

# De situering van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen bij kunstmatige infiltratie

## 1. Inleiding

Daar de winbare hoeveelheden grondwater beperkt zijn, moet op steeds grotere schaal Rijnwater worden verwerkt tot drinkwater. Rijnwater is vuil, zout en soms giftig; men denke bijvoorbeeld aan de endosulfanramp in 1969. Ter verbetering van de hygiënische kwaliteit infiltreerde men vroeger het rivierwater in een geschikt grondmassief om het elders weer te onttrekken. De reinigende werking van deze zogenaamde kunstmatige infiltratie is nog waardevol, maar heeft aan betekenis ingeboet door de verbeterde methode van fabrieksmatige reiniging. Ontzouting van het water kan door kunstmatige infiltratie niet worden verkregen; fabrieksmatig slechts tegen hoge kosten. Toch ligt het grote belang van kunstmatige infiltratie in de verbetering van het zoutgehalte.

Het door de industrie dagelijks in de rivier geloosde zout leidt alleen bij lage rivierafvoer tot te zout water. Bij gebruik van de Rijn als bron voor drinkwater moeten daarom de steeds in het najaar optredende hoge zoutgehalten worden geëlimineerd. De fluctuaties in zoutgehalte kunnen worden afgevlakt door middel van kunstmatige infiltratie. Het infiltratie- en drainage systeem moet dan zo zijn, dat het weer aan de grond onttrokken debiet een mengsel is van „waterdeeltjes” die gedurende verschillende perioden in de grond verbleven en dus verschillen in zoutgehalte (zie afb. 1). Deze gedachte is gelanceerd door prof. ir. L. Huisman van de Technische Hogeschool te Delft. Door ir. Th. G. Martijn is berekend (zie literatuur) dat met een lineair cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden een nagenoeg tijds-onafhankelijk zoutgehalte kan worden verkregen (zie afb. 2). Het zo verkregen gemiddelde zoutgehalte van Rijnwater wordt momenteel aanvaardbaar geacht.

Bij goede situering van de infiltratie beschikt men ook over een buffervoorraad, die aangesproken kan worden als een ramp op de rivier noopt tot onderbreking van de toevoer. Hiertoe moeten de werken gesitueerd worden in een gebied, waar een tijdelijke verlaging van de grondwaterspiegel toelaatbaar is.

### Probleemstelling

Het probleem is nu een infiltratie- en drainagesysteem te vinden, waaruit een lineaire spreiding van de verblijftijden resulteert. In verband met de veiligheid zou de stroming bij voorkeur geconcentreerd moeten worden in een beperkt gebied, waar ter verkrijging van een buffervoorraad verhoging van het peil gewenst is.

### De variabelen

De stroming en daarmee de verblijftijdsverdeling wordt bepaald door de volgende factoren:

- geometrie van het massief;
- soort en debiet van de infiltratie- en onttrekkingsmiddelen;
- situering van de middelen.

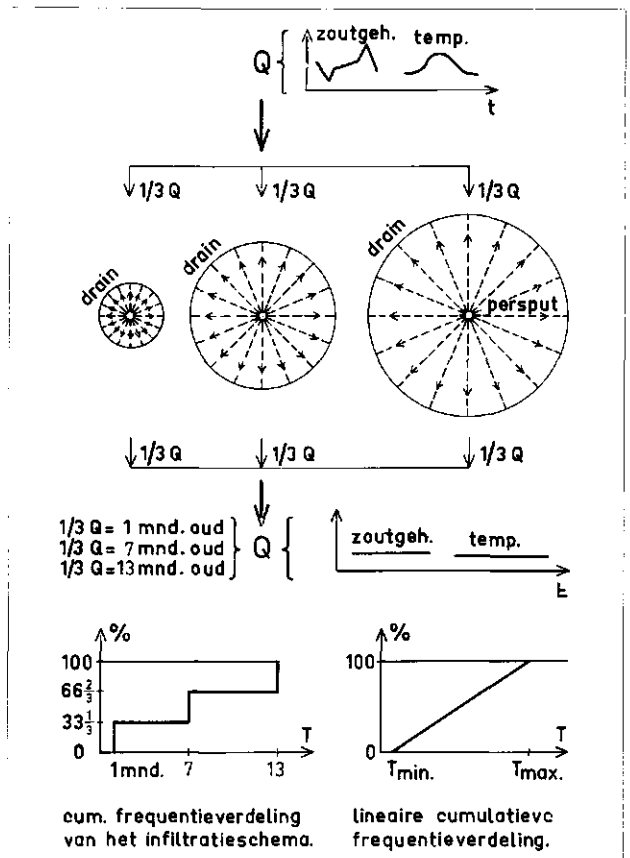
Voor grondwaterstroming geldt de wet van Darcy. Deze

wet zegt dat het specifieke debiet ( $q$ ) gelijk is aan de doorlatendheidscoëfficiënt ( $k$ ) maal de gradiënt van de stijghoogte ( $i$ ). Voor de infiltratie van debieten van enige omvang is daarom een zanderige (doorlatende) bodem nodig alsmede de mogelijkheid tot het aanbrengen van verschillen in stijghoogte. Om een voldoende nauwkeurige voorspelling van de verblijftijden te kunnen maken, is het verder gewenst dat de geometrie van het massief niet al te gecompliceerd is. Met bovengestane restricties bepalen veiligheid, economie en planologie de terreinkeuze.

In dit artikel wordt uitgegaan van een homogeen massief met lage grondwaterstand, dat op zekere diepte begrensd wordt door een horizontale ondoorlatende laag (zie afb. 3, 7 en 10). Dit is een schematisering die toepasbaar is op sommige delen van de Veluwe.

