

# De bijzondere hydrologie van kwelplassen in duinen met kunstmatige infiltratie

## 1. Inleiding

De meeste kwelplassen in duinen met kunstmatige grondwateraanvulling vertonen slechts aan één zijde kwel en aan de andere kant infiltratie. Dit genereert een bijzonder stromingspatroon, dat voor kwelplassen in de duinen nog niet eerder is aangetoond, met vèrgaande consequenties voor de hydrologie, hydrochemie en wellicht ecologie. Zo komt bijvoorbeeld de verstoring van regenwaterlenzen door kwelplassen in een geheel ander daglicht te staan. Het blijkt niet zozeer de hydrodynamische dispersie te zijn die hier



P. J. STUYFZAND  
KIWA NV



F. M. L. MOBERTS  
KIWA NV

regenwaterlenzen verstoort – zoals aangenomen door Van Dijk [1984] & De Groot [1984] –, als wel de menging van ondiep met dieper grondwater in de kwelplas vooral door de wind. Hoewel Van Dijk & Meltzer al in 1981 wezen op de mogelijkheid van het optreden van tegelijk kwel en infiltratie in duinmeren langs Nederlands kust, verbonden Van Dijk c.s. hieraan in latere publikaties geen verdere consequenties.

De voornaamste hulpmiddelen in deze studie vormden de hydrochemie en de temperatuur, waarmee stromingspatronen zichtbaar gemaakt zijn. Louter afgaande op stijghoogtemetingen, komt men hier makkelijk tot een foutief stroombeeld. Deze studie vormt dus een goed voorbeeld van de noodzaak van een meer holistische benadering of systeemanalytische aanpak [Engelen, 1984; Engelen & Jones (eds.), 1986]. Duidelijk blijkt hoe gevaarlijk het is om in een te vroeg stadium van onderzoek te gaan modelleren.

Meren met kwel en infiltratie als belangrijkste aan- respectievelijk afvoer zijn buiten Nederland, in heuvelachtige, zandige of grofkorreligere terreinen al eerder aangetoond [Engelen, 1972; Hennings geciteerd in Born et al, 1979; Le Baugh, 1986].

Dergelijke meren kunnen de natuurbeheerder in zijn strijd tegen eutrofiëring voor extra problemen stellen, omdat de nutriëntfluxen hoog kunnen oplopen alleen al ten gevolge van het kwel-infiltratiemechanisme [Den Hoed, Moberts & Stuyfzand, 1986].

## 2. De proeflocatie 'West-Meijendel'

### 2.1. Algemeen

West-Meijendel bestaat uit een kwelplassen-rijk, grillig gevormd duingebied tussen de Noordzee en meest westelijk gelegen infiltratiepannen van de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL), circa 4 km ten noorden van Scheveningen (afb. 1). De meetraaien A, B en C zijn door o.a. Van Dijk [1984], Van Dijk & Bakker [1984] en De Groot [1984] onderzocht aan de hand van metingen in de periode juli 1977 t/m juni 1978. Wij hebben de meetraaien IV en V onderzocht aan de hand van eigen en door de DWL uitgevoerde tweewekelijkse tot maandelijks metingen in de periode november 1984 t/m december 1985. Ter aanvulling zijn de oude gegevens met betrekking tot de raaien A, B en C nader uitgewerkt en herinterpreteerd.

### 2.2. Hydrologische situatie

De regionale hydrologische situatie kan beknopt beschreven worden met afb. 2 voor ogen. Dit oost-west profiel langs de zuidelijkste raai VI, geeft naast de opbouw van de ondergrond, tevens de ruimtelijke verbreiding van watertypen, die op basis van

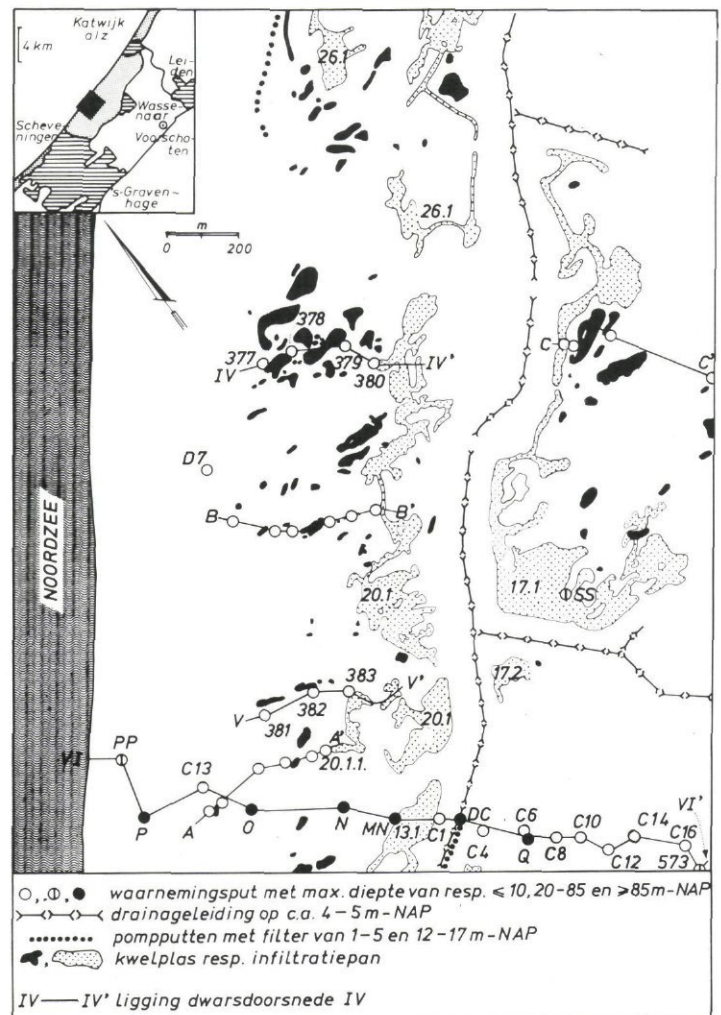
alleen hun herkomst zijn onderscheiden, namelijk: geïntroduceerd Noordzee-water (brak-zout; Cl > 300 mg L<sup>-1</sup>), neerslagwater (het echte duinwater) en kunstmatig geïnfiltreerd Rijn- en later Maaswater. De kunstmatige infiltratie met Rijnwater startte eind 1955. Sinds maart 1976 wordt Maaswater geïnfiltreerd, tot en met 1977 nog met weinig Rijnwater bijgemengd, daarna zonder bijmenging.

Het profiel onthult o.a. het voorkomen van regenwaterlenzen op het zich vooral zijdelings verbredende Maas- en Rijnwater. Merk op, dat de verticale ten opzichte van de horizontale schaal van de afbeelding 25 maal overdreven is en dat dit zuidelijkste profiel geen kwelplassen aansnijdt.

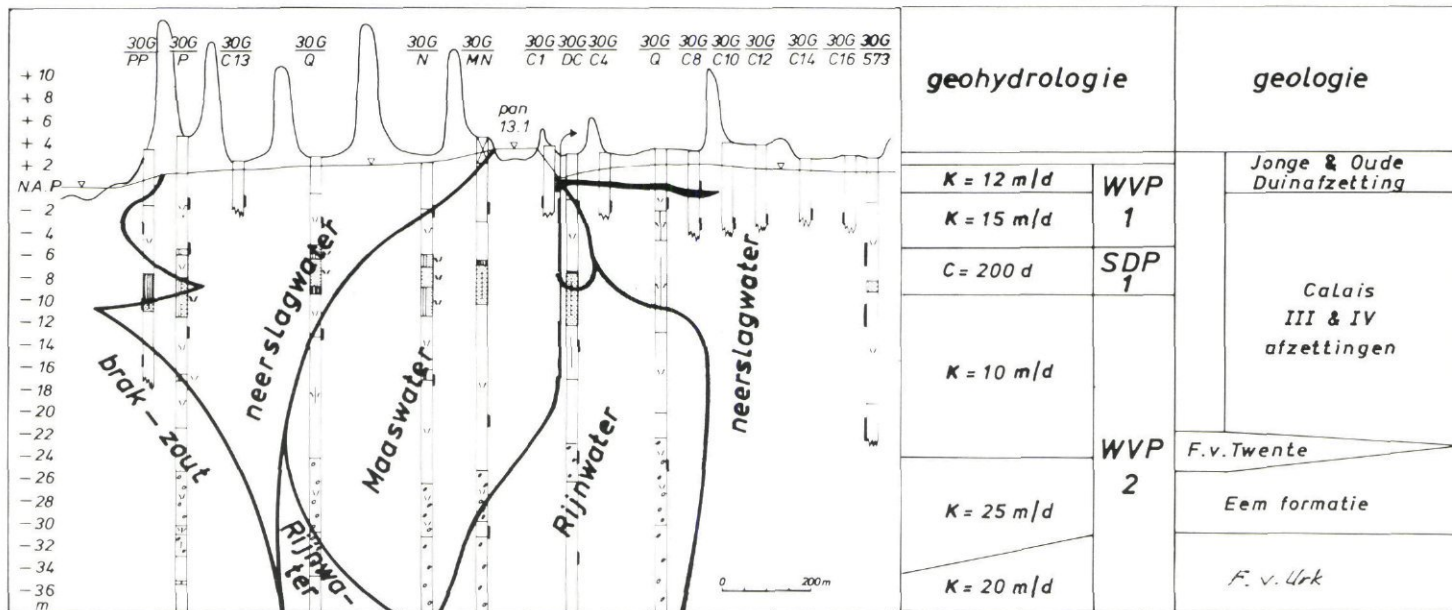
### 2.3. Grondwaterstanden

De verdroging en vernatting van West-Meijendel zijn in beeld gebracht in afb. 3. Het gemeten en vermoede verloop van de grondwaterstand in een centraal gelegen peilbuis is hierin weergegeven van 1830 t/m 1985.

Tussen 1874 en 1890 is de grondwaterstand hier vermoedelijk met bijna 2 meter gedaald, ten gevolge van de start van en uitbreidingen



Afb. 1 - Ligging van West- en Midden-Meijendel, met voor dit onderzoek relevante meetraaien.



