parkeergarages (rood).

Er zijn een aantal redenen geweest om te twijfelen aan de haalbaarheid van het cementbentoniet-scherm. De belangrijkste reden is dat diverse kelders zullen worden gerealiseerd op de locatie. Het waterdicht aansluiten van deze kelders op het cementbentoniet-scherm is op zijn minst moeilijk. Verder zal er op een aantal plaatsen riolering worden aangelegd waardoor het grote aantal doorkruisingen van het scherm een onzekere factor was in het ontwerp. Om deze reden is toen onderzocht of een stalen damwand een beter alternatief zou zijn. Het aantal aansluitingen bleef echter onveranderd fors. Een andere reden was dat de gefaseerde sloop, bouw en dus ook de gefaseerde sanering en aanleg van het scherm voor moeilijkheden zou zorgen. Daarom is er gezocht naar een betere oplossing die goed toepasbaar zou zijn binnen het ontwikkelingsgebied van CSG Eemkwartier.

In overleg met de provincie Utrecht is onderzocht of alternatieven mogelijk zijn. Op basis van een afweging van een aantal varianten is vastgesteld dat het toepassen van het ijzerscherm-principe door middel van een funnel en gate op de locatie Actief II perspectief biedt (rapport TTE [2]).

De volgende kansen werden gesignaleerd:

- De funnel heeft als voordeel dat minder damwand nodig is dan bij de conventionele isolatie.
- De gate heeft als voordeel dat het geen bovengronds ruimtebeslag vraagt. Er is dus minder hinder.
- Het systeem zelf functioneert onder vrij verval zodat ook het milieurendement verbetert. Er is geen energie nodig om het systeem in stand te houden en de hoeveelheid reststoffen zijn praktisch nul.
- Doordat er geen mechanische middelen nodig zijn is de onderhoudsfrequentie laag. In principe is het systeem zelfs onderhoudsvrij.
- Door het slim aanleggen van de funnel en gate bestaat de mogelijkheid het grondwater met leidingwerk te verdelen voordat het door de gate wordt gevoerd. Ook wordt sturing voor de gate mogelijk. Zo kan na installatie een optimum worden gezocht in de werking van het systeem.
- En boven alles: het systeem is in principe goedkoper.

1.4 Uitvoering van het project

Doelstelling

Doel van het project is de acceptatie van een reactief ijzerschermbij de CKW-problematiek door middel van de implementatie van een 'fullscale' ijzerschermbij de locatie Actief II te Amersfoort.

Het beoogde projectresultaat is een schoolvoorbeeld van integratie van bodemsanering in stedelijke ontwikkeling. Positieve ervaringen met de beoogde integratie van het ijzerschermbij in de ruimtelijke inrichting van het centraal stadsgebied van Amersfoort zal bijdragen aan de integrale aanpak van volgende projecten, waarbij de problematiek van ruimtelijke ordening en bodemsanering opgelost dient te worden.

Consortium

Het initiatief voor het project is genomen door Heijmans Milieutechniek. Heijmans werd op de locatie in Amersfoort geconfronteerd met een oplossing die vanuit het 'Bever'-perspectief en ruimtelijke inrichting niet optimaal was.

Heijmans heeft TTE gevraagd alternatieve oplossingen aan te dragen. TTE introduceerde als oplossing een reactief ijzerschermbij. In overleg met de provincie Utrecht, CSG-Eemkwartier, Heijmans en TTE is besloten deze variant als optimale oplossing voor de locatie verder uit te werken en te implementeren. Vervolgens is een consortium opgericht, bestaande uit de partijen zoals weergegeven in figuur 5. Lopende het project is een deel van de laboratoriumexperimenten uitbesteed aan de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO). Eindverantwoordelijke van het project, tevens penvoerder is Heijmans, de projectleiding is in handen van TTE.



Fig. 5. Samenstelling consortium.

Oplossingsrichting

Als oplossingsrichting is gekozen voor het daadwerkelijk implementeren van een ijzerschermbij op de locatie Actief II te Amersfoort. Aan de hand van de knelpunten die daarbij naar voren komen en de daarvoor gevonden oplossingen worden ontwerprichtlijnen opgesteld voor het toepassen van ijzerschermen in Nederland. Op basis van dit project kan worden vastgesteld of een ijzerschermbij voor gelijksoortige CKW-locaties in Nederland een kosteneffectieve saneringsoplossing is. Uit oogpunt van de beheersbaarheid, de flexibiliteit en de uitvoerbaarheid wordt uitgegaan van een 'funnel and gate'-systeem (een gecontroleerd doorlatende schermconstructie).

Knelpunten

Een inventarisatie van de knelpunten bij de start van het project heeft het volgende overzicht opgeleverd:

Geochemisch

- De samenstelling van het reactief medium in relatie tot de reactiesnelheid;
- De reactieve capaciteit van het ijzer kan afnemen in de tijd, waardoor het ijzer periodiek vervangen moet worden;
- De doorlatendheid van het reactieve scherm kan afnemen als gevolg van ijzerneerslagen, zouten en biologische activiteit;
- Het optreden van concurrerende chemische reacties (wat is de invloed van nitraat, sulfaat en organisch materiaal op de reactiesnelheid);
- IJzer kan vrijkomen uit het scherm en als de concentraties te hoog zijn zelf een verontreiniging worden;
- Regeneratiemogelijkheden van het reactief medium.

Materiaaltechnologie

- Het gedrag van ijzer in de grond;
- Morfologie (korrelvorm en korrelgrootte).

Geohydrologisch

- Geen langsstroming van de pluim;
- Gelijkmatische stroming;
- De benodigde funnellengte en het te verwerken debiet in de gates;
- Het aantal gates in relatie tot een gelijkmatige grondwaterstroming.

Civieltechnisch

- De wijze van aanbrengen van de reactieve zone en de ondoorlatende wand;
- De aansluiting van de ondoorlatende wand op de reactieve zone;
- De constructie van de gates;
- Vervangen reactief medium.

Beleidsmatig

- Welke randvoorwaarden worden gesteld aan het toe te passen ijzer?
- Welke randvoorwaarden worden gesteld aan het effluent?
- Hoe past een reactief scherm in het nieuwe beleid? Welke zekerheden worden gewenst bij minder functioneren?
- Wat is de werking van het ijzerscherm (betrouwbaarheid)?
- Op welke wijze is de werking te controleren?
- Wat zijn de kosten van onderhoud en vervanging ijzer?

Planologisch

- Hoe is het ijzerscherm, en het eventuele toekomstige onderhoud, in te passen in de plaatselijke inrichting van de locatie?

Maatschappelijk

- Wordt een ijzerscherm maatschappelijk geaccepteerd?

Activiteiten en fasering

Het project is onderverdeeld in drie fasen:

- Fase 1: Ontwerp/dimensionering;
- Fase 2: Implementatie (aanbrengen systeem en monitoringspunten);
- Fase 3: Evaluatie (monitoring, toetsing systeem en ontwerpuitgangspunten).

Op basis van de resultaten van fase 1 is inmiddels, in verband met de herinrichting van het gebied, al besloten om over te gaan tot implementatie. In dit rapport wordt dan ook al kort ingegaan op de resultaten van de uitvoeringsfase.

Deelrapporten

De resultaten van een aantal specifieke onderdelen zijn beschreven in de volgende deelrapporten:

- Actualisatie-onderzoek grondwater CSG-gebied;
- Geohydrologische modellering;
- Kolomexperimenten;
- Beschrijving ondoorlatende wanden;
- Monitoringsplan ijzerscherm.

De deelrapporten zijn als bijlage toegevoegd op de cd-rom behorende bij deze rapportage. In dit hoofdrapport wordt, waar nodig, verwezen naar deze deelrapporten.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de algemene achtergronden van reactieve barrières beschreven. Hoofdstuk 3 behandelt het ontwerp. Hierbij komen onder andere het geohydrologisch onderzoek en de laboratoriumexperimenten aan bod. Geohydrologische modellering en laboratoriumstudies zijn onontbeerlijk voor het ontwerpen van een ijzerscherm. De geohydrologische modellering bepaalt, in combinatie met de ruimtelijke inrichting, in hoge mate de ligging en vorm van het scherm. Met behulp van de laboratoriumexperimenten wordt het juiste type ijzer gekozen en kunnen de belangrijkste karakteristieken van het ijzer, de halfwaardetijden, bepaald worden. Op basis hiervan wordt het benodigde volume van de gates bepaald. Met deze informatie als uitgangspunt wordt in hoofdstuk 4 de dimensionering en civiele techniek behandeld in relatie tot de ruimtelijke inrichting. Het rapport wordt tenslotte in hoofdstuk 5 afgesloten met de conclusies.

HOOFDSTUK 2

REACTIEVE BARRIÈRES

2.1 Algemeen

“Reactive barrier” is een kreet die is overgewaaid van het Amerikaanse continent, oorspronkelijk afkomstig uit Canada van de University of Waterloo. De Engelse naam beschrijft meteen de basisgedachte: Permeable Reactive Barrier (PRB) ofwel in goed Nederlands, een doorlatend reactief scherm.

In het basisidee wordt zo'n barrière loodrecht op de stromingsrichting geplaatst. Verontreinigd grondwater stroomt de doorlatende barrière binnen, reageert met reactief materiaal en stroomt vervolgens aan de andere kant schoon naar buiten. In Nederland staat op dit moment vooral de funnel and gate-versie in de belangstelling. Hierbij wordt grondwater naar een ondergrondse reactor geleid, waar het wordt gezuiverd en weer wordt geïnfilteerd. Er bestaat daarbij ook nog de keuze tussen een actieve of passieve variant. In sommige gevallen betekent het toevoegen van een pomp aan het systeem een enorme reductie van kosten en onzekerheden. In andere gevallen is een dergelijke actieve variant niet noodzakelijk omdat de grondwaterverhagen groot genoeg zijn, of omdat in de omgeving een punt aanwezig is met een lage waterstand. De processen in de PRB kunnen van chemische, fysische of biologische aard zijn.

De processen die aan de basis liggen van de verwijdering van verontreinigingen kunnen versneld of geïnduceerd worden door introductie van bepaalde stoffen in de bodem. In ijzerwanden wordt bodemmateriaal vervangen door zerovalente ijzergranules, die de wand reactief maken. Momenteel is ijzer het meest gebruikte medium in PRB's met ongeveer 45% van alle toepassingen. Sorptie van gechloreerde solventen op actieve kool is een belangrijk voorbeeld van een verwijderingsproces, gebaseerd op hydrofobische binding.

In de volgende paragrafen wordt verder ingegaan op de mogelijke uitvoeringsvarianten van schermen en het werkingsmechanisme van reactief ijzer. In de laatste paragraaf wordt ingegaan op een stappenplan om tot een goed ontwerp en dimensionering van een ijzerscherm te komen.

2.2 Uitvoeringsvormen

De verticale sleuf



Fig. 6. Aanleg van een verticale sleuf.

De originele en meest eenvoudige vorm bestaat uit een verticale sleuf, gevuld met goed doorlatend reactief materiaal, loodrecht op de grondwaterstromingsrichting (figuur 6). De sleuf sluit aan de onderkant aan op een ondoorlatende laag. Deze techniek is in principe toepasbaar tot de diepte waarop een bentonietwand kan worden aangebracht. Veel dieper dan 25 meter lijkt echter niet reëel, maar alles is mogelijk. De benodigde dikte van de reactieve wand is afhankelijk van de benodigde verblijftijd in de wand. Voordeel is de eenvoudige vorm en het gebrek aan zorg/onderhoud als de wand eenmaal is geplaatst. Het nadeel hangt met deze eenvoud samen. Het ontbreekt aan stuurmogelijkheden als blijkt dat de wand niet goed is gedimensioneerd. De consequentie is dat de dimensionering gebaseerd moet zijn op een worstcase situatie. De verblijftijd (en dus de dikte van de wand) moet overal gebaseerd zijn op de maximaal mogelijke concentratie. Als de wand ergens niet dik genoeg is, betekent dit een falend systeem, terwijl op de overige plekken de wand is overgedimensioneerd met alle kosten van dien.

Bioscherm

Misschien nog eenvoudiger is het bioscherm, waarbij loodrecht op de stromingsrichting langs een lijn injectiefilters worden aangebracht waarmee nutriënten en/of elektronenacceptoren worden toegevoegd. Direct achter de filters wordt een biologisch actieve zone gecreëerd waarin de verontreiniging wordt afgebroken. Het betreft een lokale zone in een natuurlijke, poreuze ondergrond waarin een verhoogde activiteit van biologische afbraak van verontreinigende organische stoffen wordt gekoppeld aan een hoog immobilisatievermogen (zie figuur 7).

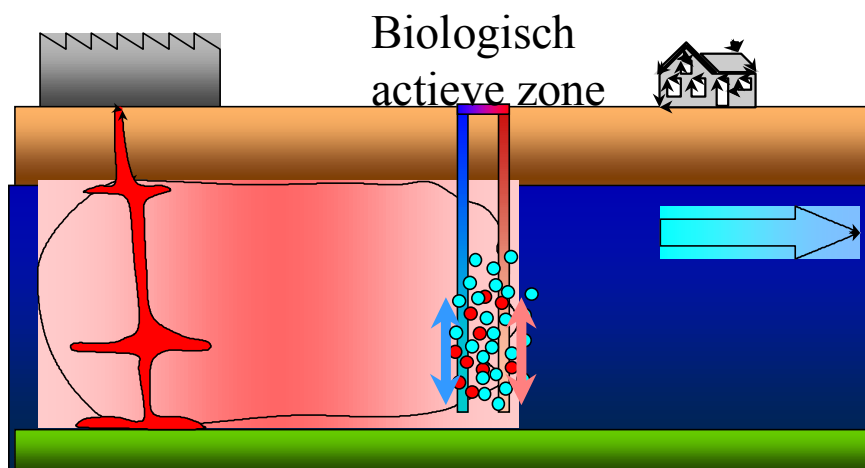


Fig. 7. In situ (bio)reactief scherm (Rijnaarts [3]).

Een bioscherm is in principe uitvoerbaar tot elke diepte waarop injectie mogelijk is. Technische knelpunten liggen vooral in de invloedstraal (het mengen van het vloeibare substraat met het grondwater) en het voorkomen van verstopping. Gasinjectie (perslucht of in gas opgelost substraat bij anaëroob afbreekbare verontreiniging) kan deze knelpunten voorkomen. Deze techniek is echter gevoelig voor heterogeniteiten in de vorm van horizontale lagen. Hoe dieper de toepassing hoe onzekerder de daadwerkelijke effectiviteit. Bioschermen vormen een goedkope en flexibele variant voor biologisch afbreekbare stoffen. Nadelen liggen in de wat intensievere zorg en het onderhoud, de kans op verstopping en onzekerheid met betrekking tot de invloedstraal en kortsluitstromen door het scherm.

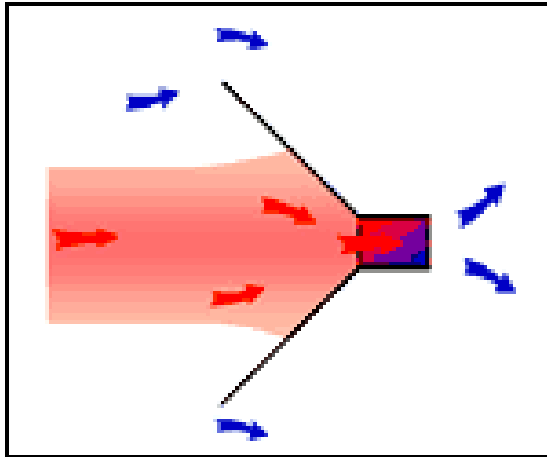


Fig. 8. Funnel and gate.

Funnel and gate

Een iets geavanceerdere uitvoering is gebaseerd op het funnel and gate-principe. De funnel is ondoorlatend en leidt het grondwater naar de gate, een zeer goed doorlatende, (re)actieve zone. De funnel is een eenvoudige civieltechnische constructie (damwand of cementbentoniet scherm). Ontwerp en dimensionering van de gate vallen in het domein van de procestechnologen. Voordeel van het systeem is de totale controle over het afbraakproces. 'Zorg' is in dit systeem gelijk aan onderhoud zoals we dat kennen bij civiele constructies als rioleringen of procestechnologische installaties als waterzuiveringsinstallaties. In een aantal varianten wordt de gate los van de funnel uitgevoerd op een plek die daarvoor het meest geschikt is. Ook de vorm van de gate kan geoptimaliseerd worden, zo ondiep mogelijk. Net als bij alle schermen is een juiste dimensionering cruciaal. De funnel moet de juiste lengte hebben en de gate moet gevuld worden met een zeer goed doorlatend materiaal. Een funnel and gate is niet toepasbaar in slecht doorlatende grond. Daar is echter een variant in de vorm van een trench and gate geschikt.

Trench and gate

De trench and gate-uitvoering wordt gebruikt in slecht doorlatende pakketten. De trench is een goed doorlatende grindkoffer die zodanig geplaatst wordt dat het verontreinigde grondwater door de trench wordt afgevoerd richting de reactieve zone (de gate). Net als bij funnel and gate kan de reactieve zone of de reactor op elke willekeurige plek en vorm worden gebouwd. De voor- en nadelen van het systeem zijn vergelijkbaar met die van de funnel and gate. Een bijkomend nadeel is het risico van verstopping van de trenches, met name als het afgevangen water stroomafwaarts weer wordt geïnfiltreerd in trenches.

'Horizontale wanden'

Horizontale permeabele reactieve wanden kunnen worden toegepast bij kwel of infiltratiesituaties. Daadwerkelijke toepassingen zijn nog niet bekend, maar het creëren van een reactieve zone net onder de bron, bijvoorbeeld door substraat (gas)injectie onder de bron, is goed mogelijk.

Radial Collector Well

De civiele uitvoering van een horizontale barrière is de Radial Collector Well (RCW) (figuur 9). Dit is een grondwater onttrekkingssysteem dat sinds jaar en dag gebruikt wordt in de drinkwaterwereld voor grondwaterwinning uit dunne watervoerende pakketten of uit freatische pakketten waarbij de verlagingen minimaal moeten zijn. Het systeem bestaat uit een betonnen schacht tot maximaal 80 m –mv. van waaruit laterale drains (diameter 30 cm, maximale lengte 80 meter) direct onder of, bij kwel, boven de bron worden weggedrukt. Gezuiverd grondwater wordt afgevoerd via laterale drains op andere diepten. De reactieve zone (reactor) kan in de schacht worden aangebracht.

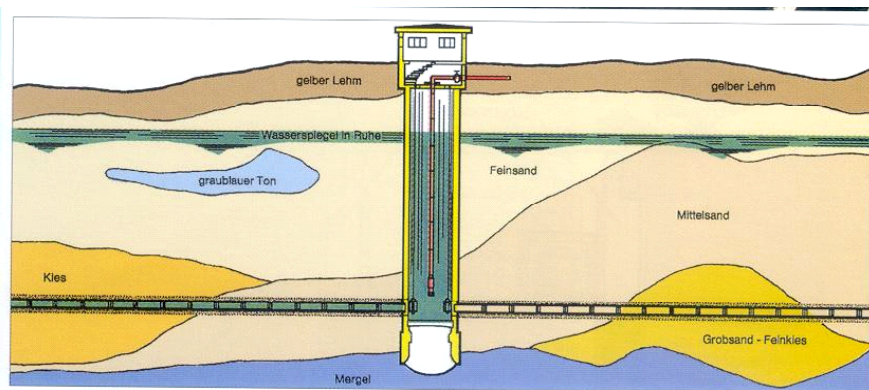


Fig. 9. Radial Collector Well.

2.3 Werkingsmechanisme reactief ijzer

De beschrijving van het werkingmechanisme van reactief ijzer is grotendeels gebaseerd op de lezing: "Verwijdering van gechloreerde organische verbindingen onder invloed van zerovalent ijzer" van de heer L. Bastiaens van het VITO tijdens het symposium "Reactieve barrières", gehouden op 30 mei 2002 te Amersfoort.

Reactief ijzer

Het gebruik van zerovalent ijzer voor de reiniging van met gechloreerde koolwaterstoffen verontreinigd water werd uitvoerig bestudeerd aan de Universiteit van Waterloo, Canada (Gillham & O'Hannesin, [4]). Een concrete toepassing die hieruit voortvloeide bestaat uit reactieve wanden voor passieve in situ sanering van grondwater. Reactieve wanden zijn permeabele wanden die 'reactief' zijn dankzij de aanwezigheid van ijzergranules. Ze katalyseren de degradatie van de gechloreerde organische stoffen die aanwezig zijn in het doorstromende grondwater, zodat het grondwater stroomafwaarts van de wand 'schoon' is.

Zero-valente metalen zoals ijzer, tin en zink zijn relatief sterk reducerende agentia die veel contaminanten kunnen reduceren zoals gechloreerde alifaten, metalen (bv. CrO_4^{2-}), nitraat, nitroverbindingen en pesticiden. Metalen als Zn kunnen ook leiden tot vrijstelling van Zn^{2+} , wat het gebruik in PRB's limiteert.

Ook bimetallische koppels hebben veel aandacht gekregen omwille van hun grotere reactiviteit. Bimetallische koppels zoals ijzer/palladium kunnen ook meer resistente producten zoals PCB's en gechloreerde fenolen dehalogenen. Als hypothese voor deze verhoogde reactiviteit geldt:

- Corrosie-effecten, geïntroduceerd door de aanwezigheid van een metaal met een meer positief reductiepotentiaal;
- Katalytische dehydrogenatie;
- De vorming van een krachtiger reductans door intercalatie van waterstofgas in de palladiumstructuur.

Een belangrijk probleem bij deze bimetallische koppels is het snelle verlies van reactiviteit door de vorming van een dikkere oxidelaag.