Infiltratie door middel van persputten is mogelijk maar duur. Bij de veel goedkopere open infiltratie kan men kiezen tussen meertjes en kanalen. De aanleg van een kanaal in geaccidenteerd terrein lijkt een geweldige ingreep. Het effect van een kanaal kan evenwel ook worden verkregen door een keten langwerpige meertjes of een rij persputten. Dit is mogelijk vanwege de lage oorspronkelijke grondwaterstand. Tengevolge van de

Afb. 1 - Een mogelijk infiltratieschema met spreiding in de verblijftijden.



infiltratie zal deze onder het kanaal wel stijgen maar vrij van de kanaalbodem blijven zolang het geïnfilteerde debiet ( $Q$ ) een bepaalde waarde ( $Q_m$ ) niet overschrijdt. De tijd waarin het water percoleert door de onverzadigde zone tussen kanaalbodem en vrije grondwaterspiegel is relatief klein. Verschillen in percolatietijd langs de kanaalbodem zijn zeker te verwaarlozen. De genoemde meertjes kunnen daarom zonder meer op verschillende niveaus liggen.

Vanwege de lage grondwaterstand moet het water met behulp van putten weer worden onttrokken. De plaats van de putten is gefixeerd door hun verdeling langs een kromme rond het infiltratiewerk. In dit artikel wordt er van uitgegaan dat alle putten dezelfde opbrengst hebben. Dit is geen beperking daar een andere debietsverdeling slechts een andere distributie van de putten langs de genoemde kromme impliceert. Het totale debiet is niet van invloed op de vorm van de kromme die de frequentieverdeling van de verblijftijden weergeeft en wel om de volgende redenen. Omdat alle snelheden evenredig zijn met het debiet, zijn alle verblijftijden hiermee omgekeerd evenredig. Het totale debiet is derhalve slechts een schaalfactor in een verblijftijdengrafiek. Als wezenlijk variabelen resteren nu:

1. De vorm van het infiltratiemiddel.
2. De situering van de putten.

## 2. Stroming in een beperkt gebied

De variabelen hebben zo veel graden van vrijheid, dat meerdere situeringen van de werken technisch gezien voldoende. Het geheel moet echter ook passen in het landschap en de verkaveling van het gegeven infiltratiegebied. Zo wenst men de putten langs de omtrek van een gegeven kavel met daarbinnen een infiltratiewerk. Indien ook nog wordt geëist dat buiten deze kavel geen stroming optreedt, is één der variabelen gefixeerd en wel om de volgende redenen.

Om buiten de kavel geen stroming te krijgen, moet langs de omtrek, meestal een veelhoek, de oorspronkelijke grondwaterstand worden gehandhaafd. Dit betekent dat er zodanig moet worden onttrokken, dat de lijn langs de omtrek een (equi-)potentiaalijn is. Door deze eis en de ligging en de vorm van het infiltratiewerk worden de langs de omtrek te onttrekken debieten volkomen bepaald en daarmee de plaats van de putten langs de omtrek. De spreiding in de verblijftijden is dan alleen nog afhankelijk van:

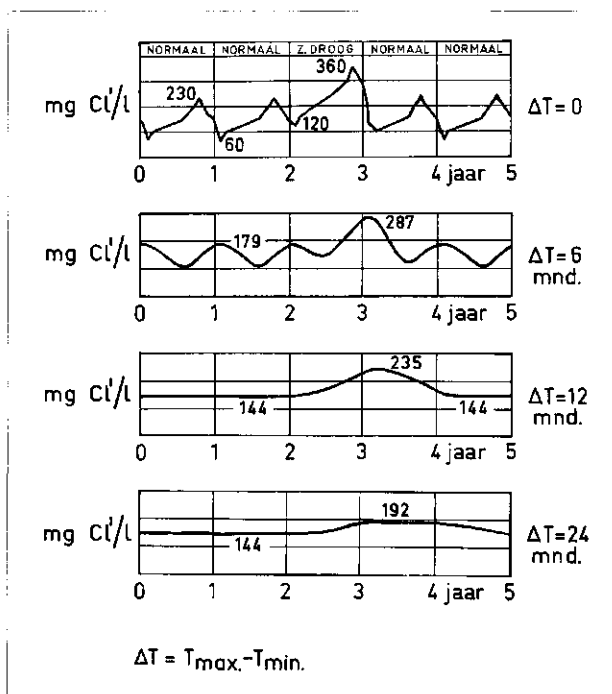
De vorm en de positie van het infiltratiemiddel.

Er zal worden aangetoond dat exacte oplossingen mogelijk zijn indien de kavel de vorm heeft van een regelmatige veelhoek of van een ruit.

### 2.1. Algemene opzet van de berekeningen

De te beschouwen situeringen worden vastgelegd door de volgende geometrische parameters (zie afb. 3, 7 en 10):

- $H$  — oorspronkelijke hoogte van de watervoerende laag
- $\Delta H^*$  — afstand van maaiveld tot oorspronkelijk peil
- $\Delta H$  — de grootste verhoging van de grondwaterstand
- $L$  — een maat voor de lengte van stroomlijnen
- $b$  — straal van meertje of halve kanaalbreedte



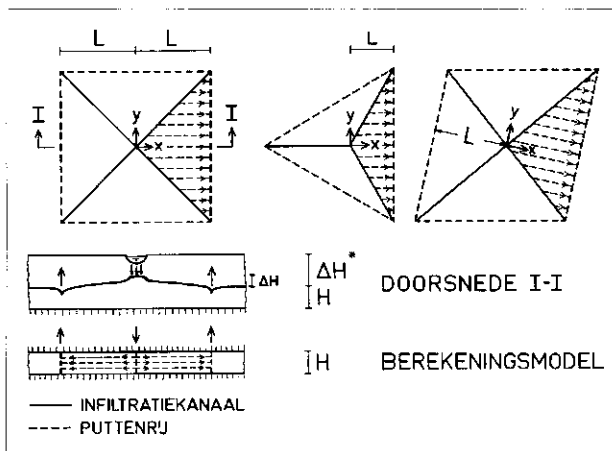
Afb. 2 - Verloop van het chloridegehalte van het rivierwater te Lobith na infiltratie met lineaire spreiding in de verblijftijden. Normale jaren onderbroken door een zeer droog jaar.

