

Enkele mogelijkheden van persputten bij de watervoorziening*

Ofschoon dit laatste technisch zo mogelijk is, blijft de vraag of de voordeligste oplossing in de praktijk altijd de meest wenselijke is. Andere argumenten als verstoring van de rust in het gebied en het ontzien van de bodem kunnen tot een verdergaande voorzuivering doen besluiten. Een en ander zal van geval tot geval nader bekeken moeten worden en betreft een niet-technisch afwegingsvraagstuk. Wel kan de optimalisatie laten zien wat op andere dan technische gronden genomen besluiten zullen gaan kosten.

Literatuur

Anoniem. *Duinwaterleiding en alternatieven*. Centrum voor milieukunde der univ. Leiden. Leiden, juli 1978.
Olsthoorn, T. N. *Persputten als infiltratiemiddel*. H₂O 1982, p. 21.

1. Inleiding

Voor een gat dat in de bodem gemaakt is om een vloeistof aan de bodem toe te voegen, bestaat een groot aantal benamingen die vaak al de gebruiksvorm aanduiden. Zo wordt met een *retourput* een met een bepaald doel onttrokken vloeistof weer teruggeleid in de bodem. Op enkele plaatsen in de wereld worden *lozingsputten* en *injectieputten* gebruikt onder andere voor wat genoemd wordt de 'berging' van vloeibaar afval.

De woorden *infiltratieput*, *aanvullingsput*



IR. J. H. PETERS
KIWA NV Nieuwegein

en *persput* wijzen in de richting van toepassingen in de openbare drinkwatervoorziening – toepassingen waarbij water wordt ingebracht in de ruimte die aanwezig is tussen het korrelmateriaal waaruit de bodem is opgebouwd. In tegenstelling tot wat de naam persput doet vermoeden, is hiervoor geen grote druk noodzakelijk. In verband met het verlies van stabiliteit van de ondergrond is dit zelfs onmogelijk als de infiltratie op slechts kleine diepte plaatsvindt.

Weer een andere benaming voor persput is *negatieve put* – een naam die mogelijk slaat op de ervaringen die waterleidingbedrijven hebben in verband met de verstopping van dergelijke putten. Waarschijnlijk is echter dat de laatste benaming dient om onderscheid te maken met winputten die ook wel positieve putten worden genoemd.

Wat de meeste toepassingen gemeen hebben, is dat de aandacht niet alleen gericht is op de verstopping van de putten, maar ook op de weg die de in de bodem gebrachte vloeistof neemt. Dit om redenen die samenhangen met economie, veiligheid of een mogelijke invloed op de omgeving. De interesse kan daarbij uitgaan naar de vloeistof zelf of een bepaalde chemische of fysische parameter zoals de temperatuur. De temperatuur is belangrijk onder andere bij projecten waarbij grondwater gebruikt wordt voor koeling, voor de winning van aardwarmte of voor de opslag van energie. Het beschouwen van slechts de stroming

van water is hierbij onvoldoende; de interacties tussen het water en de bodem moeten dan in de studies worden betrokken. Voor wat de watervoorziening betreft, zijn er vele toepassingsmogelijkheden te onderscheiden. Zo kunnen persputten gebruikt worden voor het plaatselijk compenseren van verlagingen van grondwaterstand of -stijghoogte [11], voor het reguleren van stromingen van verontreinigd of zout grondwater, voor de beperking van het intrek- of beschermingsgebied van een grondwaterpompstation en als middel ter aanvulling van het (zoete) grondwater. Dit laatste gebeurt bij de techniek die bekend staat als *kunstmatige infiltratie*. Van de laatste drie genoemde toepassingsmogelijkheden zullen in dit artikel aan de hand van fictieve voorbeelden enkele hydrologische aspecten worden besproken. Allereerst wordt ingegaan op enkele beschikbare computermodellen waarmee een belangrijk hydrologisch aspect, de stroming van het grondwater, kan worden berekend.

2. Grondwaterstromingsmodellen

In de watervoorziening is de aandacht voor wat betreft grondwatermodellen lange tijd voor het grootste gedeelte gericht geweest op de voorspelling van veranderingen in grondwaterstanden en -stijghoogten als gevolg van bijvoorbeeld een winning. Dit om de hoeveelheid energie die nodig is voor de winning te kunnen berekenen, om pompen te kunnen dimensioneren of om een inzicht te krijgen in de schade die anderen die belangen hebben bij de grondwaterstand kan worden berekend. Later is ook de invloed die de omgeving op een winning uitoefent onderwerp van studie geworden. Belangrijk hierbij is de weg die het water aflegt door de ondergrond en de tijdsduur die daarmee is gemoeid.

De stroming van water door de bodem wordt onder andere bepaald door eigenschappen van zowel water (viscositeit, volumieke massa (dichtheid)) als bodem (doorlatendheid, porositeit) en kan worden berekend met behulp van modellen indien de genoemde eigenschappen bekend zijn. Het stationaire stromingsmodel FLOP (Flow-Pattern) dat is ontwikkeld door Van den Akker is een dergelijk model. Dit model maakt het mogelijk om – uitgaande van een aantal veronderstellingen – snel een beeld te krijgen van het stromingspatroon in een watervoerend pakket en een indruk van de bijbehorende verblijftijden van het grondwater [1]. Bij het onderzoek naar de hydrologie van persputsystemen kan de situatie dat infiltraties plaatsvinden in een ander pakket dan het

* Voordracht gehouden tijdens de 4e KIWA/VWN-colloquium. 'Enkele aspecten betreffende de winning en aanvulling van grondwater voor de drinkwatervoorziening' op 4, 5 en 10 november 1981 in 's-Hertogenbosch, Leiden en Assen.