Afbreekbare gechloreerde organische verbindingen

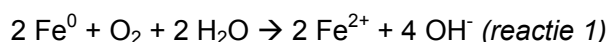
In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van een aantal gehalogeneerde componenten die reeds getest werden voor afbraak in aanwezigheid van zerovalent ijzer. Voor de meeste van deze componenten werd afbraak vastgesteld via reductieve dehalogenatie. Anderzijds moet rekening gehouden worden met het feit dat een beperkt aantal componenten slechts zeer traag tot niet gedehalogeneerd wordt onder invloed van het ijzer.

Tabel 1. Afbreekbaarheid organische componenten onder invloed van zerovalent ijzer.

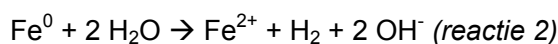
Component	Afbraak van component	
	Ja	Nee
Tetrachloorkoolstof	x	
Trichloromethaan (TCM)	x	
Dichloromethaan (DCM)		x
Chloromethaan (MCM)		x
Tribromomethaan	x	
Hexachloroethaan	x	
1,1,2,2-Tetrachloroethaan	x	
1,1,1,2-Tetrachloroethaan	x	
1,1,1-Trichloroethaan (111TCA)	x	
1,1,2-Trichloroethaan	x	
1,1-Dichloroethaan (11DCA)	x	
1,2-Dichloroethaan (12DCA)		x
Chloroethaan (MCA)		x
1,2-Dibromoethaan	x	
Freon 113 (Trichlorotrifluoroethaan)	x	
Freon 11 (Trichlorofluoroethaan)		x
Tetrachloroetheen (PCE = Per)	x	
Trichloroethene (TCE = Tri)	x	
Cis-1,2-Dichloroetheen (cDCE)	x	
Trans-1,2-Dichloroetheen (tDCE)	x	
1,1-Dichloroetheen (11DCE)	x	
Vinylchloride (VC)	x	
1,2,3-Trichloropropaan	x	
1,2-Dichloropropaan	x	
1,3-Dichloropropaan	x	
Hexachlorobutadien	x	

Mechanisme

Alhoewel er nog heel wat vragen zijn omtrent het exacte werkingsmechanisme van reductieve dechlorinatie in aanwezigheid van zerovalent ijzer, is het al wel duidelijk dat een heel aantal re-dox-reacties bij het proces betrokken is. De bekendste reactie is ongetwijfeld wanneer ijzer in contact komt met water en zuurstof (zie reactie 1). Opgelost zuurstof reageert zeer snel met ijzer waarbij roest, ijzerhydroxide, gevormd wordt.



Onder anaërobe omstandigheden kan water optreden als oxidant en het ijzer corroderen, waarbij waterstofgas gevormd wordt (zie reactie 2):



In zowel reactie 1 als reactie 2 worden hydroxylionen geproduceerd, die leiden tot een pH-stijging. Onder aërobe omstandigheden is dit pH-effect en aldus de corrosie het meest uitgesproken (Sutharsan [5]). In aanwezigheid van zerovalent ijzer kunnen gechloreerde koolwaterstoffen onder bepaalde voorwaarden abiotisch gedechloriseerd worden.

Hiervoor zijn drie verschillende basismechanismen beschreven (zie figuur 10):

1. Gechloreerde verbindingen kunnen direct aan het metaaloppervlak gereduceerd worden in de aanwezigheid van een proton-donor. Hierbij wordt verondersteld dat elektronen rechtstreeks worden overgedragen van het Fe^0 -metaaloppervlak naar gesorbeerde VOCl-componenten.

2. Een andere mogelijke afbraakweg is via verdere oxidatie van Fe^{2+} , dat een corrosieproduct is van reactie 1 en reactie 2. Fe^{2+} wordt hierbij verder geoxideerd tot Fe^{3+} .
3. Waterstofgas, dat geproduceerd wordt bij de corrosiereactie van water met het zerovalent ijzer (reactie 2), kan betrokken zijn bij de dechlorinatie van VOCl 's.

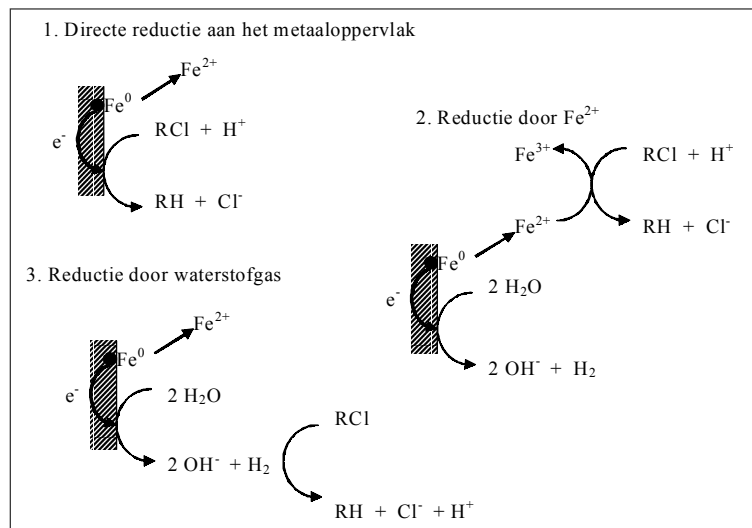


Fig. 10. Mogelijke reactiewegen voor reductieve dechlorinatie van VOCl 's door zerovalent ijzer.

De dehalogenatie heeft plaats aan de ijzer-water interfase en naar het algemeen model voor oppervlaktereacties zijn de volgende stappen te onderscheiden in het transport en reactiemechanisme (vermeld door Matherson & Tratnyek, [6]):

1. Transport van VOCl 's van de bulkoplossing naar het ijzeroppervlak;
2. Adsorptie van de VOCl 's aan het ijzeroppervlak;
3. Chemische reacties aan het ijzeroppervlak (zie figuur 10);
4. Desorptie van de reactieproducten van het ijzeroppervlak;
5. Transport van de reactieproducten naar de bulkoplossing.

Kinetiek

Vele laboratoriumexperimenten met betrekking tot reductieve dehalogenatie van VOCl 's met zerovalent ijzer hebben aangetoond dat de dehalogenatiereacties benaderd kunnen worden met een pseudo-eerste orde afbraak kinetiek (Gillham & O'Hannesin [4]; Powell et al. [7]). Dit kan beschreven worden met de volgende differentiaalvergelijking:

$$dC/dt = -kC$$

Met: C = concentratie verontreiniging
 t = tijd
 k = eerste orde afbraaksnelheidsconstante (h^{-1})

Bij een eerste orde afbraak kinetiek is de k -waarde een constante, die onafhankelijk is van de verontreinigingsconcentratie C . De k -waarde geeft informatie betreffende de afbraaksnelheid van component C , namelijk hoe hoger de k -waarde, des te sneller de afbraak. Vaak worden echter halfwaardetijden ($t_{1/2}$) gebruikt om de snelheid van de reactie te beschrijven. Een halfwaardetijd wordt gedefinieerd als de tijd die nodig is om een bepaalde beginconcentratie aan verontreinigin-

gen (C_0) te reduceren tot de helft van deze concentratie ($C = C_0/2$). De halfwaardetijd is dan als volgt met de k-waarde gecorreleerd:

$$t_{1/2} = \ln(2)/k = 0.693/k$$

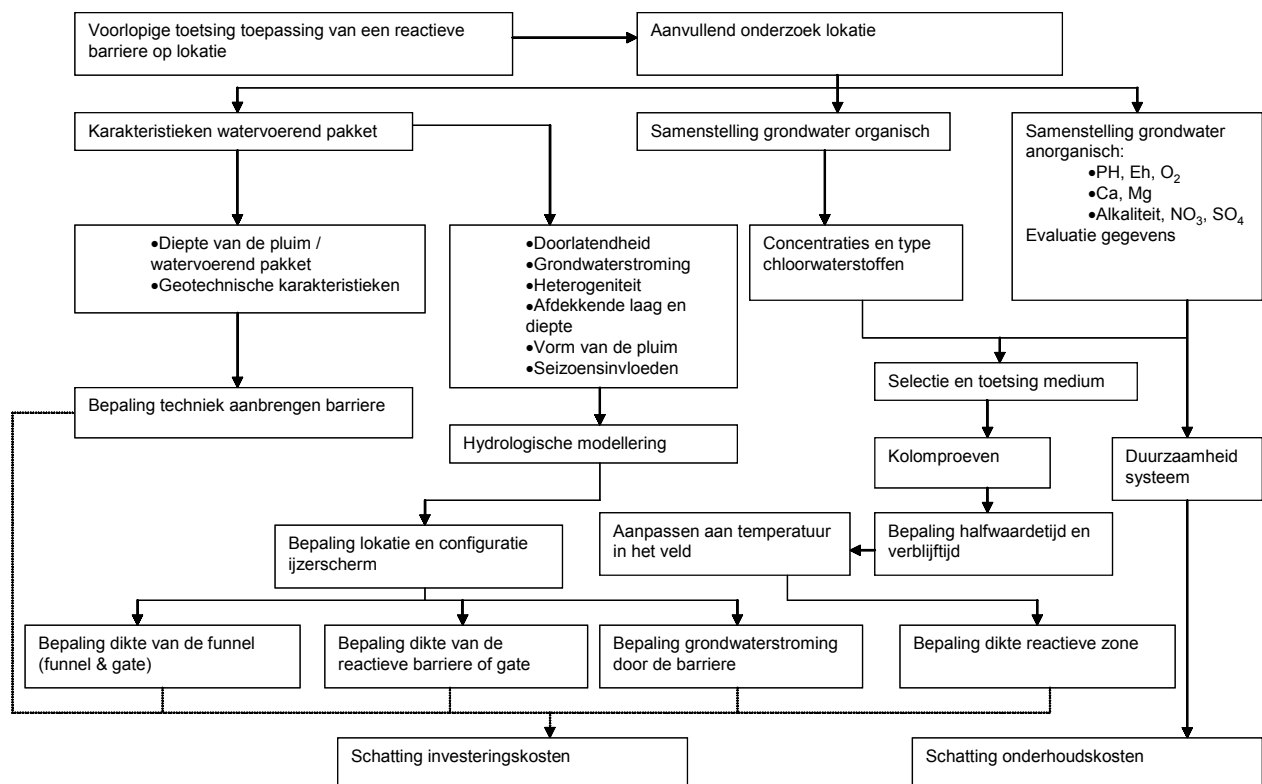
Een hogere halfwaardetijd komt dus overeen met een lagere k-waarde en een minder snelle afbraak. Experimentele halfwaardetijden en k-waarden die verkregen worden voor bepaalde VOCl-componenten kunnen sterk variëren. De volgende factoren hebben o.a. invloed op de afbraaksnelheid van VOCl's in aanwezigheid van zerovalent ijzer:

- Het soort ijzer dat gebruikt wordt en de gebruikte hoeveelheid;
- De temperatuur;
- De samenstelling van het grondwater. Bepaalde componenten zoals NO_3^- , CrO_4^{2-} en SO_4^{2-} kunnen, net zoals zuurstof en water, bij bepaalde ijzers mogelijk als competitor optreden en het afbraakproces vertragen (Damke et al. [8]; Schlicker et al. [9]). Verder kan het ijzer onder invloed van bepaalde componenten geïnactiveerd worden door vorming van niet-geleidende oxidelagen.

Een haalbaarheidstest (kolomtest) op laboratoriumschaal met het te saneren grondwater is daarom noodzakelijk ter bepaling van de afbraaksnelheden van de verschillende aanwezige componenten.

2.4 Stappenplan ontwerp en dimensionering reactief ijzerscherm

In het onderstaande schema is een richtlijn gegeven voor het ontwerpen en dimensioneren van een reactieve barrière (naar Gavaskar et al. [10]). Dit stappenplan is in hoofdlijnen ook bij het onderhavige project gebruikt.



HOOFDSTUK 3

ONTWERPEN

3.1 Algemeen

Ontwerpen is eigenlijk een vertaalproces van generieke ideeën naar maatwerk. In sommige vakgebieden is dit proces verworden tot een procedure, in de bodemsanering is het vaak een creatief proces. Dat proces begint al met het vormen van een coherent beeld van de boven- en ondergrondse situatie en de interactie daartussen (zie figuur 11). In de bodemsanering hebben we geleerd dat een dergelijk 'eerste' beeld altijd fouten bevat. Door cyclisch te ontwerpen of door flexibel te ontwerpen is hiermee te leven.

Het ontwerpen van een PRB betekent het bedenken van een systeem waarmee verontreinigd grondwater door een reactief medium wordt geleid en daarna weer terug in het watersysteem wordt gebracht. Het PRB-concept staat voor de generieke gedachte, maar hoe het uiteindelijke maatwerk eruit zal gaan zien, weten we pas als het werk klaar is.

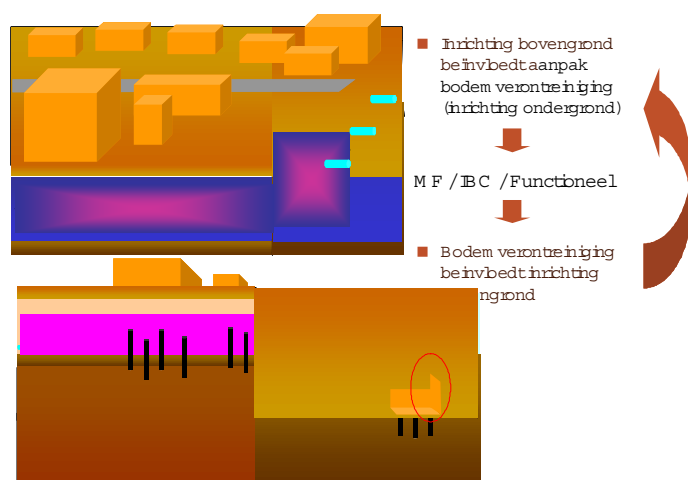


Fig. 11. Interactie inrichting bovengrond en bodemverontreiniging.

Een mooi voorbeeld is het ijzerscherm in Amersfoort. Iedereen noemt dit een ijzerscherm. Het eerste idee voor de locatie was inderdaad een sleuf met ijzer. Wat er komt is echter een geavanceerd funnel and gate-systeem. Er zit ijzer in de gate, de naam ijzerscherm bleef dus bestaan. In Den Haag is een 'actieve' funnel and gate gebouwd. Hier gebeurde het tegenovergestelde met de naam. Het water stroomt daar langzaam en de invloeden van buitenaf (onttrekkingen etc.) zijn potentieel groot. Een lange funnel was de enige oplossing. Door in de gate een pompje te installeren kon de funnel echter vele tientallen meters verkort worden en konden vele rampenscenario's het hoofd worden geboden. Dit ontwerp werd bijna onderuit gehaald door de dogmatische discussie of er nog wel sprake was van een funnel and gate. Het compromis werd gevonden in de term actieve funnel and gate. Het doel heiligt de middelen soms.

Daarnaast is ontwerpen in de bodemsanering een bijzondere aangelegenheid. Voorafgaand aan het ontwerp staan veel van de randvoorwaarden wel vast, maar is het te bereiken resultaat, de doelstelling, een discussiepunt en staat de hardheid van enkele uitgangspunten niet vast. Extra complicerend daarbij is de variabele waardering van de doelstelling. Het schetsen van varianten binnen de vaste zaken en het op kosten zetten daarvan wordt gebruikt om de doelstelling en uitgangspunten vast te stellen. Wordt in een dergelijk proces een PRB als variant geschetst, dan is

het van belang consensus te vinden over de positie van het eindproduct. Concreet in bodemsa-
neerderstaal: Wordt door de opstellers van het programma van eisen een PRB als een beheers-
variant of als een stabiele eindsituatie gezien? Begrijpen ze de impact van hun keuze?

Onderhoud versus zorg

Belangrijk aspect voor beleids mensen is de zorg na installatie. Het woord zorg is daarbij onge-
lukkig gekozen. De ondertoon bij zorg is: falen, oplappen, aandacht oftewel 'bezorgdheid'. Bij tal
van civiele constructies is sprake van zorg, eigenlijk onvermijdelijke zorg, bestaande uit: het jaar-
lijks verven van een staalconstructie om corrosie te voorkomen, het afzuigen van slib uit een rio-
leringssysteem om verstopping te voorkomen, het toevoegen van nutriënten bij een
grondwaterzuiveringsinstallatie, etc.

In civiele termen wordt gesproken over onderhoud. Voor dit onderhoud wordt een onderhouds-
plan geschreven. Civiele aspecten van een reactieve barrière zouden dus onder onderhoud ge-
noemd moeten worden.

Is zorg dan misschien van toepassing op de reactor, de gate? Procestechnologen zouden hard
lachen bij die vraag. Bij een goede bedrijfsvoering wordt het hele proces gestuurd door middel
van monitoring en vastgelegde procedures.

Maar wat wordt dan onder zorg verstaan? Zorg over de situatie na installatie wordt in de civiel-
technische wereld gebruikt om aan te geven dat er faalkans bestaat en dat die kans toeneemt bij
bepaalde scenario's. In een zorgplan worden deze scenario's met de daaruit voortvloeiende ge-
volgen beschreven en wordt aangegeven op welke manier gereageerd moet worden om de schade
te beperken.

Waarschijnlijk zal men zich ernstige zorgen maken over de Natuurlijke Afbraak (NA). Natuurlijke
afbraak als saneringsoplossing is eigenlijk een gigantisch reactief scherm, zonder sturingsmoge-
lijkheden, zonder funnel en met een gate die net zo groot is als de bron en pluim samen. "Dat is
pas een griezelig reactorvat" zou de procestechnoloog denken, na wat in de onderzoeken te
hebben gelezen. Hoe moet ik nou zonder pompen of schermen garanderen dat deze situatie niet
zal veranderen?

In 30 jaar moeten we voldoende informatie hebben over de werkwijze van deze reactor, waarna
we deze naar verwachting onderhoudsloos kunnen achterlaten. Probleem daarbij is wel dat als
gedurende deze 30 jaar blijkt dat ons basisidee over de werking van de reactor, over het vermo-
gen van de reactor, verkeerd is, we ons ernstige zorgen moeten gaan maken. Ingrijpen is dan
noodzakelijk en dan zijn we toch weer terug bij het onderhoud. NA is een zeer inflexibel ontwerp,
bij een faalscenario rijzen de kosten al snel de pan uit, omdat een ander ontwerp nodig is. De
reactor is zo groot dat het vaststellen dat een dergelijk faalscenario optreedt, op zich al duur is.
Het proces monitoren is interessant, maar vormt vooral een zwaard van Damocles, zou de pro-
cestechnoloog denken. NA: veel zorgen maar geen onderhoud!

Een leuke analogie is het oversteken van een rivier. De wens bestaat zich van de ene oever naar
de andere oever te kunnen bewegen. Een brug bouwen levert onderhoud op en is best duur. Een
pont kost ook heel wat, moet ook onderhouden worden en vraagt ook nog eens om geschoolde
bemanning. Je kunt ook uitgaan van de stelling 'als ik aan de ene kant een vlot loslaat, komt dat
altijd ergens aan de andere kant aan'. Dit lijkt op het eerste gezicht een zeer goedkope variant.
Echter het onweerlegbaar aantonen van de juistheid van de stelling is zeer kostbaar en vergt
waarschijnlijk veel tijd. De meest robuuste oplossing is het dempen van de rivier. Na het dempen
zijn er geen zorgen meer.

Basis

Allereerst moet een idee verkregen worden of toepassing van een PRB mogelijk is. Generieke
gedachte is het scheiden van bron en pluim met de PRB. Daarnaast moet er een reactief medi-
um zijn dat de verontreiniging die op een locatie aanwezig is, kan wegnemen. Als dat zo is, kan
rondom dat medium een reactieve barrière worden gebouwd. De toepasbaarheid van een PRB
wordt daarbij hoofdzakelijk bepaald door geohydrologie. Het PRB-concept maakt gebruik van de

afwisseling tussen slecht en goed doorlatende lagen. Het doel: water móét door (het reactieve deel van) de barrière. Gevaar is daarbij dat het er omheen of onderdoor stroomt. Eronder door is te voorkomen door een slecht doorlatende laag als basis te kiezen, eromheen valt te voorkomen door een goede dimensionering van de lengte of breedte of doorlatendheid van de wand. Bij verticale systemen waar gebruik wordt gemaakt van civiele technieken (wand/trench/damwand/ slurrywally etc.) is de dieptegrens toch wel 20 tot 25 meter. Dieper gaat extreem veel kosten. Wordt gebruik gemaakt van biologische systemen waarbij reactieve zones worden gecreëerd, bijvoorbeeld door gasinjectie of infiltratie dan kan in principe dieper worden gewerkt. Ook hier spelen de kosten echter al snel een grote rol, omdat controle complex en dus duur wordt. Horizontale PRB's zijn werkelijk maatwerk, gesteld kan worden dat ook hier de uitvoeringsdiepte van de civiele constructie bepalend is. Een Radial Collector Well bijvoorbeeld kan geplaatst worden tot circa 80 m-mv.

Systeemkeuze

De systeemkeuze hangt natuurlijk nauw samen met randvoorwaarden die gesteld worden. Als duurzaamheid een belangrijke rol speelt, lijkt een reactieve wand optimaal. In een sleuf wordt eenmalig een materiaal aangebracht waardoor doorstromend grondwater wordt ontdaan van zijn verontreiniging. Een dergelijk systeem werkt goed wanneer geen vervanging van het materiaal noodzakelijk is en als de kosten van enige overdimensionering te verwaarlozen/acceptabel zijn. Een funnel and gate-variant kan ook. Daarbij zijn minimalisatie van debiet en energie en minimalisatie en simplificatie van onderhoud belangrijke items. Het is de uitdaging geheel zelfstandige systemen te maken. Interessante ontwikkeling is het loskoppelen van de gate van de funnel. Het ontwerp van een (ijzer)scherf is het combineren van civieltechnische kennis, procestechnologie, bodemkunde en geohydrologie. Kortom, niet meer of minder complex dan een "normale" in-situ sanering.

