

R.I.D.-MEDEDELING 74-7

**VERLAGINGEN VAN HET FREATISCH
VLAK BIJ GRONDWATERONTTREKKING
IN EEN GEBIED MET VRIJE AFWATERING
Drs. J. BLOM.**

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Mededelingen van het Instituut zijn geen officiële publicaties, maar zijn bedoeld als interne communicatiemiddelen.

Aangezien echter ook anderen veelal intensieve medewerking verlenen aan de arbeid inzake vraagstukken die, direct of indirect, verband houden met de drinkwatervoorziening, is het wenselijk hen zo vroeg en zo volledig mogelijk in te lichten van de bevindingen op het R.I.D.

Bovendien is het nuttig degenen die nauw betrokken zijn bij de vraagstukken voor welke behandeling het Rijksinstituut door verkregen kennis en ervaring hulp kan verlenen, op de hoogte te houden van de ontwikkelingen op het Instituut.

Nadrukkelijk zij gesteld dat in vele gevallen de conclusies van voorlopige aard zullen zijn, omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

De inhoud van de mededelingen kan betrekking hebben op alle facetten van het terrein waarop het R.I.D. werkzaam is.



27 OKT. 1975

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT

PHYSICS 311

LECTURE 1

LECTURE 2

LECTURE 3

LECTURE 4

LECTURE 5

LECTURE 6

LECTURE 7

LECTURE 8

LECTURE 9

LECTURE 10

LECTURE 11

LECTURE 12

LECTURE 13

LECTURE 14

LECTURE 15

LECTURE 16

LECTURE 17

LECTURE 18

LECTURE 19

LECTURE 20

LECTURE 21

LECTURE 22

LECTURE 23

LECTURE 24

LECTURE 25

LECTURE 26

LECTURE 27

LECTURE 28

LECTURE 29

LECTURE 30

EEN METHODE OM VERLAGINGEN
VAN HET FREATISCH VLAK TEN
GEVOLGE VAN EEN GRONDWATER-
ONTTREKKING TE VOORSPELLEN
IN EEN GEBIED MET VRIJE AF-
WATERING. (DRENTHE).

J. Blom

Rijksinstituut
voor
Drinkwatervoorziening
1973

1. INLEIDING

Een van de belangrijkste aspecten van geohydrologische studies betreft het op juiste wijze berekenen van de te verwachten potentiaalverlagingen van het grondwater in de verschillende watervoerende pakketten ten gevolge van een ingreep in de bestaande waterhuishoudkundige toestand, zoals b.v. een nieuwe grondwateronttrekking.

Een juiste berekening van deze potentiaalverlagingen is vooral nodig voor de studie van het volgende drietal onderwerpen.

- a) Potentiaalverlagingen bepalen wat voor gevolgen een nieuwe grondwateronttrekking voor andere belangen heeft. Hierbij kan b.v. gedacht worden aan 1) schade of winst voor land- en bosbouwbelangen, 2) verbeteringen in de waterhuishoudkundige toestand door afname van ongunstige kwel, 3) zettingen van slappe lagen met zijn gevolgen voor funderingen, 4) afname van de droogweerafvoer van beken, enz.
- b) Potentiaalverlagingen in de watervoerende pakketten kunnen invloed hebben op het evenwicht dat in vele delen van Nederland bestaat tussen het zoete grondwater en het daaronder gelegen brakke en zoute grondwater. De potentiaalverlagingen kunnen tengevolge hebben dat een grondwaterstroming optreedt naar het onttrekkingspunt, ook in de diepere aardlagen die met zout water zijn gevuld, en dat het isostatisch evenwicht tussen zoet en zout grondwater wordt verstoord.
- c) De kennis van de te verwachten potentiaalverlagingen zijn voorts van belang voor het technisch ontwerp van grondwaterwinningsmiddelen en voor de studie van waterhuishoudkundige maatregelen om ontoelaatbare verlagingen te voorkomen.

In het kader van het regionale geohydrologische onderzoek in Drenthe werd dan ook veel aandacht besteed aan de toetsing van de bestaande berekeningsmethoden in dit gebied en aan de ontwikkeling van nieuwe berekeningswijzen.

2. GEOHYDROLOGISCHE LANDSCHAPSTYPES

Voor de berekening van grondwaterstandsverlagingen ten gevolge van grondwateronttrekking is het nodig om naast de geologische opbouw van de bodem en de geohydrologische bodemconstanten van de aardlagen ook de randvoorwaarden met betrekking tot de voeding van het grondwaterstroomveld te kennen. Het onttrokken water moet tenslotte ergens vandaan komen, en vooral bij de meer

en meer voorkomende grote onttrekkingen wordt het de vraag of er nog voldoende water in een gebied aanwezig is om een nieuwe evenwichtstoestand te bereiken tussen onttrekking en aanvulling.

In het deel van Nederland dat bedekt is door Pleistocene en Holocene afzettingen (dit is vrijwel heel Nederland met uitzondering van Zuid-Limburg) kunnen drie hydrologische landschapstypen worden onderscheiden die geleidelijk in elkaar over gaan. Het onderscheid betreft voornamelijk de topografische ligging. Deze ligging heeft n.l. invloed op het afwateringspatroon en het grondwaterniveau, en dit patroon laat zich ruwweg in een drietal klassen verdelen. De grondwaterstroming in iedere klasse kan, uitgaande van één basisdifferentiaalvergelijking, wiskundig worden benaderd, waardoor in het algemeen, ook in het gebruik van wiskundige formules, van drie hoofdtypen kan worden gesproken.

Type 1

1.a. De grondwaterstand ligt diep onder maaiveld (meer dan 1,5 m); er is geen oppervlaktewaterafstroming; alle neerslagoverschot (neerslag minus verdamping) wordt gebruikt voor het in stand houden van de natuurlijke opbolling van het freatisch vlak tussen de grenzen van het stroomveld; er is alleen ondergrondse afstroming naar de grenzen.

Als met een grondwateronttrekking wordt aangevangen, planten de verlagingen zich net zo lang voort (waarbij het onttrokken debiet uit berging afkomstig is) tot een of meer voedende grenzen (open water zoals een rivier, de zee, een polder met vast polderpeil) worden bereikt. Het grondwaterstroomveld wordt hierna geleidelijk stationair en alle voeding zal op den duur van de grenzen komen. Zolang de stroming niet stationair is, zijn ter bepaling van de bodemconstanten, formules zoals ontwikkeld door Theis, Thiem en Boulton, toepasbaar. Zijn de bodemconstanten bekend, dan kunnen voor eenvoudige randvoorwaarden de verlagingen ten tijde van de niet-stationaire stroming worden berekend met de formule van Theis. Wordt een evenwicht tussen onttrekking en voeding bereikt, dan geldt de formule van Dupuit en kunnen voor ingewikkelde gevallen ook met succes modellen van het grondwaterstroomveld worden toegepast, waarbij de volkomen voedende grenzen, met constante grondwaterpotentiaal, worden ingebouwd. Voorbeelden van dit stromingstype zijn te vinden in de hoogste delen van Nederland, zoals b.v. de Veluwe (In Drenthe, zie rapport Gasselte, lit. 1).

1.b. Een komplikatie in dit grondwaterstromingstype treedt op als niet van één freatisch pakket kan worden gesproken maar als één of meer semi-permeabele lagen in de ondergrond voorkomen. Voor de niet-stationaire stroming naar een put in een zodanig pakket is geen formule uit de literatuur bekend. De bodemconstanten kunnen echter, zodra het verhang rondom een onttrekkingspunt konstant is geworden en zolang de verlagingen in het freatische pakket klein blijven t.o.v. de dikte van dit pakket, bepaald worden door een door Vogel afgeleide formule (zie rapport Assen, lit. 15). De verlagingen in geval van stationaire stroming naar een onttrekkingspunt kunnen voor eenvoudige randvoorwaarden worden berekend met behulp van een door Bruggeman afgeleide formule (lit. 15) of met behulp van formules zoals gegeven in lit. 16. Voor meer gekompliceerde randvoorwaarden kunnen weer modellen worden toegepast.

Type 2

Dit type betreft het z.g. Hollandse profiel. Er is zoveel oppervlaktewater dat het peil in het fijnmazige afvoersysteem op constant niveau gehandhaafd kan blijven, hoewel de verlaging van de grondwaterpotentiaal ten gevolge van een grondwaterwinning een voortdurende wegzijging van water uit dit afvoersysteem naar de diepe ondergrond ten gevolge heeft. Vaak is een semi-permeabele kleilaag aanwezig tussen de watervoerende laag waaraan onttrokken wordt en het ondiepe pakket waarin het freatisch vlak en het slootsysteem is gelegen. Deze kleilaag zorgt voor een spreiding van de invloed van een grondwateronttrekking over een groot gebied en hierdoor blijft de wegzijging per oppervlakte-eenheid beperkt en kan gemakkelijk worden aangevuld door toestroming in het goed ontwikkelde slotensysteem waarin het polderpeil constant blijft. Potentiaalverlagingen treden alleen op in het pakket waaruit gewonnen wordt en vrijwel niet in het freatische water. Hoe groter de potentiaaldaling in het diepe pakket, hoe groter de voeding van boven. Deze wegzijging vormt het debiet dat onttrokken wordt. Voorbeelden hiervan zij te vinden in alle poldergebieden met voldoende inlaatmogelijkheden. Toepassing in Drenthe zal vooral gezocht moeten worden in de laagste delen van de provincie met een beheerst peil. Zolang de stroming nog niet stationair is geworden, kunnen de bodemconstanten met behulp van de formules van Hantush worden bepaald. De berekeningen voor stationaire stroming geschieden met de formules van De Glee, Huisman - Kemperman of Bruggeman.