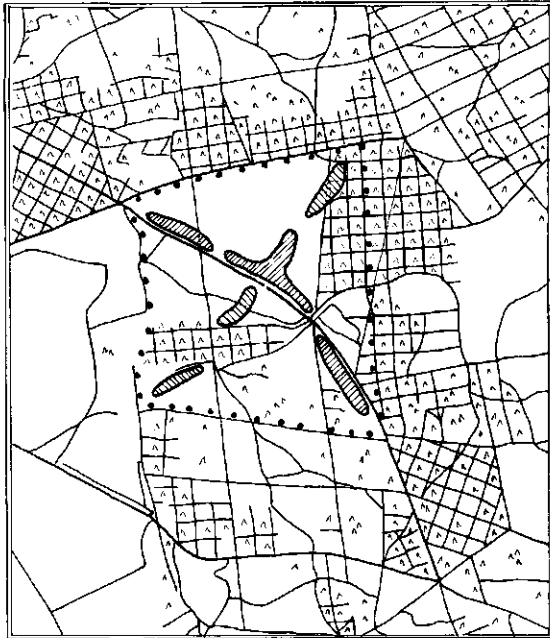
Als fysische parameters worden gebruikt:




- $Q$  — het totale geïnfilteerde debiet
- $\Delta T$  — het verschil tussen maximale en minimale verblijftijd
- $B$  — de door peilverhoging gecreëerde watervoorraad
- $k$  — de doorlatendheidscoëfficiënt van de grond
- $n$  — porositeit van de grond

Uitgegaan wordt van een grondwaterspiegel die steeds vrij is van de kanaalbodem. Daar de kanaalbodem op een te verwaarlozen afstand onder het maaiveld ligt, moet er derhalve voldaan worden aan de eis  $\Delta H < \Delta H^*$ . Dit betekent dat  $Q$  kleiner is dan een nader te bepalen

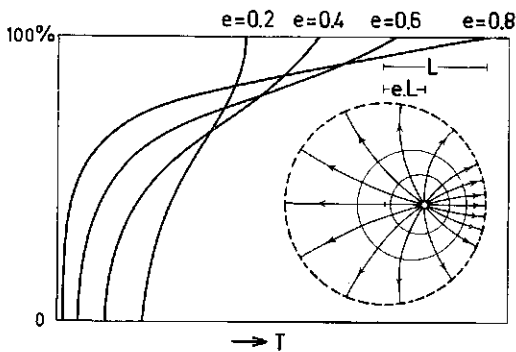
Afb. 3 - Situering met een lineaire cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden.





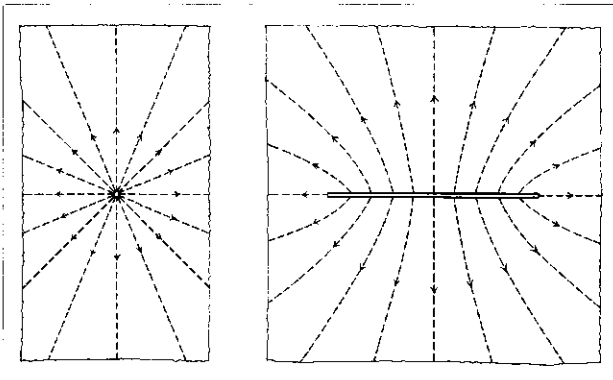
 infiltratiemeer  
 put  
 bestaand pad

Afb. 4 - Landschappelijk aangepaste vierkant-situering.



Afb. 5 - Vierkantennet en cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden voor een stroming van een bron naar een cirkeldrain met constante potentiaal.

Afb. 6 - Stroming vanuit een puntbron en een lijnbron naar oneindig.



waarde  $Q_m$ . Verder wordt uitgegaan van bij benadering twee-dimensionale stromingen in het horizontale vlak. Hiertoe moet gelden dat  $b \ll L$  en  $\Delta H \ll H \ll L$ . Ook wordt verondersteld dat de putten dicht opeen staan, zodat ze geschematiseerd kunnen worden tot een lijnonttrekking. Resumerend dus de voorwaarden:

1.  $b \ll L$ , dicht opeen staande putten;
2.  $\Delta H \ll H \ll L$ ,  $\Delta H < \Delta H^*$ .

Onder deze voorwaarden is de stroming nagenoeg gelijk aan de horizontale stroming in het berekeningsmodel (zie afb. 3, 7 en 10).

In het model is een kanaal geschematiseerd tot een lijn, een meertje tot een bron en een puttenrij tot een lijnonttrekking.

Er zal gebruik worden gemaakt van de uit de stromingsleer bekende potentiaalfunctie  $\Phi$  en stroomfunctie  $\Psi$ . De potentiaalfunctie is gedefinieerd als doorlatendheidscoëfficiënt ( $k$ ) maal stijghoogte ( $h$ ). De functie  $\Psi$  heeft de eigenschap constant te zijn langs een stroomlijn. Als  $q_x$  en  $q_y$  het specifieke debiet in respectievelijk  $x$ - en  $y$ -richting is, geldt dat

$$q_x = \frac{-\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad q_y = \frac{-\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \Psi}{\partial x}.$$

De verblijftijd van een „waterdeeltje”, dat langs de stroomlijn gaat, waarop  $\Psi$  de waarde  $\Psi_1$  heeft, is gedefinieerd als

$$T_{\Psi_1} = \int_{\Psi_1} \frac{ds_{\Psi_1}}{V(s_{\Psi_1})} = n \int_{\Psi_1} \frac{ds_{\Psi_1}}{q(s_{\Psi_1})},$$

waarin  $s_{\Psi_1}$  de coördinaat langs de stroomlijn  $\Psi$ , is. De verblijftijd van een „waterdeeltje” in de grond is afhankelijk van de stroomlijn waarlangs het deeltje gaat. Uit de definitie van de verblijftijd volgt de functie