Infiltratieput met drains, die het voedingwater verzamelen voor de persput IP1 van het PWN.
(Foto: PWN).

pakket waarin de winputten zijn geplaatst, niet buiten beschouwing blijven. Daarom is het computermodel uitgebreid met opties voor het berekenen van stroombanen in twee door een minder doorlatende laag van elkaar gescheiden pakketten [2, 12]. Een handleiding bij het gebruik van dit programma is gereed [3]. In navolgende paragrafen worden rekenvoorbeelden gegeven ter illustratie van enkele toepassingsmogelijkheden van persputten.

Het is gebleken dat juist plaatselijke verschillen in eigenschappen van zowel water als bodem voor het stromingspatroon belangrijk zijn. Fysische verschijnselen als dispersie, dichtheidsstromingen en 'interfingering' vinden hierin hun oorzaak. Dichtheidsstromingen, treden onder andere op bij de berging van zoet water wanneer zout water wordt verdrongen en bij 'upconing' onder winputten. Bij de bestudering van deze verschijnselen kan gebruik gemaakt worden van computermodellen die gebaseerd zijn op de vortex-theorie ontwikkeld door De Josselin de Jong [5]. Deze modelleren de rotatie zoals die in de stroming aanwezig is als de dichtheid in horizontale richting verandert [6, 10]. De invloed daarvan is zodanig dat een hellend grensvlak tussen vloeistoffen met verschillende dichtheden in een horizontale positie wordt (terug-)gedraaid. In paragraaf 3.2. is een resultaat weergegeven van berekeningen met een axiaal-symmetrisch model dat is ontwikkeld door Haitjema [8, 13].

3. Een persput bij kunstmatige infiltratie

Met uitsluitend oppervlaktewater als bron

voor de drink- en industriewatervoorziening is voorraadvorming noodzakelijk om altijd een ongestoorde waterlevering te kunnen waarborgen. Bijkomende voordelen van een voorraad zijn dat door een selectieve inname naast de afbraak- en mengprocessen extra kwaliteitsverbeteringen kunnen worden bewerkstelligd. Een voorraad kan worden gevormd door gebruik te maken van spaarbekkens [16] maar ook door aanvulling van het water in de ondergrond, kunstmatige infiltratie. Voorraadvorming in diepere bodemlagen kan slechts geschieden door middel van putten.

Voor het onderzoek van de specifiek geohydrologische problemen die zich bij een dergelijke infiltratie kunnen voordoen, is in 1979 het project Hydrologie van Persputsystemen geïnitieerd door de KIWA-Commissie Infiltratie [15]. Enkele aspecten die worden onderzocht door de hiertoe ingestelde werkgroep zijn:

- kwaliteitsafvlakking
- voorraadvorming door verdringing van zout water
- terugwinpercentages
- tegengaan van zoutwaterintrusie en 'upconing'
- vorming van brak grondwater
- veiligheid bij berging onder slecht doorlatende lagen.

Bepaalde effecten manifesteren zich vaak pas na vele jaren zodat proefondervindelijk onderzoek langdurig en erg kostbaar zou zijn. Gekozen is daarom voor een modelmatiek aanpak. Hierbij zijn het ont-

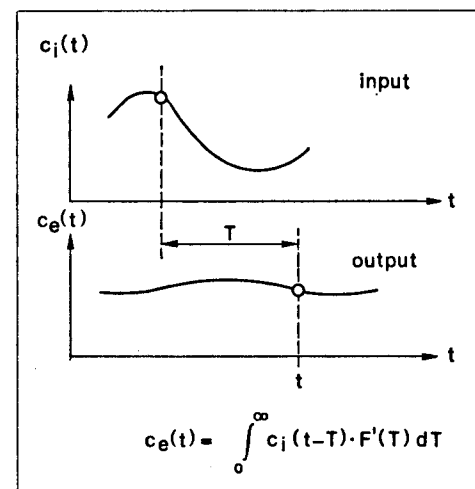
wikkelen van rekenmethoden ter bepaling van kwaliteitsafvlakking en het inventariseren en ontwikkelen van 'zoet-zout-modellen' belangrijke punten van studie.

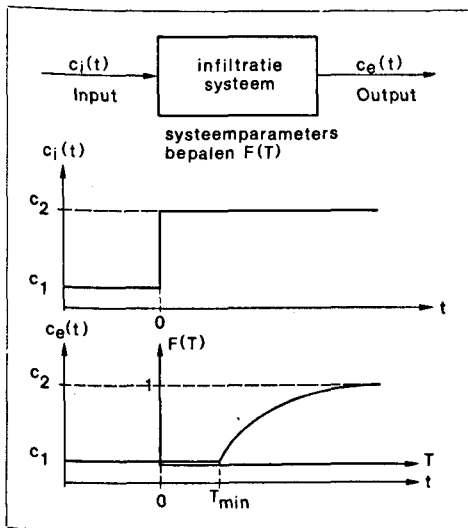
3.1. De demping van kwaliteitsfluctuaties door menging in de ondergrond

Een belangrijk aspect van ondergrondse berging door infiltratie van voorgezuiverd oppervlaktewater is de afvlakking van de waterkwaliteit en de temperatuur. De wenselijkheid hiervan is onder andere aangegeven door Van Puffelen [14]. Vaak vormt namelijk niet alleen de kwaliteit alswel de variatie daarvan een probleem. Een infiltratie-onttrekkingssysteem kan zo worden ingericht dat bij de onttrekking water met verschillende verblijftijden, en dus in het algemeen verschillende kwaliteiten, wordt gemengd hetgeen resulteert in een demping van de wisselingen in kwaliteit.