Bij zeer belangrijke onttrekkingen zal het freatisch vlak ook kunnen dalen, hoewel het slootpeil constant wordt gehouden. Er treedt dan uitholling tussen de infiltrerende sloten op. (Voor een berekeningswijze van een dergelijk geval in Drenthe, zie concept-rapport De Groeve, lit. 2).

Type 3

Er is een vrij afwaterend afvoerstelsel met vele sloten en beken, maar zonder beheerst peil zoals in polders. Dit type, dat voorkomt op veel middelhoge gronden in Nederland, vormt een overgang van de zeer hoge gebieden zonder afwatering naar de lage poldergebieden met volkomen beheerste afwatering. In deze gebieden is de oppervlakteafstroming (afvoer) een functie van de grondwaterstanden. Worden de grondwaterstanden verlaagd onder invloed van een winning, dan neemt de afvoer af. De afname van de afvoer is gelijk aan de wegzijging naar het watervoerende pakket waaraan onttrokken wordt, en deze voeding vormt het debiet dat onttrokken wordt. Deze voeding neemt echter niet onbeperkt toe met de potentiaaldaling in het pakket waaraan onttrokken wordt. Daalt nl. de grondwaterstand onder de slootbodem, dan wordt de afvoer nul en heeft de voeding een maximum bereikt. Voor de berekening van grondwaterstandsverlagingen ten gevolge van een onttrekking zijn de randvoorwaarden van het eerste type, nl. een constante grondwaterpotentiaal langs bepaalde, volkomen voedende grenzen, niet geldig, want daarvoor zijn de watergangen te beperkt van omvang en bovendien zo algemeen voorkomend dat het moeilijk is één bepaalde voedende grens vast te stellen. De randvoorwaarde van type twee, nl. een constante grondwaterpotentiaal in de bovenste aardlaag, is niet geldig omdat in die laag het grondwaterpeil onder invloed van een grondwaterwinning wél daalt, de oppervlaktewaterafvoer afneemt en de toevoer via de sloten onvoldoende is om de afname van de afvoer en daarmee de grondwaterstands-daling te compenseren.

Voor dit derde geohydrologische landschapstype is eerst in de laatste paar jaren ten behoeve van het geohydrologisch onderzoek in Drenthe een rekensysteem ontwikkeld. Aangezien over deze methode nog vrijwel geen publicaties bestaan, wordt in de volgende paragraaf de methode kort toegelicht.

3. ANALYTISCHE BEREKENING VAN GRONDWATERSTANDSVERLAGINGEN IN EEN GEBIED MET VRIJE AFVOER.

Om in een geohydrologische situatie zoals beschreven in 2.3 de grondwaterstandsverlagings tengevolge van een grondwateronttrekking te berekenen, zijn reeds vele benaderingswijzen toegepast (Voor een historisch overzicht, zie lit. 3).

Voor Drenthe werd een nieuwe analytische formule afgeleid waarin een lineaire grondwaterstand-afvoerrelatie werd ingevoerd. Deze lineaire relatie dient dan representatief te zijn voor het hele onttrekkingsgebied (Zie rapport Beilen met een lineaire opbolling-afvoerrelatie, lit. 4; zie rapport Ruinerwold met een lineaire grondwaterstand-afvoerrelatie, lit. 5; zie rapport Emmen waarin een lineaire grondwaterstand-afvoerrelatie electrisch werd gesimuleerd, lit. 6).

In werkelijkheid laat de relatie tussen grondwaterstandsverlaging in het gepompte pakket, verlaging van het freatisch vlak en vermindering van de afvoer zich moeilijk analyseren. Als een eerste benadering werd deze relatie echter lineair aangenomen omdat dan een tweetal formules voor de radiale grondwaterstroming naar een put zijn af te leiden, welke de verlaging van het freatisch vlak beschrijven en waarin de grondwaterstand-afvoerrelatie en het feit dat de oppervlaktewaterafvoer nul wordt als het grondwaterpeil onder een bepaald niveau zakt, zijn ingecalculeerd (Zie ook lit. 7). De bepaling van de helling van de grondwaterstand-afvoerlijn is echter niet eenvoudig. Methoden om de grondwaterstanden van één of meer peilbuizen te vergelijken met de afvoeren van een beekgebied zijn minder juist, omdat gegevens van een geheel verschillende orde van grootte worden vergeleken. Peilbuisgegevens zijn puntgegevens en de afvoergegevens hebben betrekking op een zeer groot oppervlak.

Toch levert de berekening met een lineaire grondwaterstand-afvoerrelatie een duidelijke verbetering in de beschrijving van wat werkelijk in zo'n gebied gebeurt, ten opzichte van de formules met vaste randvoorwaarden, zoals beschreven in 2.1 en 2.2, of ten opzichte van de in lit. 3 genoemde benaderingswijzen.

De verlaging van het freatisch vlak om een grondwateronttrekkingspunt binnen een straal R wordt volgens deze nieuwe theorie beschreven door de formule (lit. 4)

$$s_{f_r} = \frac{2,3 Q}{2\pi kD} \log \frac{R}{r} - \frac{a}{4kD} (R^2 - r^2) + s_{f_R} \text{ voor } r < R,$$

waarin

s_{f_r} = verlaging van het freatisch vlak op afstand r van het centrum van de onttrekking (in m),

Q = het onttrokken debiet (in m^3/dag),

kD = de doorlatendheid van de ondergrond (in m^2/dag),

a = het natuurlijke gemiddelde drainagedebiet, ofwel de in het afwateringsstelsel uitstromende natuurlijke grondwaterafvoer uit het gebied minus de oppervlakkige afstroming bij zware regenbuien (in m/dag),

R = de straal om het onttrekkingspunt, waarbinnen het hele drainage-debiet als gevolg van de grondwateronttrekking naar de diepe ondergrond wegzijgt en de sloten droog komen te staan (in m).

Voor het gebied buiten straal R geldt de formule

$$s_{f_r} = \frac{w}{c+w} \cdot \frac{Q_0 - \pi R^2 a}{2\pi kD} \cdot \frac{\lambda_s}{R} \cdot \frac{K_0(r/\lambda_s)}{K_1(R/\lambda_s)} \text{ voor } r > R$$

waarin

w = de drainageweerstand van het gebied, uitgaande van een gemiddelde grondwaterstand in de percelen (in dagen),

c = de verticale weerstand van de semi-permeabele kleilaag die aanwezig kan zijn tussen het ondiepe freatische grondwater en het diepe pakket waaraan onttrokken wordt (in dagen),

λ_s = de schijnbare spreidingslengte $\sqrt{kD(c+w)}$ (in m),

K_0, K_1 = Besselfuncties van de orde nul en één

Voor $r = R$ geeft s_{f_R} juist die grondwaterstandsverlaging weer waarbij de grondwaterafvoer naar het sloot- en beekstelsel nul wordt. s_{f_R} dient afgeleid te worden uit de gemiddelde grondwaterstand onder maaiveld vóór de onttrekking, en uit de gemiddelde diepte van de beek- en slootbodem onder maaiveld. Binnen een straal R zijn de grondwaterstandsdalingen zodanig, dat geen afvoer van grondwater naar de sloten en beken van dit gebied meer plaatsvindt. In het gebied buiten straal R heeft verminderde afvoer plaats.

Nadeel van deze analytische formules, zoals van de meeste analytische formules, is dat ze berusten op de volgende aannamen die soms niet toelaatbaar zijn:

- a) de ondergrond dient homogeen te worden aangenomen,
- b) de verdeling van het drainagedebiet dient homogeen verdeeld over het gebied te worden aangenomen,
- c) de relatie grondwaterstand-afvoer moet lineair worden genomen en constant voor het hele gebied,
- d) de bepaling van s_{fR} is over het algemeen zeer moeilijk en dubieus.

Berekeningen met bovenstaande formules zijn dan ook niet geheel bevredigend. Om deze reden werden enige nieuwe formules ontwikkeld, waarop hieronder nader wordt ingegaan.

4. EEN NIET-LINEAIRE GRONDWATERSTAND-AFVOERRELATIE

Met betrekking tot de onder 3 a t/m d genoemde beperkingen van de analytische formules kan nog het volgende worden opgemerkt.

ad a) Dat de ondergrond niet homogeen is, gaat vooral een rol spelen bij grote onttrekkingen. Deze zullen in het algemeen ook een groot gebied beïnvloeden en de kans op een heterogene opbouw is dan groter dan bij kleine onttrekkingen.

ad b) Het drainagedebiet in een gebied bestaat uit het neerslagoverschot (neerslag minus verdamping), plus de oorspronkelijke kwel of minus de oorspronkelijke wegzijging naar de diepe ondergrond, minus de oppervlakkige afvoer (dit is de afvoer die over de oppervlakte of over de ploegzool tot afstroming komt, zoals b.v. bij zware buien in keileemgebieden).

