

Hydrologisch scherm als isolering van bodemverontreiniging

Samenvatting

In het algemeen zal men een diep in een watervoerend pakket doorgedrongen verontreiniging trachten te isoleren om verspreiding ervan, ten gevolge van de grondwaterstroming, te voorkomen. Daarna dient de bodem en het grondwater nog op één of andere wijze te worden gesaneerd. Bij isolering denkt men veelal aan civiel-technische maatregelen in de vorm van damwanden of sleuven gevuld met waterdicht materiaal. Bij enige diepte en omvang van de verontreiniging wordt dit een uiterst kostbare



I.R. G. A. BRUGGEMAN
Rijksinstituut voor Volks-
gezondheid en Milieuhygiëne



ING. H. SNELTING
Rijksinstituut voor Volks-
gezondheid en Milieuhygiëne

zaak, nog afgezien van het gevaar voor lekkages. In dit artikel wordt een methode besproken waaraan tot nu toe nauwelijks aandacht is geschonken, namelijk isolering met behulp van 'hydrologische' schermen. Hierbij wordt nog onderscheid gemaakt tussen waterondoorlatende en water-afstotende schermen.

Hydrologische schermen kunnen worden gecreëerd met behulp van combinaties van onttrekkings- en retourputten, waarmee tevens sanering van bodem en grondwater in situ kan plaatsvinden.

1. Inleiding

Het onderzoek dat aan de sanering van een plaatselijk door chemicaliën verontreinigde bodem voorafgaat, is veelal gericht op het afgraven van de verontreinigde grond. Deze wordt dan ter plaatse gezuiverd met behulp van bijvoorbeeld uitgloeimethoden. Ook vindt opslag plaats van de afgegraven grond op daartoe geschikt gemaakte locaties totdat zuivering kan plaatsvinden. Op plaatsen waar de ondergrond nabij het maaiveld uit minder goed doorlatend materiaal bestaat (klei, slibhoudend fijn zand en dergelijke) zal de verontreiniging meestal nog niet tot grotere diepte zijn doorgedrongen. De kans dat verspreiding in het horizontale vlak heeft plaatsgevonden ten gevolge van de natuurlijke stroming van het grondwater, is eveneens gering. De verontreiniging van het grondwater zal in dergelijke gevallen een ondergeschikte rol spelen en de oplossing van het probleem kan worden bereikt door de verontreinigde grond af te

graven. Het zal duidelijk zijn, dat voornoemde veronderstellingen wel door adequaat onderzoek moeten worden bevestigd. Op vele plaatsen in Nederland is de ondergrond vanaf het maaiveld echter opgebouwd uit lagen met een relatief goede doorlatendheid waardoor de verspreiding van de verontreiniging, zowel horizontaal als verticaal, wordt bevorderd. Infiltrerende neerslag, dichtheidsstromingen en diffusie-verschijnselen bevorderen verspreiding in de diepte en vooral de natuurlijke stroming van het grondwater in een relatief goed doorlatend watervoerend pakket maakt verspreiding mogelijk in het horizontale vlak. Vooral als het tijdstip dat de verontreiniging aan het maaiveld werd aangebracht ver in het verleden ligt, zoals bijvoorbeeld op voormalige gasfabriekterreinen het geval is, kunnen de gronddeeltjes en het grondwater over een groot oppervlak tot op grotere diepte ernstig zijn verontreinigd. Bij een dergelijke diepe verontreiniging (tot 20 of meer meters beneden het maaiveld) komt afgraven van het gehele verontreinigde pakket niet meer in aanmerking wegens de exorbitant hoge kosten en het sterk vergrote probleem van de opslag van de uitkomende verontreinigde grond, terwijl hiermee het probleem van sanering van het verontreinigde grondwater nog niet is opgelost.

Om verdere verspreiding van het verontreinigde grondwater ten gevolge van stroming en dispersie en daarmee besmetting van omringende, nog niet verontreinigde grond tegen te gaan, wordt in dergelijke gevallen in eerste instantie gedacht aan het isoleren van het verontreinigde bodemgedeelte. Zoals uit recente praktijkgevallen blijkt, denkt men hierbij bij voorkeur aan isolering met behulp van een waterdicht scherm, bijvoorbeeld in de vorm van damwanden of diepe sleuven, gevuld met klei of bentoniet. De onderkant van de wand dient dan te reiken tot in een 'ondoordringende' kleilaag, waardoor als het ware een waterdichte doos ontstaat.

Men hoeft geen deskundige op waterbouw-

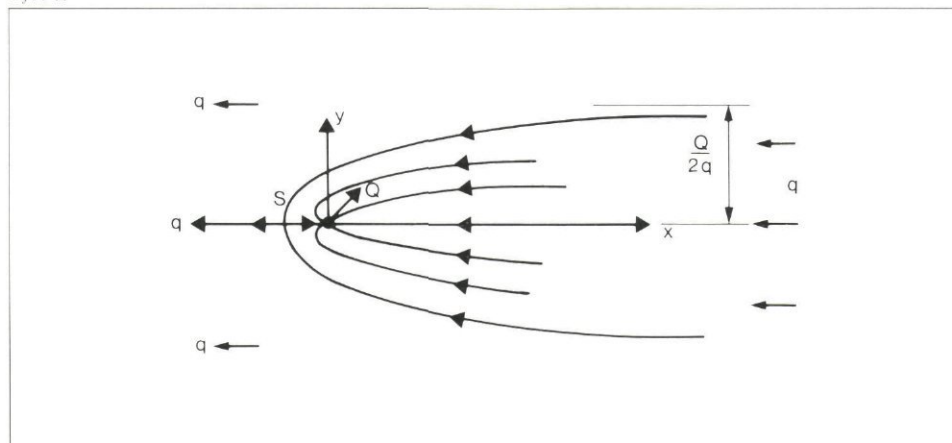
kundig gebied te zijn om in te zien, dat deze methode bij enige omvang voor wat betreft oppervlak en diepte van de verontreiniging een uiterst kostbare zaak zal worden, nog afgezien van het feit dat de 'waterdichte' bodem (kleilaag) van het geïsoleerde compartiment, zeker op de langere termijn, in vele gevallen als twijfelachtig moet worden beschouwd. Om afstroming van verontreinigd grondwater vanuit het compartiment via de kleibodem naar het onderliggende watervoerende pakket te voorkomen, moet binnen het scherm een onttrekking van verontreinigd, te zuiveren grondwater worden aangebracht. Deze dient ervoor te zorgen, dat de grondwaterstand in het geïsoleerde compartiment lager blijft dan de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket. Verder dienen oplossingen te worden gezocht om te voorkomen, dat het grondwater binnen het scherm wordt aangevuld door de neerslag waardoor het waterbezwaar nog toe zou nemen. Bovendien zijn de grond en het grondwater in de 'doos' nog verontreinigd en zullen in veel gevallen op lange termijn alsnog schoonmaakmaatregelen moeten worden getroffen.

