CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING

NOTA 353, d.d. 16 september 1966

Wateronttrekking door diepe putten

dr. L. F. Ernst

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, 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 onderzoek nog niet is afgesloten.
Aan gebruikers buiten het Instituut wordt verzocht ze niet in publikaties te vermelden.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking.

1. Inleiding

Bij een berekening van de grondwaterstandsverlaging bij wateronttrekking door diepe putten mag men de algemene hydrologische eigenschappen van het betrokken gebied niet buiten beschouwing laten. Voeding en drainage zijn vrijwel altijd van belang. Het ontbreken van voeding leidende tot een totale uitputting van het gebied komt slechts zeer zelden voor. Een dergelijke eenvoudige randvoorwaarde leidt echter tot handzame formules, vooral als het gebied oneindig groot en homogeen doorlatend wordt verondersteld. In vele gevallen is dit aanleiding geweest om een dergelijke veronderstelling voor een beperkte tijdsduur aanvaardbaar te achten en dus de bedoelde formules wel te gebruiken maar slechts voor kleine waarden van t.

Een tegenovergesteld geval vindt men waar voeding en drainage zo intensief zijn dat van een constante grondwaterspiegel mag worden gesproken. Veronderstelt men daarbij, dat de samendrukbaarheid van de grond te verwaarlozen is - wat bij een wat langer durende grondwateronttrekking in Nederland altijd het geval is - dan is de toestand stationair of quasi stationair. Veronderstelt men bovendien, dat de grond bestaat uit een slecht doorlatende laag boven een goed doorlatende laag, dan zijn de formules van DE GLEE geldig.

Voor een meer algemene beschouwing van de niet-stationaire toestanden bij wateronttrekking door diepe putten, kan men de volgende indeling gebruiken:

1. Gebieden met weinig drains. Ligging van de putten op grote afstand van deze drains, wat inhoudt dat we hier (voor een beperkte tijd) de boven aangeduide toestand zonder voeding kunnen aannemen (MUSKAT, 1934; THEIS, 1935)
2. Gebieden met veel drains

   a. Alle drains gelijkwaardig.

   b. Drains te onderscheiden in primaire, secundaire, tertiaire, enz.

2. Gebieden met weinig drains

Indien er een constante wateronttrekking is, kunnen we de gevraagde oplossing zien als een superpositie van twee deeloplossingen. De eerste deeloplossing dient te voldoen aan de oorspronkelijke toestand zonder oppompen van water (in eerste benadering dus een jaarlijks periodieke grondwaterstandsfluctuatie). De tweede deeloplossing moet vervolgens alleen de invloed van het pompen geven, voor grote t dus een sterke uitputting met grote grondwaterstandsdalingen rondom de put of wel een volledige voeding vanuit de al of niet op grote afstand gelegen drains. In het laatste geval, wordt voor grote waarden van t een evenwichtstoestand benaderd, zodat een tweede deeloplossing onafhankelijk van t aanvaardbaar kan zijn. De toelaatbare verwaarlozingen zijn in grootte mede afhankelijk van de nauwkeurigheid waarmee de toekomstige fluctuaties door seizoen- en weersveranderingen kunnen worden voorspeld.

Voor de grondwaterstandsdaling in een afgesloten cirkelvormig gebied, waarbinnen door een centrale put van kleine diameter een constante hoeveelheid water wordt onttrokken te beginnen met een horizontale toestand op t = o, werd door MUSKAT de volgende oplossing gegeven (zie ook MUSKAT, 1937, p. 630 e.v.):

$$h = \frac{Q}{2\pi kD}\left[\frac{3}{4} + \log\frac{r}{R} - \frac{1}{2}\left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{2kDt}{\mu R^2} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{J_o\left(\alpha_n \frac{r}{R}\right) e^{-\alpha_n^2 \frac{kDt}{\mu R^2}}}{\alpha_n^2 J_o^2(\alpha_n)}\right]$$

met Q = debiet van de pompput

kD = geleidend vermogen van het homogene pakket voor horizontale grondwaterstromingen

μ = bergingscoëfficiënt

R = straal van het gebied rondom de pompput

J_p = Bessel-functie van de eerste soort van de orde p

r = straal v.d. centrale put.

α_n volgt uit $J_1(\alpha_n) = o$ α_1 = eerste pos. wortel α_2 = tweede post. wortel enz.

Voor grote waarden van t nadert de oneindige reeks tot nul. De tweede term duidt op een eenparig dalende beweging voor deze waarden van t

(zie fig. 1). Bovenstaande formule zonder de laatste twee termen is geldig in het stationaire geval met in het gehele gebied een gelijke voeding.

Voor kleine waarden van t vindt men uit bovenstaande formule dat aan de rand van het gebied nog vrijwel geen daling van h is ontstaan. Dan is de waarde van R nog van geen invloed en mag men ook de bekende formule gebruiken behorende bij het eenvoudigere geval met $R = \infty$ (THEIS, 1935):

$$h = -\frac{Q}{4\pi kD}\int_{\frac{\mu r^2}{4kDt}}^{\infty}\frac{e^{-w}\,dw}{w} = 0{,}5772 + \ln u - + \frac{u^2}{2.2!} - \frac{u^3}{3.3!} + \ldots\ldots\ldots$$

$$\text{met } u = \frac{\mu r^2}{4kDt}$$

A. Vervolgens kan hier nog worden gewezen op het bezwaar, dat in eerstgenoemde formule de grootheid Q niet onafhankelijk kan worden gezien van R. Voert men in ter substitutie: $Q = \pi R^2 P$, zodat onder P dient te worden verstaan de gemiddelde wateronttrekking per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid, dan volgt hieruit:

$$\frac{\mu h}{Pt} = \frac{\mu R^2}{2kDt}\left[\frac{3}{4} + \log\frac{r}{R} - \frac{1}{2}\left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{2kDt}{\mu R^2} + 2\sum\ldots\ldots\right]$$

Hiermee is een betrekking verkregen, welke de verhouding van de grondwaterstandsdaling h op de tijd t tot de gemiddelde waterontrekking tot dat tijdstip (Pt) geeft als functie van de parameters r/R en $kDt/\mu R^2$ (zie fig.2).

B. Een duidelijk beeld van de relatieve verdeling van de wateronttrekking kan worden gegeven door figuur 1 in iets andere vorm te brengen, namelijk met $(r/R)^2$ lineair uitgezet langs de as (zie fig. 3). Bij indeling van het betrokken gebied in een binnen- en een buitengebied gescheiden door een cirkel met straal R_{bi} (dus oppervlakken respectievelijk πR_{bi}^2 en $\pi R^2 - \pi R_{bi}^2$) is hieruit zeer eenvoudig af te leiden tot welke waarden van t de winning grotendeels in het binnengebied gebeurt (zie fig. 4).

3. Gebieden met een groot aantal gelijkwaardige drains.

De voorafgaande behandeling kan ook worden toegepast op een gebied met veel drains namelijk door te veronderstellen, dat in het voorjaar ($\approx$1 april, begin van het seizoen met $\bar{E} > \bar{R}$) de toestand met $Q \neq o$ vrijwel niet afwijkt van de oorspronkelijke toestand met $Q = o$, dat op deze tijd de afvoer naar de drains in hoofdzaak tot stilstand komt en er dus een horizontale grondwaterspiegel is welke verder alleen nog kan dalen door de wateronttrekking uit de diepe put. Met betrekking tot de grondwaterstandsverlaging zijn deze veronderstellingen voor een deel te gunstig voor een deel te ongunstig. Op elke tijd en dus ook omstreeks 1 april is er een zekere verlaging van h te verwachten. Gedurende de zomer houdt de drainage door de primaire leidingen (beken) niet op en zelfs mag men de mogelijkheid niet uitsluiten dat voor een deel van de tijd de secundaire drains (grote sloten) nog afvoer geven.