Een hoog gebied zoals Drenthe bestaat uit een aanéenschakeling van beekdalen, voorzien van een drainagesysteem en met veel afvoer, en van hoge ruggen zonder drainagesysteem en vrijwel zonder afvoer. Daarbij neemt het gebied dat aan het afvoerproces deelneemt, in de loop van de zomer bij dalende grondwaterstanden enigszins af. Verder hebben in de gedraineerde gebieden de terreinen met kwel en zeer ondiepe grondwaterstanden onder maaiveld veel meer afvoer dan de gedraineerde terreinen met diepe grondwaterstanden onder maaiveld.

Hieruit volgt dus wel dat het drainagedebiet in het geheel niet homogeen over een gebied verdeeld is.

ad c) Dat de relatie tussen de stand van het freatisch vlak en de afvoer niet lineair is, kan blijken uit de volgende beschouwing.

Voor bovengenoemde relatie geldt

$$w = \frac{\Delta\varphi}{\Delta a}$$

waarin

φ = stand van het freatisch vlak (in m),

a = afvoer (in m/dag),

w = drainageweerstand (in dagen).

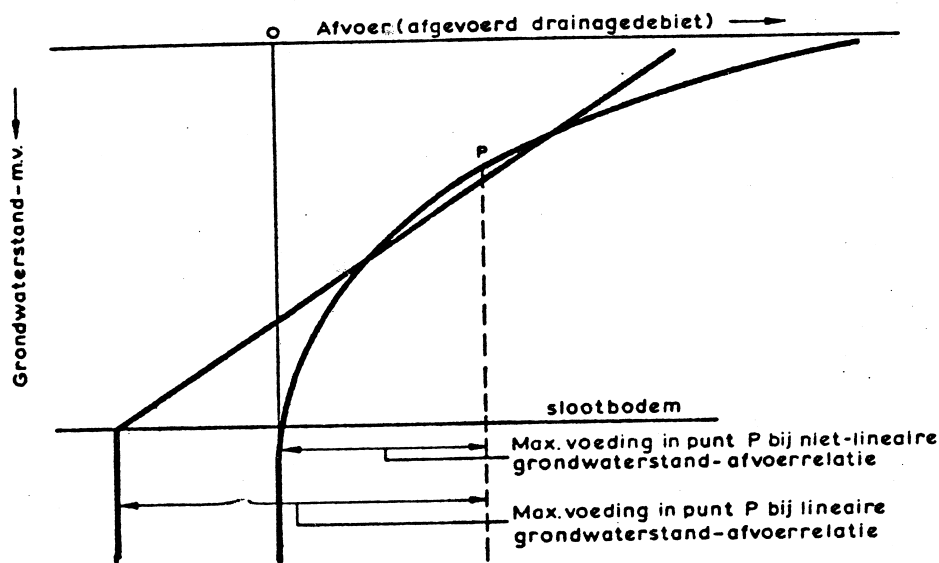
De drainageweerstand bestaat uit een horizontale weerstand ten gevolge van de horizontale stroming in het perceel naar de sloten, een verticale weerstand ten gevolge van een verticale stroming naar de sloten door een eventueel aanwezige semi-permeabele weerstandslaag en uit een radiale weerstand ten gevolge van het samenkomen van de stroomlijnen bij de onvolkomen sloten.

Daalt de grondwaterstand, dan zullen de ondiepste sloten het eerst droogvallen. De afstand tussen de nu nog natte sloten neemt daarmee toe, en dus ook de horizontale weerstand voor de stroming in het bovenste pakket. De radiale weerstand neemt ook toe omdat bij lage waterstand in de sloten het natte profiel vermindert en de stroomlijnen dus sterker gekromd zullen zijn. Daar zowel horizontale als radiale weerstand met afnemende grondwaterstand toenemen blijkt wel dat de drainageweerstand ook moet toenemen met afnemende grondwaterstand, en dat de relatie afvoer-grondwaterstand niet lineair kan zijn.

ad d) Voor s_{fR} kan de grondwaterstandverlaging van het oorspronkelijke freatische oppervlak tot de slootbodem worden aangehouden, maar hiermee kunnen fouten worden gemaakt, daar de grondwaterstandafvoerrelatie in werkelijkheid niet lineair is en bij linearisatie de afvoer nul meestal niet samenvalt met een grondwaterstand op de hoogte van de slootbodem. (Zie fig. 1).

Bovenstaande beschouwingen leiden ertoe om te zoeken naar een niet-lineaire grondwaterstand-afvoerrelatie welke meer met de werkelijkheid overeen komt.

GRONDWATERSTAND- AFVOERRELATIES



Uit verschillende beschouwingen met betrekking tot drainageformules in percelen (lit. 8) en in beekgebieden (lit. 9) kan worden aangenomen dat de relatie grondwaterstand-afvoer beter benaderd wordt door een tak van een parabool dan door een rechte lijn. Het toppunt van deze liggende parabool ligt op een diepte onder maaiveld welke gelijk is aan de gemiddelde diepte van de bodems van de diepe sloten. Zakt het grondwaterpeil onder dit niveau dan wordt de drainageweerstand vrijwel oneindig en wordt de grondwaterstand-afvoerrelatielijn een vertikaal. In gebieden waar enkele zeer diepe watergangen aanwezig zijn, zal deze lijn nooit geheel vertikaal worden; het verloop heeft dan een meer hyperbolische vorm. (Lit. 7 en 10). In de praktijk van het berekenen van grondwaterstandsverlagingen ten gevolge van een grondwateronttrekking is het verband grondwaterstand-afvoer echter wel parabolisch aan te nemen zonder grote fouten te maken. Deze werkwijze heeft het voordeel dat een parabolisch verband op eenvoudige wijze is af te leiden. In het geval dat er zeer diepe, grote waterlopen in het onderzoeksgebied aanwezig zijn, kunnen deze waarschijnlijk in het model worden geprogrammeerd.

Zoals in par. 3 werd beschreven, werd aanvankelijk één lineaire grondwaterstand-afvoerrelatie gebruikt, welke voor het hele onttrekkingsgebied geldigheid had. Nu dient een parabolische relatie te worden afgeleid welke voor het gehele onttrekkingsgebied of voor gedeelten daarvan geldigheid heeft.

De afvoer in een punt wordt als functie van de grondwaterstand t.o.v. een bepaald referentievlak geschreven volgens

$$a = p\varphi^2 + q\varphi + r .$$

Wordt er nu vanuit gegaan dat het drainagesysteem binnen een beekgebied homogeen is, d.w.z. dat er een gelijkmatige verdeling van primaire, secundaire en tertiaire afvoerleidingen is en dat de op de drainage invloed hebbende bodemgesteldheid niet te sterk wisselt binnen het beekgebied, dan kan de relatie tussen de afvoer en de grondwaterstand voor alle punten binnen het drainagesysteem beschouwd worden als te verlopen volgens één voor het hele gebied geldige parabolische relatielijn van bovenstaande vorm. De parameters p , q , en r daarin zijn uitsluitend afhankelijk van de drainerende eigenschappen van het beekgebied.

De grootte van de afvoer in een punt wordt nu volgens de gegeven functie alleen bepaald door de grondwaterstand t.o.v. maaiveld. Deze afvoeren dienen tevoren vastgesteld te worden, daar ze bij een latere berekening van de verlagingen van het freatisch vlak t.g.v. een grondwateronttrekking bepalend zijn voor de voeding die in ieder punt naar het diepe pakket zal wegzingen. Om de parameters p , q en r te bepalen en om de afvoeren per punt te berekenen, wordt gebruik gemaakt van de bekende afvoeren uit stroomgebieden van beken in Drenthe, en van de bekende grondwaterstandsverdeling in deze stroomgebieden.

De afvoeren zijn bekend uit de meetgegevens van de Rijkswaterstaat. Voor de meeste beekgebieden werd in één meetpunt gemeten. De afvoeren kunnen worden gesplitst in een gemiddelde afvoer voor de zomerperiode ($1/6$ t/m $31/8$) en in een gemiddelde afvoer voor de winterperiode ($15/11$ t/m $15/2$). De gemiddelde zomer- en winterafvoeren zijn berekend door sommatie van de maandtotalen over ca 15 jaar (1950-1965).