Voor de berekening van het effect van spreiding van verblijftijden beschouwen we een infiltratiesysteem dat stationair doorstroomd wordt. Het is dan zinvol de aankomstdichtheid $F'(T)$ te definiëren als de fractie van de op het tijdstip $t = 0$ geïnfilterde volumestroom die per tijds-eenheid bij de winmiddelen arriveert ten tijde T . Hierbij is T de verblijftijd van het water. De fractie die reeds is gearriveerd ten tijde T wordt aangegeven met $F(T)$, de relatieve cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden. Veronderstel nu dat in een infiltratie-onttrekkingssysteem water wordt geïnfilterd met daarin een stof die niet wordt afgebroken of geadsorbeerd of anderszins uit het water verdwijnt. Neem vervolgens aan dat de concentratie c_i van een dergelijke 'conservatieve' stof (bijvoorbeeld het chloridegehalte) varieert in de tijd volgens de functie $c_i(t)$.

Afb. 1 - De concentratie van een met verblijftijd T bij de winmiddelen gearriveerde fractie is gelijk aan de concentratie in het geïnfilterde water T dagen terug in de tijd.





Afb. 2 - Het concentratieverloop in het onttrokken water is afhankelijk van het concentratieverloop in het geïnfilterde water en de verblijftijdsverdeling.

Als van het stationaire infiltratiesysteem de functie $F'(T)$ bekend wordt verondersteld, is het concentratieverloop $c_e(t)$ in het onttrokken water te berekenen volgens de convolutie-integraal die weergegeven staat in afb. 1.

Deze integraal geeft een uitdrukking voor de respons van een systeem op een aandrijvende functie $c_i(t)$. Hierbij dienen de eigenschappen van het systeem bekend te zijn. Een bepaling van de relatieve cumulatieve verblijftijdsverdeling of de respons op een sprongwijze verandering van de concentratie van het geïnfilterde water is hiervoor voldoende, zie afb. 2.

In het algemeen kan worden gesteld dat verschillen in verblijftijd ontstaan doordat niet al het water eenzelfde weg kiest door de bodem. Dit wordt onder andere veroorzaakt door verschillen in doorlatendheid, porositeit en viscositeit (dat speciaal bij de infiltratie van voorgezuiverd oppervlaktewater belangrijk kan zijn). De variatie van verblijftijden zal echter voor een groot gedeelte bereikt worden door een bepaalde inrichting van het infiltratie- en onttrekkingsysteem waardoor variatie in

de lengte van en in de stijwhoogtegradiënten langs de stroomlijnen zal optreden. De bepaling van de verblijftijdsverdeling die hieruit resulteert, geschiedt aan de hand van een stroomlijnenpatroon. Het principe hiervan is weergegeven in afb. 3.

Stroomlijnenpatronen kunnen zelfs voor ingewikkelde configuraties van pers- en winputten snel met behulp van computerprogramma's worden bepaald, zie afb. 4. Het is gebleken dat het verloop van concentraties aan verontreiniging vaak een duidelijk seizoensgebonden patroon vertoont. Uitgaande van een concentratieverloop met een periodiek karakter (bijvoorbeeld jaarlijks terugkerend) kan voor een stationair infiltratiesysteem het jaarlijkse verloop van de concentratie in het teruggewonnen water numeriek worden berekend door zowel verblijftijdsverdeling als concentratieverloop op te delen in tijdstappen (afb. 5).

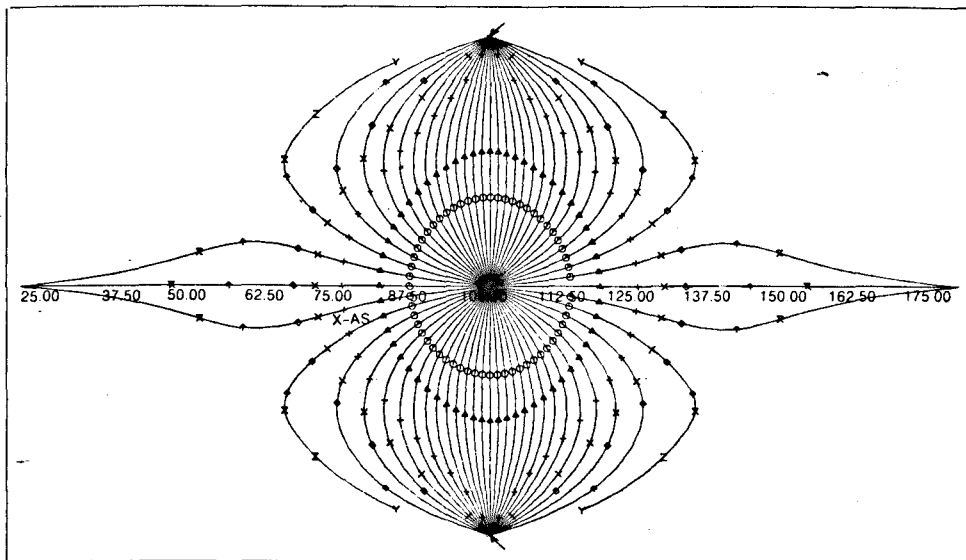
De minimale verblijftijd van het water in de ondergrond kan een ontwerpcriterium zijn, veelal gebaseerd op de afbraaksnelheid van pathogene organismen. Voor wat betreft de demping van kwaliteits-

fluctuaties kan worden berekend dat die volledig is bij een verdeling van verblijftijden als weergegeven in afb. 6 waarbij de spreiding een geheel aantal malen de periode van de fluctuaties in het geïnfilterde water omvat [9].

Haitjema heeft bewezen dat met een lineaire verblijftijdsverdeling in het geval van een periodiek ingangssignaal volledige demping kan worden gerealiseerd [7]. In het kader van het project 'Hydrologie van Persputsystemen' wordt dan ook gezocht naar opstellingen van grote aantallen pers- en winputten waarbij de lineaire verdeling van verblijftijden zo goed mogelijk wordt benaderd. Een rapport hierover is in voorbereiding.