Een betere benadering van dit probleem zou kunnen worden gevonden in de oplossing van de volgende differentiaalvergelijking:

$$kD \left(\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r}\right) = \mu \frac{\partial h}{\partial t} + A(h) - N(t)$$

met $A(h)$ = wateronttrekking door drains
$N(t)$ = overtollige neerslag

Zelfs in het eenvoudigste geval dat $A(h)$ een lineaire functie van h is, is er geen eenvoudige oplossing bekend. Gesteld immers dat gegeven is $AW = h - h_o$, dan zal men er toch mee rekening moeten houden, dat voor zeer lage h er geen drainage is. Voor $h > h_o$ en $h < h_o$ zouden dus twee oplossingen moeten worden gezocht van bovenstaande differentiaalvergelijking respectievelijk met de gegeven lineaire functie voor A en met weglating van A. De term $N(t)$ mag in geen van beide gevallen worden weggelaten, daar hiervan de variabele grens $r(h_o, t)$ afhangt, waarbij genoemde twee oplossingen een gemeenschappelijke randvoorwaarde hebben.

Bij de stationaire toestand met als randvoorwaarde $h = h_o$ op een gegeven binnenrand R_{bi} behoort wel een eenvoudige oplossing. Immers na weglating van de term $\mu\, \partial h/\partial t$ en vervanging van $N(t)$ door een constante, is onmiddellijk in te zien dat in het buitengebied met $h > h_o$ de oplossing uit Besselfuncties kan worden samengesteld:

$$h = h_o + \bar{N}W \left\{ 1 - \frac{K_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) I_o\left(\frac{r}{\sqrt{kDW}}\right) - I_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) K_o\left(\frac{r}{\sqrt{kDW}}\right)}{K_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) I_o\left(\frac{R_{bi}}{\sqrt{kDW}}\right) - I_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) K_o\left(\frac{R_{bi}}{\sqrt{kDW}}\right)} \right\}$$

Voor de opbrengst Q van de put vindt men:

$$\frac{Q}{\bar{N}kDW} = \pi \left(\frac{R_{bi}}{\sqrt{kDW}}\right)^2 - \frac{2\pi R_{bi}}{\sqrt{kDW}} \times \frac{K_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) I_1\left(\frac{R_{bi}}{\sqrt{kDW}}\right) - I_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) K_1\left(\frac{R_{bi}}{\sqrt{kDW}}\right)}{K_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) I_o\left(\frac{R_{bi}}{\sqrt{kDW}}\right) - I_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right) K_o\left(\frac{R_{bi}}{\sqrt{kDW}}\right)}$$

Oplossing van R_{bi} bij gegeven waarden voor Q en andere parameters is in het algemeen het eenvoudigst te doen door het maken van een grafieke voorstelling.

Indien men aanneemt dat voor $h < h_o$ de peilen van het water in de open leidingen constant zullen blijven (h_o) en er van grote afstand een aanvoer van water zal zijn, dat in de omgeving van de pompput door de bodem van de open leidingen zal infiltreren, dan zijn de gegeven formules verder te vereenvoudigen.

$$h = h_o + \bar{N}W + \frac{Q}{2\pi kD} \left\{ \frac{K_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right)}{I_1\left(\frac{R}{\sqrt{kDW}}\right)} I_o\left(\frac{r}{\sqrt{kDW}}\right) - K_o\left(\frac{r}{\sqrt{kDW}}\right) \right\}$$

Wordt hieraan bovendien nog de veronderstelling toegevoegd dat $R = \infty$, dan volgt tenslotte een formule die grote overeenkomst vertoont met een bekende formule welke bij pompproeven dikwijks wordt gebruikt (DE GLEE, 1930):

$$h = h_o + \bar{N}W - \frac{Q}{2\pi kD} K_o\left(\frac{r}{\sqrt{kDW}}\right)$$

drainbuizen $W \approx 100$ dagen
sloten 300 m afst. $W \leq 500$ "
beken, sloten met weinig invloed $W \geq 3000$ "

4. Drainage door ongelijkwaardige leidingen

Voor een groot deel van Nederland is het als een normaal verschijnsel te beschouwen, dat bij dalende grondwaterstand een toenemend aantal drainage leidingen droog komt te staan. De kleinste leidingen (drainbuizen, greppels) zijn het grootst in aantal (beter gezegd in lengte per oppervlakte-

eenheid), het hoogste gelegen en daardoor het eerst droogvallend. De grootste leidingen (rivieren, beken) liggen in het algemeen het laagste, waardoor zelfs in zeer droge zomers meestal nog een zekere afvoer doorgaat.

Hoewel bij de behandeling van drainage problemen in het algemeen een zekere indeling, bijvoorbeeld in primaire, secundaire, tertiaire leidingen enz. wel nuttig zou kunnen zijn, is aan inventarisatie en classificatie tot nu toe nog slechts weinig aandacht gegeven. Hoe dit ook zijn mag, het is in ieder geval wel duidelijk dat onder bedoelde omstandigheden van een constante weerstand W geen sprake kan zijn.

Op de middelhoge zandgronden van Nederland vindt men van winter tot zomer zeer grote variaties in W. Enkele metingen in de Achterhoek kunnen hiervan een voorbeeld geven. De resultaten en conclusies vindt men in figuur 5 en de volgende tabel.

Toestand	Grondwaterstand onder maaiveld h	Opbolling Δh	Drainafstand L	Radiale weerstand w	$W = \frac{L^2}{8kD} + Lw$	Afvoer A
1	- 15 cm	40 cm	150 m	1 dg/m	150 dagen	2,7 mm/dag
2	- 40	20	250	0,9	225	0,9
3	- 110	20	1200	0,5	670	0,3
4	- 160	60	7000	0,2	4000 dagen	0,15

$kD = 2500\ m^2/dag$ Waarden voor w in grootte-orde overgenomen uit onderzoek Lollebeekgebied en Boven-Dommelgebied

Voor algemene orientatie kan hieraan worden toegevoegd, dat bij drainage door buizen gelegd op 1 meter onder maaiveld met een drainafstand overeenkomstig de gebruikelijke drainage-criteria (BOUMANS, 1953) een waarde van W tussen 70 en 100 dagen bij de voorgestelde grondwaterstand kan worden verwacht. Voor de hoge zandgronden in zuidelijk Nederland, waar buiten de grote beken weinig open leidingen zijn, zijn veel hogere waarden te verwachten ($W \approx 2000$ dagen), zoals kon worden afgeleid uit grondwaterstandsmetingen en de in grootte-orde bekende gemiddelde jaarlijkse afvoer (ERNST, 1958; zie ook Boven-Dommel-rapport).

De uitkomsten in bovenstaande tabel geven ondersteuning aan wat reeds op grond van vrijwel uitsluitend theoretische beschouwingen kon worden aangetoond. Of men er de voorkeur aan geeft het grafische verband tussen A en h als een gebroken rechte lijn voor te stellen (ERNST, 1956) of als een vloeiende kromme (fig. 6) kan zowel afhangen van de hydrologische terreingesteldheid als van de wenselijkheid zekere rekentechnieken toe te passen. Hoewel plotselinge overgangen, zoals in het eerste geval gesuggereerd, weinig waarschijnlijk lijken, is er nog te weinig omtrent de terreingesteldheid bekend om hier reeds vergaande uitspraken te doen.

