

NOTA 423 d. d. 18 oktober 1967 (gewijzigd)

ALTERRA

Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

De consequenties van grondwaterwinning
in de Achterhoek

J. J. de Vries

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemid-
delen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onder-
zoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking.

ALTERRA

Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

Inleiding

De resultaten van het door het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding uitgevoerde geohydrologisch onderzoek in de Achterhoek, hebben een inzicht gegeven in de spreiding van doorlatendheid en drainageweerstand. Bovendien is een indruk gekregen van de wijze waarop de overvloedige neerslag via de verschillende drainagestelsels tot afvoer komt. (DE VRIES 1967^I en 1967^{II})

Met behulp van deze gegevens is het mogelijk geworden plannen te maken voor de grondwaterwinning in de toekomst en te trachten de gevolgen van deze winning te overzien.

Bij de grondwateronttrekking kan onderscheid gemaakt worden tussen onttrekking door middel van een diffuus verspreid stelsel van pompstations en meer geconcentreerde onttrekking in hydrologisch gezien gunstig gelegen gebieden waarbij eventueel kunstmatige infiltratie kan worden toegepast.

In het volgende zullen beide mogelijkheden worden besproken en zal getracht worden de gevolgen van grondwaterstandsval bij een diffuus onttrekkingsstelsel te berekenen. In het rekenschema hiervoor wordt onderscheid gemaakt tussen een 5-tal gebieden die min of meer een eenheid vormen in hydrologisch opzicht. Voor ieder van deze gebieden wordt het huidige verloop van de grondwaterstand weergegeven. Verder wordt de grondwaterdiepte in een kansverdeling opgegeven. Hierbij is uitgegaan van bestaande kansverdelingen van beekafvoeren. Deze afvoeren zijn met behulp van drainageweerstanden omgezet in grondwaterstanden.

Op deze grondwaterstandsveranderingen onder invloed van het seizoen zijn de grondwaterstandsveranderingen veroorzaakt door grondwateronttrekking gesuperponeerd.

Combinatie van deze grondwaterstandsgegevens en opbrengst-ontwateringscurven kunnen een indruk geven van de gevolgen van grondwaterwinning voor de landbouw.

1. Schematische indeling van de Achterhoek naar geohydrologische eigenschappen en grondwaterstanden (rekenschema)

Tengevolge van het feit dat veranderingen in doorlatendheid van de ondergrond en topografie zich in oost-west richting voordoen, is het

mogelijk om de Achterhoek in een aantal noord-zuid verlopende gebieden te verdelen die tot op zekere hoogte een eenheid vormen in hydrologische zin.

De hydrologische grootheden die hier in aanmerking worden genomen zijn:

gemiddelde zomer- en wintergrondwaterstand
kD-waarde
drainageweerstand W, die gelijk is aan

$$W = \frac{L^2}{8kD} + Lw \quad (1)$$

hierin is:

L de gemiddelde afstand tussen de open leidingen in m
kD de doorlatendheid in m²/dag
w de radiale weerstand in dagen.

Hydrologische gebieden (zie fig. 1)

I Strook langs de IJssel met een breedte van ongeveer 6000 m;
vrij vlak gebied.

kD-waarde	2000 m ² /dag
W(winter)	500 dagen
W(zomer)	700 dagen
gemiddelde zomergrondwaterstand	200 cm-m.v.
gemiddelde wintergrondwaterstand	100 cm-m.v.

II Strook oostelijk van gebied I; breedte ongeveer 3000 m;
hellend gebied (helling ongeveer 1 : 1000).

kD-waarde	2500 m ² /dag
W(winter)	500 dagen
W(zomer)	700 dagen
gemiddelde zomergrondwaterstand	100 cm-m.v.
gemiddelde wintergrondwaterstand	40 cm-m.v.

III Strook met een breedte van ongeveer 5000 m; oostelijk van gebied II. Gebied met stuifruggen (droge zandgronden).

kD-waarde 4000 m²/dag
W(zomer en winter) 3000 dagen
gemiddelde zomergrondwaterstand 200 cm-m.v.
gemiddelde wintergrondwaterstand 100 cm-m.v.

IV Gelegen tussen gebied III en de rand van het Tertiair Plateau, die gevormd wordt door de lijn Groenlo, Lichtenvoorde, Aalten; vrij vlak liggend gebied.

kD-waarde 3000 m²/dag
W(zomer en winter) 2000 dagen
gemiddelde zomergrondwaterstand 140 cm-m.v.
gemiddelde wintergrondwaterstand 30 cm-m.v.

V komt meer verspreid voor: omgeving van Lichtenvoorde, Borculo en Neede; relatief laag liggende, vlakke gebieden.

kD-waarde 1500 m²/dag
W(winter) 300 dagen
W(zomer) 500 dagen
gemiddelde zomergrondwaterstand 100 cm-m.v.
gemiddelde wintergrondwaterstand 30 cm-m.v.

VI Tertiair Plateau.

Gebied waarin de slecht doorlatende Tertiaire sedimenten tot aan de oppervlakte komen; komt voor grondwaterwinning niet in aanmerking.

kD-waarde < 500 m²/dag
gemiddelde zomergrondwaterstand 100 cm-m.v.
gemiddelde wintergrondwaterstand 40 cm-m.v.

IIIA Ten zuiden en ten noorden van gebied III; gebied ligt iets lager dan gebied III.

kD-waarde 4000 m²/dag
W(zomer en winter) 2000 dagen
gemiddelde zomergrondwaterstand 100 cm-m.v.
gemiddelde wintergrondwaterstand 40 cm-m.v.

De grondwaterstandsgegevens zijn geschematiseerd naar het COLN rapport (1958).

2. Verloop van de grondwaterstand in de verschillende gebieden in de loop van het jaar

De tijdstippen waarop gemiddeld de maximum- en minimum-grondwaterstanden voorkomen, vallen niet in alle gebieden op hetzelfde moment. Afhankelijk van drainageweerstand en bergingscoëfficiënt zal er een faseverschuiving optreden ten opzichte van de tijdstippen van maximum en minimum neerslagoverschot.

Volgens ERNST(1966)^I is bij constante W, de faseverschuiving afhankelijk van een parameter;

$$\xi = \sqrt{\frac{\pi \mu W}{T}} \quad (2)$$

hierin is

μ de bergingscoëfficiënt (gemiddeld 0,15 voor de Achterhoek)

W de constante drainageweerstand

T de periodelengte (365 dagen).

In figuur 2 is het verband tussen de parameter ξ en de fasevertraging φ_h af te lezen.

Betrekking
Deze formule kunnen we toepassen op de in par. 1 genoemde gebieden. We moeten er echter rekening mee houden dat in deze gebieden de W niet constant is. Voor zomer en winter moeten dus verschillende nabijingen van de grondwaterstand ten opzichte van de neerslag worden berekend.

Waarbij we dus aannemen dat bij de extreme waarden voor de grondwaterstand, de extreme waarden voor ϕ_h behoren.

Hoewel dus niet geheel exact, passen we formule (2) toe op de in par. 1 genoemde gebieden. Daarbij wordt uitgegaan van een maximum neerslagoverschot op 1 januari en een minimum neerslagoverschot op 1 augustus. Verder wordt aangenomen dat $t = 0$ steeds aan het begin van het jaar valt.

Gebied I

$$h_{\max} = 100 \text{ cm-m.v. op 15 januari}$$
$$h_{\min} = 200 \text{ cm-m.v. op 15 augustus}$$

Bij deze ligging van de extreme punten kan de grondwaterstands-beweging nu bij benadering door de volgende formules worden weergegeven (gezien de benaderende werkwijze leek het geen bezwaar daarbij enigszins van de gebruikelijke Fourier-analyse af te wijken):

$$\text{voor } -15 < t < 135 \quad h = 150 + 0,44 \sin \frac{2\pi}{T_1} (t+30) + 0,31 \sin \frac{4\pi}{T_1} (t+30)$$

$$T_1 = 315 \text{ dagen (voor afleiding zie fig. 3)}$$

$$\text{voor } 135 < t < 350 \quad h = 150 - 0,5 \sin \frac{2\pi}{T_2} (t - 135)$$

$$T_2 = 420 \text{ dagen}$$

Drainageweerstand

$$W_t = 600 + 100 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$T = 365 \text{ dagen}$$

Gebied II

$$h_{\max} = 40 \text{ cm-m.v. op 1 februari}$$
$$h_{\min} = 100 \text{ cm-m.v. op 1 september}$$

$$\text{voor } -30 < t < 450 \quad h = 0,70 + 0,26 \sin \frac{2\pi}{T_1} (t+30) + 0,12 \sin \frac{4\pi}{T_1} (t+30)$$

$$T_1 = 300 \text{ dagen}$$

voor $150 < t < 335$ $h = 0,70 - 0,3 \sin \frac{2\pi}{T_2} (t-150)$

$T_2 = 420$ dagen

Drainageweerstand $W_t = 600 + 100 \sin \frac{2\pi}{T} t$

$T = 365$ dagen

Gebied III

$h_{\max} = 100$ cm-m.v.