Ontwerpvisie Amersfoort

Bij het project Amersfoort is gewerkt vanuit de volgende ontwerpvisie. De funnel wordt zodanig rondom de bron geplaatst dat binnen de funnel een stagnante zone ontstaat. Door een hevelsysteem wordt een minimale controlestroom via een gate naar de Eem geleid of zo dicht mogelijk bij de Eem geïnfiltrerd, zodat een zo groot mogelijk verhang kan worden gecreëerd. Bij de Eem treden immers de laagste stijghoogtes op. De gate kan direct achter de funnel geplaatst worden of verder stroomafwaarts. Drijvende kracht van het systeem is het stijghoogteverschil tussen de waterspiegel in de naburige Eem en het opgestuwde water stroomopwaarts van de funnel.

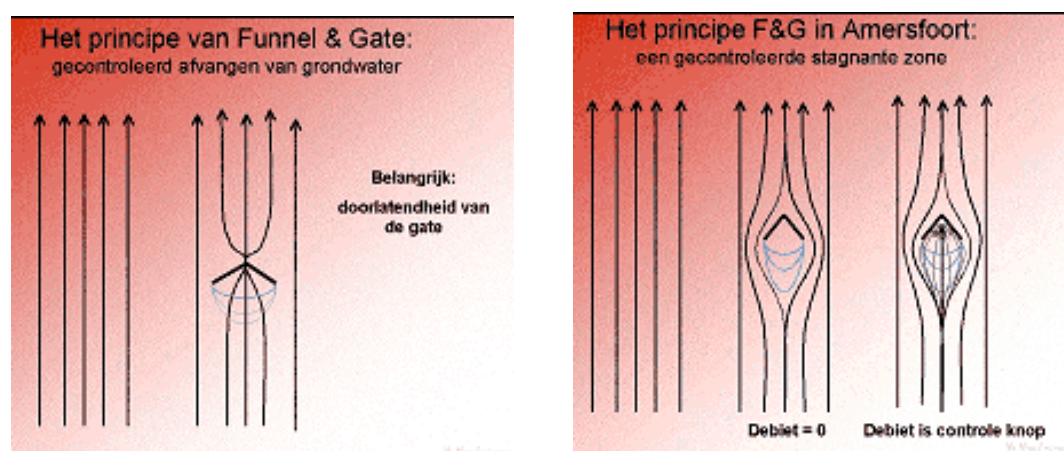


Fig. 12. Een gecontroleerde stagnante zone.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt dit ontwerpidee uitgewerkt tot een definitief ontwerp. In de navolgende paragrafen worden de belangrijkste aspecten bij het ontwerp van het ijzerscherp in Amersfoort behandeld:

- Inventarisatie van de gegevens (bodempopbouw, verontreinigingssituatie, ruimtelijke inrichting);
- Aanvullend onderzoek grondwater;
- Geohydrologische modellering;
- Selectie en toetsing van het reactief ijzer;
- Ontwerpberekeningen van de gates;
- Integratie technisch ontwerp en ruimtelijke inrichting.

Van het grondwateronderzoek, de geohydrologische modellering en de kolomexperimenten zijn uitgebreide deelrapportages opgenomen op de bijgevoegde cd-rom.

3.2 Inventarisatie gegevens locatie

Bodempopbouw en geohydrologie

De bodempopbouw binnen het CSG-gebied is globaal aangegeven in tabel 2. De gemiddelde maaiveldhoogte varieert van 5,8 m +NAP aan de westzijde tot 3,5 m +NAP aan de oostzijde. De grondwaterstand varieert van circa 2 tot 3 m +NAP.

Tabel 2. Bodempopbouw CSG te Amersfoort.

Diepte (m –mv)	Omschrijving	
0 – 3	Zandlaag, matig fijn zand	Deklaag
3 – 4	Veenlaag	Scheidende laag
4 – 7	Aandlaag, matig fijn tot grof zand	Eerste watervoerende pakket
7 – 8	Veenlaag met leemlenzen	Eerste watervoerende pakket
8 – 13	Zandlaag, matig fijn zand	Eerste watervoerende pakket
13 – 15	Veen-/leemlaag	Scheidende laag
15 – 19	Kleilaag	Scheidende laag, Eemklei
19 – 125	Zandlaag	Tweede watervoerende pakket

Het gebied wordt in het noordwesten begrensd door de Eem. De stand van de Eem fluctueert van 0,1 m -NAP in de zomer tot 0,3 m -NAP in de winter. Geohydrologisch gezien vormt de Eem een waterscheiding in het eerste watervoerende pakket (figuur 13).

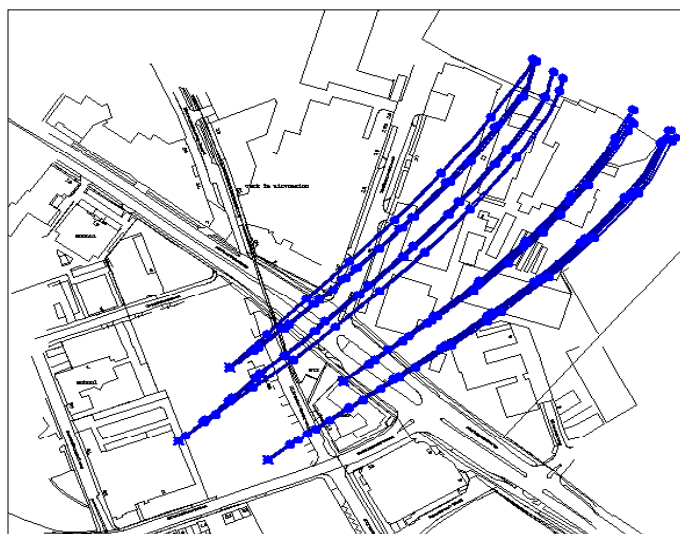


Fig. 13. Bovenaaanzicht natuurlijke grondwaterstroming.

De grondwaterstroming in het eerste watervoerend pakket staat onder invloed van de drainerende werking van de Eem en stroomt derhalve in de richting van de Eem. In het tweede watervoerend pakket is de stromingsrichting noordnoordoost. Tussen het freatisch pakket boven de eerste veenlaag en het eerste watervoerende pakket boven de Eemklei bestaat geen noemenswaardig potentiaalverschil. Er is derhalve geen duidelijke infiltratie of kwel (figuur 14).

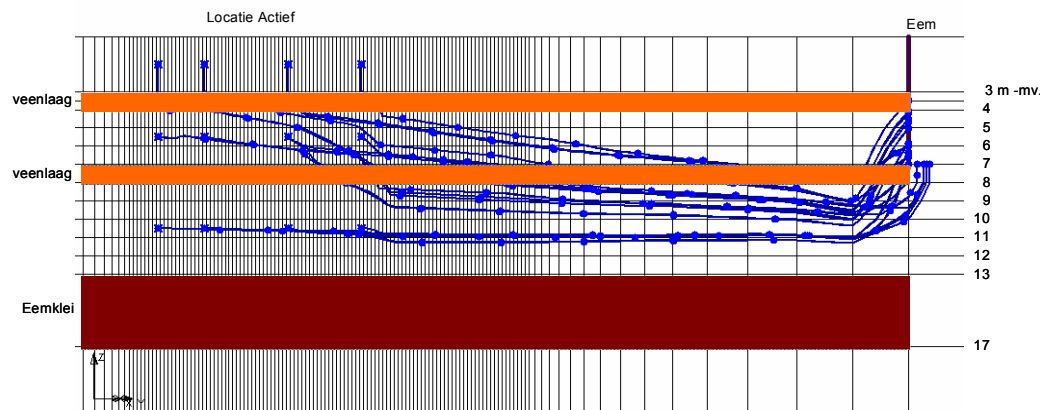


Fig. 14. Dwarsdoorsnede natuurlijke grondwaterstroming.

Tussen het eerste en het tweede watervoerende pakket bestaat in het noordnoordoostelijk deel van het CSG-gebied een duidelijke kweldruk. In het zuidzuidwestelijk deel is deze veel kleiner of licht tegengesteld (lichte infiltratiedruk).

Vanwege het relatief lage watervoerend vermogen van het eerste watervoerend pakket bevinden zich in de omgeving van het clustergebied geen grondwaterwinningen in dit pakket. Alleen de onttrekkingen ten behoeve van de tunnel van de Amsterdamseweg bevindt zich in het eerste watervoerend pakket en heeft daarmee invloed op de lokale grondwaterstroming.

Verontreinigingssituatie

Er is uitgegaan van de verontreinigingssituatie zoals bekend tijdens het saneringsonderzoek (DHV [11]). Een bovenaanzicht van de bronzone is aangegeven in figuur 15.

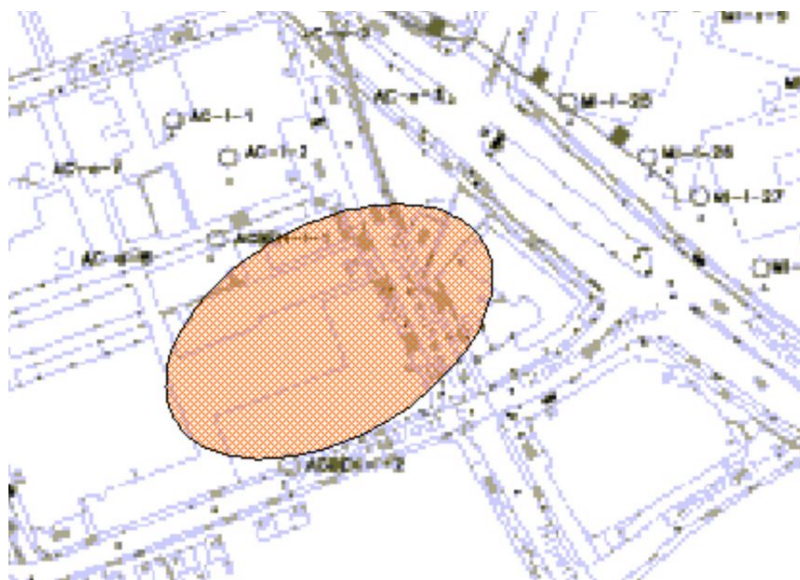


Fig. 15. Bronzone Actief II.

De bronzone is tot op de eerste veenlaag (circa 3 m –mv.) ontgraven. Het puur product is weggezakt tot op de Eemklei (circa 13 m –mv.). Het is niet met zekerheid te zeggen waar de grens in stroomafwaartse richting ligt. Verticaal strekt de zone zich uit tot op de Eemlaag.

De pluim spreidt zich uit vanaf de Amsterdamseweg naar de Eem. In het diepste pakket boven de Eemlaag is een kernspoor aan te wijzen waarin pas op enige afstand ten oosten van de Amsterdamseweg sprake is van enige biologische afbraak, ongeveer daar waar de derde veenlaag begint. In het pakket onder en vlak boven de tweede veenlaag begint deze afbraak al veel eerder, eigenlijk direct aan de stroomafwaartse zijde onder het Actief II-terrein. Het lijkt erop dat de veenlagen de anaërobe afbraakprocessen van de CKW-verontreiniging bespoedigen. Dit is geen vreemde waarneming, aangezien de condities in en rondom een veenlaag over het algemeen sterk anaëroob zijn en de veenlaag zelf voldoende organisch materiaal levert dat geoxideerd kan worden door de CKW's. Daarnaast houdt de veenlaag de CKW's vast door sorptieprocessen, hetgeen de biologische afbraak meer kans biedt.

Ruimtelijke inrichting

In verband met de herontwikkeling worden in het gebied ten zuidwesten van de Amsterdamseweg (deels) nieuwe NUTS-tracés aangelegd. In figuur 16 is een indruk gegeven van de ligging van de kabel- en leidingstroken in de toekomstige situatie.



Fig. 16. Bovenaanzicht toekomstige situatie.

Uit een inventarisatie van de kabels en leidingen in de Amsterdamseweg en de directe omgeving van de locatie blijkt dat er bij de aanleg van een reactief scherm in ieder geval een groot aantal kruisingen is te verwachten. Daarnaast zijn bij een ongunstige positionering van het ijzerscherm, door de aanwezigheid van een aantal 50 kV-leidingen en een hoge druk gasleiding, de consequenties van de te maken kruisingen qua kosten en planning vermoedelijk zodanig groot dat het verstandig is naar een alternatief tracé uit te wijken.

In het kader van de bouw van een tunnel en een nieuw verkeersplein ter plaatse van de Amsterdamseweg, wordt deze weg tijdelijk omgelegd (zie figuur 17).

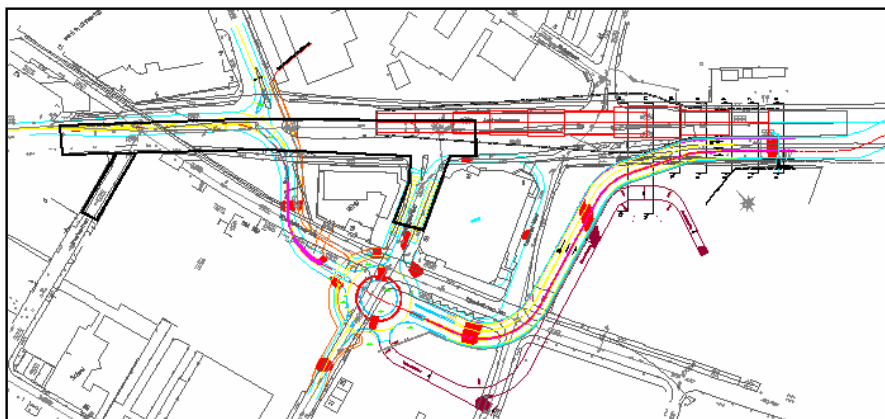


Fig. 17. Wegomlegging Amsterdamseweg.

Ter hoogte van de kruising met de Groningerstraat wordt tijdelijk een rotonde aangelegd. Ongeacht de definitieve keuze van het tracé zal het ijzerscherp de tijdelijke omlegging kruisen. Deze kruising zal vóór de ingebruikname van de omlegging gerealiseerd moeten zijn omdat het eventueel tijdelijk afsluiten van de omlegging geen optie is. De werkgebieden van de nieuw te bouwen tunnel en het ijzerscherp overlappen elkaar niet.

Op de locatie Actief II zal een kantorencomplex gebouwd worden met tweelaags ondergronds parkeren (zie figuur 4 voor de ligging van de kelders). Deze bebouwing is in eerste instantie één van de aanleidingen geweest om af te zien van het oorspronkelijke ontwerp van de isolatiewand. In het ontwerp van het ijzerscherp zou er wellicht winst geboekt kunnen worden indien de wand van het ijzerscherp tijdens de bouw van het kantorencomplex een deel van de bouwkuip gaat uitmaken. Dit zou een aanzienlijke kostenreductie betekenen en voorkomt eventuele conflictsituaties indien er twee wanden dicht bij elkaar geplaatst moeten worden.

In overleg met het CSG Eemkwartier is vastgesteld dat dit in verband met planning en reeds afgesloten contracten met projectontwikkelaars/bouwers niet mogelijk is.

3.3 Aanvullend onderzoek grondwater

Aangezien de laatste onderzoeksgegevens van het grondwater dateerden van circa 5 jaar geleden, is besloten tot een actualisatie van de verontreinigingssituatie. Tegelijkertijd is de algemene samenstelling van het grondwater onderzocht. In mei 2000 zijn op tien plekken in het onderzoeksgebied boringen verricht tot circa 16 m diepte waarbij in totaal vierentwintig peil- en monsternemingsfilters zijn geplaatst. Gedurende het afpompen van de filters zijn metingen verricht op zuurstofconcentratie, redoxpotentiaal (Eh), zuurgraad (pH), elektrisch geleidingsvermogen (EC) en temperatuur (T). Daarnaast zijn de grondwaterstanden opgenomen. De grondwatermonsters uit de peilbuizen zijn op een groot aantal chemische parameters geanalyseerd. Voor een uitgebreide beschrijving van het actualisatie-onderzoek en de resultaten wordt verwezen naar de deelrapportage op bijgevoegde cd-rom.

Uit de resultaten blijkt dat het grondwater anaëroob is. Opvallend zijn de hoge temperaturen die in het grondwater gemeten worden. De temperatuur neemt vanaf put 1 richting de Eem toe. Vanaf put 2 neemt eveneens de pH toe. In figuur 18 is een dwarsprofiel opgenomen met de verontreinigingssituatie voor CKW in de monitoringsputten.

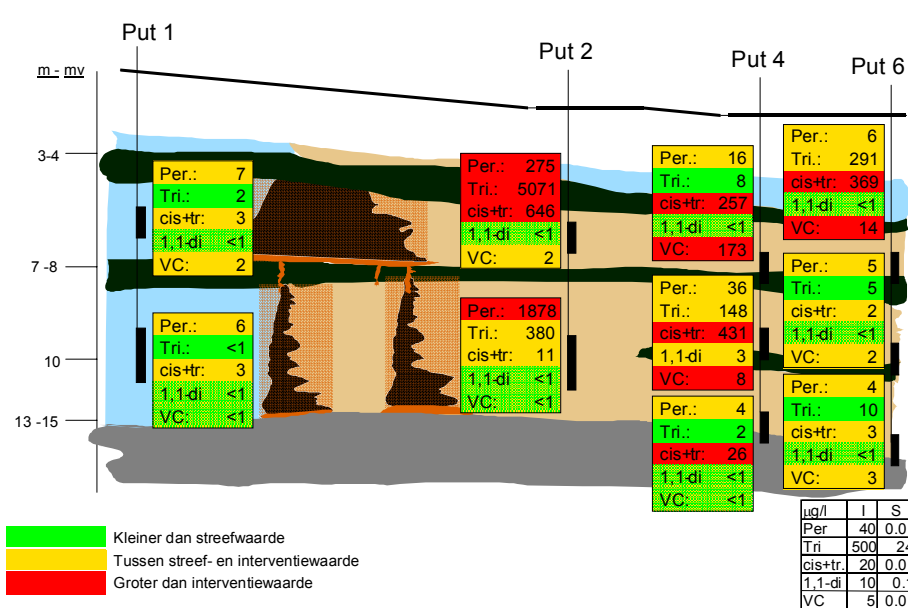


Fig. 18. Dwarsprofiel 1-2-4-6 (in µg/l).

In het grondwater wordt natuurlijke anaërobe afbraak van CKW's geconstateerd. De anaërobe afbraak van Per en Tri treedt op, maar onduidelijk is of dit proces geheel doorzet naar etheen. De afbraak lijkt te blijven steken bij Cis en/of VC. De continue aanvoer van verse per en tri uit de bron vertroebelen de waarneming. De algemene samenstelling van het grondwater is in beeld gebracht door uit tien filters grondwatermonsters te nemen en deze te analyseren op de macro-ionen. Het algemene beeld van de macrosamenstelling van het grondwater is dat van een zeer zoet, laag alkalisch grondwater met een pH van 5 à 6 dat in het noordoostelijke deel grenst aan een zoet, matig alkalisch grondwater met een pH van 7 à 8. Dit laatste grondwatertype schuift in het noordelijke centrale deel van het onderzoeksgebied onder het eerste grondwatertype; namelijk dáár waar de derde veenlaag aanwezig is.

3.4 Geohydrologische modellering

Inleiding

Net als voor (vrijwel) alle in situ saneringstechnieken is de geohydrologische modellering bij reactieve barrières cruciaal voor een goed ontwerp. Eigenlijk stelt een scherm geen specifieke eisen aan de modellering. Het bijzondere is wellicht de introductie van een 'vreemd' geohydrologisch object: een goed doorlatende actieve zone, wellicht in combinatie met een funnel of een gate (respectievelijk erg slecht of erg goed doorlatend). De modellering van een scherm is maatwerk. Daar staat tegenover dat het eigenlijk maar één keer per locatie hoeft te worden uitgevoerd. Een goed ontwerp is dermate robuust dat het ongevoelig is voor de meeste wijzigingen in de omgeving.

Kenmerk van een funnel and gate is dat de verontreiniging alleen stroomafwaarts wordt afgevangen. De verontreiniging is dus niet geheel omsloten. Dit hoeft ook niet, maar stelt uiteraard wel nauwere eisen aan het geohydrologisch model dat gebruikt wordt bij het ontwerp van het systeem. Voor de modellering is het van belang een aantal variabelen, en de variaties hierin, nauwkeurig in kaart te brengen. Deze variabelen zijn:

- opbouw grondlagen;
- doorlatendheid van de diverse grondlagen;
- stromingsprofielen en – richtingen;
- locatie van de verontreiniging en vorm van de pluim.

Daarnaast spelen een tweetal locatiespecifieke zaken een rol:

- bestaande en toekomstige ruimtelijke inrichting;
- herstel en onderhoudsmogelijkheden van het systeem.

Een uitgebreide beschrijving van de geohydrologische modellering en de resultaten zijn opgenomen in de deelrapportage op de bijgevoegde cd-rom.

Opzet geohydrologisch model

De modellering is uitgevoerd met Modflow en Modpath onder Groundwater Modelling System (GMS) v3.0. Modflow en Modpath zijn beide veel gebruikte en geaccepteerde modellen, die volgens een studie (US Army Corps van Engineers [12]) prima in staat zijn permeabele barrières zoals een ijzerschermbaan te modelleren. Modflow wordt gebruikt om de grondwaterstroming te modelleren, Modpath voor de stroombaanberekeningen.

Diverse ontwerpen van het ijzerschermbaan moeten beoordeeld worden, met diverse breedtes, lengtes en dieptes. Daarom is het van belang dat het grid dat gebruikt wordt voldoende fijn is ter plaatse van de wand. Hiertoe is een zone gedefinieerd waarbinnen de ijzerwand geplaatst moet gaan worden. Daarbij is uitgegaan van:

- De globale situering in het basisprojectplan op basis van een bestaand grondwatermodel (DHV [11]);
- De afspraak met bedrijven aan de noordzijde van de Amsterdamseweg dat het ijzerschermbaan niet verder komt dan de middenberm van de Amsterdamseweg;
- Het toekomstig tracé van kabels, leidingen en riolering;
- De maximale lengte van het scherm van 230 m;
- De situering van eventuele 'zijvleugels' in de Drentsestraat en Groningerstraat.