Bij differentiaal-vergelijkingen, welke een niet-lineaire relatie A (h) bevatten zijn in het algemeen dus geen eenvoudige oplossingen te verwachten zelfs in het geval dat de wateronttrekking uit putten buiten beschouwing wordt gelaten (Q = 0), hoewel de onderhavige differentiaal-vergelijking dan in de volgende eenvoudige vorm kan worden geschreven:

$$\mu \frac{dh}{dt} = N\ (t) - A\ (h)$$

Door deze vergelijking als een differentie-vergelijking te schrijven komt men echter wel snel en zonder moeite tot een uitkomst. Voor het geval, dat $N = \bar{N} + N_a \cos 2\pi t/T$ met $\bar{N}$ = 0,5 mm/dag, N_a = 1 mm/dag, T = 360 dagen, μ = 0,1 en A (h) als in figuur 6, is met behulp van laatstgenoemde methode de periodieke oplossing gevonden, welke staat afgebeeld in figuur 7. Hieruit kan men onmiddellijk afleiden de combinatie van jaargemiddelden $\bar{A}$ en $\bar{h}$, welke voor Q = 0 bij elkaar behoren (zie driehoekje in fig. 7). Van te voren was reeds bekend $\bar{A} = \bar{N}$ = 0,5 mm/dag. In figuur 2 kan men aflezen: $\bar{h}$ = - 87 cm.

Voor positieve waarden van Q zal men in elk punt andere, lagere waarden voor $\bar{h}$ krijgen. Veronderstelt men echter daarbij dat de fluctuatie om dit gemiddelde niet verandert, dan kan de betrokken differentiaal-vergelijking worden teruggebracht tot de volgende vorm, daar de aangenomen fluctuatie het tijdsafhankelijke deel volledig bevat en achteraf kan worden toegevoegd aan een eerste deeloplossing:

$$kD \left(\frac{d^2\bar{h}}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\bar{h}}{dr}\right) = \bar{A}\ (\bar{h}) - \bar{N}$$

Hoe $\bar{A}$ van $\bar{h}$ afhangt bij bovengenoemde veronderstelling, kan eenvoudig uit de figuren 6 en 7 worden afgeleid. Wordt aan de kromme in figuur 7 door

evenwijdige verschuiving een ander gemiddeld niveau gegeven, dan kan in de bovenste kromme van figuur 6 punt voor punt de bijbehorende waarde van A worden opgezocht en daaruit volgt dan voor dat geval onmiddellijk de waarde van $\bar{A}$. Na enkele herhalingen verkrijgt men zo een aanvaardbare benadering van de betrekking $(\bar{A}, \bar{h})$.

De veronderstelling dat de fluctuatie van h niet of niet noemenswaardig verandert, kan op de volgende manier worden ondersteund. De berekening van de bovenste kromme in figuur 7 is namelijk herhaald, nu met $\bar{N}$ = 0,15 mm/dag terwijl alle andere parameters onveranderd zijn overgenomen. Nu werd als resultaat de onderste kromme uit figuur 7 verkregen. De afwijking van de ingevoerde sinus is evenals in het vorige geval zeer klein. De fluctuatie is 10% groter geworden. Bij een 10% grotere bergingscoëfficiënt, hetgeen zeker niet kan worden uitgesloten bij een 80 cm diepere grondwaterstand, zou de verandering in de fluctuatie vrijwel nul zijn geweest. Zolang men niet over meer gegevens met betrekking tot de bergingscoëfficiënt beschikt, zal men de kleine onzekerheid op dit punt moeten laten bestaan.

Bovendien moeten hier nog twee opmerkingen worden gemaakt. Het transport van het ^{water} in de open leidingen moet enige verandering ondergaan: minder drainage op grote afstand van de pompput en voeding van het grondwaterpakket dicht erbij. Verder valt te verwachten dat door de lagere grondwaterstand de planten in de zomer gemiddeld iets minder grondwater zullen onttrekken. Beide effecten veroorzaken een iets kleinere fluctuatie dan tevoren berekend.

Hiermee is geen volledig bewijs gegeven van de toelaatbaarheid van genoemde veronderstelling, daar gebruik is gemaakt van enkele bijzondere gegevens, namelijk het verband tussen A en h voor stationaire toestanden volgens figuur 6 en $N = \bar{N} + N_a \sin 2\pi t/T$.

Als belangrijkste probleem blijft dus over de oplossing van laatstgenoemde differentiaal-vergelijking. In het algemeen kan men bij willekeurige $\bar{A}$ $(\bar{h})$ ook hier weer de differentie-methode toepassen. De resultaten zullen dan in grafische voorstellingen moeten worden vastgelegd (bij een kwadratische formule in het rechterlid slechts 1 grafiek). Indien men echter $\bar{A}$ $(\bar{h})$ bij benadering door een lineaire functie vervangt (zie bijv. kromme tussen Δ en ✱ in fig. 6) dan kan men vervolgens weer de laatste drie formules uit paragraaf 3 toepassen. Terwijl in paragraaf 3 door de verondersteld grote dichtheid van het net van open leidingen met betrekkelijk kleine waarden van W kan worden gerekend moeten hier veel grotere waarden van W worden verwacht. Zo vindt

men bijvoorbeeld uit het laagste deel van de kromme in figuur 6 als uitkomst: $W = \Delta\bar{h}/\Delta\bar{A} = 3000$ dagen.

5. Vermindering van grondwaterstandsdaling door opstuwing van sloten

Indien een opstuwing van sloten ter vermindering van de grondwaterstandsdaling zal worden toegepast dan vermoedelijk alleen in de zomer. Het effect van beide ingrepen - het gebruik van de putten en de opstuwing van de sloten - kan het beste worden onderzocht door een en ander afzonderlijk te berekenen.

Het lijkt een redelijke en goed hanteerbare veronderstelling de bovenste kromme uit figuur 7 opnieuw te gebruiken boven een zekere nader te bepalen grondwaterstand. Beneden die grondwaterstand kan men een beheersing van het slootpeil aannemen. De streeplijn in figuur 7 geeft hiervan een voorbeeld; bij grondwaterstanden dieper dan - 90 cm een slootpeil constant op - 110 cm. Door opnieuw de differentie-methode toe te passen werd hierbij de gestreepte kromme afgebeeld in figuur 7 gevonden. Deze figuur toont vanaf het midden van de zomer een vrij belangrijk verschil met de oorspronkelijke toestand: in augustus een 20 cm hogere grondwaterstand in september zelfs 30 cm hoger.

Hoewel volgens dit voorbeeld toch maar een betrekkelijk klein aantal sloten met water gevuld zal blijven (zie tabel en fig. 5) is de invloed ervan dus niet te verwaarlozen. Ook de gemiddelde waarde van W zal aanzienlijk veranderen. De zeer lage waarden welke in de tabel voorkomen, gelden voor toestanden met meer of minder wateroverlast, wat voor een toekomstige toestand niet als kenmerkend is te beschouwen. Zonder uitbreiding van het slotenstelsel is dus voor een toekomstige toestand met opstuwing een tussengelegen waarde als het meest aannemelijk te beschouwen: $W \approx 500$ dagen.

Voor de aangenomen waarden W = 500 dagen en W = 3000 dagen zijn in de figuren 8 en 9 respectievelijk weergegeven de relatieve wateronttrekking en de grondwaterstandsdaling veroorzaakt door een wateronttrekking van 10^6 m^3/jaar. Door optelling van de resultaten getoond in de bovenste krommen van de figuren 7 en 9 vindt men dat onder de gegeven omstandigheden inhoudende een matige opstuwing en een matige wateronttrekking er slechts geringe grondwaterstandsveranderingen te verwachten zijn: over de eerste helft van het jaar een kleine verlaging, over de tweede helft van het jaar een kleine verhoging.

6. Conclusie

Volgens de beschouwingen in de paragrafen 3 en 4 is het aannemelijk dat de gebruikelijke diepe putten voor winning van drinkwater slechts weinig invloed hebben op de gemiddelde jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand. Men kan echter toch niet uitsluiten dat onder bepaalde omstandigheden de fluctuatie in de omgeving van een pompput aanzienlijk groter is dan op grote afstand ervan. Dit zal namelijk gebeuren als bij diepe grondwaterstanden een relatief kleine bergingscoëfficiënt relatief grote grondwaterstandsfluctuaties veroorzaakt, terwijl bij grondwaterstanden dicht onder maaiveld een zeer intensieve drainage door open leidingen de jaarlijkse fluctuatie tot een minimum kan worden beperkt.

