

Geo-hydrologische modellering van de Duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen Amsterdam

1. Inleiding

In het kader van het geo-hydrologisch onderzoek in de Duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen Amsterdam is gezocht naar een geschikt computer-programma voor het uitvoeren van hydrologische berekeningen in de gehele winplaats. Dit ten behoeve van de optimalisatie van de bedrijfsvoering en ten behoeve van het verkrijgen van gegevens voor een vergunningsaanvraag in het kader van de Grondwaterwet. In dit



IR. J. W. KOOIMAN
Gemeentewaterleidingen,
Amsterdam



IR. M. J. EMKE
Gemeentewaterleidingen,
Amsterdam
(thans: IWACO BV,
Rotterdam)

artikel wordt beschreven hoe op grond van een eisenpakket (paragraaf 2) gekomen is tot de keuze van het reken-programma MODFLOW (paragraaf 3). Na een korte beschrijving van dit programma (paragraaf 4) volgt de ijking van het model (paragraaf 5), en tenslotte wordt een aantal toepassingen getoond (paragraaf 6).

Ter voorkoming van misverstanden zal eerst een verklaring van een aantal termen gegeven worden. Er is sprake van:

- 1. een rekenprogramma;
- 2. de modelparameters; en
- 3. de invoergegevens.

Deze drie tezamen vormen een zogenaamd duinmodel.

Het rekenprogramma is een computer-programma waarin op een bepaalde wijze grondwaterstromingsproblemen worden aangepakt en opgelost. De modelparameters, zoals bijvoorbeeld doorlatendheden, zijn voor een bepaald modelgebied vaste waarden, welke met een ijking worden berekend. De invoergegevens, bijvoorbeeld kanaalstanden en hoeveelheid (nuttige) neerslag, verschillen per tijdsperiode en bieden daardoor de mogelijkheid andere situaties door te berekenen.

2. Pakket van eisen

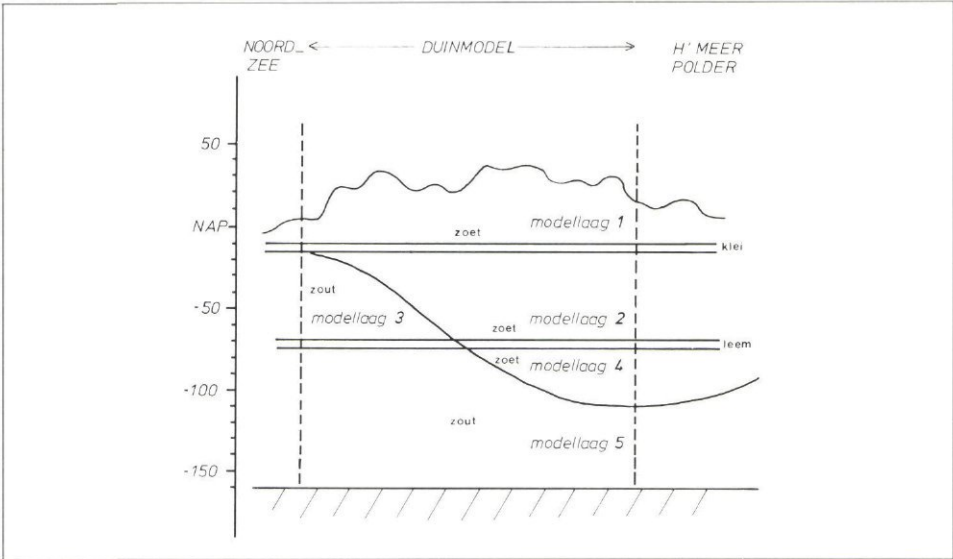
Uit voorgaande onderzoeken [zie onder andere Kooiman, 1983] is reeds een geo-hydrologische schematisatie bekend, waarvan afb. 1 een verticale dwars-

Samenvatting

Voor het geo-hydrologisch rekenwerk in de Duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen Amsterdam is gezocht naar een geschikt computer-programma. Op grond van de bekende geo-hydrologische situatie en de doelstellingen van het onderzoek is een pakket van eisen opgesteld. Hiermee zijn tien rekenprogramma's vergeleken, waarna de keuze viel op het programma MODFLOW van McDonald en Harbaugh. Voor- en nabewerkingsprogramma's zijn in eigen beheer ontwikkeld. De ijking van het duinmodel is uitgevoerd voor drie qua neerslag en winning verschillende jaren. Gezien de grove schematisatie (celoppervlak 200 bij 200 meter) is het niet mogelijk exacte grondwaterstanden in beperkte gebieden te berekenen. Met het gekijkte model kunnen de gevolgen worden uitgerekend van een verhoogde winning en van ernstige calamiteitssituaties (30 dagen inlaatstop).

doorsnede toont. Uitgaande van de schematisatie en van de genoemde doelstellingen voor het modelonderzoek is het onderstaande pakket van eisen opgesteld waaraan het te selecteren reken-programma moet voldoen.