$h_{\min} = 200$ cm-m.v.

$h = 1,50 + 0,50 \sin \frac{2\pi}{T} (t+15)$

$T = 365$ dagen

Drainageweerstand

$W = 3000$ dagen

Gebied IV

$h_{\max} = 30$ cm-m.v. op 15 januari

$h_{\min} = 140$ cm-m.v. op 1 september

voor $-65 < t < 165$ $h = 0,85 + 0,48 \sin \frac{2\pi}{T_1} (t+60) + 0,12 \sin \frac{4\pi}{T_1} (t+60)$

$T_1 = 450$ dagen

voor $165 < t < 300$ $h = 0,85 - 0,55 \sin \frac{2\pi}{T_2} (t-165)$

$T_2 = 270$ dagen

Drainageweerstand

$W = 2000$ dagen

Gebied V

$h_{\max} = 30$ cm-m.v.

$h_{\min} = 100$ cm-m.v.

voor $-75 < t < 135$ $h = 0,65 + 0,26 \sin \frac{2\pi}{T_1} (t+75) + 0,16 \sin \frac{4\pi}{T_1} (t+175)$

$T_1 = 420$ dagen

$$\text{voor } 135 < t < 185 \quad h = 0,65 - 0,35 \sin \frac{2\pi}{T_2}(t - 135)$$

$$T_2 = 300 \text{ dagen}$$

$$\text{Drainageweerstand} \quad W_t = 400 + 100 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$T = 365 \text{ dagen}$$

In de figuren 4 t/m 8 zijn de hier beschreven grondwaterstandsbevingen weergegeven in de bovenste curven. De schaal die de bijbehorende grondwaterstand aangeeft staat onder de 50% overschrijdingskans.

Voor de landbouw is het van groot belang te weten welke kans er bestaat dat de grondwaterstand ten gevolge van meteorologische omstandigheden hoger of lager dan normaal zal zijn. Een grondwaterstandskansverdeling ontbreekt echter nog, zodat in het volgende de afvoerkans als klimatologische parameter zal worden gehanteerd.

3. Grondwaterstandskansen in relatie tot afvoerkansen

De gemiddelde afvoer van de Baakse beek bedraagt voor de verschillende maanden (FONCK, 1967):

jan.	50 mm	juli	6 mm
febr.	38 mm	aug.	7 mm
mrt.	25 mm	sept.	10 mm
apr.	15 mm	okt.	18 mm
mei	12 mm	nov.	32 mm
juni	5 mm	dec.	42 mm

Voor de landbouw is vooral de hoeveelheid beschikbaar vocht in de periode van februari t/m juli van belang. Voor deze periode werden de volgende afvoerkansen opgegeven (FONCK, 1967):

Afvoer	overschrijdingskans	k
260 mm	5%	2,6
240 mm	10%	2,4
180 mm	20%	1,8
100 mm	50%	1
80 mm	70%	0,8
40 mm	90%	0,4
25 mm	95%	0,24

$$k = \frac{\text{afvoer } A_t}{\text{afvoer-mediaan } A_m} \quad \text{dus } A_t = k A_m \quad (3)$$

k is dus een soort klimaatsparameter

Nu is de opbolling in de grondwaterspiegel afhankelijk van de afvoer en van de drainageweerstand. Uit verschillen in afvoer voor een bepaalde periode zijn dus verschillen in grondwaterstand af te leiden.

In droge perioden zal de mate van droogte weinig of geen invloed meer hebben op de grootte van de drainageweerstand, aangezien in normale zomers de meeste sloten in de Achterhoek reeds droog komen te staan. Steeds kan in een droge periode als drainageweerstand de W(zomer) worden aangehouden.

Voor de opbolling h_t^1 op een bepaald moment t geldt:

$$h_t^1 = A_t W_t \quad (4)$$

hierin zijn A_t en W_t respect. de afvoer en de drainageweerstand ten tijde t.

Met behulp van de parameter k is het nu mogelijk om afvoerkansen om te zetten in opbollingskansen.

Stel het verschil in opbolling onder niet-gemiddelde klimatologische omstandigheden op een bepaald moment t, met de opbolling onder gemiddelde omstandigheden is gelijk; Δh_t^1 dan is:

$$\begin{aligned}\Delta h_t^1 &= A_m W_m - A_t W_t && \text{en dus} \\ \Delta h_t^1 &= (1 - k) A_t W_t && (5)\end{aligned}$$

Hierin is A_t de mediaanafvoer op het beschouwde moment (periode). In droge perioden kan W_t gelijk gesteld worden aan W (zomer) en in natte perioden aan W (winter).

Voor de verschillen in gemiddelde grondwaterstand Δh_t werd $2/3$ van het verschil in opbolling aangenomen, dus:

$$\Delta h_t = 2/3 (1-k) A_t W_t \quad (6)$$

Deze formule, toegevoegd aan de formules in par. 2 geeft de mogelijkheid de grondwaterstanden te differentiëren naar verschillende kanspercentages, althans in de periode van februari t/m juli.

Voor de in par. 2 behandelde gebieden is deze bewerking uitgevoerd. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 4 t/m 8.

De beweging van de grondwaterspiegel in de loop van het jaar wordt weergegeven door de bovenste curve, terwijl voor de verschillende overschrijdingskansen, verschillende grondwaterstandsschalen zijn aangegeven (verticale assen).

In extreem natte perioden komen in deze figuren de grondwaterspiegels soms boven het maaiveld uit. Dit betekent dat er inundaties optreden en/of dat er afstroming langs de oppervlakte plaats vindt.

a. Invloed van de gekozen periode

Wanneer afvoerkansen over een kortere periode in beschouwing worden genomen, b.v. de periode april, mei, juni, dan blijkt bij dezelfde overschrijdingskans de factor k nauwelijks af te wijken van die in het bovenstaande geval bij een langere periode.

Aangezien echter de gemiddelde dagafvoer in de periode van april t/m mei kleiner is dan over de periode februari t/m juli, zal Δh_t kleiner zijn bij dezelfde overschrijdingskans.

Dit betekent dat b.v. een droogte die met eenzelfde kans in beide

perioden voorkomt (gelijke k) over de korte periode minder grondwaterstands-daling (Δh_t) geeft dan over de langere periode. In het volgende zullen wij er dus rekening mee moeten houden dat een geringere grondwaterstands-daling over de korte periode dezelfde schadekans geeft als grotere grondwaterstands-dalingen over de langere periode.

4. Invloed van grondwateronttrekking op de grondwaterstand

Aangezien in de zomer enerzijds praktisch alle sloten in de Achterhoek droog staan, doch anderzijds er altijd nog een zekere afvoer naar de primaire drains blijft bestaan, neemt de Achterhoek voor wat betreft grondwateronttrekking een positie in tussen enerzijds aride gebieden en anderzijds vochtige gebieden als het Hollandse polderland.

In het eerste geval moet het grondwater van oneindig ver worden aangevoerd en spelen voor de vorm van de afpompingskegel de kD -waarde en de storage-coëfficiënt een grote rol, in het Hollandse polderland daarentegen wordt water vanuit het overvloedig aanwezige open water aangetrokken en speelt naast de kD -waarde de verticale weerstand van de afdekkende, slecht doorlatende bovenlagen een rol.

In de Achterhoek zal bij grondwateronttrekking op den duur infiltratie optreden vanuit de open leidingen. Hierbij zal de vorm van de afpompingskegel voor het belangrijke deel bepaald worden door de kD -waarde en de drainageweerstand.

Voor dit stromingsgeval ontwikkelde ERNST(1966)^{II} de volgende formule

$$\Phi = - \frac{Q}{2\pi kD} K_0 \frac{r}{\sqrt{kDW}} \quad (7)$$

hierin is

Φ de potentiaaldaling op een afstand r van de pompput, in meters.

Q het debiet van de pomp in m^3 /dag.

kD de doorlatendheid in m^2 /dag

- K_0 een Besselse functie van de 1^e soort
 orde nul
- W de drainageweerstand die gelijk is aan $\frac{L^2}{8kD} + L\omega$
- L de gemiddelde afstand tussen de drainerende leidingen
 in meters.
- ω de radiale weerstand dag/m.

Deze formule toegepast op de in par. 2 genoemde gebieden, bij een onttrekking van $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ water per jaar per onttrekkingseenheid, levert de in figuur 9 geschetste afpompingskrommen.

Ook deze formule kan weer toegevoegd worden aan de formules uit par. 2 en par. 3, zodat uiteindelijk met behulp van deze drie deeloplossingen tezamen een voorspelling gedaan kan worden over de grondwaterstand die met een bepaalde kans, in een bepaald gebied, in een bepaalde maand op een bepaalde afstand van een pompstation verwacht mag worden.