Afb. 2 - Geohydrologische en geologische opbouw met de niet-stationaire ruimtelijke verbreiding van grondwatertypen langs raai VI in West-Meijndel, omstreeks 1980 (gebaseerd op gegevens in Stuyfzand, in voorbereiding).

in de ondiep-duinwaterwinning. Ongeveer 2 jaar na de start van kunstmatige infiltratie eind 1955, is de oude grondwaterstand min of meer hersteld, met als resultaat de terugkeer van een kwelplassenrijk gebied. Veel kwelplassen zijn praktisch permanent aanwezig, andere vallen droog in de periode juli t/m oktober. Isohypsen van de gemiddelde grondwater-spiegel voor het jaar 1985 zijn ingetekend in afb. 4. Een zeewaartse afstroming vanuit de infiltratiepannen spreekt voor zich.

**2.4. Stroomsnelheden en verblijftijden**  
 In dit kader zijn het meest interessant de stroomsnelheden en verblijftijden van het geïnfiltreerde oppervlaktewater, vanaf de oever van de infiltratiepan t/m de kweloever van de eerste (grote) kwelplas. Deze zijn voor de raaien IV, V, A en B berekend uit het stijghoogteverloop (tabel I). Uit deze tabel volgt, dat deze vier raaien redelijk op elkaar lijken. De afstand tussen infiltratiepan en eerste grote kwelplas varieert slechts van 100-140 m, de gemiddelde stroomsnelheid van 0,2-0,3 m.d<sup>-1</sup> en de verblijftijd van het geïnfiltreerde Maaswater van 410-520 dagen. Voorbij deze kwelplassen (afstand > 120-250 m) is het grondwaterverhang

aanzienlijk geringer (zie afb. 4), zodat het grondwater daar 2½-5 maal langzamer stroomt.

**3. Hydrochemische visualisering van stromingspatronen**

**3.1. Basisgegevens**

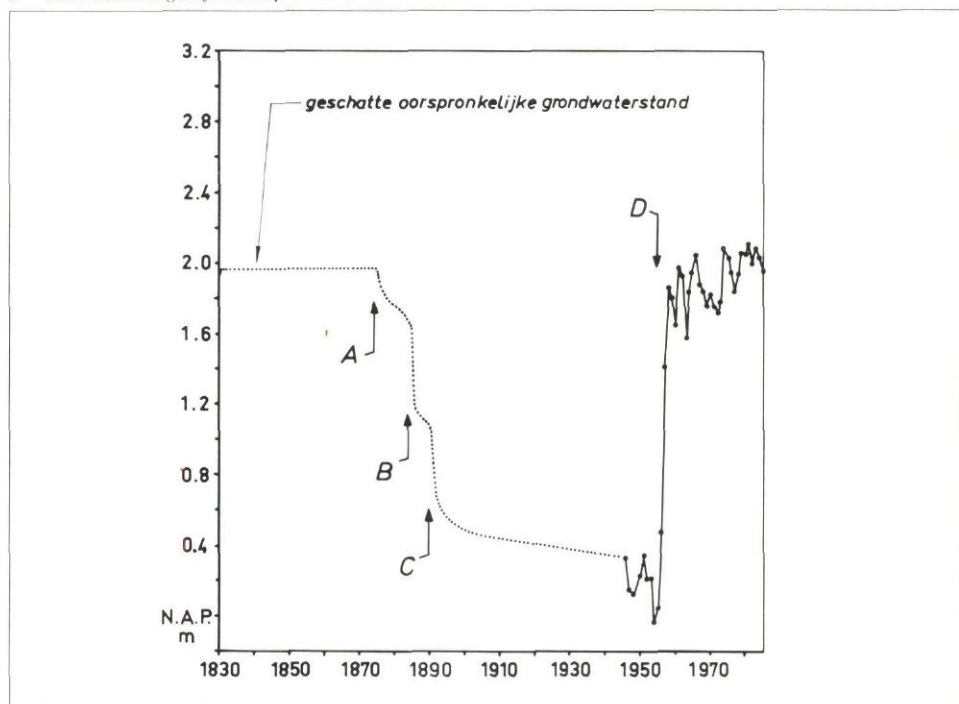
We zullen ons beperken tot de meetraaien A, B en vooral V en tot slechts enkele van de vele onderzochte hoofd- en neven-

bestanddelen van grond- en oppervlaktewater. Voor een uitvoerige presentatie en beschouwing van alle meetresultaten met betrekking tot de raaien A, B, C, IV en V zij verwezen naar Stuyfzand & Moberts [1986]. In afb. 5 is de ruimtelijke verbreiding van het jaargemiddelde DOC-, SO<sub>4</sub>-, F-, K-, Cl- en NO<sub>3</sub>-gehalte van al het onderzochte water in raai V weergegeven met behulp van isoconcentratielijnen.

Afb. 3 - Verloop van de jaarstand van het grondwater bij het meetpunt D7, centraal gelegen in West-Meijndel. Gegevens 1946 t/m 1984 ontleend aan De Jonge (1985).  
 A = start ondiep-duinwaterwinning op 24 oktober 1874.  
 B = verdieping kanaal hoofdader en installatie drain onder kanaalbodem.  
 C = verdieping liggend drain plus installatie putten langs drain.  
 D = start kunstmatige infiltratie op 29 november 1955.

Tabel I - Afstand, gemiddelde stroomsnelheid en (totale) verblijftijd van geïnfiltreerd Maaswater van infiltratiepan tot en met de eerste (grote) kwelplas, langs vier meetraaien in West-Meijndel.

meetraai	afstand x (m)	stroomsnelheid (m.d <sup>-1</sup> )	verblijftijd (d)
IV	110	0,27	410
V	130	0,25	520
A	100	0,2	500
B	140	0,3	470



De ruimtelijke verbreiding van de bijbehorende standaardafwijking ten aanzien van DOC,  $\text{HCO}_3^-$ , K en de temperatuur is geschetst in afb. 6.

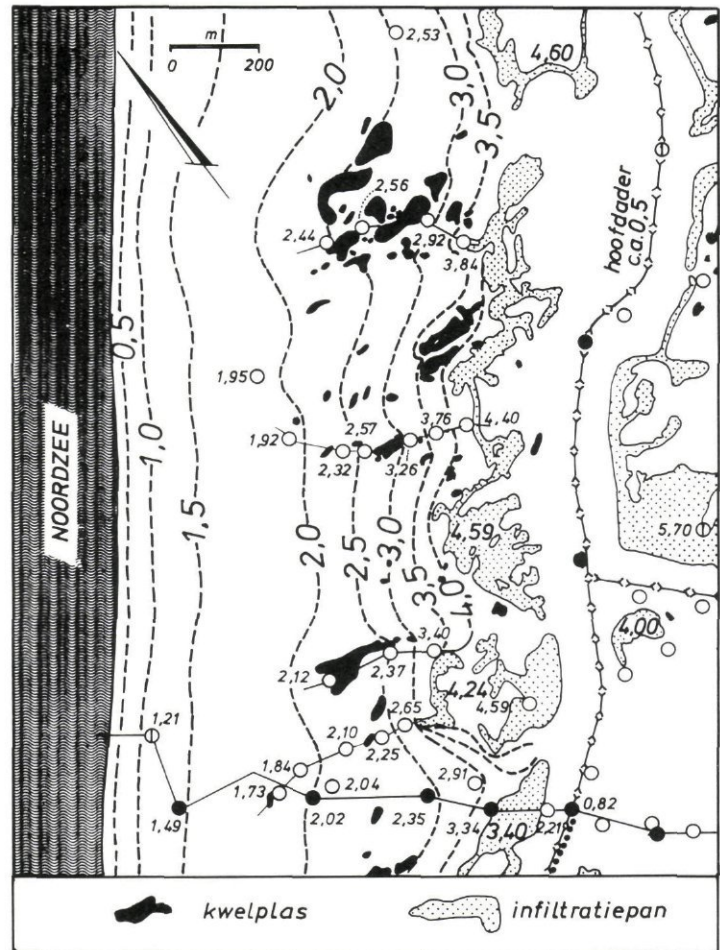
Afb. 7 presenteert de ruimtelijke verbreiding van het jaargemiddelde  $\text{Cl}^-$ , K- en  $\text{NO}_3^-$ -gehalte van al het onderzochte water in de raaien A en B.

### 3.2. Labelling van het water

De stromingspatronen worden hier gevisualiseerd dankzij drie soorten kenmerken (natuurlijke merkstoffen), die het water ergens meekrijgt en waaraan de verschillende watersoorten ook bij voortgaande bodempassage herkenbaar blijven:

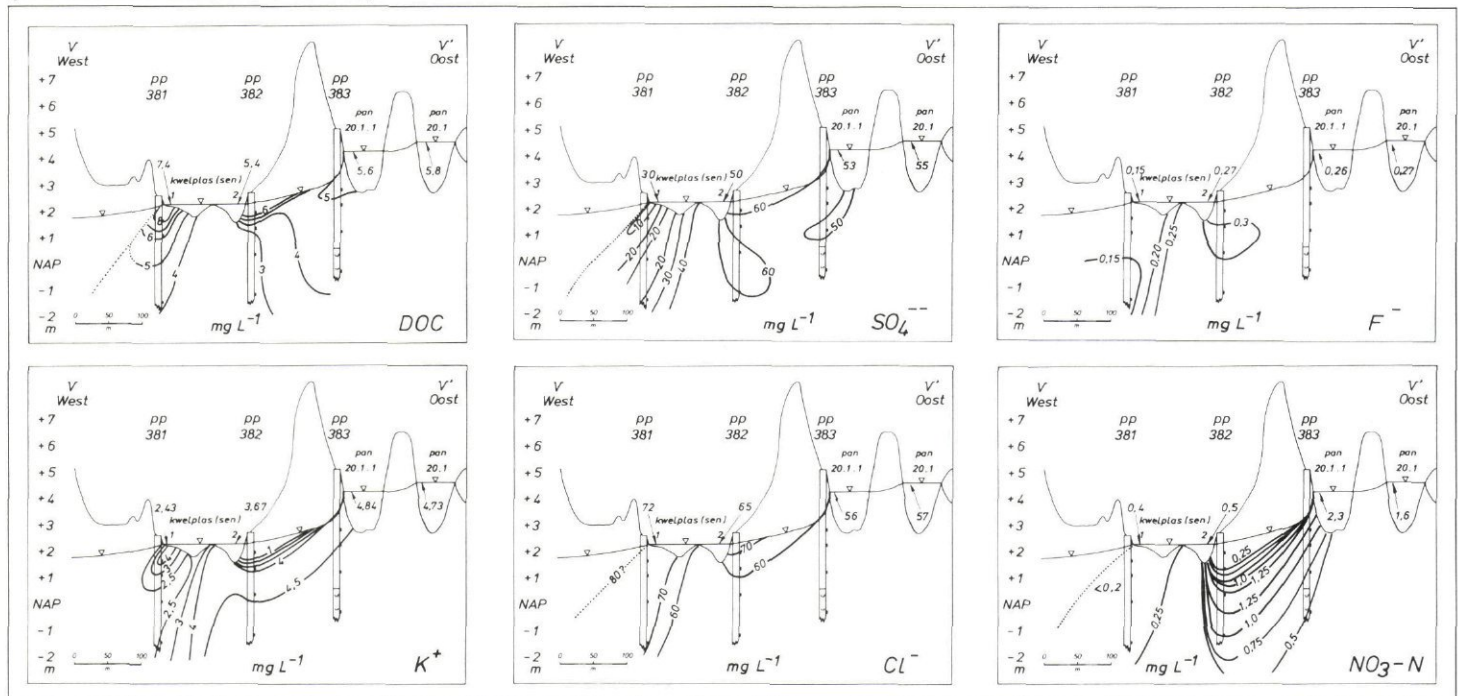
a. *een herkomstkenmerk*: het infiltrerende Maaswater heeft in West-Meijendel in het algemeen duidelijk hogere K- en F-gehalten [Van Dijk, 1984; Stuyfzand, 1986], maar een lagere Cl-concentratie dan ondiep duinwater dat door de neerslag wordt aangevuld (tabel II). Hoge  $\text{NO}_3^-$ -gehalten ( $> 3 \text{ mg NO}_3\text{-N L}^{-1}$ ) wijzen vrijwel eenduidig op (voornamelijk) geïnfiltreerd neerslagwater met een hoge atmosferische depositie eventueel in combinatie met  $\text{N}_2$ -fixatie door duindoorns. Het geïnfiltreerde Maaswater vertoont immers nauwelijks hogere  $\text{NO}_3^-$ -gehalten dan water in de bijbehorende infiltratiepan [Stuyfzand, 1986].

b. *een (bio)geochemisch kenmerk*: bodempassage van geïnfiltreerd Maaswater door bodemslib in de infiltratiepan en vervolgens door duinzand (zonder veen!) leidt duidelijk



Afb. 4 - Isohypsens van de grondwaterspiegel en waterstanden van open water, gemiddeld over 1985, voor West-Meijendel (tussen de westelijkste infiltratiepannen van de DWL en de Noordzee).

Afb. 5 - Ruimtelijke verdeling van het jaargemiddelde DOC-,  $\text{SO}_4^{--}$ , F-, K-, Cl- en  $\text{NO}_3^-$ -gehalte van grond- en oppervlaktewater langs raai V in West-Meijendel (periode december 1984 t/m november 1985).



tot een continue afvlakking van al relatief kleine HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>- en DOC-fluctuaties (afb. 6) en behoud van praktisch al het SO<sub>4</sub> (afb. 5). Passage van bodemslib in de 's zomers geheel met riet vol gegroeide kwelplas leidt daarentegen tot SO<sub>4</sub>-reductie en een sterk seizoenafhankelijke HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>- en DOC-productie (deze fluctuaties manifesteren zich in een hoge standaardafwijking);

c. *temperatuurfluctuaties als kenmerk*: voortgaande bodempassage leidt in het algemeen tot afvlakking van temperatuurfluctuaties, dus tot afname van de standaardafwijking. Infiltrerend oppervlaktewater (in pan 20.1 of kwelplas) vertoont door warmte-

Tabel II – Concentratieniveaus van vier potentiële merkstoffen van (= discriminatoren tussen) geïnfiltrerd Maaswater en ondiep duinwater, dat door de neerslag in West-Meijendel wordt aangevuld.

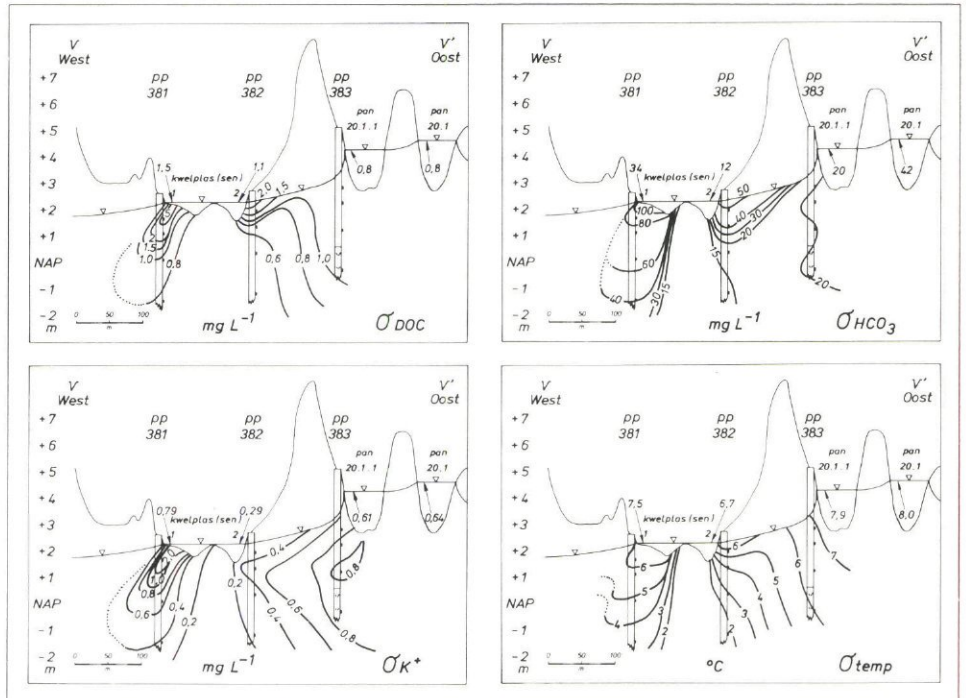
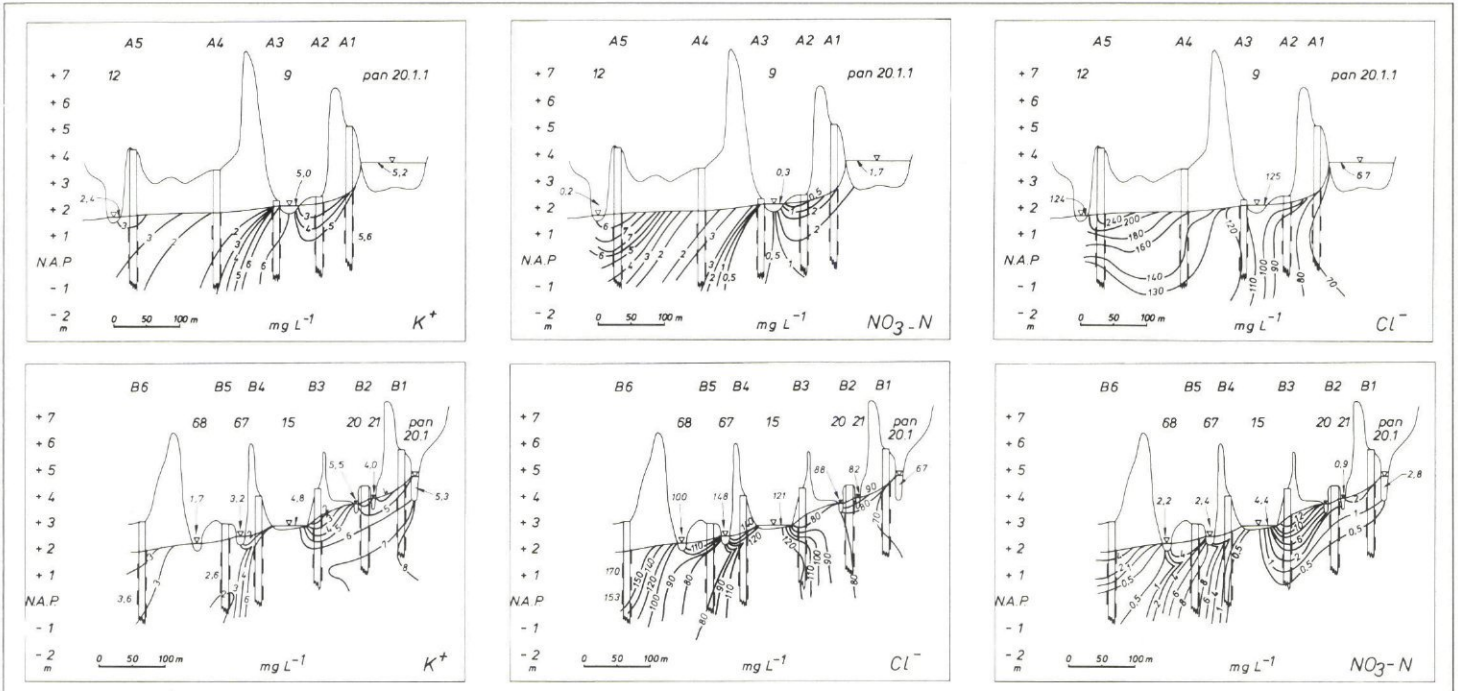
mg L <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> -N
<b>Maaswateraanvoer</b>				
1976	109	0,41	6,9	4,31
1977 raaien A & B	73	0,31	5,5	4,11
1978	61	0,32	5,0	3,48
1984 raai IV	61	0,35	4,9	3,63
1985	63	0,36	5,1	3,48

<b>Infiltratiepannen</b>					
pan 20.1	juli 1977	67	–	5,3	2,8
pan 20.1.1	juli 1978	67	–	5,3	1,7
pan 20.1	1985	57	0,27	4,73	1,6
pan 20.1.1	1985	56	0,26	4,84	2,3

<b>Ondiep duinwater (autochtoon, geïnfiltrerd regenwater) West-Meijendel</b>				
minimum α	75	0,10	0,6	0
maximum α	250	0,25	4,0	12

α = gegevens ontleend aan Stuyfzand (in voorbereiding).