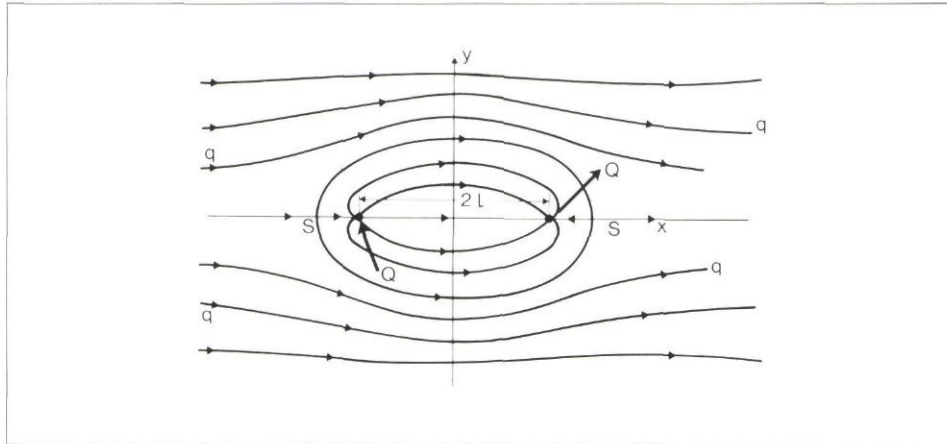
Een methode die veel minder kostbaar is en waaraan men tot nu toe weinig aandacht heeft geschonken, is de toepassing van wat men zou kunnen noemen een 'hydrologisch' scherm, waarbij isolering van een ondergrondse verontreiniging plaatsvindt met behulp van een combinatie van onttrekkings- en infiltratieputten eventueel gecombineerd met zuivering van het onttrokken water. Tevens vindt op deze wijze sanering in situ plaats van de grond.

2. Principe hydrologisch scherm; analytische oplossingen

Ten aanzien van de aard van een hydrologisch scherm dient onderscheid te worden gemaakt tussen gebieden waar van 'nature' een min of meer uitgesproken uniforme horizontale grondwaterstroming aanwezig is en gebieden waar verticale stroming ten gevolge van neerslag of kwel de overhand heeft. In deze

Afb. 1.





Afb. 2.

paragraaf zal steeds worden uitgegaan van een homogeen watervoerend pakket zonder voeding via semi-permeabele lagen en van volkomen onttrekkings- en retourputten.

2.1. Gebieden waarin uniforme stroming aanwezig is

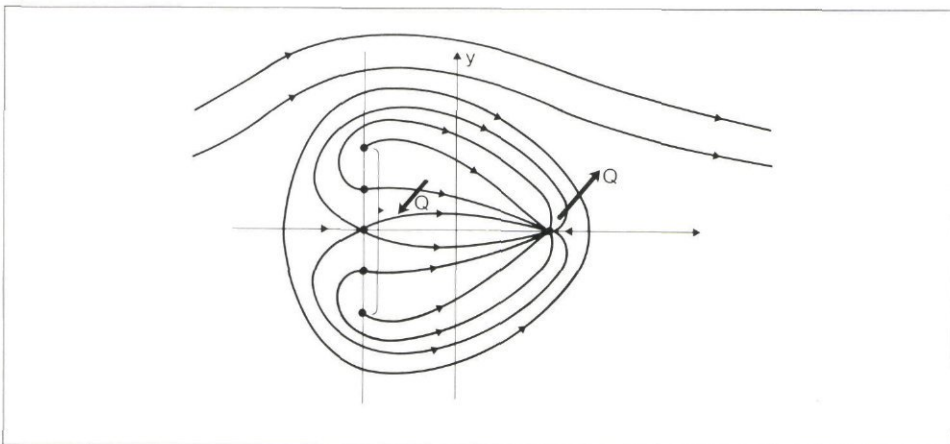
Het meest eenvoudige geval van een hydrologisch scherm treedt op bij een putonttrekking in een gebied met uniforme stroming (zie afb. 1).

Bij onttrekkingen of infiltraties via putten in uniforme stroming treden zogenaamde stagnatiepunten op, waarvoor geldt dat de stroming daar gelijk aan nul is. In het geval van afbeelding 1 is er een stagnatiepunt S op de x-as met $x = -\frac{Q}{2\pi q}$, indien de uniforme stroming q [L^2T^{-1}] en de putonttrekking Q [L^3T^{-1}] bedraagt. Alle stroomlijnen van het grondwater dat in de pompput terecht komt verlopen binnen een grensstroomlijn die door het stagnatiepunt gaat en asymptotisch nadert tot de rechten $y = \pm \frac{Q}{2q}$.

De vergelijking voor deze grensstroomlijn is $x = y \cotg\left(\frac{2\pi q y}{Q}\right)$ (1)

Hierdoor wordt een rechte cilinder bepaald, met een hoogte gelijk aan de pakketdikte.

Afb. 3.



heid water als via de pompput wordt onttrokken in de ondergrond wordt teruggebracht (zie afb. 2).

Hierbij ontstaan twee stagnatiepunten op de x-as (indien de verbindinglijn van de putten in de richting van de uniforme stroming is gekozen) met coördinaten

$$x = \pm \sqrt{l^2 + \frac{Ql}{\pi q}}; y = 0$$

waarbij $2l$ de afstand is tussen de putten.

Door deze stagnatiepunten gaat nu een gesloten grensstroomlijn, waarbinnen de gehele stroming van retourput naar onttrekkingsput plaatsvindt.

De vergelijking van deze grensstroomlijn is $x^2 = l^2 - y^2 + 2ly \cotg\left(\frac{2\pi q y}{Q}\right)$ (2)

waardoor een gesloten hydrologisch scherm wordt bepaald, in tegenstelling tot het vorige geval, dat als een open hydrologisch scherm is te typeren.

De voordelen van dit schema – onttrekkingsput en retourput in een uniforme stroming – boven één onttrekkingsput zijn evident.

Er ontstaat een stationaire grondwaterstroming binnen een gesloten hydrologisch scherm, waarbij de verlagingen en verhogingen zich voornamelijk afspelen binnen dat scherm terwijl de stijghoogten erbuiten nauwelijks worden beïnvloed. Bovendien bestaat de mogelijkheid de ondergrond met 'schoon' water door te spoelen en daarmee de verontreinigde grond te wassen. Omdat de stroming tussen onttrekkings- en retourput plaatsvindt binnen een gesloten systeem, behoeft hierbij niet voor verspreiding van de verontreiniging buiten het scherm te worden gevreesd. Weer rekening houdend met een zekere mate van transversale dispersie kan een in de ondergrond aanwezige verontreiniging dus door een juiste plaatsing en dimensionering van de putten in een bestaande uniforme grondwaterstroming worden geïsoleerd en tegelijkertijd in situ gesaneerd, waarbij de stijghoogten van het grondwater buiten het verontreinigde gebied niet noemenswaard worden beïnvloed.

