

NN31545.0080

De formatieconstanten in het proefgebied van Groenlo bepaald  
door middel van pompproeven

W.B.Verhaegh en dr.N.A.de Ridder

1. Inleiding

Ten behoeve van het waterhuishoudkundige onderzoek, dat door de Hydrologische Sectie van Werkgroep I van de Zoetwatercommissie Gelderland in het proefgebied bij Groenlo wordt verricht, is door het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen een onderzoek ingesteld naar de geohydrologische gesteldheid van de diepere ondergrond in dit gebied.

Hiertoe zijn een aantal diepe boringen uitgevoerd, die tezamen met de profielbeschrijvingen van een serie oudere boringen, ontleend aan het boorarchief van de Geologische Dienst te Haarlem, een algemeen inzicht hebben gegeven in het voorkomen, de verbreiding, en de dikte van de watervoerende- en semi-permeabele lagen en hun lithologische eigenschappen. De diepteligging van de "ondoorlatende"basislaag kon door middel van deze boringen nauwkeurig worden vastgesteld.

Naast dit algemeen geologische onderzoek werd in het bijzonder aandacht besteed aan de bestudering van de hydrologische eigenschappen van het diepere bodemprofiel. Zo kon bijvoorbeeld het horizontaal geleidend vermogen (kD-waarde) van de watervoerende lagen in ieder boorpunt bepaald worden door berekening uit de granulometrische samenstelling van de monsters, die op regelmatige afstanden in het bodemprofiel waren genomen. Het bleek, dat als gevolg van de merkwaardige geologische bouw van het gebied, de kD-waarden sterk varieerden, maar in grootte-orde toenamen van oost naar west.

Ten einde na te gaan in hoeverre de gevonden uitkomsten geacht mochten worden representatief te zijn, werd een pompproef uitgevoerd. In het volgende zullen de opzet en uitkomsten van deze proef worden besproken. Om vergelijkingsmogelijkheden te hebben, werden in de pompput voor deze proef, geroerde (puls)monsters verzameld. Van de geroerde monsters werd de granulometrische samenstelling bepaald en met behulp hiervan kon op de gebruikelijke wijze de kD-waarde worden berekend.



0000 0082 2367

124/0561/25

222906

## 2. Locatie en opzet van de pompproef

Het proefgebied is gelegen in oostelijk Gelderland, in de driehoek Eibergen-Borculo-Groenlo. Uit het geologische onderzoek was gebleken, dat de "ondoorlatende" basis in het oostelijke deel van het gebied op zeer geringe diepte ligt, maar in westelijke richting geleidelijk daalt. De watervoerende lagen nemen dus in deze richting geleidelijk in dikte toe. Aangezien in het waterwingebied bij Eibergen ten behoeve van het pompstation voor de drinkwaterleiding reeds pompproeven waren gedaan, leek het wenselijk een meer westelijk gelegen punt voor de pompproef te kiezen. De keuze viel ten slotte op een gebied, dat ongeveer 1,5 km ten zuidwesten van Haarlo (gem. Borculo) is gelegen. In figuur 1 is de ligging van de pompput (M74) en de waarnemingsputten aangegeven. Noordelijk van de pompput werden waarnemingsputten geplaatst op afstanden van 10, 25, 50, 100 en 285 m van de pompput, en in een zuidelijke raai op afstanden van 10, 25, 50, 100 en 220 m van de pompput. In deze raai kon gebruik worden gemaakt van boring M 69, die reeds eerder ten behoeve van het geologische onderzoek was gemaakt en waarin peilfilters waren gesteld.

De verderaf gelegen boringen M 68 en M 70 waren niet alleen van belang voor de geologische interpretatie; zij dienden tevens als controleputten om eventuele veranderingen in de stijghoogten van het grondwater na te gaan, welke door andere oorzaken dan door de proefpomp worden teweeg gebracht (regenval, luchtdrukveranderingen).

## 3. Geologie

Uit de profielbeschrijvingen van de verschillende boringen is gebleken, dat de ondergrond in de omgeving van de pompproef uit een pakket van afwisselende zand- en kleilagen bestaat (fig. 2).

Uit deze figuur blijkt, dat de basislaag van het gebied uit een vrij zware klei bestaat, waarvan de bovenzijde op 36 à 37 m beneden maaiveld (-19 à -20 m N.A.P.) ligt. Deze klei, die donkergrijs tot blauwgroen van kleur is en veel glauconiet bevat, behoort tot het Mariene Mioceen. Het gehalte aan afslibbare delen varieert, maar bedraagt gewoonlijk 40 à 60 %. Hoewel deze kleilaag in N-Z richting vrijwel horizontaal ligt, blijkt toch in het uiterste noorden van het profiel (in boring M 68) een afwijkende diepteligging voor te komen. Hier werd op 50 m beneden maaiveld (-33 m N.A.P.) nog geen Mioceen bereikt.

Boven deze Mioceen klei, die vermoedelijk een aanzienlijke dikte heeft

en als ondoorlatende basis is te beschouwen, komt een 3 à 4 m dikke laag fijne, glauconiet- en slibrijke zanden voor, die eveneens nog tot het Mioceen gerekend kunnen worden.