Men zal zich dus toch moeten afvragen onder welke omstandigheden, c.q. in welke gebieden, men de voorkeur zal moeten geven aan een behandeling volgens paragraaf 2, dan wel de paragrafen 3 en 4 zal willen volgen. Ter beantwoording van deze vraag ligt het wel voor de hand allereerst gebruik te maken van vermoedelijk reeds beschikbare grondwaterstandsmetingen in de omgeving van een geschikt pompstation. Men zal daarbij wel acht moeten geven op de gelijkmatigheid van wateronttrekking en bodemgesteldheid, en of de onttrekking aan een freatisch dan wel een artesisch grondwaterreservoir gebeurt.

Literatuur

BOUMANS, J.H. Het bepalen van de drainage-afstand met behulp van de boorgaten methode.
Landbouwkundig Tijdschrift 65, 1953, 82 - 104.

ERNST, L.F. Calculation of the steady flow of groundwater in vertical cross sections.
Neth. J. Agr. Sci. 4, 1956, 126 - 131.

_____ Onderzoek van grondwaterstromingen in het Lollebeekgebied.
Inst. voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding. Meded. 4, 1958.

GLEE, G.J. DE. Over grondwaterstromingen bij wateronttrekking door middel van putten.
Proefschrift Delft, 1930.

MUSKAT, M. The flow of compressible fluids through porous media and some problems in heat conduction.
Physics, 5, 1934, 71 - 94.

_____ The flow of homogeneous fluids through porous media. Mc Graw - Hill Book Co. New York, 1937.

THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage.
Trans. Amer. Geoph. Un. 16, 1935, 519 - 524.