In het geval van afb. 2 heeft het gesloten hydrologische scherm de vorm van een regelmatige ovaal. Door gebruik te maken van een aantal retourputten op verschillende locaties, kunnen evenwel de meest uiteenlopende verbreidingsvormen op betrekkelijk eenvoudige en goedkope wijze worden geïsoleerd. Hierbij moet dan wel worden bedacht, dat om een stationaire toestand te bereiken het totale geïnjecteerde debiet gelijk moet zijn aan het totale onttrokken debiet, terwijl om een gesloten hydrologisch scherm te verkrijgen, de retourputten ten opzichte van de bestaande grondwaterstroming, bovenstrooms van de onttrekkingsputten moeten worden gesitueerd.

Ter illustratie is in afb. 3 een voorbeeld gegeven van 5 retourputten ieder met een debiet $Q/5$, in combinatie met één onttrekkingsput met debiet Q .

2.2. Gebieden zonder uniforme stroming

Indien geen noemenswaardige natuurlijke grondwaterstroming in horizontale richting plaatsvindt is het niet mogelijk om gesloten grensstroomlijnen te creëren met behulp van combinaties van een onttrekkingsput en retourputten, zoals in de voorbeelden van afb. 2 en 3. De noodzaak van isolering in horizontale zin is echter ook minder omdat geen horizontale stroming aanwezig is, die de verontreiniging verspreidt. In principe kan sanering in situ plaatsvinden met behulp van één onttrekkingsput. De optredende verlagingen van de grondwaterstanden in de omgeving kunnen dan echter aanzienlijk zijn. Om deze reden ligt het voor de hand ook hier weer met retourputten te werken, waarbij echter het gevaar bestaat dat een gedeelte van het verontreinigde grondwater wordt weggedrukt en zich (tijdelijk) verspreidt buiten het te saneren gebied. Het is dan zaak een dusdanige configuratie van putten en retourputten te kiezen, dat de grondwatersnelheden op de randen van het verontreinigde gebied naar binnen zijn gericht en dat tevens de verlagingen en verhogingen van de grondwaterstanden buiten dat gebied beperkt blijven.

Een standaardvoorbeeld voor de isolering van een niet-langgerekt verontreinigd gebied is een onttrekkingsput met debiet Q en een aantal van n retourputten op regelmatige afstand (R) van de onttrekkingsput (zie afb. 4), waarbij de cirkel met straal R het verontreinigde gedeelte moet omsluiten. Afb. 5 toont voor een systeem van één onttrekkingsput met drie retourputten een analytisch geconstrueerd vierkantennet, waarbij het principe van de stroming en de verdeling van verlagingen en verhogingen duidelijk tot uiting komen.

De analytische formule voor de dalingen (stijgingen) van de stijghoogten van het

grondwater kan via een conforme transformatie worden bepaald. In poolcoördinaten luidt de daling (positief genomen) als functie van de plaats [Bruggeman, 1984]:

$$\varphi(r, \Theta) = \frac{Q}{4\pi k D n} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{R}{r}\right)^{2n} + 2\left(\frac{R}{r}\right)^n \cos(n\Theta) \right\} \quad (3)$$

waarbij r en Θ de poolcoördinaten voorstellen en

φ = de daling

Q = het pompdebiet

kD = het doorlaatvermogen van het pakket

n = het aantal retourputten

R = de straal van de cirkel waarop de retourputten zijn gelegen.

Hieruit kan door differentiatie naar r worden afgeleid dat de snelheidscomponent van de grondwaterstroming op de cirkelomtrek met straal R overal naar binnen is gericht (dus naar de onttrekkingsput toe) en, behalve ter plaatse van de retourputten, overal de constante waarde heeft van:

$$\left| V_r(r, \Theta) \right| = \frac{Q}{4\pi R D} \quad (4)$$

Deze waarde is dus onafhankelijk van de doorlatendheid en zelfs van n , het aantal retourputten!

Ten gevolge van de naar binnen gerichte snelheidscomponent kan het grondwater, dat zich binnen de cirkelcilinder bevindt, niet naar buiten stromen, zodat een verontreini-

ging binnen de cilinder zich niet erbuiten kan verspreiden. In deze zin kan de cilinder-mantel weer als een hydrologisch scherm worden opgevat. In tegenstelling echter met de *waterondoorlatende hydrologische schermen* van de vorige voorbeelden laat dit scherm eenzijdig (van buiten naar binnen) water dobr, waardoor kan worden gesproken van een *waterafstotend hydrologisch scherm*. De verlagingen die buiten het scherm optreden strekken zich het verst uit langs een voerstraal midden tussen twee retourputten en kunnen uit formule 3 worden afgeleid door $\Theta = 0$ te stellen:

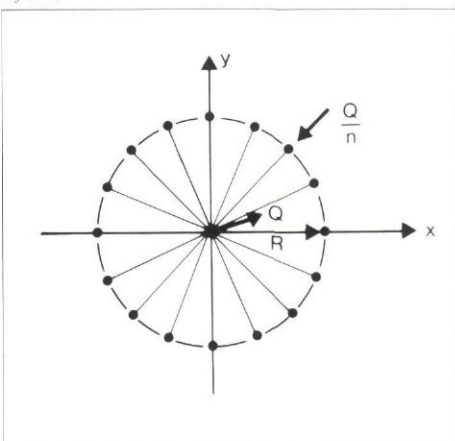
$$\varphi(r, 0) = \frac{Q}{2\pi k D n} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{R}{r}\right)^n \right\}$$