Deze Tertiaire afzettingen worden bedekt door een 12 tot 15 m dik pakket grove, grindrijke zanden, die een grote doorlatendheid bezitten. Dit pakket als geheel kan als de belangrijkste watervoerende laag worden beschouwd. In geologisch opzicht bestaat het echter uit twee zones, die mineralogisch duidelijk van elkaar verschillen. In beide zones komt de mineraal-associatie epidoot, granaat, hoornblende, saussuriet-alteriet voor, maar in de onderste zone, die direct op het Mioceen is gelegen, worden hoge percentages aan vulkanische mineralen (o.a. augiet) aangetroffen (fig. 3). Deze zone vertegenwoordigt vermoedelijk een Midden-Pleistocene Rijn-afzetting.

De bovenste zone van dit grove pakket, waarin bijna geen of slechts zeer weinig vulkanisch materiaal voorkomt, wordt tot de fluvioglaciale afzettingen gerekend. De bovenste paar meters van dit pakket bestaat uit een fijnzandiger afzetting.

De fluvioglaciale afzettingen worden aan de bovenzijde begrensd door een kleilaag, die in alle boringen is aangetroffen. Deze kleilaag, die rijk is aan humus en schelpresten, heeft een dikte van 4 à 6 m en is vermoedelijk gedurende het Eemien (Riss Würm interglaciaal) gevormd.

Deze Eem-afzetting wordt bedekt door een grofzandige laag, waarin enig fijn grind is aangetroffen. De dikte van deze grove laag, die echter minder grofkorrelig is dan de onder de klei voorkomende grove zanden, bedraagt 4 à 5 m. Ook in deze afzetting wordt bovengenoemde zware mineralen-associatie gevonden, met dit verschil dat het mineraal groene hoornblende domineert (fig. 3). Opvallend is verder het optreden van vulkanische mineralen, die een belangrijk percentage van het zware mineralenresidu uitmaken. De afzetting is vermoedelijk gedurende het Würm-glaciaal door de Rijn gevormd. Hydrologisch is de afzetting als de tweede watervoerende laag te beschouwen.

Dit watervoerende pakket wordt afgedekt door een fijnzandige deklaag, die tot aan maaiveld reikt. Deze deklaag vertoont een nogal onregelmatige samenstelling. Het fijne zand heeft overwegend een dekzand-karakter, maar plaatselijk is het meer of minder slibhoudend en worden dunne leemlaagjes gevonden. De dikte van deze deklaag varieert van ca. 4 tot 12 m, maar bedraagt gemiddeld ca 6 à 7 m.

Opgemerkt zij, dat de lithologie in het profiel onder de Eem-klei in boring M 68 sterk afwijkt van dat in de overige boringen. In plaats van een grofzandig pakket, worden hier in hoofdzaak matig fijne tot middelfijne zanden gevonden, met enkele kleilaagjes. Alleen op ca-19m N.A.P. komt een laag grof zand voor tot een dikte van ca 2 m.

Samenvattend kan dus worden gesteld, dat in het gebied twee watervoerende lagen van verschillende dikte voorkomen, gescheiden door een kleilaag. De belangrijkste van deze beide lagen is die, welke op een diepte van ca 0 tot -16 m N.A.P. is gelegen en zowel aan de onder- en bovenzijde door een kleilaag is begrensd. De tweede watervoerende laag is gelegen op een diepte van -6 tot -12 m N.A.P. Deze laag, die een geringere dikte heeft dan eerstgenoemde en uit materiaal bestaat dat minder grof is, wordt aan de basis door een kleilaag begrensd en aan de bovenzijde door een fijnzandige deklaag, die tot aan maaiveld reikt.

#### 4. Uitvoering van de pompproef

In fig.2 is de ligging en de diepten van de verschillende putten aangegeven, alsook de diepten waarop de waarnemingsfilters en de pompfilters waren gesteld. Zoals is op te merken werd in iedere boring één filter geplaatst in de watervoerende laag onder de Eemien-klei, één filter in de watervoerende laag boven deze klei en één filter in de deklaag op ca 2 m beneden maaiveld.

De pompproef werd in twee gedeelten uitgevoerd, waarbij eerst afpomping plaats vond in de diepe watervoerende laag en daarna in de ondiepe. Het pompfilter in de diepe laag had een lengte van 8 m en was gesteld op een diepte van 24,00 tot 32,00 m beneden maaiveld. De diameter van het pompfilter was 3". De gebruikte pomp had een maximale capaciteit van ca.40 m<sup>3</sup> per uur.

Loodrecht op de raai van waarnemingsfilters werd een afvoerleiding van beregeningsbuizen gelegd, waardoor het opgepompte water naar een nabijgelegen sloot kon worden afgevoerd. De lengte van de afvoerleiding bedroeg ca 250 m. Door deze uitvoering was de kans op circulatie van het opgepompte water vrij klein. Aan het begin van de afvoerleiding werd in een zak een watermeter geplaatst, zodat deze steeds vol water was en geen onjuiste metingen waren te verwachten. Doordat de beregeningsbuizen een diameter hadden van slechts 2½" en de uitstroomopening van de pomp een diameter had van 3" trad een aanzienlijk drukverlies op.