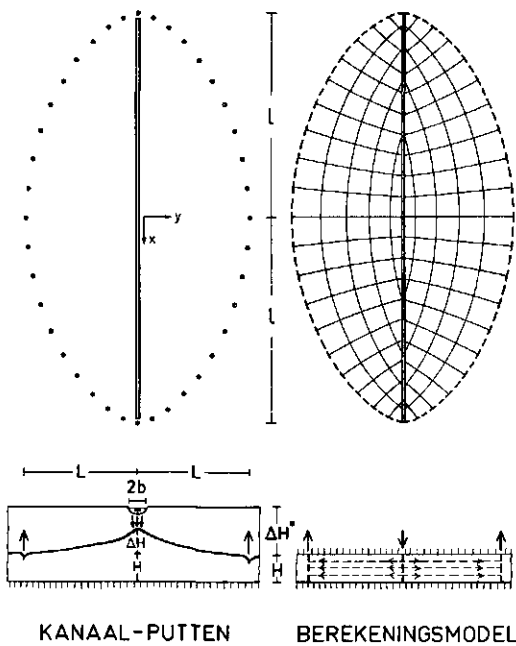
$$T(\Psi) = n \int_{\Psi} \frac{ds_{\Psi}}{q(s_{\Psi})}.$$

Deze functie geeft de verblijftijden van de waterdeeltjes als functie van de stroomlijn waarlangs ze gaan. De functie  $\Psi$  is niet alleen zo gedefinieerd dat ze constant is langs een stroomlijn, maar ook zo dat het verschil in waarde van  $\Psi$  op twee stroomlijnen gelijk is aan het debiet dat tussen deze krommen doorstroomt.

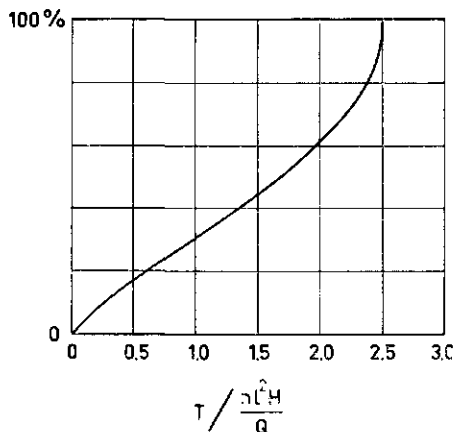
Omdat  $\Psi$  de maat is voor de debieten, is de functie  $\Psi(T)$  (de inversie van  $T(\Psi)$ ) juist de cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden.

## 2.2. Situeringen met lineaire verblijftijdsverdeling

Afb. 3 geeft situeringen waaruit een exact lineaire spreiding in de verblijftijden resulteert. De getrokken lijnen representeren kanalen, waaruit per eenheid van lengte een constant debiet wordt geïnfiltrerd. De putten staan langs de streeplijnen op onderling gelijke afstand en met onderling gelijk debiet. Iedere situering in de vorm van een regelmatige veelhoek geeft een lineaire cumulatieve frequentieverdeling. Veel kanalen zijn landschappelijk ongewenst, zodat van de genoemde categorie het vierkant en de gelijkzijdige driehoek resteren. De ruitvorm,

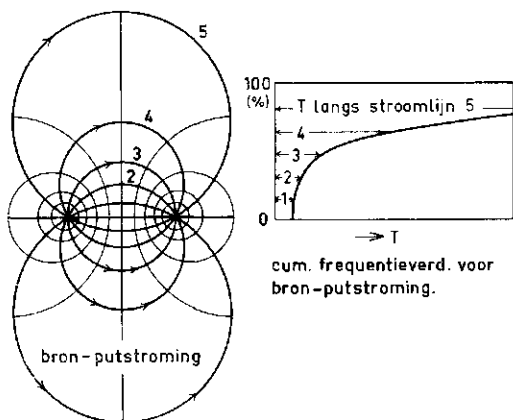


Afb. 7 - Strooming van kanaal met konstant debiet per eenheid van lengte naar putten.



Afb. 8 - De cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden bij infiltratie volgens afb. 7.

Afb. 9.



die ook voldoet, impliceert kanalen van ongelijke breedte. Aannemende dat voldaan is aan de voorwaarden 1 en 2 wordt de berekening betrokken op het twee-dimensionale model. In het model zijn de puttenrijen tot drains geschematiseerd. Voor de van stroomlijnen voorziene driehoeken uit afb. 3 geldt:

$$\Phi = k.h = \frac{q_d}{H} (L-x),$$

waarin  $q_d$  het debiet per eenheid van drainlengte is. Toepassing van de Wet van Darcy op deze vergelijking geeft

$$q_x = \frac{-\partial \Phi}{\partial x} = \frac{q_d}{H}, \quad q_y = 0.$$

De strooming is uniform en evenwijdig aan de x-as. De verblijftijd van het water dat met eenparige snelheid langs een stroomlijn met lengte  $l$  gaat is

$$T(l) = \frac{l}{V} = n \cdot \frac{l}{q} = n \cdot \frac{H}{q_d} \cdot l.$$

$$\Delta T = T_{\max} = \frac{H}{q_d} \cdot L.$$

Daar de lengte van de stroomlijnen lineair toeneemt van nul tot  $L$  is de verblijftijdsverdeling lineair. Af te leiden zijn de onder de voorwaarde  $Q < Q_m$  voor alle configuraties van afb. 3 geldende formules:

$$\Delta T = 2 n \cdot H \cdot O / Q$$

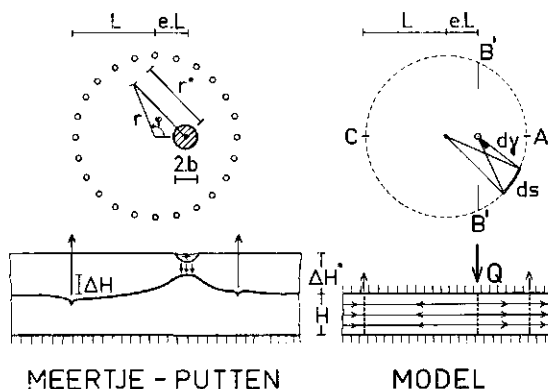
$$B = \frac{1}{6} \frac{n}{kH} \cdot L^2 \cdot Q$$

$$\Delta H = \frac{L^2}{2 \cdot O} \cdot \frac{Q}{kH}$$

waarin  $O$  het oppervlak van de veelhoek,  $Q$  het totale geïnfilterde debiet en  $B$  de door peilverhoging verkregen watervoorraad is. Uit de voorwaarde  $\Delta H < \Delta H^*$  en de laatste formule volgt dat

$$Q_m = \frac{2 \cdot O}{L^2} \cdot \Delta H^* \cdot k \cdot H.$$

Afb. 10 - Putten homogeen verdeeld op een cirkel, excentrisch daarin een meertje.



Het patroon van de regelmatige veelhoek is technisch gezien optimaal. Er wordt een lineaire spreiding in de verblijftijden mee verkregen, alsmede een beperkt stroomgebied. De beschouwde situeringen moet men zien als grondvormen. In de praktijk kan men proberen deze vormen te benaderen in de geest van afb. 4.

### 2.3. Niet exacte-oplossingen

Situeringen die aansluiten bij een exacte oplossing (afb. 4) vereisen nogal wat graafwerk of persputten. De vraag rijst of het mogelijk is met behulp van één kanaal of meertje een bij benadering lineaire spreiding in de verblijftijden te verkrijgen. Onder handhaving van de eis dat de randen van het infiltratiegebied een potentiaallijn vormen, is dit in het algemeen niet mogelijk en wel om de volgende redenen.

Indien men het infiltratiewerk in het centrum van de kavel situeert, zijn alle stroomlijnen nagenoeg even lang, zodat alle verblijftijden ongeveer even groot zijn. Zou men het werk excentrisch situeren, dan stroomt een groot

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi H} \left\{ (x'-1) \ln \sqrt{(x'-1)^2 + y'^2} - y' \arctan \frac{y'}{x'-1} - (x'+1) \ln \sqrt{(x'+1)^2 + y'^2} + y' \arctan \frac{y'}{x'+1} + 2 \ln 2 \right\},$$

$$\Psi = \frac{Q}{4\pi H} \left\{ y' \ln \sqrt{(x'-1)^2 + y'^2} + x' \arctan \frac{y'}{x'-1} - y' \ln \sqrt{(x'+1)^2 + y'^2} - y' \arctan \frac{y'}{x'+1} \right\},$$

deel van het water naar de meest nabije rand. De korte verblijftijden zouden overheersen, terwijl een gelijkmatig voorkomen van alle verblijftijden gewenst is. Dit kan worden gedemonstreerd aan de hand van een meertje in een cirkelvormig infiltratiegebied. In afb. 5 is het meertje geschematiseerd tot een puntbron en de puttenring tot een drain met constante potentiaal. Voor verschillende excentriciteiten van de bron is de cumulatieve verblijftijdsverdeling berekend. Deze verdelingen, die verre van lineair zijn, en een vierkantennet zijn in de figuur afgebeeld. Een berekening van de verdelingen was niet direct nodig daar het genoemde vierkantennet reeds toont dat veel stroomlijnen nagenoeg even lang zijn. Een te groot deel van het debiet kiest de kortste weg naar de drain.

Alleen als de putten langs zeer bijzondere krommen staan, is het mogelijk met een enkelvoudig infiltratiemiddel binnen een dergelijke kromme een stroming te creëren, die een adequate verblijftijdsverdeling waarborgt. In de volgende paragraaf zal een dergelijke stroming worden beschreven.

### 2.4. Putten rondom een infiltratiekanaal, afb. 7

Vanuit een kanaal wordt per eenheid van lengte een debiet  $q_k$  geïnfiltrerd. Gesteld wordt dat het oorspronkelijk peil in het massief zo laag is, dat een constant debiet per eenheid van kanaallengte te realiseren is. Het debiet zal hiertoe onder een nog te bepalen maximum moeten blijven. Door middel van putten wordt het debiet weer onttrokken.

Aannemende dat voldaan wordt aan de voorwaarden 1 en 2 (par. 2.1) wordt uitgegaan van het berekeningsmodel van paragraaf 2.1. De potentiaalfunctie van deze stroming is te schrijven als

$$\Phi = \Phi_k + \Phi_d$$

Hierin is  $\Phi_k$  de potentiaal van de lijnfiltratie en  $\Phi_d$  de potentiaal veroorzaakt door de ringdrain.  $\Phi_k$  is de uit de potentiaaltheorie bekende lijnbelegging met constante beleggingsstrekke. Afb. 6 geeft de stroomlijnen van de door  $\Phi_k$  beschreven stroming.

Zoals reeds gesteld is, is behalve een lineaire spreiding in de verblijftijden een tot een klein gebied beperkte stroming wenselijk. Aan deze wens wordt voldaan door van de ringdrain een potentiaallijn te maken. De stroming wordt zo beperkt tot het door de ringdrain omsloten gebied. Een bijzonder geval hiervan wordt verkregen door de drain te laten samenvallen met de potentiaallijn van  $\Phi_k$ , die het kanaal juist omsluit. Voor dit geval geldt binnen de ringdrain  $\Phi = \Phi_k$  en buiten de drain  $\Phi = \text{constant}$ . Juist in dit geval is een goede verblijftijdsverdeling te verwachten. De lengte van de stroomlijnen neemt immers redelijk monotoon toe (zie afb. 7). Met behulp van complexe variabelen is de lijnbelegging uitgewerkt. De potentiaal- en stroomfunctie zijn in cartesische coördinaten respectievelijk

waarin  $x' = x/l$  en  $y' = y/l$ . De parameter  $L$  is de halve kanaallengte en  $Q$  is het totaal geïnfiltrerde debiet.  $\Phi$  is constant langs de potentiaallijnen,  $\Psi$  langs de stroomlijnen.