In een algemene formule wordt dit:

$$h = \left. \begin{array}{l} h_m + a_1 \sin \frac{2\pi}{T_1}(t+\Phi) + a_2 \sin \frac{4\pi}{T_1}(t+\Phi) \\ \\ h_m - a \sin \frac{2\pi}{T_2}(t+\Phi_2) \end{array} \right\} + \frac{2}{3}(1-k)A_t W_t - \frac{Q}{2\pi kD} K_0 \frac{r}{\sqrt{kDW}} \quad (8)$$

In de figuren 4 t/m 8 is de laatste deeloplossing toegevoegd door middel van een aantal grondwaterstandsbewegingen die op een bepaalde afstand van een pompstation zullen optreden. Hierbij kan dus de grondwaterstandsbeweging uit de beide eerste oplossingen, dus zonder wateronttrekking, beschouwd worden als de gang van de grondwaterspiegel op een "oneindig" grote afstand van het onttrekkingspunt.

5. Landbouwschade door grondwateronttrekking

De schade die tengevolge van grondwaterstands­daling toegebracht zal worden aan het gewas, zal ongeveer evenredig zijn met de mate van grondwaterstands­daling. Echter tot aan het niveau waarop de invloed van de capillaire opstijging voor de wortelzone verwaarloosbaar klein wordt. Daalt de grondwaterspiegel beneden dit niveau, dan zal de schade niet meer toenemen. (D.w.z. we bevinden ons in het horizontale gedeelte van de opbrengst-ontwateringscurve.)

Noemen we de grondwaterstands­daling waarbij de optredende schade maximaal zal zijn h_m (dus het punt waarop de opbrengst-ontwaterings­curve bij benadering horizontaal gaat lopen) en de afstand van het punt waarop deze daling optreedt tot de pompput r_m dan is de schade binnen het gebied met straal r_m reeds maximaal.

Nu bedraagt de maximale schade ongeveer $1/4$ van de normale pro­duktie P . Dus de maximale schade is $1/4 P$, en de totale schade S_1 binnen het gebied met straal r_m :

$$S_1 = \int_0^{r_m} \frac{1}{2} \pi P r dr \quad (9)$$

Is de afstand van het onttrekkingspunt tot aan het gebied waar de potentiaaldalingen te verwaarlozen zijn, gelijk aan r_o , dan is de to­tale schade S_2 in het gebied gelegen tussen de cirkels met straal r_m en r_o :

$$S_2 = \frac{1}{4} P \cdot \frac{Q}{2\pi k D} \cdot \frac{1}{h_m} \int_{r_m}^{\infty} 2\pi r K_0\left(\frac{r}{\sqrt{kDW}}\right) dr \quad (10)$$

Hierbij is r_o op oneindig gesteld, in werkelijkheid zal de invloed van het pompstation op een afstand van 5000 à 7000 m te verwaarlozen zijn. Door deze afstand op oneindig te stellen wordt echter de berekening eenvoudiger zonder dat dit merkbare invloed op het antwoord heeft.

De totale opbrengstdaling voor het gehele, door n pompstations be­invloede gebied:

$$n(S_1+S_2) = n \left[\int_0^{r_m} 2\pi r \cdot \frac{1}{4} P \, dr + \frac{1}{4} P \cdot \frac{Q}{2\pi k D \cdot h_m \cdot n} \int_{r_m}^{\infty} 2\pi r K_0\left(\frac{r}{\sqrt{kDW}}\right) dr \right]$$

$$n(S_1+S_2) = \frac{1}{4} P \left[n\pi r_m^2 + \frac{QW}{h_m} \cdot \frac{r_m}{\sqrt{kDW}} K_1\left(\frac{r_m}{\sqrt{kDW}}\right) \right] \quad (11)$$

uitgedrukt in m^2 waarover de opbrengst nihil is.

Droge omstandigheden (fig. 10 a)

Wanneer het voorjaar en de zomer droger zijn dan normaal en de grondwaterstand een bedrag Δh lager is dan onder gemiddelde omstandigheden, dan neemt het gebied waarbinnen de opbrengstdaling maximaal is toe.

In fig. 10a: r_m wordt r_m^1 , terwijl h_m overgaat in h_m^1 die gelijk is aan $h_m - \Delta h$. Wanneer h_m en Δh bekend zijn dan zijn r_m en r_m^1 af te lezen uit figuur 9.

Voor dit geval gaat formule (11) over in:

$$n(S_1+S_2) = \frac{1}{4} P \left[n\pi r_m^1{}^2 + \frac{QW}{(h_m - \Delta h)} \cdot \frac{r_m^1}{\sqrt{kDW}} K_1 \frac{r_m^1}{\sqrt{kDW}} \right] \quad (12)$$

Hierbij geldt: $W = W(\text{zomer})$.

Natte omstandigheden (fig. 10b)

Komt de grondwaterspiegel ten gevolge van natte meteorologische omstandigheden een bedrag Δh hoger te staan dan de gemiddelde grondwaterstand in de beschouwde periode dan is de schade in het gebied waarin de potentiaaldaling kleiner is dan Δh te verwaarlozen.

r_m^1 is in dit geval uiteraard kleiner dan r_m , terwijl r_0 niet meer op oneindig gesteld mag worden.

In dit geval kan de schade met de volgende formule worden uitge-

drukt :

$$n(S_1+S_2) = n \left[\int_0^{r_m} 2\pi r_m^1 \frac{1}{4} P dr + \frac{1}{4} P \cdot \frac{Q}{2\pi KD \cdot h_m \cdot n} \int_{r_m}^{r_o} 2\pi r K_o \frac{r}{\sqrt{kDW}} dr \right]$$

of

$$n(S_1+S_2) = \frac{1}{4} P \left[\pi r_m^1^2 + \frac{QW}{h_m} \left[\frac{r_m^1}{\sqrt{kDW}} k_1 \frac{r_m}{\sqrt{kDW}} - \frac{r_o}{\sqrt{kDW}} K_1 \frac{r_o}{\sqrt{kDW}} \right] \right] \quad (13)$$

hierin is $W = W(\text{winter})$.

Schadekansen bij een diffuus verdeeld onttrekkingsstelsel

De waterbehoefte tegen het jaar 2000 wordt door de Achterhoek geraamd op $90 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Wanneer deze hoeveelheid diffuus onttrokken wordt, betekent dit voor elk van de in par. 2 genoemde gebieden een onttrekking van $61,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{dag}$. Bij onttrekkingseenheden met een capaciteit van $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ betekent dit een aantal van $n = 4,5$ pompstations per gebied.

Stellen we de grondwaterstandsaling die maximale schade veroorzaakt, op $h_m = 75 \text{ cm}$ dan geven de formules (1), (2) en (3) toegepast op de verschillende gebieden de schadekansen uitgedrukt in m^2 voor de landbouw verloren gebied.

Opgemerkt moet worden dat de maximale schade per gebied niet meer kan zijn dan $1/4$ van de totale oppervlakte van het gebied. Schematiseren we het beeld uit figuur 1 zodat alle gebieden even groot worden, dan is de maximale schade per gebied ongeveer $5 \cdot 10^7 \text{ m}^2$.

Wanneer de berekende schade toch groter is, betekent dit dat de invloed van de grondwateronttrekking zich ook nog doet gevoelen buiten het beschouwde gebied. Bij het vaststellen van de totale schade over de Achterhoek dient dus steeds de totaal berekende schade per gebied in aanmerking te worden genomen, ook al is deze theoretisch te hoog.

Schade in m² totaal verloren opbrengst

overschrijdingskans	gebied				totaal
	I en II	III	IV	V	
5%	10 ⁸	0	0	2,9.10 ⁷	1,3.10 ⁸
10%	1,1.10 ⁸	10 ⁹	3,7.10 ⁸	2,8.10 ⁷	1,5.10 ⁹
30%	3,7.10 ⁷	2,8.10 ⁹	1,3.10 ⁸	2,7.10 ⁷	4,7.10 ⁸
50%	3,7.10 ⁷	1,8.10 ⁸	1,1.10 ⁸	2,2.10 ⁷	3,5.10 ⁸
80%	1,7.10 ⁷	0	1,5.10 ⁷	1,3.10 ⁷	4,5.10 ⁷

Hierbij zijn de gebieden I en II die overeenkomstige geohydrologische eigenschappen bezitten, samengenomen.

Bij grote droogte neemt de schade af omdat hier slechts de schade wordt aangegeven die door wateronttrekking wordt veroorzaakt.

Totale schade in % van een normale opbrengst (75.10³ ha)

overschrijdingskans	schade in ha	% normale opbrengst
10%	1,5.10 ⁵	25%
30%	4,7.10 ⁴	25%
50%	3,5.10 ⁴	25%
80%	4,5.10 ³	6%

De mediaan-schade bedraagt dus ongeveer 15%, wanneer wordt aan- genomen dat de randvoorwaarde h_m 75 cm bedraagt

Wanneer de maximale schade op 30% van de normale opbrengst was gesteld, zoals gedaan is in nota 390, dan was de gemiddelde schade op ongeveer 20% gekomen. Dit resultaat werd ook verkregen met de bereke- ningsmethode uit nota 390 (DE VRIES(1967)^I) waarbij uitgegaan werd van een "gemiddelde Achterhoek" met een kD-waarde van 3000 m²/dag en een drainageweerstand W van 1500 dagen. Het is dus gerechtvaardigd in het

vervolg bij berekeningen over de gehele Achterhoek, van deze gemiddelde Achterhoek uit te gaan.