Alvorens met de afpompings te beginnen werden alle filters ( dus in rusttoestand) opgemeten. Dit geschiedde met een peilklokje aan een koting. Nadat de watermeter was afgelezen en de pomp aangezet, werd de kraan geopend en het tijdstip van opendraaien nauwkeurig genoteerd. Eén uur na het openen van de kraan, werd de watermeter afgelezen, de stand van het grondwater in de pompput electrisch gepeild en daarna de grondwaterstand in alle waarnemingsputten opgenomen. Ieder uur werden deze metingen herhaald. Steeds werd na de pompput eerst de zuidelijke raai gepeild en daarna de noordelijke, waarbij steeds begonnen werd met de dichtst bij de pompput gelegen waarnemingsputten.

Tijdens de proefpompings bleek al spoedig, dat het filter I (op 27 m -m.v.) in de waarnemingsput op 10 m van de pompput in de noordelijke raai niet goed functioneerde. De peilfilters II en III (resp. op ca 9 m en 2 m -m.v.) van alle waarnemingsputten vertoonden geen noemenswaardige peilverlagingen gedurende het pompen (fig.4). Hieruit is af te leiden, dat de Bemien klei zich over een grotere afstand aaneengesloten uistrekt en een afsluitende laag vormt. Opgemerkt moet evenwel worden, dat de klei niet algemeen in het gehele proefgebied voorkomt, want reeds in boringen op enkele kilometers afstand van de pompproef werd op deze diepte geen klei meer aangetroffen. Het water dat zich in de grove laag onder de klei bevindt, is dus als onvolkomen spanningswater te beschouwen.

Als bijzonderheid bij de metingen kwam naar voren, dat de diepe peilfilters in de waarnemingsputten M 69 (op 220 m zuidelijk van de pompput) en in put 285 m noordelijk van de pompput, een naar verhouding grote daling vertoonden (zie fig.4). Zelfs het diepe filter in put M 70, gelegen op ca 1 km zuidelijk van de pompput vertoonde nog een meetbare daling. De proefpompings met het pompfilter onder de kleilaag werden drie opeenvolgende dagen herhaald, waarbij steeds na 8 uren pompen nagenoeg een evenwichtstoestand was bereikt (fig.5).

De derde dag werd de eerste drie uren met een capaciteit van  $29 \text{ m}^3$  per uur gepompt, waarna de afpompings van de pompput werd gehalveerd door nu met een capaciteit van  $17,50 \text{ m}^3$  per uur te pompen. Op deze manier is het in sommige gevallen mogelijk de evenwichtstoestand eerder te bereiken en de invloedsafstand nauwkeuriger te bepalen (einde van de afpompingsstrecter).

Ten einde de formatiefactoren van de tweede watervoerende laag te bepalen, werd vervolgens een pompproef in deze laag uitgevoerd. Daartoe werd het pompfilter opgetrokken en van 6.30 tot 10.30 m beneden maaiveld in de

grofzandige laag boven de klei geplaatst. Er werden nog enkele peilfilters op 2 m afstand van de pompput geplaatst op een diepte van ca 2 m beneden maaiveld en wel ten noorden, oosten, zuiden en westen van de pompput.

Tijdens de pompproef bedroeg de pompcapaciteit slechts  $3,75 \text{ m}^3$  per uur, zodat de afpompingsbelasting belangrijk minder was dan bij de eerste proef.

Opgemerkt moet worden, dat verschillende ondiepe peilfilters nogal afwijkende peilverlagingen te zien gaven (fig. 6b).

In het bijzonder de peilfilters in de noordelijke raai op 25 en 50 m van de pompput vertoonden sterke afwijkingen. Zelfs in rusttoestand bleken de potentiaalverschillen tussen het ondiepe (III) en middelste (II) filter van deze putten reeds belangrijk groter te zijn vergeleken met de filters in de overige putten. De oorzaak van de afwijkingen kon niet worden vastgesteld, omdat genoemde peilputten tot een diepte van ca 10 m als spoelboring waren uitgevoerd. Gedurende de proefpompingsritten traden geen noemenswaardige dalingen op in de diepste peilfilters, geplaatst onder de Eemien klei. Er werd voor deze proef twee opeenvolgende dagen gedurende 8 uren gepompt en uurwaarnemingen in alle filters verricht. De resultaten van alle metingen zijn weergegeven in de tabellen 1, 2 en 3.

## 5. Berekeningen

Uit de waarnemingen tijdens de pompproeven verricht, kunnen de volgende formatieconstanten worden berekend;

- a) de doorlaatcapaciteit van de watervoerende lagen, ook wel  $kD$ -waarde genoemd. Hierin stelt  $k$  de gemiddelde horizontale doorlaatfactor (in m/dag) van het watervoerend pakket voor en  $D$  de dikte (in m) van dit pakket. De  $kD$ -waarde wordt uitgedrukt in  $\text{m}^2/\text{dag}$ .
- b) de verticale weerstand van de semi-permeabele (dek)lagen, ook wel  $c$ -waarde genoemd. Deze constante wordt gedefinieerd;  $c = \frac{D'}{k'}$  waarin  $D'$  de dikte van de semi-permeabele laag (in m) voorstelt en  $k'$  de verticale doorlatendheid (in m/dag) van deze laag. De verticale weerstand wordt uitgedrukt in dagen.
- c) de spreidingslengte  $L$  (in m.) ook wel voorgesteld door  $B$  of  $\lambda$ . Deze grootheid geeft spreiding weer van de stroombanen onder de deklaag en wordt gedefinieerd  $L = \sqrt{kDc}$ .
- d) de bergingscoëfficiënt  $S$ , een onbenoemd getal, dat de hoeveelheid water aangeeft, die per  $\text{m}^2$  oppervlak van het watervoerend pakket vrijkomt als

de grondwaterstijghoogte 1 m wordt verlaagd. Deze grootheid is afhankelijk van de samendrukbaarheid van grond en water en is evenredig met de dichtheid van het water.