- 1. Het aantal watervoerende lagen moet minimaal drie zijn;
- 2. In het freatische pakket moet een stelsel van waterlopen (infiltratiegeulen, winningskanalen) aangebracht kunnen worden;

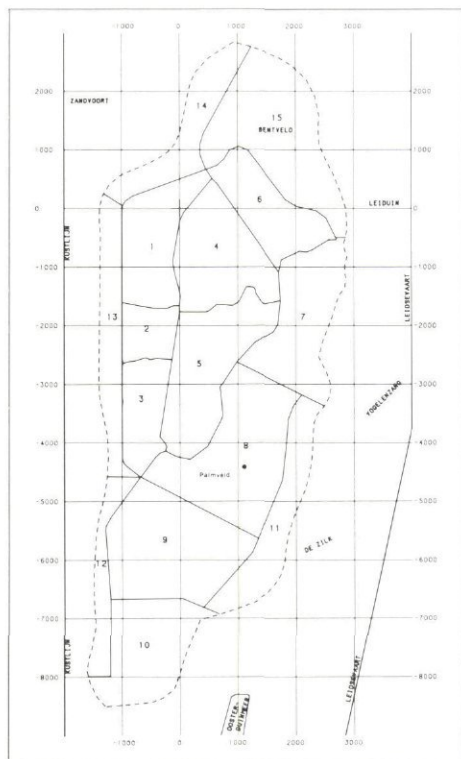


Afb. 1 - Verticale doorsnede Duinwaterwinplaats.

TABEL I - Vergelijking rekenprogramma's

rekenprogramma's	F	G	G	M	P	S	T	T	T	T
	E	E	R	O	L	T	R	R	R	R
	M	L	O	D	A	A	A	I	I	I
	S	G	M	F	S	T	N	N	S	W
	A	A	U	L	M	R	S	S	T	A
	T	M	L	O		E	R			C
eisen			A	W		C	E			O
						T	C			
							T			
1. aantal watervoerende lagen	>3	3	>3	>3	1	2	2	>3	>3	>3
2. freatisch	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+
3. verzadigd/onverzadigd	+/-	+/+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
4. stationair/niet-stationair	-/+	+/-	+/+	+/+	+/+	+/+	-/+	-/+	+/+	+/+
5. diepe pakket	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
6. aanpassingen voor zoet/zout	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
7. anisotropie	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+
8. documentatie	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9. hulpprogramma's	0	0	+	-	0	-	-	-	-	+
10. verkrijgbaarheid	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
11. aanschaffkosten	+	0	0	+	+	+	+	+	+	-

+ = positief; - = negatief; 0 = onbekend



Afb. 2 - Kaart van het modelgebied.
De gestippelde lijn is de globale grens van het intrekgebied in het freatische pakket.

3. Onverzadigde stroming hoeft niet opgenomen te zijn, vanwege de grote hoeveelheid daarvoor noodzakelijke, maar niet beschikbare gegevens;
4. Zowel stationaire als niet-stationaire situaties moeten doorgerekend kunnen worden;
5. Ontrekkingen en infiltraties in diepe pakketten moeten aangebracht kunnen worden;
6. Berekeningen aan zoet, brak en zout water worden vanwege de complexiteit in eerste instantie achterwege gelaten. Wel moet de mogelijkheid aanwezig zijn het programma voor dit soort berekeningen uit te breiden.

