

SV-044

## Smart pump&treat naar de praktijk

Haalbaarheid en kosteneffectiviteit

Eindrapport

ing. P.J.P. Aarnink (Tauw)  
drs. R.A.A. Hetterschijt (TNO NITG)  
ir. F.J. Roelofsen (TNO NITG)

mei 2001

Gouda, CUR/SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

### **Auteursrechten**

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Smart pump&treat naar de praktijk - Haalbaarheid en kosteneffectiviteit", mei 2001, CUR/SKB, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

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

**Titel rapport**

Smart pump&treat naar de praktijk  
Haalbaarheid en kosteneffectiviteit  
Eindrapport

**CUR/SKB rapportnummer**

SV-044

**Project rapportnummer**

SV-044

---

**Auteur(s)**

ing. P.J.P. Aarnink  
drs. R.A.A. Hetterschijt  
ir. F.J. Roelofsen

**Aantal bladzijden**

**Rapport:** 26  
**Bijlagen:** 121

---

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

AVR Milieutechniek (H.J.W.Y. Opdam, 0416-344044), Bodemzorg (J. Rood, 023-5534389), De Straat (Th. H.J. Aalink, 015-2516313), DHV (G. Dekker, 033-4682929), Groundwater Technology (Y.M.M. Veenis, 015-2516372), Hanover Milieu&Veiligheids Techniek (J. Hullegie, 0318-624624), Iwaco (T. Praamstra, 010-2865684), Mourik (B. van Herpen, 0184-667244), Oranjewoud (D. Tijdeman, 0162-487293), Tauw (P.J.P. Aarnink, 0570-699784), TNO NITG (R.A.A. Hetterschijt, 030-2564704), Provincie Drenthe (J. Bakker, 0592-365820), Provincie Groningen (R. Schoonbeek, 050-3164870), Provincie Noord-Brabant (A.A. van der Koppel, 073-6808187), Provincie Noord-Holland (J.V.J.M. Kuypers, 023-5145055) Provincie Zuid-Holland (J.L. Veldhoven, 070-4416910), Stichting Bodemsanering NS (B. de Moor, 030-2988310)

---

**Uitgever**

CUR/SKB, Gouda

---

**Samenvatting**

Langzame nalevering van verontreinigingen vanuit zaklagen, slecht doorstroomde bodemlagen, organisch koolstof en kleimineralen beperken de sanerende werking van pump&treat saneringen. In het Restrisk project is aangetoond dat het onttrekken van geringe hoeveelheden grondwater afdoende is om de fysische en chemische processen die aan die nalevering ten grondslag liggen juist in stand te houden. Dit besef en daarop afgestemde onttrekkingsstrategie wordt smart pump&treat genoemd.

Een hoge natuurlijke grondwaterstroomsnelheid kan mogelijk een knelpunt zijn voor het toepassen van smart pump&treat. In dit project is het 'omleiden' van schoon grondwater om de verontreinigde locatie heen als mogelijke oplossing voor dit knelpunt meegenomen. Een andere mogelijkheid voor de reductie van onttrekkingsdebieten is het gebruiken van de bodem als reactorvat.

Dit rapport doet verslag van de screening van 27 praktijklocaties op de haalbaarheid en kosteneffectiviteit van smart pump&treat. Uit de screening blijkt dat het concept smart pump&treat in veel gevallen een reductie in onttrekkingsdebieten en kosten kan opleveren (respectievelijk 63% en 34% voor de 27 cases). Met name bij bodemsaneringsprojecten met mobiele stoffen, een watervoerend pakket en een grondwaterstroomsnelheid groter dan 5 m/jaar, is het toepassen van dit concept ten opzichte van de traditionele variant zeer goed haalbaar en kosteneffectief.

---

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

grondwateronttrekking, grondwatersanering,  
pump&treat

**Vrije trefwoorden:**

grondwater, kosteneffectiviteit,  
sanering, verspreiding

---

**Titel project**

Smart pump&treat naar de praktijk

**Projectleiding**

Nederlands Instituut voor Toegepaste  
Geowetenschappen TNO (drs. R.A.A.  
Hetterschijt, 030-2564704)

---

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda



## VOORWOORD

Dit SKB-project is uitgevoerd door een consortium van 17 partijen, waarvan 6 eindgebruikers (vijf provincies en SBNS) en 11 uitvoerende partijen (één kennisinstituut, acht adviesbureaus en twee aannemers). Dit rapport is mede tot stand gekomen door de bijdrage van de adviesbureaus en aannemers die, in overleg met de eindgebruikers, 27 locaties hebben aangeleverd en de locaties op toepassingsmogelijkheden van smart pump&treat hebben gescreend.

Voorafgaand aan de screening is voor het gehele consortium door TNO en Tauw een kennisuitwisselingsdag georganiseerd, waaraan ook Iwaco een bijdrage heeft geleverd over het model Sorwaco. De sheets van de cursus zijn in digitale vorm verkrijgbaar bij SKB.

Met dit project hopen wij het concept smart pump&treat breed onder de aandacht te hebben gebracht bij bodemsanerend Nederland.

mei 2001



## INHOUD

		SAMENVATTING	VII
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Kader	1
	1.2	Probleem- en doelstelling	1
	1.3	Leeswijzer	2
Hoofdstuk	2	THEORETISCHE ACHTERGROND SMART PUMP&TREAT	3
	2.1	Achtergronden van smart pump&treat	3
	2.2	Omleiden van de grondwaterstroming	5
	2.3	Natuurlijke afbraak	7
Hoofdstuk	3	OPZET SCREENING PRAKTIJKLOCATIES	9
	3.1	Algemeen	9
	3.2	Kader	9
	3.3	Stappenplan	9
Hoofdstuk	4	OPZET ANALYSE GESCREENDE PRAKTIJKLOCATIES	15
	4.1	Algemeen	15
	4.2	Belangrijkste elementen locaties	15
Hoofdstuk	5	ANALYSE GESCREENDE PRAKTIJKLOCATIES	17
	5.1	Eindgebruikers	17
	5.2	Kosten traditionele variant versus smart variant	18
	5.3	Deklaag of watervoerend pakket	20
	5.4	Aard verontreiniging	21
	5.5	Natuurlijke stroomsnelheid	22
	5.6	Conclusies en aanbeveling	23
	5.6.1	Conclusie variantenvergelijking	23
	5.6.2	conclusie locatiespecifieke omstandigheden	24
	5.7	Aanbeveling	24
		LITERATUUR	25
Bijlage	A	DIMENSIONERING VAN HET OMLEIDINGSSYSTEEM	
Bijlage	B	OVERZICHT BUREAU'S EN LOCATIES	
Bijlage	C	INFORMATIEFORMULIEREN SCREENINGS	

### LITERATUUR BIJLAGEN



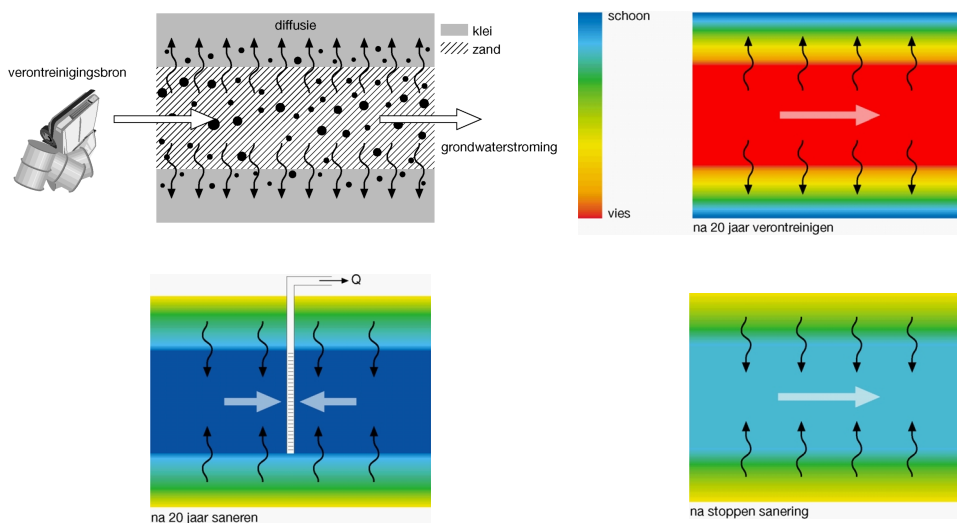


# SAMENVATTING

## Smart pump&treat naar de praktijk

### Achtergrond

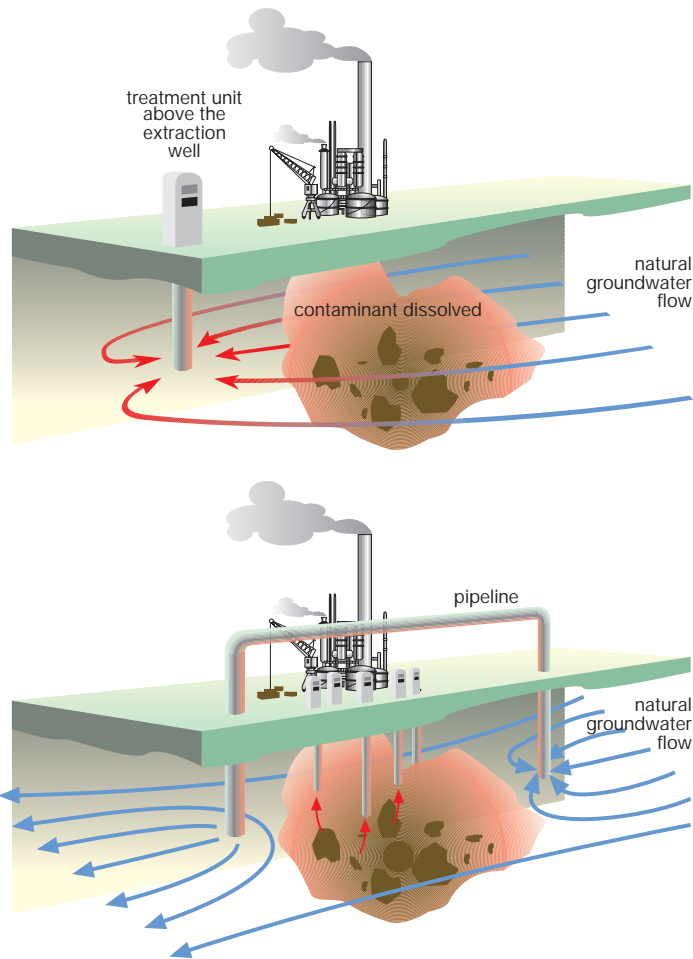
Binnen het NOBIS-project Restrisk en het SKB-project Implementatie van extensieve pump&treat op een voormalige locatie van Akzo Nobel is het concept 'smart pump&treat' onderbouwd als kosteneffectief alternatief voor 'traditionele' pump&treat saneringen. Langzame nalevering van verontreinigingen door diffusie, desorptie en oplossen belemmeren de voortgang van een pump&treat sanering (zie figuur I-1). Een pump&treat sanering waarbij juist genoeg grondwater wordt onttrokken om deze processen op gang te houden is even effectief (eindresultaat en saneringsduur), maar veel efficiënter (volume onttrokken en geloosd water, zuiveringskosten) dan een traditionele pump&treat sanering.