waaruit

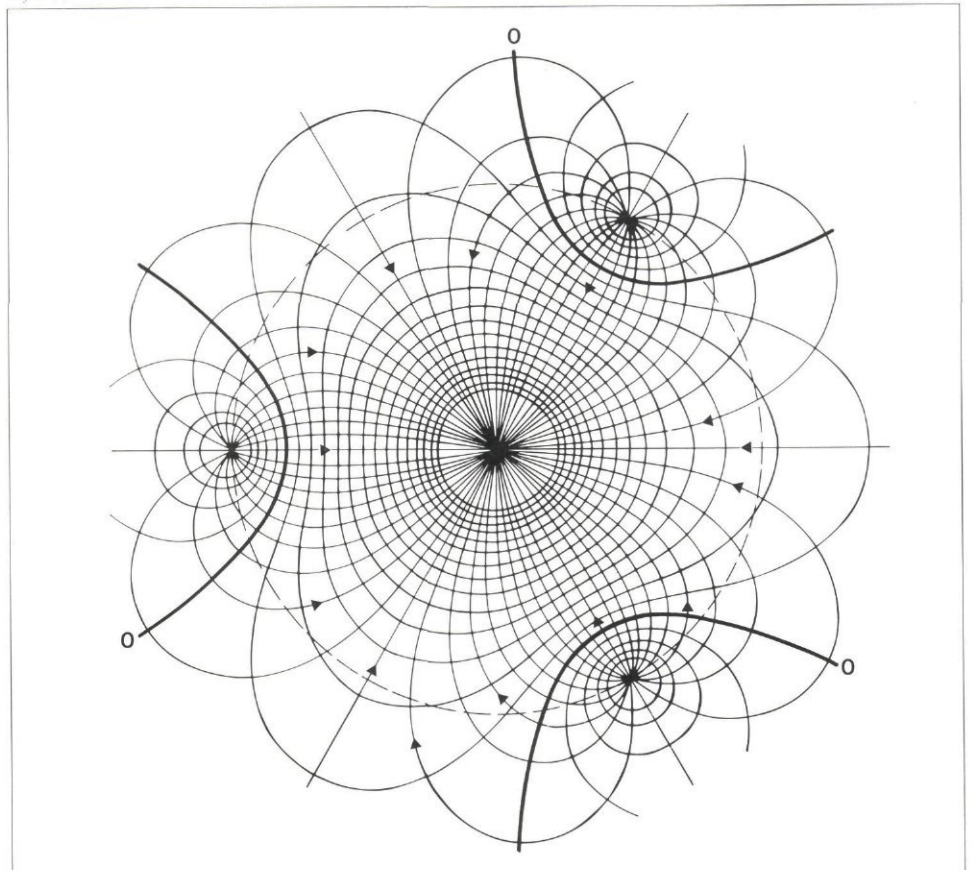
$$r = R \left\{ \frac{1}{\exp\left(\frac{2\pi k D n \varphi}{Q}\right) - 1} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Met formule 5 kan ook het invloedsgebied van het onttrekkingsinfiltratiesysteem worden berekend. Bijvoorbeeld geeft een systeem met 12 retourputten ($n = 12$) en een totaal debiet van 100 m^3 per uur ($Q = 2.400 \text{ m}^3/\text{dag}$) in een pakket van 50 m dik en een k -waarde van 25 m/dag ($kD = 1.250 \text{ m}^2/\text{dag}$) voor het gebied waarbuiten de verlagingen kleiner zijn dan 1 cm ($\varphi = 1 \text{ cm}$) een straal van 1,063 R . Indien $R = 50 \text{ m}$ bijvoorbeeld zullen de

Afb. 4.



Afb. 5.



verlagingen al buiten een straal van 53 m kleiner zijn dan 1 cm.

Voor de optredende verhogingen buiten het hydrologische scherm ten gevolge van het infiltreren van water kan een soortgelijke uitdrukking worden afgeleid door uit te gaan van de verhogingen langs een voerstraal door een retourput.

Met $\Theta = \frac{n}{\pi}$ en $r > R$ wordt formule 3:

$$\varphi\left(r, \frac{n}{\pi}\right) = \frac{Q}{2\pi k D n} \ln \left\{ 1 - \left(\frac{R}{r}\right)^n \right\}$$

waaruit

$$r = R \left\{ \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{2\pi k D n \varphi}{Q}\right)} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

Hierbij moet worden bedacht, dat voor φ een negatieve waarde moet worden ingevuld (verhoging). In het vorige voorbeeld vinden we met een verhoging van 1 cm ($\varphi = -0,01$ m) een straal van 55 m. Indien bepaalde eisen aan de grondwaterstandsveranderingen in de omgeving worden gesteld, kan met behulp van de formules 5 en 6 het puttenstelsel zodanig worden gedimensioneerd, dat aan die eisen wordt voldaan.

De saneringsmogelijkheden met een systeem van retourputten op de cirkelomtrek en een onttrekkingsput in het centrum zijn gunstig. De verblijftijden van het grondwater binnen de cirkelcilinder zijn gemiddeld relatief laag en vertonen een geringe spreiding voor de verschillende punten. Zo wordt bijvoorbeeld de verblijftijd van een waterdeeltje op de cirkelomtrek R midden tussen twee retourputten (langste stroomlijn), bepaald door

$$t_v = \frac{\eta_e \pi R^2 D}{Q} \left(1 + \frac{2}{n+2}\right) \quad (7)$$

en voor een deeltje langs de kortste stroomlijn (verbindingslijn tussen onttrekkingsput en retourput):

$$t_v = \frac{\eta_e \pi R^2 D}{Q} \left(1 - \frac{2}{n+2}\right) \quad (8)$$

waarin η_e = effectieve porositeit en t_v = verblijftijd binnen de cilinder. Wordt $\eta_e = 0,35$ aangenomen, dan worden de maximum en minimum verblijftijden in het genoemde voorbeeld volgens formule 7 en 8 respectievelijk 65 en 49 dagen.

Ook in deze gevallen, waar een natuurlijke horizontale grondwaterstroming ontbreekt, kunnen met behulp van combinaties van onttrekkings- en retourputten uiteenlopende vormen van eenzijdig waterafstotende hydrologische schermen worden geïnstalleerd, zonder dat de grondwaterstijghoogten in de omgeving noemenswaard worden beïnvloed.

De waterafstotende schermen kunnen ook in gebieden met een horizontale grondwaterstroming worden toegepast. In het geval van een cirkelvormige rij retourputten rondom een onttrekkingsput moet dan bijvoorbeeld

worden gezorgd dat de naar binnen gerichte snelheidscomponent volgens (4) groter is dan de aanwezige horizontale flux zodat de resulterende naar de onttrekkingsput gerichte snelheidscomponenten steeds positief blijven.