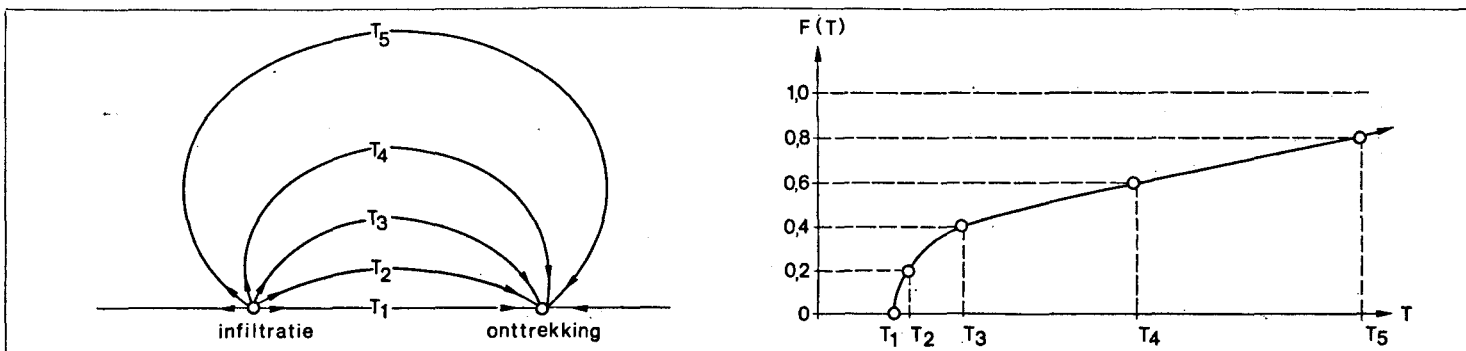
3.2. Persputten ter aanvulling van de hoeveelheid zoet grondwater

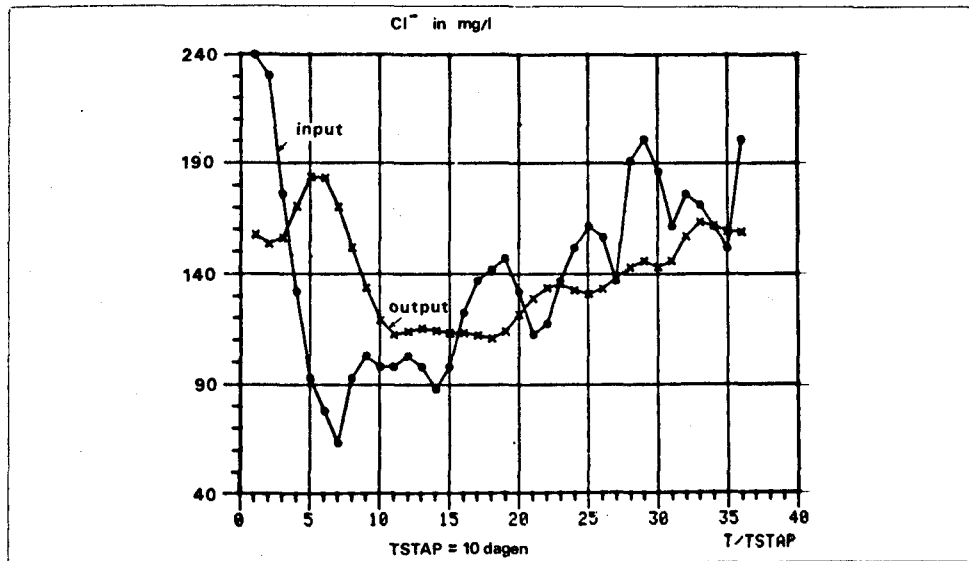
De berging van zoet water in de bodem is niet alleen mogelijk boven de natuurlijke grondwaterstand. Ook door in de ondergrond zout water te verdringen, wordt een mogelijkheid tot opslag van zoet water geschapen. Rekenmethoden voor simultaan optredende stromingen van vloei-



Afb. 4 - Het stromingspatroon zoals dat optreedt als in de hoekpunten van een rechthoekennetwerk afwisselend pers- en winputten worden geplaatst.

Afb. 3 - Bepaling van de verblijftijdsverdeling aan de hand van een stroomlijnenpatroon.





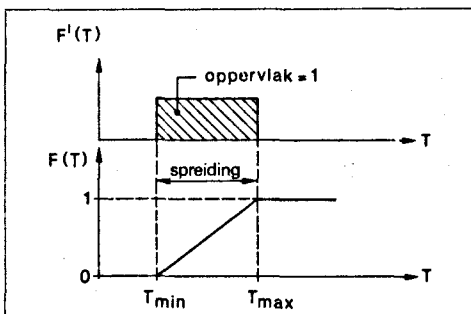
Afb. 5 - De demping van de wisselingen in het chloridegehalte door spreiding der verblijftijden bij het stroomlijnenpatroon als weergegeven in afb. 4.

stoffen met verschillende dichtheden zijn in ontwikkeling. Om een inzicht te krijgen in de parameters die de verplaatsing van een grensvlak tussen zoet en zout water bepalen, worden berekeningen uitgevoerd onder andere met computermodellen gebaseerd op de vortex-theorie. Het resultaat van een dergelijke berekening volgt hierna [13].

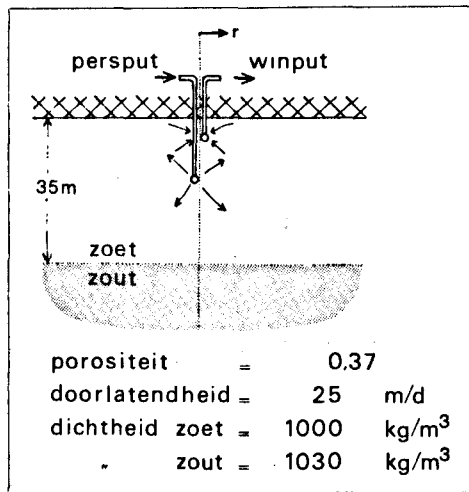
Veronderstel een watervoerend pakket van oneindige uitgestrektheid dat aan de bovenzijde begrensd is door slechtdoorlatende lagen, zoals weergegeven in afb. 7. Op een diepte van 35 m verandert de dichtheid van het water.