Afb. 7 - Ruimtelijke verdeling van het gemiddelde K<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>-N- en Cl<sup>-</sup> gehalte van grond- en oppervlaktewater langs de raaien A en B in West-Meijendel (periode juli 1977 t/m juni 1978). Gebaseerd op gegevens in Van Dijk (1979) en Van Dijk (1984).



Afb. 6 - Ruimtelijk patroon van seizoenfluctuaties van DOC, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K en temperatuur volgens de standaardafwijking behorende bij het jaargemiddelde (periode december 1984 t/m november 1985), van water langs raai V in West-Meijendel.

uitwisseling met de atmosfeer grotere fluctuaties dan opkwellend grondwater dat een lange ondergrondse weg achter de rug heeft (afb. 6).

COMPLICATIES

**Kalium** gedraagt zich niet overal even conservatief (als ideale merkstof). Het komt vrij bij mineralisatie van verse organische stof

o.a. op de bodem van kwelplassen (peilput 381 bovenin; afb. 5 en 6), wordt opgenomen bij de synthese van biomassa in en rond kwelplassen (peilput 382 bovenin?, in de kwelplas in de stromingsrichting; beide afb. 5) en kan sorberen aan bodemslib. Waarschijnlijk verkeert het duinzand na 30 jaar infiltratie en bij de eerste grote kwelplas na 20-30 maal doorspoeling met

K-rijk Rijn- en Maaswater wel in evenwicht met dit oppervlaktewater wat K betreft. Het bodemslib in pan 20.1 zorgt in raai B bij de diepere filters van B1 en B2 nog voor K-desorptie naar aanleiding van de overschakeling van Rijn- op K-armede Maaswater (afb. 7).

Fluoride kan vooral door droge depositie in zeer ondiep grondwater concentratieniveaus bereiken, die weinig lager zijn dan die in Maaswater [Stuyfzand, 1984a en b]. Daarnaast is adsorptie c.q. chemisorptie aan in de kwelplas neerslaande kalk en ijzerhydroxiden en misschien aan accumulerende organische stof zeker niet uit te sluiten. In hoeverre F opgenomen wordt bij de synthese van biomassa is onbekend. Met duinzand is evenwicht waarschijnlijk, zoals dat ook voor K geldt.

Het chloridegehalte van ondiep duinwater is uiterst variabel in de ruimte, ten gevolge van verschillen in begroeiing [Stuyfzand, 1984a] en afstand tot de kust [Stuyfzand, 1985] en in de tijd, zowel door seizoen- als jaarfluctuaties in zeezoutdepositie en verdamping [Stuyfzand, 1984b]. Dit komt fraai tot uiting in alle meetpunten van A4, A5, B5 en B6 (afb. 7). In de meetraaien A en B komt verder, geheel in overeenstemming met de grondwaterstroomsnelheid, nog Maaswater uit 1976 met hogere Cl-gehalten dan daarna (tabel II) voor, namelijk bij de meetpunten A3, B3 en B4.

### 3.3. Resultaten

Combineren we nu al de patronen in afb. 5, 6 en 7 met de ook daarin aangegeven waterstanden, dan ontstaan uiteindelijk de in afb. 8 gepresenteerde grondwaterstromingspatronen. De begrenzing van de onderscheiden grondwatersoorten II, III, IV, VI en VII is gelijk aan een stroombaan, zodat er inderdaad sprake is van een hydrochemische visualisering van het stromingspatroon. De in afb. 8 onderscheiden watersoorten kenmerken zich als volgt:

I: zuurstofrijk (oxisch) Maaswater in de infiltratiepan. Ten opzichte van ingelaten Maaswater heeft het de normale kwaliteitsveranderingen ondergaan [zie Stuyfzand, 1986]. De Cl- en F-afname volgens tabel II is mogelijk schijnbaar, omdat de verschillen veroorzaakt kunnen zijn door een niet toegepaste reistijdcorrectie en door een ongelijke frequentie van bemonstering;  
II: nog NO<sub>3</sub>-bevattend (suboxisch), geïnfiltreerd Maaswater, dat de normale effecten van bodempassage door oeveralud en duinzand vertoont [zie Stuyfzand, 1986];  
III: geen O<sub>2</sub>- en vrijwel geen NO<sub>3</sub>-bevattend (anoxisch), geïnfiltreerd Maaswater met de normale verschijnselen van contact met bodemslib in de infiltratiepan [zie Stuyfzand, 1986];

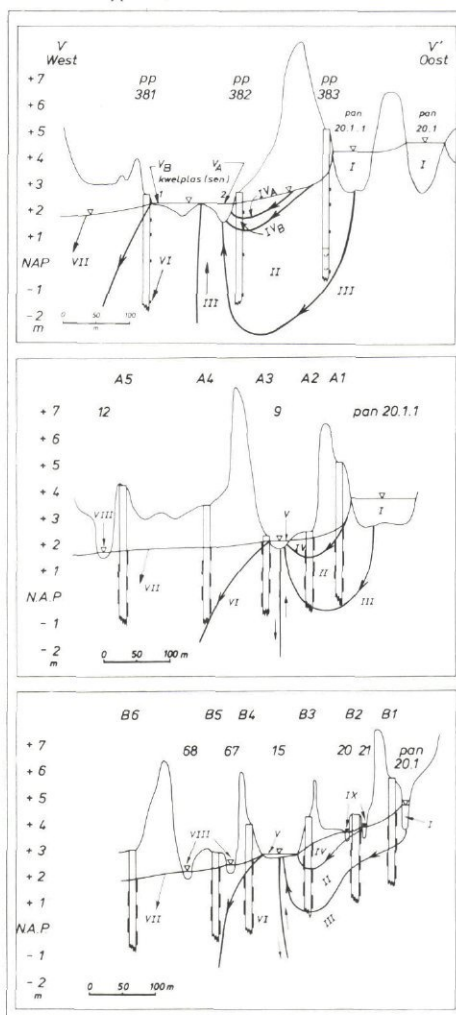
IV: slecht ontwikkelde regenwaterlenzen met > 10% Maaswater bijgemengd en met een samenstelling die verder sterk afhangt van de begroeiing. Type IV<sub>A</sub> bevat minder dan 50% bijgemengd Maaswater, type IV<sub>B</sub> 50-90%;

V: kwelplaswater met 10-90% geïnfiltreerd Maaswater. Het is dus een mengsel van de typen II, III en IV, dat de sporen draagt van bodemslibpassage (SO<sub>4</sub>-reductie) en synthese van biomassa (N-, P- en K-opname);  
VI: geïnfiltreerd kwelplaswater van het type V, met verdere SO<sub>4</sub>-reductie, alsmede hoge concentraties en sterke fluctuaties van HCO<sub>3</sub> en DOC;

VII: ondiep duinwater met < 10% bijgemengd Maaswater, met Cl-gehalten > 75 mg L<sup>-1</sup> en vaak hoge NO<sub>3</sub>-concentraties;

VIII: kwelplaswater met < 10% Maaswater;  
IX: kwelplaswater met ≥ 90% Maaswater. Duidelijk is te zien, dat het geïnfiltreerde Maaswater (typen II en III) met daarop zwak

Afb. 8 - Ruimtelijke verbreiding van de watersoorten I t/m IX met de daaruit en uit de waterstanden afgeleide stroomrichting. Het geïnfiltreerde Maaswater (type II en III) met daarop zwak ontwikkelde regenwaterlenzen (type IV) kwelt op aan de oostzijde van de kwelplas, stroomt daarin oppervlakkig westwaarts en infiltreert aan de westzijde (leidend tot type VI).



ontwikkelde regenwaterlenzen (type IV) aan de oostzijde van de kwelplas omhoog komt, in de plas zelf oppervlakkig westwaarts stroomt en daar infiltreert (leidend tot type VI). De watertypen I t/m VI en IX maken dus deel uit van het hydrologische systeem, gedomineerd door kunstmatige infiltratie. Ten westen daarvan bevindt zich een hydrologisch systeem, gedomineerd door autochtoon regenwater (de watertypen VII en VIII). Deze tweedeling in hydrologische systemen uit zich ook in het fluctuatiepatroon van grondwaterstanden [Stuyfzand & Moberts, 1986].

Tussen type VI en type VII is het voorkomen van een mengzone gemakshalve verwaarloosd. Het scheidingsvlak tussen beide watersoorten duikt relatief snel naar beneden, in overeenstemming met het geringe grondwaterverhang voorbij de (eerste) grote kwelplassen.

### 4. Motoriek achter het stromingspatroon

Aan de kwel en infiltratie in één plas ligt de in afb. 9 geschematiseerde motoriek ten grondslag. De invloed van neerslag op en verdamping uit de kwelplas is hier verwaarloosd. De kwelzijde is voor de eenvoud even groot als de infiltratiezijde verondersteld. Zonder kwelplas zou de grondwaterspiegel verlopen volgens H\*. Het verschil tussen H\* en het waterpeil H<sub>K</sub> in de kwelplas geeft nu bij benadering het verloop van de kwel- c.q. infiltratiedruk. Het verdwijnen van water uit de kwelplas voornamelijk door infiltratie houdt de kwel dus aan de gang, althans zolang de plasbodem stroomopwaarts de grondwaterspiegel aansnijdt.

### Verdamping relatief gering effect?

De waterbalans van een kwelplas ziet er voor een gemiddeld hydrologisch jaar als volgt uit (zie ook afb. 9):

$$S + P - I - E = 0 \quad (1)$$

waarin:

S = kwel; P = neerslag; I = infiltratie; E = reële verdamping; alle in m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>.

Als eerste benadering stellen we P = E en

$$S = I \cong \frac{L\bar{B}(H_A - H_K)}{4C} \quad (2)$$

waarin (zie ook afb. 9):

L = lengte van kwelplas (m);  
 $\bar{B}$  = gemiddelde breedte kwelplas (m);  
 H<sub>A</sub> = stijghoogte (m + NAP) grondwater in meest stroomopwaartse kweloever;  
 H<sub>K</sub> = waterpeil (m + NAP) kwelplas = 0,5 (H<sub>A</sub> + H<sub>A</sub> + L);  
 C = weerstand van bodemslib tegen verticale stroming (d).

Aangenomen is, dat de kweldruk gelijk is aan 1/2 (H<sub>A</sub> - H<sub>K</sub>).