Er is gekozen voor een variabel grid dat, ter plaatse van het gebied waarin de ijzerwand geplaatst wordt, een horizontale gridcel-afmeting heeft van 1 bij 1 m. Verder van de locatie vandaan is i.v.m. rekensnelheid en geheugencapaciteit een grover grid gekozen. Aan de randen is de maximale gridcel-afmeting 100 bij 100 m. De verticale afmetingen van de gridcellen moeten voldoende klein zijn om ondergrondse constructies (b.v. parkeergarages) en verschillende dieptes van de funnel and gate te kunnen simuleren. Een gridcel-afmeting van 1 m in de verticaal wordt gebruikt in het eerste watervoerende pakket.

Modelberekeningen

Stap 1

In eerste instantie zijn er twee varianten uitgewerkt. Naast een ijzerschermbaan parallel aan de Amsterdamseweg met 'vleugels' in de Drentsestraat en Groningerstraat (alternatief 1) is er een tweede ontwerp dat de verontreiniging meer omsluit (alternatief 2). De twee ontwerpen staan weergegeven in figuur 19.

Het tweede ontwerp heeft als voordeel dat er een kleiner gebied ingevangen wordt en er dus een kleiner debiet door de gates gerealiseerd wordt. Op dit moment in de modellering was nog niet bekend dat de kabels en leidingen in de Amsterdamseweg zoveel problemen zouden opleveren. Alternatief 1 van het ijzerschermbaan is in het model doorgerekend.

Het ijzerschermbaan is gemodelleerd als een barrière met een weerstand van 1000 d. De plaatsing van het ijzerschermbaan zorgt voor een opbolling vóór het ijzerschermbaan en een verlaging achter het scherm. Alternatief 1 zorgt voor een maximale opbolling van ongeveer 0.55 m in het freatische pakket. Gebaseerd op het model van de natuurlijke stroming en de invangbreedte van het

scherm, krijgt variant 1 60 m³/d te verwerken. Dit is een maat voor het maximaal te verwerken debiet.

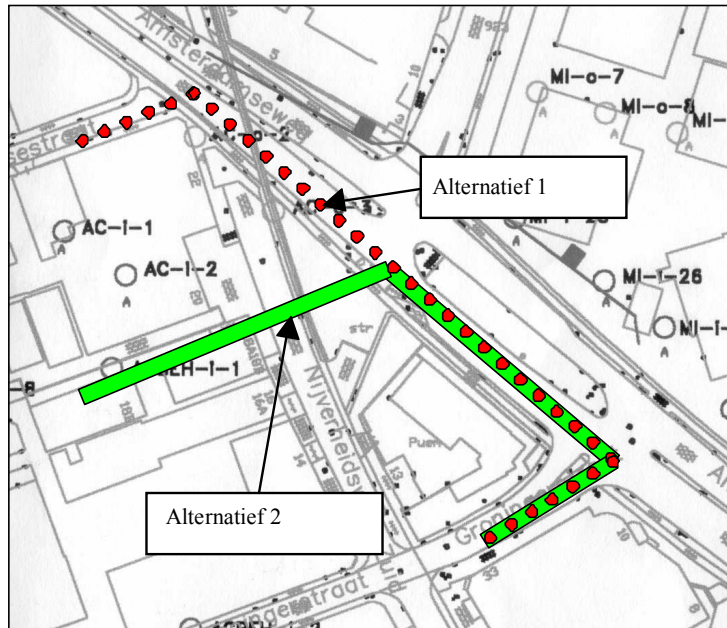


Fig. 19. Alternatieven ijzerscherm.

Alternatief 2 van het ijzerscherm is vervolgens in het model geplaatst. Variant 2 zorgt voor een maximale opbolling van ongeveer 0.50 m in het freatische pakket. Het debiet dat alternatief 2 te verwerken zou krijgen bedraagt volgens het model ongeveer 36 m³/d. Deze waarde is ook gebaseerd op het model van de natuurlijke stroming en de invangbreedte van het scherm, en is dus ook een maat voor het maximaal te verwerken debiet.

De maximale opbolling is vrijwel identiek voor beide varianten, terwijl het te verwerken debiet voor alternatief 2 lager is dan voor alternatief 1. Voor het ijzerschermontwerp is het enerzijds wenselijk het te verwerken debiet te minimaliseren en anderzijds de drukgradiënt over de wand te maximaliseren. In dit kader verdient alternatief 2 de voorkeur.

Voor alternatief 2 zijn stroombaanberekeningen uitgevoerd. Er zijn deeltjes geplaatst in het midden van de twee lagen in het eerste watervoerende pakket. Een aantal deeltjes is op de C-contour van de verontreiniging geplaatst en een aantal op de A-contour. Verder zijn er in de westelijke en oostelijke hoekpunten van de wand onttrekkingen over het gehele eerste watervoerende pakket geplaatst om regelbare (debiet) waterdoorgangen te simuleren (36, 18, 9, en 4.5 m³/d). Figuur 20 laat de stroombanen zien bij een aantal variërende debieten. In de situatie waar 36 m³/d onttrokken wordt, stromen alle deeltjes door de waterdoorgangen. In deze situatie wordt het gehele te verwerken debiet onttrokken. In de situatie waar 9 m³/d onttrokken wordt, stromen deeltjes in de noordwestelijke en zuidoostelijke startlocaties op de A-contour langs het ijzerscherm. De deeltjes startend op de C-contour stromen in de bovengenoemde situaties wél naar de onttrekkingen. Echter, in de situatie waar 4.5 m³/d onttrokken wordt, stromen enkele deeltjes afkomstig van de zuidelijke startlocaties op de C-contour langs het scherm.

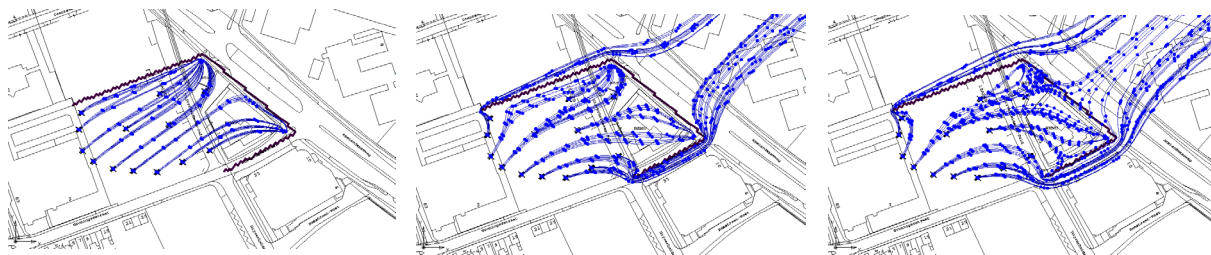


Fig. 20. Stroombanen bij variërend debiet (van links naar rechts: 36 m³/d, 9 m³/d en 4,5 m³/d).

Stap 2

In verband met de ontwikkelingen ten aanzien van de ruimtelijke inrichting (kabels en leidingen) zijn twee nieuwe varianten geselecteerd (zie figuur 21). Deze twee varianten zijn verder uitgewerkt.

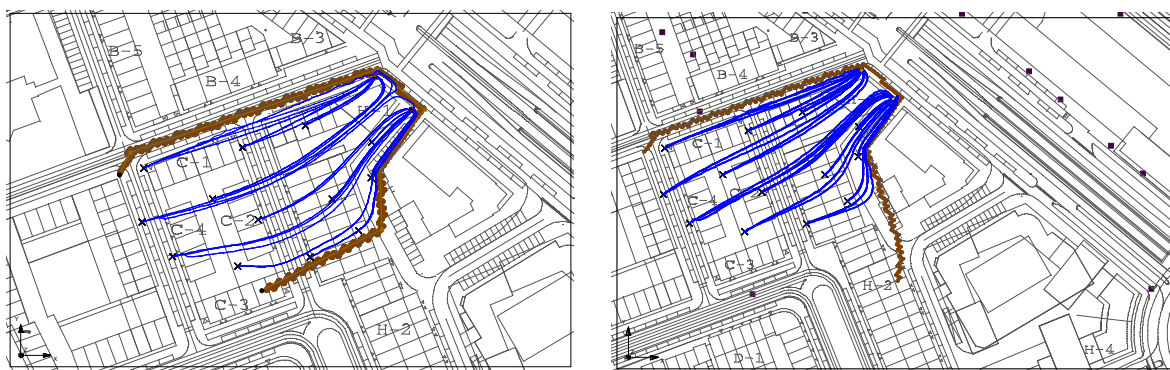


Fig. 21. Aangepaste varianten ijzerscherm (links variant 1 en rechts variant 2).

Uitgangspunt is een zo laag mogelijk debiet door de ijzerwand. De verontreiniging mag echter niet om het scherm stromen. Om dit te waarborgen moet het ijzerscherm in het model blijven functioneren in een aantal scenario's:

- Zomer- en wintersituatie;
- Grootchalig grondwatersaneringssysteem pluim;
- Parkeergarage ter plaatse van de ijzerwand (7 m –mv.) en damwand (13 m –mv.) ten zuidoosten van de ijzerwand.

Uit de berekeningen blijkt dat variant 1 in alle gevallen functioneert met een debiet van 15 m³/d door de gates van de wand. Dit is gecontroleerd door middel van stroombaanberekeningen. In de modellering is gerekend met een weerstand van 1000 d voor de wand. De scherm lengte van de tweede variant is 239 m, dit is 11 m korter dan de eerste variant. Echter, het minimale debiet waarbij het scherm goed functioneert, is hoger dan bij de eerste variant: 20 m³/d in plaats van 15 m³/d. Een andere bijkomstigheid is dat de configuratie van de tweede variant gevoeliger is voor afwijkingen in grondwaterstromingsrichting. Op basis hiervan is gekozen voor variant 1. Deze variant wordt verder uitgewerkt waarbij als ontwerpdebiet 20 m³/dag wordt aangehouden.

3.5 Selectie en toetsing reactief ijzer

Inleiding

Voor het selecteren van het juiste type ijzer en vervolgens het ontwerpen en dimensioneren van een ijzerscherm is het noodzakelijk om een aantal laboratoriumproeven uit te voeren.

De laboratoriumexperimenten dienen om:

1. het type ijzer en de hoeveelheid te bepalen;
2. de korrelgrootte en eventuele mengverhouding met zand of grind te kiezen;
3. de te verwachten reactieproducten te bepalen;
4. de vereiste verblijftijd in de gate te bepalen (dus vereiste gate-grootte);
5. de levensduur en het kwaliteitsverloop van de gate te voorspellen (verstopping, neerslagvorming).

De experimenten worden gedaan in batchproeven en kolomproeven. De batchexperimenten kunnen relatief snel worden uitgevoerd, maar hebben slechts een beperkte scope. Zij worden gebruikt om het meest geschikte reactieve medium te selecteren. Kolomproeven dienen vervolgens om meer gedetailleerde gegevens te verzamelen. Dit zijn:

1. Halfwaardetijden voor de afbraak van de contaminanten. Aan de hand hiervan wordt de uiteindelijke dikte van de reactieve barrière bepaald. Van belang hierbij zijn:
 - de stroomsnelheid van water door kolom of barrière (m/s);
 - reactieve oppervlak (specifiek oppervlak - m^2/g);
 - fractie reactief medium (bijv. nulwaardig ijzer) in reactieve barrière.
2. Levensduur en kwaliteitsverloop reactieve barrière. Van belang hierbij zijn:
 - verhouding tussen de hoeveelheid contaminant en reactief medium;
 - andere (concurrerende) reacties die reactief medium consumeren;
 - kwaliteitsverandering van de barrière door verstopping / neerslag reactieproducten;
 - eventuele verandering van reactieproducten in effluent.

De levensduur en het kwaliteitsverloop van de kolom zullen pas blijken na langere tijd. Indien voldoende gegevens zijn gehaald uit de steady-state situatie kan de stroomsnelheid worden verhoogd om dit verouderingseffect te versnellen. Kwaliteitsverloop openbaart zich als:

- toename van de effluentconcentraties. Dit kan een gevolg zijn van het opraken van reactief medium of een afname van reactief oppervlak;
- afname stromingssnelheid als gevolg van verstopping (bijv. neerslag FeOH).

Voorselectie reactief medium

Voor het verloop van de reactie zijn de volgende materiaaltechnische zaken van belang:

- *Beschikbaar reactieoppervlak*
Het beschikbare reactieoppervlak wordt hoofdzakelijk bepaald door de korrelgrootte en vorm van het metaaldeeltje. In de literatuur wordt een optimale korrelgrootte genoemd van ca. 0,2 tot 2,5 mm. Daarnaast is het van belang dat het oppervlak van het ijzerdeeltje vet- en olievrij is.
- *Samenstelling ijzer*
Het ijzer dat gebruikt wordt moet een voldoende hoog ijzergehalte hebben. In de literatuur wordt hiervoor een gehalte van minimaal 95 % metallisch ijzer gehanteerd. Het is gebleken dat reacties, waarbij uit verschillende bronnen ijzer gebruikt is, niet allemaal reproduceerbaar zijn. Soms is de gemeten reactiesnelheid circa. 20 % hoger bij het ene ijzer ten opzichte van ijzer van een andere bron. Het vermoeden bestaat dat sporenelementen hierbij een belangrijke rol kunnen spelen. Gebleken is namelijk dat het aanwezig zijn van FeS een katalyserende invloed heeft op de reactie. Geadviseerd wordt dan ook om in een vooronderzoek zoveel mogelijk bronnen van ijzer te onderzoeken.

Verreweg het meest gebruikte medium voor de dehalogenering van gehalogeneerde koolwaterstoffen is nulwaardig ijzer. De belangrijkste voordelen:

- goede reactiviteit;
- relatief goedkoop;
- gemakkelijk verkrijgbaar;
- 'onschuldig' eindproduct (ijzerzouten).

Het wordt meestal toegepast in korrelvorm (zandgrootte - afhankelijk van vereiste permeabiliteit) al dan niet gemengd met (locatie)zand.

De volgende ijzerbronnen zijn gevonden:

- Corus-IJmuiden (voormalige Hoogovens);
- Afvalproducten ijzerverwerkende industrie (geen schroot);
- Metalpulver uit Duitsland.

Corus-IJmuiden

Dit ijzer komt vrij bij de productie van staal. Tijdens het maken van staal wordt onder hoge druk zuurstof in het vloeibare ijzer geblazen om de koolstof die als ijzercarbide aanwezig is te verbranden. Hierdoor ontstaat staal. Het verschil tussen staal en ijzer ligt dus in het koolstofgehalte van het ijzer. Bij het inblazen van zuurstof komt de koolstof als CO₂-gas vrij. Het door ons gebruikte ijzer bestaat uit de gestolde druppels staal die op de grond naast de oven zijn neergekomen.

Het oppervlak is ten gevolge van dit proces zo goed als glad. Daarnaast heeft het ijzer een zeer hoge zuiverheid, wat betekent dat het kristalrooster vrijwel optimaal gevormd is. Dit kan nadelig zijn bij chemische reacties, omdat de kristalroosterenergie overwonnen moet worden. Als het kristal

minder goed gevormd en dus minder sterk is, door bijvoorbeeld meer onregelmatigheden als ijzercarbide, kan er eerder een chemische reactie optreden.

De samenstelling van het ijzer is weergegeven in tabel 3. Corus garandeert dat deze samenstelling gedurende lange tijd (jaren) ongewijzigd blijft. Dit in verband met de lang lopende contracten voor bepaalde typen staal. Daarnaast is het materiaal vet- en olievrij.

De volgende materiaalgroottes zijn beschikbaar:

- 0,2 tot 0,5 mm;
- 0,5 – 1,8 mm;
- 1,8 tot 6,0 mm.

Tabel 3. Samenstelling Corus-ijzer.

Element	Percentage
Fe	98,0
S	0,016
Si	1,0
P	0,029
Cr	0,017
Mn	0,322
Ni	0,024
Cu	0,009
Mo	0,004
Sn	0,001
C	0,109

Afvalproducten ijzerverwerkende industrie

In tabel 4 is een overzicht gegeven van de drie typen materiaal die momenteel beschikbaar zijn. Er is geen informatie bekend omtrent de deeltjesgrootte en het olie- en vetgehalte van het afval-ijzer. IJzerslijpsel komt vrij bij de ijzerverwerkende industrie. Het monster betreft slijpsel van ijzeren pijpen. Door het slijpen heeft dit een sterk geruwd oppervlak. Het nadeel van dit ijzer kan zijn dat hier nog wat olie (roestvrij houden van het ruwe ijzer) aan kan zitten.

Tabel 4. Samenstelling afvalproducten ijzerverwerkende industrie.

Component/ element	Slijpsel (%)	Walssinter onder blokstraat (%)	Uitgezeefd mon- ster blokstraat (%)
Chloride	-	< 0,01	< 0,01
As	0,008	< 0,001	0,002
Cd	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cr	0,54	0,27	0,39
Cu	0,06	0,03	0,06
Ni	0,03	<0,01	0,01
Pb	0,004	0,003	0,003
Zn	0,006	0,025	0,014
Fe	85	63	58
Mo	0,03	0,02	0,02
Co	0,007	0,003	0,004
Mn	0,50	0,48	0,57
Ti	0,005	0,046	0,107
V	0,01	< 0,01	0,01
SiO ₂	0,88	7,7	10,2
C	0,32	0,02	0,16
S	0,02	0,01	0,02
Al ₂ O ₃	-	2,7	5,4

Metalpulver (type FG 0300/300 um)

Dit ijzer is afval van gieterijen en is afkomstig van een handelsmaatschappij in metaalgranulaat in Duitsland (tabel 5). Bij het gieten van ijzer ontstaan vaak bramen en gietranden op de gietsels. Deze worden na het gieten eraf gebikt en geslepen.

Doordat het een lagere kwaliteit ijzer betreft (gietijzer is ruw ijzer uit de hoogovens) en niet staal, is dit materiaal reactiever. Daarnaast heeft dit materiaal door de "productiemethode" (slijpen en bikken) een geruwd oppervlak gekregen. Ook dit kan bijdragen aan een verhoogde reactie. Het metaalgranulaat betreft een grijszwart poeder, met een onregelmatige vorm van de deeltjes. De grootte van de deeltjes bedraagt 0,3-1,8 mm. De dichtheid is 6,7-7,2 kg/l, het specifiek oppervlak: 0,70 +/- 0,01 m²/g.

Tabel 5. Samenstelling Metalpulver.

Element	Range (%)
Fe	Ca. 92,00
C	2,8 - 3,2
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

Kosten

Door de diverse leveranciers is een kostenindicatie van de diverse ijzers gegeven. De prijzen zijn richtprijzen en zijn, zeker voor schroot, aan seizoenen onderhevig.

Tabel 6. Kosten ijzer.

Leverancier	Prijs per ton (euro)	Leveringscondities
Corus	150,-	In big bags op pallet af IJmuiden
Afval staal	160,-	Op locatie in bulk
Schroot	135,-	Op locatie geschredderd, afgezeefd op de gewenste grootte, in bulk, roestvrij
Metalpulver	270,-	Geleverd in bulk. Voor levering in big bags wordt ca. 10 euro per ton extra gerekend.

Batchexperimenten

In eerste instantie zijn een aantal eenvoudige batchexperimenten ingezet bij de Universiteit Twente (UT). Voor de batchexperimenten is ijzer van Corus gebruikt en ijzer van Metalpulver, in een later stadium ook nog ijzerkrullen en fijn slijpsel. Naast de batchexperimenten is het specifieke oppervlak van de twee ijzersoorten bepaald door middel van een BET-analyse. Het ijzer van Corus met een korrelgrootte van 0.2-0.5 mm heeft een oppervlak van 0.0006 m²/gram. Het ijzer van Metalpulver heeft een oppervlak van 0.705 m²/gram. In totaal zijn er 14 proeven uitgevoerd. Uit de experimenten is gebleken dat alleen het ijzer uit Duitsland geschikt is. Het heeft een groot specifiek oppervlak. Dit is een belangrijk aspect, maar niet uitsluitend van belang. Het slijpsel heeft een nog veel groter specifiek oppervlak, maar is toch niet reactief. Wellicht is dit (samen met het Corus-ijzer en de ijzerkrullen) meer een vorm van roestvrij staal. Met het Metalpulver-ijzer is ook ervaring opgedaan in een ijzerscherm in Rheine (Duitsland).

Het VITO in België heeft informatie over ca. 40 ijzersoorten. Het Duitse ijzer (Metalpulver) wordt gebruikt als referentiemateriaal en heeft goede eigenschappen, dat wil zeggen dat het één van de meest reactieve ijzersoorten (met een groot specifiek oppervlak) is en dat het lijkt, doordat het niet al te fijn is, dat het minder problemen zal veroorzaken met betrekking tot verstopping. Een aantal ijzersoorten was wat reactiever, maar zo fijn van structuur dat verstoppingen zeer waarschijnlijk leken. De informatie uit batchproeven kan alleen worden gebruikt voor onderlinge vergelijking van de ijzersoorten. Gemeten k-waarden kunnen bijvoorbeeld niet worden geëxtrapoleerd voor veldgebruik.

Aangezien bij de door de UT uitgevoerde batchexperimenten ook het Metalpulver ijzer minder reactief was dan verwacht, is het Corus-ijzer ter verificatie door VITO getest op de reactiviteit met betrekking tot reductieve dehalogenatie van gechloreerde verbindingen. De reactiviteit werd nagegaan via batchtesten bij 12°C in CaCO₃-oplossing (40 mg/l), waarbij TCE (13 mg/l) werd gebruikt als modelcomponent. De volgende twee reeksen werden opgestart:

- Reeks 1: Corus-ijzer (FeL1) + artificieel vervuild grondwater;
- Reeks 2: artificieel vervuild grondwater (= controle).

De resultaten zijn grafisch weergegeven in figuur 22. In aanwezigheid van het ijzer daalde de TCE-concentratie van 13 mg/l tot 2 mg/l in een tijdspanne van 30 dagen, terwijl in de controle de TCE-concentratie nagenoeg constant bleef. In tegenstelling tot andere ijzers werden hier in reeks 1 enkel 1,2cDCE en geen 1,1-DCE en VC aangetroffen als intermediaire producten. In de controle (reeks 2) konden geen intermediaire producten gedetecteerd worden. De sterk dalende redox-potentiaal en stijgende pH in aanwezigheid van het ijzer zijn typisch.