3. Programmakeuze

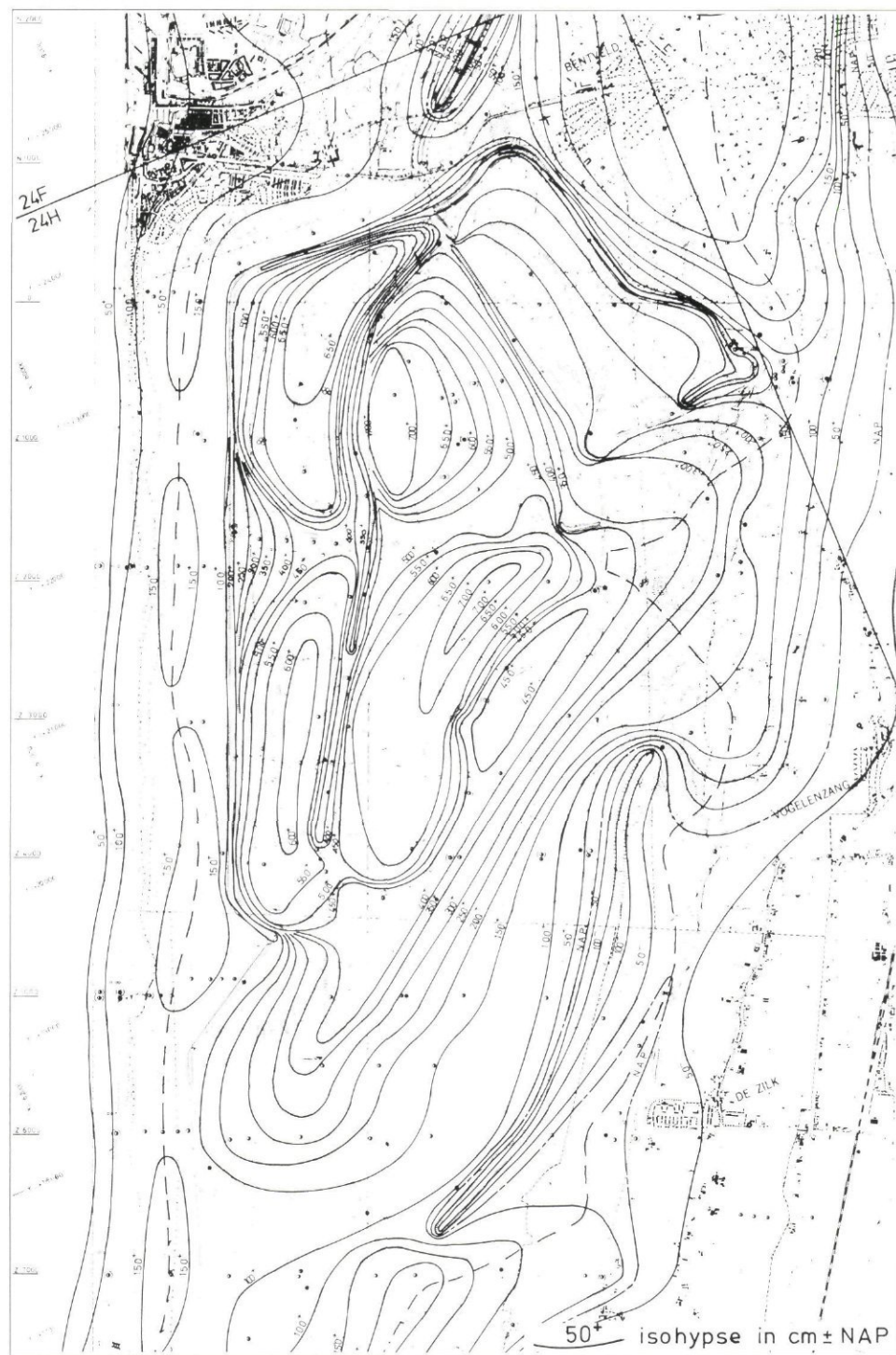
Om tot een goede keuze te komen zijn tien programma's met elkaar vergeleken. Alle programma's zijn gebaseerd op de eindige elementenmethode dan wel de eindige-differentiemethode [Emke, 1987]. In tabel I is de uitkomst van het vergelijkingsonderzoek samengevat.

Uitgaande van de eisen 1 (watervoerende lagen) en 4 (stationair/niet-stationair) bleven de programma's GROMULA, MODFLOW en TRIWACO over. GROMULA was moeilijk verkrijgbaar, zodat de keuze uiteindelijk ging tussen MODFLOW en TRIWACO, twee gelijkwaardige, goed gedocumenteerde en een-

voudig aan te schaffen rekenprogramma's. De aanschaffkosten van TRIWACO zouden wel veel hoger zijn dan van MODFLOW omdat hulpprogramma's voor voor- en nabewerking werden bijgeleverd en ondersteuning vanuit het bureau IWACO zou plaatsvinden. Bij MODFLOW werd slechts het rekenprogramma geleverd zonder verder enige service. Wel was kennisuitwisseling mogelijk met het onderzoeksinstituut van

de waterleidingbedrijven, het KIWA, waar ook met dit programma gewerkt werd. Dankzij deze mogelijkheid kon worden gekozen voor het goedkopere programma MODFLOW. De benodigde hulpprogramma's zouden zelf, in het kader van een afstudeerscriptie, worden ontwikkeld [Emke, 1986, 1988]. Sindsdien, het was toen eind 1985, zijn er ook voor MODFLOW hulpprogramma's op de markt gekomen, en is de prijs van

Afb. 3 - Handmatig bepaalde isohypsenkaart van het freatische pakket, december 1981.
Standen in centimeters ten opzichte van NAP.