Figuur I-1 Niet-evenwichtssorptie als oorzaak van stagnatie.

Soms zal implementatie van smart pump&treat gepaard gaan met het 'omleiden' van schoon grondwater om de verontreinigde locatie heen of met gebruikmaking van 'natuurlijke afbraak'. Omleiden kan mogelijk worden gebruikt bij implementatie van smart pump&treat in goed doorlatende watervoerende pakketten, waar smart pump&treat zonder omleiding niet zonder verspreidingsrisico's kan worden geïmplementeerd. Door schoon grondwater om te leiden (zie figuur I-2) wordt de beheersing van de verontreiniging door een apart systeem van onttrekkingen en injectiepunten verzorgd. Indien van nature volledige afbraak van verontreinigingen plaatsvindt, kan een debietsreductie mogelijk worden door hiervan gebruik te maken. In het pluimgebied hoeft dan geen grondwater meer te worden onttrokken.

De verwachting bestaat dat een slimmere toepassing van pump&treat veel grondwater en kosten kan besparen. In hoeverre dit daadwerkelijk het geval is, zal de kosteneffectiviteit en daarmee de haalbaarheid van smart pump&treat in de praktijk bepalen.



Figuur I-2 Traditionele pump&treat (a) en smart pump&treat met omleiding van grondwater (b).

### Probleem- en doelstelling

De doelstelling van dit project is de kosteneffectiviteit en haalbaarheid van het concept smart pump&treat te bepalen door de toepassingsmogelijkheden van dit concept voor een groot aantal praktijkgevallen te screenen. Hiermee hopen wij voldoende handvatten te bieden voor toepassing van smart pump&treat in de praktijk.

### Opzet en resultaten screening

Door tien adviesbureau's/aannemers zijn 27 locaties gescreend op haalbaarheid en kosteneffectiviteit van het concept smart pump&treat. Voorafgaand is voor de screening een stappenplan opgezet. Het stappenplan houdt in dat eerst algemene informatie over de locatie wordt vastgelegd, daarna wordt de traditionele variant vastgelegd en wordt een smart-variant uitgewerkt, tot slot worden deze varianten op kosten gezet en met elkaar vergeleken. Het stappenplan is tijdens een kennisoverdrachtstag toegelicht. Ook zijn op deze dag de smart pump&treat varianten besproken.

Van de gescreende locaties is in deze rapportage een kostenanalyse gemaakt. Tijdens de analyse is ook gekeken naar de locatiespecifieke omstandigheden, zoals aanwezigheid van een deklaag of watervoerend pakket, verontreinigingsgraad en natuurlijke stroomsnelheid. Uit de analyse van de gescreende locaties kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

Variantvergelijking:

- Het verlagen van het onttrekkingsdebiet tot een minimaal beheersdebiet levert een gemiddelde besparing op van 82% op debiet en 42% op kosten;
- De bron saneren/beheersen en pluim saneren met natuurlijke afbraak levert een gemiddelde besparing op van 74% op debiet en 55% op kosten;
- Indien schoon water om de bron heen wordt geleid, de bron wordt gesaneerd/beheerst en de pluim met natuurlijke afbraak wordt gesaneerd, levert dit een gemiddelde besparing op van 83% op debiet en 42% op kosten;
- Het alleen omleiden van schoon water levert een gemiddelde besparing op van 59% op debiet en 28% op kosten;
- Het onttrekkingsdebiet voor alle traditionele varianten op de 27 gescreende locaties is ca. 6500m<sup>3</sup>/dag. Alle smart varianten leveren een debiet op van ca. 2000 m<sup>3</sup>/dag. Het toepassen van smart varianten levert in totaal voor de 27 cases een gemiddelde besparing op van 63% van het debiet;
- De berekende jaarlijkse kosten voor alle traditionele varianten bedragen ca. Nlg. 2,5 miljoen. De jaarlijkse kosten voor alle smart varianten bedragen ca. Nlg. 1,5 miljoen. Het toepassen van smart varianten levert in totaal voor de 27 cases een gemiddelde besparing op van 34%;
- Het horizontaal isoleren in een deklaag door schoon water af te vangen, levert geen of nauwelijks besparingen op.

#### Locatiespecifieke omstandigheden:

- Voor locaties met een watervoerend pakket zijn alle smart varianten gebruikt. Uit het kostenoverzicht valt te concluderen dat de inzet van natuurlijke afbraak altijd kostenbesparend werkt. Omleiden om de bron, in combinatie met natuurlijke afbraak in de pluim geeft ook een besparing. Het omleiden om de gehele verontreiniging is niet altijd kostenbesparend. Dit wordt veroorzaakt door kosten van het omleidingssysteem (meer deepwells, meer leidingwerk, meer instandhoudingskosten);
- De haalbaarheid van een smart variant is afhankelijk van de aard van de verontreiniging (mobile/immobiele stoffen);
- De haalbaarheid van de smart varianten met omleiding hebben een vrij sterke relatie met de natuurlijke stroomsnelheid. Is de stroomsnelheid groter dan 5 m/jaar, dan leveren deze smart varianten veel voordeel op in termen van kosten en waterbesparing. Op een locatie met een stroomsnelheid kleiner dan 5 m/jaar is het voordeel sterk afhankelijk van andere locatiespecifieke omstandigheden;
- Op locaties waar sanering in een deklaag plaatsvindt, leveren de smart varianten geen of nauwelijks voordeel op.

#### **Conclusies en aanbevelingen**

Uit de screening van 27 praktijklocaties kan worden geconcludeerd dat het concept smart pump&treat in veel gevallen een reductie in onttrekkingsdebieten en kosten kan opleveren.

Met name bij bodemsaneringsprojecten met mobiele stoffen, een watervoerend pakket en een grondwaterstroomsnelheid groter dan 5 m/jaar, is het toepassen van dit concept ten opzicht van de traditionele variant zeer goed haalbaar en kosteneffectief.

Aanbevolen wordt zowel bodemsaneringsprojecten in voorbereiding als die in uitvoering kritisch te evalueren en indien mogelijk het concept smart pump&treat als variant toe te passen.

Naast reductie in debieten en kosten heeft smart pump&treat ook als voordeel dat de grondwaterstand minder wordt verlaagd, zodat minder zettingsschade en/of verdrogingsschade zal optreden. Daarnaast wordt het rioelstelsel en daarmee ook het oppervlaktewater minder belast.



# HOOFDSTUK 1

## INLEIDING

### 1.1 Kader

Binnen het NOBIS-project Restrisk [1] is het concept 'smart pump&treat' uitgewerkt als ondervanging van stagnatie van grondwatersaneringen. Smart pump&treat behelst het saneren van de bodem door met een gering debiet grondwater te onttrekken, dit ter onderscheiding van traditionele pump&treat, waarbij relatief veel grondwater wordt onttrokken om de bodem snel en veelvuldig te doorspoelen.

De onderbouwing voor het concept smart pump&treat is de bevinding dat trage natuurlijke processen zoals diffusie, desorptie en het oplossen van verontreinigingen de voortgang van een pump&treat sanering bepalen en niet de stroomsnelheid van het grondwater zoals voorheen werd verondersteld. Modelberekeningen toonden aan dat een smart pump&treat sanering met een gering onttrekkingsdebiet even effectief verloopt als een traditionele pump&treat sanering.

De verwachting is dat toepassing van smart pump&treat in een aanzienlijke reductie van het onttrokken grondwater resulteert, waardoor een pump&treat sanering aanzienlijk goedkoper kan worden. Daarnaast kan debietreductie in positieve zin bijdragen aan onder andere de verdrogings- en lozingsproblematiek.

Een hoge natuurlijke grondwaterstroomsnelheid kan mogelijk een knelpunt zijn voor het toepassen van smart pump&treat (NOBIS-project Restrisk). In deze situatie lijkt een hoog onttrekkingsdebiet noodzakelijk om de verontreiniging te beheersen, iets wat vanuit saneringsperspectief niet noodzakelijk is. In dit project is de methode het omleiden van schoon grondwater over de verontreinigde locatie [2] als mogelijke oplossing meegenomen.

Een andere methode om reductie van onttrekkingsdebieten te realiseren is het benutten van de optie om de bodem als reactorvat te gebruiken. Deze methode kan mogelijk een reductie opleveren bij grondwatersanering in uitvoering, waarbij in het verleden de mogelijkheid van natuurlijke afbraak niet is onderzocht. Door verontreinigingen, met name in het pluimgebied, van nature te laten afbreken (natuurlijke afbraak), hoeft het water uit dit gebied niet te worden afgevangen.

### 1.2 Probleem- en doelstelling

Vanuit fysisch/chemisch processen kan de stagnatie van pump&treat saneringen worden verklaard. Van daaruit is het alternatieve concept 'smart pump&treat' uitgewerkt, dat rekening houdt met deze processen en daarmee efficiënter kan zijn.

Het doel van het project 'smart pump&treat naar de praktijk' is het bevorderen van grootschalige implementatie van het concept smart pump&treat door kennisoverdracht en onderzoek naar de haalbaarheid en kosteneffectiviteit ervan.

In dit project wordt aan de hand van 27 praktijkcases onderzocht in welke mate smart pump&treat kosteneffectiever is dan de traditionele oplossing. Andere voordelen van het concept smart pump&treat, zoals minder verdroging, minder lozing en een hogere milieuverdienste worden in dit project niet verder uitgewerkt.

### 1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een beknopte toelichting gegeven over de onderbouwing van het smart pump&treat concept en het 'omleiden' van schoon grondwater om smart pump&treat ook bij een hoge natuurlijke grondwaterstroomsnelheid mogelijk te maken. De theorie in dit hoofdstuk is tijdens de kennisuitwisselingsdag nader toegelicht. Daarnaast is in dit hoofdstuk het begrip 'natuurlijke afbraak' kort toegelicht. In hoofdstuk 3 wordt een toelichting gegeven op de methode waarmee de haalbaarheid en de kosteneffectiviteit van smart pump&treat voor 27 locaties is getoetst, verder screening genoemd. In hoofdstuk 4 wordt toegelicht hoe de resultaten van de screening zijn geanalyseerd om een geaggregeerd beeld te krijgen van de haalbaarheid en kosteneffectiviteit van smart pump&treat. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van deze analyse gepresenteerd. Aan het eind van dit hoofdstuk worden conclusies getrokken en een aanbeveling gedaan.