Invloed van de grootte van de randvoorwaarde h_m op de schade

In par. 3 is er reeds op gewezen dat de schade die met een bepaalde kans optreedt, bij beschouwing van de grondwaterstand over een langere periode (voorjaar + zomer) gepaard gaat met een relatief sterke gemiddelde grondwaterstands daling over deze periode. Daarom is een grondwaterstands daling $h_m = 75$ cm waarbij de maximale schade van 25% optreedt waarschijnlijk te gering. Het is waarschijnlijk beter h_m op 100 cm of zelfs 125 cm te houden.

In de volgende tabel wordt de invloed van dit bedrag op de grootte van de verschillende andere randvoorwaarden gegeven;

overschrijdingskans	Δh	$h_m = 100$ cm		$h_m = 125$ cm	
		r_m	r_o	r_m	r_o
5%	-45 cm	1400 m	∞	850 m	∞
10%	-36 cm	1200 m	∞	700 m	∞
30%	-12 cm	800 m	∞	500 m	∞
50%	0 cm	600 m	∞	450 m	∞
80%	+48 cm	400 m	5000 m	200 m	5000 m
90%	+85 cm	250 m	4000 m	150 m	4000 m

De schade in ha wordt nu als volgt:

overschrijdingskans	$h_m = 100$ cm		$h_m = 125$ cm	
	ha	% normale opbrengst	ha	% normale opbrengst
5%	$3,2 \cdot 10^4$	25%	$1,1 \cdot 10^4$	15%
10%	$1,5 \cdot 10^4$	20%	$1 \cdot 10^4$	13%
30%	$1 \cdot 10^4$	13%	$9,6 \cdot 10^3$	13%
50%	$1 \cdot 10^4$	13%	$7,4 \cdot 10^3$	10%
80%	$6,5 \cdot 10^3$	9%	$6 \cdot 10^3$	8%

Waarschijnlijk is een bedrag van 125 cm voor h_m aanvaardbaar. De gemiddelde schade wordt dan ongeveer 8 à 10% van de normale opbrengst

Vermindering van de verdamping door grondwaterstandsaling

In het bovenstaande is geen rekening gehouden met het feit dat bij grondwaterstandsaling de hoeveelheid vocht die door capillaire opstijging naar de wortelzone wordt vervoerd zal afnemen. Hierdoor zal de verdamping afnemen, hetgeen dus een winst aan vocht betekent.

Volgens ERNST (1967) is deze vochtwinst weer te geven als een daling van de gemiddelde drainageweerstand van 1500 dagen naar 1200 dagen.

Brengen we deze weerstandsverandering in rekening bij het geval $h_m = 125$ cm, dan worden de opbrengstdalingen als volgt:

overschrijdingskans	opbrengstdaling in % van normale opbrengst
5%	12%
10%	11%
30%	10%
50%	9%
80%	7%

Dit betekent een gemiddelde schade van ongeveer 8%. Onder de huidige omstandigheden bedraagt een dergelijke schade ongeveer f 100,- per ha. Over het gehele gebied gerekend waaraan water zal worden onttrokken betekent dit $100 \times 75000 = 7,5$ miljoen gulden schade, of ongeveer 1 cent per m^3 onttrokken grondwater (De huidige prijs van een m^3 water bedraagt voor de consument ongeveer ⁷⁰35 cent, hiervan komt ¹⁶8 cent op rekening van winning en reiniging en ⁵⁴27 cent op rekening van transportkosten.

6. Geconcentreerde onttrekking

In het voorgaande is uitgegaan van een regelmatig over de Achterhoek gespreide onttrekking. Zal men de onttrekking binnen bepaalde gebieden gaan concentreren, dan zal in het algemeen de onttrekking gro-

ter worden dan de afvoer uit het gebied met gevolg dat de grondwater-voorraad aangesproken wordt hetgeen aanleiding zal geven tot steeds sterkere grondwaterstands dalingen.

In dit geval zal dus oppervlaktewater van buiten het gebied moeten worden aangevoerd om het grondwater via beregening en infiltratie aan te vullen. Het voordeel van deze werkwijze is dat tegelijk de landbouwschade die door grondwaterstands daling wordt veroorzaakt kan worden opgeheven.

Figuur 11 toont het patroon van de afvoerintensiteit van het diepe grondwater, d.w.z. grondwater dat onder invloed van de algemene helling van het terrein stroomt naar de primaire drains (IJssel, Oude IJssel, en Twente kanaal).

Uit deze figuur blijkt dat in de Achterhoek twee gebieden zijn te onderscheiden die een aanzienlijke infiltratie vertonen; n.l. het gebied dat gelegen is tussen Doetinchem, Aalten en de Oude IJssel, en het gebied rond Hengelo. (DE VRIES 1967^{II})

In het eerstgenoemde gebied is de infiltratie het gevolg van de toename van de doorlatendheid in de richting van de Oude IJssel. De grondwaterafvoer naar deze rivier bedraagt ongeveer 30 miljoen m³ per jaar. Een deel van dit water is afkomstig uit de Aaltense Slinge en de Keizersbeek, die in dit gebied water verliezen door wegzijging (afvoermetingen van ir J. Bon).

Dit gebied leent zich dus zeer goed voor geconcentreerde onttrekking aangezien reeds 30 miljoen m³ per jaar kan worden gewonnen zonder dat grote schade zal worden toegebracht aan de grondwaterstand. Grotere onttrekking wordt mogelijk wanneer men de infiltratie vanuit de beken verder stimuleert en uitbreidt door het aanleggen van stuwen en het graven van sloten. Een gunstige factor bij het aanleggen van een infiltratiesysteem in dit gebied is het praktisch ontbreken van de fijnzandige deklagen (dekzand) die in het overige deel van de Achterhoek gemiddeld ongeveer 8 m dik zijn.

Van voldoende water kan men zich verzekeren door b.v. een spaarbekken aan te leggen in het dal van de Schaarsbeek ten noord-oosten van Bredevoort. De Schaarsbeek stroomt hier door een oud glaciaal dal dat een breedte heeft van ongeveer 2000 m en waarvan de bodem enkele meters beneden de omgeving is gelegen. (DE VRIES en VAN REES VELLINGA 1967)

Een spaarbekken hier zou een inhoud kunnen krijgen van 10 à 20

miljoen m^3 . De afvoer van de Aaltense Slinge bedraagt ongeveer 40 miljoen m^3 per jaar.

De infiltratie in het gebied rond Zelhem vertoont een ander karakter. De oorzaak ligt hier in het feit dat de helling van het terrein toeneemt, en dus ook de gradient van de grondwaterpotentiaal. Verder bezit het gebied, tengevolge van de knik in het terrein, een lage zomer- en wintergrondwaterstand (fig. 1). Hierdoor vindt de afvoer van het over-
tollige winterneerslagoverschot niet voor een belangrijk deel plaats via de sloten (zoals elders) doch via de diepere ondergrond.

De "infiltratie" is hier dus meer het ontbreken van afvoer naar de sloten, zodat we mogen verwachten dat kunstmatige infiltratie hier minder succesvol zal zijn dan in het gebied bij de Oude IJssel.

Gezien ook de grote drainageweerstand lijkt het waarschijnlijk dat geconcentreerde onttrekking in dit gebied weinig voordelen biedt.

We kunnen concluderen dat in geval van geconcentreerde onttrekking, het gebied langs de Oude IJssel tussen Doetinchem en Dinxperlo in de eerste plaats in aanmerking komt. Temeer daar een groot deel van de toekomstige bevolking zich in dit gebied zal gaan concentreren. Wellicht is het mogelijk om ongeveer 45 miljoen m^3 per jaar uit dit gebied te winnen. Bij een huidige totale onttrekking van ongeveer 30 miljoen m^3 per jaar betekent dit dat men voor de toekomst (het jaar 2000) nog 15 miljoen m^3 per jaar verspreid over de rest van de Achterhoek zal moeten winnen. Hiertoe zou men de capaciteit van de bestaande pompstations kunnen vergroten.