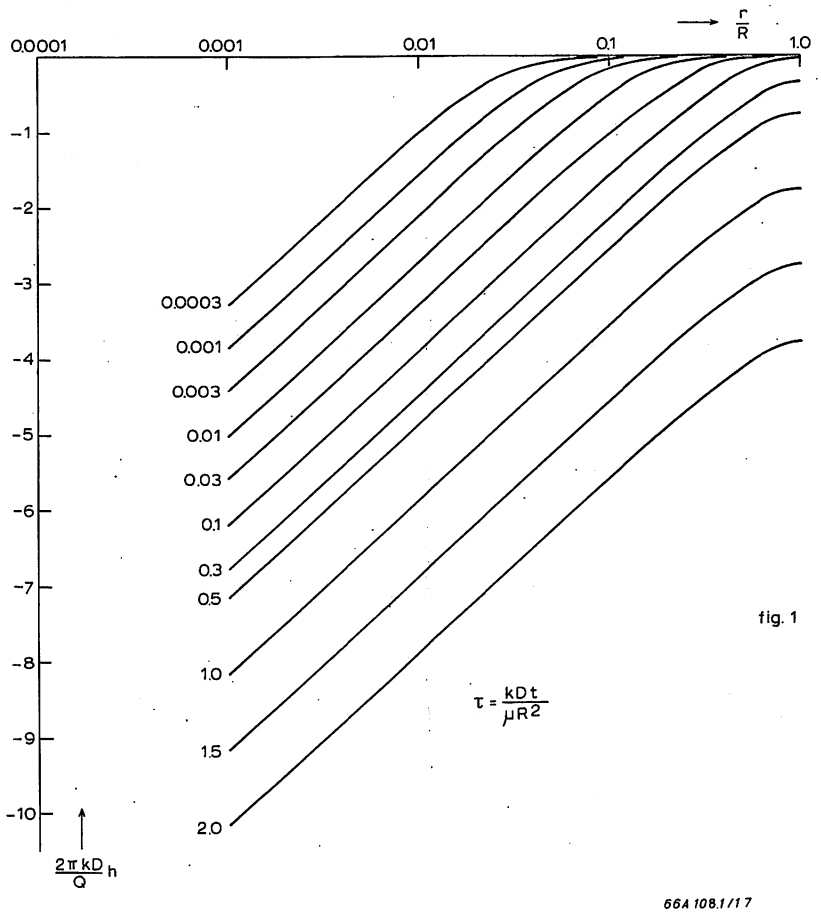


fig. 1

66A 108.1/1 7

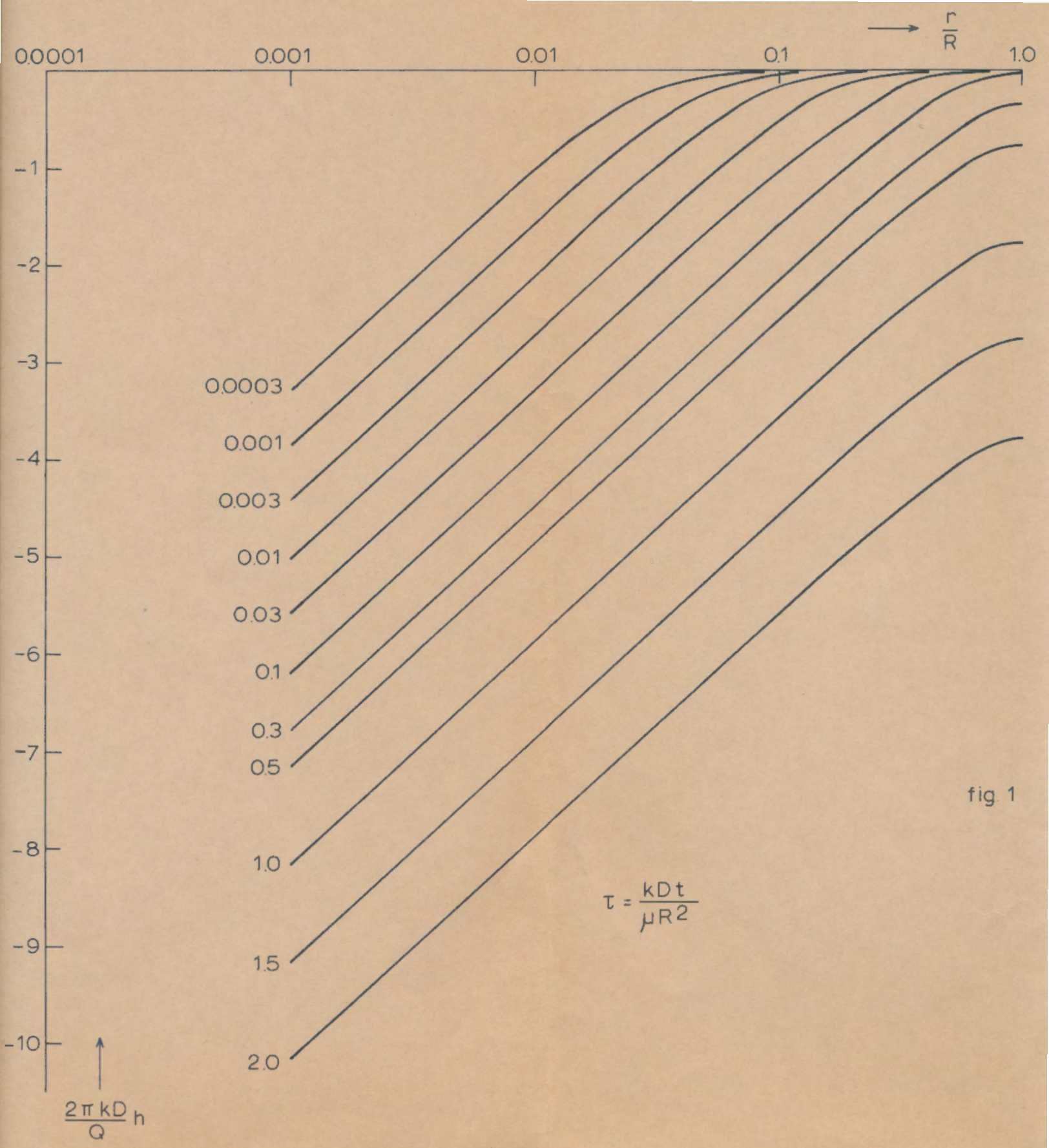


fig. 1

66A 108.1/1.7

fig. 2

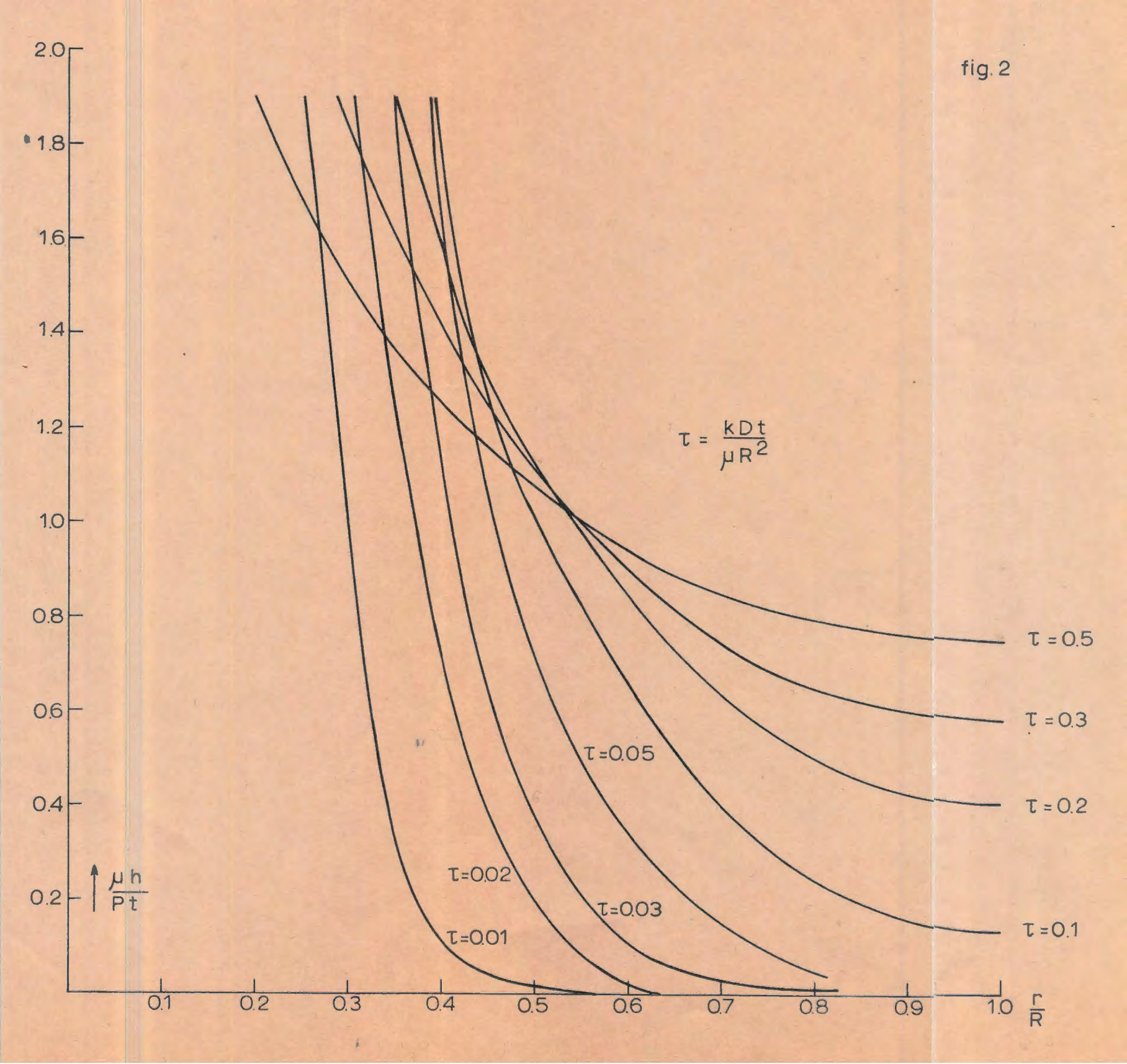
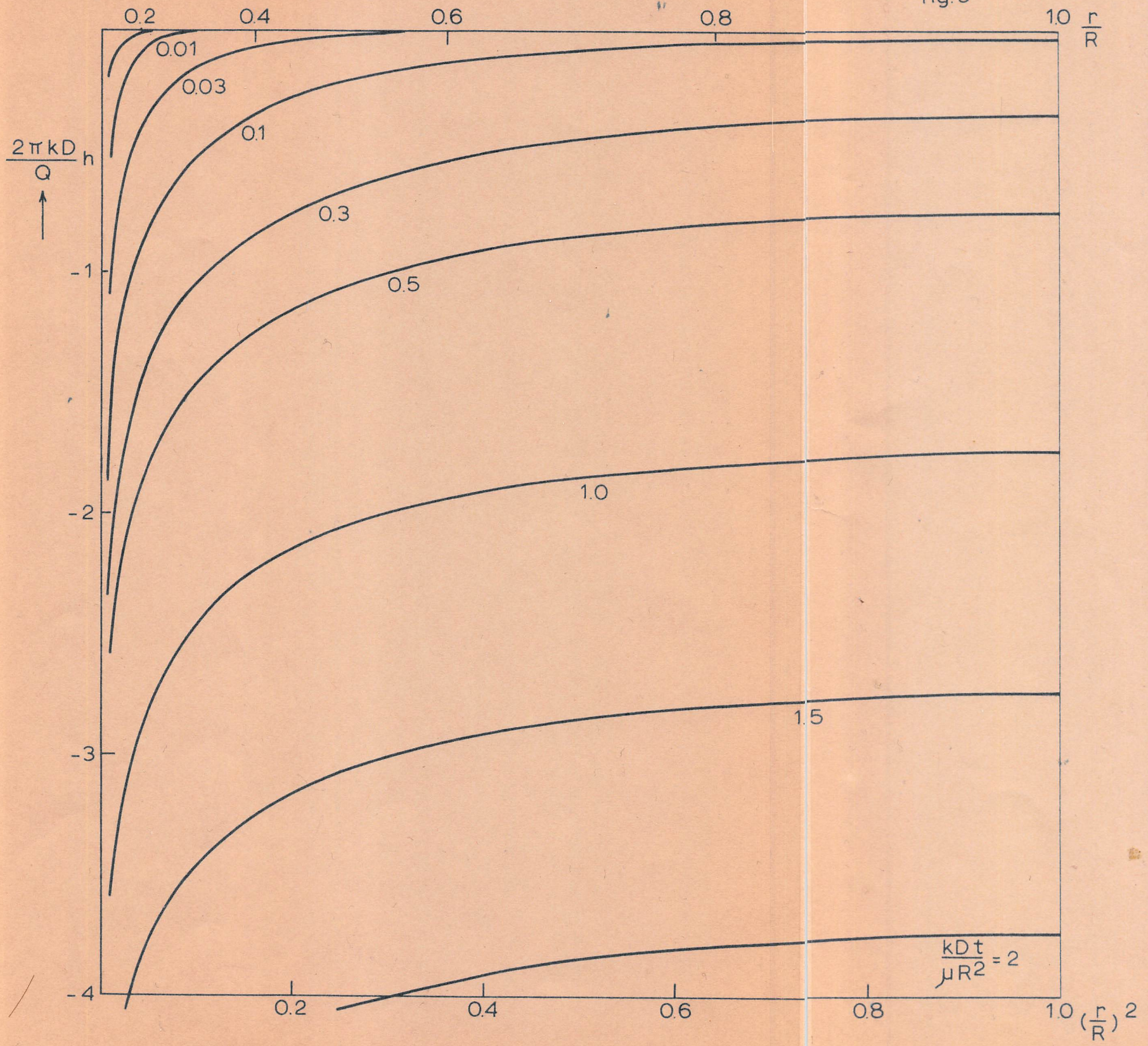