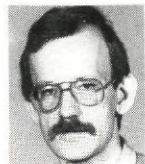
# Het simuleren van grondwaterstroming met spreadsheet; enkele voorbeelden

## Inleiding

Tot voor enige tijd werd voor het simuleren van complexe grondwaterstroming gebruikgemaakt van kostbare programmatuur. De geohydrologische werkelijkheid moet voor toepassing van deze programmatuur soms sterk worden geschematiseerd. Aan het monopolie van deze, meestal in Fortran geschreven, programmatuur lijkt definitief een einde te zijn gekomen. De oorzaak is gelegen in de opkomst van de microcomputer met de daarop beschikbare, weinig kostbare, spreadsheetprogramma's. Een spreadsheet is



IR. J. L. TIMMER  
DHV Raadgevend  
Ingenieursbureau BV



IR. H. J. ROELOFS  
DHV Raadgevend  
Ingenieursbureau BV

een soort tabel, niet alleen opgebouwd uit getallen, maar waarbij een getalswaarde op een zekere plaats ook kan worden gedefinieerd door het formuleren van een rekenkundige bewerking van getallen uit omliggende tabelplaatsen. In dit artikel wordt aan de hand van een tweetal voorbeelden geïllustreerd wat deze moderne hulpmiddelen kunnen betekenen voor de geohydroloog. Het artikel moge gezien worden als een vervolg op een artikel van Olsthoorn in dit tijdschrift [lit. 3], waarin reeds werd gewezen op de mogelijkheden van het voornoemde gereedschap.

## Het principe van een grondwatermodel met een spreadsheet

Het opstellen van een grondwatermodel met een spreadsheet is bijzonder eenvoudig. De bodem wordt geschematiseerd tot een systeem van goed en minder goed doorlatende lagen. Deze lagen worden opgebouwd gedacht uit eindige rechthoekige elementen. De elementen corresponderen met de cellen van een spreadsheet.

Onder aanname van homogeniteit en isotropie geldt voor de situatie in afb. 1 de Wet van Darcy en de continuïteitswet:

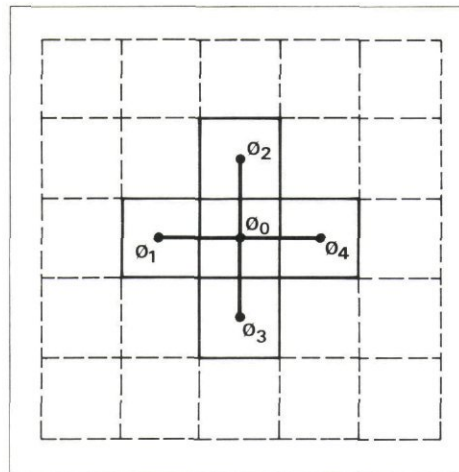
$$\text{continuïteit} : q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = Q \quad (1)$$

$$\text{Darcy} : q_1 = (\varnothing_1 - \varnothing_0) * kD * L/L \quad (2)$$

waarin:

$q$  = de grondwaterstroming door grensvlak van het element ( $m^3/(m^2 \cdot \text{dag})$ )

$Q$  = de externe onttrekking of aanvulling van grondwater ( $m^3/\text{dag}$ )



Afb. 1 - Principe van de modellering.

$\varnothing$  = grondwaterpotentiaal (m ten opzichte van referentieniveau)

$kD$  = doorlaatvermogen ( $m^2/\text{dag}$ )

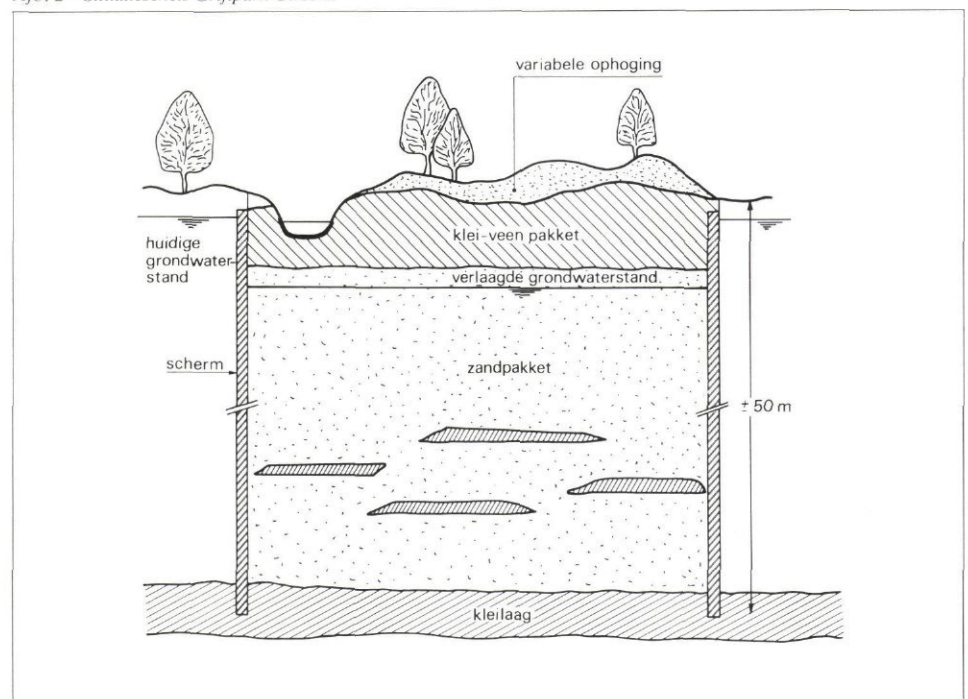
Combinatie van (1) en (2) levert:

$$\varnothing_0 = (\varnothing_1 + \varnothing_2 + \varnothing_3 + \varnothing_4 + Q/kD)/4 \quad (3)$$

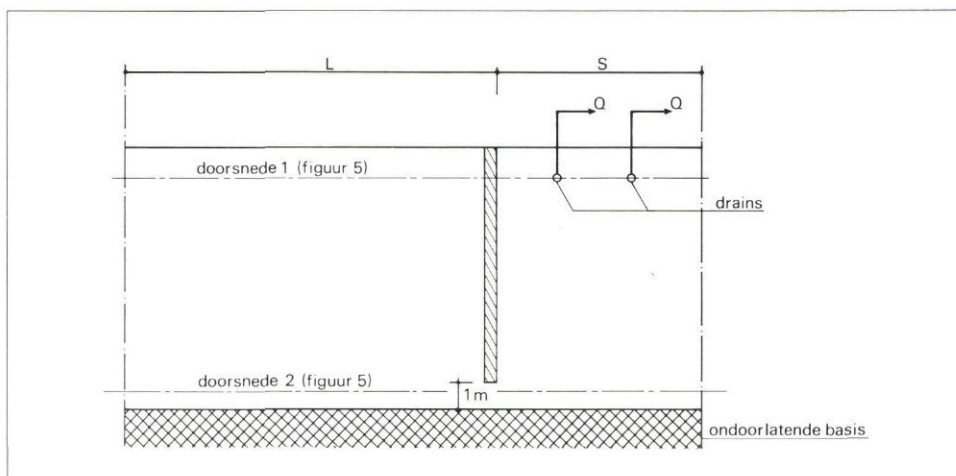
Vergelijking (3) vormt de meest eenvoudige basisformule voor het spreadsheetmodel. Deze formule wordt ingebracht in de cellen van de spreadsheet, waarbij gerefereerd wordt aan getalswaarden in aanliggende cellen. Vergelijking (3) wijzigt als de eigenschappen van de elementen niet gelijk zijn, bijvoorbeeld als gevolg van

- anisotropie (verschil in horizontale en verticale doorlatendheid);
- weerstandslagen, bijvoorbeeld een kleilaag tussen twee watervoerende lagen;

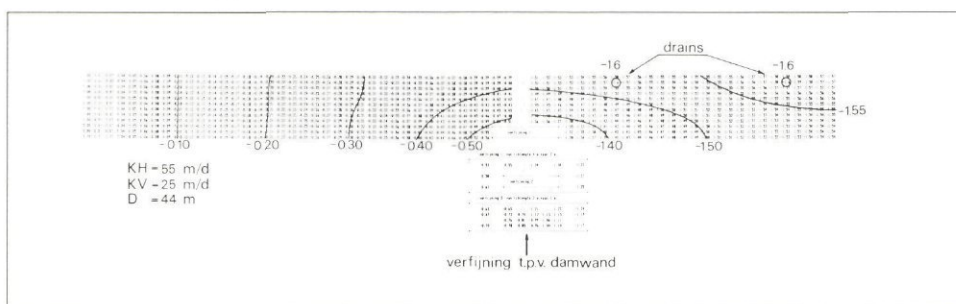
Afb. 2 - Situatieschets Griftpark Utrecht.



- ondoorlatende of slecht doorlatende schermen en wanden, etc. De formules aan de rand van het model zijn van een bijzondere vorm. Deze formules zijn afgestemd op de ter plaatse geldende randvoorwaarden, zoals een vast debiet of een vaste potentiaal. In dit artikel zal niet nader worden ingegaan op de verschillende formules waaruit een spreadsheetmodel wordt opgebouwd. Volstaan wordt met een verwijzing naar lit. [3 en 5]. Ondanks de soms grote verscheidenheid in formules, is met enige routine, in relatief korte tijd een spreadsheetmodel te maken. Dit is vooral dankzij de handige copy-commando's van de spreadsheet-programmatuur. Het iteratieve rekenproces maakt onderdeel uit van de spreadsheet-programmatuur. Het rekenproces wordt gestart met een simpel commando. De resultaten van de berekeningen kunnen op eenvoudige wijze worden gecontroleerd aan de hand van een eveneens in de spreadsheet op te nemen waterbalans. Deze waterbalans kan betrekking hebben op het gehele model, maar ook op bepaalde andere onderdelen. Met behulp van deelwaterbalansen zijn eventuele fouten in het model snel en eenvoudig op te sporen. Tijdens de berekeningen kan de voortgang van het rekenproces worden gevolgd aan de hand van de waterbalansen. Het bouwen van een model met een spreadsheet kan wat meer tijd kosten dan het gereedmaken van de data-input voor een klassiek grondwaterprogramma. Voorts moet als nadeel van grondwatermodellen met



Afb. 3 - Schematisatie Griftpark.