TRIWACO gezakt. Hierdoor zou op dit moment wellicht een andere beslissing genomen worden.

4. **Programma MODFLOW**

MODFLOW is ontwikkeld bij het US Geological Survey [M. G. McDonald en A. W. Harbaugh, 1984]. Het is een modulaair opgezet computerprogramma dat gebruik maakt van de eindige-differentiemethode om tot een oplossing van een driedimensionaal grondwaterstromingsprobleem te komen.

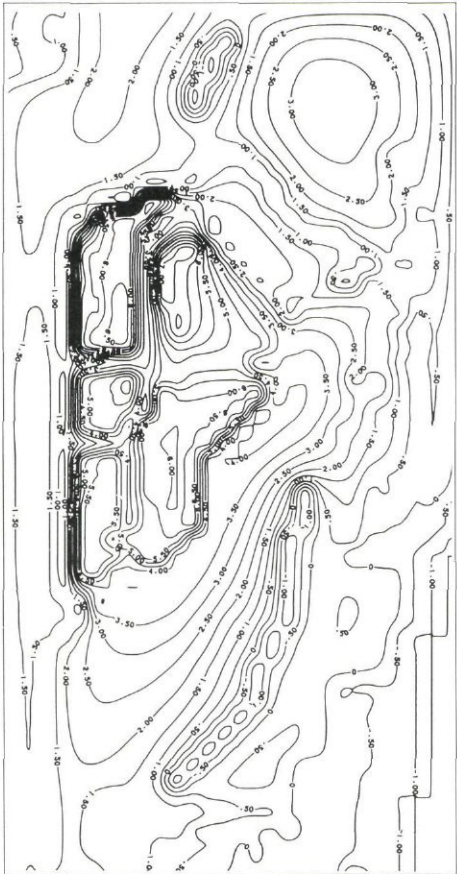
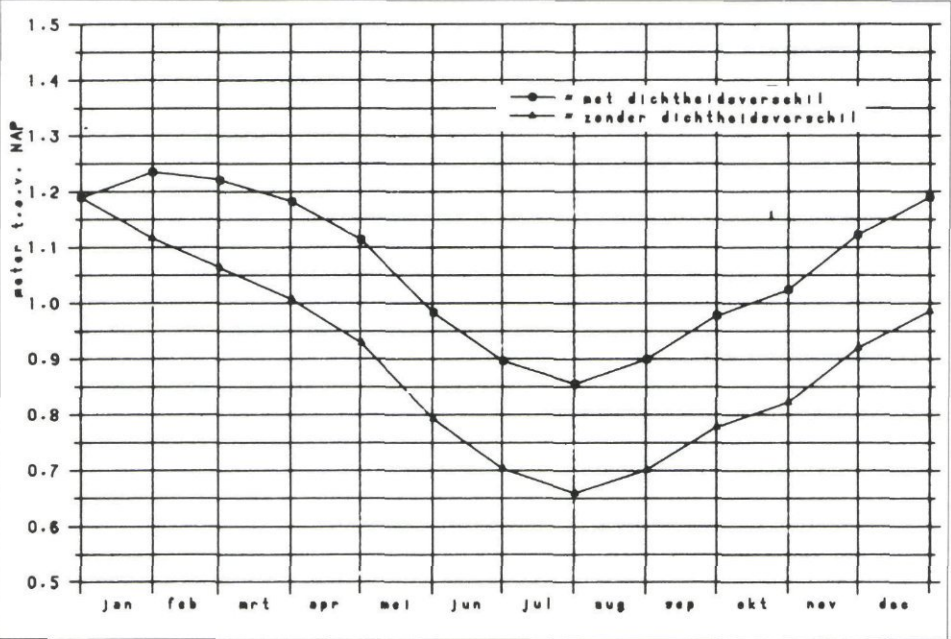
Het programma is modulaair genoemd omdat verschillende modules al dan niet gebruikt kunnen worden.

Bijvoorbeeld: het wel of niet aanwezig zijn van putten in het modelgebied vereist ook het wel of niet kunnen gebruiken van de puttenmodule in het rekenprogramma. De volgende modules zijn beschikbaar:

- 1. put met vast debiet;
- 2. onttrekking door middel van drains;
- 3. onttrekking of infiltratie met kanalen en rivieren;
- 4. externe toevoeren afhankelijk van de stijghoogte;
- 5. neerslag;
- en 6. evapotranspiratie.