2.0
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
μ h / P t
τ = kDt / μR²
τ = 0.5
τ = 0.3
τ = 0.2
τ = 0.1
τ=0.05
τ=0.02
τ=0.03
τ=0.01
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
r / R

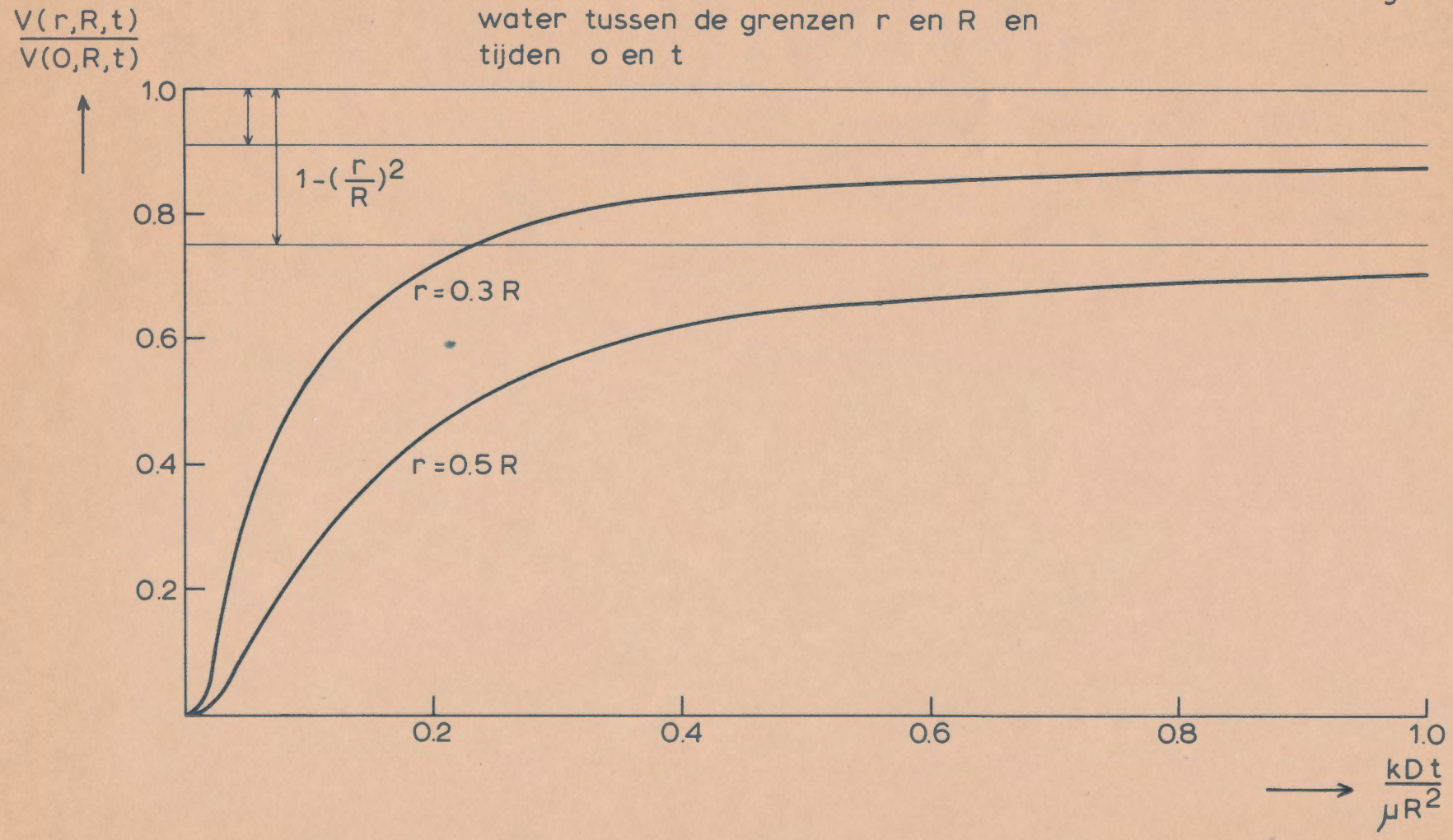
fig. 3



66A 108.3/1.7

V(r,R,t) = volume van het gewonnen water tussen de grenzen r en R en tijden o en t

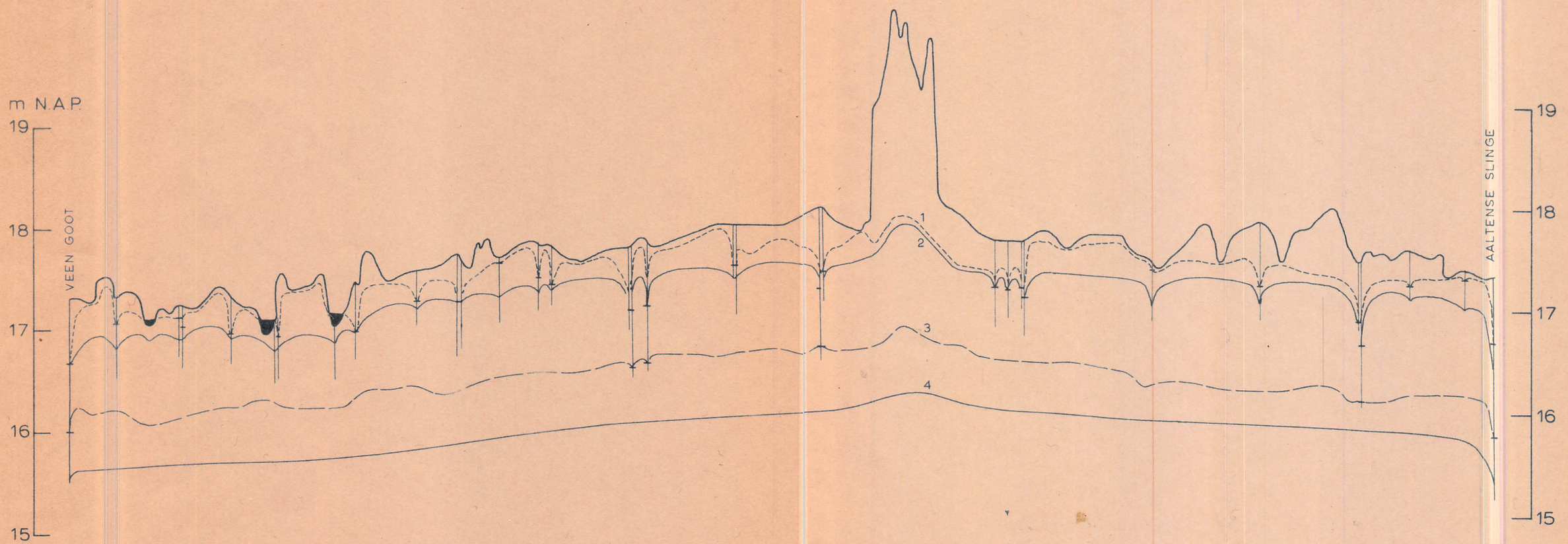
fig. 4



66C 108.4/1.7

HYDROLOGISCH ONDERZOEK ACHTERHOEK RAAI WOLFERSVEEN – HALLE – VARSSEVELD

fig. 5



1 = 6 - 8 dec. 1965 (waarnemer H. Fonck)
2 = winterkaart C.O.L.N. -rapport
3 = 10 - 20 okt. 1965 (waarnemer H. Fonck)
4 = zomerkaart C.O.L.N – rapport