Uit de aanname  $\Delta H \ll H$  volgt dat de stijghoogte ( $h = \Phi/k$ ) ongeveer gelijk is aan de rijzing van de grondwaterspiegel. Voor de grootste stijging geldt

$$\Delta H = \frac{\Phi(0,0)}{k} = \frac{Q}{kH} \cdot \frac{\ln 2}{2\pi} \quad \text{voor } Q < Q_m,$$

Uit de conditie  $\Delta H < \Delta H^*$  volgt dat

$$Q_m = \frac{2\pi}{\ln 2} \Delta H^* k H.$$

Het debiet moet onder de aangegeven limiet blijven. Anders kan niet langer een constant debiet per eenheid van kanaallengte worden geïnfiltrerd; de kanaallijn zou potentiaallijn worden.

De door de peilverhoging gecreëerde watervoorraad (B) volgt uit de betrekking

$$B \approx 0,07 \frac{n l^2}{kH} \cdot Q \quad \text{mits } Q < Q_m,$$

waarin  $n$  de porositeit van de grond is. De coëfficiënt 0,07 in de betrekking is numeriek bepaald. Een analytische berekening van de verblijftijden is hier niet mogelijk. Een numerieke berekening resulteerde in de verdeling van afb. 8 en in de betrekking

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \approx 2,5 n \cdot H \cdot l^2 / Q \quad \text{mits } Q < Q_m.$$

De uit deze situering resulterende cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden benadert de lineaire verdeling goed. Bovendien wordt de stroming geconcentreerd.

treerd in een beperkt gebied. Ten aanzien van de praktische uitvoering van deze kanaal-puttsituering is er een geringe vrijheid. De putten moeten zo goed mogelijk geplaatst worden langs de kromme  $\Phi(x', y') = 0$  of ter verkrijging van een zekere minimale verblijftijd langs de kromme  $\Phi(x', y') = C$ . Hierin is  $C$  een functie van de minimale verblijftijd. De dichtheid van de putten (met onderling gelijk vermogen) moet evenredig zijn met de dichtheid van de stroomlijnen.

### 3. Stroming in een groter gebied

De eis, dat de stroming geconcentreerd moet worden op een bepaalde kavel, blijkt de mogelijkheden te beperken. Alleen met behulp van meerdere infiltratiemiddelen of in geval van uitzonderlijke gebiedsgrenzen is dan een goede verblijftijdsverdeling te verkrijgen. Een enkel infiltratiewerk in de vorm van een meertje is landschappelijk echter zeer aantrekkelijk. Zo zijn er meerdere argumenten voor het toelaten van enige stroming ook buiten het door de putten omsloten gebied. In het vervolg van dit artikel zal daarom worden aangenomen dat ook buiten de kavel enige stroming en potentiaalverandering toelaatbaar is. Door deze aanname zijn de graden van vrijheid als volgt te preciseren:

1. de positie van het meertje in de kavel;
2. de distributie van de putten langs de kavelomtrek.

De lineaire spreiding in de verblijftijden moet zo goed mogelijk worden benaderd door deze variabelen geschikt te kiezen. Een numerieke methode voor de bepaling van het optimum is misschien te ontwikkelen. De ontwikkeling hiervan zou omvangrijk onderzoek vergen. In dit artikel wordt een analytische methode gepresenteerd, waarmee oplossingen, die bij benadering voldoen, voor een willekeurige kavelvorm geconstrueerd kunnen worden.

#### 3.1. Methode van oplossen

De methode is gebaseerd op de gedachte dat er een stroming zonder „stroombruggen” gecreëerd moet worden. Met een stroombrug wordt een traject tussen het meertje en de putten bedoeld, waarlangs door een relatief grote potentiaalgradient (verhang) een groot debiet gaat. Een dergelijke brug ziet men in afb. 5, waar veel stroomlijnen van de bron naar de meest nabije rand gaan. In de bron-putstroming (zie afb. 9) vormt de rechte van de bron naar de put een stroombrug. De aanwezigheid van een brug impliceert door de vele korte stroomlijnen een te grote frequentie van de korte verblijftijden.

De potentiaal en de potentiaalgradient van een stroming vanuit een meertje naar de putten zijn respectievelijk te schrijven als

$$\Phi = \Phi_i + \Phi_0, \quad \nabla\Phi = \nabla\Phi_i + \nabla\Phi_0$$

Hierin is  $\Phi_i$  de potentiaal van het infiltratiemiddel en  $\Phi_0$  de door de onttrekking veroorzaakte potentiaal. Een meertje is veelal tot een puntbron te schematiseren. De stroomlijnen van een bronpotentiaal zijn getekend in afb. 6. Daar dit een axiaalsymmetrische stroming is, is ze in de meest absolute zin vrij van stroombruggen. Er moet daarom een wijze van onttrekken langs de kavelomtrek worden bepaald die de bronpotentiaal zo weinig mogelijk verstoort. Met behulp van de techniek der conforme

afbeeldingen kan voor een willekeurige veelhoek de onttrekking langs de veelhoek worden gevonden, waarbij een  $\Phi_0$  behoort die constant is ( $c$ ) binnen de veelhoek. Binnen de veelhoek geldt dan

$$\Phi = \Phi_i + c, \quad \bar{q} = -\nabla\Phi = -\nabla\Phi_i$$

Hieruit volgt dat de stroomlijnen binnen de veelhoek overeenkomen met de radiale stroomlijnen van een bronpotentiaal. Tenslotte moet de bron (meertje) enigszins excentrisch binnen de veelhoek (kavel) gelegd worden ter verkrijging van spreiding in de verblijftijden. Ter illustratie zal deze methode worden toegepast op een cirkelvormig gebied. Een geval dat vanwege haar eenvoud als voorbeeld is gekozen.