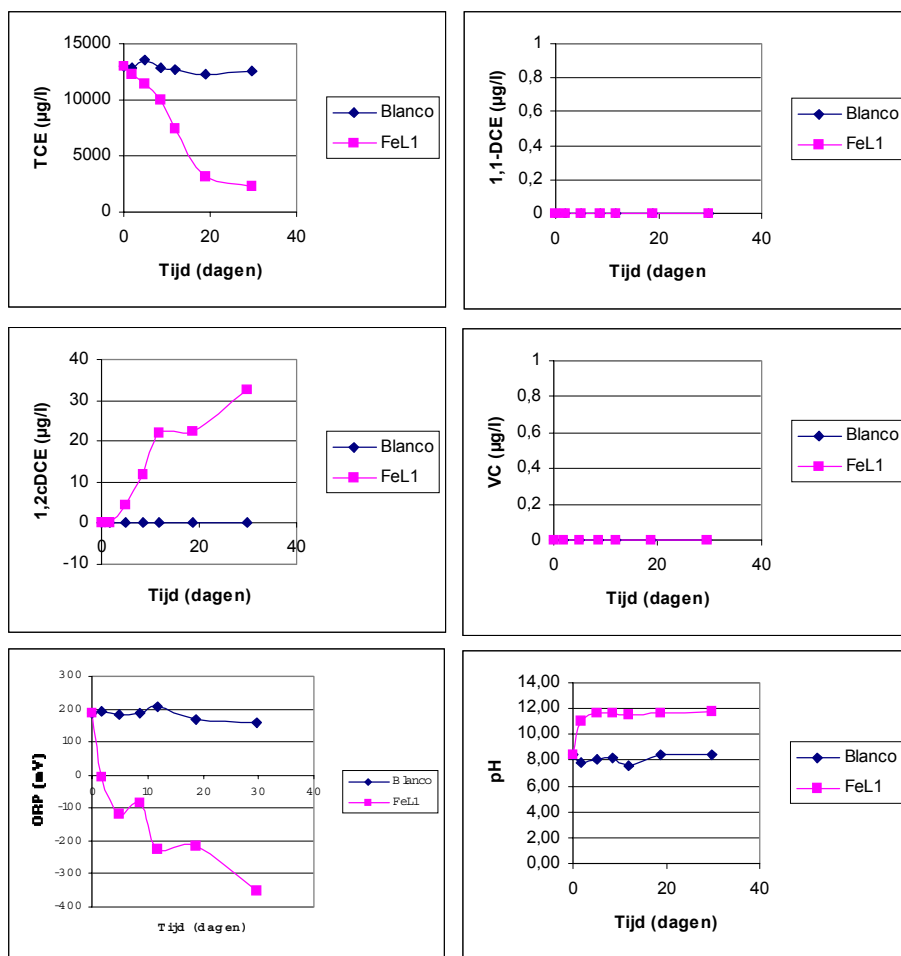


Fig. 22. Resultaten ijzerscreeningstest.

Chloridemetingen hebben aangetoond dat de concentratie aan organische chlorides in de tijd daalden en de anorganische chlorides stegen. De som van alle chlorides schommelde gedurende de hele test rond dezelfde waarde. Dit alles geeft sterke indicaties dat TCE wel degelijk werd afgebroken via reductieve dechlorinatie en niet enkel uit de waterfase verdween door sorptie aan het reactief ijzer. Uitgaande van de verkregen TCE-afbraakcurve is een pseudo eerste orde afbraakconstante (k) en halfwaardetijd ($t_{1/2}$) afgeleid. De gegevens in tabel 7 geven aan dat het Corus-ijzer veel minder reactief is dan het Metalpulver, dat op dezelfde wijze getest werd.

Tabel 7. Afbraakconstanten en halfwaardetijden.

Parameter	Corus-ijzer	Metalpulver
k (h^{-1})	0.0042	0.0117
$t_{1/2}$ (h)	166	50

Op basis van de batchexperimenten en de gegevens van VITO is voor het vervolg van het project Metalpulver als het reactieve ijzer gekozen.

Haalbaarheidstest

Bij reactieve ijzerwanden is de studie die aan de implementatie voorafgaat van groot belang. Wanneer de voorstudie heeft uitgewezen dat het beoogde terrein aan de hydrogeologische randvoorwaarden voldoet, kan overgegaan worden tot haalbaarheidsstudies op laboratoriumschaal met grondwater, afkomstig van het terrein dat bestudeerd wordt. De haalbaarheidstest, kolomtest, die is uitgevoerd voor de ijzerwand in Amersfoort, zal ter illustratie kort toegelicht worden.

Voor een uitgebreide beschrijving van het kolomexperiment wordt verwezen naar de bijgevoegde Cd-rom.

Het doel van dit haalbaarheidsonderzoek was drievoudig, nl:

- Bepaling van afbraaksnelheden voor de in het grondwater aanwezige chloorkoolwaterstoffen en voor metabolieten die in de loop van het proces gevormd worden.
- Berekening van de nodige verblijftijd van het grondwater in de wand om een reductie van de VOCl-concentraties te realiseren tot het vereiste niveau.
- Nagaan in welke mate precipitaties van mineralen het proces beïnvloeden.

Experimentele opzet

De test werd uitgevoerd in kolommen van plexiglas (L: 50 cm; D: 4 cm), met monsternamepunten aan de ingang en uitgang van de kolommen en op zeven intermediaire hoogtes (zie figuur 23). De kolommen zijn gepakt met 100% Duits ijzer (0.3-2.0 mm) met een specifieke oppervlakte van 0.7 m²/g.

De porositeit in de kolom was 0.55. Het kolomexperiment werd opgestart bij 12°C met grondwater van Amersfoort (2.072 µg/L TCE, 2.257 µg/L PCE, 928 µg/L cDCE en sporen 11DCE, tDCE en VC) dat met een snelheid van 50 cm/dag door de kolommen werd gepompt. Er werden meer dan 50 poriënvolumes (PV, gerekend voor kolom A) door de kolommen gepompt.

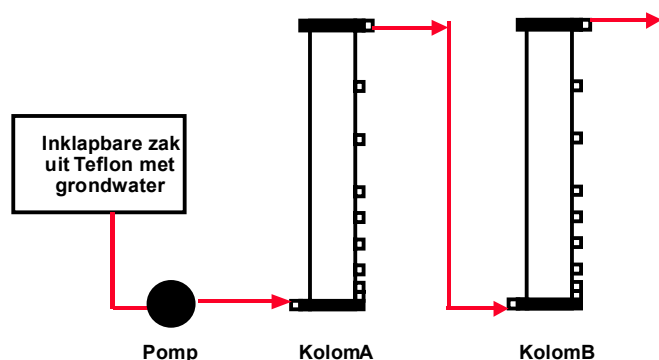


Fig. 23. Kolomopstelling.

In functie van de tijd werd de kolom bemonsterd totdat steady state concentratieprofielen verkregen werden. Op de grondwatermonsters zijn VOCl-analyses en redox- en pH-metingen uitgevoerd. Anorganische analyses zijn uitgevoerd op het influent en effluent van de kolommen na 40 PV.

Resultaten

In figuur 24 zijn de VOCl-concentratieprofielen en de pH- en redox-metingen weergegeven die opgemeten werden na 49 PV. De kolom was op dat moment in evenwicht. De PCE- en TCE-concentratie daalde snel van respectievelijk 953 µg/l en 1.262 µg/l tot bijna ondetecteerbare concentraties gedurende het doorlopen van de eerste 30 cm in de kolom. Cis-DCE accumuleerde tijdelijk en bereikte een piekwaarde van 830 µg/l na 50 cm. Op het moment dat alle TCE en PCE bijna verdwenen was (na 30 cm), begon ook de cDCE-concentratie te dalen. Na het doorlopen van beide kolommen werd nog 91 µg/l cDCE teruggevonden. Ook voor 11DCE werd een tijdelijke ophoping (max. 12µg/L) vastgesteld in de eerste 20 cm van de kolom.

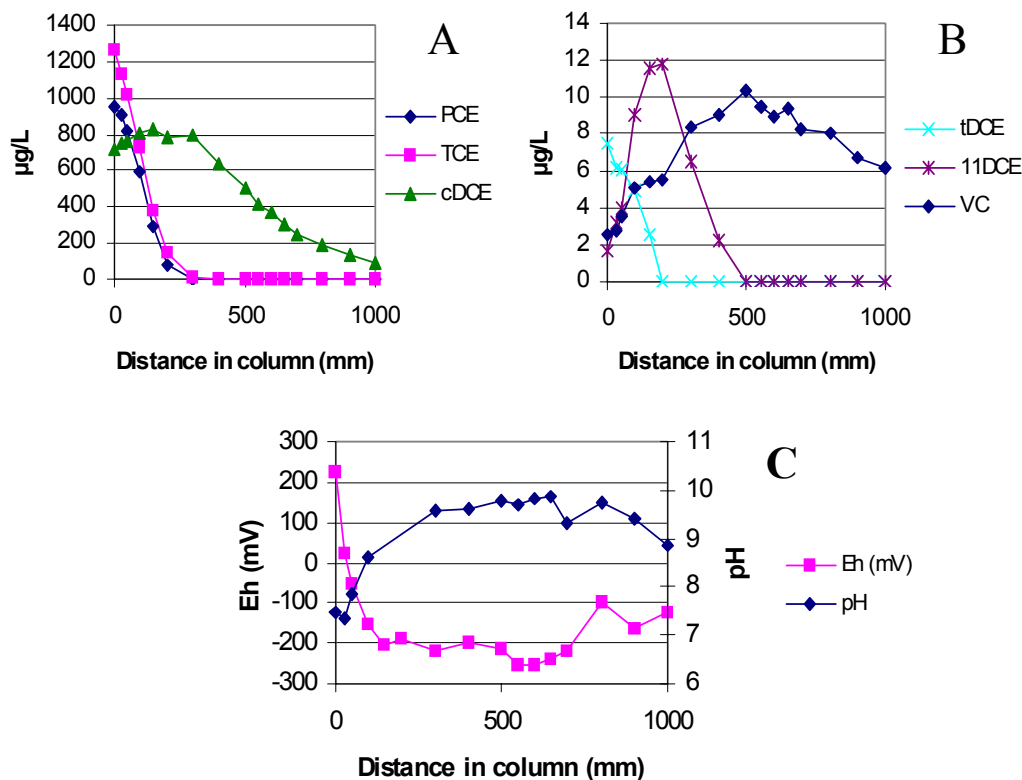


Fig. 24. Steady state VOCI-concentratieprofielen en pH- en redoxmetingen na 59 poriënvolumes.

De aanwezige sporen van t-DCE werden afgebroken in de eerste 10 cm van de kolom. De VC-concentratie steeg geleidelijk in de stromingsrichting van de kolom, van een bijna ondetecteerbare waarde tot een piekwaarde van 9 µg/l. Deze piekwaarde werd opgemeten aan de uitgang van de eerste kolom (na 50 cm). Nadien daalde de VC-concentratie. Bij het verlaten van de tweede kolom (na 100 cm) werd nog 6.2 µg/l VC gedetecteerd. Over de kolommen werd een sterke daling in redox en stijging in pH gemeten.

Bij steady state werd de anorganische samenstelling van influent and effluent vergeleken. De concentraties aan kalium, natrium en sulfaat bleven constant. Anderzijds werd een daling vastgesteld in het effluent van calcium, ijzer, magnesium, DOC, DIC en bicarbonaten. Deze resultaten laten vermoeden dat carbonaat- en hydroxide-precipitaten gevormd werden in de kolom, zoals sideriet (FeCO_3), ijzerhydroxiden ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), magnetiet (Fe_3O_4), calciet en aragoniet (CaCO_3), magnesiet (MgCO_3), sepioliet ($\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Door het dechlorinatieproces steeg de concentratie aan chloride bij het doorlopen van de kolommen.

Gebruikmakend van een eerste-orde kinetisch model, werden op basis van de verkregen concentratieprofielen afbraakconstanten en halfwaardetijden berekend via (I) lineaire regressie van Ln-getransformeerde data en (II) via fitting met de kleinste-kwadraatmethode. De resultaten (tabel 8) tonen aan dat c-DCE en VC het traagst werden afgebroken. Voor de meeste VOCIs werden met de verschillende berekeningsmethoden significant verschillende halfwaardetijden verkregen. De berekening via lineaire regressie van Ln-getransformeerde data geeft meer gewicht aan de lagere concentraties wat in bepaalde gevallen tot overschattingen van de halfwaardetijden kan leiden. Anderzijds zijn voor de fitting via de kleinste-kwadraatmethode voldoende meetpunten noodzakelijk.

Tabel 8. Halfwaardetijden berekend op basis van resultaten kolomtest.

VOCI	Influent-concentratie (piek) ($\mu\text{g/L}$)	Berekend via lineaire regressie *		Berekend via fitting met de kleinste-kwadraatmethode *	
		Halfwaarde-tijden (h)	Correlatie r2 (range)	Halfwaarde-tijden (h)	Correlatie r2 (range)
PCE	953	1.5 $\pm$ 0.2	0.846 – 0.948	3.7 $\pm$ 0.5	0.975 – 0.987
TCE	1262	1.8 $\pm$ 0,3	0.846 – 0.958	3.0 $\pm$ 0.6	0.981 – 0.994
c-DCE	928 (800)	12.4 $\pm$ 1.8	0.863 – 0.991	13.1 $\pm$ 2.1	0.741 – 0.997
t-DCE	7.5	4.3 $\pm$ 0.5	0.896 – 0.944	1.7 $\pm$ 0.1	0.993 – 0.999
1,1-VC	1.7 (12)	4.1 $\pm$ 0.3	0.967 – 1.000	5.4 $\pm$ 0.5	0.919 – 0.979
VC	2.5 (11)	25.7 $\pm$ 6.2	0.925 – 0.992	15.3 $\pm$ 5.4	0.850 – 0.995

* gemiddelde van 5 steady state concentratie profielen $\pm$ 1 standaarddeviatie

Om een inschatting te maken van de benodigde verblijftijd van het grondwater in de wand om tot een voldoende grote reductie van alle componenten te komen, werd gebruik gemaakt van:

- de concentraties die in de wand verwacht worden;
- de via laboratoriumexperimenten bepaalde halfwaardetijden;
- de van toepassing zijnde terugsaneerwaarden.

Via een molair conversiemodel dat de sequentiële afbraak van PCE beschrijft, kon vervolgens de verandering van de VOCl's in functie van de contacttijd met het ijzer berekend worden (figuur 25).

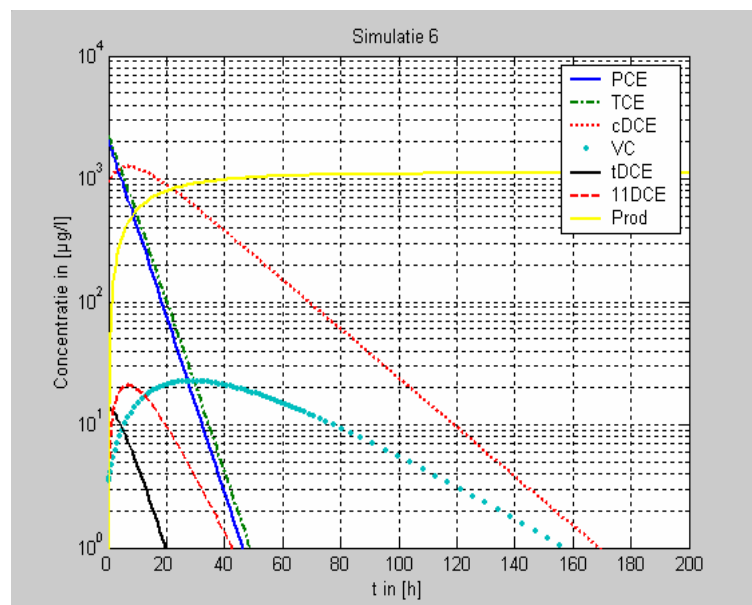


Fig. 25. Gesimuleerde evolutie van de VOCl-concentraties in functie van contacttijd met ijzer.

In deze studie is naast een molair conversiemodel dat ontwikkeld is voor Amerikaans ijzer, ook een speciaal voor deze studie aangepast molair conversiemodel gebruikt. De beide modellen waren significant verschillend (data niet weergegeven). In tabel 9 zijn de resultaten van verschillende simulaties samengevat. Hieruit blijkt dat in deze studie de methode waarmee de halfwaardetijden berekend werden en in mindere mate het gebruikte molaire conversiemodel de resultaten beïnvloeden. Uitgaande van simulatie 6 werd op basis van het kolomexperiment een benodigde verblijftijd van 109 uren berekend om de aanwezige VOCl's en de gevormde afbraakproducten te reduceren tot minder dan 20 $\mu\text{g/L}$. Op basis van simulatie 1 werd een benodigde verblijftijd van 94 uren berekend.

Tabel 9. Benodigde verblijftijden, berekend op basis van kolomexperiment.

	Benodigde contacttijd in 100% ijzerwand (h)					
	Simulatie 1 **	Simulatie 2	Simulatie 3	Simulatie 4	Simulatie 5	Simulatie 6 ***
Molair conversie-model	Algemeen	Algemeen	Aangepast	Aangepast	Aangepast	Aangepast
Berekening t1/2	Lineaire regressie	Lineaire regressie	Lineaire regressie	Lineaire regressie	Fitting****	Fitting****
Waarde t1/2	Gem.	Gem. + SD (worst case)	Gem.	Gem. + SD (worst case)	Gem.	Gem. + SD (worst case)
Terugsaneerwaarde voor VC (µg/l):						
- 10	88	109	84	101	59	77
- 5	116	141	112	135	80	103
- 2.5	142	173	137	167	99	127
Terugsaneerwaarde voor som VOCI's *						
- 20	94	107	93	107	93	109
- 10	109	128	109	127	107	126
- 5	128	152	128	150	121	143
- 2.5	151	178	147	175	135	159

Gem. = gemiddelde waarde; gem. + SD = gemiddelde waarde vermeerderd met 1 standaard deviatie; t1/2 = halfwaardetijd.

* Som van PCE, TCE, cDCE, tDCE, 11DCE en VC.

** In het verleden gebruikte simulatie.

*** Aanbevolen simulatie.

**** Gebruikmakend van de kleinste-kwadraatmethode.

Conclusies

De chemische samenstelling van het grondwater en de resultaten van de uitgevoerde kolomtest zijn positief voor het gebruik van de reactieve ijzerwandentechnologie te Amersfoort. Experimenteel werd vastgesteld dat de belangrijkste VOCI-componenten in het grondwater (PCE, TCE, cDCE, tDCE, VC en 11DCE) kunnen worden afgebroken tot onder de gestelde normen na een contacttijd van 109 uren met een 100% ijzerwand. De geobserveerde afbraaksnelheden liggen in de lijn van wat in andere kolomexperimenten geobserveerd werd. Uitgaande van een stroomsnelheid van het grondwater door de gate van 50 cm/dag en de aanname dat de porositeit van de wand gelijk is aan deze van de omliggende aquifer, werd op basis van contacttijden een benodigde dikte van de wand berekend van 227 cm. Rekening houdend met de lage flux die in de wand verwacht wordt (max. 20 m³/d) is dit haalbaar.

Minimale hoeveelheden minerale precipitaten zullen waarschijnlijk gevormd worden in de wand, waardoor de reactiviteit en efficiëntie van de wand in de tijd kan afnemen. Er wordt verwacht dat de 'bruikbaarheid' van de wand hierdoor niet met jaren verkort zal worden.

3.6 Ontwerpberekeningen gates

In het kader van het project zijn een aantal ontwerpberekeningen uitgevoerd. Doel van de berekeningen is enig inzicht te geven in de benodigde hoeveelheden ijzer. Bij de berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Afbraakkinetiek gechloreerde koolwaterstoffen volgens kolomexperiment;
- Variabel debiet grondwater door ijzerscherm van 5 tot 20 m³/dag (gerekend wordt met 20 m³/dag);
- Verontreinigingsgraad grondwater kan variëren;
- In het scherm wordt 100% zerovalent ijzer (Metalpulver) toegepast;
- Porositeit ijzer 55%;
- Effluentconcentratie voor gechloreerde koolwaterstoffen totaal is 20 µg/l.

Afbraakkinetiek

In totaal zijn door VITO zes simulaties doorgerekend. De simulaties gaan uit van verschillende afbraaksnelheden en -routes. Aanbevolen wordt om voor de berekeningen gebruik te maken van de parameters die gebruikt zijn in simulatie 6. Om inzicht te krijgen in de gevolgen van de keuze van parameterset voor de dimensies van de gate is de grootte van de gate voor twee simulaties doorgerekend. De parameters in simulatie 2 verschillen het meeste van die in simulatie 6. De resultaten zijn te zien in figuur 26. Hieruit blijkt dat de verschillen voor de grootte van de gate verwaarloosbaar zijn. Bij de berekeningen zijn de volgende influentconcentraties gebruikt: Per en Tri 2.500 µg/l, CIS 1.000 µg/l en VC 10 µg/l. Als de influentconcentraties van Per en Tri sterk verschillen, worden de verschillen tussen de scenario's groter.

