

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING

NOTA no 325, d. d. 16 december 1965

Waterwinning uit diepe putten, welke
door zandzuigen zijn ontstaan

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.

Waterwinning uit diepe putten, welke door zandzuigen zijn ontstaan.

Diepe zandgaten als bufferreservoir

Voor de uitbreiding van steden en de aanleg van wegen zijn grote hoeveelheden zand nodig. In de westelijke helft van Nederland bestaan de bovenste lagen van de grond uit klei, veen en fijn, slibhoudend zand. Een gebruikelijke methode om daar het benodigde zand zonder te hoge transportkosten te verkrijgen, is het opzuigen van zand uit de veelal op enkele tientallen meters diepte voorkomende grove pleistocene afzettingen.

Na beëindiging van de zandwinning blijft een grote put over, welke kan worden gebruikt bij de waterwinning, die in Nederland ook steeds meer moeilijkheden geeft. Daar het diepere grondwater in westelijk Nederland in de meeste gevallen een te hoog zoutgehalte heeft om ook als drinkwater te dienen, kan een dergelijke put in het algemeen slechts als bufferreservoir worden gebruikt. De vulling en verversing van de put zal kunnen gebeuren door overtollig water uit de omringende polders in te laten ofwel door rivierwater van goede kwaliteit over grote afstanden aan te voeren.

De hoeveelheid water, welke uit een dergelijke put kan worden verkregen, zal voornamelijk afhangen van de grootte van de put (horizontale oppervlakte), van de peilfluctuaties en van de toelaatbaar geachte grondwateronttrekking, welke na menging met het zoetere water in de put tot een stijging van het zoutgehalte zal leiden.

Stabiliteit van de bodem van de put

Door grote peilverlagingen kan de putbodem instabiel worden, namelijk in die gevallen dat dicht onder de bodem van de put een slecht doorlatende laag een zekere afsluiting geeft van daaronder gelegen grove afzettingen. De stabiliteit van de putbodem hangt nu zowel af van de dikte D van het pakket tussen bodem en de bovenzijde van de tweede grove laag, als van het verschil tussen de stijghoogte in de tweede grove laag en de waterspiegel in de put. Het onderwatergewicht van de laag met dikte D moet bij stabiliteit groter zijn dan de overdruk vanuit de tweede watervoerende laag. Wordt het peilver-
schil voorgesteld door $h_4 - h$, waarbij: h = peil van de put en h_4 =
stijghoogte van het water in de tweede grove laag; wordt verder het

soortelijk gewicht van de gronddeeltjes voorgesteld door γ en het poriegehalte door β , dan geldt als stabiliteitseis:

$$\left\{ (1 - \beta) (1 - \gamma) \right\} D > h_4 - h$$

Daar bij zand in losse pakking $\beta = 0,4$ tot $0,5$ en $\gamma = 2,65 \text{ gr/cm}^3$, volgt hieruit dat D minstens enkele tientallen procenten groter moet zijn dan $h_4 - h$. In de praktijk zal men uit veiligheidsoverwegingen D anderhalf tot twee maal zo groot maken,

Toestroming van het grondwater

Bij de beschouwing van de geohydrologische gesteldheid van de westelijke helft van Nederland kan men in hoofdzaak twee gevallen onderscheiden. Onder de afdekkende slecht doorlatende laag (verticale weerstand $c_1 = D_1/k_1$) is een goed doorlatende grofzandige laag, daar- onder weer een slecht doorlatende laag, welke ofwel een zo kleine doorlatendheid heeft dat deze laag als ondoorlatend kan worden beschouwd ($c_2 = \infty$, Hollands profiel) ofwel er is door deze laag nog een zekere uitwisseling van water met diepere lagen mogelijk (c_2 eindig, zie fig. 1). Bij pompproeven maakt men dikwijls gebruik van formules, welke voor stationaire toestanden zijn afgeleid. Daar het hier in het algemeen om zeer langzame peildalingen gaat (max. 10 cm/dag) is de toepassing van dergelijke formules hier zeker toegestaan. Voor het eerste geval (toestroming naar de put door een enkele water-voerende laag) is voor de intensiteit Q_g'' van de putstroming de formule van DE GLEE geldig (VAN NES, 1935):

$$Q_g'' = 2 \pi r (h_2^1 - h) \sqrt{\frac{k_2 D_2}{c_1}} \frac{K_1 \left(\frac{r}{\sqrt{k_2 D_2 c_1}} \right)}{K_0 \left(\frac{r}{\sqrt{k_2 D_2 c_1}} \right)}$$

r = straal van cirkelvormige put

h = peil van het water in de put

h_2^1 = stijghoogte van het grondwater in de bovenste grove laag ter plaatse van de put in de oorspronkelijke toestand

h_2'' = stijghoogte van het grondwater in de bovenste grove laag na aanleg van de put met peil h (zie fig. 1)

K_0 = Bessel-functie van de eerste soort van de orde nul } zie fig. 2)
 K_1 = Bessel-functie van de eerste soort van de eerste orde }