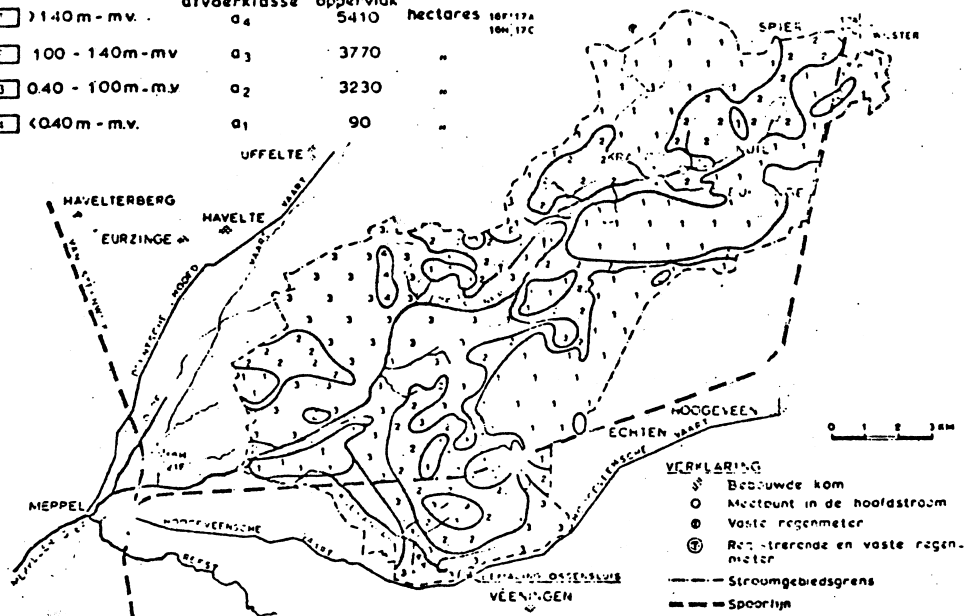
De grondwaterstandsverdeling voor de zomer- en de winterperiode is bekend van de C.O.L.N.-kaarten (lit. 11). Deze waterstanden onder maaiveld stellen eveneens een langjarig gemiddelde voor.

De grondwaterstandsklassen van de C.O.L.N.-kaarten zijn nu hergroepeerd tot 4 nieuwe klassen (Zie fig. 2 en 3). Vervolgens werd voor ieder beekgebied voor zowel de zomer- als de winterperiode het aantal hectaren (0) van een bepaalde grondwaterklasse bepaald en tevens een gemiddelde grondwaterstand per klasse. De verdeling in klassen werd als volgt:

GRONDWATERSTANDEN MINUS MAAVELD

ZOMERTOESTAND (1 juni t/m 31 aug)

	afvoerklasse	oppervlakt	hectares	187-172
1 >140m -mv.	a ₄	5410	"	10m, 17C
2 100 - 140m -mv.	a ₃	3770	"	
3 0.40 - 100m -mv.	a ₂	3230	"	
4 <0.40m -mv.	a ₁	90	"	



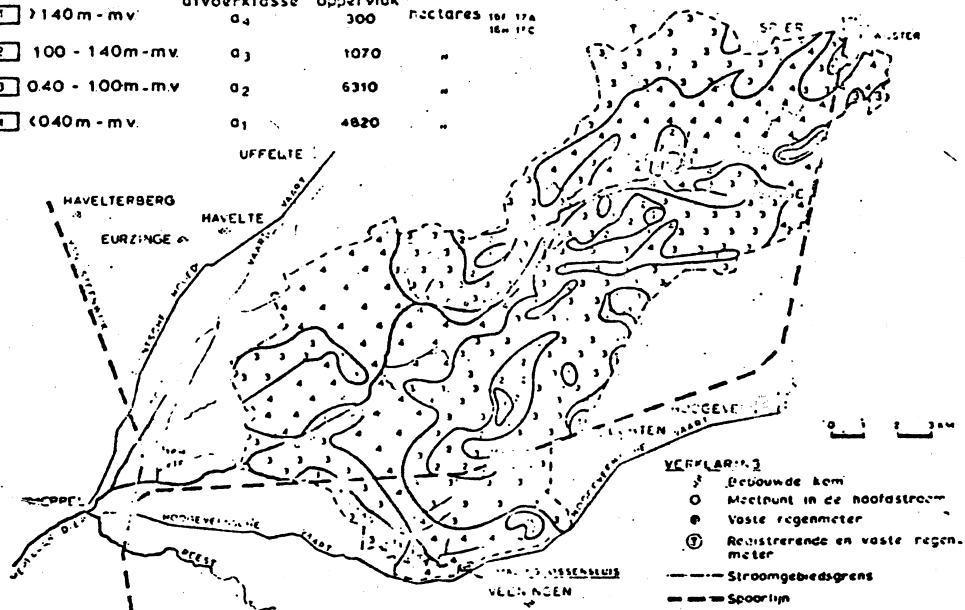
STROOMGEBIED VAN DE WOLD AA

FIG. 23

GRONDWATERSTANDEN MINUS MAAVELD

ZOMERTOESTAND (1 juni t/m 31 aug)

	afvoerklasse	oppervlakt	hectares	187-172
1 >140m -mv.	a ₄	300	"	10m, 17C
2 100 - 140m -mv.	a ₃	1070	"	
3 0.40 - 100m -mv.	a ₂	6310	"	
4 <0.40m -mv.	a ₁	4820	"	

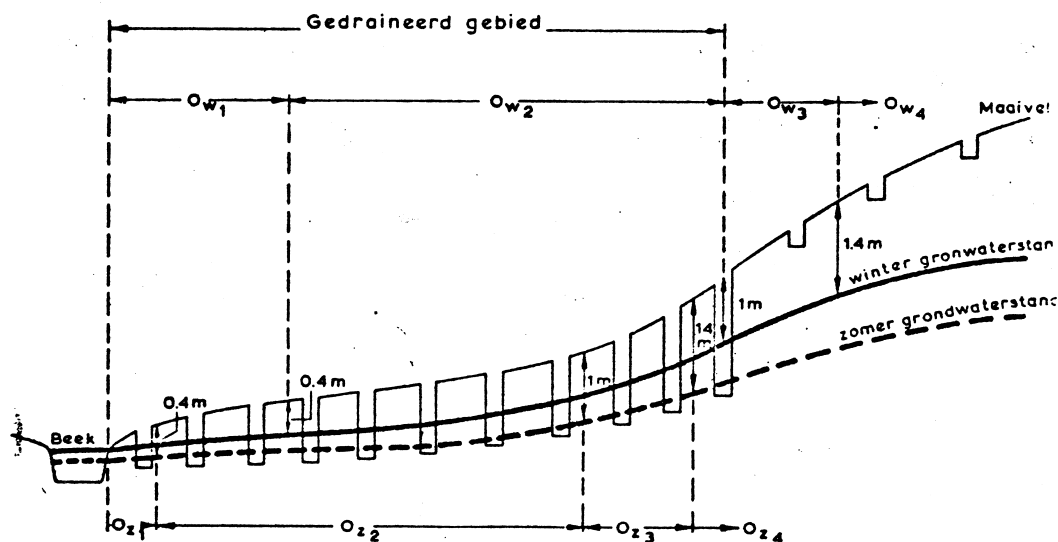


Klasse	Grondwaterstand minus m.v.	Gemiddelde grondwaterstand	Gemiddelde afvoer
1	0,0-0,4 m-m.v.	$\varphi_1 = 0,2$ m-m.v.	a_1
2	0,4-1,0 m-m.v.	$\varphi_2 = 0,6$ m-m.v.	a_2
3	1,0-1,4 m-m.v.	$\varphi_3 = 1,2$ m-m.v.	a_3
4	> 1,4 m-m.v.		a_4

Afhankelijk van de grondwaterstandsfluctuaties met de seizoenen verschuift het oppervlak van een bepaalde grondwaterklasse van seizoen tot seizoen (fig. 4). De grens van het gedraineerde gebied ligt ongeveer waar in de winterperiode de grondwaterstand 1,0 m-m.v. bedraagt. Zowel voor de zomer- als voor de winterperiode is er een kleine afvoer in klasse 3 omdat deze klasse dan binnen het gedraineerde gebied valt en in de winterperiode is deze afvoer vrijwel afwezig omdat ze dan buiten het gedraineerde gebied valt (Zie fig. 4). Deze gegevens leveren 3 vergelijkingen op (zie hieronder).

SCHEMA - GRONDWATERKLASSEN

FIGUUR 4



De indeling in drie afvoerende klassen 1, 2 en 3 met ieder een specifieke, gemiddelde grondwaterdiepte onder m.v. $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ levert een vergelijking voor de zomerperiode en een vergelijking voor de winterperiode van welke perioden de totale gemiddelde afvoeren bekend zijn. Aldus zijn er nu vijf vergelijkingen met zes onbekenden verkregen. De zesde vergelijking wordt verkregen uit het gegeven dat in alle punten in een stroomgebied dezelfde parabolische relatie geldt en dat de apex van de parabool op een diepte onder maaiveld zal liggen welke gelijk is aan de gemiddelde diepte onder maaiveld van de slootbodem van de diepe sloten in het gebied (ca 1,4 m-m.v.).