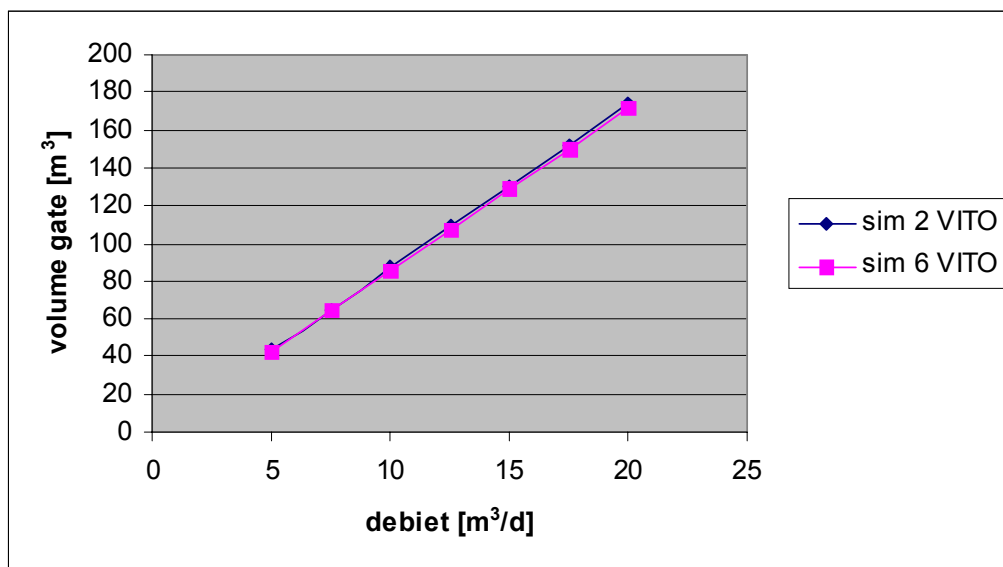


Fig. 26. Invloed parameters op volume gate.

Debiet

Het debiet kan in de tijd variëren. Volgens berekeningen kan het debiet door het scherm variëren van 5 tot 20 m³/dag. De gate moet bij elk debiet aan de lozingseis kunnen voldoen. Daar er op dit moment geen aanwijzingen zijn dat bij hogere debieten lagere VOCl-concentraties te verwachten zijn, wordt bij de berekeningen uitgegaan van een debiet van 20 m³/dag.

Verontreiniging

De verontreinigingslast door het scherm kan variëren, zowel in de tijd als per filter. In tabel 10 zijn de verschillende scenario's opgenomen die doorgerekend zijn. In de eerste vier scenario's zijn de concentraties gebaseerd op in het veld gemeten concentraties in bodemlaag 1 en 2. De locaties van de meetpunten liggen net voor, ter plaatse en vlak achter het beoogde ijzerscherm. In scenario 5 is gerekend met de influentconcentraties zoals die in de proeven van VITO zijn gemeten. Uitgangspunt is dat iedere laag 10 m³/dag levert. In tabel 10 zijn tevens de resultaten van de scenario's opgenomen. Uit de berekeningen blijkt dat bij deze influentconcentraties het volume van de gate varieert van 134 tot 182 m³. Uitgangspunt is dat de twee lagen gemengd worden alvorens ze door het ijzerscherm worden gevoerd. De influentconcentraties bij deze berekeningen zijn de gemiddelde concentraties. Daarnaast is alleen het benodigde volume ijzer berekend en is geen rekening gehouden met de configuratie van het systeem.

Tabel 10. Concentraties in grondwater in relatie tot benodigd volume ijzer.

Concentraties [$\mu\text{g/l}$]									
Laag 1	1	2	3	4	5 (put 2)	6 (VITO)	7 (PCE)	8 (cDCE)	9 (cDCE)
PCE	4.300	2.100	2.000	2.200	275	2.063	4.000	1	1
TCE	6.200	4.200	5.900	1.900	5.071	2.280	1	1	1
cDCE	83	130	970	33	646	947	1	4.000	4.000
Laag 2	1	2	3	4	5 (put 2)	6 (VITO)	TCE	TCE	PCE
PCE	41	11.000	69	36	1.878	2.080	1	1	4.000
TCE	0	300	0	150	380	2.234	4.000	4.000	1
cDCE	0	0	51	430	11	945	1	1	1
Gemiddeld	1	2	3	4	5 (put 2)	6 (VITO)	TCE	TCE	PCE
PCE	2.171	6.550	1.035	1.118	1.077	2.072	2.001	1	2.001
TCE	3.100	2.250	2.950	1.025	2.726	2.257	2.001	2.001	1
cDCE	42	65	511	232	329	946	1	2.001	2.001
Volume ijzer [m^3]									
Berekend	153	182	151	134	146	167	146	167	176

Effluentconcentratie

De effluentconcentratie voor VOCl totaal is in de berekeningen op $20 \mu\text{g/l}$ gesteld. Voor de dimensionering van de gate is dit een belangrijke parameter. Veranderingen in deze eis hebben een sterke invloed op de hoeveelheid ijzer en daarmee op de omvang van de gate.

In figuur 27 zijn de effluentconcentraties van de verschillende individuele VOCl's en VOCl-totaal uitgezet tegen de benodigde hoeveelheid ijzer. Uit deze figuur is te lezen dat voor een verdere afname van de effluentconcentratie tot bijvoorbeeld $10 \mu\text{g/l}$ er ongeveer 200 m^3 ijzer nodig is ten opzichte van ongeveer 170 m^3 bij een effluentconcentratie van $20 \mu\text{g/l}$. Een afname van de effluentconcentratie heeft een exponentiële stijging van de benodigde hoeveelheid ijzer als gevolg. Let op, door de logaritmische schaal op de y-as lijkt het lineair.

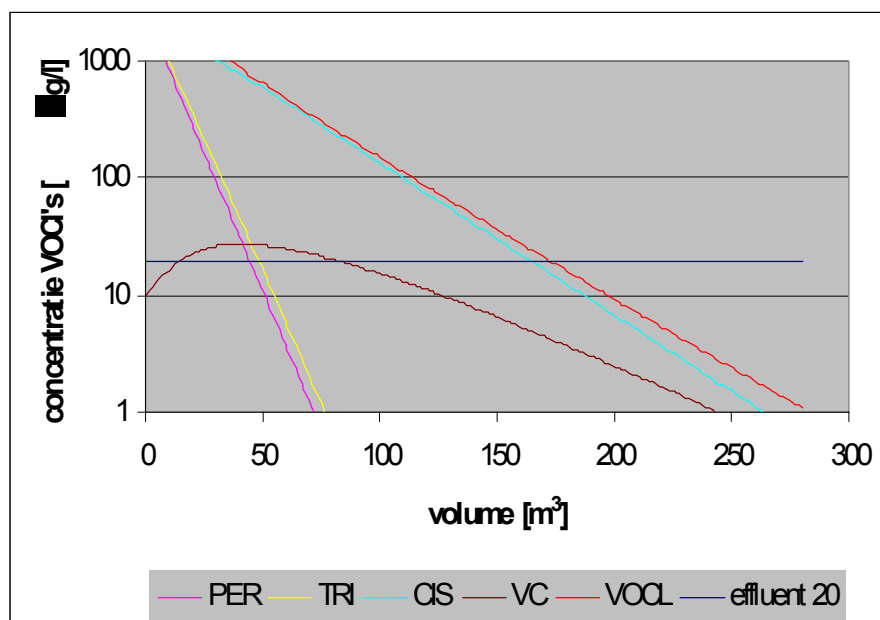


Fig. 27. Effluentconcentratie versus volume ijzer.

Configuratie systeem

Het gebruik van ijzer in het systeem kan geoptimaliseerd worden door de configuratie van de influentstromen. Vooral als de concentratieverschillen van de influentstromen groot zijn, is optimalisatie van het systeem lucratief. Vanuit zuiveringsoogpunt is het mengen van een relatief schone stroom met een relatief sterk verontreinigde stroom nadelig voor de benodigde hoeveelheid ijzer. Uitgangspunt is dat de meest vervuilde stroom eerst gezuiverd wordt. Daarna wordt de relatief schone stroom bijgemengd. In figuur 28 is dit principe in een schets weergegeven.

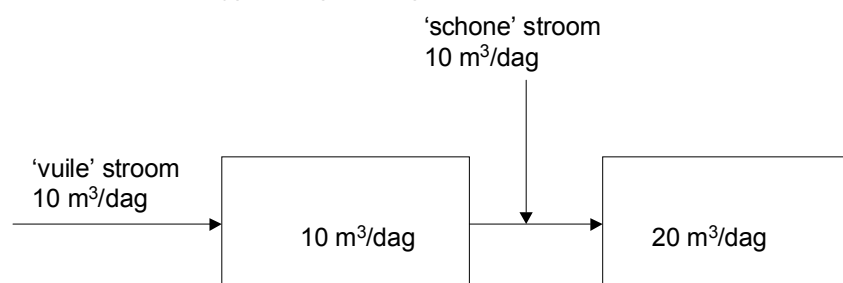


Fig. 28. Configuratie systeem.

Om dit inzichtelijk te maken zijn enkele scenario's doorgerekend. Enkele op basis van veldmetingen (1 t/m 5), de VITO-proef (6) en enkele (7 t/m 9) hypothetische gevallen. Deze staan alle samengevat in tabel 11. Hieruit blijkt dat met name bij grote concentratieverschillen de configuratie van het systeem kan bijdragen aan een aanzienlijke besparing van de benodigde hoeveelheid ijzer. In scenario 6 zijn de verschillen in influentconcentraties te klein voor een optimalisatie. De verschillen die bij de diverse scenario's per laag zijn aangegeven kunnen natuurlijk ook per onttrekkingsfilter optreden. Ook dan levert optimalisatie van de stromen een besparing van ijzer op.

Tabel 11. Input en output verschillende scenario's.

Concentratie [µg/l]									
Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Laag 1									
PCE	4.300	2.100	2.000	2.200	275	2.063	4.000	1	1
TCE	6.200	4.200	5.900	1.900	5.071	2.280	1	1	1
cDCE	83	130	970	33	646	947	1	4.000	4.000
Laag 2									
PCE	41	11.000	69	36	1.878	2.080	1	1	4.000
TCE	0	300	0	150	380	2.234	4.000	4.000	1
cDCE	0	0	51	430	11	945	1	1	1
Gemiddeld									
PCE	2.171	6.550	1.035	1.118	1.077	2.072	2.001	1	2.001
TCE	3.100	2.250	2.950	1.025	2.726	2.257	2.001	2.001	1
cDCE	42	65	511	232	329	946	1	2.001	2.001
Volume ijzer [m³]									
Laag 1	75	18	60	15	9		22	31	12
Laag 2	21	159	53	115	136		118	123	161
Totaal	96	177	113	130	145	167	140	154	173
Laag 1+2	153	182	151	134	146	167	146	167	176
Verschil	57	5	38	4	1	0	6	13	3

Conclusie

Uit de ontwerpberekeningen blijkt dat in een worst case situatie een volume ijzer benodigd is van afgerond 180 m³. Voor het verdere ontwerp wordt hiervan uitgegaan.

3.7 Integratie technisch ontwerp en ruimtelijke inrichting

De exacte locatie van het scherm is na veel overleg en het doorrekenen van een groot aantal varianten definitief vastgesteld. Een permanent scherm vraagt namelijk nogal wat van de gebruikers van de locatie. De wand mag, zelfs gedeeltelijk, niet meer worden verwijderd of beschadigd. De wand moet daarom op publiek terrein worden geplaatst en zo min mogelijk kabels, leidingen en kelders kruisen. De ligging van het definitieve scherm is weergegeven in figuur 29.

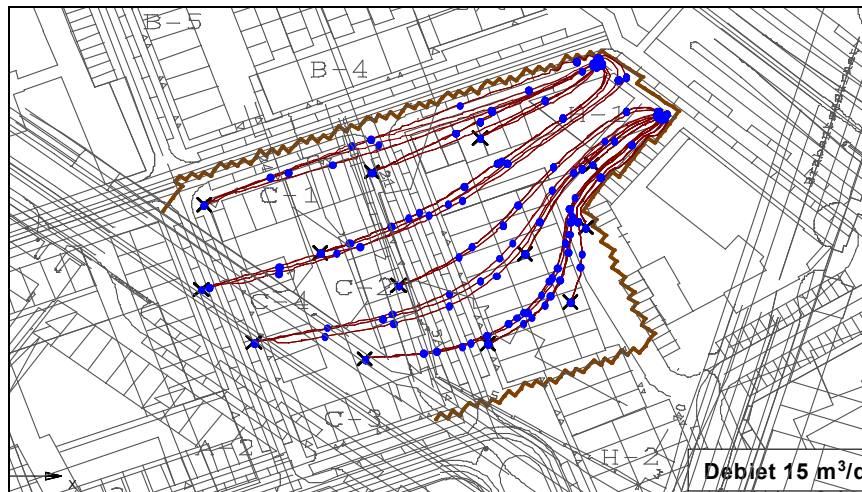


Fig. 29. Scherm in de eindsituatie.

Bij de keuze van het scherm is veel aandacht besteed aan het minimaliseren van het debiet door het creëren van een 'stagnante zone' binnen het scherm. Om al het verontreinigde grondwater uit de bronzone af te vangen wordt $15 \text{ m}^3/\text{dag}$ water onttrokken in de funnel.

Vanwege de tijdelijke omlegging van de Amsterdamseweg kan de 'oostelijke poot' van de funnel pas over circa drie jaar aangelegd worden. Om in deze periode te kunnen voldoen aan de isolatiedoelstelling worden er aan deze zijde bij de funnel twee extra onttrekkingsputten (elk $2,5 \text{ m}^3/\text{d}$) geplaatst. Met een totale onttrekking van $20 \text{ m}^3/\text{dag}$ wordt het grondwater ook in deze situatie voldoende ingevangen (zie figuur 30).

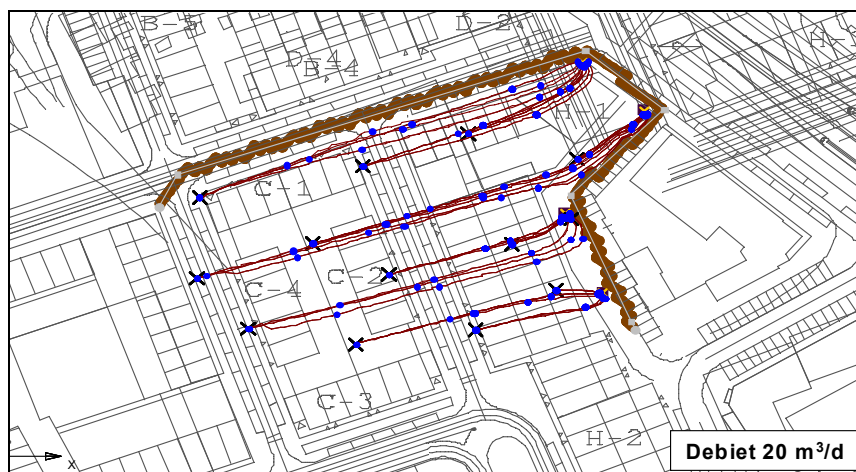


Fig. 30. Scherm gedurende wegomlegging.

Vanwege ruimtegebrek en problemen met aanwezige kabels en leidingen is besloten de gates los te koppelen van de funnel en verder stroomafwaarts te plaatsen (zie figuur 31). Het verontreinigde water wordt ingevangen tussen de damwanden en wordt afgevoerd via de onttrekkingsputten die daar zijn geplaatst. De filters in deze putten zijn geplaatst ter hoogte van de twee watervoerende pakketten die gescheiden zijn door een veenlaag. Vanaf deze putten wordt het te

zuiveren grondwater via een leidingstelsel afgevoerd naar de zuivering. Deze zuivering bestaat uit een aantal bakken die gevuld zijn met nulwaardig ijzer, waarmee de CKW's worden omgezet.

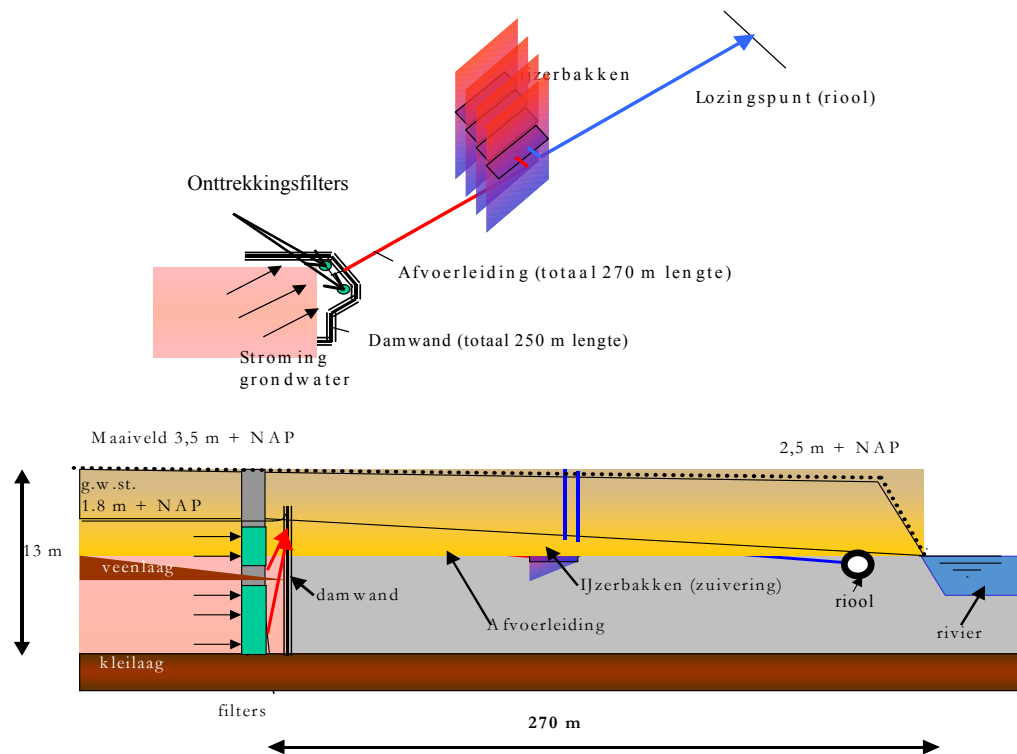


Fig. 31. Schematische weergave ijzerscherm (plattegrond en doorsnede).

Vanaf de bakken wordt het gezuiverde water via leidingen getransporteerd naar het lozingspunt. Doordat de grondwaterstand voor de schermen een stuk hoger ligt dan de waterstand bij het lozingspunt en de optredende debieten gering zijn, kan dit principe geheel onder vrij verval plaatsvinden. Het lozingspunt is zodanig gekozen dat een maximaal stijghoogteverschil wordt gecreëerd. Voor het lozingspunt is, op aandringen van het waterschap, gekozen voor een rioleering nabij de Eem. Het riool ter plaatse heeft een diepe ligging waardoor een potentiaalverschil van 1,5-2,0 meter kan worden gerealiseerd.

Uit een analyse van beschikbare locaties voor het plaatsen van de gates is een nieuwbouwlocatie van de brandweer geselecteerd. De nieuwbouw is medio april 2002 opgeleverd met een bebouwd deel en een parkeervoorziening. Gezien de nieuwbouw is een wijziging van gebruik van de locatie op korte termijn niet te verwachten. Verder is het perceel (publiek) privé-terrein. Met de brandweer zijn op hoofdlijnen afspraken gemaakt. Een groot deel van de locatie is bebouwd en slechts een beperkt deel wordt ingericht als parkeervoorziening. Een belangrijke randvoorwaarde voor het plaatsen van de gates is dat de uitrukroute van de brandweer niet gehinderd zou worden. Onder de parkeerplaats is een geschikte locatie gevonden voor de gates, die tevens voldoende groot is om de hoeveelheid ijzer in reactoren onder de grondwaterspiegel aan te brengen.

HOOFDSTUK 4

DIMENSIONERING

4.1 Algemeen

Aangezien het de eerste keer is dat een ijzerscherm in Nederland wordt toegepast, is het belangrijk een goede analyse te maken van verschillende constructiemethoden. De constructie bestaat in principe uit de volgende onderdelen:

- de funnel;
- de onttrekkingsputten en de transportleiding;
- de gate(s).

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens de verschillende dimensioneringsgrondslagen van deze onderdelen behandeld. In figuur 32 is een plattegrond van het ijzerscherm op de ondergrond van de ruimtelijke inrichting weergegeven.

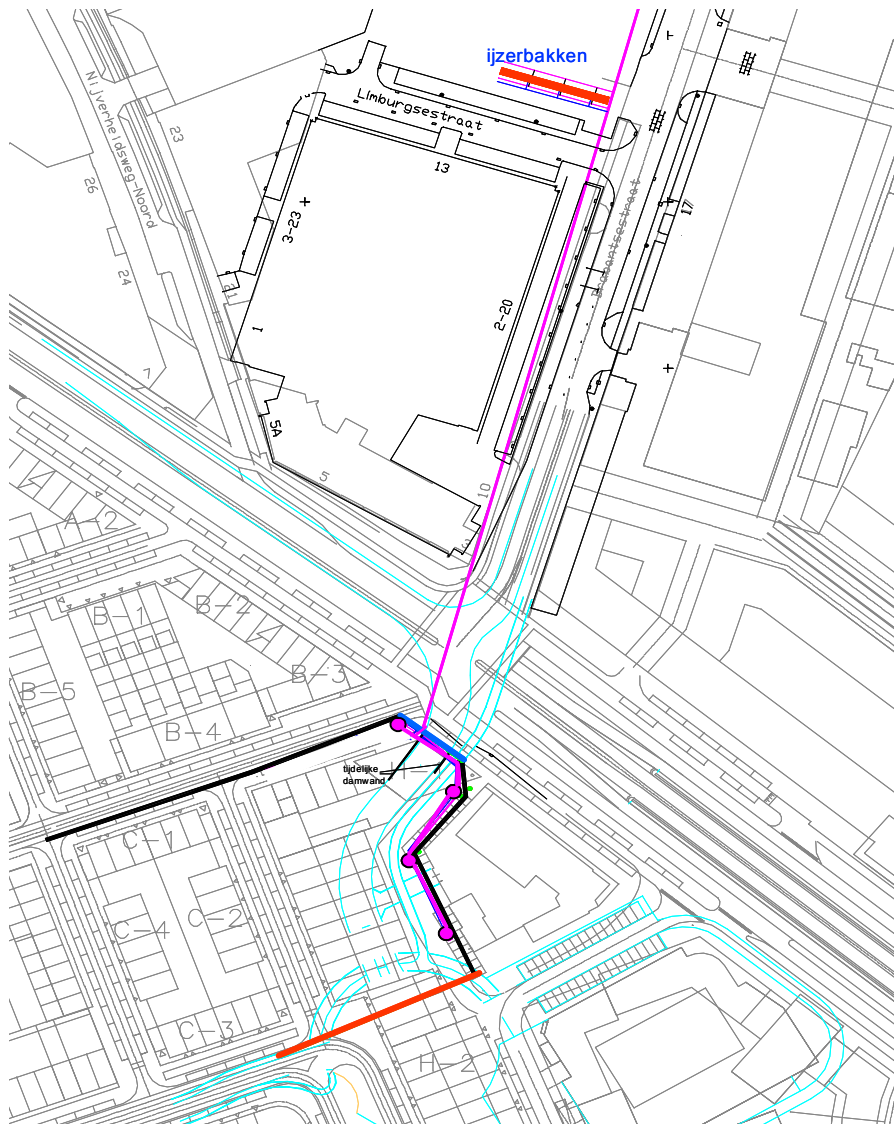


Fig. 32. Plattegrond onderdelen ijzerscherm.