### THEORETISCHE ACHTERGROND SMART PUMP&TREAT

#### 2.1 Achtergronden van smart pump&treat

De 'traditionele' methode voor het saneren van verontreinigde locaties is het doorspoelen van de bodem door grondwater te onttrekken (pump&treat), al dan niet in combinatie met het ontgraven van hot spots. In de jaren 80 werd duidelijk dat deze aanpak minder veelbelovend was dan in eerste instantie werd gedacht: vele grondwatersaneringen bleken te stagneren [3, 4, 5 en 6]. Dit wil zeggen dat na een aanvankelijk snelle daling van de verontreinigingsconcentratie van het influent, de concentratie op een niveau blijft hangen dat boven het vooraf gestelde saneringsdoel ligt. De sanering duurt daardoor langer dan verwacht, waardoor de saneringskosten hoger uitvallen dan geraamd.

Het onttrekken van grote volumes grondwater kan de sanering niet versnellen. Hetterschijt en Te Stroet [1] toonden aan dat een gering onttrekkingsdebiet van enkele kubieke meters per dag zelfs even effectief kan zijn als een debiet van honderden kubieke meters per dag. Wanneer hiermee bij het ontwerp van een pump&treat sanering rekening wordt gehouden, kan meer kosteneffectief worden gesaneerd (smart pump&treat). Belangrijke voordelen hiervan zijn een aanzienlijke kostenbesparing op de zuivering van het onttrokken grondwater en een geringere verlaging van de grondwaterstand. Vanuit provincies wordt aangegeven dat dat laatste met name in het kader van de verdrogingsproblematiek gewenst is.

De oorzaak van de genoemde stagnatie is, dat het verloop van een pump&treat sanering wordt gelimiteerd door bepaalde niet-evenwichtsprocessen in de bodem. Van een dergelijk proces is sprake wanneer bijvoorbeeld slecht doorlatende lagen naast goed doorstroomde bodemlagen voorkomen (zie figuur 1). De verontreinigingen zijn in de loop der jaren in de bodemlagen met geringe doorlatendheid gediffundeerd. Na een periode van grondwater onttrekking is de verontreiniging verwijderd uit de goed doorstroomde bodemlagen, ook wel mobiele zones genoemd. Er ontstaat nu een concentratiegradiënt tussen deze mobiele zones en de slecht doorlatende lagen, ook wel immobiele zones genoemd. Door deze gradiënt komen processen als diffusie en desorptie op gang. Deze processen kunnen echter niet worden versneld door de bodem met grondwater te blijven doorspoelen, immers de concentratiegradiënt is al tot stand gekomen.

Vaak werd de verwijdering van verontreiniging uit de mobiele zones als maatgevend voor de saneringsduur gesteld. Dit blijkt echter te optimistisch: als de verontreiniging uit de goed doorlatende lagen is verwijderd, blijven de immobiele zones langzaam naleveren, waardoor de bodemsanering veelal nog niet kan worden afgerond.

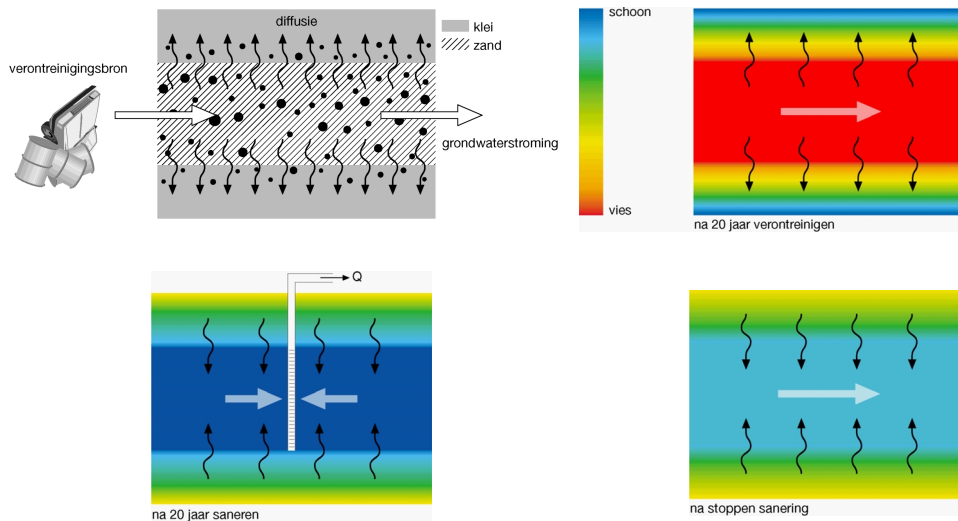


Fig. 1. Niet-evenwichtssorptie als oorzaak van stagnatie.

Niet-evenwichtsprocessen spelen zich ook op andere schaalniveau's af. Niet alleen op macroschaal maar ook op microschaal: kleine deeltjes organische koolstof fungeren bijvoorbeeld ook als immobiele zones. De verontreinigingen moeten hierbij van de 'harde' kern van het koolstofdeeltje naar de rand diffunderen alvorens ze eenvoudiger desorberen en in het grondwater beschikbaar komen voor de onttrekking.

In het algemeen kan worden gesteld dat het naast elkaar voorkomen van mobiele en immobiele zones in de ondergrond niet-evenwichtsprocessen in de hand werken en daarmee stagnatie van pump&treat (en andere in-situ) saneringstechnieken veroorzaken.

Het concept van smart pump&treat houdt rekening met niet-evenwichtsprocessen. Het concept is ontwikkeld vanuit de gedachte dat bij optreden van niet-evenwichtsprocessen door intermitterend grondwater te onttrekken een zelfde resultaat kan worden verkregen als door continu te onttrekken [7]. Wanneer na een korte periode van onttrekken de verontreiniging uit de mobiele zones is verwijderd, wordt de onttrekking stopgezet, deze heeft immers geen zin meer. Tijdens de 'rustperiode' blijft verontreiniging uit de immobiele zones naar de mobiele zones diffunderen. Na verloop van tijd is de concentratie in de goed doorstroomde lagen dermate toegenomen, dat het doorspoelen van de bodem weer de moeite loont. Door zo afwisselend korte perioden actief de goed doorstroomde zones te doorspoelen en vervolgens de natuurlijke processen te laten verlopen wordt hetzelfde saneringsresultaat behaald. Daarbij wordt echter veel minder grondwater onttrokken.

In het kader van het NOBIS-project Restrisk is onderzoek gedaan naar de meest effectieve wijze van intermitterend saneren [1]. Daarbij is gekeken naar de invloed van de frequentie van de pomp&pauze-cyclus, het onttrekkingsdebiet en de verhouding tussen de duur van de pompperiode en pauzes.

Het vergroten van de frequentie had een verhoogde effectiviteit tot gevolg (meer massa werd verwijderd), terwijl evenveel grondwater werd onttrokken. Dit is toe te schrijven aan het feit dat de concentratiegradiënt tussen mobiele en immobiele zone bij een te lange pauze dermate is afgenomen, dat deze limiterend werd voor de nalevering door diffusie en desorptie. De rustperiode



dient dus niet zo lang te duren, dat de nalevering vanuit immobiele zones door diffusie en desorptie niet maximaal is.

Het verhogen van het onttrekkingsdebiet resulteerde niet in een toename van de effectiviteit van de pump&treat sanering.

Het gelijktijdig verhogen van de frequentie van de pomp&pauze cyclus en het verlagen van het onttrekkingsdebiet zijn de belangrijkste optimalisaties die tot efficiency verbetering van intermitterend saneren leiden. Deze optimalisatie kan nog verder worden doorgevoerd door de duur van de pauze naar 0 dagen te verkorten en het debiet verregaand te verlagen. Deze resultaten worden bevestigd door Harvey et al. [8], die op een vergelijkbare wijze hebben aangetoond, dat continu onttrekken met een laag debiet efficiënter is dan intermitterend onttrekken.

Resumerend wordt gesteld dat de grondwatersnelheid, die door middel van het debiet wordt opgelegd, niet bepalend is voor de verwijdering van verontreiniging uit bodem en grondwater; deze dient aan te sluiten bij de snelheid van de massa-overdracht van de immobiele naar de mobiele zone om zo efficiënt mogelijk te saneren. In de praktijk betekent dit dat het onttrekken van enkele kubieke meters grondwater per dag voldoende doorstroming levert om effectief te saneren. Indien de verontreiniging over een groot gebied is uitgespreid ( $>100 \text{ m}^2$ ), dient de onttrekking te worden verdeeld over de verontreiniging door meerdere onttrekkingspunten te plaatsen. Zo wordt de afstand van de verontreiniging tot de onttrekkingspunten verkleind, waardoor de transportsnelheid van de verontreiniging tot het onttrekkingspunt niet beperkend is voor de voortgang van de sanering.

De haalbaarheid van het smart pump&treat concept is in de volgende hoofdstukken aan de hand van 27 praktijklocaties onderzocht.

## 2.2 Omleiden van de grondwaterstroming

Een knelpunt bij grootschalige implementatie van smart pump&treat sanering middels kleine onttrekkingen is de beheersing van de verontreiniging. Dit knelpunt wordt ondervonden wanneer de natuurlijke grondwaterstroming groot is en verspreiding van stoffen niet door natuurlijke afbraak (NA) wordt geremd. Voor het beheersen van de verontreiniging bij een hoge natuurlijke achtergrondstroming in een watervoerend pakket moet vele malen meer grondwater worden onttrokken dan voor de sanerende werking strikt noodzakelijk is.

Om in een situatie met een hoge achtergrondstroming en geringe mogelijkheden voor natuurlijke afbraak smart pump&treat toe te passen, is het opheffen van de natuurlijke grondwaterstroming ter plaatse van de locatie noodzakelijk. Dit kan door het grondwater dat bovenstrooms van de saneringslocatie komt aanstromen te onttrekken en dit benedenstrooms weer te injecteren. Door op deze manier schoon grondwater om te leiden, wordt de drijvende kracht van de verspreiding van de verontreiniging weggenomen.

In figuur 2 is het verschil te zien tussen de traditionele pump&treat, waarbij de verontreiniging wordt beheerst door het onttrekken van 'vies' grondwater (rood) en smart pump&treat met omleiden van grondwater, waarbij wordt beheerst door het omleiden van 'schoon' grondwater (blauw).