De voorraad die noodzakelijk is om perioden met onderbroken infiltratie te kunnen overbruggen, is moeilijk te voorspellen. Stel dat bekend is dat die perioden niet langer zijn dan een maand en elkaar ook niet binnen een maand opvolgen. In afb. 8 is een mogelijk schema voor onttrekking en infiltratie weergegeven. De onttrekking uit de bovenste put is continu en constant. Infiltratie vindt plaats in de onderste put in perioden van een maand en met onderbrekingen van een maand. In dit geval zijn dus totale onttrekking en

Afb. 6 - Een 'lineaire' verdeling van verblijftijden.

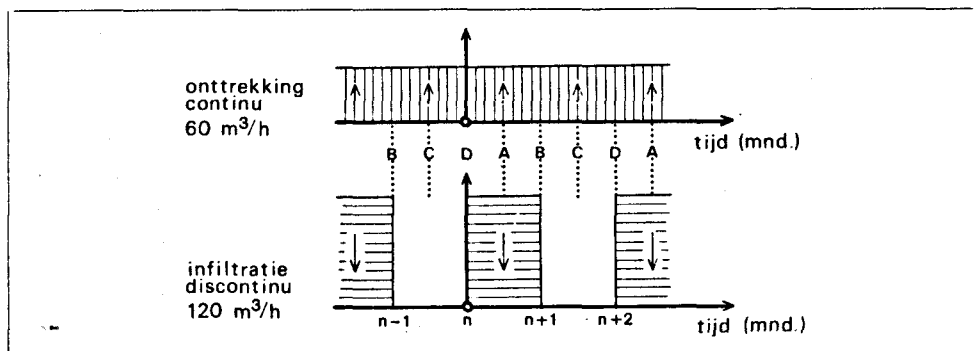


totale infiltratie op de lange duur aan elkaar gelijk. De positie van het zoet-zout grensvlak voor de achtereenvolgende tijdstippen A, B, C en D kan nu worden berekend (zie afb. 9). Menging ten gevolge van het feit dat een gedeelte van de vloeistof niet zo snel ver-



Afb. 7 - Een pers- en winput in een homogene isotrope bodem.

Afb. 8 - Schema voor infiltratie en onttrekking in een systeem als weergegeven in afb. 7.



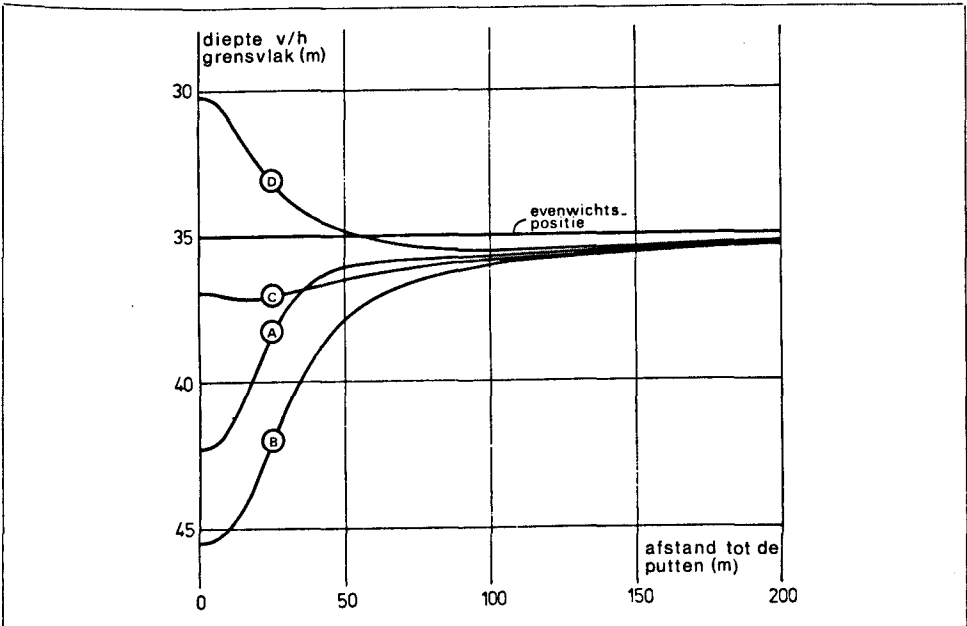
drongen wordt als de rest, zal een vervagende grens tussen het zoete en het zoute water veroorzaken. Als er minder doorlatende of veel meer doorlatende gedeelten aanwezig zijn of als de verdringing op een andere manier niet volledig en gelijkmatig is, dan zal er menging en nalivering van zout water in zoet water en omgekeerd plaatsvinden. Dit zal ook het geval zijn bij 'dead-end pores' waarin transport van opgeloste zouten alleen plaatsvindt door diffusie en niet door stroming. Een belangrijke vraag waarop een antwoord dient te komen voordat op praktijkschaal voorraadvorming door verdringing van zout water kan worden toegepast, is in hoeverre er sprake zal zijn van deze 'brakwatervorming'. Onregelmatigheden in de bodemopbouw spelen hierbij een belangrijke rol. Momenteel zijn dan ook praktijkproeven met persputten in uitvoering waarbij dit verschijnsel wordt bestudeerd.

Negatieve gevolgen van een mengzone kunnen worden bestreden door meer water te infiltreren dan zal worden onttrokken. Het mengproces op zich kan worden tegengegaan door verplaatsing van het zoet-zout grensvlak met niet te grote snelheid te laten plaatsvinden. Een manier om dit te bewerkstelligen is zowel pers- als winputten zo te situeren dat er voldoende weerstand tegen stroming aanwezig is tussen de putten en het zoute water, bijvoorbeeld als weergegeven in afb. 10.