Daar zowel Q_g'' als h van de tijd afhangen, maar de straal r van de put vrijwel niet, dus Q_g'' en $h_2' - h$ als evenredig mogen worden beschouwd, kan bovenstaande formule ook als volgt worden geschreven:

$$Q_g''(t) = \frac{h_2' - h}{W_1}$$

met als weerstand (zie fig. 3):

$$W_1 = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{c_1}{k_2 D_2}} \frac{K_0\left(\frac{r}{\sqrt{k_2 D_2 c_1}}\right)}{K_1\left(\frac{r}{\sqrt{k_2 D_2 c_1}}\right)}$$

Hierbij moet echter worden opgemerkt, dat in de oorspronkelijke toestand er een zekere kwelstroming was, welke ook in het nieuwe geval met dezelfde intensiteit door de open put zal worden aangetrokken indien $h_2' = h$. Deze kwelstroming in de oorspronkelijke toestand kan worden voorgesteld door:

$$Q_g' = \frac{\pi r^2 (h_2' - h_1)}{c_1}$$

waarbij h_1 = gemiddelde grondwaterstand in de omringende polders
 \approx polderpeil h_p

Voor $h_2' = h$ levert de formule voor Q_g'' als uitkomst echter nul. Hieruit volgt, dat de totale toestroming naar de put moet worden voorgesteld door:

$$Q_g = Q_g'' + Q_g' = \frac{h_2' - h}{W_1} + \frac{\pi r^2 (h_2' - h_1)}{c_1}$$

Deze formule is echter ook te schrijven als:

$$Q_g = \frac{h_o - h}{W_1}$$

waaruit volgt dat:

$$h_o = h_2' + \pi r^2 (h_2' - h_1) \frac{W_1}{c}$$

Voor het geval met eindige c_3 is het beter de formule van Huisman en Kemperman te gebruiken (HYDROLOGISCH COLLOQUIUM, 1964, pag. 41-45 en 161 - 167). Indien $K_4 D_4$ zeer groot kan men ook een goede benadering bereiken met de volgende formule:

$$Q_g = \frac{h_2' - h}{W_1} + \pi r^2 \left(\frac{h_2' - h_1}{c_1} + \frac{h_2' - h}{c_3} \right)$$

waarbij nu in de noemer W_1 de grootheid c_1 dient te worden vervangen door een effectieve verticale weerstand c te berekenen uit:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}$$

Evenals in het vorige geval kan hier Q_g worden geschreven als het quotient van een stijghoogteverschil en een weerstand, Voor het nul-niveau en de weerstand gelden nu echter iets andere formules, die onmiddellijk uit voorgaande formules zijn af te leiden. Hierop wordt verder niet ingegaan. In volgende voorbeelden wordt alleen gebruik gemaakt van bovenstaande formule voor W_1 .

Voor een berekening van het verloop van h of van Q met de tijd kan de volgende differentiaalvergelijking dienen:

$$Q_g(t) = a \frac{dh}{dt} + Q_o(t) + a(E - R)$$

Q_o = wateronttrekking aan de put

E = verdamping van open water

R = neerslag

$a = \pi r^2$ = oppervlakte van de put

Door te gebruiken $Q_g = (h_2' - h) W_1^{-1}$ met constante W_1 en door ook voor a , $E-R$ en Q_o constanten te nemen, ontstaat een gewone lineaire differentiaalvergelijking van de eerste orde met constante coëfficiënten:

$$- a W_1 \frac{dQ_g}{dt} = Q_g(t) - Q_o - a(E-R)$$

Deze differentiaalvergelijking heeft als oplossing:

$$\frac{Q_g(t) - Q_o - a(E-R)}{Q_g(o) - Q_o - a(E-R)} = e^{-\frac{t}{aW_1}}$$

Om de grootte-orde van de grondwaterstroming te beoordelen komt men gemakkelijker tot een resultaat door te veronderstellen dat er gedurende de waterwinningsperiode T_0 een lineaire daling is van het peil $h(0) = 0$ tot $h(T_0)$. Een dergelijke veronderstelling is aannemelijk als de uitvoer Q_0 constant is en de grondwaterstroming Q_g relatief klein. De gewonnen hoeveelheid is dan:

$$- a h(T_0) = \frac{0,5 h(T_0) T_0}{W_1}$$

De grondwaterstroming is van weinig belang als $a W_1$ groot is en wel minstens van dezelfde grootte-orde als T_0 . Als voorbeeld aangenomen dat $kD = 1000 \text{ m}^2/\text{dag}$, $c = 1000$ dagen en $T_0 = 100$ dagen, kan men met behulp van de formule voor W_1 afleiden, dat dit het geval is als $r \cong 800 \text{ m}$, dus $a \cong 200 \text{ ha}$. Voor $a = 200 \text{ ha}$ volgt dan namelijk $a W_1 = 260$ dagen. Er is dus slechts een 20% bijdrage in de opbrengst te verwachten na 100 dagen.

Voor kleine waarden van $a W_1$ en in het algemeen dus voor niet zeer grote putten zal de toestroming van het grondwater van meer belang zijn. Er is dan weinig reden om een lineair verloop van $h(t)$ aan te nemen. Een betere oplossing kan worden verkregen door bovenstaande differentiaalvergelijking op te lossen bij een gegeven tijdsafhankelijke $Q_0(t)$ ofwel bij een constante Q_0 de formule met e -macht te gebruiken.