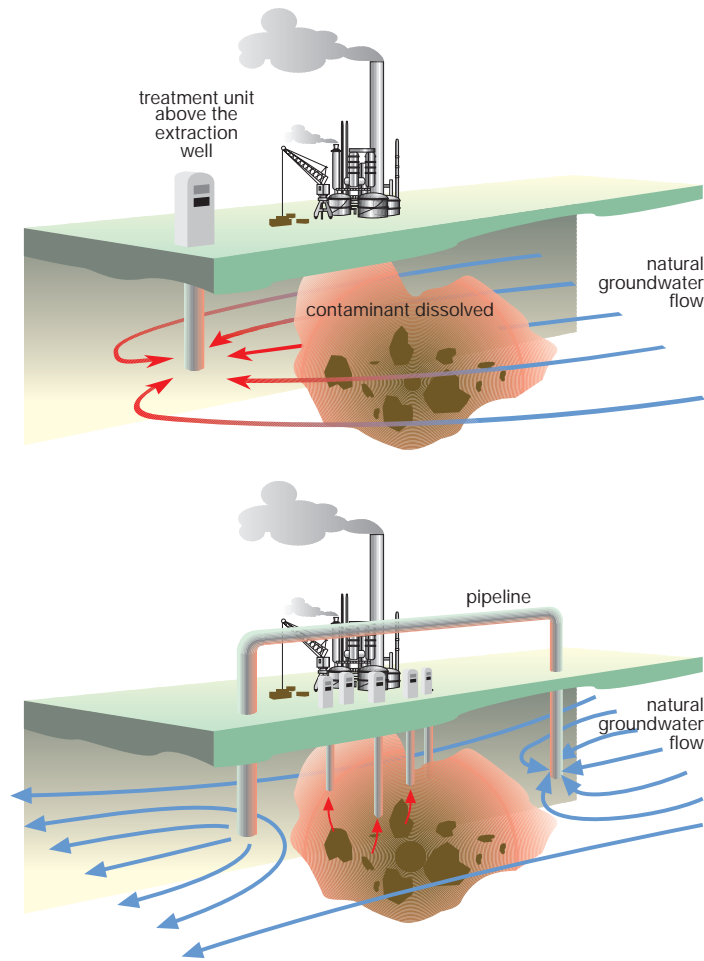


Fig. 2. Traditionele pump&treat (a) en smart pump&treat met omleiding van grondwater (b).

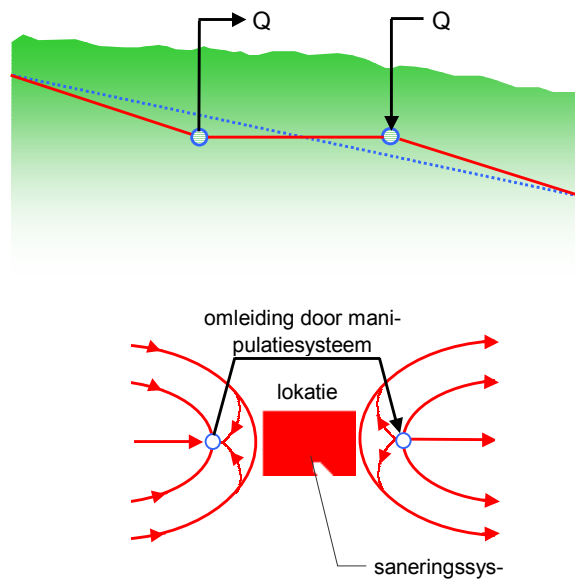


Fig. 3. Vlaktrekken van de stijghoogtegradiënt door middel van een grondwater omleidingsstelsel.

Het grote voordeel van het omleiden van grondwater om de verspreiding van verontreinigingen te voorkomen, is dat het grondwater dat wordt onttrokken schoon is en niet gezuiverd hoeft te worden. Het wegnemen van de natuurlijke grondwaterstroming op een verontreinigde locatie kan worden gecontroleerd aan de hand van het stijghoogteverloop op de locatie.

Als gevolg van de natuurlijke grondwaterstroming vertoont de stijghoogte een verhang of gradiënt op de locatie. Het omleiden van grondwater heeft tot gevolg dat er geen stroming meer plaatsvindt op de locatie, waardoor het oorspronkelijke verhang van de stijghoogte wordt 'vlakgetrokken' (zie figuur 3).

Door het omleiden wordt het zwaartepunt van de beheersfunctie verplaatst van de onttrekkingsputten in de verontreiniging naar de onttrekkings- en infiltratieputten in schoon grondwater.

In bijlage A wordt ingegaan op het ontwerp van een omleidingssysteem. Kort samengevat zijn de volgende conclusies te vermelden over omleiden van grondwater ten behoeve van smart pump&treat:

- Door toepassing van een omleidingssysteem is een reductie van de achtergrondstroming tot 10% van de oorspronkelijke stroming mogelijk. Dit maakt toepassing van smart pump&treat in het stromingsloze gebied zonder verspreidingsrisico's mogelijk;
- Bij een heterogene bodem biedt het omleiden door middel van meerdere sets van putten (4 à 5) meer flexibiliteit, waardoor het omleidingsdebiet omlaag kan;
- Het gebruik van een extra saneringsput levert een verdere debietsreductie op waardoor de uiteindelijke kosten van de zuiveringsstap nog verder zullen afnemen. Meerdere saneringsputten zijn ook voor het vergroten van de sanerende werking aan te bevelen.

### 2.3 Natuurlijke afbraak

Door het nieuwe bodemsaneringsbeleid in Nederland is natuurlijke afbraak als sanerings- en beheersvariant belangrijk geworden. Toen in Nederland elke verontreiniging moest worden verwijderd tot concentraties beneden de streefwaarde, was natuurlijk afbraak veelal alleen van academisch belang. De reden hiervoor is dat door natuurlijke afbraak hoogst zelden concentraties beneden de streefwaarde worden bereikt. Een gevolg hiervan was dat verontreinigingen in het algemeen zijn verwijderd door ontgraving of grondwateronttrekking.

De traditionele aanpak bleek op lange termijn duur en ineffectief te zijn. Naast hoge saneringskosten moesten gebouwen op verontreinigde bodem vaak worden gesloopt of de productieprocessen dienden te worden gestopt. In het kort komt het erop neer dat door het nieuwe beleid bij saneringen veel meer wordt gekeken naar de actuele risico's en het controleren van deze risico's.

Hierdoor is natuurlijke afbraak een aantrekkelijke alternatief geworden. Voor de probleemhebbers is het aantrekkelijk omdat de monitoring op natuurlijke afbraak in het algemeen goedkoop en zonder grote ingrepen in het productieproces mogelijk is. Bij het bevoegd gezag is in de laatste jaren de acceptatie van natuurlijke afbraak gestegen. Een belangrijk aspect is dat kennis over stofgedrag, risicobeoordeling en nauwkeurige modellering van pluimontwikkelingen in de laatste jaren sterk is toegenomen.

Natuurlijke afbraak wordt uitgevoerd door micro-organismen via chemische reacties, met name reductie-oxidatiereacties (= redoxreacties). Redoxreacties zijn reacties waarbij één of meerdere elektronen van een stof naar de andere worden overgedragen. Van nature kunnen er in de bodem verschillende electronenacceptoren voorkomen. De meest gangbare zijn zuurstof, nitraat, ijzer(III), sulfaat en koolstofdioxide. Elektronendonoren komen van nature ook voor: opgeloste organische stof. Daarnaast kunnen verontreinigingen ook als donoren fungeren.

Er bestaan twee principiële verschillende manieren van natuurlijke afbraak via redoxreacties:

1. Verontreinigingen kunnen als elektronendonoren dienen (BTEX, olie);
2. Verontreinigingen functioneren als electronenacceptor (CKW). In dit geval kunnen andere verontreinigingen (bijvoorbeeld BTEX) of natuurlijke stoffen (bijvoorbeeld humuszuren) als elektronendonoren worden gebruikt.

Of natuurlijke afbraak op de locatie optreedt, dient te worden onderzocht. In het NOBIS-project CUR/NOBIS 97-1-02, "Beslissingsondersteunend model natuurlijke afbraak", Fase 1, Deelresultaat 1 [9] is een vier-stappen-model ontwikkeld voor de ondersteuning van de beslissing over de potentie van natuurlijke afbraak.

### OPZET SCREENING PRAKTIJKLOCATIES

#### 3.1 Algemeen

Zoals in de inleiding is vermeld is het doel van het project 'smart pump&treat naar de praktijk' het bevorderen van grootschalige implementatie van het concept smart pump&treat door kennisoverdracht en onderzoek naar de haalbaarheid en kosteneffectiviteit ervan. Onderdeel daarvan is de screening van bestaande saneringsprojecten. Het screenen van zowel in uitvoering zijnde als nieuw te starten grondwatersaneringen is bedoeld om na te gaan, in welke mate smart pump&treat kosteneffectiever is dan traditionele pump&treat door een kostenvergelijking met traditionele pump&treat te maken.

In deze paragraaf worden de opzet en de wijze van uitvoering van de screening uiteengezet.

#### 3.2 Kader

Omdat de screening beperkt blijft tot een bureaustudie, zijn bij de vergelijking een aantal vereenvoudigingen gemaakt:

- De vergelijking van de kosten wordt uitgevoerd op basis van de jaarlijkse kosten waarbij de nadruk ligt op de zuivering, dit omdat veelal het zuiveringsdebiet de bepalende kostenfactor van een sanering is;
- Bij de screening worden alleen vergelijkbare pump&treat technieken bekeken. Wezenlijk andere technieken, zoals bodemluchtextractie of persluchtinjectie komen niet aan de orde;
- Er worden geen extra gegevens bij derden (eigenaar, gemeente, etc.) ingewonnen.

#### 3.3 Stappenplan

Samengevat komt de screening neer op het bedenken van 2 geohydrologische pump&treat varianten, waarvoor de saneringsdebieten worden bepaald gevolgd door een vertaling van debieten naar zuiveringskosten. Onderstaand stappenplan is gebruikt als checklist voor deze exercitie.

##### 1. *Informatie inwinnen*

Elk adviesbureau heeft een drietal saneringslocaties voor screening toegewezen gekregen. Een overzicht van de locaties is als bijlage B opgenomen. Voor elke locatie is een locatie-informatieblad samengesteld met daarin de belangrijkste locatiespecifieke gegevens. Met name de geohydrologische gegevens en gegevens over de verontreiniging zijn van belang zoals o.a. de omvang, diepte en aard van de maatgevende verontreiniging, de bodemopbouw en doorlatendheid, de gradiënten verticaal en horizontaal (isohypsen beeld) en aanwezige verharding in verband met de grondwateraanvulling. Extra of ontbrekende gegevens zijn opgevraagd bij het betrokken adviesbureau of de eindgebruiker, zoals vermeld op het locatie-informatieblad. De informatiebladen van de 27 locaties zijn als bijlage C opgenomen.