Het verontreinigde water wordt ingevangen tussen de damwanden en afgevoerd via de onttrekingsputten die daar zijn geplaatst. De filters in deze putten zijn geplaatst ter hoogte van de twee watervoerende pakketten die gescheiden zijn door een veenlaag. Vanaf deze putten wordt het te zuiveren grondwater via een leidingstelsel afgevoerd naar de zuivering. Deze zuivering bestaat uit bakken die gevuld zijn met nulwaardig ijzer, waarmee de gechloreerde koolwaterstoffen worden omgezet. Vanaf de bakken wordt het gezuiverde water via leidingen getransporteerd naar het lozingspunt. Doordat de grondwaterstand voor de schermen (1,80 m +NAP) een stuk hoger ligt dan bij het lozingspunt en doordat de optredende debieten gering zijn, kan dit principe geheel onder vrij verval plaatsvinden.

4.2 Funnel

Algemeen

Om de funnel te construeren kunnen verschillende typen wanden worden toegepast:

- Damwanden;
- Cement-bentoniet wanden;
- Diepwanden;
- Groutwanden.

Een uitgebreide beschrijving van de wandconstructies met voor- en nadelen is opgenomen op de bijgevoegde Cd-rom. Hier volgt een korte beschrijving.

Damwanden

Damwanden zijn op zichzelf staande, verticale elementen die onderling zijn gekoppeld door middel van een slotconstructie over de gehele lengte van de damwand. Stalen damwanden hebben een dikte variërend van 6 tot 31 mm en lengten tot circa 30 m. Damwandplanken worden afzonderlijk of met meerdere tegelijk in de grond aangebracht door middel van trillen, heien of drukken, zonodig in combinatie met spuiten, fluïdiseren of voorboren. Met betrekking tot de grondwaterstroming zijn vooral de verbindingen tussen de opbouwende elementen van de damwand van belang: de damwandsloten. Damwandsloten zijn per definitie niet waterdicht. In de praktijk blijkt het echter mogelijk te zijn om gesloten damwandkuipen te construeren met een minimale slotlekkage. Door het injecteren van bv. bitumineuze slotvullingen kan de weerstand met een factor 10 tot 100 worden vergroot. Hiermee wordt dan een nagenoeg volkomen dichte wand bereikt.

Cement-bentonietwanden

Dit zijn in de grond aangebrachte verticale schermen (panelen) met een geringe sterkte. Ze worden voornamelijk vanwege de waterremmende eigenschappen aangebracht. In het algemeen betekent dit dus dat aan de waterremmende kwaliteit van deze wanden hoge eisen worden gesteld. Cement-bentonietwanden worden aangebracht als een vloeibare suspensie, die na verloop van tijd uithardt. De waterdichtheid wordt in voorkomende gevallen verbeterd door in de nog niet verharde suspensie een kunststoffolie aan te brengen. Twee opeenvolgende panelen dienen elkaar enigszins te overlappen, zodat geen grondwaterstroming tussen twee panelen kan optreden.

Diepwanden

Een diepwand is een door ontgraving in de grond vervaardigde betonnen wand. Diepwanden zijn vrijwel altijd van gewapend beton. De dikte varieert van 0,4 tot 1,2 m. Voor de uitvoering worden in eerste instantie geleidingsbalken op maaiveldniveau aangebracht waartussen een ondiepe sleuf wordt gegraven, over de lengte van de aan te brengen diepwand. Binnen de geleidebalken wordt in secties ontgraven, bijvoorbeeld door middel van een diepwandgrijper. De sleufwand wordt tijdens het graven gesteund door een steunvloeistof, over het algemeen wordt hiervoor bentoniet toegepast. Na het op diepte komen van een sectie worden voegmallen en eventueel

wapening geplaatst en wordt vanonder uit beton in de sleuf gebracht, waardoor de steunvloeistof wordt verdrongen. Na het aanbrengen van een sectie is een dag verhardingstijd noodzakelijk. Pas nadat de aangrenzende panelen zijn verhard en de voegmallen zijn verwijderd, kan een tussenliggend paneel worden ontgraven.

Groutwanden

Grout is een mengsel van cement, water en fijn zand. Door middel van groutinjecties kunnen verticale wanden worden gemaakt.

Jetgroutwanden zijn wanden die opgebouwd zijn uit oversnijdende jetgroutkolommen. Bij jetgroutkolommen wordt een vloeistof onder hoge druk uit verschillende ronddraaiende nozzles in de grond gespoten. Hiermee wordt de grond losgesneden en vervangen door het grout. Door nu de kolommen te laten oversnijden wordt een massief gevormd en kan een wand worden geconstrueerd. Door de nozzles niet te laten roteren, kunnen dunne wanden worden geconstrueerd. Jetgroutwanden kunnen goed worden gebruikt als waterremmende constructie, als de kolommen elkaar goed oversnijden. Als gevolg van verschillende grondlagen, eventuele insluitingen en obstakels in de ondergrond kunnen de diameter van een kolom over de diepte nogal verschillen, waardoor de kolommen elkaar niet meer overschrijden. Dit betekent dat de waterdichtheid niet altijd gegarandeerd kan worden. De uitvoering kan gebeuren met relatief weinig hinder voor de omgeving.

Keuze type wand

Voor de aanleg van de ondoorlatende wand van het ijzerscherm komen op basis van kosten en betrouwbaarheid alleen de stalen damwand en de cement-bentonietwand in aanmerking. Aan de stalen damwand wordt de voorkeur gegeven om de volgende redenen:

- De aansluiting op kelders op de locatie is eenvoudiger te bewerkstelligen. Het waterdicht aansluiten van kelders op cementbentoniet is op zijn minst moeilijk.
- Doorvoeringen van rioleringen zijn eenvoudiger te realiseren.
- De aanleg van het scherm wordt gefaseerd uitgevoerd. Staal kan makkelijk op staal worden aangesloten.

Daarnaast speelt de bodemgesteldheid een rol. Om het juiste type wand te selecteren en de wand goed te construeren is een degelijk grondonderzoek nodig. Uit de sonderingen blijkt dat tussen ca. 9,0 en 11,5 m -NAP zich een vaste zandlaag bevindt met hoge conusweerstand tot maximaal 45 MPa. Deze laag kan voor zowel de waterdichtheid als de installatie van de damwand problemen opleveren. De te gebruiken damwandpanelen zullen vrij zwaar moeten zijn, omdat de damwandpanelen anders bij de installatie zullen bezwijken. Een ander probleem bij het installeren is het gevaar van het 'uit het slot lopen' van de damwandpanelen. Dit gevaar kan worden ondervangen door gebruik te maken van slotverklikkers. Met slotverklikkers wordt aange-toond of een plank uit het slot is gelopen. Vervolgens wordt de plank getrokken en een nieuwe getrild. De waterdichtheid van het scherm kan nog verhoogd worden door het toepassen van een slotafdichting.

Mede op basis van de positieve ervaringen bij de aanleg van een stalen damwand voor de tunnelbak ter plaatse van de Amsterdamseweg is gekozen voor een stalen damwand.

Programma van eisen damwand

- De damwand dient waterdicht te zijn;
- De levensduur van de damwand dient minimaal 100 jaar te bedragen;
- De damwand dient onderhoudsvrij te zijn;
- De damwand dient minimaal 0,5 meter in de onderliggende Eemkleilaag te worden aangebracht. Deze bevindt zich op 11 m -NAP;
- De bovenkant van de damwand dient te worden afgewerkt op 2,4 m +NAP (1-3 m -mv.);

- De sloten van de damwandplanken dienen, over de gehele lengte van de plank, gevuld te worden met een middel dat bestand is tegen de VOCl-verontreiniging (tot 10 mg/l VOCl) (bijvoorbeeld Polyurethaan);
- Planken mogen niet uit het slot lopen. Om dit te controleren dienen alle planken te zijn voorzien van een slotverklikker;
- De damwand dient hoogfrequent te worden ingebracht. Tijdens het heien dienen de planken goed geleid te worden, dit om wringen in het slot te vermijden en beschadiging aan de dichting te voorkomen;
- Er dienen nieuwe planken te worden gebruikt.

Aanbrengen damwand

In figuur 32 is de definitieve situering van de damwand weergegeven. De damwand heeft een totale lengte van circa 250 meter. Van belang voor de plaatsing van de damwand zijn de volgende factoren:

- Omlegging Amsterdamseweg: Ten behoeve van de reconstructie van de Amsterdamseweg zal een omlegging worden aangelegd;
- Nieuwbouwbestemming: de ligging van kelders, privaat en publiek terrein.

Het aanbrengen van de damwand is gefaseerd uitgevoerd. Het deel ter plaatse van de wegomlegging langs de Amsterdamseweg is eind 2001 uitgevoerd (ca. 20 m, blauwe lijn in figuur 32). De damwand is aangebracht tot enkele meters in de Eemklei. Bij het plaatsen van de damwand is gebruik gemaakt van slotverklikkers en slotafdichting. De rest van de damwand exclusief de 'oostelijke poot' is medio 2001 aangebracht. De 'oostelijke poot' (ca. 60 m, rode lijn in figuur 32) wordt na de beëindiging van de tijdelijke wegomlegging aangebracht. Plaatsing zal worden uitgevoerd tussen het verwijderen van de tijdelijke rotonde en nieuwbouw. Voor zover bekend is dit medio 2003.



Fig. 33. Aanbrengen damwand langs de Amsterdamseweg.



Fig. 34. Slotafdichting.

Monitoring funnel

De isolatie voorkomt dat de sanering van het grondwater achter de bron neerkomt op dweilen met de kraan open. Ná het aanbrengen van de isolatiemaatregel mag geen verontreinigd grondwater vanaf de Actief-locatie stromen. Door monitoring van het grondwater wordt gecontroleerd of dit inderdaad niet optreedt. In het monitoringsplan op de bijgevoegde CD-rom wordt beschreven op welke wijze de performance van de isolatie wordt gemonitord en op welke wijze kan worden bijgestuurd als de isolatie niet voldoet aan de doelstelling.

Basisidee achter het monitoringsplan en het uitgewerkte isolatiesysteem is dat een dreigende verspreiding zodanig tijdig wordt geconstateerd dat daadwerkelijke verspreiding kan worden voorkomen door de procesvoering aan te passen. In het monitoringsplan wordt onderscheid gemaakt in een opstartfase en een exploitatiefase. In de opstartfase wordt vastgesteld bij welke procescondities het systeem voldoet aan de gestelde eisen. In deze fase wordt ook de wijze van monitoring tijdens de exploitatiefase ontwikkeld en getest. Op basis hiervan wordt een draaiboek opgesteld voor de bedrijfsvoering in de exploitatiefase. De opstartfase valt samen met de herinrichting van de CSG-locatie, in welk kader verschillende tijdelijke onttrekkingen geïnstalleerd worden ten behoeve van de bouw van ondergrondse parkeergarages.

4.3 Onttrekkingsputten en transportleiding

Na de herinrichting is er relatief weinig plaats voor putten en andere bovengrondse appendages. Daarnaast is de bereikbaarheid van ondergronds aangebrachte voorzieningen dan nog moeilijker. Vandaar dat een uitgebreide afweging is gemaakt van o.a. het aantal onttrekkingsbronnen en leidingen.

Uiteindelijk is gekozen voor vier onttrekkingsbronnen met een diep en een ondiep filter. De ligging van de bronnen is weergegeven in figuur 35. De bronnen worden onder het grondwaterniveau afgetakt. De bronnen worden tot maaiveld geplaatst en afgewerkt om regeneratie uit te kunnen voeren. De onttrekkingsputten worden voorzien van onttrekkingsfilters in het bovenste en onderste deel van het eerste watervoerende pakket. Een filterdiameter van 100 mm is ruim voldoende voor een onttrekking van 15-20 m³/dag, verdeeld over een viertal punten met elk twee onttrekkingsfilters. Om de intreeweerstand zo laag mogelijk te houden is een goede grindomstorting van het onttrekkingsfilter benodigd met een diameter van 300 mm. De korrelgrootte van de grindomstorting dient afgestemd te worden op de grondslag (korrelverdeling) van het omringende zand van het eerste watervoerende pakket om een langdurige werking van de onttrekkingsputten te kunnen waarborgen. De sleufbreedte van de onttrekkingsfilters dient kleiner te zijn dan de korrelgrootte van de grindomstorting (bijvoorbeeld filteropeningen van 0,8 mm breedte en filtergrind

met een diameter van 1,2 tot 1,7 mm). Een schematische weergave van de onttrekkingsfilters is weergegeven in figuur 35.

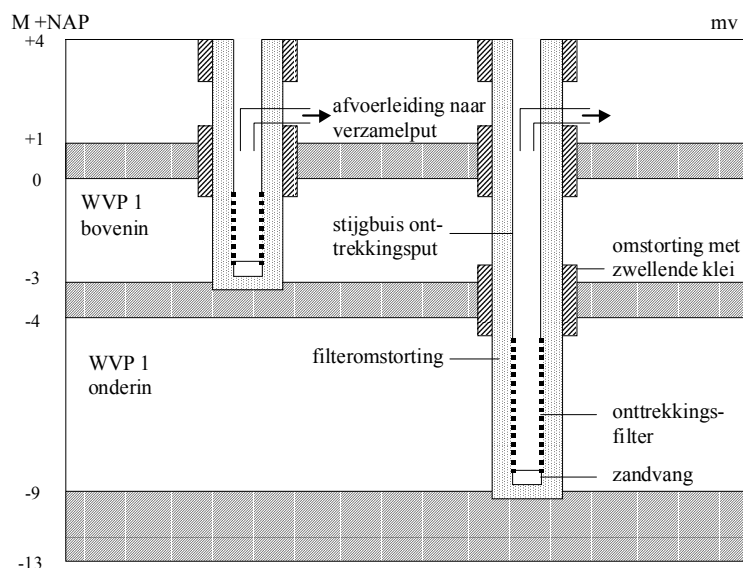


Fig. 35. Doorsnede onttrekkingsfilters.

Om te garanderen dat het onttrekkingswater anaëroob blijft dient de put aan de bovenzijde te worden afgewerkt met een kleiafdichting. Tevens dienen doorboorde kleilagen te worden afgedicht, zodat op de twee verschillende diepten het onttrekkingswater gescheiden wordt gewonnen en naar het verzamelput kan worden afgevoerd. Vervolgens kan het grondwater naar de ijzerbakken worden afgevoerd. Het is van belang dat het grondwater slechts in één richting kan stromen en geen terugstroming in de leidingen naar de onttrekkingsfilters kan optreden. Dit kan bijvoorbeeld door het opnemen van terugslagkleppen.

De afstand tussen de damwand en het lozingspunt bedraagt circa 270 meter. Tussen de damwand en het lozingspunt bevindt zich de Amsterdamseweg (en de wegomlegging). Het ontgraven van een sleuf tot circa 3 m –mv. voor het plaatsen van de leiding is technisch en financieel gezien niet haalbaar door de diepte, het verkeer en aanwezige kabels en leidingen. Daarom is gekozen voor een horizontaal gestuurde boring. De boring start in de sleuf voor de damwand en eindigt in de effluentontvangstput. Er zijn twee mogelijkheden om het grondwater te transporteren naar de ijzerbakken:

1. Vanuit de onttrekkingsputten aparte leidingen naar een verzamelput, deze leidingen daar koppelen en transporteren naar de ijzerbakken middels twee leidingen i.v.m. onttrekking uit twee watervoerende pakketten.
2. Vanuit de putten aparte leidingen doortrekken naar de ijzerbakken zonder koppelingen en put. Berekend is dat voor elke leiding een minimale diameter benodigd is van 50 mm om de leidingweerstand beperkt te houden. Kleinere diameters geven mogelijk een te hoge drukval. Uitgangspunt bij deze berekening is dat het maximale debiet per leiding 0,2 m³/h bedraagt (worst case: twee putten in werking, wat overeenkomt met vier leidingen) met een veiligheidsfactor van 2. De aangenomen lengte is 300 m.

In het kader van de mogelijkheid tot processturing is de voorkeur gegeven aan het doortrekken van acht leidingen door een mantelbuis. Voor al het leidingwerk rondom de bakken (met afsluiters e.d.) kan een diameter aangehouden worden van minimaal 30 mm. Het materiaal dient bestand te zijn tegen hoge concentraties chloorkoolwaterstoffen. Aanbevolen wordt gebruik te maken van PE. De mantelbuis voor het verbindende leidingwerk tussen het scherm en het reactieve deel is geplaatst met behulp van een HDD boring. De leiding is uiteindelijk aangebracht op

een diepte variërend van 3 tot 6 m –mv. Op deze diepte is de leiding relatief veilig voor toekomstige ontwikkelingen.

Aandachtspunten bij de dimensionering van het leidingwerk zijn:

- Indien sprake is van leidingen onder vrij verval dient de leidingdiameter “overgedimensioneerd” te worden om de weerstand te minimaliseren;
- In het leidingwerk moet voorkomen worden dat luchtsloten ontstaan.

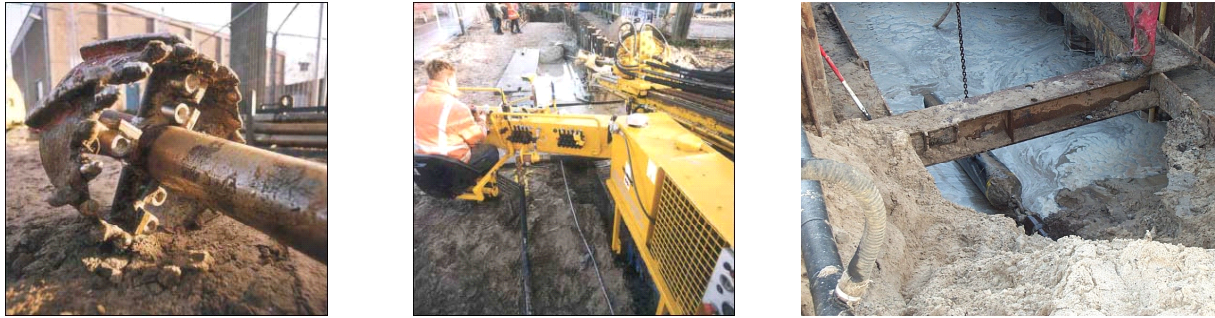


Fig. 36. Horizontale boring.

4.4 Gates

Configuratie bakken

Aangezien er gekozen is voor acht verschillende onttrekkingsfilters en leidingen, is uitgegaan van de maximale variant, dat wil zeggen acht verschillende ijzerbakken. Hiervan uitgaande zijn verschillende configuraties mogelijk: parallelstroming, seriestroming of een combinatie van beiden. De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

- Al het ijzer moet te allen tijde geheel worden benut, ook bij uitval van één of meer van de onttrekkingsfilters
- Alle acht waterstromen moeten de mogelijkheid hebben om te worden uitgezet.

Op basis van deze uitgangspunten zijn verschillende flowschema's ontwikkeld, variërend van volledige seriestroming tot volledige parallelstroming en een variant waarbij door een intensief gebruik van leidingen en afsluiters elke gewenste doorstroming bereikt kan worden. Omdat er groot belang wordt gehecht aan het aspect flexibiliteit is gekozen voor het flowschema met de maximale sturingsmogelijkheden (zie figuur 37). Voordelen van deze variant zijn onder andere:

- Flexibel ontwerp in verband met de aanvoer van grondwater;
- Parallel en serieschakeling mogelijk, dus flexibel met bepaling doorstroming (verblijftijd) in relatie tot de drukval;
- Minder verontreinigde deelstromen kunnen bij seriebedrijf later 'ingeprikt' worden. Indien bekend is dat er verschillende waterstromen worden opgevangen met verschillende concentraties, dan kan winst worden gehaald om 'relatief schoon water' een kortere verblijftijd te geven, bijvoorbeeld door deze deelstroom halverwege het volume ijzer in te prikken;
- IJzerbakken kunnen separaat uit bedrijf worden genomen.

Het water wordt verzameld via acht leidingen uit acht onttrekkingsfilters. Als elke leiding wordt aangesloten op één ijzerbak zal die bak niet meer functioneren op het moment dat de leiding of de bron niet functioneert (en andersom). Elke leiding moet eigenlijk op elke bak kunnen worden aangesloten maar natuurlijk niet altijd op alle bakken tegelijk. Dit vraagt nogal wat van het besturingssysteem, temeer omdat alle aansluitmogelijkheden van tevoren moeten worden aangebracht. Opgraven en alternatieven installeren is later niet meer haalbaar.