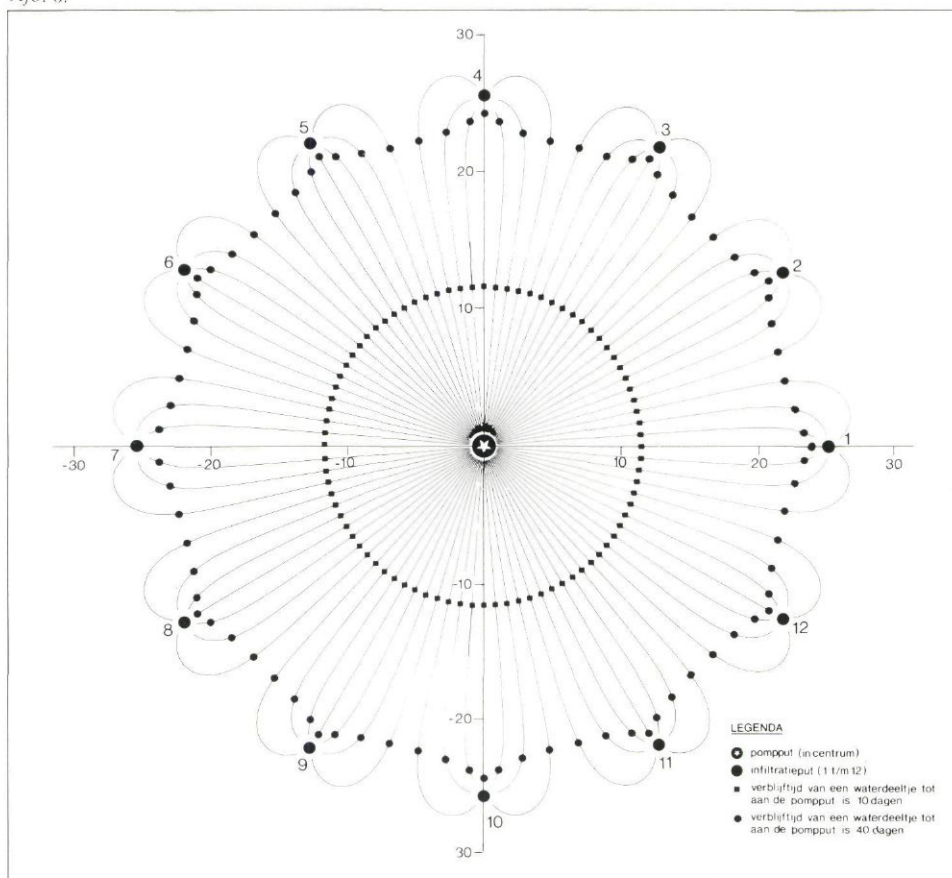
3. Voorbeelden; numerieke oplossingen

De in de vorige paragraaf gegeven voorbeelden lenen zich uitstekend voor analytische oplossingen en geven daardoor een goed inzicht in het principe van het hydrologische scherm. Voor meer ingewikkelde situaties zijn analytische oplossingen, vooral wat het berekenen van verblijftijden betreft, meestal niet te vinden en moeten numerieke oplossingsmethoden worden toegepast. De ontwerpberekeningen kunnen op vrij eenvoudige wijze worden uitgevoerd met het rekenprogramma FLOP [Van den Akker, 1982], dat bij vele diensten en instanties beschikbaar is. Het rekenprogramma geeft niet alleen indicaties omtrent de richting van de grondwaterstroming maar ook over de tijd die een waterdeeltje onder invloed van een onttrekking nodig heeft om een bepaalde afstand in de ondergrond te overbruggen.

3.1. Het ontwerp

Het is uiteraard onmogelijk om alle voorkomende gevallen van bodem- en grondwaterverontreiniging te bespreken.

Afb. 6.



Gekozen is dan ook voor een tweetal standaard situaties; in werkelijkheid voorkomende verontreinigingen in de ondergrond kunnen in vele gevallen tot een van beide worden geschematiseerd. Voor de uitgewerkte voorbeelden is aangenomen, dat de verontreiniging zich bevindt in een watervoerend pakket met een relatief goede doorlatendheid ($k = 25$ m/d), een effectieve porositeit van 0,35 en een dikte van 50 resp. 20 m. Het grondwater in het pakket kan als freatisch worden beschouwd. Verder wordt verondersteld, dat de verontreiniging tot een diepte van 20 m beneden het maaiveld in het watervoerende pakket is doorgedrongen. De voornoemde standaard situaties waarvoor een saneringsontwerp met behulp van een 'hydrologisch' scherm zal worden besproken zijn:

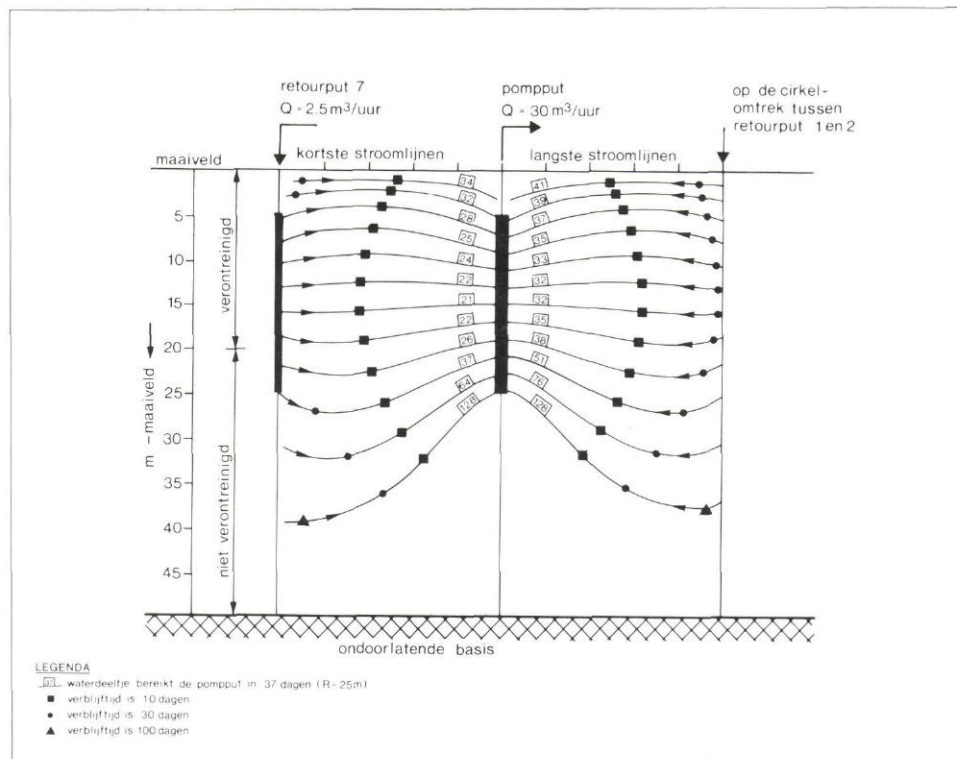
1. een verontreiniging die qua verbreiding kan worden geschematiseerd tot een cirkelcilinder;
2. een verontreiniging in een langgerekte vorm.

Verder is bij de berekeningen de richting en de grootte (gradiënt) van de natuurlijke grondwaterstroming van belang. Uitgaande van bovengenoemde veronderstellingen betreffende het hydrologische systeem waarin de verontreiniging voorkomt, kan nu een aantal saneringsmogelijkheden worden uitgewerkt.