De beschikbare vergelijkingen zijn nu de volgende.

$$\text{Afvoer}_z = O_{z1} \cdot a_1 + O_{z2} \cdot a_2 + O_{z3} \cdot a_3 \quad (\text{in m}^3/\text{dag})$$

$$\text{Afvoer}_w = O_{w1} \cdot a_1 + O_{w2} \cdot a_2 + O_{w3} \cdot a_3 \quad (\text{in m}^3/\text{dag})$$

$$a_1 = p\varphi_1^2 + q\varphi_1 + r \quad (\text{in m/dag}) \quad \varphi_1 = -0,2 \quad (\text{in m})$$

$$a_2 = p\varphi_2^2 + q\varphi_2 + r \quad (\text{in m/dag}) \quad \varphi_2 = -0,6 \quad (\text{in m})$$

$$a_3 = p\varphi_3^2 + q\varphi_3 + r \quad (\text{in m/dag}) \quad \varphi_3 = -1,2 \quad (\text{in m})$$

$$\frac{da}{d\varphi} = 0 \text{ geeft } 2p\varphi + q = 0 \text{ voor } \varphi = 1,4 \text{ m-m.v.}$$

waarin

$O_{z,w}$ = oppervlak per grondwaterstandsklasse (in hectares)

w = winter

z = zomer

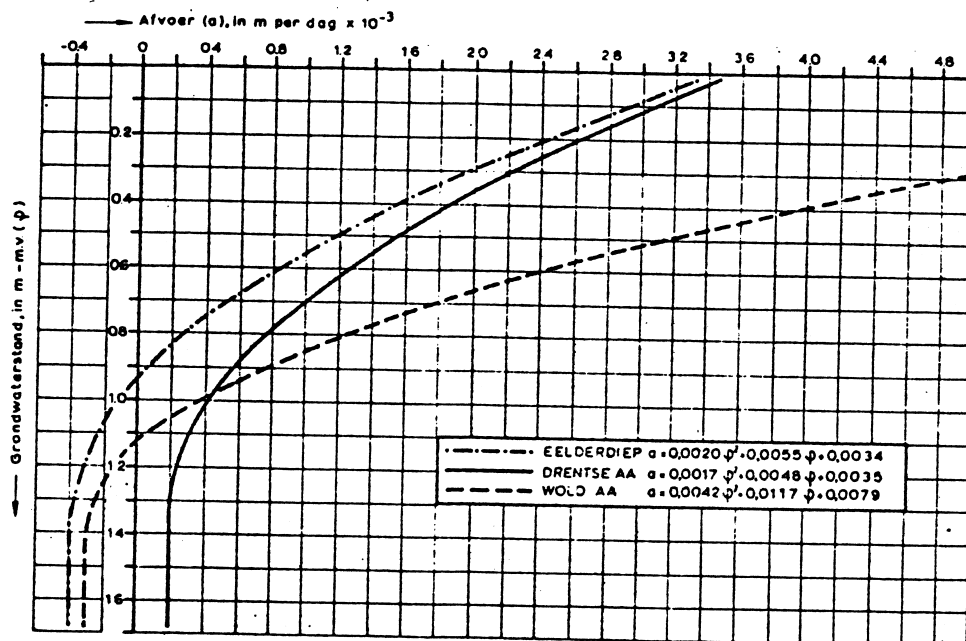
Uit deze 6 vergelijkingen zijn de gemiddelde afvoeren per klasse a_1 , a_2 , a_3 en de parameters p , q en r op te lossen, zodat nu per afvoergebied de karakteristieke afvoer-grondwaterstandslijnen zijn te tekenen (Zie fig. 5).

Bij berekening van de karakteristiek van de Drentse Aa blijkt dat er een minimum afvoer is die altijd optreedt, ook bij zeer diepe grond-

* In deze studie werd met een gemiddelde grondwaterstand per klasse gerekend en de parabool dus eigenlijk geschematiseerd tot een aantal rechten. Uit latere wiskundige berekeningen van de continue lijn bleek de afwijking in de constanten p , q en r bij de toegepaste linearisatie zeer klein te zijn. Voor de exacte berekening van de continue lijn werd een standaardprogramma ontwikkeld.

FIG.5

RELATIE AFVOER-GRONDWATERSTAND PER BEEKGEBIED



waterstanden. Dit minimum wordt waarschijnlijk gevormd door oppervlakkige afvoer en droogweerafvoer. (lozingen).

Bij de karakteristieken van de Wold Aa en het Eelder Diep valt op dat negatieve afvoeren kunnen optreden bij diepe grondwaterstanden. Dit verschijnsel kan er op duiden dat a) een afname plaatsvindt van de verdamping, resulterend in een grotere voeding naar de diepe ondergrond, of dat b) er toestroming in het gebied zelf kan plaatsvinden. Een oppervlakkige afvoer of droogweer-afvoer zoals bij de Drentse Aa is hier niet te onderscheiden, wat niet wil zeggen dat hij niet kan optreden.

Als voordelen voor het werken met grondwaterstand-afvoer-karakteristieken kunnen de volgende punten genoemd worden.

- Er wordt uitsluitend uitgegaan van gemeten grondwaterstanden en de daaruit resulterende gemeten afvoeren. De processen welke tot de grondwaterstanden leiden, zoals neerslag, bodem- en gewasverdamping, blijven buiten beschouwing en hoeven dus niet gesimuleerd te worden. Dit lijkt voor de praktijk van het berekenen van gemiddelde grondwaterstandsverlagingen voorlopig voldoende. De afvoer-grondwaterstandsrelatie is namelijk ca 10 x meer bepalend voor die verlagingen dan de verdamping-grondwaterstandsrelatie (dit geldt voor Drenthe). Voorts is de verdamping-grondwaterstandsrelatie impliciet wel in rekening gebracht d.m.v. de zomergrondwaterstanden die invloed van de verdamping hebben ondergaan.

- b) Bij de afleiding van de grondwaterstand-afvoerrelatie worden schematisaties aangebracht, zoals met betrekking tot de gemiddelde diepte van de slootbodems, die tot bepaalde fouten in de vorm van de relatie lijn kunnen leiden. Er wordt echter wel uitgegaan van de juiste, gemeten afvoeren. Bij het berekenen van grondwaterstandsverlagingen wordt dezelfde, eventueel enigszins foutieve relatielijn gebruikt. De optredende voeding kan echter nooit meer bedragen dan de gemeten afvoeren. Dit is niet het geval bij rekensystemen met vaste randvoorwaarden.
- Ook is dit niet het geval bij lineaire grondwaterstand-afvoerrelaties. Daarin wordt niet uitgegaan van gemeten afvoeren, en de diepte van de slootbodems heeft geen invloed op de vorm van de relatielijn. Een andere aanname m.b.t. de gemiddelde diepte van de bodem van de diepe sloten heeft hier een grote invloed op de mate van voeding van het grondwaterstroomveld, zodat grotere fouten in de berekening van de grondwaterstandsverlagingen zijn te verwachten. (Fig. 1).
- c) De grondwaterstand-afvoerrelaties worden afgeleid met de gegevens uit een heel stroomgebied en hebben een gemiddelde geldigheid voor dit gebied.
- d) Bij het werken met deze relaties wordt steeds het verschil tussen een beginafvoer en een nieuwe afvoer in rekening gebracht. Door slechts met het verschil te werken, zullen bepaalde fouten, b.v. door een verkeerde schatting van de begingrondwaterstand of door het niet in rekening brengen van oppervlakkige afvoer, elkaar gedeeltelijk opheffen.

De afgeleide grondwaterstand-afvoercharacteristieken dienen nu in een rekenmodel te worden verwerkt, teneinde ze te kunnen gebruiken voor praktische berekeningen.

Inbouwen in een analytische formule blijkt wiskundig een onoverkomelijke moeilijkheid op te leveren en zou bovendien de bezwaren weer medebrengen welke in 3a, b en c zijn genoemd.

Daarom werd overgegaan op het toepassen van een numerieke rekenwijze waarin parabolische relaties zich zonder grote bezwaren laten programmeren.

5. HET COMPUTERMODEL*

Het toegepaste computermodel bestaat uit een rekenprogramma met een willekeurig aantal knooppunten, dat gebaseerd is op de eindige-elementen-methode. Voor ieder knooppunt worden d.m.v. een getalkaart ingevoerd a) de bodemconstanten, b) de in dat punt geldende grondwaterstand-afvoerrelatie (d.m.v. de parameters p , q en r), c) de begingrondwaterstand t.o.v. maaiveld waarmee via bovengenoemde relatielijn per knooppunt de stationaire beginafvoer is bepaald.

Het model heeft uitsluitend betrekking op stationaire grondwaterstromingen. Het bevat een beginsituatie, bestaande uit gemiddelde grondwaterstanden onder maaiveld en de daarmee samenhangende gemiddelde afvoeren. Wordt hierna ingegrepen in de waterhuishouding, dan zal een nieuwe stationaire stromingstoestand ontstaan met gewijzigde grondwaterstanden en afvoeren. Wordt b.v. in één of meer van de knooppunten van het model een onttrekking aangebracht, dan zullen d.m.v. een computer de veranderingen kunnen worden berekend in de grondwaterstanden en afvoeren.

Het programma werkt zodanig dat tengevolge van een potentiaaldaling in het diepe pakket onder invloed van een onttrekking ook een daling van het freatisch vlak zal optreden. Deze daling zal volgens de parabolische grondwaterstand-afvoerrelatie verlopen. De gemiddelde grondwaterstanden beneden maaiveld vóór de onttrekking vormen het nulpotentiaalvlak voor de te berekenen grondwaterstandsverlagingen. De afname van de afvoer welke nu plaats heeft in een punt, is gelijk aan de voeding (V) van het diepe grondwater (Zie figuur 6b). De voedingen in alle knooppunten samen vormen het debiet dat onttrokken wordt in het onttrekkingspunt.