Voorbeeld: $r = 300 \text{ m}$

$$kD = 1000 \text{ m}^2/\text{dag}$$

$$c = 1000 \text{ dagen}$$

$$kD W_1 = 0,235$$

$$W_1 = 0,235 \cdot 10^{-3} \text{ dg/m}^2$$

$$h_2 - h(0) = 1 \text{ m}$$

$$Q_g(0) = 4250 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$Q_0 = 20\,000 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$E-R = 0,002 \text{ m/dag}$$

$$a = 28,2 \cdot 10^4 \text{ m}^2$$

$$a(E-R) = 564 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$a W_1 = 66 \text{ dagen}$$

$$Q_g(t) = 20564 \text{ m}^3/\text{dag} - 16\,314 \text{ m}^3/\text{dag} \times e^{-\frac{t}{66 \text{ dagen}}}$$

$$t = 0$$

$$Q_g(t) = 4250 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$h_2 - h(t) = 1 \text{ m}$$

$$= 50 \text{ dagen}$$

$$= 12900 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$= 3,0 \text{ m}$$

$$= 100 \text{ dagen}$$

$$= 16975 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$= 4,0 \text{ m}$$

$$= 150 \text{ dagen}$$

$$= 18875 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$= 4,45 \text{ m}$$

Stabiliteit van de taluds onder water

Of grote peilverlagingen in de put de stabiliteit van de zandige taluds (normale helling van los gestort zand onder water ongeveer 30°) in gevaar zullen brengen, kan niet zonder meer worden verklaard, daar in het algemeen ook in de grove watervoerende pakketten een bijzondere gelaagdheid kan voorkomen, welke van overwegend belang kan zijn.

De grotendeels horizontale stroming van het grondwater in de goed doorlatende laag verandert dicht onder het talud van richting door een opwaartse component. Dit brengt met zich mee dat de grootste stromingsdichtheden en de grootste stromingsdrukgradienten ontstaan in de bovenrand van het grofzandige talud (zie bijv. fig. 4; stromingsdrukgradienten omgekeerd evenredig met doorsnede van vierkantjes). Indien het goed doorlatende pakket niet homogeen is, maar is opgebouwd uit afwisselend goed en slecht doorlatende lagen zal men dergelijke randen met sterke uitstroming, behalve direct onder de afdekkende kleilaag ook op grotere diepte vinden. De vorm van het talud en een door de zandwinning veroorzaakte meer of minder gelijkmatige bedekking van bodem en taluds met fijner of grover zand kunnen een meer gelijkmatige uittreding van het grondwater bevorderen.

In eerste benadering zal men er wel mee moeten rekenen dat op de meest bedreigde plaatsen de drukgradiënt enkele malen hoger is dan die welke bij een zuiver horizontale stroming langs de rand van de put zou ontstaan. De stijghoogtegradiënt van een dergelijke horizontale stroming kan met behulp van bovenstaande formules als volgt worden afgeleid:

$$i = \frac{Q_g}{2 \pi r k_2 D_2} = \frac{h_0 - h}{\sqrt{k_1 D_1 c_1}} \cdot \frac{K_1 \left(\frac{r}{\sqrt{k_1 D_1 c_1}} \right)}{K_0 \left(\frac{r}{\sqrt{k_1 D_1 c_1}} \right)} = \frac{h_0 - h}{2 \pi r} \cdot \frac{1}{k_1 D_1 W_1}$$

Welke uitdrukking men hier ook gebruikt, er volgt wel uit, dat voor de stijghoogtegradiënt van de horizontale stroming grotere waarden zijn te verwachten naarmate de put kleiner is. Bij kleine putten zal men geneigd zijn de winning van water te verhogen door grote peilverlagingen toe te staan. Bijvoorbeeld: $r = 100$ m, $h_0 - h = 10$ m en $\sqrt{k_1 D_1 c_1} = 200$ m leidt tot $i = 0,09$. In dit geval zijn dus op die plaatsen van het talud, waar de uittredende grondwaterstroming zich concentreert, gradiënten van 0,3 tot 1 te ver-

wachten, wat inhoudt dat de kans op evenwichtsverstoringen daar vrij groot is. In het bijzonder moet men hierbij denken aan die gevallen waarbij de waterspiegel is gedaald tot de bovenkant van een grove zandlaag, terwijl direct erboven slappe klei of fijne slibhoudend zand aanwezig is.

Verhoging zoutgehalte door grondwater

Het toestromende grondwater kan schadelijk zijn als daardoor het zoutgehalte van het water in de put in belangrijke mate wordt verhoogd. Wordt volledige menging van het water in de put aangenomen, dan kan het verloop van het zoutgehalte worden gevonden met behulp van de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{d}{dt} (V C) = Q_g (t) C_g - Q_o (t) C (t)$$

V = volume van het water in de put

C = zoutgehalte van het water in de put

C_g = zoutgehalte van het grondwater

Deze differentiaalvergelijking is eenvoudig oplosbaar als de oppervlakte van de put constant wordt genomen en de verdamping van open water wordt verwaarloosd. Bijvoorbeeld voor de begintijd $t = 0$ moeten de grootheden $V(0)$ en $C(0)$, welke van de voorgeschiedenis afhankelijk zijn, als gegevens worden ingevoerd.