3.2. Verontreiniging in de vorm van een cirkelcilinder

Een eerste berekening is gemaakt voor een verontreiniging die kan worden geschematiseerd tot een cirkelcilinder met een straal (R) van 25 m in een watervoerend pakket met een dikte van 50 m. Het debiet van de in het centrum te installeren onttrekking wordt gesteld op 30 m^3 per uur ($Q = 720 \text{ m}^3$ per dag). Het opgepompte, verontreinigde grondwater wordt na zuivering in de ondergrond teruggebracht door middel van 12 infiltratieputten ($n = 12$) die regelmatig verdeeld op de cirkelomtrek zijn geplaatst. De putten hebben elk een infiltratiecapaciteit van 2.5 m^3 per uur. Voor dit geval is verder verondersteld, dat zowel de onttrekking als de infiltratie plaatsvindt met behulp van volkomen putfilters, die derhalve het gehele pakket in verticale zin omvatten en dat in het watervoerende pakket geen natuurlijke grondwaterstroming aanwezig is. Afb. 6 geeft de berekeningsresultaten in de vorm van stroombanen naar de pompput toe en verblijftijden binnen de cirkelcilinder. Ten aanzien van afb. 6 kan het volgende worden opgemerkt. Precies de helft van het geïnfilteerde water stroomt in eerste instantie af buiten de cirkelcilinder, hetgeen analytisch kan worden bewezen en aan de hand van afb. 5 kan worden geverifieerd. De stroomlijnen buigen echter om en het water passeert na enige tijd de cilindermantel om vervolgens in de richting van de pompput zijn weg te vervolgen. De andere helft blijft binnen de cirkelcilinder en stroomt min of meer rechtstreeks naar de pompput. Voor dit voorbeeld – geen natuurlijke grondwaterstroming en 'volkomen' putten – zijn de in paragraaf 2.2 aangegeven formules toepasbaar. De maximale en minimale verblijftijd van het grondwater binnen de cirkelcilinder kan worden berekend met (7) en (8) en bedraagt resp. 54 dagen en 41 dagen.

Het is in dit geval echter niet noodzakelijk te werken met pomp- en infiltratieputten die over de gehele pakketdikte van 50 m zijn geplaatst (volkomen putten). De verontreiniging in het watervoerende pakket wordt immers verondersteld maar tot 20 m beneden het maaiveld te zijn doorgedrongen. Het grondwater onder de verontreinigde zone tot aan de basis van het pakket is niet verontreinigd en behoeft derhalve niet te worden opgepompt en gezuiverd. Om deze onnodige belasting van het systeem te vermijden kan met 'onvolkomen' putten worden gewerkt. De filters worden in dit geval ingericht tot bijvoorbeeld 25 m beneden het maaiveld. De hierin gelegen voordelen bestaan niet alleen uit geringere aanlegkosten maar vooral uit een aanzienlijke reductie van de verblijftijd van het grondwater binnen de cirkelcilinder in het



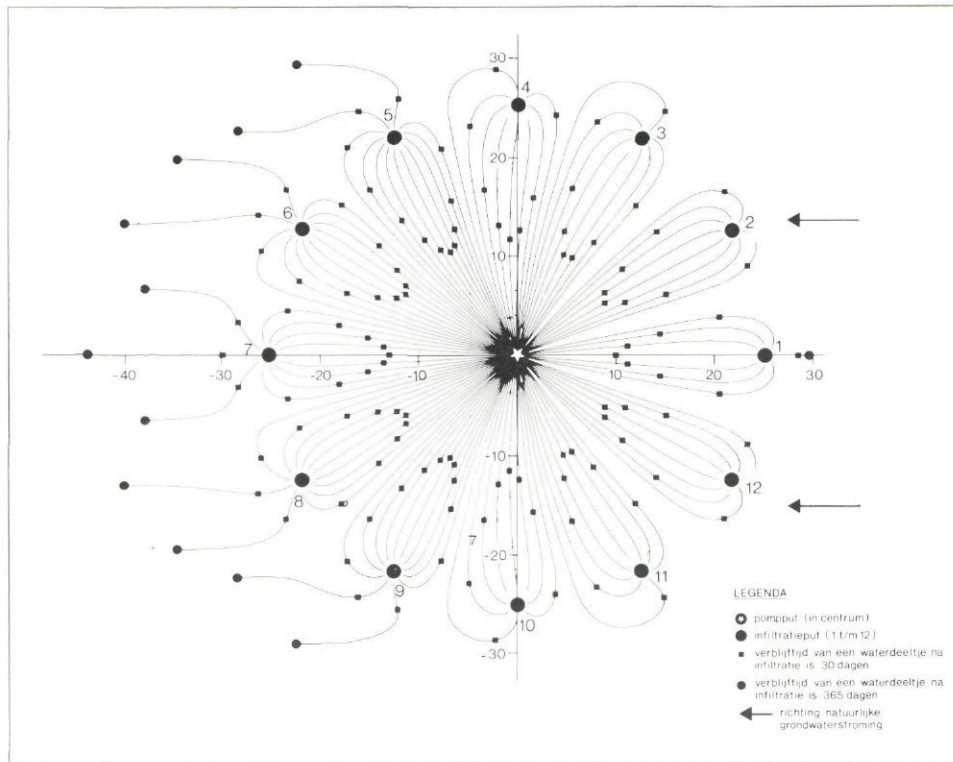
Afb. 7.

verontreinigde gedeelte van het watervoerende pakket.

Ter illustratie is in afb. 7 een doorsnede weergegeven waarin het stromingspatroon en de verblijftijden binnen de cirkelcilinder in het verticale vlak goed tot uiting komen. Uit afb. 7 blijkt, dat het grondwater in het niet verontreinigde gedeelte (dieper dan 20 m) van het watervoerende pakket wel aan de stroming meedoet. De verblijftijden in dit pakketdeel zijn evenwel beduidend groter dan in het verontreinigde deel. In vergelijking met het voorbeeld waarin met volkomen pompputten is gerekend, zijn de verblijftijden in het verontreinigde deel van het pakket kleiner. Via de kortste stroomlijnen (op de verbindinglijn tussen de onttrekingsput en een retourput) zoals is weergegeven in afb. 7, variëren de verblijftijden van waterdeeltjes met de diepte van 21 tot 34 dagen (was 41 dagen bij volkomen putten). De langste stroomlijnen komen voor in een vlak tussen de pompput en punten op de cirkelomtrek die midden tussen twee retourputten zijn gelegen. De verblijftijden in het verontreinigde deel van het watervoerende pakket in deze vlakken zijn aangegeven in het rechter gedeelte van afb. 7. In vele gevallen zal echter ook met een zekere natuurlijke horizontale grondwaterstroming rekening moeten worden gehouden. In tegenstelling tot de situatie zonder deze stroming is de verblijftijd van het grondwater binnen de cirkelcilinder in dit geval ook afhankelijk van het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket.