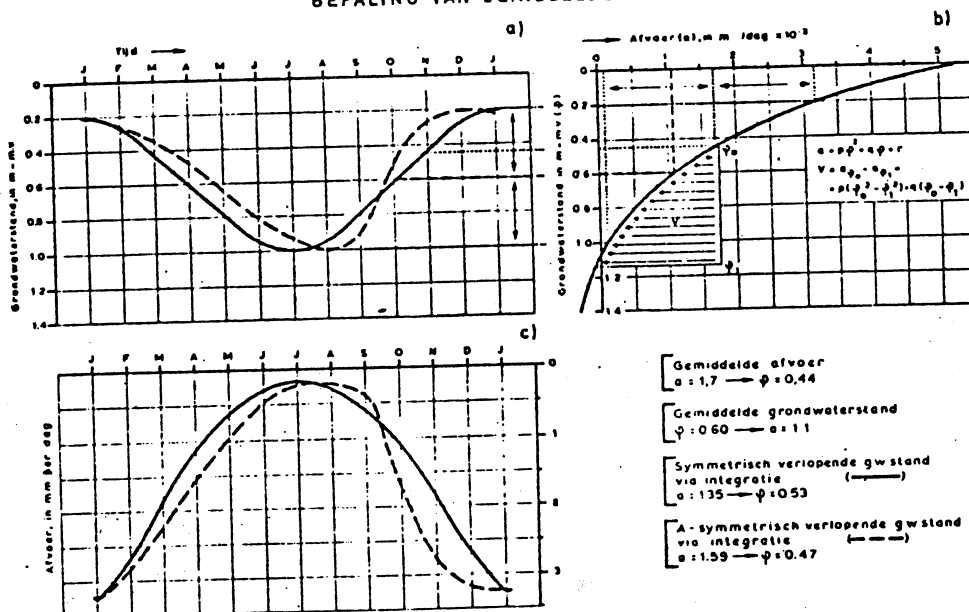
Een voorwaarde voor een juiste voorspelling van grondwaterstands-dalingen en afvoerverminderingen m.b.v. het model is wel dat het in het model weergegeven gebied zo groot is dat op de randen van het model vrijwel geen invloed van de onttrekking meer wordt ondervonden.

De begingrondwaterstanden werden afgeleid van de C.O.L.N.-kaarten. Teneinde een gemiddelde verlaging ten gevolge van een onttrekking te berekenen, dient men van een gemiddelde afvoersituatie uit te gaan. Benadering van deze gemiddelde afvoersituatie is mogelijk op verschillende manieren en zal worden verduidelijkt aan de hand van een rekenvoorbeeld zoals weergegeven op figuur 6a, b en c.

* De wiskundige opbouw van het model, evenals de programmering, waaronder ook het op blz. 11 genoemde sub-programma voor de berekening van de continue parabolische lijn voor de grondwaterstand-afvoerrelatie, werd verzorgd door Ir. C. van den Akker.

BEPALING VAN GEMIDDELTE AFVOER

FIGUUR 6



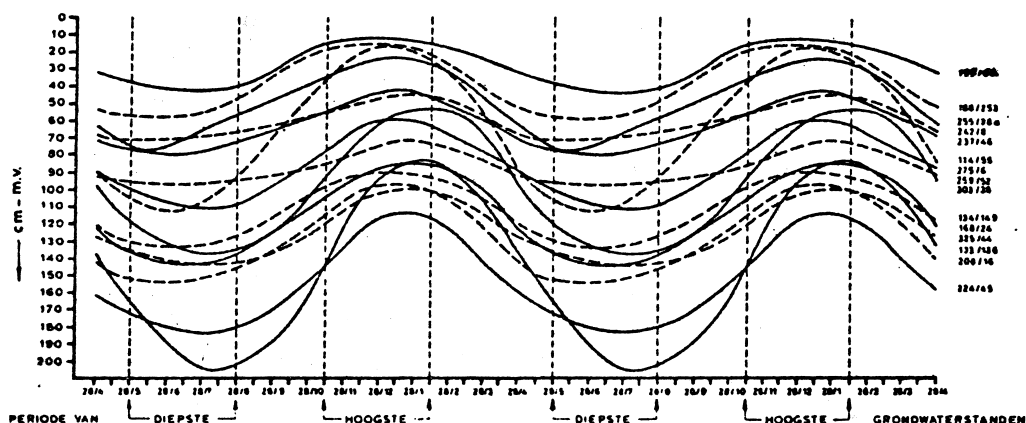
In de eerste plaats kan uitgegaan worden van het gemiddelde van de afvoeren. Deze kan bepaald worden door af te lezen welke afvoer hoort bij een gemiddelde zomergrondwaterstand en welke afvoer hoort bij een gemiddelde wintergrondwaterstand. Deze twee afvoeren dienen dan gemiddeld te worden (fig. 6a en b). In het rekenvoorbeeld van figuur 6 is dit $a = 1,7$ mm/dag en $\phi = 0,44$ m-m.v.

In de tweede plaats kan uitgegaan worden van de afvoer welke hoort bij een gemiddelde grondwaterstand voor het hele jaar, $\phi = 0,6$ m-m.v. en $a = 1,1$ mm/dag.

Dat deze tweede benadering beter met een gemiddelde situatie overeenkomt dan de eerste, kan worden verduidelijkt met behulp van fig. 6a. Hierin is een sinusvormig grondwaterstandsverloop met de tijd weergegeven. Met behulp van 6 b kan dit verloop omgezet worden in een afvoer-tijdverloop (6c). Door integratie van deze nieuwe relatie kan nu de werkelijke gemiddelde afvoer worden berekend; deze is 1,35 mm/dag en de grondwaterstand die erbij hoort is 0,53 m-m.v.

FIG. 7

LIJNEN VAN GEMIDDELD VERLOOP VAN DE GRONDWATERSTAND
IN 15 C.O.L.N. STAMBUIZEN



uit „De landbouwwaterhouding in de
provincie Drenthe“
Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding
Nederland - T.N.O., 1958

Voor een asymmetrisch verlopende tijd-grondwaterstandskromme wordt dit $a = 1,6$ mm/dag en $\phi = 0,47$ m-m.v.

Uit een onderzoek naar grondwaterstandsfluctuaties gedurende het C.O.L.N.-onderzoek volgt echter dat over het algemeen van symmetrische fluctuaties kan worden gesproken (Zie figuur 7). Bovendien is de gemiddelde amplitude van de fluctuaties in Drenthe nog wat kleiner dan in het rekenvoorbeeld in fig. 6 is voorgesteld. Deze overwegingen, en vergelijking van de uitkomsten van het rekenvoorbeeld, leidden ertoe om in het model in eerste instantie een eenvoudig af te leiden gemiddelde grondwaterstand $\frac{\phi_z + \phi_w}{2}$ in te voeren per knooppunt.

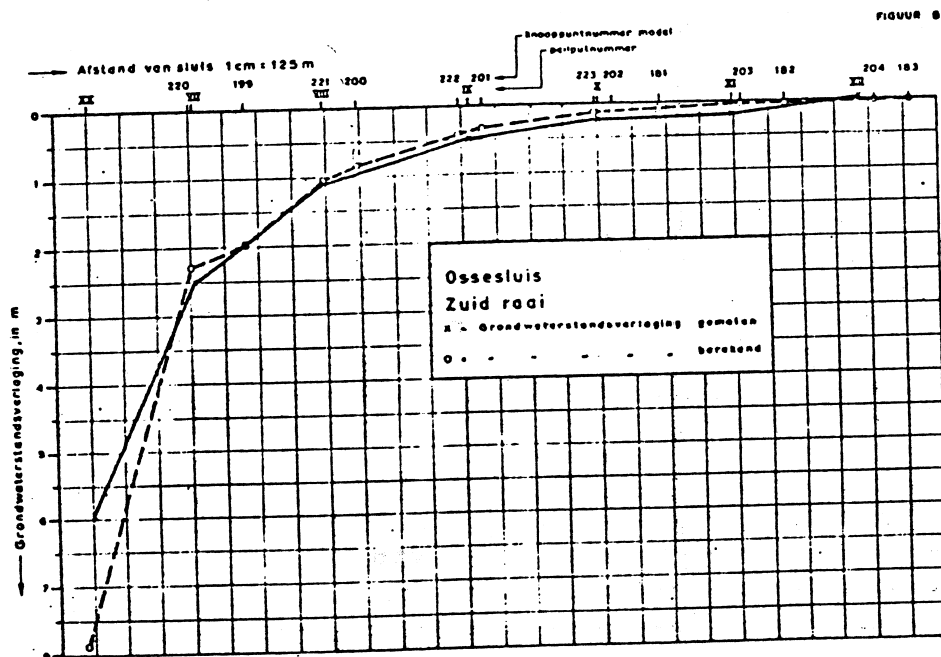
Zoals in de eerste alinea al werd vermeld, kan per knooppunt een grondwaterstand-afvoerrelatie worden ingevoerd. In praktijk zijn nog slechts enkele relaties bekend (fig. 5), welke dan dienen te worden geëxtrapoleerd naar grote gebieden, met alle risico's daaraan verbonden. Er is in het onderzoek Drenthe echter naar gestreefd om meer afvoeren te meten, zodat in de toekomst voldoende basisgegevens voor dit soort van berekeningen aanwezig zullen zijn.