Ook door bij onderbroken infiltratie met diepe putten zout water te onttrekken kan verplaatsing van het grensvlak worden tegengegaan. Mogelijkheden voor lozing (bijvoorbeeld afvoer naar zee) of ontzouting moeten dan wel aanwezig zijn.

4. Mogelijkheden van persputten bij de bescherming van waterwingebieden

Volledige bescherming van een waterwinplaats is alleen dan mogelijk als in het totale intrekgebied van de winning geen

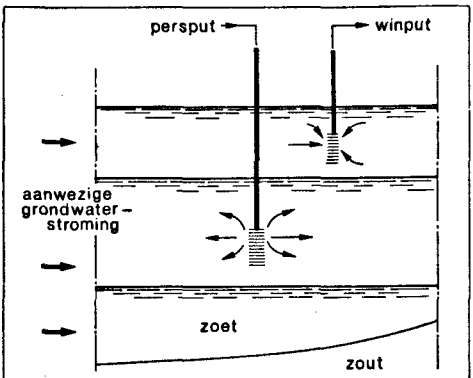


Afb. 9 - De posities van het grensvlak bij een infiltratie-onttrekkingsschema als weergegeven in afb. 8.

enkele activiteit is (geweest) die een verontreiniging van het grondwater met zich mee kan brengen (heeft gebracht). Omdat een dergelijke afdoende bescherming niet uitvoerbaar is, heeft de VEWIN-RID-Commissie Bescherming Waterwingebieden indertijd als 'second-best'-oplossing aanbevolen om binnen de intrekgebieden een zonering aan te brengen met een in de richting van het puttenveld toenemende graad van bescherming [4]. Voor de berekening van de grootte van die beschermingszones diende te worden uitgegaan van de verblijftijd van het water bij de stroming door het geëxploiteerde watervoerende pakket naar de winmiddelen.

Ondanks allerlei beschermingsmaatregelen kunnen zich toch voorvallen voordoen die niet of nauwelijks kunnen worden voorkomen en die verontreiniging van bodem en grondwater veroorzaken. Nu kan door afgraven of met behulp van interceptie-

Afb. 10 - De situering van pers- en winputten in meerdere lagen.

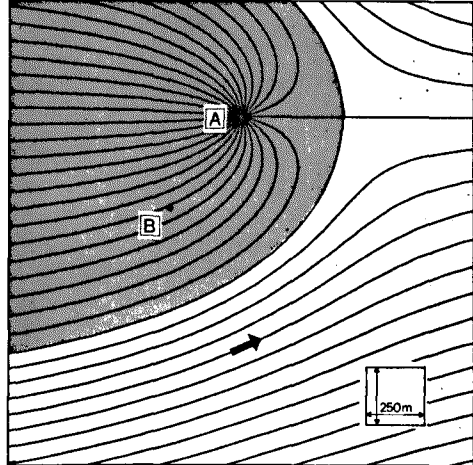


putten vaak slechts een deel van de verontreiniging worden weggenomen. Als de verontreiniging in het intrekgebied van een waterwinning gelegen is en het verontreinigde grondwater kan in verband met bijvoorbeeld lozingsproblemen niet langdurig met behulp van interceptieputten van de winning worden afgeschermd, dan zal dit tot gevolg hebben dat na verloop van tijd de verontreinigingen en hun afbraakprodukten de winputten bereiken.

Met pers- en winputten zijn echter middelen beschikbaar waarmee dit kan worden uitgesteld of zelfs tegengegaan. Door putten te verplaatsen en door het bijplaatsen van pers- of winputten kunnen stagnatiepunten in de stroming worden gecreëerd. Praktisch gezien wordt de watersnelheid in wat grotere gebieden haast volledig tenietgedaan zodat verspreiding van een mogelijk aldaar opgetreden verontreiniging kan worden tegengegaan. Een bijkomend voordeel is dat dan de verontreiniging al met een kleine onttrekking kan worden bestreden. Ook is het zo dat als op niet te grote afstand van winputten bijvoorbeeld door middel van persputten water aan de bodem toegevoegd wordt, de 'netto onttrekking' vermindert, de vorm en grootte van de verblijftijdzones sterk veranderen en de intrek- en invloedsgebieden van de winning gereduceerd worden. In volgende paragrafen zal een en ander aan de hand van rekenvoorbeelden worden toegelicht.

4.1. Persputten ter regulering van een grondwaterstroming

Veronderstel een waterwinnig van 1 mil-

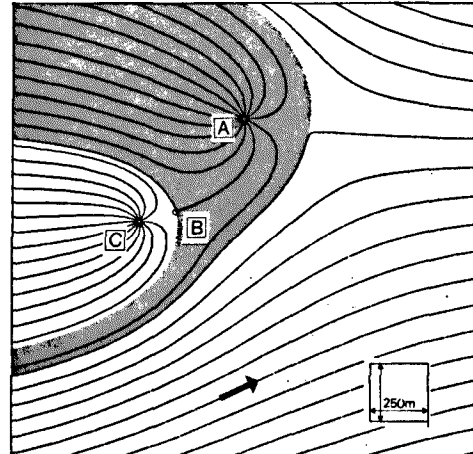


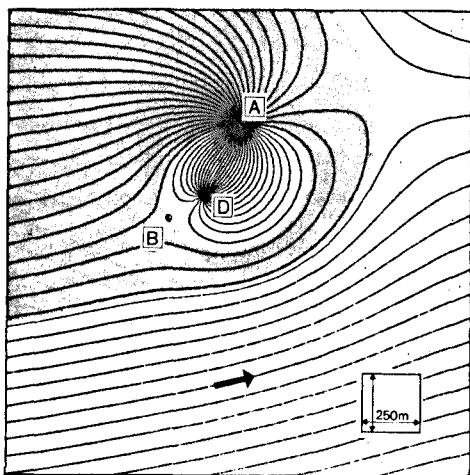
Afb. 11 - Bovenaanzicht van het stromingspatroon bij een winning in het punt A.

joen m³ per jaar uit een begrensde pakket met een dikte van 40 m, een porositeit met betrekking tot de stroming van 40 % en een natuurlijke afstroming oostwaarts van 2,5 cm per dag (volumestroomdichtheid). Het hierbij horende stromingspatroon is weergegeven in afb. 11 waarbij met een arcering het stromingsgebied van de winning is aangegeven.