Er dient dan ook een schatting te worden gemaakt of een bepaling te worden gedaan van de richting en gradiënt van de natuurlijke grondwaterstroming (isohypsenkaarten) en het doorlaatvermogen (kD) van het pakket. In het uitgewerkte voorbeeld wordt de natuurlijke grondwaterstroming van oost naar west aangenomen onder een verhang (gradiënt) van 1 : 2.500. Het doorlaatvermogen (kD) van het pakket is op $1.250 \text{ m}^2/\text{d}$ gesteld.

Afb. 8 geeft een indruk van het stromingsbeeld waarin de invloed van de natuurlijke grondwaterstroming is verdisconteerd voor het geval dat met volkomen putten wordt gewerkt (12 infiltratieputten met $Q = 60 \text{ m}^3/\text{d}$ in een cirkel rond een centraal gelegen pompput met $Q = 720 \text{ m}^3/\text{d}$). Afb. 8 geeft aanleiding tot de volgende opmerkingen. Uit het stromingsbeeld blijkt, dat de totale hoeveelheid geïnfilteerd water maar gedeeltelijk via de pompput in het centrum wordt opgepompt. Aan de stroomafwaartse zijde van het cirkelcilinder stroomt geïnfilteerd water af (de stroombanen buigen niet om zoals zonder natuurlijke afstroming wel het geval is). Dit impliceert, dat bovenstrooms behalve geïnfilteerd water ook nog grondwater van buiten de cirkelcilinder naar de pompput toestroomt. Het systeem wordt derhalve minder goed beheersbaar en controleerbaar omdat het van buiten toestromende grondwater eveneens verontreinigd kan zijn. Hierin kan verbetering worden gebracht, door de pompput stroomafwaarts in de richting van



Afb. 8.

de natuurlijke grondwaterstroming uit het centrum van de cirkelcilinder te plaatsen (bijvoorbeeld op $x = -10$ m). De situatie, waarin het infiltratiewater in zijn geheel naar de pompput stroomt, zoals in het geval zonder natuurlijke afstroming, wordt nu min of meer hersteld en er is weer sprake van een geïsoleerd gebied waarbinnen sanering kan plaatsvinden. Ook voor de hier beschreven situatie met natuurlijke grondwaterstroming is het zinvol met onvolkomen putten te werken. Hiermee kan de verblijftijd van het water in de ondergrond binnen de cirkelcilinder aanzienlijk worden verkort.

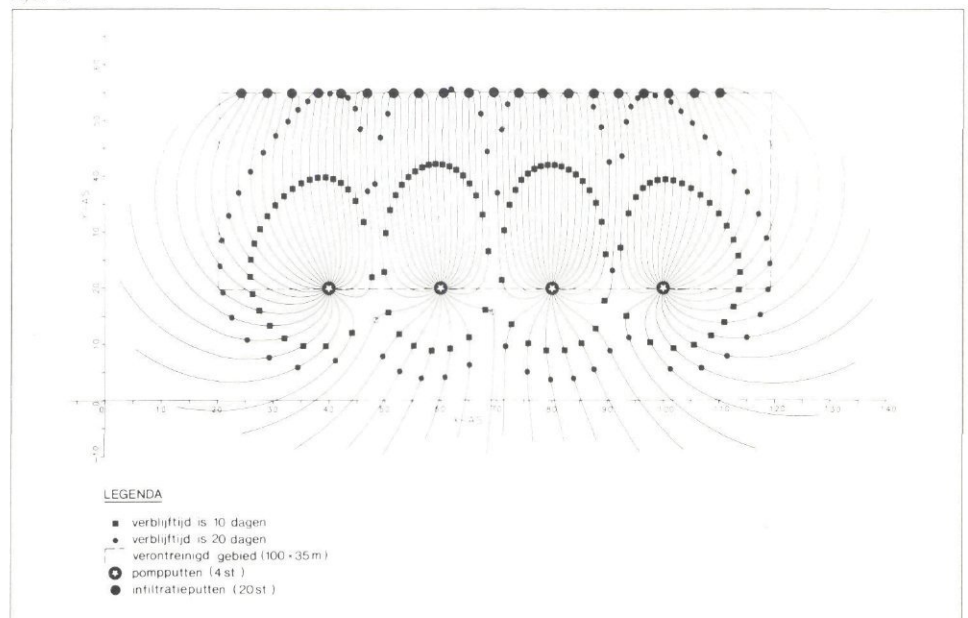
3.3. Verontreinigingen in langgerekte vorm

In vele gevallen is de bovenomschreven aanpak niet mogelijk omdat de verontreiniging een langgerekte vorm heeft. Te denken valt hierbij aan vuilstorten waarin niet of moeilijk een aantal boringen kan worden gezet of met milieuvreemde stoffen gedempte sloten. Gewerkt kan worden met pomp- en infiltratieputten in de langsrichting van de verontreinigde strook of dwars erop. Voor beide situaties is een voorbeeld uitgewerkt waarin een watervoerend pakket wordt aangenomen met een dikte van 20 m en een k -waarde van 20 m/d. De verontreiniging wordt verondersteld te zijn doorgedrongen tot op de ondoorlatende basis van het pakket.

In afb. 9 is het stromingsbeeld weergegeven in een verontreinigd gebied van 100×35 m waarin geen of een zeer geringe natuurlijke grondwaterstroming aanwezig is.

De onttrekkingscapaciteit bedraagt $60 \text{ m}^3/\text{uur}$ (4 putten van elk $15 \text{ m}^3/\text{uur}$). Het opgepompte water wordt na zuivering door middel van 20 infiltratieputten, elk met een capaciteit van $3 \text{ m}^3/\text{uur}$, in de bodem teruggebracht. De aangegeven verblijftijden hebben betrekking op een waterdeeltje, dat in de aangegeven tijd vanaf het betreffende punt naar de pompput stroomt. Zoals blijkt uit afb. 9 wordt het grondwater in het grootste gedeelte van het verontreinigde gebied in 10-25 dagen eenmaal 'rondgepompt'. Alleen ter plaatse van de korte

Afb. 9.



zijden van de rechthoek is de verblijftijd van een waterdeeltje groter voordat de pompput wordt bereikt. Ook vindt toestrooming naar de pompput plaats van grondwater van buiten het verontreinigde gebied. Voor het hier besproken pomp- en infiltratieschema is dit laatste niet te voorkomen.