66A 108.5/1.7

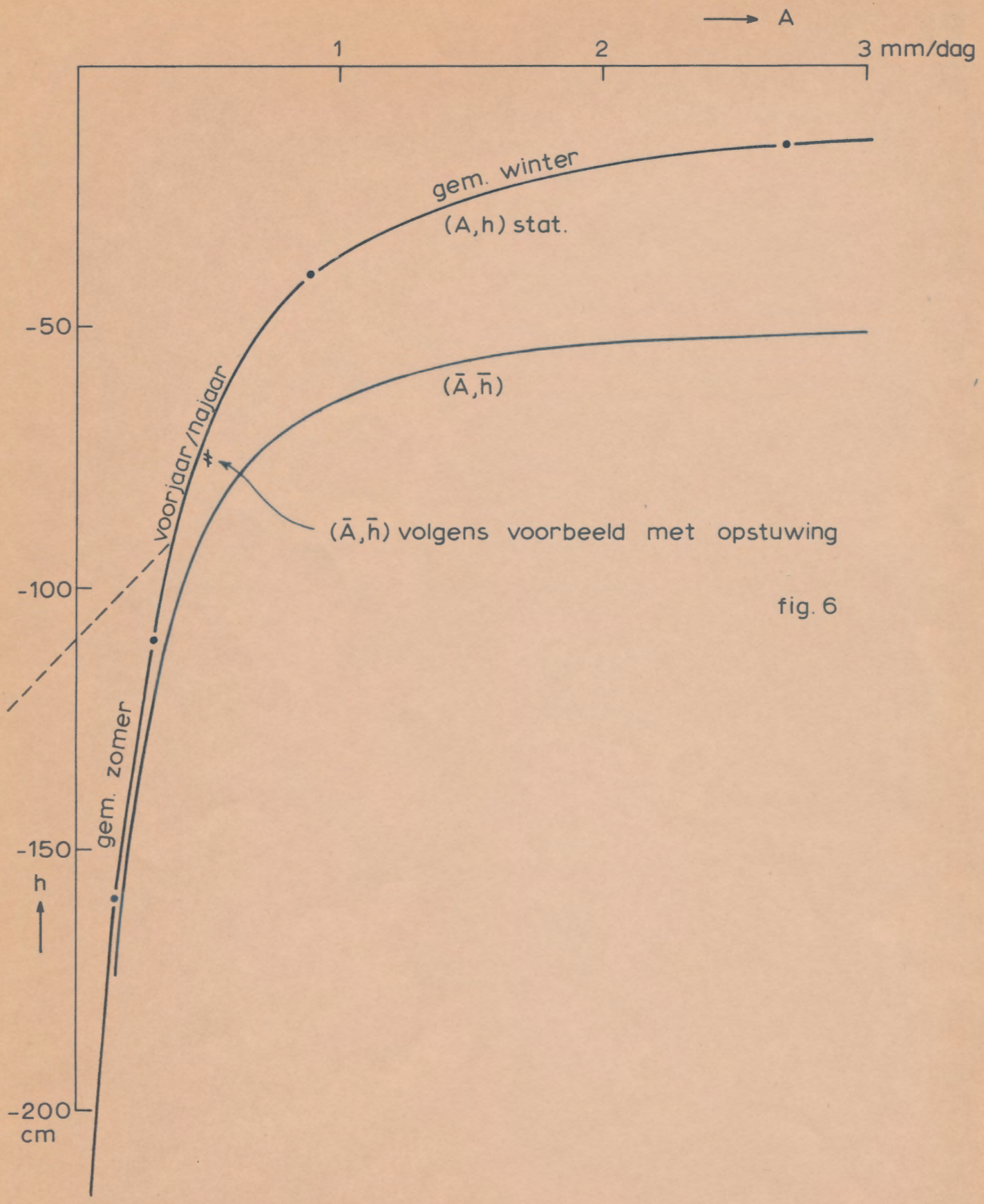
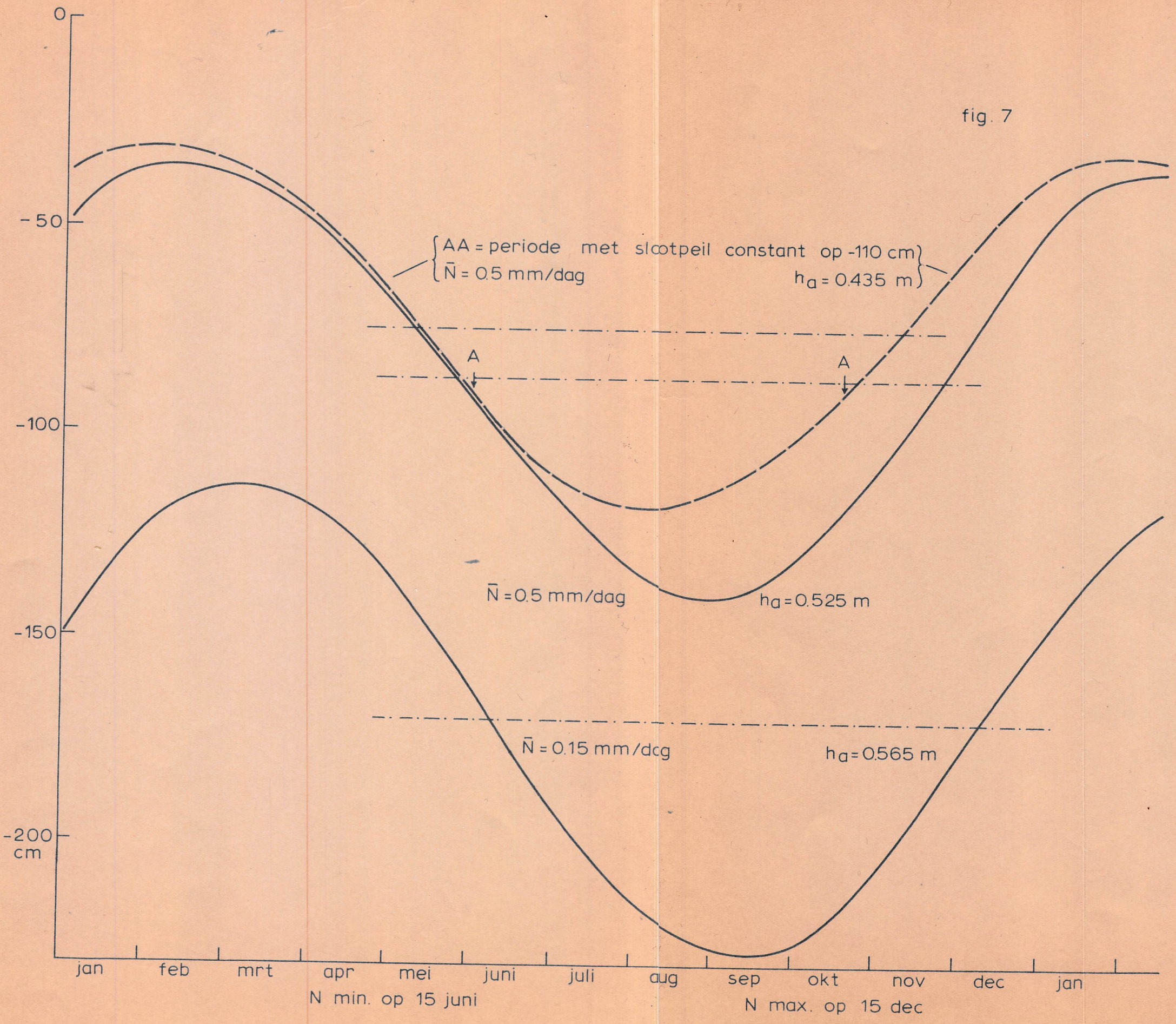

A
1
2
3 mm/dag
gem. winter
(A,h) stat.
-50
(Ā,h̄)
voorjaar/najaar
(Ā,h̄) volgens voorbeeld met opstuwing
-100
gem. zomer
-150
h
-200
cm