literatuur

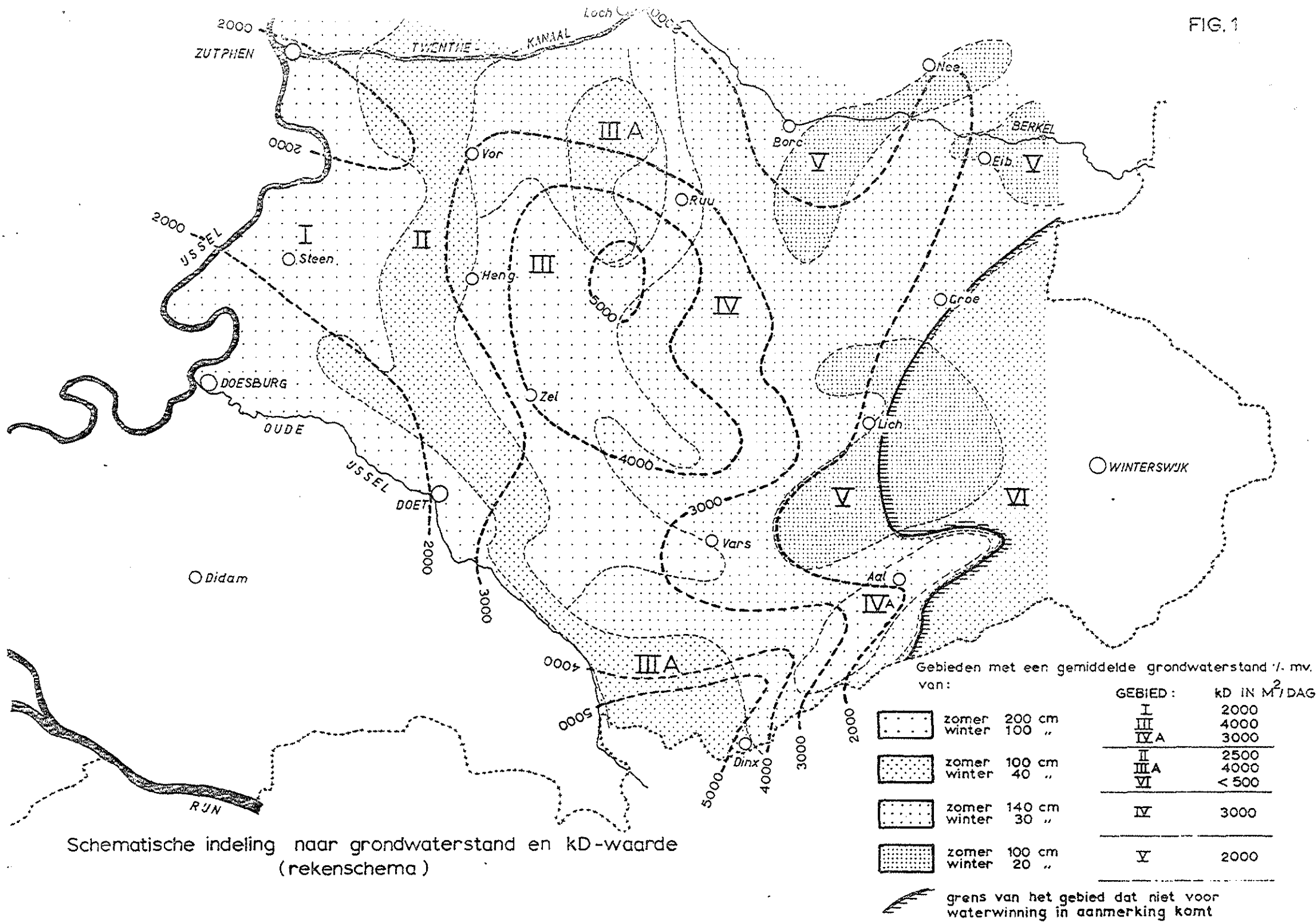
ERNST, L.F., 1966. Determination of storage coefficients from observation of ground-water levels. Symposium on water in the unsaturated zone. Wageningen.

—————, 1966. Wateronttrekking door diepe putten. nota no 353 I.C.W. Wageningen.

—————, 1967. ~~In voorbereiding.~~

Veranderingen in waterverbruik door gewassen op sandgrond door veranderingen in grondwaterstand, nota I.C.W., nr. 421

- REUTER, K.N. en J.J.KOUWE., 1958. De Landbouwwaterhuishouding in de Provincie Gelderland.
C.O.L.N. - T.N.O.
- RIDDER, N.A.DE, 1966. De geo-hydrologische gesteldheid van de Achterhoek.(interimrapport).
nota no 344. I.C.W. Wageningen.
- VRIES, J.J. DE, 1967. De geo-hydrologische gesteldheid van de Achterhoek en de consequenties van de toenemende waterwinning.
nota no 390. I.C.W. Wageningen.
- , 1967. Relatie tussen chemische samenstelling en beweging van het grondwater in de Achterhoek.
nota no 406. I.C.W. Wageningen.
- en E. VAN REES VELLINGA, 1967. Enkele opmerkingen over de richting van de beken in de Gelderse Achterhoek in verband met de ondergrond.
nota no 396. I.C.W. Wageningen.



Schematische indeling naar grondwaterstand en kD-waarde (rekenschema)

Faseverschuiving van het grondwaterniveau
naar ERNST 1966

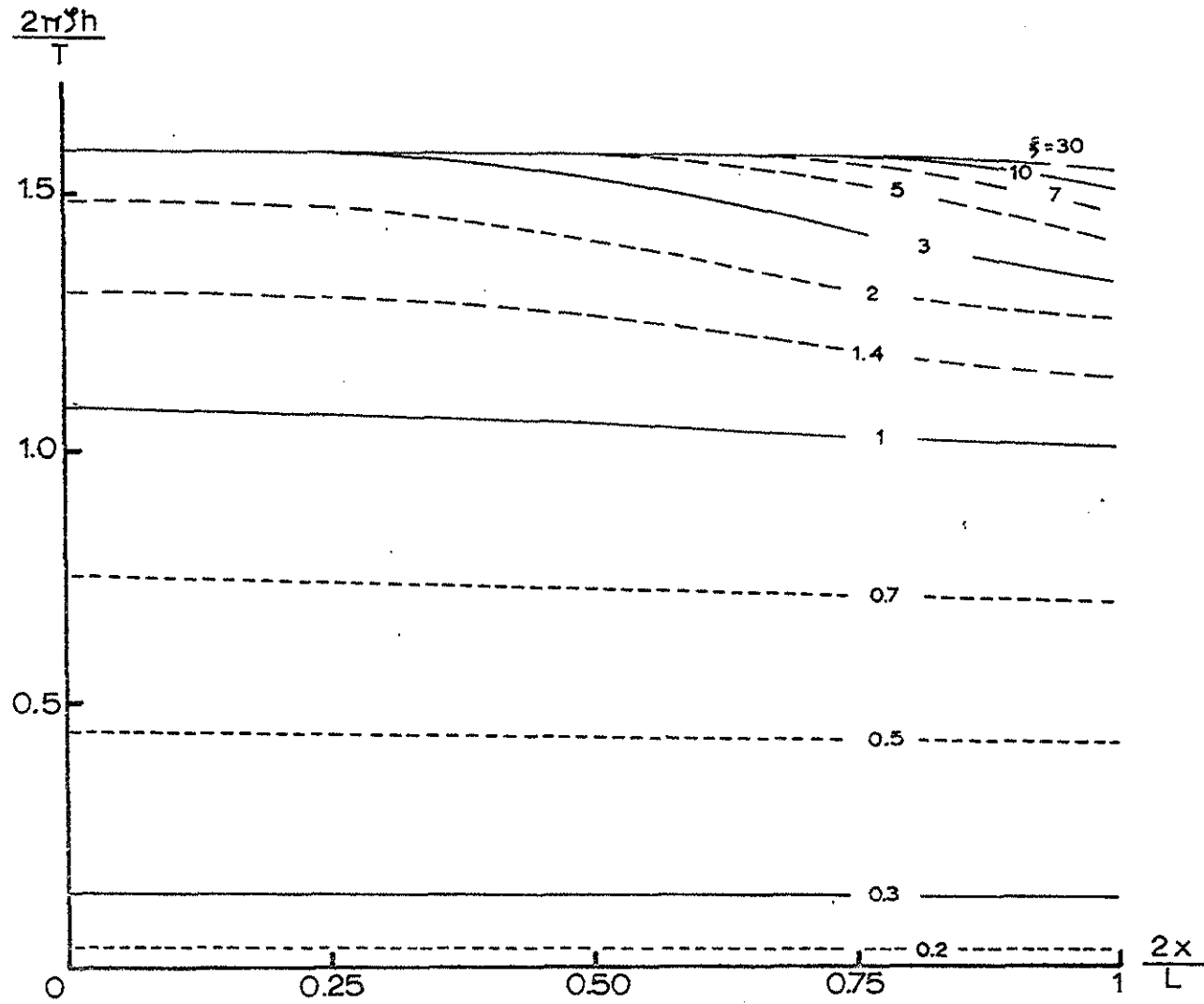
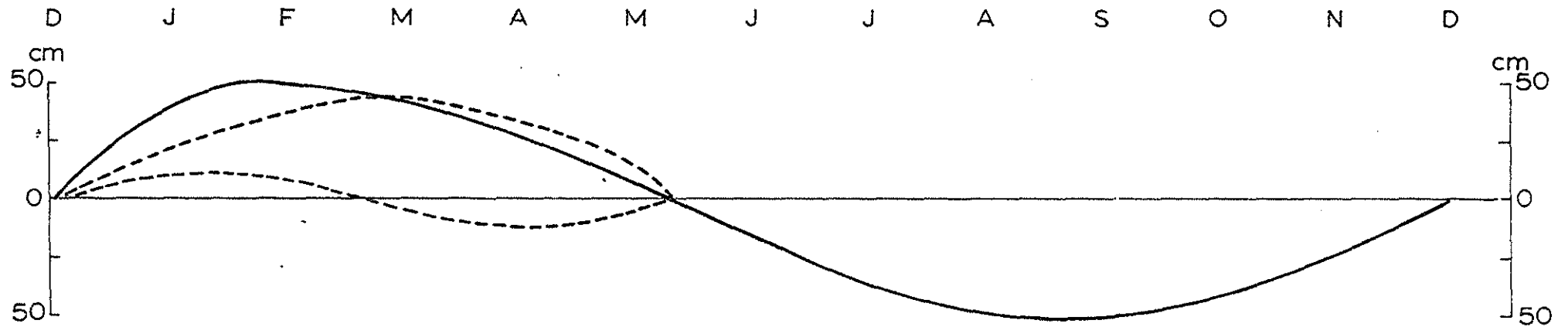