Afb. 4 - Verkleining van de elementen t.p.v. opening scherm.

spreadsheets de lange rekentijd worden genoemd. Voor een enigszins ingewikkeld probleem is de rekentijd op een IBM microcomputer al snel enige uren. Tegenover deze nadelen staat als voordeel de grote flexibiliteit met betrekking tot de te beschrijven problemen. Wanneer een klassiek grondwaterprogramma niet voorziet in een simulatie van een bepaalde situatie dan zijn vaak onevenredig grote programmeerinspanningen nodig voor aanpassing of uitbreiding van het programma. Met name op dit laatste punt ligt de kracht van spreadsheetmodellen.

Ter illustratie van de mogelijkheden van grondwaterberekeningen met spreadsheets zal in het navolgende een tweetal voorbeelden worden gepresenteerd. In de voorbeelden zal worden aangetoond dat de toepassingen niet beperkt zijn tot twee-dimensionale stroming.

**Het Griftpark, Utrecht**

Het Griftpark is een ernstig verontreinigd buurtpark in Utrecht. Afgraven en het vervolgens reinigen van de verontreinigde grond is zeer kostbaar, mede vanwege de grote diepte waarnaar de verontreinigingen zijn doorgedrongen. Daarom zijn plannen ontwikkeld om de verontreinigingen van de omgeving te isoleren door middel van een scherm. Dit scherm zal moeten doorlopen tot circa 45 meter minus maaiveld, waar een slecht doorlatende kleilaag wordt aangetroffen. Binnen het scherm zijn drains

geprojecteerd om de grondwaterstand tot een bepaald niveau te verlagen. Hierdoor wordt een verdere verspreiding van de verontreinigingen in de diepte voorkomen. Afb. 2 geeft een situatieschets. In het ontwerp is steeds rekening gehouden met een niet volledige waterafsluitende aansluiting van scherm en kleilaag. Vanwege de zettingsgevoeligheid van de in de nabijheid gelegen bebouwing zijn berekeningen uitgevoerd om de verlaging van de grondwaterstand buiten het geïsoleerde gebied te bepalen. Deze berekeningen waren tevens noodzakelijk om de grootte van het binnen het scherm op te pompen debiet te bepalen. In diverse studies zijn verschillende klassieke grondwaterprogramma's gebruikt om de genoemde grootheden te berekenen. In het kader van een interne DHV-studie is een simulatie gemaakt met behulp van een spreadsheetmodel.

**a. Tweedimensionale simulatie**

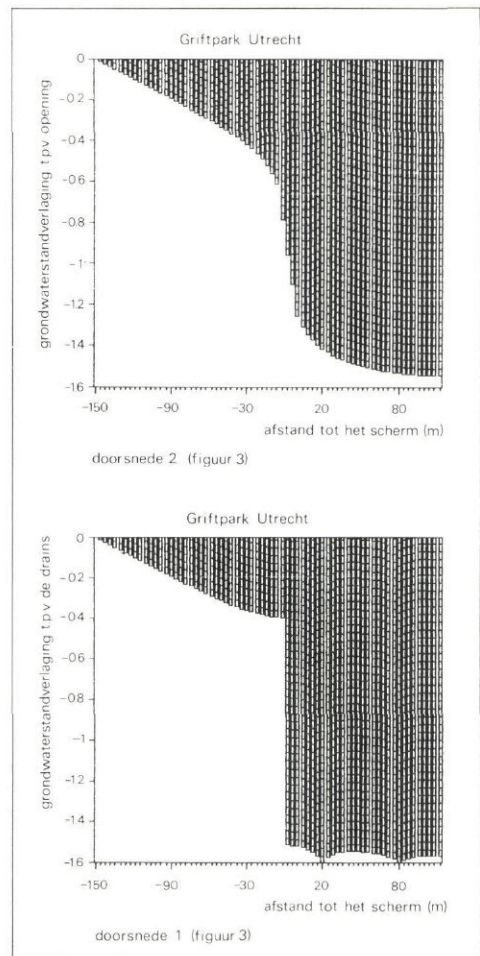
Het tweedimensionale spreadsheetmodel beschrijft de grondwaterstroming in een doorsnede over het Griftpark en omgeving, waarbij een strook van 1 meter breedte is beschouwd. In het model is, gebruikmakend van symmetrie-aspecten, slechts de helft van de dwarsdoorsnede ingevoerd. De doorsnede in zij-aanzicht is weergegeven in afb. 3. Als 'worst case' benadering is aangenomen dat tussen het scherm en de kleilaag een opening van 1 meter aanwezig is.

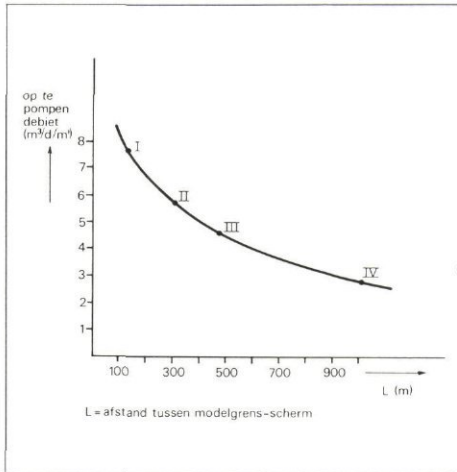
Ter plaatse van de opening tussen scherm en kleilaag is de grootte van de elementen verkleind, teneinde een zo goed mogelijke beschrijving van de stroming te verkrijgen. In afb. 4 is het deel van de spreadsheet weergegeven waarin deze verfijning is ingebracht.

De rand van het model is (volgens vuistregels) in eerste instantie gelegd op een afstand van driemaal de dikte van het watervoerende pakket, gemeten vanaf het scherm. Als randvoorwaarde is een vaste potentiaal ingevoerd. Op voornoemde afstand van het scherm mag de verlaging van de grondwaterstand ten gevolge van de onttrekking binnen het scherm verwaarloosbaar klein worden geacht. Er is geen neerslag ingevoerd. De resultaten van het spreadsheetmodel zijn weergegeven in afb. 5. De resultaten zijn in goede overeenstemming met die van simulaties met klassieke grondwaterprogramma's.

Met behulp van het spreadsheetmodel is vervolgens een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met betrekking tot de begrenzing van het model. Dit is gedaan door de rand van het model op een grotere afstand van het scherm aan te brengen, waarbij de randvoorwaarde (vaste potentiaal) niet is

Afb. 5 - Resultaten van de spreadsheetberekeningen.





Afb. 6 - Relatie tussen de modelgrens en het op te pompen debiet.

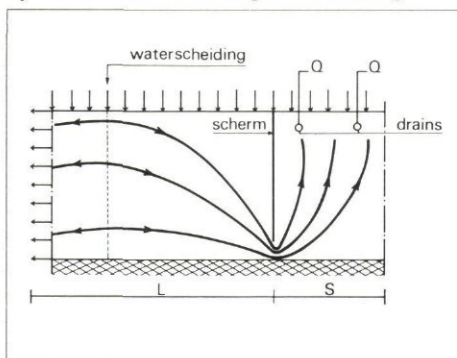
gewijzigd. Hierbij kwam een van de voordelen van een spreadsheetmodel duidelijk naar voren; de aanpassing van het model vond met gebruik van de handige copy- en move-commando's van de spreadsheetprogrammatuur binnen enkele tientallen minuten plaats.

Uit de berekeningen blijkt dat het op te pompen debiet sterk afhankelijk is van de ligging van het model. Voor de berekeningsresultaten wordt verwezen naar afb. 6. Opgemerkt wordt dat aan een juiste inschatting van het op te pompen debiet een hoge waarde moet worden toegekend. Dit in verband met de aan te brengen voorzieningen voor reiniging van het grondwater. De hiervoor behandelde benadering van het probleem blijkt minder geschikt om de op te pompen debieten uit te rekenen, omdat de plaats van de modelgrens teveel van invloed is op de resultaten.

#### b. Driedimensionale simulatie

Bij het hiervoor geschetste model vindt de aanvoer van het op te pompen grondwater plaats via de verticale modelgrens. In werkelijkheid vindt de grondwateraanvulling echter plaats door neerslag. Op een zekere afstand van het scherm zal als gevolg van de grondwateronttrekking een

Afb. 7 - Grondwateraanvulling en waterscheiding.



waterscheiding optreden. Wanneer de modelgrens ver genoeg wordt gelegd (verder dan de waterscheiding) dan is de plaats van de modelgrens nauwelijks van invloed op de berekeningsresultaten, zie afb. 7.

Om de invloed van grondwateraanvulling door neerslag in de berekeningen op te nemen wordt in de regel gebruik gemaakt van programmatuur voor quasi-driedimensionale grondwaterstroming. Met enige creativiteit kan ook gebruik worden gemaakt van een spreadsheet.

Wanneer de natuurlijke grondwaterstroming buiten beschouwing wordt gelaten (hetgeen in het onderhavige geval geoorloofd is), dan zal de waterscheiding min of meer een cirkel beschrijven rondom het door een scherm geïsoleerde gebied. Per strekkende meter scherm kan, in bovenaanzicht gezien, het grondwater aanvoerende grondpakket als goede benadering worden beschreven door een cirkelsegment.

Verwezen wordt naar afb. 8.

Voor het spreadsheetmodel is wederom uitgegaan van de halve dwarsdoorsnede over het watervoerende pakket en een strookbreedte van een meter. Het feit dat het beregende oppervlak kwadratisch toeneemt met de afstand tot het scherm is ingebracht door de nuttige neerslag te vermenigvuldigen met een factor  $f$ . Deze factor ziet er als volgt uit (zie ook afb. 8):

$$f(r) = \frac{\pi * ((r + S)^2 - S^2)}{2 * \pi * S * r} \quad (4)$$

waarbij:

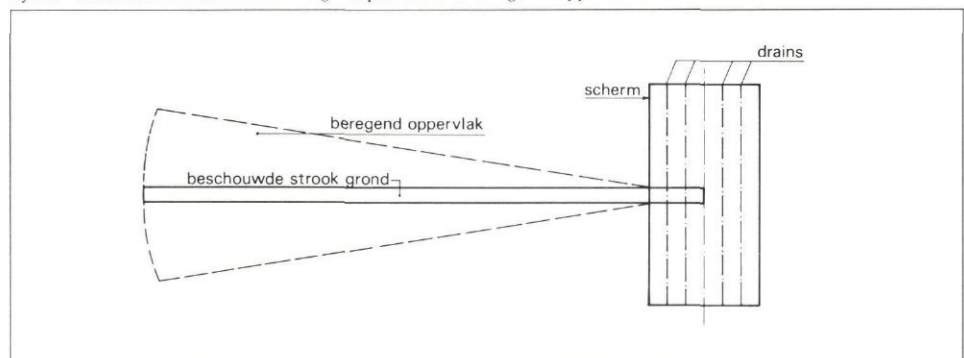
$r$  = afstand van het beschouwde punt tot het scherm (m)

$S$  = afstand van het scherm tot het middelpunt van het cirkelvormig veronderstelde geïsoleerde gebied (m)

Voor de in beschouwing genomen saneringsvariant van het Grietpark heeft  $S$  een waarde van 120 m. Het model is omgezet met de modelgrens op 1.000 m van het scherm. Op de modelgrens is als randvoorwaarde een vaste potentiaal ingevoerd.