##### 2. *Conceptueel grondwatermodel*

Uitgaande van de gegevens uit stap 1 is een conceptueel grondwatermodel opgezet door een geohydroloog op basis waarvan de berekeningen uit stap 4 zullen worden uitgevoerd. Een grove schematisatie is in dit kader toereikend. Dit kan een eenvoudig één-laagmodel zijn dat het watervoerend pakket representeert of een twee-lagenmodel waarbij tussen een ophooglaag en een watervoerend pakket een weerstandslaag voorkomt die de deklaag representeert.

### 3. Variantkeuze en ontwerp

Voor elk van de locaties is zowel een traditionele als een geschikte smart pump&treat variant gekozen. Een belangrijk onderscheid dat daarvoor allereerst is gemaakt, is of het ter plekke van de verontreiniging een deklaag (met overwegend verticale stroming en verspreiding) of een verontreiniging in het watervoerend pakket (met overwegende horizontale stroming en verspreiding) betreft. Dit onderscheid in verontreiniging in de deklaag of in het watervoerend pakket bepaalt hoe de smart pump&treat variant eruit ziet.

Hieronder worden enkele voorbeelden van beide varianten uitgewerkt waaruit men kon kiezen. Elke variant krijgt een eigen code toegewezen: de letter D voor verontreinigingssituatie in de Deklaag (verticale verspreiding) of een A van Aquifer (horizontale verspreiding). Het extra getal 1 staat voor een traditionele variant, de getallen 2 en hoger geven de smart varianten aan.

De volgende **traditionele** pump&treat varianten zijn mogelijk in een aquifer (horizontale verspreiding):

- A1 Stroomafwaarts afvangen van de verontreinigingspluim.  
De omvang van de verontreiniging en de natuurlijke achtergrondstroming bepalen in feite het onttrekkingsdebiet en daarmee het zuiveringsdebiet.

De **smart** pump&treat varianten voor een aquifer zijn:

- A1\* Saneren met geringer debiet.  
Bij de traditionele variant werd het debiet vaak hoog gekozen om de bodem veelvuldig en snel te doorspoelen. Het debiet kan gereduceerd worden door het debiet af te stemmen op de nalevering vanuit de bodem met als minimale ondergrens het beheersdebiet.
- A2 Bron saneren/beheersen, pluim op basis van natuurlijke afbraak (NA) saneren.  
Als kan worden aangetoond\*\* dat de pluim door NA zal verdwijnen, kan de geohydrologische isolatie zich richten op de bronzone. De beheersing richt zich op een kleiner gebied waardoor het saneringsdebiet zal afnemen. Dit is met name voordelig wanneer de breedte van de pluim beduidend groter is dan de breedte van de bron of bronnen (meerdere hotspots) en wanneer NA kansrijk lijkt.
- A3 Bron saneren/beheersen, inclusief omleiden, en pluim op basis van NA saneren.  
De sanering/beheersing richt zich op de bron waarbij het omleidingsprincipe uit variant A4 lokaal bij de bron wordt toegepast. De pluim verdwijnt op basis van NA.
- A4 Bron en pluim saneren/beheersen, inclusief het omleiden\*\*\* van de achtergrondstroming.  
De omleiding van de natuurlijke achtergrondstroming door een omleidingssysteem leidt tot een stromingsreductie op de verontreinigingslocatie, waardoor de verontreiniging met een kleiner debiet wordt beheerst. Het gevolg is dat de sanering/beheersing kleiner kan worden uitgevoerd, waardoor ook het te zuiveren debiet afneemt.

Bij een verontreiniging in een deklaag waar geen watervoerende lagen zijn te onderscheiden en er voornamelijk sprake is van verticaal transport, is het vinden van smart pump & treat varianten minder eenvoudig.

\* Saneren met geringer debiet  
Systeem gelijk traditionele variant maar dan met lager onttrekkingsdebiet.

**\*\* Natuurlijke Afbraak (NA)**

De mogelijkheden van NA hangen onder meer af van het type verontreiniging en de redoxstatus van grond en grondwater. Een verontreiniging bestaande uit aromaten breekt onder zuurstofrijke omstandigheden goed af. NA var bijvoorbeeld een benzeenpluim zal om die reden in een watervoerend pakket minder snel optreden. Gaat het om een VOCL-verontreiniging dan geldt het omgekeerde, met name Per, Tri en Cis breken onder anaërobe condities goed af, mits er voldoende DOC (opgelost organisch koolstof) aanwezig is.

Het aantonen van NA kan op enkele manieren. De belangrijkste manier is het aantonen van afbraakproducten. Voor VOCL's zijn de afbraakprocessen en daarmee de producten bepaald en is het aantonen ervan eenvoudig. Voor verontreinigingen zoals aromaten geldt dit niet, er zijn tal van moeilijk te bepalen afbraakproducten mogelijk. In die gevallen biedt het uitkomst om de verandering in de redoxchemie van het grondwater te bepalen op basis van macrochemie (O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, FeII, SO<sub>4</sub> en CH<sub>4</sub>) indien deze gegevens beschikbaar zijn. Afbraak van bijvoorbeeld BTEX leidt tot gereduceerde omstandigheden.

**\*\*\* Omleiden**

Op basis van het in bijlage A gepresenteerde onderzoek over de omleiding van de grondwaterstroming kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Door toepassing van een grondwater-omleidingsysteem is het vlaktrekken van de stijghoogte tot 10% van de oorspronkelijke gradiënt mogelijk;
- Een omleidingsysteem bestaande uit één set omleidingputten heeft bij een homogene bodem de voorkeur vanwege de negatieve invloed van meerdere sets van putten op het saneringsdebiet;
- Bij een heterogene bodem biedt het omleiden door middel van meerdere sets van putten meer flexibiliteit, hetgeen zwaarder weegt dan het nadelig effect op het saneringsdebiet. Deze situatie komt meer overeen met de praktijk, waardoor omleiden door meerdere sets van putten (4 à 5) wordt aanbevolen;
- Een toenemend aantal extra omleiding- of saneringsputten sorteert steeds minder effect;
- Onder de gecreëerde omstandigheden kan het saneringssysteem volledig gericht zijn op het saneren van de verontreiniging zelf;
- Het gebruik van een extra saneringsput levert al een forse debietsreductie op waardoor de uiteindelijke kosten van de zuiveringsstap sterk zullen afnemen. Meerdere saneringsputten zijn ook voor het vergroten van de sanerende werking aan te bevelen.

Een **traditionele** saneringsvariant in een deklaag is:

- D1 Creëren kwelsituatie

Door de stijghoogte in de deklaag te reduceren tot onder het niveau van het watervoerend pakket met bijvoorbeeld horizontale drains ontstaat een verticale grondwaterstroming omhoog. Alle verontreiniging wordt ingevangen waardoor wordt voorkomen dat transport van verontreiniging richting het watervoerend pakket optreedt.

De volgende **smart pump&treat** varianten zijn mogelijk in een deklaag

- D2 Horizontale isolatie

Enkele onttrekkingsputten in de deklaag rondom de locatie hinderen de horizontale toestroming richting het saneringssysteem. Op de locatie functioneren saneringsputten. Het water dat door het saneringssysteem wordt opgepompt is in feite afgevangen neerslag, het water dat naar de buitenste putten toestroomt is schoon.

- D3 Verticaal omleiden

Ter plaatse van de verontreiniging wordt verticaal transport richting het watervoerend pakket verhinderd door een onttrekking in de deklaag te plaatsen in combinatie met een (gedeeltelijke) herinfiltratie na zuivering boven in het onderliggende watervoerend pakket. Hierbij dient wel aandacht te worden besteed aan verstoppingsrisico's. Infiltratie van suboxisch water in anaërobe aquifers is niet aan te raden. De variant vervalt dan als mogelijkheid.

- D4 Combinatie van D2 en D3

Het schone water uit het systeem dat de horizontale toestroming tegengaat (D2) wordt gebruikt om in het watervoerend pakket te infiltreren (D3).

- D5

Als bovenstaande varianten niets opleveren blijft over het laten uitzakken van de verontreiniging tot in het watervoerend pakket waarna de opties A mogelijk worden.

4. *Stroombaanalyse*

Bij stroombaananalyse (particle tracking) worden deeltjes losgelaten ter plaatse van de verontreiniging en wordt de stroombaan van die deeltjes berekend met bijvoorbeeld Modflow [10] en Modpath [11]. Aan de hand van die stroombanen is te zien of deeltjes wel of niet aan het saneringssysteem ontsnappen. Door de omleidings- of saneringsdebieten aan te passen, veranderen die stroombanen. In een dergelijk "trial and error" proces is het minimale saneringsdebiet per variant te bepalen. Voorbeelden van een stroombaananalyse zijn in de figuren 4 en 5 opgenomen.

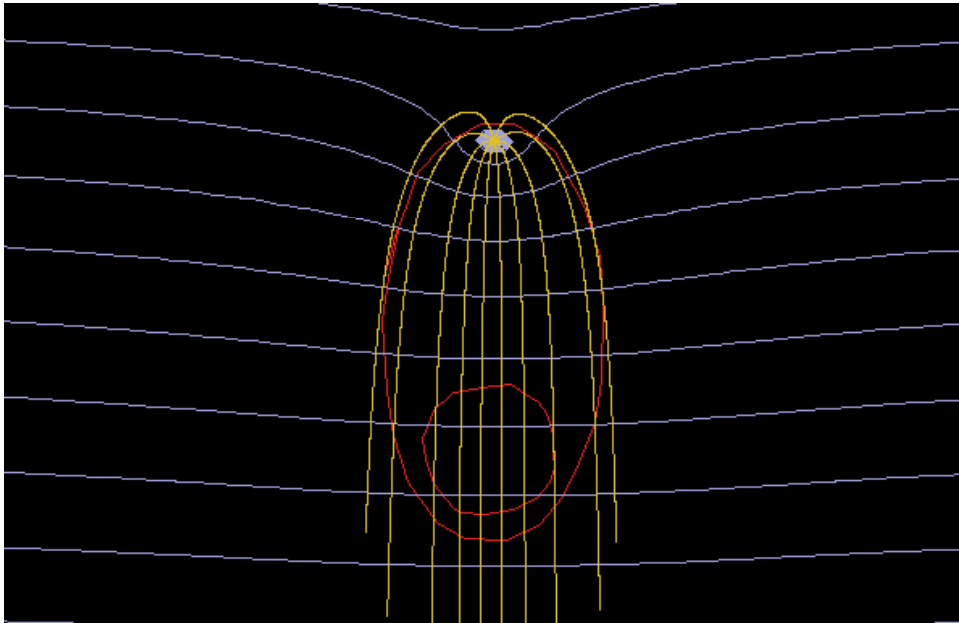


Fig. 4. Traditionele variant: onttrekking bij eind van de pluim (bovenaanzicht isohypsen, stroombanen en verontreinigingsvlek).