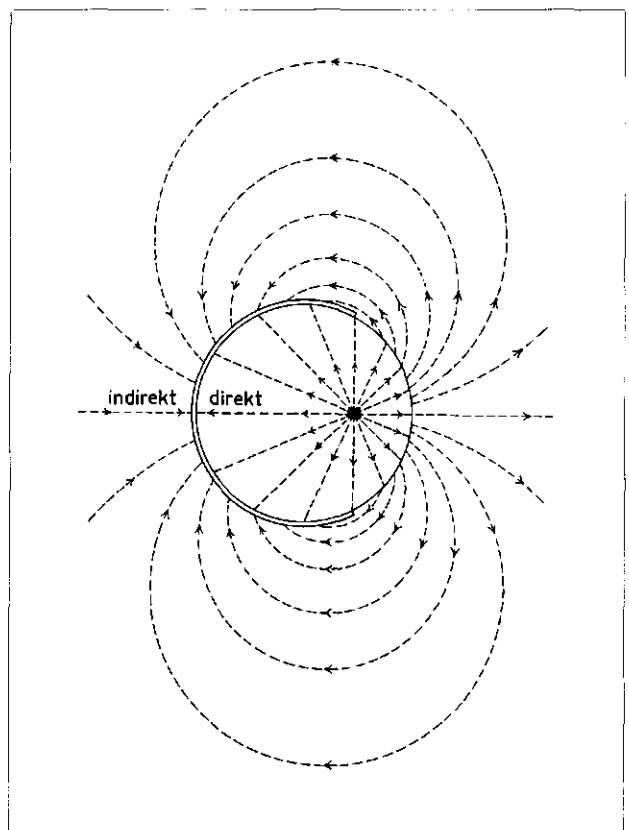
#### 3.2. Voorbeeld

Beschouwd wordt de situering van afb. 10. Een groot aantal putten is geplaatst langs een cirkel met straal  $L$ . Binnen de cirkel op afstand  $e \cdot L$  van het middelpunt ligt een meertje. Een stationaire stroom met debiet  $Q$  wordt gecreëerd van het meertje naar de putten. Aannemende dat voldaan wordt aan de voorwaarden 1 en 2 (par. 2.1) wordt uitgegaan van het berekeningsmodel van paragraaf 2.1. In dit model is het meertje geschematiseerd tot een puntbron en de puttenring tot een lijnonttrekking. De potentiaalfunctie van de stroming wordt gesplitst in een bronpotentiaal en een onttrekkingspotentiaal.

$$\Phi = \Phi_i + \Phi_0$$

De onttrekking langs de cirkel moet zodanig geschieden dat de potentiaal  $\Phi_0$  binnen de cirkel constant is.

Afb. 11 - Enige stroomlijnen van het model uit afb. 10.



De enige potentiaal functie die aan de randvoorwaarden voldoet, is in poolcoördinaten

$$\Phi_0 = \frac{Q}{2\pi H} \ln L \quad \text{voor } r \leq L$$

$$\Phi_0 = \frac{Q}{2\pi H} \ln r \quad \text{voor } r \geq L$$

De bronpotentiaal is

$$\Phi_i = \frac{-Q}{2\pi H} \ln r^*$$

waarin

$$(r^*)^2 = r^2 + (eL)^2 - 2eLr \cos \varphi$$

Superpositie geeft

$$\Phi = \Phi(r, \varphi) = \frac{Q}{2\pi H} \ln \frac{L}{r^*} \quad \text{voor } r \leq L$$

$$\Phi = \Phi(r, \varphi) = \frac{Q}{2\pi H} \ln \frac{r}{r^*} \quad \text{voor } r \geq L$$

Uit de potentiaal functie blijkt dat binnen de cirkel, die geen potentiaal lijn is, een ongestoorde radiale stroming vanuit de bron optreedt. Buiten de cirkel komen de stroomlijnen overeen met de cirkelvormige stroomlijnen van een bron-putstroming (zie afb. 11). In dit bijzondere geval is de onttrekking zeer eenvoudig. Uit de functie  $\Phi_0$  volgt namelijk dat deze constant is per eenheid van lengte langs de lijnonttrekking en gelijk is aan

$$q_c = Q/2\pi L$$

Met nadruk wordt er op gewezen dat bij een veelhoekige kavelvorm de toepassing van de methode niet tot een constante onttrekking per eenheid van lengte leidt. De methode leidt dan tot een gecompliceerdere debietsverdeling.

Het debiet dat vanuit de bron radiaal naar de cirkel stroomt is gelijk aan

$$q_{cd}(\varphi) = \frac{Q}{2\pi} \frac{d\gamma}{ds} = \frac{Q}{2\pi L} \frac{1 - e \cos \varphi}{1 + e^2 - 2e \cos \varphi}$$

Indien de punten B' (zie afb. 10) de snijpunten van de cirkel en de vertikaal door de bron zijn, volgt uit de laatste twee formules dat