FIG. 3

Grondwaterstandsverloop in gebied I



$$\left. \begin{aligned} a_1 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,3\pi + a_2 \sin \frac{4\pi}{T} \cdot 0,3\pi &= 0,50 \\ a_1 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5\pi + a_2 \sin \frac{4\pi}{T} \cdot 0,5\pi &= 0,44 \end{aligned} \right\} -30 < t < 127$$

$$T = 315 \text{ dagen} \quad \begin{aligned} a_1 &= 0,44 \\ a_2 &= 0,31 \end{aligned}$$

5% 10% 20% 50%

overschrijdingskans

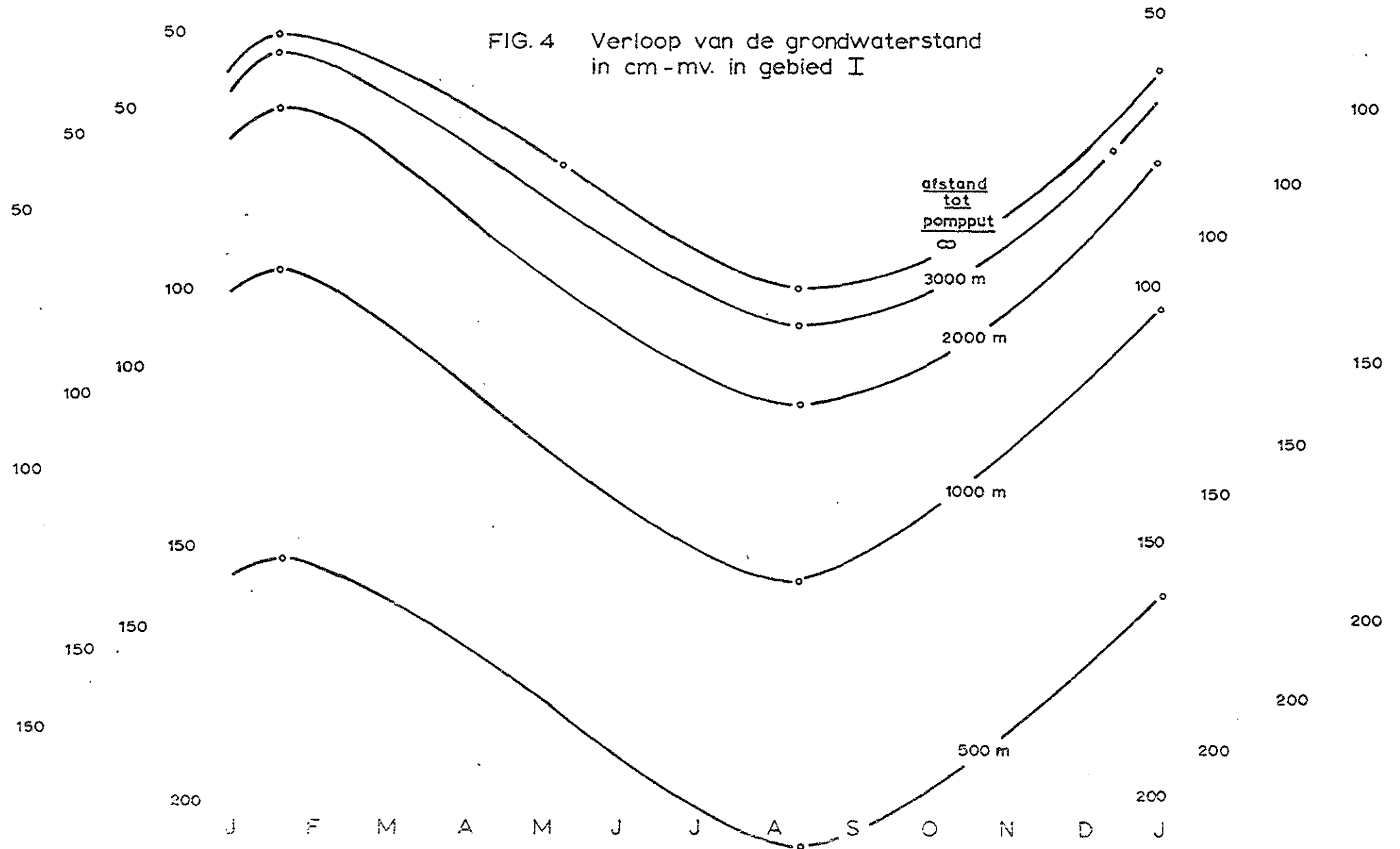
50% 80% 90% 95%

← NAT

DROOG →

De 50%-kansschaal geldt voor het gehele jaar.
De overige schalen gelden slechts voor de
periode van februari t/m juli

FIG. 4 Verloop van de grondwaterstand
in cm-mv. in gebied I



5% 10% 20% 50%

overschrijdingskans

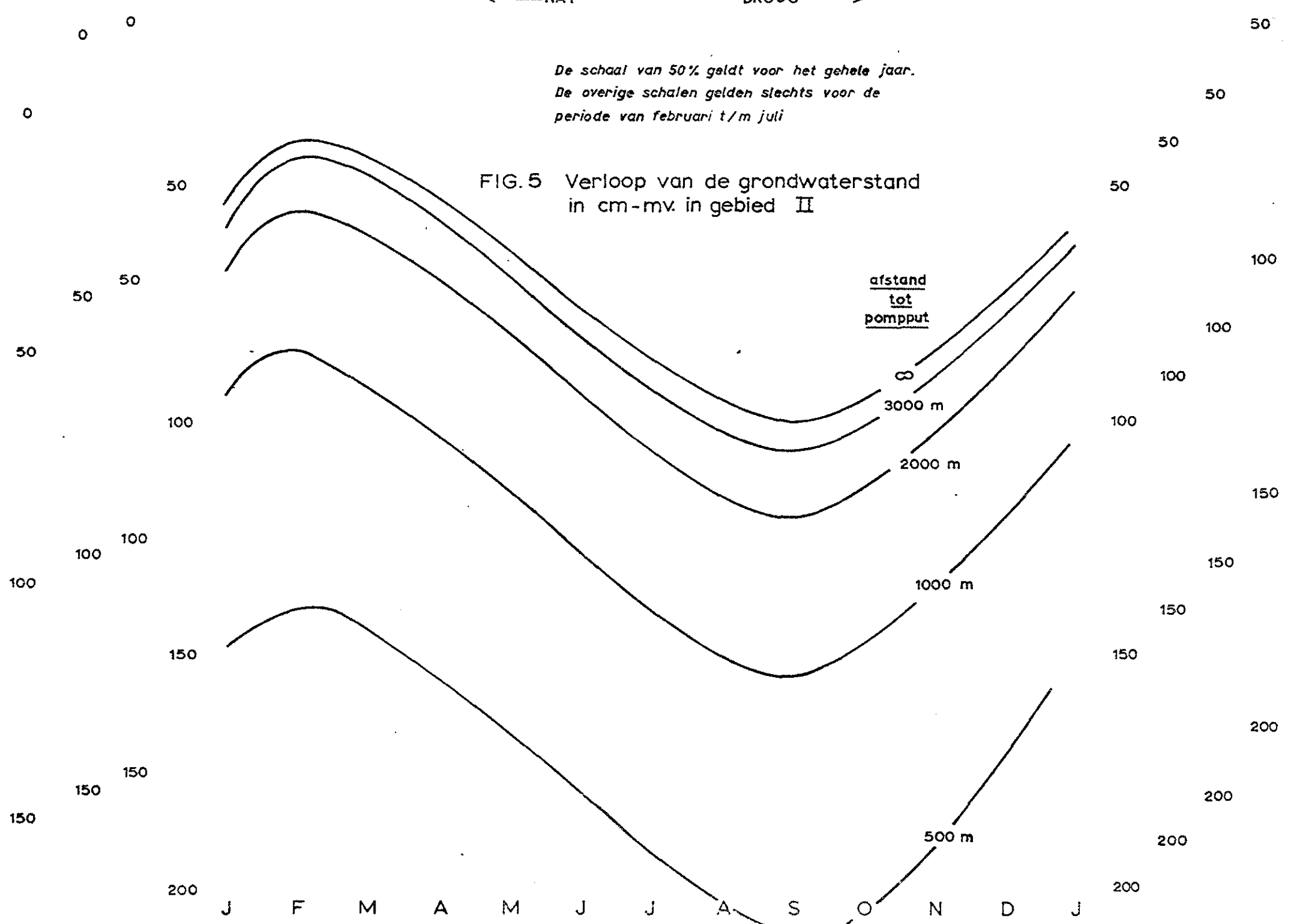
50% 80% 90% 95%

← NAT

DROOG →

De schaal van 50% geldt voor het gehele jaar.
De overige schalen gelden slechts voor de
periode van februari t/m juli