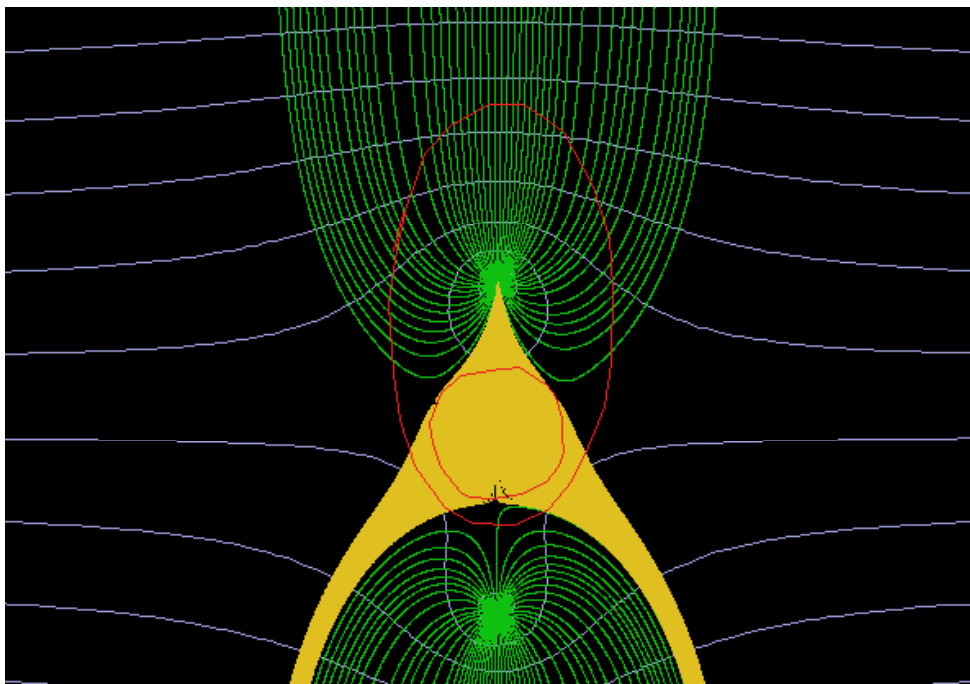


Fig. 5. Smart variant: Omleiden om brongebied en natuurlijke afbraak (bovenaanzicht isohypsen, stroombanen en verontreinigingsvlek).

##### 5. *Kosten per variant*



Wanneer de saneringsdebieten van de varianten bekend zijn, is meestal al aan te geven bij welke variant de kosten het minst zullen zijn: veelal de variant met het laagste saneringsdebiet. Bij een verschil in debieten van meer dan factor 2 is het zinvol om de jaarlijkse kosten van de varianten te bepalen en deze tegen elkaar af te zetten. Het kostenverloop is namelijk niet lineair zodat het onderlinge prijsverschil mogelijk nog duidelijker de voordelen van de smart pump&treat variant laat zien. Echter ook kosten voor het omleiden van grondwater of het monitoren van NA, wanneer een inschatting daarvan gewenst is, dienen in de vergelijking te worden opgenomen.

Om tot een eerlijke vergelijking te komen is het van belang dat de jaarlijkse kosten van de varianten tegen elkaar worden uitgezet in plaats van de totale kosten. Dit in verband met het feit dat de traditionele varianten in het algemeen niet binnen de gestelde termijn worden gesaneerd.

#### *6. Rapportage*

Het einde van de screening wordt gevormd door het opstellen van de screeningsrapportage. Hierin zijn naast de argumentatie en uitwerking van de gekozen *traditionele* en *smart* varianten ook de kostenvergelijking en conclusies opgenomen.

Vanwege de uiteindelijke bundeling van de screeningsresultaten van alle adviesbureaus dient de rapportage aan een vastgesteld format te voldoen (zie ook de opzet in bijlage B).



### OPZET ANALYSE GESCREENDE PRAKTIJKLOCATIES

#### 4.1 Algemeen

De gescreende locaties zijn door de diverse bureaus aangeleverd. De informatieformulieren van de locaties zijn in bijlage C opgenomen. Om conclusies te kunnen trekken over het in de praktijk brengen van smart pump&treat, is een analyse gemaakt van alle aangeleverde locaties. Allereerst is, om een totaalindruk te krijgen, in paragraaf 5.1 een totaalbeeld gemaakt. Een verdere analyse van de belangrijkste elementen van de locaties is in de daaropvolgende paragrafen in hoofdstuk 5 uitgevoerd.

#### 4.2 Belangrijkste elementen locaties

Om na te gaan in welke mate smart pump&treat kosteneffectiever is dan traditionele pump&treat, is een kostenvergelijking gemaakt. De jaarlijkse kosten worden bepaald door:

- de afschrijving van het onttrekkingsstelsel;
- instandhouden van het onttrekkingsstelsel en eventueel het infiltratiesysteem;
- de afschrijving van het zuiveringssysteem;
- instandhouden van het zuiveringssysteem;
- de monitoring van de systemen.

Het onttrekkingsstelsel hangt af van de gekozen saneringsvariant. Zoals in hoofdstuk 3 is uitgelegd is deze keuze in eerste instantie afhankelijk van het voorkomen van een deklaag of een watervoerend pakket. Daarnaast is de aard van de verontreiniging bepalend voor het al dan niet optreden van natuurlijke afbraak. Omleidingsvarianten komen in beeld als er van nature een relatief hoge (achtergrond)stroming optreedt (zie hiervoor ook bijlage B).

Op basis van het bovenstaande zijn voor de analyse van de locaties, naast de algemene locatiegegevens, de volgende elementen nader bekeken:

- locatiennaam;
- eindgebruiker (zoals omschreven in het projectplan);
- betrokken bureau;
- aanwezigheid deklaag of watervoerend pakket;
- aard verontreiniging;
- natuurlijke grondwaterstromingssnelheid;
- traditionele variant;
  - systeem;
  - onttrekkingsdebiet (verontreinigd water);
  - kosten;
- smart variant;
  - systeem;
  - onttrekkingsdebiet (verontreinigd water);
  - kosten;
- conclusie.

De elementen zijn al dan niet in gecombineerde vorm in hoofdstuk 5 verder uitgewerkt.



## HOOFDSTUK 5

### ANALYSE GESCREENDE PRAKTIJKLOCATIES

#### 5.1 Eindgebruikers

In tabel 1 zijn de gescreende locaties gerangschikt naar eindgebruikers. Dit overzicht zegt nog niets over de haalbaarheid van de smart pump&treat variant, maar is met name voor de eindgebruikers interessant en geeft een beeld van de verdeling van de locaties in Nederland.

Tabel 1. Overzicht eindgebruikers en locaties.

Eindgebruiker	Locaties	Bureau
3	Provincie Groningen Groningen, Verlengde Parallelweg Nieuw-Buinen, Industrierweg * Uithuizen, Hoofdstraat-west	Iwaco Tauw DHV
3	Provincie Drente Emmer-Compasuum, Oosterdiep Nieuw-Buinen, Industrierweg * Nieuw Roden, Roderweg	Tauw Tauw DHV
7	Provincie Noord-Holland Haarlem, Oudeweg Haarlem, Kraaijenhorst Hoofddorp, Graftermeerstraat IJmuiden, Tussenbeeksweg IJmuiden, Rivierenbuurt Zandvoort, Patrijzenstraat Zandvoort, Patrijzenstraat	Bodemzorg Tauw TNO Bodemzorg De Straat Bodemzorg HMvT
4	Provincie Zuid-Holland Delft, Van Miereveltlaan Gorinchem, 'Uniek' Papendrecht, Veerdam Voorschoten, Leidseweg	De Straat TNO De Straat GT
10	Provincie Noord-Brabant Dongen, Looiershof Breda, Tramsingel Cuijk, Molenstraat Oss, Boschpoort Rijen, Stationsstraat-zuid Tilburg, Smidspad Tilburg, Van Bijlandtstraat Vlijmen, Nassaulaan Waalre, Aalsterweg Zevenbergen, gasfabriek	Arcadis HMvT HMvT Arcadis TNO Oranjewoud Oranjewoud GT DHV Arcadis
1	SBNS Groningen, 'Tankplaat'	Oranjewoud

\* = hetzelfde 'geval'.

Uit de tabel blijkt dat de locaties, behalve voor SBNS, redelijk verdeeld zijn over de eindgebruikers.

## 5.2 Kosten traditionele variant versus smart variant

Om een algemeen beeld te krijgen van de kostenverdeling tussen de traditionele variant en de gekozen smart variant zijn in tabel 2 de locaties gerangschikt naar de traditionele variant en de smart variant.

Tabel 2. Jaarlijkse kosten per locatie volgens traditionele en smart aanpak.

Traditionele variant	Smart variant	Locatie	Kosten % trad. variant	Kosten % smart variant	Toepasbaarheid
D1	D2	Delft, Van Miereveltlaan	15.000	15.000	0
		Groningen, 'Tankplaat'	36.400	37.100	0
		Groningen, Verl. Parallelweg	20.500	10.500	1
		Zevenbergen, gasfabriek	0	10.800	0
D1	D3	-			
D1	D4	-			
D1	D5	-			
A1	A1 *	Haarlem, Kraaijenhorst	183.000	79.000	3
		Haarlem, Oudeweg	250.000	212.500	2
		IJmuiden, Tussenbeekseweg	100.000	50.000	3
		Zandvoort, Patrijzenstraat	11.000	3.000	1
		Zandvoort, Patrijzenstraat	12.500	11.000	1
		Nieuw-Buinen, Industrieweg	110.000	60.000	2
A1	A2	Cuijk, Molenstraat	135.000	30.000	3
		Tilburg, Smidspad	21.800	17.100	2
		Tilburg, Van Bijlandtstraat	40.000	17.900	2
		Vlijmen, Nassaulaan	-	-	1
		Waalre, Aalsterweg	270.000	95.000	3
A1	A3	Breda, Tramsingel	60.000	43.000	2
		Papendrecht, Veerdam	13.000	10.000	1
		Voorschoten, Leidseweg	210.000	55.000	3
A1	A4	Dongen, Looiershof	21.600	18.000	1
		Emmer-Compasuum, Oosterdiep	130.000	58.000	3
		Gorinchem, 'Uniek'	39.000	38.000	1
		IJmuiden, Rivierenbuurt	15.000	11.500	1
		Nieuw-Roden, Roderweg (A4-)	320.000	320.000	0
		Oss, Boschpoort	307.200	120.000	3
		Rijen, Stationsstraat-zuid	130.000	115.000	2
		Uithuizen, Hoofdstraat-west (A4-)	22.500	22.500	0
A1	D1	Hoofddorp, Graftermeerstraat	-	-	1

% = Kosten zijn niet eenduidig berekend. Soms zijn **alleen jaarlijkse zuiveringskosten** berekend, soms onttrekking- en zuiveringskosten.