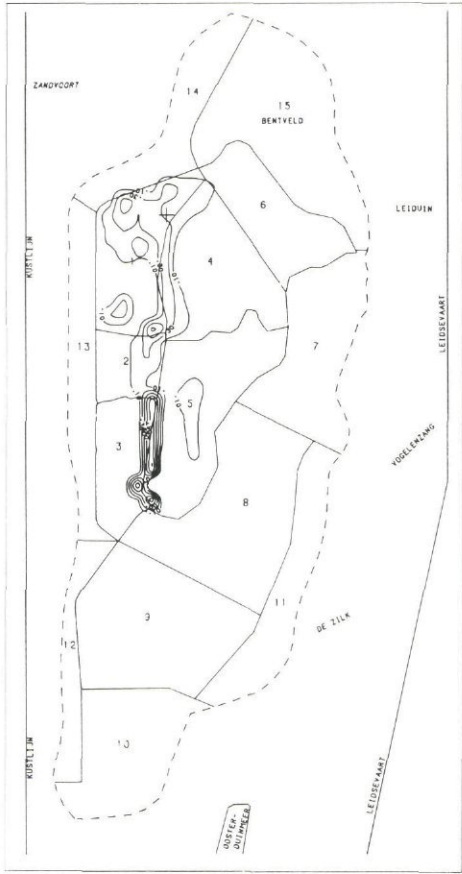
Het te modelleren gebied dient te worden opgedeeld in een groot aantal cellen, zowel horizontaal als verticaal, welke tezamen het totale modelgebied vormen. In elke cel wordt een stijghoogte berekend. Zijn deze bekend, dan kunnen ook debiettermen berekend worden, waarmee waterbalansen opgesteld kunnen worden.

Afb. 5 - Stijghoogtes in het freatische pakket, berekend met en zonder dichtheidsverschillen. Standen in meters ten opzichte van NAP.



Afb. 4 - Met MODFLOW berekende isohypsenkaart van het freatische pakket, december 1981. Standen in meters ten opzichte van NAP.

In MODFLOW wordt geen rekening gehouden met dichtheidsverschillen in het grondwater. In de Duinwaterwinplaats treden deze wel op, waardoor verschillen



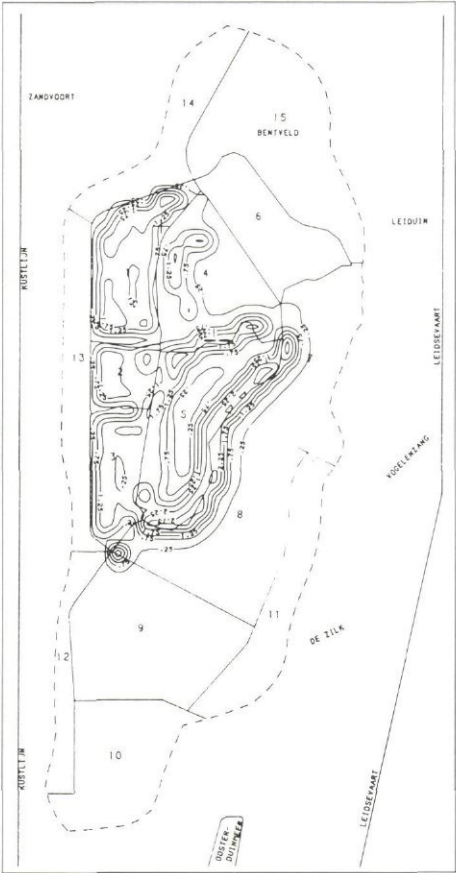
Afb. 6 - Verschilkaart van freatische waterstanden tussen '77 miljoen' en '60 miljoen' aan het eind van een jaar, in meters.

kunnen optreden tussen berekende en gemeten stijghoogten tot in de orde van grootte van decimeters, ook in het freatische pakket. Daarom is een methode ontwikkeld die het effect van de aanwezigheid van een zoet-zout-grensvlak op de stijghoogten berekent [Maas en Emke, dit nummer; Emke en Maas, 1988b]. Voor het toepassen van deze methode is het noodzakelijk dat elke watervoerende laag waarin zich een grensvlak bevindt uit twee modellen (een 'zoete' en een 'zoute') bestaat (zie ook afb. 1). Inmiddels is bij het KIWA een methode ontwikkeld om tevens een stromingsbeeld van het modelgebied te verkrijgen. Testberekeningen zijn onder andere uitgevoerd met het in dit artikel beschreven duingebied [Boukes, dit nummer].

5. **Ijking van het duinmodel**

Het doel van de ijking is het bepalen van de modelparameters (zie paragraaf 1). Dit gebeurt met de gegevens van drie qua neerslag en winning verschillende jaren: 1976 (lage neerslag; hoge winning), 1981 (hoge neerslag; lage winning) en 1984 (gemiddelde neerslag; lage winning).