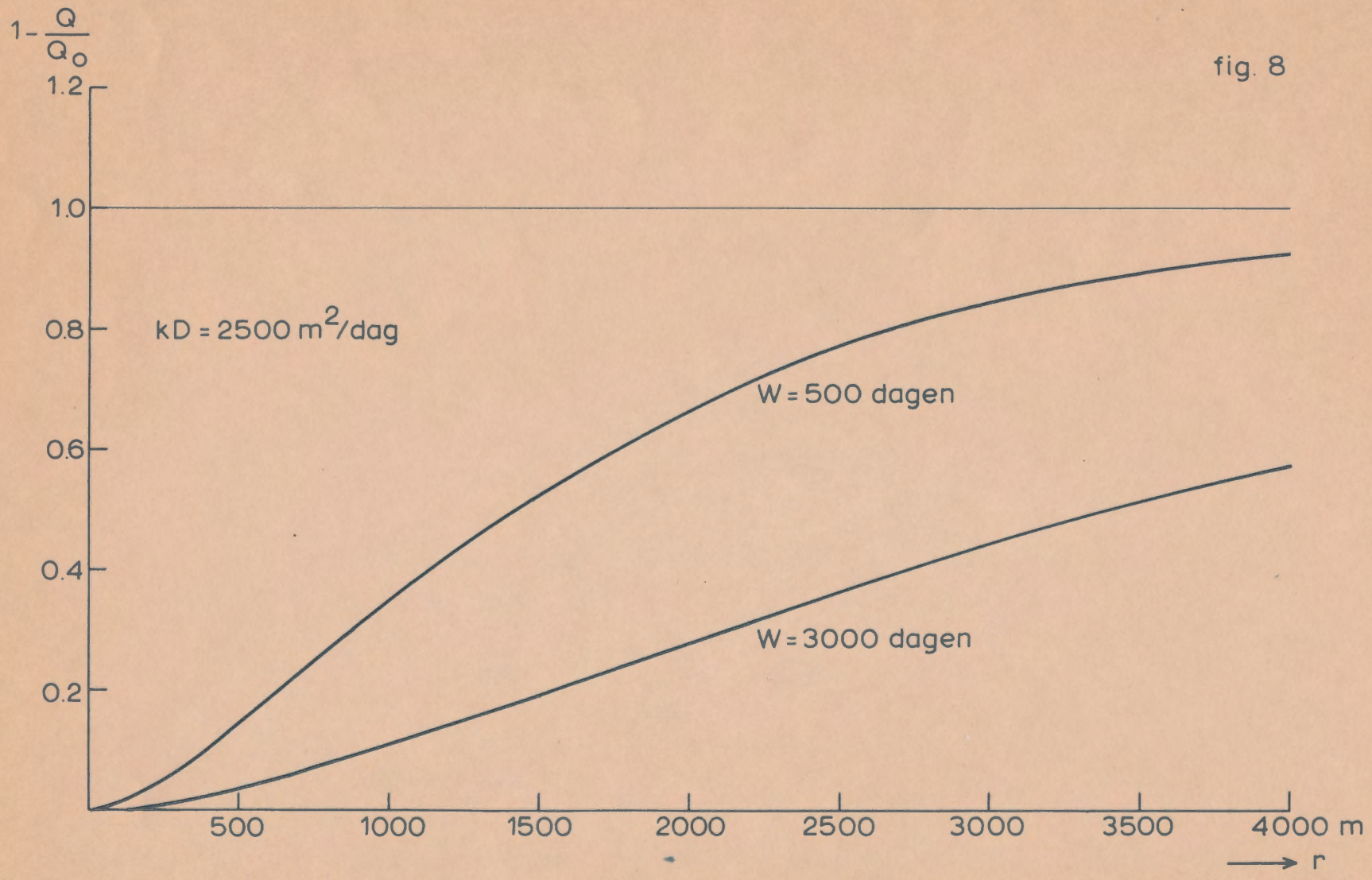
fig. 6

fig. 7

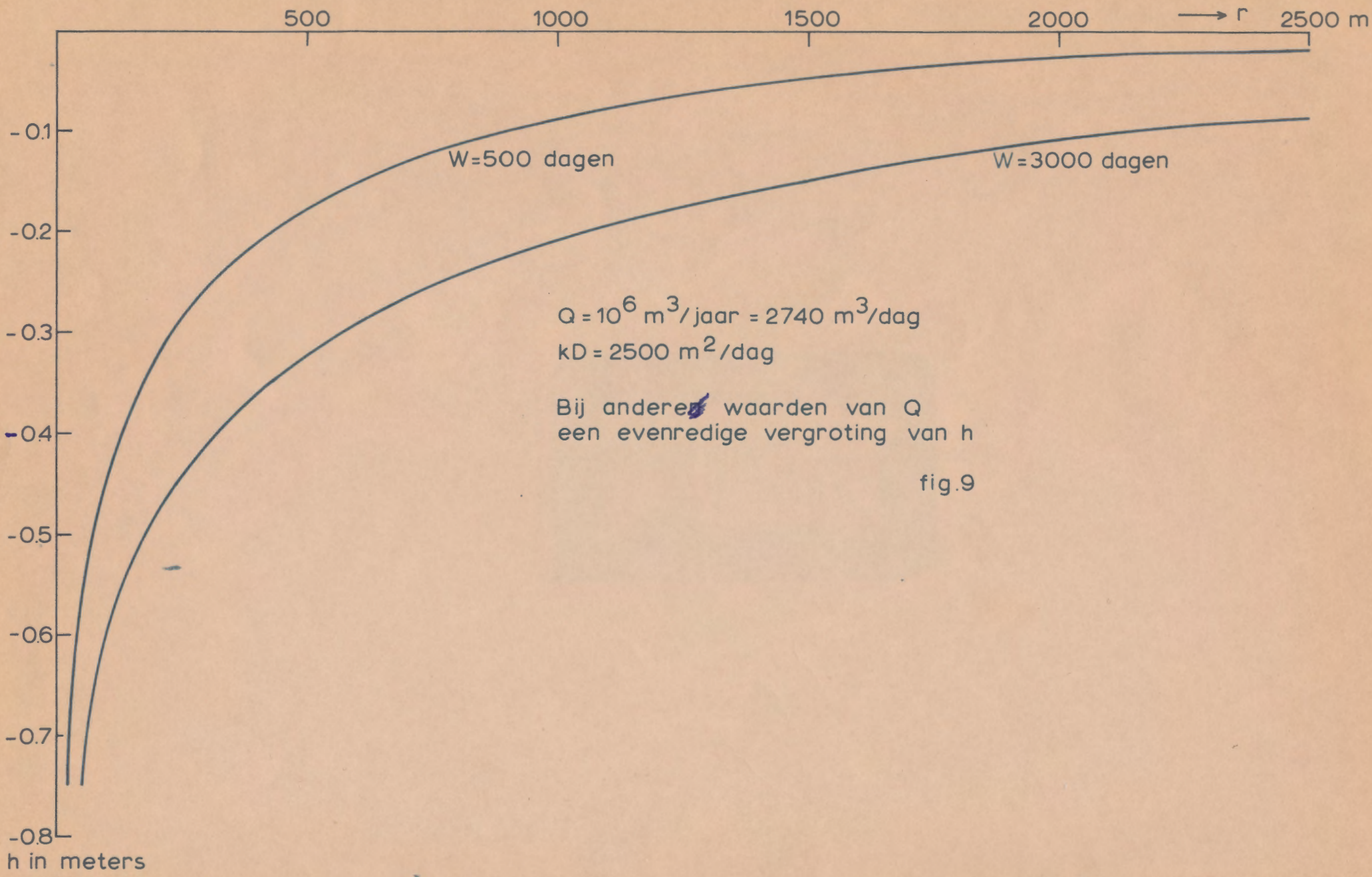


66Q.108.7/1.7

fig. 8



66C 108.8/17



$Q = 10^6\ m^3/jaar = 2740\ m^3/dag$

$kD = 2500\ m^2/dag$

Bij andere waarden van Q
een evenredige vergroting van h

fig.9