Om bovengenoemde formatieconstanten te kunnen berekenen zijn de waarnemingsuitkomsten op verschillende manieren grafisch verwerkt. De volgende grafieken zijn samengesteld:

- afpompingskrommen, waarbij de afstanden van de verschillende peilputten tot de pompput tegen de waargenomen peil-verlagingen in deze putten op lineaire schaalverdeling zijn uitgezet (fig.4). Deze figuur geeft een indruk van de peilverlagingen, die na 8 uur pompen uit de diepe watervoerende laag, in de verschillende waarnemingsbuizen zijn opgetreden.
- tijd-potentiaal kromme, waarbij de waargenomen dalingen van de grondwaterstijghoogten in één enkele waarnemingsput tegen de tijd zijn uitgezet. Voor de grondwaterstands dalingen is een lineaire, voor de tijd een logaritmische schaalverdeling toegepast (fig.5a en b). Doordat gedurende het eerste uur van de proef onvoldoende waarnemingen zijn verricht, is het buigpunt van de kromme niet bekend, hetgeen de curve voor verdere berekeningen ongeschikt maakt.
- afpompingskrommen, waarbij de afstanden van de verschillende peilputten tot de pompput tegen de verlagingen van de grondwaterstijghoogten in deze putten op dubbel-logaritmische schaalverdeling zijn uitgezet (fig.6a en b)
- afstands-potentiaal kromme, waarbij de afstanden van de waarnemingsputten tot de pompput tegen de grondwaterstands dalingen in deze putten zijn uitgezet (fig.7a en b). Voor de afstanden is een logaritmische, voor de grondwaterstands dalingen een lineaire schaalverdeling toegepast. Om de  $kD$ -en  $c$ -waarden met behulp van deze krommen te kunnen berekenen, geldt als voorwaarde, dat  $r/B \leq 0,05$ , hierin stelt  $r$  de afstand van de waarnemingsput tot de pompput voor en  $B$  de spreidingslengte.

Voor de berekening van het doorlatend vermogen van de onderste, met spanningswater gevulde, grove laag is gebruik gemaakt van de formule van Thiem, geldend voor stationaire stroming

$$Q = 2\pi kD \frac{h_2 - h_1}{\ln r_2/r_1} \quad (1)$$

hierin is de  $Q$  de hoeveelheid water in  $m^3$  die per tijdséénheid aan de wattervoerende laag is onttrokken,  $kD$  het doorlatend vermogen van deze laag,  $h_2$  en  $h_1$  de stijghoogten van het grondwater op afstanden van respectievelijk  $r_2$  en  $r_1$  meter van de pompput, nadat bij permanente onttrekking van een constante hoeveelheid water nagenoeg een evenwichtstoestand is bereikt.

Indien het potentiaalverschil  $h_2 - h_1$  door  $\Delta h$  wordt voorgesteld, is deze formule te schrijven:

$$kD = \frac{Q}{2\pi \Delta h} \ln r_2/r_1 \quad (2)$$

- a) Voor de waarnemingsputten op 100 en 10 m. van de pompput in de zuidelijke raai, bedroeg het potentiaalverschil  $\Delta h$ , bij een constante wateronttrekking  $Q = 25,33 m^3/\text{uur}$ ,  $0,330 - 0,211 = 0,119$  m.  
Gesubstitueerd in (2) geeft voor  $kD$ :

$$kD = \frac{24 \times 25,33}{2\pi \times 0,119} \ln \frac{100}{10} = \frac{607,9 \times 2,3}{3,14 \times 0,238} = 1871 m^2/\text{dag}.$$

- b) In de noordelijke raai worden de waarnemingsputten gebruikt, die op 100 en 25 m van de pompput liggen. Het potentiaalverschil tussen deze peilputten bedroeg  $\Delta h = 0,271 - 0,227 = 0,044$  m.  
Gesubstitueerd in (2) geeft voor de  $kD$ -waarde:

$$kD = \frac{24 \times 25,33}{2\pi \times 0,044} \ln \frac{100}{25} = \frac{607,9 \times 1,38}{3,14 \times 0,088} = 3036 m^2/\text{dag}.$$

Het blijkt dus, dat het doorlatend vermogen in noordelijke richting belangrijk groter is dan in zuidelijke richting. De  $kD$ -waarde van de diepe wattervoerende laag bedraagt gemiddeld ongeveer  $2450 m^2/\text{dag}$ . Nemen we voor de dikte van deze laag gemiddeld 15 m aan, dan volgt hieruit dat de gemiddelde horizontale doorlaatfactor van deze laag  $k = 164 m/\text{dag}$ .