Voor het vergelijken van de huidige en de



Afb. 7 - Verschilkaart van freatische waterstanden tussen 'april calamiteit' en '77 miljoen' aan het eind van de maand april, in meters.

met MODFLOW berekende waarden zijn de volgende ijkparameters gebruikt:

1. waterbalansen;
2. isohypsenkaarten aan het eind van elk jaar voor freatische en diepe pakket;
3. gemiddelde stijghoogtes van het intrekgebied (zie afb. 2) in freatische en diepe pakket aan het eind van elk jaar.

Het modelgebied heeft een oppervlakte van 75,6 vierkante kilometer en bestaat horizontaal uit 1891 cellen (61 rijen; 31 kolommen) van elk 200 meter bij 200 meter (zie afb. 2). In verticale richting is het modelgebied opgebouwd uit vijf modellagen, waarmee het totale aantal cellen op 9455 komt. De lagen 1, 2 en 4 bevatten zoet water, de lagen 3 en 5 zout (dichtheid 1020 kg/m³).

Van de drie genoemde ijkjaren zijn de volgende invoergegevens (zie paragraaf 1) gebruikt:

1. waterstanden in infiltratiegeulen;
2. stijghoogten in drains;
3. waterstanden in kanalen;
4. nuttige neerslag; en
5. diepe winning (in laag 2).

Voorts zijn startwaarden uit gemeten stijghoogtes bekend, en is de positie van het

scherpe zoet-zout-grensvlak behaald. Dit grensvlak verplaatst niet gedurende de berekeningen [zie Maas en Emke, dit nummer]. Het verloop en de uitkomsten van de ijk-berekeningen zijn uitgebreid beschreven in Emke en Kooiman, 1988a. Een indruk daarvan wordt gegeven in de afb. 3, 4 en 5 en de tabellen II en III.

In tabel II is te zien dat er een goede overeenkomst bestaat tussen de waterbalansen zoals die tot nu toe werden berekend en de met MODFLOW berekende waterbalansen. Voor de meeste termen zijn de verschillen niet groter dan enkele procenten, hetgeen gezien de grove schematisatie een goed resultaat genoemd kan worden. De lek naar de kleilaag is systematisch aan de hoge kant (circa 10%), en het berekenen van de berging in het freatische pakket voert in absolute zin tot beperkte, maar in procentuele zin tot aanzienlijke verschillen. Het bijeenprokkelen van de kleine termen uit meer dan 900 cellen geeft door afrondingen gemakkelijk een afwijking van enkele miljoenen kubieke meters. Voor één situatie zijn de handmatig bepaalde en de met MODFLOW berekende isohypsenkaarten gegeven, namelijk het freatische pakket in december 1981 (zie afb. 3 en 4).

Uit een vergelijking van beide kaarten volgt een goede overeenkomst, waarbij te noemen vallen de hoge waterstanden in de infiltratiegebieden (1 tot en met 5) en de lage waterstanden in enkele kanalen.

TABEL II - Waterbalansen van de ijkjaren: berekend met de huidige methode en berekend met MODFLOW. Hoeveelheden in miljoen kubieke meter per jaar.

	1976		1981		1984	
	Huidig	MODFLOW	Huidig	MODFLOW	Huidig	MODFLOW
<i>freatische pakket</i>						
nuttige neerslag	9,97	10,28	20,28	21,35	16,11	15,54
kunstmatische infiltratie	57,79	59,25	44,02	43,50	47,34	46,24
totaal	67,76	69,53	64,30	64,85	63,45	61,78
onttrekking	63,84	61,96	55,22	53,74	53,85	53,01
lek naar kleilaag	7,20	7,88	6,75	7,40	7,00	7,81
berging	-3,28	-0,31	2,33	3,71	2,60	0,90
totaal	67,76	69,53	64,30	64,85	63,45	61,71
<i>diepe pakket</i>						
lek uit kleilaag	7,20	7,88	6,75	7,40	7,00	7,81
diepe winning	5,86	5,78	0,48	0,45	1,99	2,08
afstroming en berging	1,34	2,10	6,27	6,95	5,01	5,73

TABEL III - Gemiddelde stijghoogtes in het intrekgebied, berekend met de huidige methode en berekend met MODFLOW, in meters ten opzichte van NAP.