De berekeningen tonen een waterscheiding op circa 890 m afstand van het scherm.

Afb. 8 - Relatie tussen het beschouwde grondpakket en het beregende oppervlak.



Deze afstand is uiteraard afhankelijk van de in de berekeningen opgenomen grondwateraanvulling door nuttige neerslag. Deze aanvulling van het grondwater door neerslag is zo goed mogelijk ingeschat, waarbij rekening is gehouden met onder meer de bebouwing van het gebied. Ten aanzien van de grondwateraanvulling is geen verdere gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Het op te pompen debiet is berekend op 4,4 m³/dag per strekkende meter scherm. Deze hoeveelheid wijkt belangrijk af van de berekeningen zonder neerslag. Een en ander is weergegeven in tabel I.

TABEL I - Vergelijking berekeningsresultaten.

Tweedimensionale benadering	
Afstand scherm-modelgrens (m)	Op te pompen debiet m³ / (dag * m' scherm)
I 150	7,77
II 310	5,88
III 470	4,73
IV 1.000	2,89

} zie afb. 6

Quasi-driedimensionale benadering met neerslag	
Afstand scherm-modelgrens (m)	Op te pompen debiet m³ / (dag * m' scherm)
1.000 *	4,4

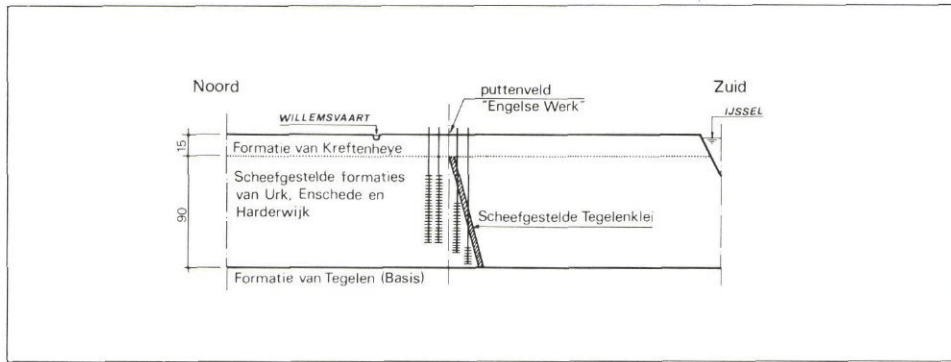
\* waterscheiding berekend op 890 m afstand van het scherm.

Het bovenstaande toont aan dat vuistregels met grote voorzichtigheid gehanteerd moeten worden. Het inzicht in de mogelijkheden van spreadsheetmodellen, dat met deze studie is verkregen, is gebruikt en nader uitgewerkt in de volgende case-studie.

#### Engelse Werk, Zwolle

Het tweede voorbeeld betreft een berekening in opdracht van Provinciale Waterstaat van Overijssel. Het pompstation 'Engelse Werk' van de Waterleiding Maatschappij Overijssel ligt op een uitloper van het Veluwe stuwwallencomplex. Als gevolg van de stuwings door het landijs zijn een aantal lagen scheef gesteld. Zo vormt de Formatie van Tegelen (klei) de geohydrologische basis van het gebied, maar ook wordt een deel ervan in scheef gestelde positie aan de zuidzijde van het puttenveld teruggevonden. Deze klei-





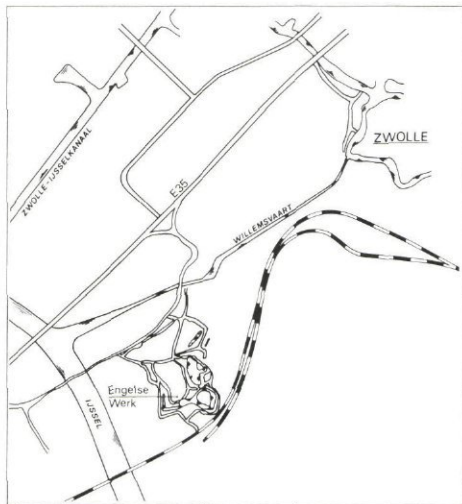
Afb. 9 - Dwarsdoorsnede (Noordwest-Zuidoost).

afzetting wordt geacht licht hellend naar het zuidoosten (hoek circa 20 graden) aanwezig te zijn. Het voornaamste watervoerende pakket bestaat uit de scheefgestelde grofzandige afzettingen van de Formaties van Urk, Enschede en Harderwijk. Op deze scheefgestelde lagen is de Formatie van Kreftenheye afgezet. Deze Formatie vormt het bovenste matig watervoerende pakket. Het puttenveld is deels onder, deels naast de scheefgestelde Tegelenklei gelegen. De geohydrologische opbouw en plaats van het puttenveld staan weergegeven in afb. 9. Binnen de invloedssfeer van het puttenveld ligt op circa 750 m afstand noordwaarts de

Willemsvaart. De berekeningen betreffen een beschrijving van het regionale stromingsbeeld. Dit om de risico's te kunnen inschatten van het toestromen van verontreinigingen uit het bodemslib van de Willemsvaart naar de winmiddelen.

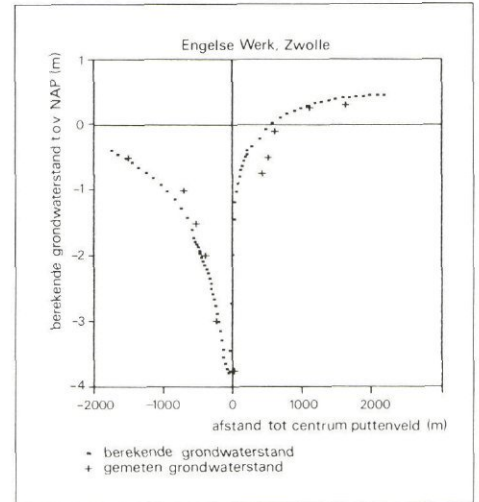
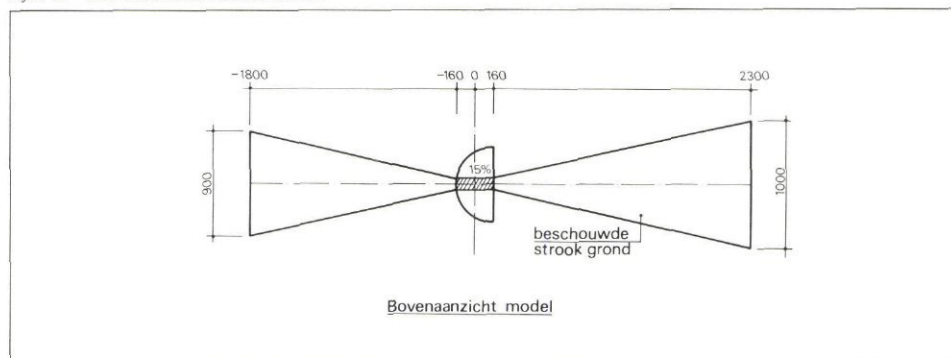
*Het model*

De grondwaterstroming in het hiervoor beschreven grondpakket is moeilijk te simuleren met de klassieke programmatuur. De oorzaak is gelegen in de scheef gestelde lagen. Derhalve werd besloten gebruik te maken van een spreadsheetmodel. Een dergelijk model biedt namelijk de mogelijkheid om per element de geohydrologische parameters te variëren. Met voldoende kleine elementen kunnen schuingestelde slechtdoorlatende lagen op eenvoudige wijze in het model worden ingebracht. Het spreadsheetmodel beschrijft een verticale dwarsdoorsnede over het gebied in de richting noordwest-zuidoost. De randen van het model worden gevormd door de IJssel (zuidoost) en een natuurlijke waterscheiding (noordwest). Op gelijke wijze als hiervoor is beschreven, is de neerslag in het spreadsheetmodel ingevoerd met behulp van een factor *f*. Voorts is het driedimensionale stromingsbeeld benaderd door de breedte van het watervoerende pakket toe te laten nemen met de afstand tot de winmiddelen. Op deze wijze worden de gekromde stroombanen van de toestroming naar het puttenveld gesimuleerd. Afb. 10 geeft een situatieschets.

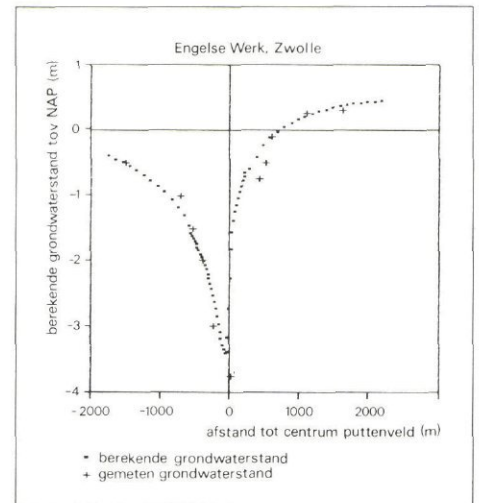


Afb. 10 - Situatieschets Engelse Werk, Zwolle.

Afb. 11 - Bovenaanzicht van het model.



Afb. 12 - De resultaten van de eerste berekening.