In recente tijd zijn door Hantush (1956) grafische methoden ontwikkeld met behulp waarvan de formatieconstanten van een oneindige wattervoerende laag met onvolkomen spanningswater kunnen worden berekend. De methode is gebaseerd op de door Hantush and Jacob (1955) ontwikkelde theorie voor de niet-permanente stroming in een oneindige wattervoerende laag met onvolkomen spanningswater naar een put, waaraan continu water wordt onttrokken. Voor de daling geldt de formule;

$$h = \frac{Q}{4\pi kD} W(u, r/B) \quad (3)$$



hierin is  $h$  = de daling,  $Q$  = de hoeveelheid water die per tijdseenheid aan de laag wordt onttrokken,  $kD$  = het doorlatend vermogen van de laag en  $W(u, r/B)$  de "put functie", hierin is  $u = \frac{r^2 S}{4 kD t}$ ,  $r$  = de afstand van de as van de pompput tot ieder punt in het veld,  $t$  = de tijd sedert met de afpompings werd begonnen en  $S$  = de bergingscoëfficiënt,  $B = \sqrt{kD \cdot c}$  de spreidingslengte of volgens Hantush and Jacob (1954) de "lek factor",  $c = \frac{D'}{k'}$  de verticale weerstand van de semi-permeabele laag, of volgens genoemde auteurs ook wel de "lek coëfficiënt" genoemd,  $D'$  en  $k'$  zijn respectievelijk de dikte en de verticale doorlatendheid van de semi-permeabele laag. Voor de maximale daling bij permanente stroming (stationaire stroming) in de omgeving van een pompput geldt de formule van De Glee:

$$h_{\max.} = \frac{Q}{2 \pi kD} K_0 \frac{r}{B} \quad (4)$$

hierin is  $K_0$  de gemodificeerde functie van Bessel van de orde nul.

Indien nu  $r/B$  klein is ( $r/B \ll 0,05$ ) kan formule (4) voor praktische doeleinden bij benadering geschreven worden:

$$h_{\max.} \approx \frac{2,3}{2 \pi kD} Q \log \left( 0,89 \frac{r}{B} \right) \quad (5)$$

Wanneer dus aan het einde van de pompproef geen merkbare daling meer wordt waargenomen en de evenwichtstoestand bij benadering is bereikt, kunnen de maximale dalingen tegen de afstanden van de verschillende peilputten op half-logarithmisch papier worden uitgezet. Voor de afstanden ( $r$ ) wordt de logarithmische schaalverdeling gebruikt en voor de dalingen de lineaire schaalverdeling. In het traject, waarin  $r/B$  klein is, zullen de punten op een rechte liggen, voor het traject waarin  $r/B$  groot is vallen de punten op een kromme, die de abscis, waar  $h = 0$ , asymptotisch nadert.

$$\text{De helling van het rechte deel van de curve } \frac{4 h}{4 \log r} = \frac{2,3 Q}{2 \pi kD} \quad (6)$$

Om de factor  $B$  te vinden wordt het rechte deel van de curve verlengd tot deze de abscis, waarvoor  $h_{\max} = 0$ , snijdt in een punt  $r_0$ .  $B$  kan nu berekend worden volgens  $B = 0,89 r_0$ . (7)

De waarnemingen verricht bij de pompproef in de diepe watervoerende laag met onvolkomen spanningswater zijn volgens bovengenoemde methode verwerkt. In figuur 7a zijn de maximale dalingen voor de zuidelijke raai tegen de afstanden op half logarithmisch papier uitgezet. Het blijkt, dat over de eerste 100 m de punten ongeveer op een rechte liggen, die bij verlenging de abscis snijdt bij een punt  $r_0 \approx 6500$  m.  $B = 0,89 \times 6500 \approx 5800$  m.

Uit de figuur volgt, dat voor één logarithmische periode de daling  $\Delta h = 0,330 - 0,211 = 0,119$  m.

Deze waarde gesubstitueerd in formule (6) geeft voor  $kD$  :

$$kD = \frac{2,3 \cdot 0}{2 \pi \Delta h} = \frac{2,3 \times 24 \times 25,33}{2 \times 3,14 \times 0,119} = \frac{1398,2}{0,74732} = 1870 \text{ m}^2/\text{dag}$$

de verticale weerstand ( $c$ ) van de semi-permeabele kleilaag kan nu berekend worden uit  $B = \sqrt{kD \cdot c}$  of  $c = \frac{B^2}{kD} = \frac{(5800)^2}{1870} = 18000$  dagen.

De curve voor de noordelijke raai is weergegeven in figuur 7b. Doordat het filter op 10 m van de pomput tijdens de proef niet goed functioneerde is voor de maximale daling een waarde van 33 cm aangenomen, overeenkomende met de daling in het filter op 10 m van de pomput in de zuidelijke raai. Het verloop van de curve is hierdoor niet geheel betrouwbaar, evenals de hieruit af te leiden formatieconstanten.

Uit de figuur blijkt, dat ook nu de waarnomingspunten over de eerste 100 m op een rechte liggen, die bij verlenging de abscis snijdt in een punt  $r_0 = 10\ 000$  m. Hieruit volgt voor de spreidingslengte  $B = 0,89 \times 10\ 000 = 8900$  m.