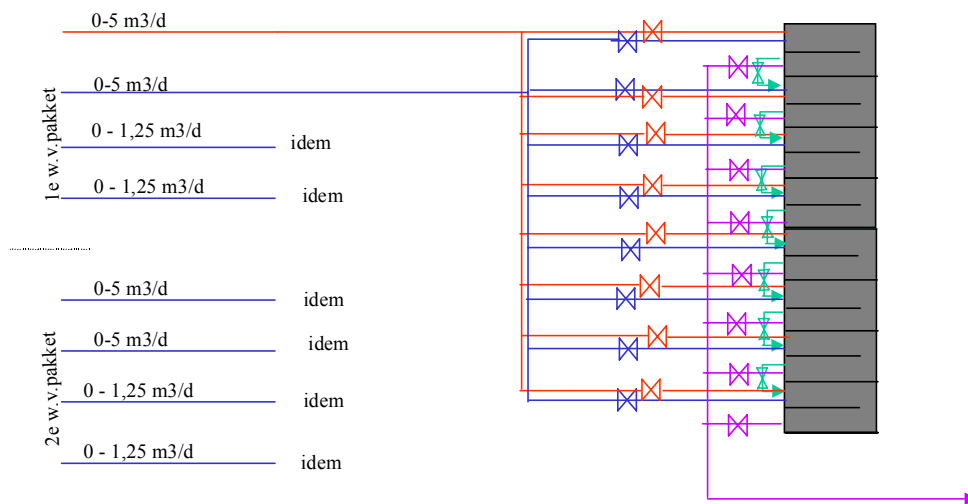


Fig. 37. Flowschema met tussenschot in bakken.

De putten worden ook onderling aangesloten omdat in principe het potentiaalverschil voldoende is om het water in serie door de putten te laten stromen. De stroming van het grondwater en de verdeling over de putten wordt centraal geregeld in de besturingsunit, waarin het influent- en effluentleidingwerk wordt verzameld. In de besturingsunit worden ook bemonsteringspunten geplaatst en kunnen diverse data worden gelogd. Dit gebeurt uiteraard handmatig, want de uitdaging is om het ijzerscherm zonder mechanische/elektrische hulpmiddelen in stand te houden. Daarbij komt dat door de bijzonder lage stroming door het leidingwerk het debiet zeer moeilijk te meten is. De lage stroomsnelheid is nodig om zo min mogelijk wrijvingverlies te krijgen over het leidingwerk. Zo is berekend dat het potentiaalverschil van ca. 1,5 meter vrijwel volledig kan worden benut voor de drukval over de putten met ijzer.

Constructie bakken

Uitgaande van een inwendig volume van 180 m^3 , verdeeld over acht bakken, zal een keuze moeten worden gemaakt in de afmetingen van de bakken. Er is gekozen om de afmetingen van de bakken te dimensioneren op $\text{length} \times \text{width} \times \text{height} = 5 \times 3 \times 1,5 \text{ m}^3$. Hierbij wordt per bak een verticaal tussenschot geplaatst. De keuze betreft een optimalisatie van kosten en technische randvoorwaarden. Enerzijds dient de hoogte van de bakken beperkt te worden om te voorkomen dat er een diepe ontgravingsput, inclusief bijbehorende bemaling, noodzakelijk is (de putten worden onder het grondwatervniveau geplaatst om anaërobie te waarborgen). Anderzijds is er slechts een beperkt oppervlak op de locatie beschikbaar gesteld voor het aanbrengen van de bakken. Door het plaatsen van een tussenschot in de bakken wordt de propstroming bevorderd en worden de leidingen tussen de bakken en de bedieningsruimte niet langer dan noodzakelijk, aangezien maar één zijde van de betonnen bakken wordt aangesloten.

Een belangrijk aspect bij de dimensionering is de drukval over de bakken. Er zal zodanig gedi-mensioneerd moeten worden dat aan de ene kant het drukverval niet te hoog wordt en aan de andere kant de spreiding in verblijftijd geminimaliseerd wordt. Met andere woorden, dat er een duidelijke propstroming optreedt in plaats van volledige menging. Hierbij zal een optimum gevonden moeten worden. De doorlatendheden (k-waarde) van het ijzer zijn bemeaten en liggen tussen 17 en 778 m/dag met een gemiddelde van 263 m/dag . Met behulp van een theoretische benadering (formule voor gepakte bedden) wordt een k-waarde gevonden van 300 m/dag , welke in dezelfde orde van grootte ligt. Gezien de grote variatie in doorlatendheden verdient het de voorkeur om het ontwerp zodanig flexibel te maken dat de doorstroming geoptimaliseerd wordt, afhankelijk van de optredende k-waarden. Als uitgegaan wordt van acht bakken met een doorstromend oppervlak van $2,25 \text{ m}^2$ (tussenschot voor een betere doorstroming) is volledige paralleldoorstroming van de bakken mogelijk bij een minimum k-waarde van 10 m/dag . Er mag vanuit worden

gegaan dat deze k-waarde altijd gehaald wordt. Bij volledige serieschakeling van alle bakken is doorstroming mogelijk bij een k-waarde van 600 m/dag. Verschillende mogelijkheden zijn uitvoerbaar bij het gekozen flowschema (zie figuur 37). Alle aansluitingen, afsluiters en monsterkranen moeten bereikbaar zijn. Dus er zal een bedieningsruimte moeten worden opgenomen in het ontwerp, die te allen tijde toegankelijk blijft.

Er zijn twee mogelijkheden om de bakken te realiseren, namelijk in staal en beton. Op grond van kosten en duurzaamheid is gekozen voor betonnen bakken. In het ene geval zal gekozen worden voor prefab betonnen tanks terwijl in een andere situatie misschien beton ter plekke storten goedkoper zal zijn. Hierbij kan ook gekeken worden naar het minimaliseren van het aantal vierkante meters wanden, vloeren en dekken door de afmetingen te variëren. Op basis van een economische afweging is in het onderhavige geval de voorkeur gegeven aan prefab betonnen tanks.

Lozingspunt

Na doorstroming van de bakken kan het water worden geloosd, in principe waren hier twee opties voorhanden, namelijk lozing op de Eem en op het riool. In overleg met het waterschap is gekozen voor lozing op het riool. De effluentleiding van de gates zal worden aangesloten op het riool, tussen de gates en het lozingspunt zal nog een controlevoorziening worden aangebracht. Belangrijk bij dit lozingspunt is dat voorkomen wordt dat rioolwater terug kan stromen in de gates. Dit kan worden gerealiseerd door de uitstroomopening van de gates altijd hoger te leggen dan het hoogst mogelijke niveau in het riool of een keerklep te gebruiken. Door het waterschap is de lozingseis gesteld op 40 µg/l VOCl-totaal. Om enige zekerheid in te bouwen is voor het ontwerp uitgegaan van een effluenteis van 40 µg/l VOCl-totaal.

Programma van eisen

Om aan de functionele eisen te kunnen voldoen worden aan het ontwerp van de bakken de volgende eisen gesteld:

IJzerbakken (gates)

- Effluentgehalte voor lozing bedraagt maximaal 20 µg/l VOCl;
- Berekend is 180 m³ netto volume aan ijzerbalk, verdeeld over acht bakken. In verband met het in de toekomst eventueel (deels) vervangen van het ijzer wordt aanbevolen in ieder geval meerdere bakken aan te leggen zodat deze separaat uit bedrijf kunnen worden genomen;
- Het water dient zoveel mogelijk als propstroom door de bakken te stromen. Het proces komt het beste tot zijn recht indien het ijzer zoveel mogelijk wordt benut met het realiseren van een propstroom in plaats van volledige menging. Het optreden van kortsluitstromen moet voorkomen worden;
- De bakken dienen anaëroob te blijven en dienen derhalve aangelegd te worden onder de grondwaterstand;
- In verband met eventuele gasvorming zal er per bak een ontluchting moeten worden aangebracht;
- Per bak moet een regeneratiemogelijkheid worden aangebracht. Deze mogelijkheid kan bestaan uit twee aansluitingen per bak (één bij de instroom en één bij de uitstroom);
- De bakken dienen waterdicht te zijn;
- Het beton dient bestand te zijn tegen hoge pH (ca. 10), lage redox (sterk anaëroob) en concentraties chloorhoudende koolwaterstoffen tot 10 mg/l;
- Om de mogelijkheid te creëren in de toekomst eventueel het ijzer te vervangen, dient op de bakken een afneembaar deksel aangebracht te worden. Het deksel moet waterdicht kunnen worden afgesloten;
- De aansluitingen van leidingen op de bakken dienen waterdicht te zijn;
- De levensduur van de bakken dient 100 jaar te bedragen;

- De bakken worden geplaatst op een diepte van 4 m –mv. en worden gevuld met ijzer. De bakken dienen bestand te zijn tegen de druk van ijzer. Het deksel van de bakken bevindt zich op 2 m-mv. Naast grond dient rekening gehouden te worden met een verkeersbelasting van zwaar verkeer;
- De bakken dienen bestand te zijn tegen eventuele zettingen;
- Op elke bak worden 2 leidingen aangesloten met een nominale diameter van 50 mm. Daartoe dienen flensen te worden aangebracht;
- De instroom- en uitstroomopening van de bakken moeten op maximale hoogte aangebracht worden zodat de bakken nooit kunnen leeglopen.



Fig. 38. Aanbrengen van de bakken en vullen met ijzer.



Fig. 39. Afsluiten van de bakken met bentoniet en afneembare deksels.

Besturingsbak / bedieningsruimte

- De ruimte moet voldoen aan de richtlijnen voor besloten ruimtes;
- De bak dient altijd toegankelijk te zijn vanaf maaiveld via een mangat. Voorkomen dient te worden dat regenwater via het mangat in de put kan stromen;
- De bak dient waterdicht te zijn;
- Alle appendages (afsluiters, meters, enz) dienen bereikbaar te zijn;
- De aansluitingen van leidingen op de bak dienen waterdicht te zijn;
- De levensduur van de bak dient 100 jaar te bedragen;
- De bak wordt geplaatst op een diepte van 3 m –mv. en blijft leeg. Om opdrijven te voorkomen dient een voorziening te worden getroffen. Het deksel bevindt zich op circa 0,5 m -mv. Naast grond dient rekening gehouden te worden met een verkeersbelasting van zwaar verkeer;

- In totaal worden 20 leidingen aangesloten op de bak. De aansluitingen dienen waterdicht te zijn. Daartoe dienen flenzen te worden ingebracht. Het betreft 10 leidingen met een nominale diameter van 44 mm en 10 leidingen met een nominale diameter van 75 mm.



Fig. 40. Besturingsbak en leidingwerk.

Monitoring gates

In verband met monitoring van het proces dienen de volgende voorzieningen te worden opgenomen in het ontwerp:

- Per bak moet het debiet bemeten kunnen worden middels een watermeter in de effluentleiding;
- Per bak moet een klep worden geïnstalleerd;
- Bij iedere bak moeten monsternamepunten aangebracht worden voor de influentstroom en de effluentstroom (met deze monsterkraan moet ook het debiet bemeten kunnen worden, handmatig met tijdsopname en opvangbak). Indien mogelijk worden monsternamepunten in één van de ijzerbakken aangebracht om het proces in de bak te kunnen volgen.

De volgende acties kunnen worden genomen:

- Alle afsluiters openzetten en meten totaaldebiet (parallelstroming over alle bakken);
- Het optreden van voorkeurstroming in een bak kan worden gecontroleerd door de toevoerkranen naar alle andere bakken te sluiten en zodoende te testen welk debiet door de bak kan stromen. Door dit voor alle bakken te testen ontstaat een beeld van de doorstroomcapaciteit van de bakken onderling, op basis waarvan het systeem later kan worden ingeregeld;
- Afsluiters zodanig instellen dat er een complete seriestroming ontstaat over alle bakken en kijken bij welk debiet dit mogelijk is. Of anders gezegd ervoor zorgen dat de bakken zoveel mogelijk in serie worden gebruikt;
- Periodiek meten influentconcentraties per waterstroom (onttrekkingspunt);
- Onttrekkingen met beduidend lagere concentraties later bijmengen in het proces (alleen mogelijk bij (partiële) seriestroming);
- Periodiek meten totale effluentconcentratie;
- Effluentconcentraties per bak (bij parallel- en seriestroming).

HOOFDSTUK 5

CONCLUSIES

In dit hoofdstuk worden de conclusies van het project samengevat aan de hand van de knelpunten zoals die geformuleerd zijn in het basisprojectplan (zie ook paragraaf 1.4).

Geochemisch

Het reactief medium bestaat uit zuiver nulwaardig ijzer dat vermalen is tot deeltjes met een grootte tussen 0,6 en 1,2 mm. De reactiesnelheid is afhankelijk van het gekozen materiaal, de samenstelling van het lokale grondwater, de influentgehalten en gewenste effluentgehalten. Voor de locatie Actief II te Amersfoort betekent dit een reactietijd van circa 110 uur.

De doorlatendheid van het scherm kan afnemen als gevolg van ijzerneerslagen, zouten en biologische activiteit. De ervaringen bij soortgelijke projecten hebben voorsnog een reikwijdte tot circa 10 jaar. Daarbij wordt geconstateerd dat bij een goed ontwerp verstoppingen geen problemen veroorzaken. Wel moet expliciet voorkomen worden dat er zuurstof bij het nulwaardig ijzer terechtkomt. Ook biologische activiteit zou aanleiding kunnen zijn voor afname van de doorlatendheid. Echter, ook hiervoor zijn nog geen aanwijzingen aangetroffen. In het algemeen kan gesteld worden dat de doorlatendheid van de wand beïnvloed zou kunnen worden, maar de wand heeft zelf een dermate hoge doorlatendheid dat deze invloed van geringe betekenis lijkt.

In het ijzer kunnen concurrerende reacties optreden die mogelijk ten koste gaan van de afbraak van de chloorkoolwaterstoffen. Aangetoond is dat de gehalten aan TOC en sulfaat afnemen. Beide lijken echter geen invloed te hebben op de reactiesnelheid. Nitraat is niet in het grondwater aanwezig. Bekend is echter dat nitraat wel degelijk van invloed is op de reactiesnelheid. Essentieel is dan ook de laboratoriumexperimenten uit te voeren met water van de locatie. Niet alleen de samenstelling van dit water en de temperatuur maar ook de (verwachte) stroomsnelheid is van invloed op de reactiesnelheid. Hierbij geldt: eerst de snelheid door de reactor vaststellen en dan de proeven uitvoeren.

Het ijzer kan in opgeloste vorm vrijkomen uit de wand en daarmee stroomafwaarts in de bodem een probleem veroorzaken. De hoeveelheid ijzer die in oplossing gaat is verwaarloosbaar. De concentratie ijzer achter het scherm is niet hoger dan voor het scherm.

Het consortium heeft diverse regeneratiemogelijkheden bekeken. Vooral benodigde hoeveelheden reagentia zijn een probleem. De oplossing wordt voorsnog gezocht in het ontwerp. Het lijkt aannemelijk dat de neerslagen als ze al optreden, met name bij de ingang van de reactor zullen optreden. Het is dan aantrekkelijk om de eerste hoeveelheid ijzer vervangbaar te maken. Echter, de aanwijzingen dat de verwachte problemen met verstopping niet zouden optreden, waren aanleiding om niet verder te zoeken.

Materiaaltechnologie

Het materiaal is korrelig. De afmetingen zijn 0,6 tot 1,2 mm. De vorm is grof. Het gedrag van ijzer in de grond is niet onderzocht omdat het ijzer wordt toegepast in een zeer gecontroleerde vorm, namelijk een achttal betonnen bakken. Het hoge soortelijke gewicht is overigens constructie-technisch gezien wel een belangrijk aandachtspunt. Zettingen en de sterkte van de betonbakken dienen goed onderzocht te worden.

Geohydrologisch

Het is mogelijk op basis van een modellering de funnel zodanig te plaatsen dat er geen langsstroming plaats zal vinden. Met monitoring zal worden aangetoond dat er daadwerkelijk geen langsstroming optreedt. Gelijkmatische stroming is vooral van belang voor wanden. In het Amersfoortse project is gekozen voor een funnel and gate-concept. Gelijkmatische stroming wordt bepaald door het openen of sluiten van kleppen.

In dit project is gekozen voor minimalisering van het debiet. Deze minimalisering wordt bewerkstelligd door de funnel zo te plaatsen dat in de bron als het ware een stagnante zone wordt gecreëerd. De hoeveelheid water die naar de gates wordt geleid wordt bepaald door de gewenste plaats van het stuwpunt. Hoe meer water wordt 'onttrokken' hoe dichter dit punt de bron in wordt 'gezogen'. Hiervoor wordt gekozen wanneer geconstateerd wordt dat langsstroming optreedt.

In het Amersfoortse project is de locatie van de gates losgekoppeld van de instroomopeningen. Alle doorstromingen worden naar de dezelfde gates geleid. De gelijkmatigheid van de doorstroming wordt daarmee bepaald door de verdeling van water door de verschillende instroomopeningen. Deze kan worden ingesteld en is niet langer onbestuurbaar zoals bij een conventioneel funnel and gate-systeem.

Civieltechnisch

In het ontwerp zijn de reactieve zones, de gates, gescheiden van de funnel. Conventioneel zijn deze gekoppeld. Water wordt nu door leidingen naar de gates geleid. Het ontwerp van de gates is gebaseerd op kennis over langzame zandfilters. Het water stroomt onder vrij verval door het systeem. Doordat de gates zijn losgekoppeld van de funnel is volledige ontwerpvrijheid verkregen. Gekozen is voor acht ondiepe reactors naar model van de langzame zandfilters, en een 'controlekamer' waarin een manifold is aangebracht van waaruit de acht instromende waterstromen op elk mogelijke wijze verdeeld kunnen worden over de acht gates. De gates zijn zo ondiep mogelijk, nog net onder de waterspiegel, aangelegd onder een parkeerplaats. Het zijn betonnen bakken met een deksel aan de bovenzijde dat indien noodzakelijk kan worden geopend.

Beleidsmatig

Het ijzer mag niet zodanig verontreinigd zijn met zware metalen dat er uitloging plaatsvindt van deze componenten. De randvoorwaarden die aan het effluent gesteld worden zijn afhankelijk van het lozingspunt, maar zijn niet noemenswaardig anders dan bij een gewone grondwateronttrekking.

Vooralsnog wordt een reactieve barrière als een beheersmaatregel gezien. Daarbij wordt een navenant monitoringssysteem geëist ten aanzien van falen en moeten daarop aansluitende fallback-maatregelen worden beschreven.

Bij het project in Amersfoort is aangetoond dat het mogelijk is een bronzone met chloorkoolwaterstoffen op een kosteneffectieve wijze te beheersen d.m.v. een ijzerscherm. Een ijzerscherm wordt gekenmerkt door relatief hoge installatiekosten, gevolgd door zeer lage onderhoudskosten. Zelfs inclusief ontwikkelkosten zijn de kosten van het ijzerscherm gelijk aan een conventioneel ontwerp (isolatievariant). De verwachting van het consortium is dan ook dat volgende toepassingen aanzienlijk goedkoper zullen zijn dan de conventionele systemen. Het ontwerp is zodanig ingericht dat een aantal onzekerheden ondervangen kunnen worden door procestechnologische bijsturing. En dit alles onder vrij verval, zodat met recht gesproken kan worden over een duurzaam systeem.

Planologisch

Planologisch heeft de ijzerscherm-techniek bewezen ideaal inpasbaar te zijn op nieuw te ontwikkelen locaties. Natuurlijk blijft creatief ontwerpen de basis voor een juiste inpassing. Alles wijst

erop dat ook inpassing in bestaande structuren één van de sterke punten van deze techniek zal zijn.

Maatschappelijk

Aan dit aspect is niet direct aandacht besteed. Bij het project waren natuurlijk wel vele partijen betrokken geweest. Het ijzerscherm wordt over het algemeen positief ontvangen, gecombineerd met een kritische houding ten aanzien van het eindresultaat: “het moet natuurlijk wel echt werken” of “als er maar niks meer langsstroomt”. Uit de reacties van de deelnemers aan het symposium Reactieve schermen (mei 2002) blijkt dat het merendeel enthousiast is over de saneringstechniek en de toepassingsmogelijkheden.

LITERATUUR

- [1] Saneringsplan “Clustergebied CSG Amersfoort”, Heijmans Milieutechniek, 14 oktober 1997.
- [2] Afweging saneringsvarianten Actief II te Amersfoort, The Three Engineers, oktober 1999.
- [3] Publicatie Rijnaarts, 1997.
- [4] Gillham, R.W., S.F. O'Hannesin; 1994; Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron; *Ground Water*, 32, 958-967.
- [5] Suthersan, S.S; 1997; Remediation engineering: design concepts; Ed. Stein & Orloff; CRC Press, Inc; Florida, US.
- [6] Matherson, L.J. P.G. Tratnyek; 1994; Reductive dehalogenation of chlorinated methanes by iron metal; *Environ. Sci. Technol.* 28, 2045-2053.
- [7] Powell, R.M., D.W. Blowes, R.W. Gillham, D. Schultz, T. Sivavec, R.W. Puls, J.V. Vogan, P.D. Powell, R. Landis. 1998. Permeable reactive barrier Technologies for contaminant remediation. EPA/600/R-98/125.
- [8] Dahmke, A., M. Elbert, W. Wüst, O. Schlicker. 1998. The effect of groundwater composition on reactivity of Fe⁰-reaction-walls. Presented at conference on groundwater Quality: Remediation and protection, Tübingen, Germany, 21-25 September.
- [9] Schlicker O., M. Ebert, M. Fruth, M. Weidner, W. Wüst, A. Dahmke. 2000. Degradation of TCE with iron: the role of competing chromate and nitrate reduction. *Ground water*, 38: 403-409.
- [10] Gavaskar et al. Permeable Barriers for Groundwater Remediation: Design, Construction and Monitoring, 1998.
- [11] Saneringsonderzoek “Clustergebied CSG Amersfoort, DHV, 12 maart 1997.
- [12] US Army Corps of Engineers, “Design Guidance for Application of Permeable Barriers to Remediate Dissolved Chlorinated Solvents”, 1997.

Basisprojectplan Reactief IJzerscherm, The Three Engineers, 12 januari 2000.

Symposium reactieve schermen, mei 2002, zie website reactieve schermen:
www.ijzerschermen.nl