\* = Systeem gelijk traditionele variant maar dan met lager onttrekkingsdebit.

- = Zonder omleiden van schoon water.

In tabel 2 zijn de volgende coderingen gebruikt:

- D1 = Traditionele variant: kwelsituatie creëren
- D2 = Smart variant: horizontale isolatie
- D3 = Smart variant: na zuivering omleiden naar watervoerend pakket
- D4 = Smart variant: horizontale isolatie en omleiden naar watervoerend pakket
- D5 = Geen onttrekking in de deklaag, A-variant uitvoeren
  
- A1 = Traditionele variant: stroomafwaartse afvangen
- A2 = Smart variant: bron saneren/beheersen en pluim door NA saneren
- A3 = Smart variant: bron saneren/beheersen, incl. omleiden en pluim door NA saneren
- A4 = Smart variant: bron en pluim saneren/beheersen, incl. omleiden
  
- 0 = geen of nauwelijks kostenbesparing door toepassing smart variant
- 1 = enigszins kostenbesparing door toepassing smart variant
- 2 = redelijk kostenbesparing door toepassing smart variant
- 3 = behoorlijke kostenbesparing door toepassing smart variant

Uit tabel 2 blijkt dat voor de vier locaties met een deklaag is gekozen voor de smart variant D2. In deze gevallen levert het toepassen van de smart variant D2 geen of nauwelijks kostenbesparing op.

Voor locaties met een watervoerend pakket zijn alle smart varianten gebruikt. Op zes locaties is gekozen voor alleen het reduceren van het onttrekkingsdebiet conform het basisprincipe van smart pump&treat (smart variant A1\*). Deze variant geeft een goede besparing. Uit het kostenoverzicht valt verder te concluderen dat natuurlijke afbraak (smart variant A2) kostenbesparend werkt. Omleiden om de bron, in combinatie met natuurlijke afbraak in de pluim (smart variant A3) geeft ook een besparing. Het omleiden om de gehele verontreiniging (smart variant A4) is niet altijd kostenbesparend. Dit wordt veroorzaakt door de kosten van het omleidingssysteem (meer deepwells, meer leidingwerk, meer instandhoudingskosten).

Voor een verdere analyse zijn in de volgende paragrafen de belangrijkste elementen, zoals genoemd in hoofdstuk 4, gedetailleerder uitgewerkt.

### 5.3 Deklaag of watervoerend pakket

In tabel 3 zijn de locaties alfabetisch ingedeeld naar deklaag of watervoerend pakket. Het voorkomen van de deklaag of een watervoerend pakket is bepalend voor de te kiezen variant. In tabel 3 zijn tevens de gekozen variant en de haalbaarheid in de vorm van de gemiddelde kostenbesparing uit tabel 2 weergegeven.

Tabel 3. Indeling locaties naar het voorkomen van de verontreiniging in de deklaag of het watervoerend pakket.

Deklaag of WVP	Locatie	Traditionele variant	Smart variant	Toepasbaarheid
4	Delft, Van Miereveltlaan	D1	D2	0
	Groningen, 'Tankplaat'	D1	D2	0
	Groningen, Verl. Parallelweg	D1	D2	1
	Zevenbergen, gasfabiek	D1	D2	0
Watervoerend pakket  23	Breda, Tramsingel	A1	A3	2
	Cuijk, Molenstraat	A1	A2	3
	Dongen, Looiershof	A1	A4	1
	Emmer-Compasuum, Oosterdiep	A1	A4	3
	IJmuiden, Tussenbeeksweg	A1	A1*	3
	IJmuiden, Rivierenbuurt	A1	A4	1
	Gorinchem, 'Uniek'	A1	A4	1
	Haarlem, Oudeweg	A1	A1*	2
	Haarlem, Kraaijenhorst	A1	A1*	3
	Hoofddorp, Graftemeerstraat	A1	D1#	1
	Nieuw-Buinen, Industrierweg	A1	A1*	2
	Nieuw Roden, Roderweg	A1	A4-	0
	Oss, Boschpoort	A1	A4	3
	Papendrecht, Veerdam	A1	A3	1
	Rijen, Stationsstraat-zuid	A1	A4	2
	Tilburg, Smidspad	A1	A2	2
	Tilburg, Van Bijlandtstraat	A1	A2	2
	Uithuizen, Hoofdstraat-west	A1	A4-	0
	Vlijmen, Nassaulaan	A1	A2	1
	Voorschoten, Leidseweg	A1	A3	3
	Waalre, Aalsterweg	A1	A2	3
	Zandvoort, Patrijzenstraat	A1	A1*	1
	Zandvoort, Patrijzenstraat	A1	A1*	1

\* = Systeem gelijk traditionele variant maar dan met lager onttrekkingsdebiet

# = Gebruik makend van natuurlijke kwel

- = Zonder omleiden van schoon water

Uit tabel 3 blijkt dat slechts op vier locaties een dusdanige deklaag aanwezig is, dat gekozen is voor de D-varianten. Op 23 locaties is met name een watervoerend pakket bepalend voor de verspreiding van de verontreiniging.

Op enkele locaties is wel een (dunne) deklaag aanwezig, maar zijn de verontreinigingen tot ruim in het watervoerend pakket verspreid, zodat voor de A-varianten is gekozen.



## 5.4 Aard verontreiniging

In tabel 4 zijn de locaties ingedeeld naar de aard van verontreiniging. De aard van de verontreiniging is bepalend voor het al dan niet optreden van natuurlijke afbraak. De omvang van de verontreiniging is ook veelal afhankelijk van de aard (mobiliteit) van de verontreiniging.

Tabel 4. Indeling locaties naar aard van de verontreiniging.

Aard verontreiniging	Locatie	Traditionele variant	Smart variant	Toepasbaarheid
Minerale olie en aromaten  7	Emmer-Compasuum, Oosterdiep	A1	A4	3
	Groningen, 'Tankplaat'	D1	D2	0
	Haarlem, Oudeweg	A1	A1*	2
	IJmuiden, Tussenbeeksweg	A1	A1*	3
	Waalre, Aalsterweg	A1	A2	3
	Zandvoort, Patrijzenstraat	A1	A1*	1
	Zandvoort, Patrijzenstraat	A1	A1*	1
Zware metalen, incl cyanide  2	Nieuw Roden, Roderweg	A1	A4-	0
	Zevenbergen, gasfabriek	D1	D2	0
Chloorhoudende oplosmiddelen (eventueel in combinatie met zware metalen)  18	Breda, Tramsingel	A1	A3	2
	Cuijk, Molenstraat	A1	A2	3
	Delft, Van Miereveltlaan	D1	D2	0
	Dongen, Looiershof	A1	A4	1
	IJmuiden, Rivierenbuurt	A1	A4	1
	Gorinchem, 'Uniek'	A1	A4	1
	Groningen, Verl. Parallelweg	D1	D2	1
	Haarlem, Kraaienhorst	A1	A1*	3
	Hoofddorp, Graftermeerstraat	A1	D1#	1
	Nieuw-Buinen, Industrieweg	A1	A1*	2
	Oss, Boschpoort	A1	A4	3
	Papendrecht, Veerdam	A1	A3	1
	Rijen, Stationsstraat-zuid	A1	A4	2
	Tilburg, Smidspad	A1	A2	2
	Tilburg, Van Bijlandtstraat	A1	A2	2
	Uithuizen, Hoofdstraat-west	A1	A4-	0
Vlijmen, Nassaulaan	A1	A2	1	
Voorschoten, Leidseweg	A1	A3	3	

\* = Systeem gelijk traditionele variant maar dan met lager onttrekkingsdebiet

# = Gebruik makend van natuurlijke kwel

- = Zonder omleiden van schoon water

Op zeven locaties is de bodem verontreinigd met minerale olie en/of aromaten. Twee locaties zijn verontreinigd met zware metalen. Chloorhoudende oplosmiddelen zijn op achttien locaties aangekomen, eventueel in combinatie met zware metalen.

Dat de haalbaarheid van een smart variant afhankelijk is van de aard van de verontreiniging, blijkt uit tabel 4. Bij gelijke geohydrologische omstandigheden worden mobiele verontreinigingen (aromaten en chloorhoudende oplosmiddelen) sneller verspreid dan de minder mobiele stoffen (zware metalen en minerale olie). Onderscheid tussen aromatische oplosmiddelen en chloorhoudende oplosmiddelen is niet waargenomen in de geselecteerde cases. Dit kan enigszins worden verklaard omdat het uitgangspunt van onttrekkingsdebiet niet direct gerelateerd is aan de aard van

de verontreiniging. Het is denkbaar dat door het verschillende stofgedrag van aromatische en chloorhoudende oplosmiddelen in andere gevallen de toepasbaarheid van de smart varianten wel beïnvloed kan worden.

## 5.5 Natuurlijke stroomsnelheid

Verwacht mag worden dat de natuurlijke stroomsnelheid bepalend is voor het al dan niet succesvol zijn van het omleiden van schoon grondwater. In tabel 5 zijn de locaties ingedeeld naar de hoogte van de natuurlijke stroomsnelheid.

Tabel 5. Indeling locaties naar de grootte van de natuurlijke stroomsnelheid.