	Freatische pakket		Diepe pakket	
	Huidig	MODFLOW	Huidig	MODFLOW
1976	2,11	2,10	-0,59	-0,55
1981	2,66	2,54	0,34	0,44
1984	2,64	2,45	0,37	0,31

Het stijghoogteniveau kan plaatselijk wat afwijken, wat gezien de grove schematisatie niet verwonderlijk is. De gemiddelde stijghoogtes van het intrekgebied zijn gegeven in tabel III. Optredende verschillen worden vaak veroorzaakt door relatief kleine verschillen in de isohypsenkaarten.

Afbeelding 5 laat zien dat het verwaarlozen van dichtheidsverschillen in dit model tot afwijkingen van enkele decimeters in de waterstand in het freatische pakket kan leiden. Uitgaande van eenzelfde startwaarde wordt dit verschil na ongeveer een half jaar bereikt, waarna het constant blijft. Met de hierboven genoemde ijkjaren zijn de modelparameters voor het duingebied voldoende nauwkeurig bekend. Moeilijkheden bij de ijkjaren waren voornamelijk het gevolg van de grove schematisatie, met name in het freatische pakket.

6. Toepassingen

Met het in de vorige paragraaf geijkte model kunnen velerlei situaties nagerekend of gesimuleerd worden, zoals de gevolgen van het variëren van de winning en de gevolgen van calamiteits-situaties (gestaakte toevoer rivierwater), maar ook kleinere ingrepen in de bedrijfsvoering. In deze paragraaf wordt een aantal voorbeelden getoond van berekeningen die relevant kunnen zijn voor een vergunningsaanvraag. Het gaat daarbij met name om de invloeden op de freatische grondwaterstanden in

verschillende omstandigheden. Daartoe is een aantal modellen doorgerekend: twee onttrekkings- en één calamiteitsmodel. In het '60 miljoen model' bedraagt het onttrekkingsniveau 60 miljoen kubieke meter per jaar. In het '77 miljoen model' wordt het niveau verhoogd tot 77 miljoen kubieke meter per jaar. Met het 'april calamiteitsmodel' worden de gevolgen van een inlaatstop gedurende de maand april berekend in het '77 miljoen model'. Deze maand is gekozen in verband met de in die tijd belangrijke vegetatie-ontwikkeling, welke zich in een gevoelige periode bevindt voor plotselinge grondwaterstandswisselingen. De resultaten zijn gegeven in de afbeeldingen 6 en 7. Hierbij dient bedacht te worden dat de absolute niveaus van de berekende waterstanden minder relevant zijn dan de verschillen in waterstanden tussen twee modellen. Naast het berekenen van isohypsenkaarten zoals in afbeelding 4 gegeven, bieden de hulp-programma's ook de mogelijkheid om verschillen tussen twee situaties weer te geven.

Afbeelding 6 geeft het verschil in freatische waterstand tussen '77 miljoen' en '60 miljoen' aan het eind van een jaar. Hieruit blijkt dat de gevolgen van de verhoging van de winning beperkt blijven tot de infiltratiegebieden 1 tot en met 5. Het verschil in freatische waterstand tussen 'aprilcalamiteit' en '77 miljoen' aan het eind van de maand april is gegeven in afb. 7, waaruit volgt dat in calamiteits-situaties tijdelijk ook stijghoogte-veranderingen optreden buiten de infiltratiegebieden. Daarnaast kan tevens het verloop van de grondwaterstand in een cel of in een deelgebied in beeld worden gebracht, zoals dat in afbeelding 5 is gedaan.

7. Conclusies

- Het is mogelijk gebleken een duinmodel te iken met gegevens van drie verschillende jaren, ondanks een toch wel grove schematisatie.
- Met het doorrekenen van verschillende modellen kan een indruk verkregen worden van de (richting van de) veranderingen die op kunnen treden. Het is niet mogelijk exacte grondwaterstanden te berekenen bijvoorbeeld in ecologisch waardevolle gebieden welke slechts een beperkte omvang hebben. De schematisatie in cellen van 200 bij 200 meter laat dit niet toe.
- Uit de berekeningen met het duinmodel volgt dat de gevolgen van een uitbreiding van de winning beperkt kunnen blijven tot de infiltratiegebieden.

– Een zeer ernstige calamiteit (30 dagen geen kunstmatige infiltratie) in het model met hoge winning heeft ook tijdelijk invloed buiten de infiltratiegebieden. Met het model kan worden berekend hoe op de meest optimale wijze dergelijke situaties opgevangen kunnen worden.