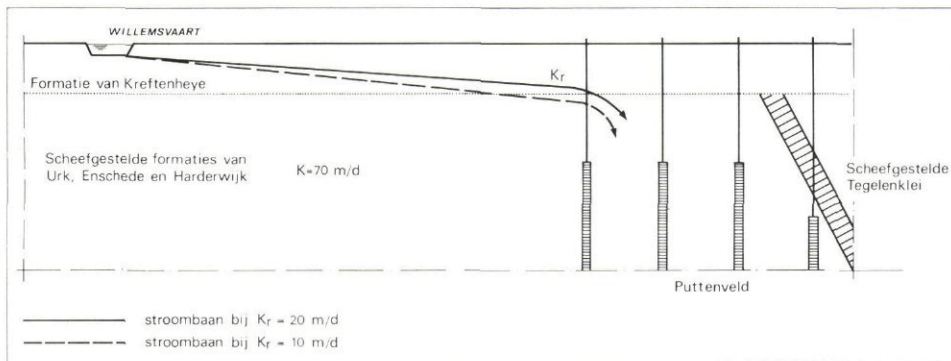


Afb. 13 - De resultaten na parameterafschatting.

Het puttenveld is geschematiseerd tot een halve cirkel. De Tegelenklei vormt namelijk een duidelijke weerstand tegen toestroming van grondwater. Het model is schematisch weergegeven in afb. 11. Met de invoer van het complexe model in het spreadsheetprogramma waren ruim twee dagen gemoeid. Het model beschrijft circa 15% van het onttrekkingsgebied. De onttrekking via de putten in het model is naar evenredigheid gesteld op 15% van de jaarlijkse onttrekking. De grondwaterstroming in de watervoerende pakketten is beschouwd als semi-spanningswater. De ijking van het model vond plaats aan de hand van een isohypsenkaart van de Waterleiding Maatschappij Overijssel.

*De resultaten*

De resultaten van de eerste berekeningen met regionaal en lokaal bekende geohydrologische parameters zijn weergegeven in afb. 12. Er blijkt een redelijke overeenstemming te zijn tussen de gemeten en berekende waarden, zowel wat betreft de verlaging van de grondwaterstand in het



Afb. 14 - Stroomlijn van een waterdeeltje van Willemsvaart naar het puttenveld.

centrum van het puttenveld als de kromming van het verlagingsspatroon in noordwest-zuidoost richting. Door middel van een gevoeligheidsanalyse zijn de geohydrologische parameters nauwkeuriger ingeschat. Verwezen wordt naar afb. 13.

Ten zuiden van het puttenveld bleef echter een niet te corrigeren afwijking bestaan tussen de berekende en gemeten waarden. Later bleek dat deze afwijking het gevolg is van enkele lokale putten in het bovenste watervoerende pakket, welke bij de opstelling van het spreadsheetmodel niet bekend waren en derhalve niet zijn ingebracht. Opgemerkt wordt dat de afb. 12 en 13 direct vanuit de spreadsheet zijn vervaardigd, door gebruik van de grafische faciliteiten van het toegepaste spreadsheetprogramma Lotus 1,2,3.

Het voornoemde model blijkt de regionale grondwaterstroming goed te beschrijven. Aan de hand van de berekeningsresultaten is de looptijd berekend van een waterdeeltje vanuit de sliblaag in de Willemsvaart naar de winmiddelen. Uit afb. 12 blijkt dat de toestroming voornamelijk plaatsvindt door de matig doorlatende Formatie van Kreftenheye. Eerst na jaren breekt het waterdeeltje boven het puttenveld door in de goed doorlatende scheefgestelde Formaties van Urk, Sterksel en Harderwijk. Daarna zal binnen enkele maanden de winmiddelen worden bereikt. Op basis van deze gegevens vond een risico-analyse plaats met betrekking tot verontreiniging van het opgepompte grondwater.

### Tenslotte

Voor de gepresenteerde voorbeelden is gebruikgemaakt van IBM compatibel Corona microcomputers met een intern geheugen van 512 kByte en voorzien van een 8087 floating point processor. Het gebruikte spreadsheetmodel is Lotus 1,2,3. Ter versnelling van het rekenproces is gebruikgemaakt van het programma RECALC+. Uit het bovenstaande moge duidelijk zijn geworden wat de mogelijkheden zijn van spreadsheetmodellen in de geohydrologie. Toepassing dient wel plaats te vinden met

kennis van zaken. Dan vormt de spreadsheetsoftware een welkome aanvulling op de klassieke programmeer- voor grondwaterstroming [lit. 5].

### Literatuur

1. Verruijt, A. (1972). *Solution of transient groundwater flow problems by the finite element method*. Water Resources Research, Vol. 8, No. 3.
2. Verruijt, A. (1970). *Theory of groundwater flow*. Macmillan, London and Basingstoke.
3. Olsthoorn, T. N. (1984). *Modelleren zonder speciale programma's*. H<sub>2</sub>O (17), nr. 3.
4. Huisman, L. *Groundwater Recovery*. Macmillan, London and Basingstoke.
5. Campbell, A. M. (1985). *Discussion of the power of electronic worksheet: modelling without special programs*. Groundwater volume 24, nr. 2, pp. 236-237.



### Hydrologie kwelplassen

- Slot van pagina 57

VEWIN, in het kader van de aan het KIWA opgedragen speurwerkprojecten 'Ecologische aspecten van kunstmatige infiltratie' en 'Kwaliteitsaspecten van kunstmatige infiltratie, door de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL) en door het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiëne (VROM, directie D). Voor de talrijke, nauwgezette wateranalyses en voor hydrologische gegevens zijn beide auteurs de medewerkers van respectievelijk het DWL-laboratorium en de Afdeling Productie van de DWL (met name ir. H. G. de Jonge) zeer erkentelijk. Nuttige kanttekeningen bij het manuscript plaatsten drs. M. A. den Hoed (KIWA N.V.), prof. dr. G. B. Engelen (Vrije Universiteit Amsterdam, Instituut voor Aardwetenschappen) en drs. E. Kisman (Chem. Weekblad).

### Referenties

- Born, S. M.; Smith, S. A. and Stephenson, D. A. (1979). *Hydrogeology of glacial-terrain lakes, with management and planning applications*. J. Hydrol (43), p. 7-43.
- Burian, K. (1971). *Primary production, carbon dioxide exchange and transpiration in Phragmites communis trin: on the lake Neusiedler See, Austria*. Hydrobiologia (12), p. 203-218.

Dijk, H. W. J., van (1979). *Gevolgen van waterwinning door infiltratie op de vegetatie in de duinen*. Rapport aan Min. V & M, Vakgroep Milieubiologie R.U. Leiden, concept.

Dijk, H. W. J., van (1984). *Invloeden van oppervlakte-infiltratie ten behoeve van duinwaterwinning op kruidachtige oevervegetaties*. Diss. LH Wageningen, 240 p.

Dijk, H. W. J., van (1986). *Oppervlakte-infiltratie en neerslagwaterlenzen in de duinen*. H<sub>2</sub>O (19), p. 276-279.

Dijk, H. W. J., van en Bakker, T. W. M. (1984). *Duininfiltratie: invloed op balans en concentraties van voedingsstoffen*. H<sub>2</sub>O (17), p. 597-600.

Dijk, H. W. J. van en Meltzer, J. A. (1981). *Hydrobiologie van natuurlijke duinmeren: een commentaar*. H<sub>2</sub>O (14), p. 563-566.

Engelen, G. B. (1972). *A limnological reconnaissance study of Lago di Braies ('Prager Wildsee'), Dolomites, N. Italy*. Aqua VU (1), 63 p.

Engelen, G. B. (1984). *Hydrological systems analysis. A regional case study*. Arnhem east. Report OS 84-20. TNO-DGV, Delft, 43 p.

Engelen, G. B. and Jones, G. P. (Eds) (1986). *Developments in the analysis of groundwater flow systems*. IAHS-Publ. in druk.

Groot, W. T., de (1984). *Hydrodynamic macro-dispersion as the casual background of the phreatic water type mixing in infiltrated dunes*. Sectie 8.7 (p. 208-212) in H. W. J. van Dijk: 'Invloeden van oppervlakte-infiltratie ten behoeve van duinwaterwinning op kruidachtige oevervegetaties'. Dissertatie LH Wageningen, 240 p.

Hoed, M. A. den, Moberts, F. M. L. en Stuyfzand, P. J. (1986). *Mogelijkheden voor een verschrand maai-beheer in twee typen (ver)nat duinterrein*. KIWA SWE-86.007.

Jonge, H. G., de (1985). *Waterwinning en hydrologie in Meijendel*. Rapport DWL 's-Gravenhage.

Le Baugh, J. W. (1986). *Limnological characteristics of selected lakes in the Nebraska sandhills USA and their relation to chemical characteristics of adjacent groundwater*. Journal of Hydrology, nr. 3-4, p. 279-298.

Stuyfzand, P. J. (1984a). *Effecten van vegetatie en luchtverontreiniging op de grondwaterkwaliteit in kalkrijke duinen bij Castricum: lysimeterwaarnemingen*. H<sub>2</sub>O (17), p. 152-159.

Stuyfzand, P. J. (1984b). *Groundwater quality evolution in the upper aquifer of the coastal dune area of the western Netherlands*. In: Eriksson, E. (ed.); Hydrochemical balances of freshwater systems; Proceedings of the Uppsala Symposium september 1984, IAHS Publ. 150, p. 87-98.

Stuyfzand, P. J. (1985). *Hydrochemie en hydrologie van het duingebied tussen Egmond en Wijk aan Zee*. KIWA SWE 85.012, 205 p.

Stuyfzand, P. J. (1986a). *Macroparameters bij duin-infiltratie*. Basisrapport 'Kwaliteitsveranderingen van oppervlaktewater bij kunstmatige infiltratie in de Nederlandse kustduinen: macroparameters' bij 5 deelrapporten (KIWA SWE 366 t/m 370). KIWA Meded. 82, 336 p.

Stuyfzand, P. J. (in voorbereiding). *Hydrochemie en hydrologie van de coastal dune area of the Western Netherlands*. Dissertatie Vrije Univ. Amsterdam.

Stuyfzand, P. J. en Moberts, F. M. L. (1986). *Hydrochemie en hydrologie van drie soorten (ver)nat duinterrein langs Hollands kust*. KIWA SWE-86.006.

Stuyfzand, P. J. en Stuurman, R. J. (1985). *Experimenteel bewijs en modellering van een stationaire regenwaterlens op kunstmatig geïnfilterd oppervlaktewater*. H<sub>2</sub>O (18), p. 408-415.

● ● ●