Uit de figuur volgt verder, dat over één logarithmische periode de daling  $\Delta h = 0,330 - 0,221 = 0,109$  m. Gesubstitueerd in formule (6) geeft voor de  $kD$ -waarde:

$$kD = \frac{2,3 \times 24 \times 25,33}{2 \times 3,14 \times 0,109} = \frac{1398,216}{0,68452} = 2043 \text{ m}^2/\text{dag}.$$

Voor de verticale weerstand ( $c$ ) van de kleilaag in de noordelijke raai geldt  $c = \frac{B^2}{kD} = \frac{(8900)^2}{2043} = 38\ 771$  dagen.

Vergelijken we thans de resultaten van beide berekeningsmethoden, dan blijkt dat voor de zuidelijke raai beide methoden voor de  $kD$ -waarde eenzelfde uitkomst geven, namelijk  $kD = 1870 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Voor de noordelijke raai geeft de formule van Thiem een waarde van  $3036 \text{ m}^2/\text{dag}$  en de methode volgens Hantush een waarde van  $2043 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Dit verschil kan mede veroorzaakt zijn, doordat voor het peilfilter op 10 m afstand van de pomput een onjuiste daling is aangenomen (zie boven).

Nemen wij voor de noordelijke raai een  $kD$ -waarde aan van gemiddeld  $2540 \text{ m}^2/\text{dag}$  en voor de zuidelijke raai van  $1870 \text{ m}^2/\text{dag}$ , dan kan de gemiddelde  $kD$ -waarde van de diepe watervoerende laag op  $2200 \text{ m}^2/\text{dag}$  gesteld worden.

#### De bergingscoëfficiënt S

Voor de berekening van deze formatie constante kan de formule van Hantush and Jacob (1955) eveneens gebruikt worden.

Immers voor de daling geldt (3):  $h = \frac{Q}{4\pi kD} W(u, r/B)$ , waarin  $u = \frac{r^2 S}{4 kD t}$   
Voor de zuidelijke raai is  $B = 5800$  en wordt vervolgens  $r = 100$  m gesteld,  
dan is  $r/B = \frac{100}{5800} = 0,0172$ .

Op een afstand  $r = 100$  m bedraagt de daling  $h = 0,211$  m. Substitueren van deze en de overige bekende waarden in bovengenoemde formule geeft:

$$W(u, 0,0172) = \frac{4 \times 3,14 \times 1870 \times 0,211}{24 \times 25,33} = \frac{4955,7992}{607,92} = 8,1849$$

$W(u, 0,0172) = 8,1849$ . Volgens de door Hantush (1956) berekende waarden van deze "putfunctie" volgt hieruit voor  $u = 0,00009$ . Substitueren van deze waarde voor  $u$  in bovenstaande formule geeft voor de bergingscoëfficiënt  $S$  de waarde:

$$S = \frac{4 kD t u}{r^2} = \frac{4 \times 1870 \times 1/3 \times 9 \times 10^{-5}}{100^2} = 2,2 \times 10^{-5}$$

#### Resultaten van de pompproof in de bovenste watervoerende laag

In tabel 2 zijn de waarnemingsuitkomsten vermeld van de pompproof, die in de bovenste watervoerende laag is verricht. Het pompfilter was gesteld op een diepte van 6,30 tot 10,30 m beneden maaiveld; de pompcapaciteit bedroeg  $3,35 \text{ m}^3$  per uur (fig.2). De waarnemingsuitkomsten zijn grafisch verwerkt op dubbel en half logaritmisch papier (fig. 6b en 8). Zoals uit figuur 2 blijkt, bevindt zich boven de betreffende watervoerende laag een ca. 4 tot 12 m dikke deklaag, bestaande uit fijne, soms slibhoudende zanden met ingesloten leemlaagjes. Gedurende de proefpompings bleken grote variaties op te treden in de dalingen van het freatisch vlak, hetgeen in de ondiepe peilfilters op ca. 2 m - m.v. kon worden vastgesteld (fig.6b). In sommige peilfilters trad een normale daling op, in andere daarentegen, was de daling aanzienlijk minder dan op grond van de ligging t.o.v. de pompput kon worden verwacht. Deze verschillen zijn een gevolg van de heterogene samenstelling van de deklaag, die een wisselende verticale doorlatendheid bezit en als semi-permeabele laag is te beschouwen. Voor de berekening van de formatieconstanten van de bovenste watervoerende laag kan daarom gebruik gemaakt worden van de methode van Hantush (1956).

In figuur 8a en b zijn de afpompingcurven voor de beide waarnemingsraaien op half-logaritmisch papier ingetekend, de afstanden op de horizontale as op logaritmische schaalverdeling, de dalingen op de verticale as op lineaire schaalverdeling. De geïnterpoleerde dalingen op 15, 20, 30 en 40 m afstand van de pompput zijn afgeleid van de op lineaire schaalverdeling

getekende afpompcurven. Uit de figuur blijkt, dat de waarnemingspunten op korte afstanden tot de pompput nagenoeg op een rechte liggen. De helling van deze rechte  $\frac{\Delta h}{\Delta \log r} = \frac{2,3 Q}{2\pi kD}$

Indien voor  $\Delta h$  één logarithmische periode wordt genomen, dan is  $\Delta \log r = 1$ , zodat bovenstaande formule kan worden geschreven:

$$\Delta h = \frac{2,3 Q}{2\pi kD} \quad \text{of} \quad kD = \frac{2,3 Q}{2\pi \Delta h}$$

Voor de spreidingslengte (B) geldt:  $B = 0,89 r_0$ , waarbij  $r_0$  het snijpunt is van de rechte met de horizontale as, waar  $\Delta h = 0$ .