FIG.5 Verloop van de grondwaterstand
in cm-mv. in gebied II



5% 10% 20% 50%

overschrijdingskans

50% 60% 90% 95%

← NAT

DROOG →

50

De schaal van 50% geldt voor het gehele jaar.
De overige schalen gelden slechts voor de
periode van februari t/m juli

50 100

50 200

100 150

100 250

150 200

150 300

200 250

200 350

250 300

250 400

300 350

300 450

350 400

350

0

50 150

0

0 100 200

50

50 150 250

250

100 200 300

300

150 250 350

350

afstand
tot
pompput

∞

4000 m

2000 m

1000 m

500 m

FIG. 6 Verloop van de grondwaterstand
in cm - mv. in gebied III

J F M A M J J A S O N D J

5% 10% 20% 50%

overschrijdingskans

50% 80% 90% 95%

← NAT

DROOG →

De schaal van 50% geldt voor het gehele jaar.
De overige schalen gelden slechts voor de
periode van februari t/m juli

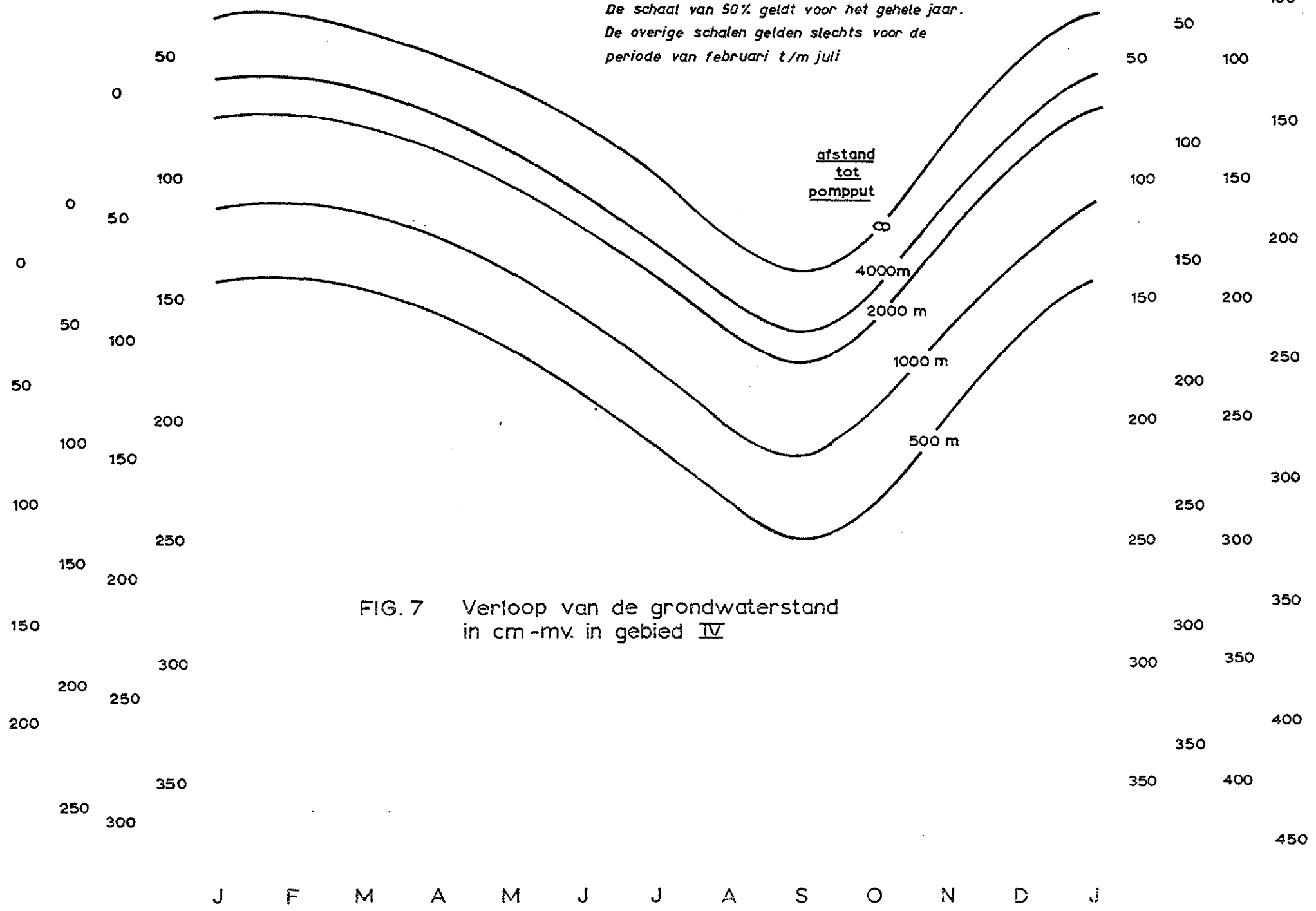


FIG. 7 Verloop van de grondwaterstand
in cm-mv. in gebied IV

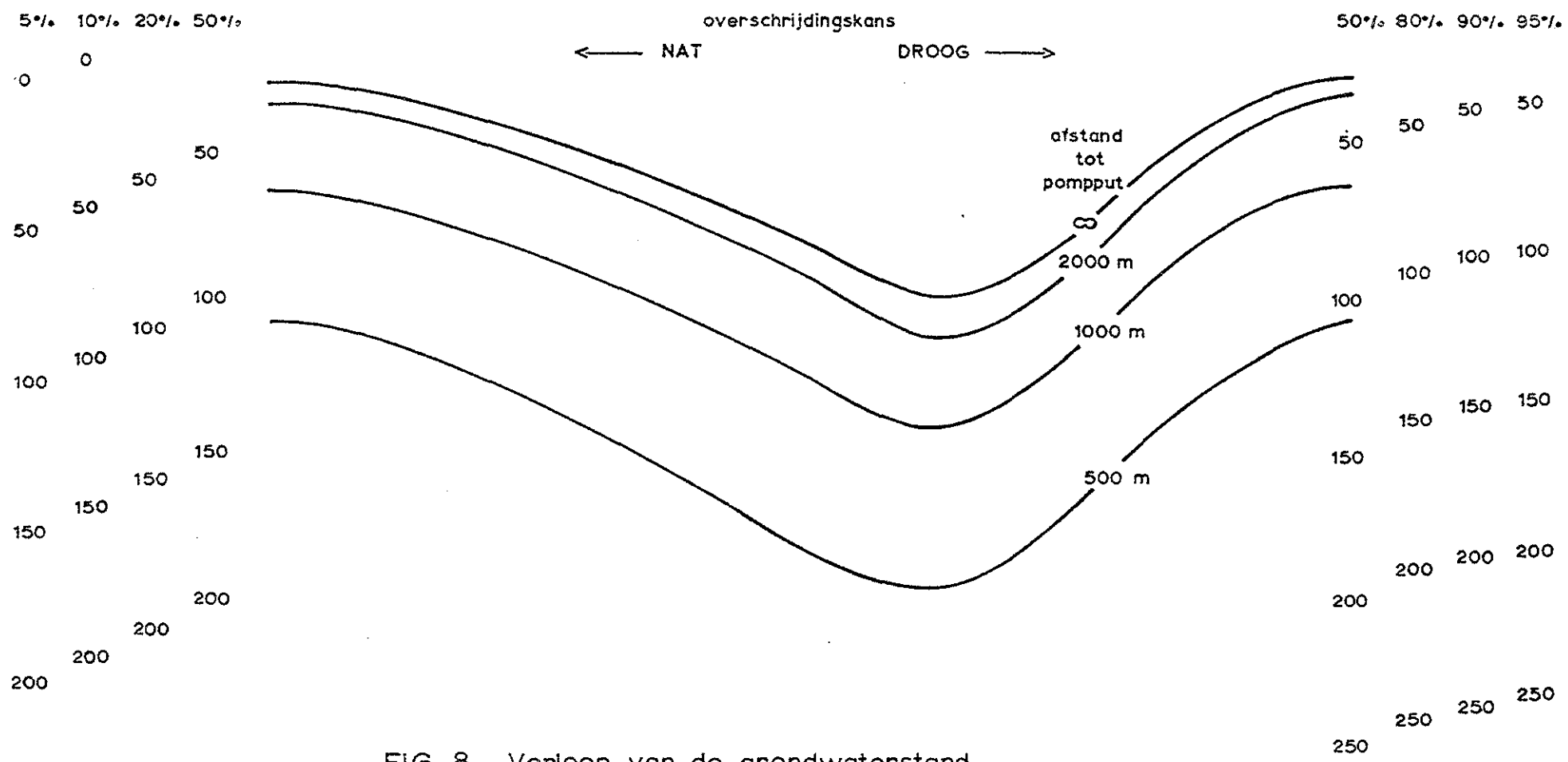


FIG. 8 Verloop van de grondwaterstand in cm-mv in gebied V

*De schaal van 50% geldt voor het gehele jaar.
De overige schalen gelden slechts voor de periode van februari t/m juli*