Een eenvoudiger uitkomst, welke vermoedelijk voor de praktijk wel van voldoende nauwkeurigheid is, kan men verkrijgen door de gemiddelden na een langjarig periodiek bedrijf te beschouwen, waaruit volgt:

verhoging zoutgehalte uitvoer =

$$= \frac{\text{grondwater invoer}}{\text{totale uitvoer}} \times (\text{zoutgehalte grondwater} - \text{zoutgehalte invoer})$$

$$\begin{array}{l} \text{Voorbeeld: grondwaterinvoer} = \int_0^{T_0} Q_g dt = 2 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \\ \text{totale uitvoer} = Q_o T_0 = 3 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \end{array} \left. \vphantom{\int_0^{T_0} Q_g dt} \right\} \begin{array}{l} \text{Zie voorbeeld} \\ \text{pag. 5} \end{array}$$

Zoutgehalte invoer (rivierwater of polderwater) = 150 mg Cl/liter. Indien het zoutgehalte van het gewonnen water hoogstens een gemiddeld zoutgehalte mag hebben van 200 tot 300 mg Cl/liter, volgt hieruit dat het grondwater hoogstens een zoutgehalte mag hebben van respectievelijk:

$$150 + \frac{3 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} \times 50 = 225 \text{ mg Cl/liter}$$

$$150 + \frac{3 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} \times 150 = 375 \text{ mg Cl/liter}$$

Infiltratie van rivierwater

Het instromen van grondwater van te hoog zoutgehalte kan worden tegengegaan door het water in de put gemiddeld een hoger peil te geven dan de gemiddelde grondwaterstand in de omringende polders (\approx polderpeil). Dit geeft een infiltratie van zoeter water in de diepe grondlagen rondom de put. De voordelen van de toestroming van grondwater, dat wil zeggen dat in de winningsperiode de put meer levert dan er in de voedingsperiode (invoer van polderwater of rivierwater) is ingebracht, gaat bij gebruik van het infiltratieprincipe verloren. Immers men wil in dat geval de schotelvormige overgangslaag tussen zoet water en zout of brak water op veilige afstand van de put houden, zodat ondanks de periodieke fluctuaties en de verdikking van de overgangslaag, die daarvan het gevolg is, vrijwel niets van het oorspronkelijke grondwater in de put kan komen.

Dit kan men bereiken door te beginnen met een voedingsperiode van de put en door in elke volgende winningsperiode zoveel te onttrekken, dat invoer van rivierwater, neerslag, verdamping en waterwinning nog juist een klein overschot laten.

Hoe instroming en uitstroming door de bodem van de put gedurende de winningsperiode zich zullen verhouden bij aanhouden van het principe dat het langjarige gemiddelde van het peil van de put voldoende hoog moet zijn om grondwater met een te hoog zoutgehalte buiten de put te houden, hangt onder meer af op welke manier de voeding gebeurt, bijvoorbeeld met constante intensiteit of zo snel mogelijk tot het maximum peil (zie fig. 5; de geharceerde oppervlakken boven de horizontale tijdas iets groter dan er onder; voor het kromlijnig verloop zie voorbeeld op pag. 5). De berekening van het verloop $h(t)$ kan bij constante invoer of uitvoer worden gedaan met de formule met e-macht (invoer negatief, uitvoer positief):

$$\frac{h(t) - h_0 + Q_0 W_1 + a(E-R) W_1}{h(0) - h_0 + Q_0 W_1 + a(E-R) W_1} = e^{-\frac{t}{aW_1}}$$

Tijdens de eerste helft van de winningsperiode bereikt de voorraad zoet grondwater zijn maximum (zie snijpunt met horizontale as in fig. 5). Uit deze beschouwing volgt ook dat in de meeste gevallen de uitstroming van grondwater over midden tot einde van de winningsperiode de infiltratie over het begin van deze periode overtreft.

De voorraad zoet water, welke op deze manier in de grond kan worden gevormd, is op eenvoudige wijze in grootte-orde te berekenen door deze hoeveelheid voor te stellen door:

$$0,5 T \overline{h_{inf}} W_1^{-1} \left(T \frac{duur}{\sqrt{van}} \text{ cyclus} = 365 \text{ dagen; voor } \overline{h_{inf}} \text{ zie fig. 5) }.$$

Wordt bijvoorbeeld genomen: $\overline{h_{inf}} = 1$ meter en overeenkomstig een voorgaand voorbeeld: $W_1 = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ dg/m}^2$, dan vindt men als maximale voorraad aan zoet water in de grond: $750\,000 \text{ m}^3$.

In figuur 5 wordt gesuggereerd dat van jaar tot jaar precies hetzelfde verloop terugkomt. Het werkelijke verloop zal hiermee slechts in ruwe benadering overeenkomen, daar toevallige afwijkingen altijd mogelijk zijn. De bezwaren van een droog jaar kan men bijvoorbeeld opvangen door een wat hoger gemiddeld peil in de normale en natte jaren (aantal n) aan te houden zodat in een droog jaar een n maal grotere verlaging van het jaargemiddelde is toegestaan.