Formatieconstanten voor de zuidelijke raai

1) Doorlatend vermogen (kD-waarde)

Volgens figuur 8a bedraagt de daling  $\Delta h$  over één logarithmische periode 0,13 m, terwijl verder  $r_0 = 103$  m.

$$kD = \frac{2,3 Q}{2\pi \Delta h} = \frac{2,3 \times 24 \times 3,35}{2 \times 3,14 \times 0,13} = \frac{184,92}{0,8164} = 226 \text{ m}^2/\text{dag}$$

2) Spreidingslengte (B)

$$B = 0,89 r_0 = 0,89 \times 103 = 91,67 \text{ m.}$$

3) Verticale weerstand (c-waarde)

$$\text{Af te leiden uit } B = \sqrt{kD \cdot c} \text{ of, } c = \frac{B^2}{kD} = \frac{(91,67)^2}{226} = 37 \text{ dagen}$$

4) Bergingscoëfficiënt (S)

Deze constante kan worden berekend uit de formules:

$$\Delta h = \frac{Q}{4\pi kD} W(u, r/B) \quad \text{en} \quad u = \frac{r^2 S}{4 kD \cdot t}$$

$$\text{Stel } r = 10 \text{ m, dan is } r/B = \frac{10}{91,67} = 0,1091$$

Voor  $r = 10$  m bedraagt de daling  $\Delta h = 0,13$  m.

$$W(u, r/B) = \frac{4\pi kD \cdot \Delta h}{Q} \cdot \text{Bovengenoemde waarden hierin gesubstitueerd geeft:}$$

$$W(u, 0,1091) = \frac{4 \times 3,14 \times 226 \times 0,13}{24 \times 3,35} = \frac{369,012}{80,4} = 4,5897.$$

Voor deze W-functie moet volgens de tabel van Hantush  $u = 0,003$  zijn.

$$u = \frac{r^2 S}{4 kD \cdot t} \quad \text{of} \quad S = \frac{4 kD \cdot t \cdot u}{r^2} = \frac{4 \times 226 \times 1/3 \times 0,003}{100} = 0,00904$$

$$S = 9,04 \times 10^{-3}.$$

Formatieconstanten voor de noordelijke raai

1) Doorlatend vermogen (kD-waarde)

Volgens figuur 8b bedraagt de daling  $\Delta h$  over één logaritmische periode 0,128 m, terwijl  $r_0 = 98$  m.

$$kD = \frac{2,3 Q}{2 \pi \Delta h} = \frac{2,3 \times 24 \times 3,35}{2 \times 3,14 \times 0,128} = \frac{184,92}{0,80384} = 230 \text{ m}^2/\text{dag.}$$

2) Spreadingslengte (B)

Af te leiden uit  $B = 0,89 r_0 = 0,89 \times 98 = 87$  m.

3) Verticale weerstand (c-waarde)

Af te leiden uit :  $B = \sqrt{kD \cdot c}$  of,  $c = \frac{B^2}{kD} = \frac{(87)^2}{230} = 33$  dagen.

4) Borgingscoëfficiënt (S)

Nemen we voor de afstand  $r = 10$  m, dan is  $r/B = \frac{10}{87} = 0,115$ .

Voor  $r = 10$  m bedraagt de daling  $\Delta h = 0,128$  m. Substitutie van deze en de overige bekende waarden in  $W(u, r/B) = \frac{4 \pi \cdot kD \cdot \Delta h}{Q}$  geeft:

$$W(u, 0,115) = \frac{4 \times 3,14 \times 230 \times 0,128}{24 \times 3,35} = \frac{369,766}{80,4} = 4,5990$$

Volgens de tabel, die door Hantush voor deze W-functie is gegeven, volgt voor  $u = 0,003$ .

$$u = \frac{r^2 S}{4 kD \cdot t} \text{ of, } S = \frac{4 kD \cdot t \cdot u}{r^2} = \frac{4 \times 230 \times 1/3 \times 0,003}{100} = 9,2 \times 10^{-3}$$

Het voorgaande samenvattend, kan het volgende worden gesteld. Het doorlatend vermogen van de bovenste watervoerende laag bedraagt gemiddeld 228 m<sup>2</sup>/dag.

Voor de verticale weerstand van de deklaag wordt een gemiddelde waarde van 35 dagen gevonden. Wanneer voor de dikte van de deklaag gemiddeld ca 6 m wordt aangenomen, dan is overeenkomstig de definitie van de verticale weerstand  $c = \frac{D'}{k'}$  de verticale doorlaatfactor ( $k'$ ) van de deklaag:

$$k' = \frac{D'}{c} = \frac{6}{35} = 0,17 \text{ m/dag.}$$

Bij een gemiddelde dikte van de watervoerende laag van ca. 4,8 m en een kD-waarde van 228 m<sup>2</sup>/dag, volgt hieruit voor de gemiddelde horizontale doorlaatfactor van de watervoerende laag een waarde  $k = 47,5$  m/dag.