J F M A M J J A S O N D J

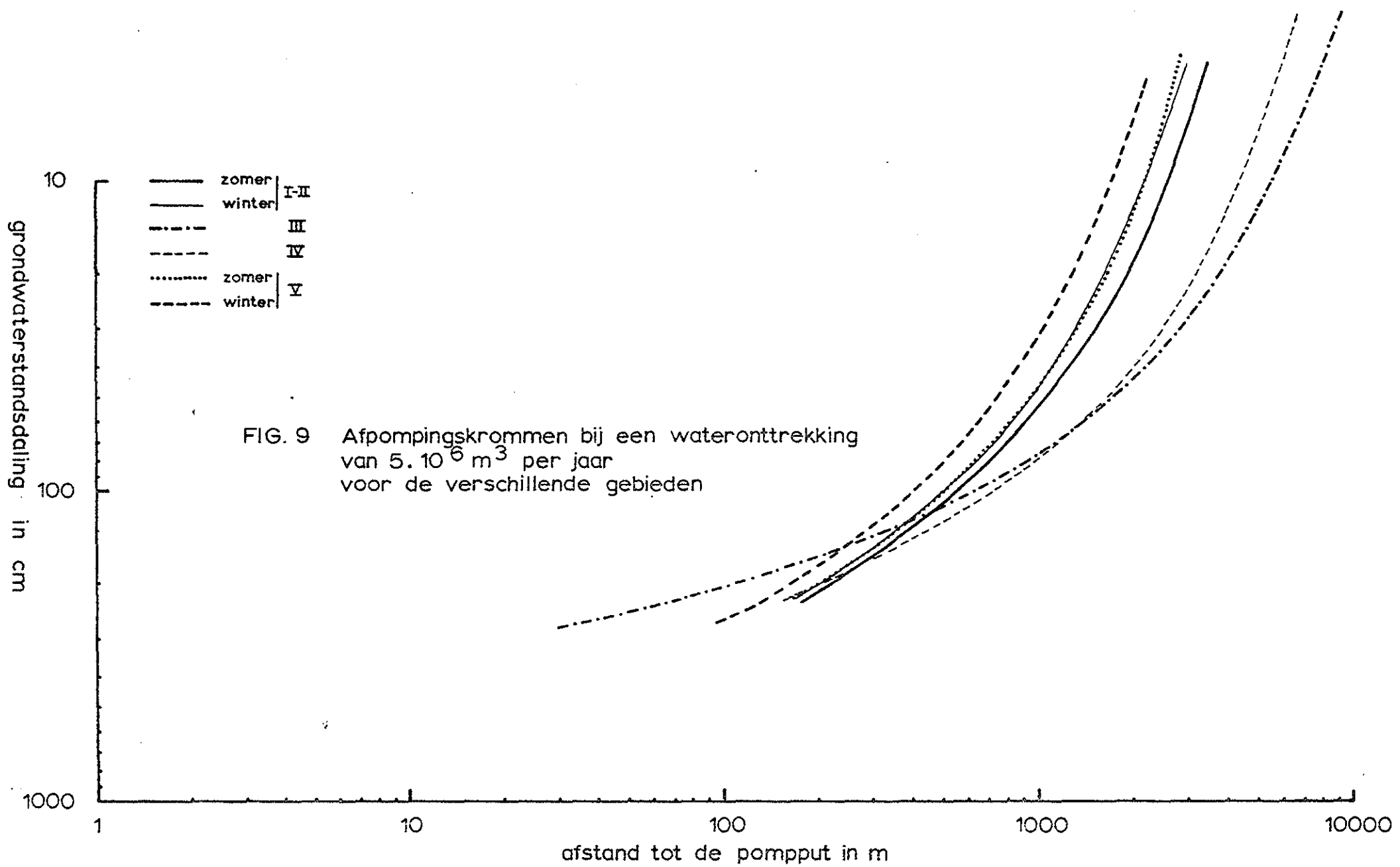
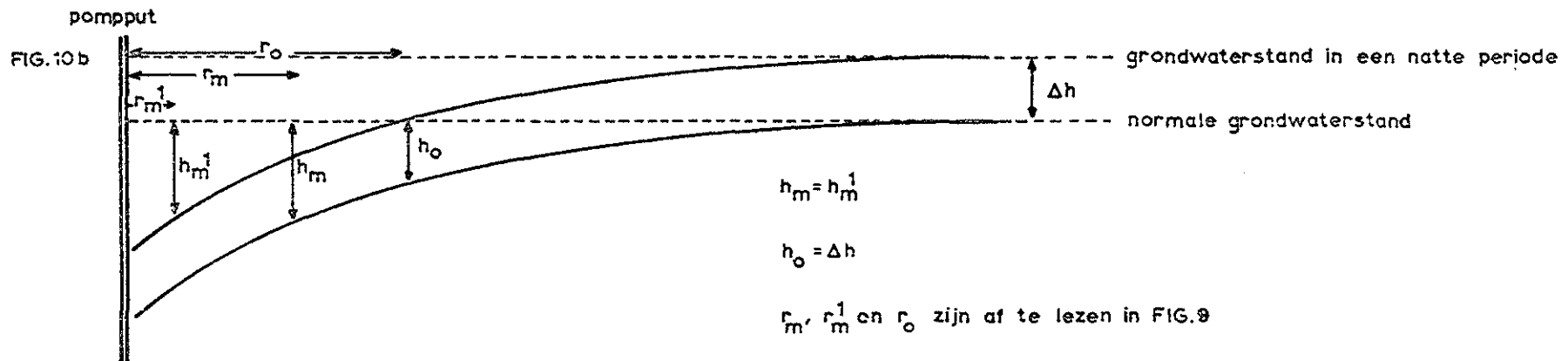
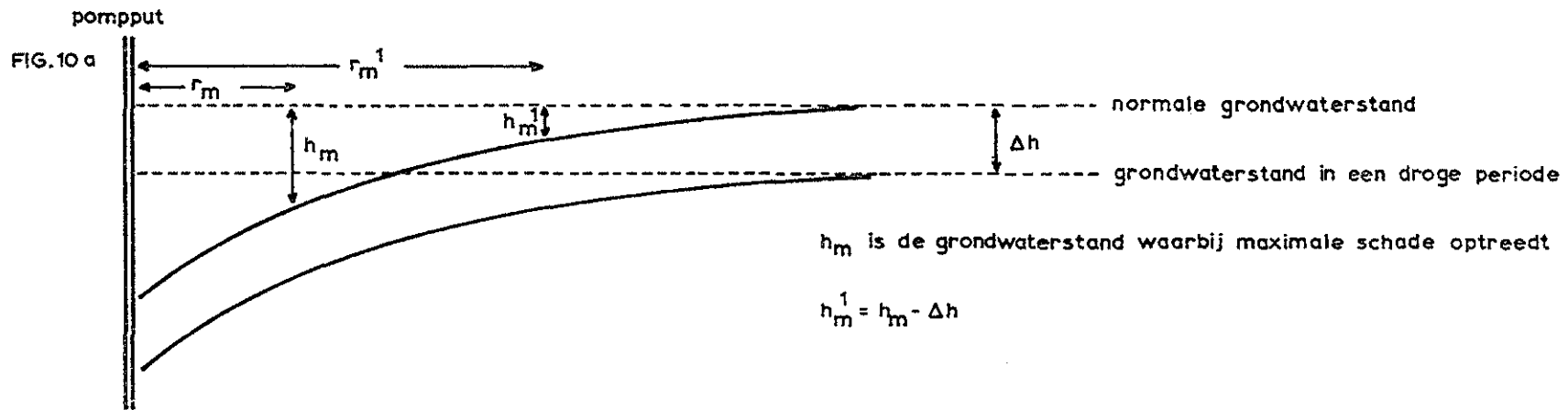


FIG.10 De invloed van perioden die droger of natter zijn dan normaal, op de lengte van de straal r_m van het gebied rond de pompput, waarbinnen de schade maximaal is ($h > h_m$)



Het patroon van de grondwaterafvoer onder invloed van de algemene helling van het terrein