Bij handhaving van het infiltratieprincipe moet omstreeks het begin van elke winningsperiode het peil van de put belangrijk boven het polderpeil liggen (zie fig. 1; $h > h_0 > h'_2 > h_1$) en dit houdt een versterking in van de kwel in de omgeving van de put. Deze toeneming van de kwel (verticale opwaartse stroming v) kan langs de rand van de put onmiddellijk worden voorgesteld door $(h - h'_2) c_1^{-1}$. Voor grotere waarden van r (dus $r' >$ straal van de put r) volgt uit de putformule (VAN NES, 1935):

$$\delta v(r') = \frac{h(r) - h'_2}{c_1} \frac{K_0 \left(\frac{r'}{\sqrt{k_2 D_2 c_1}} \right)}{K_0 \left(\frac{r}{\sqrt{k_2 D_2 c_1}} \right)}$$

De totale toeneming van de kwel in de polder rondom de put kan worden voorgesteld door $-Q_g^{\overline{h}}$. Dit geldt in de meeste gevallen ook voor kleine polders, daar K_0 met toenemende r vrij sterk afneemt.

Variaties in peil van de put

In die gevallen, dat een zwakke menging met grondwater van een hoger zoutgehalte nog is toegestaan, kan men de onttrekking van water

in de winningsperiode in zekere mate groter maken dan de invoer van rivierwater in de voorafgaande periode. De daling van het gemiddelde peil van de put, die hierdoor wordt veroorzaakt, kan voordelig of nadelig zijn al naar gelang aanleg en onderhoud van ringdijk en onderwatertaluds daarvan invloed ondervinden.

Een geval, dat nog niet genoemd is, namelijk geen invoer van rivierwater, is vermoedelijk van weinig praktisch belang, en dat vooral wegens het zoutgehalte van het te winnen water, dat afgezien van een zwakke verdunning door neerslag mag worden gelijk gesteld aan dat van het diepe grondwater en niet zozeer door het lage gemiddelde peil van de put. Dit gemiddelde peil kan voor dit geval worden berekend met de volgende formule:

$$h_0 - \bar{h} = W_1 \overline{Q_g(t)} = \frac{W_1}{T} \int_0^T \{ Q_0(t) + a(E-R) \} dt \approx W_1 \overline{Q_0}$$

De verdamping van open water en de neerslag kan men voor een gemiddeld jaar in westelijk Nederland wel aan elkaar gelijk stellen, zodat de integraal vervangen mag worden door de jaarlijkse wateronttrekking aan de put. Worden vervolgens als voorbeeld de veel voorkomende waarden $kD = 1000 \text{ m}^2/\text{dag}$ en $c = 500$ dagen genomen, daarbij voor de grootte van de put twee waarden respectievelijk $r = 100 \text{ m}$ en $r = 400 \text{ m}$, dan volgt (zie fig.3): $kDW_1 = 0,34$ en $kDW_1 = 0,165$, dus $W_1 = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ dg/m}^2$ en $W_1 = 0,165 \cdot 10^{-3} \text{ dg/m}^2$. Bij $h_0 - \bar{h} = 3 \text{ m}$ is dan de opbrengst van de put respectievelijk $3,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en $6,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

Vergroting van de bodemweerstand bij infiltratie

Een bekend verschijnsel bij infiltratie is het zogenaamde dichtslaan van de bodem tengevolge van de afzetting van slib en algen op de bodem en de verstopping door fijne deeltjes van de poriën van een oorspronkelijk schone zandbodem. Dit verschijnsel is tot nu toe nog weinig systematisch onderzocht. Wel is bekend, dat in een periode van een half jaar (normale duur van de infiltratie in de landbouw) reeds een aanzienlijke toeneming van de weerstand kan ontstaan. Of bij de omkering van de stromingsrichting de weerstand in de zandige bodem van deze diepe putten weer zal dalen, is niet bekend. Het verrichten van waarnemingen aan een diepe put met afwisselend drainage en infiltratie moet van belang worden geacht, wil men beter geïnformeerd zijn omtrent de mogelijkheden tot vorming van een voorraad zoet water in

het diepe zandpakket.

Vermoedelijk is wegens de grote oppervlakte van de diepe putten in dit geval het effect niet van overwegende invloed. Het gaat immers om de toevoeging van een weerstand W_b , welke kan worden voorgesteld door c_b/a . Enkele metingen uitgevoerd in monsters verkregen uit de oorspronkelijk zandige bodem van de Zuid-Willemsvaart (130 jaar geleden aangelegd) leverde een gemiddelde c_b -waarde van 30 dagen. Bij $a = 30$ tot 100 ha en bij aanhouden van genoemde waarde voor c_b , volgt als uitkomst voor de bodemweerstand W_b respectievelijk $0,1 \cdot 10^{-3}$ dg/m² en $0,03 \cdot 10^{-3}$ dg/m². Deze uitkomsten liggen vrij ruim beneden de waarden voor W_1 behorende bij de behandelde voorbeelden. Dit houdt echter niet in, dat in de praktijk zich geen gevallen zouden kunnen voordoen waarbij W_b een veel belangrijker deel zou uitmaken van de totale weerstand $W_1 + W_b$.