De resultaten van de pompproef vergeleken met die, welke volgens de korrelgrootte verdeling zijn gevonden.

Zoals in het voorgaande reeds is opgemerkt, zijn in de pomput geroerde (puls) monsters genomen. Deze monsters zijn granulometrisch onderzocht, waarna met behulp van het U - cijfer, het slib-en grindgehalte en de sorteringsgraad van ieder monster, de doorlaatfactor is berekend volgens de formule  $kU^2 \approx 50\ 000$ . Van alle opeenvolgende lagen kon aldus de kD-waarde bepaald worden, die gesommeerd een gemiddelde kD-waarde van de watervoerende laag opleverde.

De resultaten zijn in onderstaande tabel vermeld naast die, welke zijn verkregen door middel van de pompproeven.

	kD-waarden	
	volgens pompproef (Hantush-methode)	volgens korrelgrootte verdeling.
ondiepe watervoerende laag (5,80 - 10,60 m.- m.v.)	228 m <sup>2</sup> /dag	120m <sup>2</sup> /dag
diepe watervoerende laag (16,00 - 32,90 m.- n.v.)	1956 m <sup>2</sup> /dag	1550 m <sup>2</sup> /dag

Uit deze tabel blijkt dat de kD-waarden, die zijn berekend uit pompproef gegevens, belangrijk groter zijn dan die, welke door middel van korrelgrootte analyses zijn bepaald. Nu zijn de grindgehalten van de verschillende pulsmonsters niet exact bepaald, maar geschat. Sommige monsters waren zeer rijk aan grind. En daar het grind, vooral bij hoge percentages, de doorlaatfactor belangrijk beïnvloedt, is het mogelijk dat door onjuiste schattingen van het grindgehalte een te lage kD-waarde is berekend.

Bij de uitwerking van de gegevens en de samenstelling van dit verslag gaven de heren drs.L.F.Ernst en dr.J.Wesseling waardevolle aanwijzingen. De schrijvers spreken hiervoor gaarne hun dank uit.

Literatuur

- GLEE, G.J.DE (1930) - Over grondwaterstromingen bij wateronttrekking door middel van putten. Delft, J.Waltman.
- (1951) - Berekeningsmethoden voor de winning van grondwater. in: Drinkwatervoorziening, derde Vacantiecursus 4-5 januari 1951 Den Haag, Moorman's periodieke pers.
- HANTUSH, M.S. and  
JACOB C.E. (1955) - Non steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Trans.Amer-Geophys.Union, 36,pp.95 - 100.
- HANTUSH, M.S.(1956) - Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Trans.Amer-Geophys. Union,37,pp. 702-714.
- JONG, J DE (1960) - Enige beschouwingen betreffende de analyse van pomp-proeven in het bijzonder in onvolkomen spanningswater. Water, 44, n. 23, pp.297 - 301.
- TODD,D.K. (1959) - Ground Water Hydrology. 336 pag. New York, J.Wiley and Sons.

Wageningen, mei 1961.

Figuur bijschriften artikel pompproef Groenlo.

- figuur 1 Hot gebied van de pompproef met de locatie van de pompput en de verschillende waarnemingsputten.
- figuur 2 Lithologisch profiel van de pompproef met de diepten van de verschillende pomp-en waarnemingsfilters.
- figuur 3 De zware mineralen samenstelling van de verschillende sedimenten in boring M 69.
- figuur 4 Afpompingcurven voor de verschillende lagen gedurende de proefpomp in de onderste watervoerende laag op 0 tot - 16 m. N.A.P.
- figuur 5 Tijd-potentiaalcurven, aangevende de dalingen, die over de periode van afpomping in iedere waarnemingsput zijn opgetreden. Figuur 5a de dalingen in de peilfilters op 27 m - m.v.van de zuidraai, figuur 5 b die van de noordraai.
- figuur 6 Afpompingcurven voor de verschillende watervoerende lagen. Figuur 6a geeft de curven van de potentiaal verlagingen in de diepe filters op 27 m - m.v. tijdens de afpomping in de diepe watervoerende laag. Figuur 6b die van de filters op ca 9 en 2 m - m.v. tijdens de afpomping in de bovenste watervoerende laag.
- figuur 7 Afstands-potentiaal curven, aangevende de maximale dalingen die in de verschillende peilfilters op 27 m - m.v.zijn opgetreden, nadat aan het einde van de pompproef in de diepe watervoerende laag nagenoeg de evenwichtstoestand was bereikt. Figuur 7a de curve voor de zuidelijke raai, figuur 7b die voor de noordelijke raai.
- figuur 8 Afstands-potentiaal curven aangevende de maximale dalingen, die in de verschillende peilfilters op ca 9 m - m.v.zijn opgetreden, nadat aan het einde van de pompproef in de bovenste watervoerende laag de evenwichtstoestand nagenoeg was bereikt. Figuur 8a geeft de curve voor de zuidelijke raai, figuur 8b die voor de noordelijke raai.