Indien het in de praktijk echter mogelijk is, om in het verontreinigde gebied boringen te plaatsen dan ontstaat een stromingsbeeld zoals is aangegeven in afb. 10. De pompputten zijn hier geplaatst op de lijn $y = 37,5$ m en de infiltratieputten zijn verdeeld over de lange zijde van de rechthoek (10 st. langs elke kant). Het stroomlijnenbeeld voor dit geval is beduidend gunstiger dan in afb. 9.

De verblijftijden binnen de rechthoek zijn praktisch gehalveerd en de toestrooming van niet verontreinigd grondwater is zeer gering. Langs de korte zijden van de rechthoek zijn de verblijftijden in vergelijking met afb. 9 veel geringer. Bovendien is het pomp- en infiltratiesysteem bij een dergelijke opzet beter controleerbaar en beheersbaar.

4. Conclusies

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is een goede isolatie van een verontreiniging in een watervoerend pakket met relatief eenvoudige middelen, namelijk putten en retourputten, te bewerkstelligen. De aldus gecreëerde 'hydrologische schermen' zijn aanzienlijk goedkoper dan civieltechnische schermen, zoals damwanden of met waterdicht materiaal gevulde sleuven, waar meestal investeringen van vele miljoenen guldens mee zijn gemoeid. Bovendien behoeft bij goede dimensionering van putten en retourputten niet te worden gevreesd voor lekkages via semipermeabele lagen naar de diepere ondergrond. Een bijkomend voordeel is, dat de putten en

retourputten die een hydrologisch scherm bewerkstelligen, tezelfdertijd de sanering van de grond in gang zetten, welke bijvoorbeeld bij toepassing van een civieltechnisch scherm, afzonderlijk ter hand moet worden genomen. Indien een verontreiniging in een watervoerend pakket is geconstateerd, is in vele gevallen niet bekend hoever die verontreiniging zich uitstrekt. Om hierover een enigszins juist inzicht te krijgen is veelal een uitgebreid boorprogramma noodzakelijk. Indien men van plan is isolatie door een hydrologisch scherm toe te passen, kan elke verkenning-boring tevens dienst doen als onderdeel van het putten- en retourputtensysteem. Zelfs als men op grond van een aangetroffen verontreiniging, waarvan de grootte en de omvang goed bekend wordt verondersteld, een hydrologisch isoleringssysteem heeft opgesteld en naderhand blijkt bijvoorbeeld, dat zich ook verontreinigingen buiten het systeem bevinden, dan kan door bijplaatsing van retourputten en vervanging van bestaande retourputten door onttrekkingsputten het ontworpen hydrologische scherm eenvoudig worden gewijzigd in een scherm, dat ook de nieuw ontdekte verontreiniging omvat. Hieruit blijkt de zeer grote flexibiliteit van de methode: een eenmaal gecreëerd scherm is niet 'onherroepelijk' zoals een civieltechnisch scherm, maar kan op gemakkelijke en goedkope wijze worden gewijzigd.

De sanering van bodem en grondwater is een vraagstuk apart, waarop hier niet in detail zal worden ingegaan. Saneringstechnieken in situ zijn momenteel onderwerp van studie. In het algemeen kan worden gesteld, dat sanering in situ geen eenvoudige zaak is. Er kan namelijk niet zonder meer worden aangenomen, dat bodem en grondwater in een verontreinigd gebied, nadat het water

eenmaal is rondgepompt en gezuiverd, zijn gesaneerd. Toch zal een substantieel gedeelte van de verontreiniging zijn verwijderd, namelijk het deel dat in het grondwater in oplossing is of op andere wijze aan de stroming naar de pompput deelneemt. Een gedeelte van de verontreiniging zal evenwel aan de bodemdeeltjes geadsorbeerd blijven en op andere wijze moeten worden behandeld, bijvoorbeeld door toevoeging van chemicaliën aan het geïnfiltreerde water of door toevoeging van voedingsstoffen om de microbiologische activiteit in de bodem te stimuleren met naar verwachting versnelde afbraak van (voornamelijk) organische verontreinigingen.

Literatuur

- Akker, C. van den (1983). *Numerical analysis of the streamfunction in plane groundwaterflow*. RID-mededeeling '83-1. Leidschendam.
Bruggeman, G. A. (1984). *Analytische oplossingen voor de stroming tussen een onttrekkingsput in het centrum van een cirkelvormige rij infiltratieputten*. Interne nota. RIVM, Leidschendam.

● ● ●

Stroombanen en intrekgebieden

● Slot van pagina 185

de ondergrond heeft plaatsgevonden en welke verspreiding inmiddels is opgetreden. In feite is dat de nul-situatie, waarvan moet worden uitgegaan indien voorspellingen ten aanzien van de verspreiding in de toekomst moeten worden gedaan.

Tenslotte wordt erop gewezen dat de omvang van het intrekgebied van een winning tevens een uitgangspunt is bij het kwantificeren van de belasting van het opgepompte water met verontreinigende stoffen afkomstig van bronnen met een diffuus karakter.

Literatuur

- Santing, G. (1982). *Nogmaals over het poriegehalte van watervoerende zandpakketten en de bescherming van waterwinplaatsen*. H₂O (15) 1982, nr. 22.
Snelting, H. en Pastoors, M. J. H. (1985). *Verkenning en beschrijving van het geohydrologische systeem in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug*. RIVM-rapport (in voorbereiding).
Lanen, H. A. J. van (1984). *Verblijftijd van water in de onverzadigde zone van zandgronden in gebieden met diepe grondwaterspiegels*. H₂O (17) 1984, nr. 1.
Olsthoorn, Th. N. (1977). *In Nederlandse zandformaties zijn het doorstroomde en het totale porievolumen aan elkaar gelijk*. H₂O (10) 1977, nr. 5.
Olsthoorn, Th. N. (1973). *Kunstmatige infiltratie Utrechtse Heuvelrug ter compensatie van de lage neerslagen van de laatste 7 jaren*. Afstudeerontwerp TH-Delft.
Heij, G. J. (1984). *Verticale en horizontale stromingscomponent ten gevolge van de natuurlijke afstroming, in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug*. Technisch document OU-T9, project Oost-Utrecht.
Obdam, A. (1985). *Toepassing van geostatistische methoden voor het oplossen van het ruimtelijke interpolatie-probleem*. (In voorbereiding).
Pastoors, M. J. H., Snelting, H., Kwaadsteniet, J. W. de en Heij, G. J. (1985). *Kriging-techniek als hulpmiddel bij modelcalibratie*. H₂O (18) 1985, nr. 2.
Akker, C. van den, Veling, E. J. M. en Lieste, R. (1985). *Berekening van stroombanen uit gediscrèteerde grondwaterstijghoogten*. (In voorbereiding).
Akker, C. van den (1982). *Numerical analysis of the streamfunction in plane groundwaterflow*. Thesis.

● ● ●

Afb. 10.