Literatuur

B.A.VAN NES, Een globale berekening van het waterbezwaar van een cirkelvormige bouwput bij toepassing van een bronbemaling met volkomen putten in spanningswater. Versl. en Meded. betr. de Volksgezondheid, aug. 1935. De Ingenieur, 1935, no. 32.

HYDROLOGISCH COLLOQUIUM, Steady flow of groundwater to wells. Versl. Meded. Comm. Hydrol. Onderz. T.N.O., no. 10, Den Haag, 1964.

fig.1

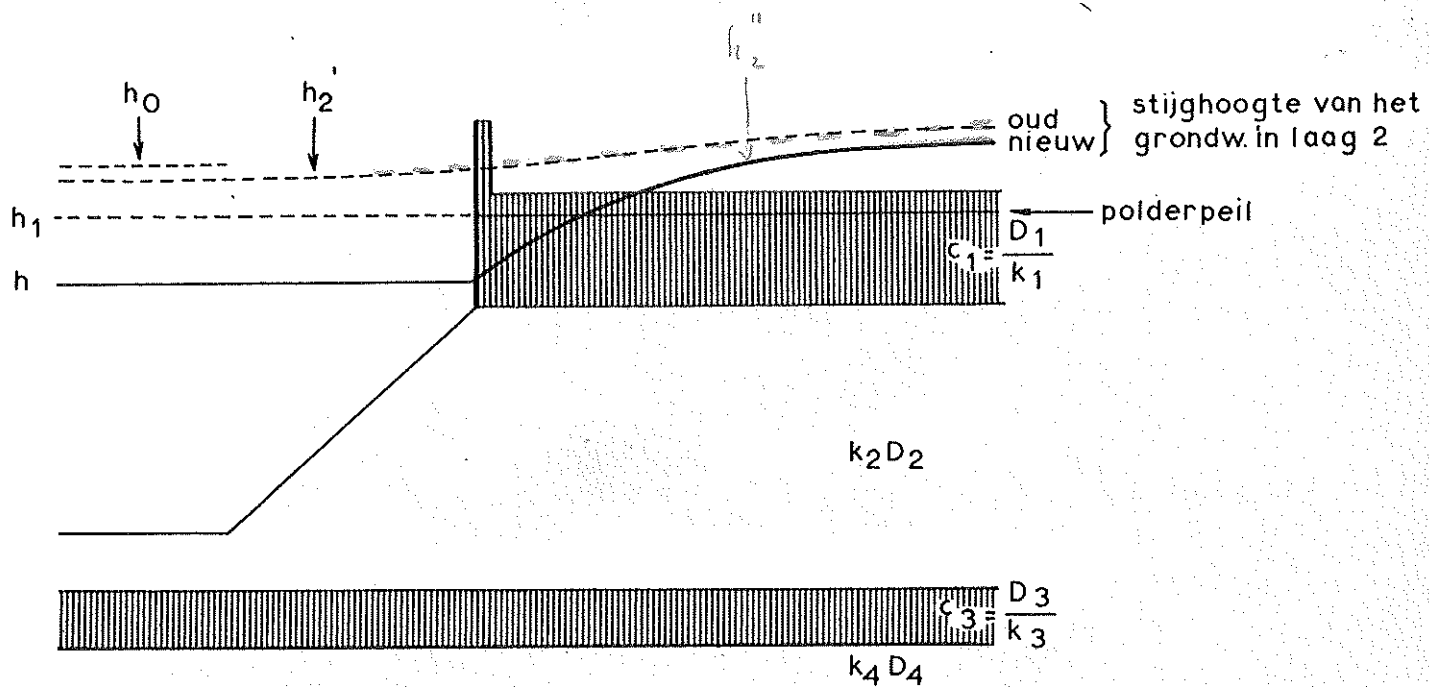


fig.2

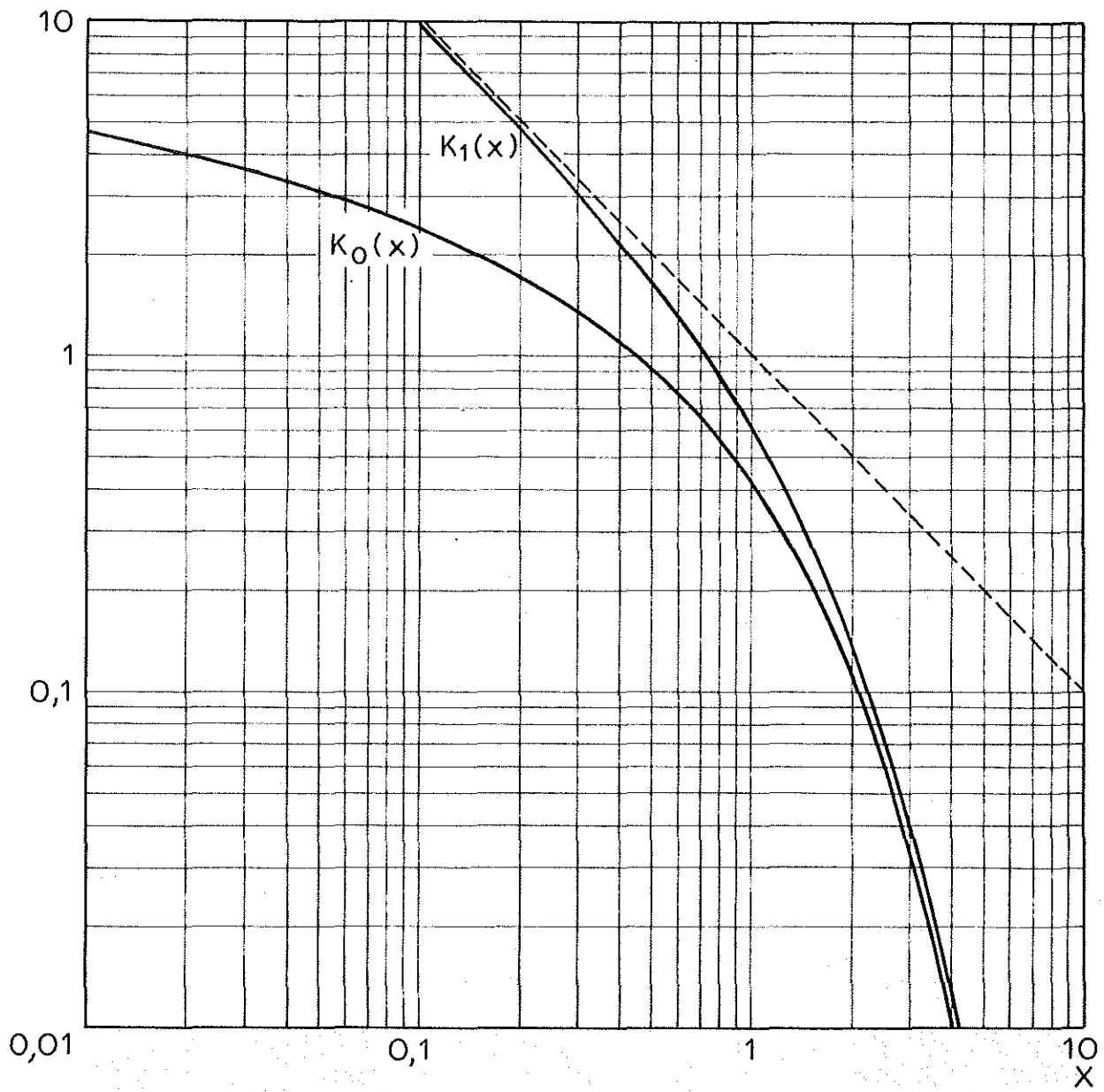


fig.3

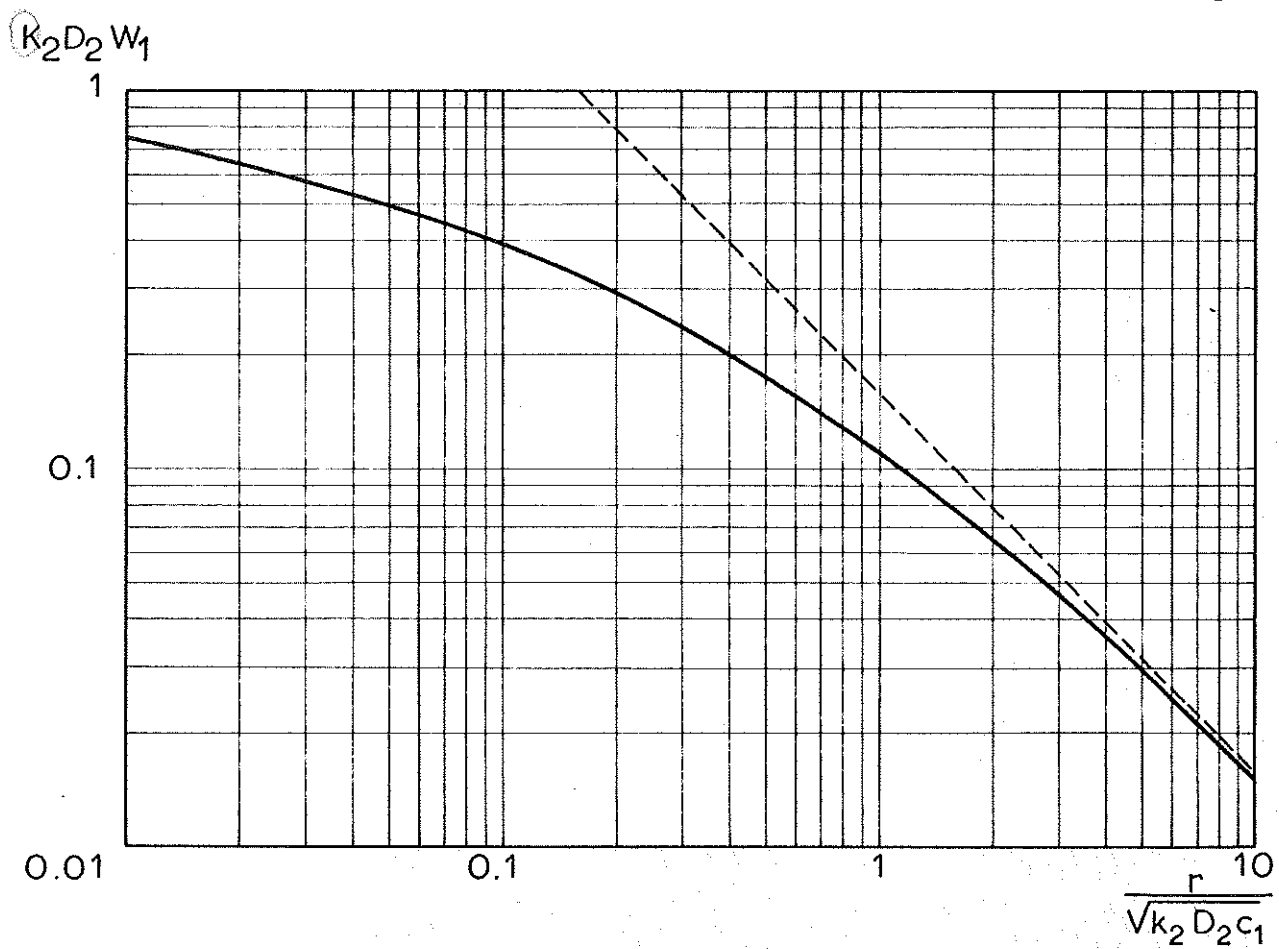


fig. 4

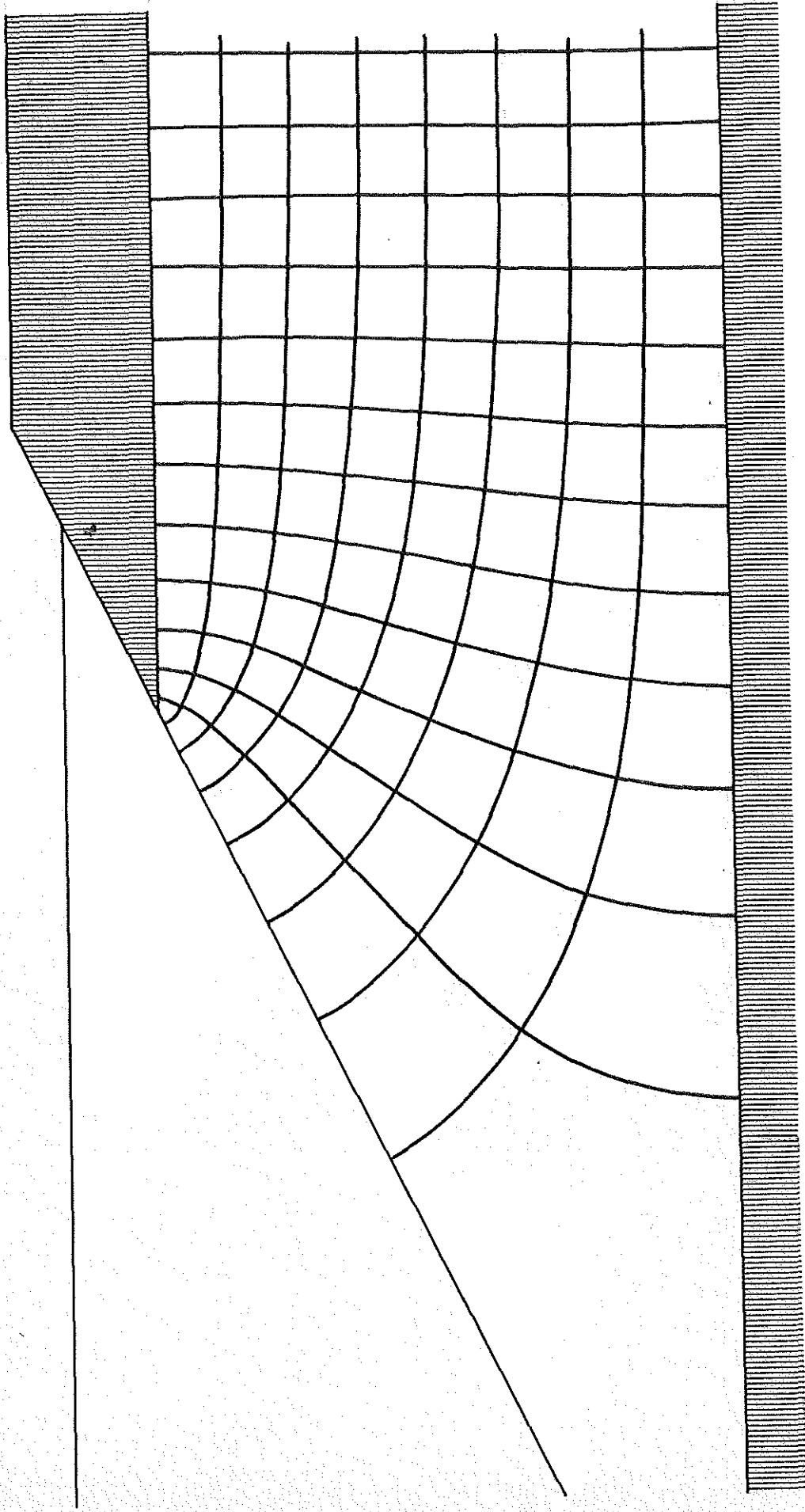


fig. 5