Indien bijvoorbeeld rondom het punt B een ernstige verontreiniging optreedt en verontreiniging van het grondwater niet door het treffen van maatregelen kan worden voorkomen, dan zal dit tot gevolg hebben dat de verontreiniging al na enkele jaren in het onttrokken water kan worden aangetoond. Deze tijdsduur, die mogelijk onvoldoende is voor bijvoorbeeld afbraak in de bodem of aanpassing van de zuivering, kan worden verlengd door in het punt B stagnatie van de stroming te creëren. Dit kan door de winning te splitsen over A en C (zie afb. 12). Een andere mogelijkheid is in A meer te onttrekken en het surplus door middel van

Afb. 12 - Het stromingspatroon zoals dat optreedt als de winning gelijkmatig verdeeld is over A en C.





Afb. 13 - Het stromingspatroon zoals dat optreedt bij een winning in A van 2 miljoen m^3 per jaar waarbij 1 miljoen m^3 per jaar in D in de bodem teruggebracht wordt.

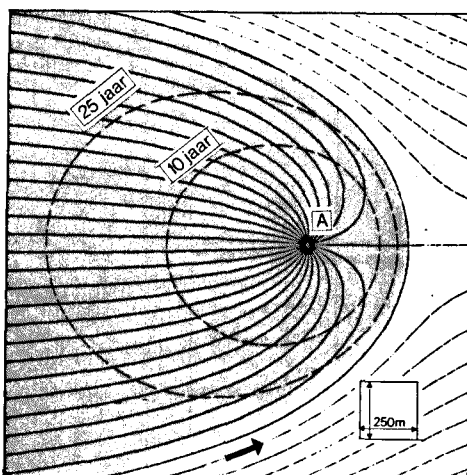
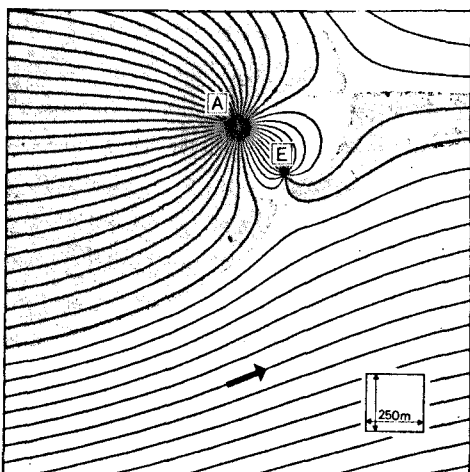
-persputten in D in de bodem in te brengen. Het daarna optredende stromingspatroon is weergegeven in afb. 13. De posities van de punten C (afb. 12) en D kunnen eenvoudig berekend worden.

Ook kan men met persputten een (verontreinigde) grondwaterstroom zodanig sturen dat water dat zich in eerste instantie in de richting van de winning beweegt, daarna een andere weg kiest en buiten het stromingsgebied van de winning komt te liggen, zie afb. 14.

De stroomlijnenpatronen gaan uit van de stationaire situaties zoals die na het veranderen van het infiltratie-onttrekkingspatroon zullen blijven voortbestaan.

Ter plaatse van een verontreiniging kan stagnatie van de stroming worden veroorzaakt zodat met aanvullende sanerende maatregelen in de vorm van kleine onttekkingspunten de (verspreiding van de) verontreiniging effectief kan worden bestreden, zelfs al is deze niet geconcentreerd in

Afb. 14 - Het stromingspatroon bij een winning in A van 1,5 miljoen m^3 per jaar waarbij 0,5 miljoen per jaar in E in de bodem teruggebracht wordt.



Afb. 15 - Stromingspatroon en verblijftijdzones bij een winning in A van 1 miljoen m^3 per jaar.

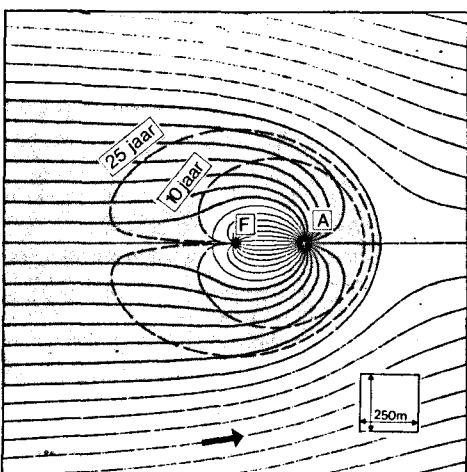
een punt en zijn natuurlijke afstroming en de volumestromen in de putten niet over voldoende lange perioden constant.

4.2. Persputten ter beperking van intrek- en beschermingsgebied

Een bepaalde onttekkingsput of een afdoende bescherming daarvan is soms niet mogelijk in verband met andere belangen die met een bepaalde grondwaterstand of met het bodemgebruik gemoeid zijn. Nu kan ter beperking van de invloed van de winning op de omgeving en van de grootte van het intrekgebied en de te beschermen zones gekozen worden voor kunstmatige infiltratie. In het navolgende zal worden aangegeven welke consequenties dit kan hebben voor het stromingsgebied en de vorm en plaats van de 10- en 25-jaars verblijftijdsgrenzen. Deze zijn erop gericht de continuïteit van de levering te kunnen garanderen op korte en middellange termijn [4].