Literatuur

- Boukes, H. (1989). *BOUFILO, een stromingsmodel aan de hand van balansen*, dit nummer.
- Emke, M. J. (1986). *Het programma MODFLOW bij Gemeentewaterleidingen*, afstudeerscriptie LU Wageningen.
- Emke, M. J. (1987). *De keuze, de werking en de eerste resultaten van een geo-hydrologisch rekenmodel voor de Duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen*, afstudeerscriptie LU Wageningen.
- Emke, M. J. (1988). *Handleiding bij het gebruik van MODFLOW en voor- en nabewerkingsprogramma's*, rapport Gemeentewaterleidingen.
- Emke, M. J. en Kooiman, J. W. (1988a). *De Duinwaterwinplaats, geohydrologisch gemodelleerd met het rekenprogramma MODFLOW*, rapport Gemeentewaterleidingen.
- Emke, M. J. en Maas, C. (1988b). *Aanpassing voor het rekenprogramma MODFLOW bij modellering van grondwater met verschillende dichtheden*, rapport Gemeentewaterleidingen/KIWA, versijnt binnenkort.
- Kooiman, J. W. (1983). *Inventarisatie van onderzoek naar de grootte van de geo-hydrologische constanten in de Duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen*, rapport Gemeentewaterleidingen.
- Maas, C. en Emke, M. J. (1989). *Het oplossen van regionale zoet/zout-problemen met een gewoon grondwatermodel*, dit nummer.
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1984). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, U.S. Geological Survey, Virginia.

• • •

Regionale zoet/zout problemen

- *Vervolg van pagina 80.*

Water Intrusion Meeting te Gent in 1988. Omdat beide evenementen een geselecteerd publiek trekken, leek het zinvol om de methode ook in dit tijdschrift te beschrijven.

Referenties

- Josselin de Jong, G., de, 1969. *Generating functions in the theory of flow through porous media*, in: R. J. M. de Wiest (red.), *Flow through porous media*, Academic Press, New York, N.Y., 377-400.
- Knudsen, W. C., 1962. *Equations of fluid flow through porous media - incompressible fluids of varying density*, J. Geophys. Res. 67, 733-737.
- Kooiman, J. W. en Emke, M. J., 1989. *Geo-hydrologische modellering van de duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen Amsterdam*. Deze aflevering van H₂O.
- McDonald, M. G. en Harbaugh, A. W., 1984. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water model*, U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Olsthoorn, Th., N., 1987. *Mondelinge communicatie gedurende de PATO cursus Grondwaterwinning en Kunstmatige Aanvulling van Grondwater te Delft*.
- Santing, G., 1980. *Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correctie op de stijghoogten*, H₂O 13, 1980, 544-548.

• • •

Waterkwaliteit en kustontwikkeling in de delta's van Rijn en Rhône

Het Instituut voor Ruimtelijk onderzoek (IRO) van de Rijksuniversiteit Utrecht organiseert in het kader van de Europese samenwerking met betrekking tot het onderzoek van delta's op 24 februari 1989 een symposium waarop de waterkwaliteit en de kustontwikkeling in de delta's van Rijn en Rhône met elkaar zullen worden vergeleken.

De ochtend zal in het teken staan van het waterkwaliteitsonderzoek in de Rijn en Rhône. 's Middags komen de duinontwikkeling en het zandtransport langs de kust aan de orde.

Dagleiders zijn Prof. Dr. H. Golterman en Prof. Dr. J. H. J. Terwindt.

Het symposium wordt gehouden in zaal 311, transitorium II, Heiderberglaan 2, Utrecht, aanvang: 9.30 uur.

Programma en verdere inlichtingen:

Mevr. M. van der Linden

Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen

Postbus 80.115, 3508 TC Utrecht

Telefoon 030 - 53 20 44

Waterleiding van 3,2 miljard dollar in Libië

Libië bouwt een enorme waterleiding om zijn kuststreken te voorzien van drinkwater uit grote ondergrondse reservoirs in de Sahara. De Libische leider Gaddafi heeft het project nationale prioriteit gegeven en het 'de grote kunstmatige rivier' gedoopt.

De tweede fase van het project houdt de bouw in van een achthonderd km lange leiding naar Tripoli, waarvan de bouwkosten worden geschat op 3,2 miljard dollar. Indische, Zuidkoreaanse en Franse bouwbedrijven zijn in de race voor het contract. De eerste fase van het project behelsde de aanleg van een leiding van duizend km lengte naar Benghazi. Dat contract werd toegewezen aan de Zuidkoreaanse groep Dong Ah.

De Franse televisie heeft gemeld dat een Frans consortium met GTM, Dumez en een dochteronderneming van Compagnie Generale des Eaux het contract waarschijnlijk zal krijgen. Een vertegenwoordiger van GTM heeft laten weten dat zijn bedrijf er nog geen enkele indicatie over heeft dat het contract naar Frankrijk gaat. (Reuter, ANP)