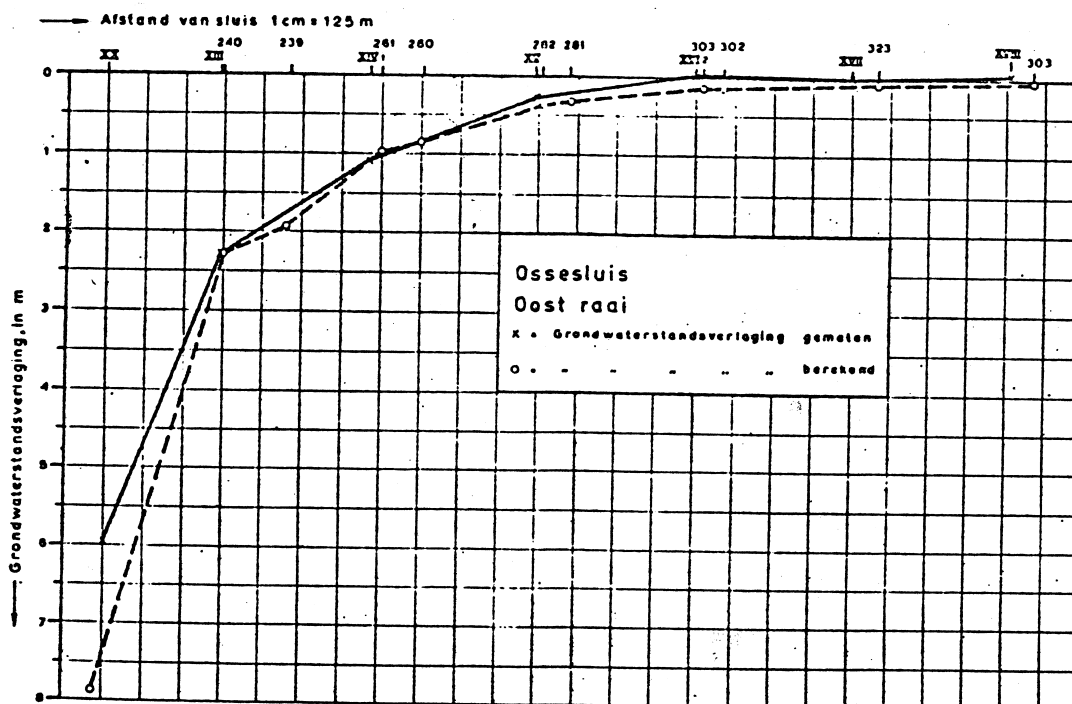
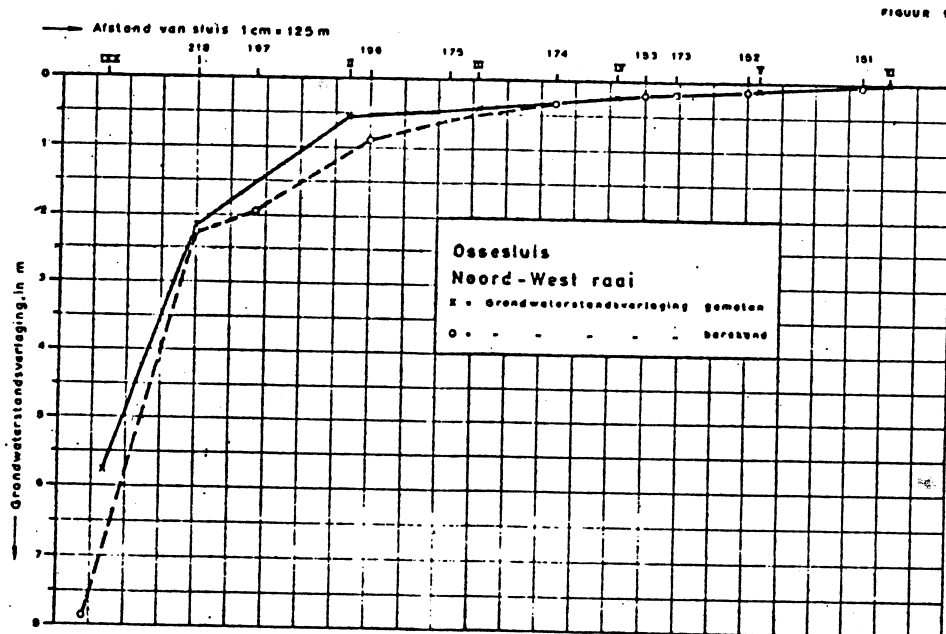
6. PRAKTISCHE TOETSING VAN HET REKENMODEL

Het model werd in de praktijk getoetst aan de verlagingen van de grondwaterstand ten gevolge van een bemaling bij de Ossesluis in de Hoogeveense Vaart (lit. 12). Zie fig. 2 en 3. Deze bemaling werd gekozen omdat het binnen Drenthe één van de best gecontroleerde grondwateronttrekkingen is.

Tijdens deze bemaling zijn de grondwaterstanden gemeten in een drietal raaien van waarnemingsputten om de sluis. D.m.v. regressieberekeningen en een stamput konden uit de gemeten grondwaterstanden de verlagingen worden berekend (lit. 13). Deze verlagingen (verder de "waargenomen verlagingen" genoemd), werden vergeleken met de met het computermodel berekende verlagingen.

Hiertoe was een model gebouwd van een gebied van 10 km^2 rondom de bemaling. Het gebied was gesplitst in 400 vierkante oppervlakjes van 500 m bij 500 m, en het bevatte 441 knooppunten. Voor ieder knooppunt was een kD-waarde geschat aan de hand van beschikbare gegevens. Voor de grondwaterstand afvoerrelatie werd de relatie van de Wold Aa gebruikt, hoewel de sluis op de rand van dit stroomgebied met het gebied van de Reest





ligt. Van de Reest waren echter geen afvoergegevens bekend.

De begingrondwaterstand werd gelijk gesteld aan $\frac{\varphi_z + \varphi_w}{2}$ waarbij φ_z en φ_w per knooppunt werden afgelezen van de C.O.L.N.-² kaarten.

De berekende verlagingen werden vergeleken met de waargenomen verlagingen op een datum welke representatief kan worden geacht voor een gemiddelde situatie (20-4-1971), zie de figuren 8, 9 en 10.

Om te beoordelen of de grondwaterstanden op de datum 20-4-1971 werkelijk een jaargemiddelde vertegenwoordigen, werden de in het model ingevoerde begingrondwaterstanden minus maaiveld vergeleken met de grondwaterstanden minus maaiveld zoals ze werkelijk zouden zijn geweest op 20-4-1971. Deze vergelijking is niet eenvoudig. Voor de noord-west raai waren veel waterpassingen van het maaiveld beschikbaar ten gevolge van de uitgevoerde ruilverkaveling Ruinerwold-Koekange. De grondwaterstanden plus NAP werden berekend d.m.v. een regressieanalyse (lit. 12). Uit het verschil tussen de maaiveldwaterpassing en de grondwaterstand plus NAP volgden de grondwaterstanden onder maaiveld op 20-4-1971. Deze blijken voor 6 peilputten gemiddeld 10 à 15 cm lager te liggen dan de in het model ingevoerde begingrondwaterstanden. Daar al deze peilputten in de berm van een weg liggen kan de gemiddelde maaiveldshoogte van de landerijen wel afwijken van die van de berm, zodat een verschil van 10 à 15 cm vrij onbetekenend wordt.

De berekende en waargenomen grondwaterstandsverlagingen in de drie raaien zijn grafisch weergegeven in de figuren 8, 9 en 10.

Over het algemeen werd een goede overeenstemming bereikt. De vorm van de berekende en gemeten afpompskrommen is identiek. De gemiddelde afwijking tussen berekende en gemeten grondwaterstanden bedraagt voor 18 waarnemingsputten 0,1 m. Slechts voor één put (nr. II) blijkt een grote afwijking van de waargenomen en de berekende verlaging te bestaan (0,5 m).

Hierbij kan worden opgemerkt dat

- a) de waargenomen verlagingen ook "berekende" verlagingen zijn, zodat daar ook nog een fout in kan schuilen,
- b) put II de laagste correlatiecoëfficiënt met de stamput heeft van alle waarnemingsputten en ook duidelijk een slechtere correlatie heeft tussen diep en ondiep grondwater. Dit kan erop wijzen dat de grondwaterstandswaarnemingen in put II slechts zeer lokale betekenis hebben. Dit wordt bevestigd door een statistische bewerking van de meetresultaten van 18 peilputten. De gegevens van de 2 peilputten die het dichtst

bij de bouwput liggen zijn weggelaten omdat deze te sterk beïnvloed zijn door de schematisering van de onttrekking tot één knooppunt. Het gemiddelde van de verschillen tussen gemeten en berekende grondwaterstandsverlagingen $\bar{x}$ is -3,33 cm en de standaard deviatie is 15,3 cm. Bij een verzameling van 18 waarnemingen is er een kans van minder dan 1% dat een verschil van 50 cm optreedt, zodat de waarneming in put II inderdaad slechts lokale betekenis heeft.

De toestroming over de rand van het model bedroeg 6% van het onttrokken debiet.