Natuurlijke stroomsnelheid	Locatie	Traditionele variant	Smart variant	Toepasbaarheid
kleiner dan 5 m/jaar  <b>9</b>	Delft, Van Miereveltlaan	D1	D2	0
	IJmuiden, Rivierenbuurt	A1	A4	1
	Groningen, 'Tankplaat'	D1	D2	0
	Haarlem, Oudeweg	A1	A1*	2 gem: 0,8
	Hoofddorp, Graftermeerstraat	A1	D1#	1
	Nieuw-Buinen, Industrieweg	A1	A1*	2
	Nieuw Roden, Roderweg	A1	A4-	0
	Papendrecht, Veerdam	A1	A3	1
	Zevenbergen, gasfabriek	D1	D2	0
5 tot 10 m/jaar  <b>8</b>	Breda, Tramsingel	A1	A3	2
	Groningen, Verl. Parallelweg	D1	D2	1
	Haarlem, Kraaijenhorst	A1	A1*	3
	Tilburg, Smidspad	A1	A2	2
	Tilburg, Van Bijlandtstraat	A1	A2	2 gem: 1,5
	Uithuizen, Hoofdstraat-west	A1	A4-	0
	Zandvoort, Patrijzenstraat	A1	A1*	1
	Zandvoort, Patrijzenstraat	A1	A1*	1
10 – 25 m/jaar  <b>6</b>	Dongen, Looiershof	A1	A4	1
	Emmer-Compasuum, Oosterdiep	A1	A4	3
	IJmuiden, Tussenbeekseweg	A1	A1*	3 gem: 2,3
	Oss, Boschpoort	A1	A4	3
	Vlijmen, Nassaulaan	A1	A2	1
	Voorschoten, Leidseweg	A1	A3	3
groter dan 25 m/jaar  <b>4</b>	Cuijk, Molenstraat	A1	A2	3
	Gorinchem, 'Uniek'	A1	A4	1 gem: 2,3
	Rijen, Stationsstraat-zuid	A1	A4	2
	Waalre, Aalsterweg	A1	A2	3

\* = Systeem gelijk traditionele variant maar dan met lager onttrekkingsdebiet

# = Gebruik makend van natuurlijke kwel

- = Zonder omleiden van schoon water

In figuur 6 is de verhouding weergegeven tussen de natuurlijke stroomsnelheid en de haalbaarheid van een smart variant.

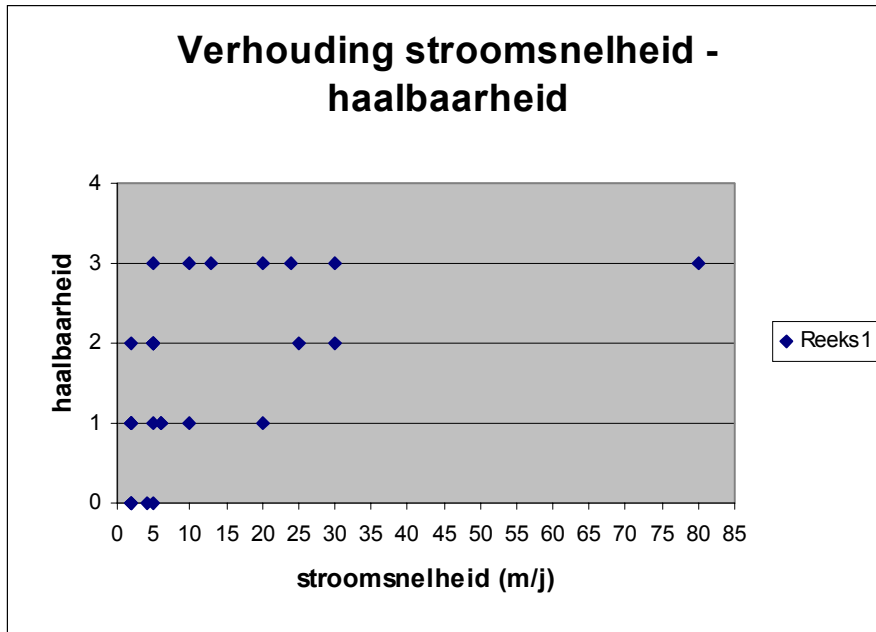


Fig. 6. Verhouding stroomsnelheid – haalbaarheid.

Uit tabel 5 en figuur 6 blijkt dat de haalbaarheid een vrij sterke relatie heeft met de natuurlijke stroomsnelheid. De haalbaarheid van een smart variant op een locatie met een stroomsnelheid kleiner dan 5 m/jaar is sterk afhankelijk van locatiespecifieke omstandigheden. Indien de stroomsnelheid groter is dan 5 m/jaar, dan leidt een smart variant in de meeste gevallen tot een flinke kostenbesparing.

## 5.6 Conclusies en aanbeveling

### 5.6.1 Conclusie variantenvergelijking

Uit de gescreende locaties kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het alleen reduceren van het onttrekkingsdebiet, variant A1\*, levert een gemiddelde besparing op van 82% op debiet en 42 % op kosten;
- De smart variant A2 (bron saneren/beheersen en pluim saneren met NA) levert een gemiddelde besparing op van 74% op debiet en 55% op kosten;
- Indien met variant A3 schoon water om de bron wordt geleid, de bron wordt gesaneerd/beheerst en de pluim met NA wordt gesaneerd levert dit een gemiddelde besparing op van 83% op debiet en 42% op kosten;
- Het alleen omleiden van schoon water (variant A4) levert een gemiddelde besparing op van 59% op debiet en 28% op kosten. Dit is berekend exclusief de twee varianten A4-, waarbij geen besparing optreedt, omdat niet wordt omgeleid, maar wel variant A4 is genoemd;
- Het onttrekkingsdebiet voor alle traditionele varianten op de zevenentwintig gescreende locaties is 6487 m<sup>3</sup>/dag. Alle smart varianten leveren een debiet op van 1923 m<sup>3</sup>/dag. Het toepassen van smart varianten levert voor deze 27 cases in totaal een gemiddelde besparing in debiet op van 63%;
- De berekende jaarlijkse kosten voor alle traditionele varianten bedragen Nlg. 2.473.500,=. De jaarlijkse kosten voor alle smart varianten bedragen Nlg. 1.459.900,=. Het toepassen van smart varianten levert voor deze 27 cases in totaal een gemiddelde besparing op van 34%;
- Het horizontaal isoleren in de deklaag (variant D2) levert geen of nauwelijks besparingen op.

In tabel 6 zijn de percentages overzichtelijk weergegeven. Deze percentages moeten met voorzichtigheid worden gehanteerd, omdat het aantal gescreende locaties beperkt is.

Tabel 6. Overzicht gemiddelde besparingen (%) per variant.

Onderdeel	D1-D2	A1-A1*	A1-A2	A1-A3	A1-A4	Totaal
Debiet	40	82	74	83	59	63
Kosten	16	42	55	42	28	34

Naast reductie in debieten en kosten heeft smart pump&treat ook als voordeel dat de grondwaterstand minder wordt verlaagd, zodat minder zettingsschade en/of verdrogingsschade zal optreden. Daarnaast wordt het rioolstelsel en daarmee ook het oppervlaktewater minder belast.

#### 5.6.2 *conclusie locatiespecifieke omstandigheden*

- De locaties zijn, behalve voor SBNS, redelijk verdeeld over de eindgebruikers;
- Op slechts vier locaties is een duidelijke deklaag aanwezig. Op deze locaties leveren de smart varianten geen of nauwelijks voordeel op ten opzichte van de traditionele variant. Op drieëntwintig locaties is een watervoerend pakket, eventueel met een (dunne) deklaag, aanwezig. De kostenbesparing is dan afhankelijk van aspecten met name de grootte van de natuurlijke grondwaterstroming;
- Op zeven locaties is een verontreiniging met minerale olie en/of aromaten aangetroffen. Twee locaties zijn verontreinigd met zware metalen, achttien locaties met chloorhoudende oplosmiddelen, eventueel gecombineerd met zware metalen. De haalbaarheid van een smart variant is afhankelijk van de aard van de verontreiniging (mobiel/immobiele stoffen);
- De haalbaarheid van de smart varianten met omleiding hebben een vrij sterke relatie met de natuurlijke stroomsnelheid. Op een locatie met een stroomsnelheid kleiner dan 5 m/jaar is dit echter sterk afhankelijk van locatiespecifieke omstandigheden. Indien de stroomsnelheid groter is dan 5 m/jaar, dan zijn deze smart varianten goed tot zeer kosteneffectief en daarmee goed toepasbaar.

#### 5.7 **Aanbeveling**

Aanbevolen wordt zowel bodemsaneringsprojecten in voorbereiding (afweging van varianten) als in uitvoering kritisch te evalueren en indien mogelijk het concept smart pump&treat als variant toe te passen. Hierbij is ook een taak weggelegd voor vergunningverleners (afgeven van beschikking, onttrekkings- en lozingsvergunningen) om kritische vragen te stellen ten aanzien van het voorgenomen onttrekkingsdebiet.

## LITERATUUR

- [1] Hetterschijt, R.A.A., Te Stroet, C.B.M., (1998); RestRisk –verspreiding en risico's van rest-concentraties in bodem en grondwater, Fase 2, deelrapport I: Slimmer saneren met pump&treat; Onzekerheden en pompstrategieen, CUR/NOBIS 95-2-11, Gouda.
- [2] Hetterschijt, R.A.A., Roelofsen, F.J. en Bakker, L.M.M., (2001); Implementatie van smart pump&treat, Ontwerp en toetsing op robuustheid. Deelrapport II, CUR/SKB SV035, Gouda.
- [3] Keeley, J.F., (1989); Performance Evaluation of Pump & Treat Remediations, *Superfund Issue Paper*, EPA/540/8-89/005, R.S. Kerr Environmental Research Lab., Ada OK, 14 pp.
- [4] Haley J.L., Hanson B., Enfield C., Glass J., (1991); Evaluating the effectiveness of Groundwater Extraction Systems, *Groundwater Monitoring Rev. Vol. 11(1)*, 119-124.
- [5] Freeze R.A., Cherry J.A., (1989); What Has Gone Wrong? *Ground Water Vol. 27(4)*, 458-464.
- [6] Mackey, D.M., Cherry, J.A., (1989); Groundwater Contamination: Pump-and-Treat Remediation, *Environ. Sci. Technol. 23(6)*, 630-636.
- [7] Griffioen, J., Hetterschijt, R.A.A., (1998); On diffusive Mass-Transfer Limitations in Relation to Remediation of Polluted Groundwater Systems, *6<sup>th</sup> International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, Edinburgh, UK.
- [8] Harvey F.C., Haggerty R., Gorelick, M.S., (1994); Aquifer remediation: A method for estimating mass transfer rate coefficients and an evaluation of pulsed pumping, *Wat. Resour. Res. Vol. 30(7)*, 1979-1991.
- [9] CUR/NOBIS 97-1-02, "Beslissingsondersteunend model natuurlijke afbraak", Fase 1, Deelresultaat 1
- [10] McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., (1988); A Modular Three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey, U.S.A.
- [11] Pollock, W., (1989); Documentation of Computer Programs to Compute and Display Pathlines Using Results from the U.S. Geological Survey Modular Three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey, U.S.A.