Veronderstel weer een winning zoals die ook in de vorige paragraaf ter sprake is

Afb. 16 - Stromingspatroon en verblijftijdzones bij winning in A en infiltratie in F van respectievelijk 1,0 en 0,5 miljoen m^3 per jaar.



geweest. Het intrekgebied en de verblijftijdzones zijn weergegeven in afb. 15. De praktijk heeft uitgewezen dat een afdoende bescherming in grote gebieden vaak op praktische en uitvoeringstechnische bezwaren stuit. Het voorkomen dat verontreiniging optreedt binnen de 10- en 25-jaars verblijftijdsgrenzen is niet altijd mogelijk gebleken. Risico's voor de continuïteit van de levering worden echter gereduceerd als de grootte van de te beschermen zones kan worden verkleind en/of grotere gedeelten daarvan mogelijk zelfs in eigen beheer kunnen worden verkregen. Door in het punt F met persputten 'stroomopwaarts' van de winning in A bijvoorbeeld voorgezuiverd oppervlaktewater in de bodem te brengen, ontstaat een stromingspatroon als weergegeven in afb. 16.

Opgemerkt moet worden dat bij dit stromingspatroon de beschermingsgebieden niet exact volgens de 10- en 25-jaars grenzen gekozen moeten worden. Het verdient aanbeveling een groter gebied dan de in afb. 16 weergegeven zones te beschermen omdat ten tijde van regeneratie van de persputten of bij verontreiniging van het oppervlaktewater de infiltratie onderbroken moet worden.

5. Samenvatting

Het aantal namen voor putten waarmee een vloeistof in de bodem kan worden gebracht, is groot. Het aantal toepassingsmogelijkheden is zo mogelijk nog groter. Voor wat de watervoorziening betreft, zijn er vele te onderscheiden. Zo kunnen 'negatieve putten' – persputten – worden gebruikt voor het plaatselijk compenseren van verlagingen van grondwaterstand of -stijghoogte, voor het reguleren van stromingen van verontreinigd of zout grondwater, voor de beperking van het intrek- en beschermingsgebied van een grondwaterpompstation en bij de techniek die bekend staat als 'kunstmatige infiltratie'. Met een systeem van pers- en winputten kan een afvlakking van de wisselingen in de waterkwaliteit worden bewerkstelligd. Ook kan door met persputten zout water te verdringen een voorraad zoet water worden gevormd. Voordat een dergelijke voorraadvorming op praktijkschaal kan worden toegepast zullen echter een aantal vragen met name op het gebied van brakwatervorming nog moeten worden beantwoord.

De toepassingsmogelijkheden van persputten beperken zich niet tot het alternatief dat ze vormen voor open infiltratie. Door voorgezuiverd oppervlaktewater in de grond te brengen kan ook bij een bestaande grondwateronttekkingsput zowel de

invloed van de winning op de omgeving als omgekeerd – die van de omgeving op de winning – worden beperkt.

Bij de beoordeling of persputten kunnen bijdragen aan de oplossing van vraagstukken in de watervoorziening zullen vele aspecten een rol spelen. In dit artikel zijn slechts enkele hydrologische aspecten in het kort behandeld. Problemen die kunnen ontstaan bij verstopping van de persputten zijn buiten beschouwing gelaten.

Literatuur

1. Akker, C. van den. *Een numerieke berekeningsmethode van stroomlijnen of stroombanen met bijbehorende verblijftijden*. H₂O (9), nr. 21, p. 436-438, 1976.
2. Akker, C. van den and Peters, J. H. *Streamlines and travel times of groundwater in a two-layered aquifer system*. Studies in Environmental Science, volume 17, p. 843-848, 1981.
3. Akker, C. van den, Gan, J. B. S. en Peters, J. H. *Handleiding bij het computerprogramma FLOP*. KIWA-rapport SWE 330, 1981.
4. Commissie Bescherming Waterwingebieden. *Richlijnen en aanbevelingen voor de bescherming van waterwingebieden*, 1980.
5. Josselin de Jong, G. de. *Singularity distributions for the analysis of multiple fluid through porous media*. Journal of Geophysical Research, Volume 65, No. 11, p. 3739-3758, 1960.
6. Haitjema, H. M. *Numerical application of vortices to multiple fluid flow in porous media*. Delft Progress Report 2, p. 237-248, 1977.
7. Haitjema, H. M. *Optimale verblijftijdsverdeling van een infiltratie-onttrekkingsstelsel voor demping van kwaliteitsfluctuaties*. H₂O (10), nr. 6, p. 145-147 en nr. 14, p. 332-333, 1977.
8. Haitjema, H. M. *The use of vortex-rings for modelling salt water upconing*. LGM-mededelingen, Vol. 11, no. 2, 1980.
9. Huisman, L. en Martijn, Th. G. *Kwaliteitsverbetering bij kunstmatige infiltratie*. H₂O (2), nr. 16, p. 366-381, 1969.
10. Luger, H. J. *Numerical application of vortices to three dimensional multiple fluid flow in porous media*. Geotechnical Laboratory Report No. 197, Delft, 1980.
11. Olsthoorn, T. N. en Mulder, F. G. *Persputexperiment met het oog op compensatie van grondwaterstandsverlagingen*. H₂O (14), nr. 22, p. 527-531, 1981.
12. Peters, J. H. *De demping van kwaliteitsfluctuaties als gevolg van spreiding der verblijftijden bij persputsystemen*. Afst. Versl. TH Delft, 1980.
13. Peters, J. H. *Application of vortex distributions in modelling the storage of fresh water in saline aquifers*. KIWA-rapport SWE-365, 1981.
14. Puffelen, J. van. *Berging van oppervlaktewater in de ondergrond*. H₂O (12), nr. 24, p. 541-548, 1979.
15. Roebert, A. J. *Werkgroep Hydrologie van Persputsystemen geïnstalleerd*. H₂O (12), nr. 15, p. 341-343, 1979.
16. Soczó, E. R. *Selectieve inname van water in de Biesbosch-bekken op grond van het ammoniumgehalte*. H₂O (13), nr. 26, p. 645-641, 1980.