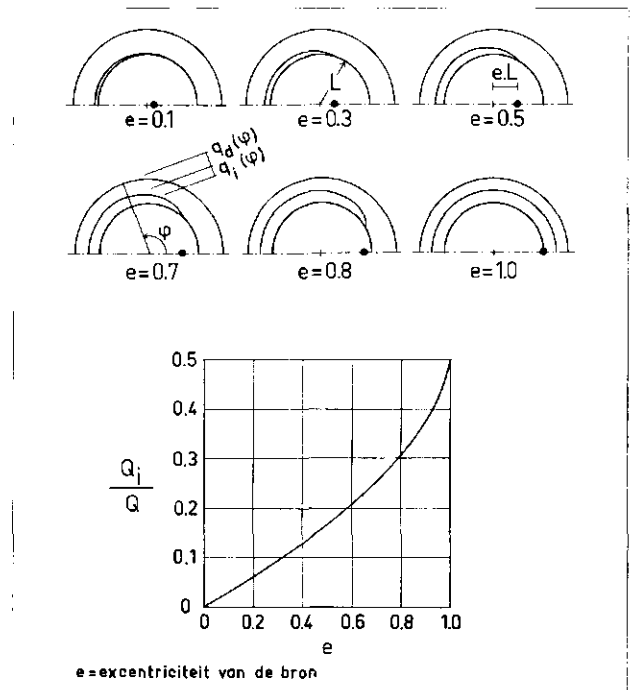
$$q_{ed} > q_c \text{ op } B'AB', \quad q_{ed} < q_c \text{ op } B'CB'$$

Op het cirkeldeel B'AB' wordt dus slechts een deel van het radiaal aangevoerde water onttrokken. Het surplus hiervan stroomt door en gaat via cirkelvormige stroomlijnen naar deel B'CB'. Over het cirkeldeel B'CB' is het debiet van de drain samengesteld uit direct of radiaal water en indirect of omlopend water (zie afb. 11 en 12). Voor de gesommeerde hoeveelheid indirect water ( $Q_i$ ) is af te leiden de relatie

$$e = \sin(\pi Q_i / Q)$$

Hieruit volgt dat voor kleine excentriciteiten ( $e$ ) het indirecte debiet relatief klein is.

Als  $T_d(\varphi_1)$  de verblijftijd is van het directe water dat



Afb. 12 - Boven: de samenstelling van het debiet langs de cirkel-drain; direkt en indirect debiet. Onder: de verhouding totaal indirect debiet-totaal debiet.

langs de stroomlijn met argument  $\varphi_1$  stroomt, geldt voor kleine waarden van  $e$  dat

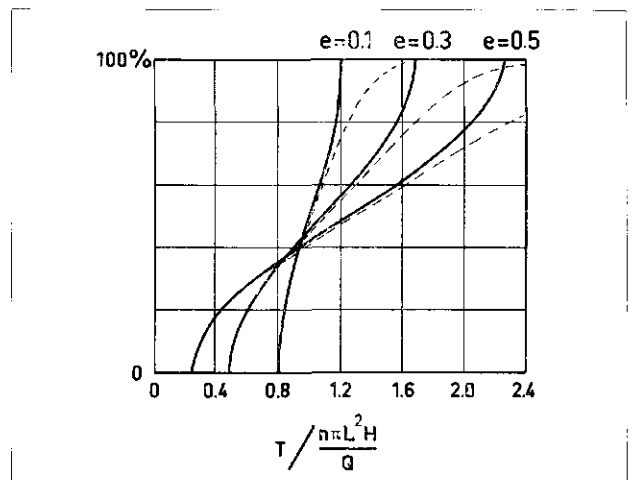
$$T(\psi) \approx T_d(\psi) = n\pi \frac{HL^2}{Q} (1 + e^2 - 2e \cos \psi)$$

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} = Hn\pi \frac{L^2}{Q} . 4e$$

Deze functie is uitgezet in afb. 13. De verdeling is redelijk lineair. De streeplijnen geven zeer globaal de correctie op het verwaarlozen van de omloopstroming.

De methode kan worden toegepast op een willekeurige veelhoek. De onttrekking langs de omtrek wordt volkomen bepaald door de vorm van de veelhoek. Binnen zekere grenzen is de plaats van het meertje vrij te kiezen, zodat inpassing in het landschap mogelijk is. Een enigszins excentrische ligging van het meertje is nodig. Voor

Afb. 13 - Cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden bij infiltratie volgens afb. 10 in eerste benadering.



niet al te grote excentriciteiten kan men met behulp van het vierkantennet van de bronpotentiaal een indruk van de verblijftijdsverdeling krijgen. De verblijftijd van het debiet tussen twee stroomlijnen is namelijk evenredig met het oppervlak tussen de beide stroomlijnen. Het met de methode verkregen resultaat blijft vatbaar voor verbeteringen. Zo kan in het gegeven voorbeeld het debiet met korte verblijftijden nog worden verminderd door de debietsverdeling langs de ringdrain enigszins te wijzigen.

#### 4. Conclusie

Indien men geen stroming wenst buiten de grenzen van een enigszins regelmatig veelhoekig gebied, leidt dit tot de plaatsing van meerdere infiltratiemiddelen. Systemen die een exact lineaire spreiding in de verblijftijden geven, zijn voor deze gevallen geconstrueerd.

Voor het geval men de putten langs de randen van een willekeurig gebied wenst en ook buiten dit gebied enige stroming toelaat, kan met behulp van één infiltratiemeertje een goede verblijftijdsverdeling worden verkregen. Een methode voor de oplossing van dit probleem

is gepresenteerd. De berekeningen zijn gebaseerd op een homogeen doorlatend massief of anders gezegd op de gemiddelde  $k$ -waarde van de bodem. Het zo berekende verschil tussen de maximale en de minimale verblijftijd is in het algemeen een ondergrens voor het werkelijke verschil. Voor het geval van een horizontaal gelaagde bodem is de beschreven berekening te verfijnen. Ook als de inhomogeniteit van de bodem stochastisch kan worden beschreven behoort een nauwkeuriger voorspelling van de verblijftijdsverdeling tot de mogelijkheden.

Met een woord van dank aan ir. O. D. L. Strack voor zijn suggesties ten aanzien van de inhoud en de presentatie wil ik dit artikel besluiten.

#### Literatuur

Huisman, L. en Martijn, Th. G., *Kwaliteitsverbetering bij kunstmatige infiltratie*. Grondslagen basisplannen 6, bijlage 11 van „De Toekomstige Drinkwatervoorziening van Nederland”, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1969.  
Verruijt, A., *Theory of Groundwater Flow*, Macmillan, London 1970.