Uit verschillende runs die met dit model werden gemaakt, kan het volgende geconcludeerd worden. (Voor een verslag van het testen van het model zie lit. 14).

- 1) Ondanks de summiere gegevens met betrekking tot kD-waarden en grondwaterstand-afvoerrelatie (geen van deze basisgegevens werd speciaal voor dit onderzoek verzameld), is toch een grote overeenstemming tussen waarnemingen en berekeningen te constateren. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het gebied rond de Ossesluis sinds de C.O.L.N.-periode geen ingrijpende wijzigingen in de ontwatering heeft ondergaan.
- 2) Het model leent zich goed voor het berekenen van een gemiddelde, stationaire situatie. Een proefrun die werd gemaakt met alleen zomerstanden, teneinde de verlagingen aan het einde van de zomer te simuleren, gaf veel te grote verlagingen, wat er op duidt dat een zomer-situatie niet met een stationair model is te benaderen. Een niet-stationaire versie dient nog ontwikkeld te worden.
- 3a) Wijziging van de kD-waarde in het onttrekkingspunt zelf heeft wel een zeer grote invloed op de berekende grondwaterstandsverlagingen. Hieruit blijkt dat het van groot belang is om zo nauwkeurig mogelijk de bodemconstanten te bepalen in toekomstige onttrekkingspunten d.m.v. uitgebreide pompproeven.
- b) Regionale variatie van de doorlatendheid van de ondergrond (in dit model van 1900 tot 4500 m²/dag met ter plaatse van het onttrekkingspunt een kD van 2400 m²/dag), levert slechts zeer kleine afwijkingen op in grondwaterstandsverlagingen ten opzichte van een model met een uniforme doorlatendheid van 2400 m²/dag voor het gehele gebied.

- 4) In de run waarvan de resultaten zijn weergegeven op de figuren 8, 9 en 10 werd geen c-waarde toegepast. De weerstand van de ondiepe klei- en veenlagen is zeer waarschijnlijk verdisconteerd in de toegepaste drainageweerstand. Een contrôle hierop zou te maken zijn door een onderzoek in te stellen naar de equivalentdikte zoals deze door Hooghoudt is gedefinieerd (lit. 8), en na te gaan of de aanwezige slecht doorlatende lagen hierbinnen vallen. Voor lagen die onder deze equivalentlaag liggen zal de verticale weerstand niet in de drainageweerstand zijn begrepen en zal zij apart in het model moeten worden ingevoerd.
- 5) Als eerste benadering werden de totale winter- en zomerafvoeren gebruikt voor de berekening van de relaties grondwaterstand-afvoer. Hierin begrepen zijn dus ook de piekafvoeren welke oppervlakkig afstromen. Daar deze echter zowel in zomer als winter voorkomen en bovendien in Drenthe klein zijn (slechts ca 15% van de totale afvoer), hebben ze waarschijnlijk niet zoveel invloed op de voeding, welke slechts het verschil tussen twee afvoertoestanden is.

7. VOORTZETTING ONDERZOEK

- 1) Het ontwikkelde model heeft geldigheid voor gebieden met zeer ondiepe semi-permeabele lagen van betrekkelijk geringe weerstand (zoals keileem- en veenlagen). Deze weerstand is begrepen in de drainage-weerstand. Teneinde potentiaalverschillen over de semi-permeabele laag te berekenen, zal echter nog een verder onderzoek naar de invloed van deze lagen dienen te worden ingesteld.
De toepassing van het model in zijn huidige vorm zal voornamelijk gezocht dienen te worden op het Plateau van Drenthe of in gebieden van een overeenkomstige hydrogeologische opbouw.
- 2) Voor gebieden met diepere weerstandslagen, zoals b.v. het Hunzedal met kleilagen op ca 15 à 20 m-m.v., zal nog bestudeerd moeten worden hoe het effect van deze weerstandslagen het best in het model verwerkt kan worden.
- 3) Het model werkt met afvoeren welke gebaseerd zijn op een gemiddelde jaargrondwaterstand. De werkelijke gemiddelde afvoeren kunnen slechts verkregen worden door integratie van de afvoeren per tijdstip. Dit punt dient nog verder te worden uitgewerkt.

- 4) Het model simuleert een gemiddelde stationaire grondwaterstroming. Een niet-stationair model zal ontwikkeld dienen te worden om b.v. grondwaterstandsverlagingen aan het einde van de zomer, of in jaren met een neerslag die afwijkt van de gemiddelde neerslag, te simuleren.
- 5) Nagegaan zal dienen te worden wat de fysische betekenis is van de parameters p , q en r in de parabolische relatie tussen grondwaterstand en afvoer.

8. CONCLUSIES

- 1) Een numeriek rekenmodel voor de berekening van grondwaterstandsverlagingen bij stationaire stroming naar een grondwateronttrekking in een gebied met vrije afwatering werd ontwikkeld. Hierin werd een nieuwe benadering voor de voeding van het grondwaterstroomveld toegepast, nl. d.m.v. grondwaterstand-afvoerrelaties.
- 2) Deze relaties zijn op eenvoudige wijze per stroomgebied af te leiden uit gemeten afvoeren en grondwaterstandskarten en dienen representatief te zijn voor dat stroomgebied.
- 3) Het is daarom van het grootste belang dat naast bepalingen van de hydrologische bodemconstanten de beekafvoeren gemeten worden en dat de gevolgen van de verbeteringswerken van de ontwatering op het freatisch vlak worden nagegaan. (Herziening van de grondwaterstandskarten van het C.O.L.N.-onderzoek).
- 4) Uit het modelonderzoek blijkt dat de kD -waarde ter plaatse van het onttrekkingspunt sterk bepalend is voor de te verwachten potentiaaldalingen. Hieruit blijkt de behoefte aan nauwkeurige pompproeven.
- 5) Het model kan dienen om prognoses van de te verwachten potentiaaldalingen ten gevolge van een geprojecteerde grondwaterwinning of enige andere ingreep in de waterhuishouding te maken. Hiermee kunnen van te voren reeds bepaalde kwesties worden bestudeerd, zoals m.b.t. de te verwachten schade of winst ten gevolge van de veroorzaakte grondwaterstandsverlagingen en m.b.t. de wijziging in het afvoerpatroon van het beïnvloede gebied.

LITERATUUR

- 1) R.I.D., Rapport inzake de gevolgen van uitbreiding van de capaciteit van de waterwinplaats Gasselte van de N.V. Waterleidingmaatschappij "Drenthe", 1970.
- 2) R.I.D., Concept-nota inzake een onderzoek naar de oorzaken van het voorkomen van droogteschade op het waterwinterrein De Groeve van de N.V. Waterleidingmaatschappij voor de provincie Groningen, 1972.
- 3) D. van Rijsbergen, Methoden ter berekening van de verlagingen van het freatisch vlak ten gevolge van waterwinning, Mededelingen 2, R.I.D., 1972.
- 4) R.I.D., Rapport inzake een onderzoek naar de gevolgen van uitbreiding van de waterwinplaats Beilen van de N.V. Waterleidingmaatschappij "Drenthe", 1970.
- 5) R.I.D., Rapport inzake een onderzoek naar de gevolgen van uitbreiding van de waterwinplaats Ruinerwold van de N.V. Waterleidingmaatschappij "Drenthe", 1971.
- 6) R.I.D., Nota inzake een geohydrologisch onderzoek in de gemeente Emmen, 1972.
- 7) L.F. Ernst, Analysis of groundwaterflow to deep wells in areas with non-linear function for the subsurface drainage. Journal of Hydrology, 14, 1971.
- 8) S.B. Hooghoudt, Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond, Deel 7, Versl. Landb. Onderz. 46 (14), 1940.
- 9) G.A. Bruggeman, Notitie inzake het verband tussen grondwaterstanden en beekafvoeren, Interne notitie, R.I.D. 1970.
- 10) L.F. Ernst, N.A. de Ridder and J.J. de Vries, A geohydrologic study of east Gelderland, Geologie en Mijnbouw, Volume 49 (6), 1970.
- 11) H. Bos, De landbouwwaterhuishouding in de provincie Drenthe, Rapport no. 4, Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding Nederland, T.N.O. 1958.
- 12) R.I.D., Rapport inzake een geohydrologisch onderzoek ten behoeve van de bemaling van de bouwput voor de Ossesluis in de gemeente De Wijk (Dr.), 1969.

- 13) A.F. van Holst en G. Rutten, De samenhang tussen de bodemgesteldheid en de mate van verdroging in het gebied rondom de Ossesluis, Concept-rapport no. 1010, Stiboka, 1972.
- 14) W.A. Winter, Verslag van een onderzoek naar de praktische toepasbaarheid van een computermodel voor de berekening van grondwaterstandsverlagingen ten gevolge van een grondwateronttrekking in een gebied met vrije afwatering. Studentenscriptie hydrogeologie, Universiteit van Leiden, 1973.
- 15) R.I.D., Rapport inzake een onderzoek naar de gevolgen van uitbreiding van de waterwinplaats "Assen" van de N.V. Waterleidingmaatschappij "Drenthe", 1971.
- 16) Hydrologisch Colloquium, Permanente grondwaterstroming naar putten, VEWIN, 1970.

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW