

r.i.d. mededeling 79-2

de bepaling van k-waarden in het veld aan
de hand van "putproeven" en "puntproeven"

resultaten van het onderzoek aan de
parkweg (den haag)

ir. g.j.m. uffink

Hydr. Uffink 79





rijksinstituut voor drinkwatervoorziening

nieuwe havenstraat 6, voorburg (den haag)
postbus 150, 2260 AD leidschendam, nederland
telefoon: 070-694251
telex: 33604 ridvz nl., telegram: rijksdrinkwater.



"R.I.D.-mededelingen" zijn bedoeld als communicatiemiddel ten behoeve van degenen die betrokken zijn bij de vraagstukken waarbij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening door kennis en ervaring hulp kan verlenen. Daarom ook zullen in vele gevallen de conclusies van voorlopige aard zijn, omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Hypm- Uffink 79

r.i.d. mededeling 79-2

**de bepaling van k-waarden in het veld aan
de hand van "putproeven" en "puntproeven"**

**resultaten van het onderzoek aan de
parkweg (den haag)**

ir. g.j.m. uffink



rijksinstituut voor drinkwatervoorziening

nieuwe havenstraat 6, voorburg (den haag)
postbus 150, 2260 AD leidschendam, nederland
telefoon: 070-694251
telex: 33604 ridvz nl., telegram: rijksdrinkwater.



"R.I.D.-mededelingen" zijn bedoeld als communicatiemiddel ten behoeve van degenen die betrokken zijn bij de vraagstukken waarbij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening door kennis en ervaring hulp kan verlenen. Daarom ook zullen in vele gevallen de conclusies van voorlopige aard zijn, omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.



inhoudsopgave

	Blz.
Samenvatting / abstract	1
1. Inleiding	2
2. Beschrijving van het proefterrein	5
2.1. De geohydrologische gesteldheid	5
2.2. Afwerking van de boring	5
3. Pompproef	12
3.1. Korrekties	12
3.2. Uitwerking / resultaten	14
4. Putproeven	18
4.1. Algemeen	18
4.2. Skin-proeven	23
4.3. Slingerproeven	32
5. Puntproeven	37
5.1. Algemeen	37
5.2. Stijgproeven	40
5.3. Debietproeven	44
5.4. Minipompproeven	51
6. Konklusies en aanbevelingen	57
7. Literatuur	60



samenvatting

Voor regionaal onderzoek met behulp van digitale of analoge modellen zijn meer gegevens over de doorlatendheid van watervoerende pakketten en de ruimtelijke variatie hiervan (heterogeniteit) noodzakelijk. Deze gegevens kunnen snel en betrekkelijk goedkoop verkregen worden wanneer men gebruik maakt van kortdurende proeven zonder aparte waarnemingsputten. Aan de Parkweg zijn dergelijke korte proeven uitgevoerd op een pompput (putproeven) en op experimentele filters van zeer geringe afmetingen (puntproeven).

De putproefresultaten vertonen onderling een goede overeenkomst. Voor toepassing op grotere schaal komt het meest een korte stopproef na pomptijd van ca. 20 minuten (skinproef) in aanmerking. Bij puntproeven is de onderlinge overeenkomst slechter. De invloed van de eigen filterweerstand kan niet worden geëlimineerd en blijkt bovendien door verstopping in de loop der tijd toe te nemen. Bij een opstelling met aparte waarnemingsfilters wordt deze moeilijkheid vermeden maar omdat hierbij minstens twee boorgaten nodig zijn zal deze methode kostbaarder zijn.

abstract

Regional geohydrological studies with numerical or analogue groundwater models require more data of the local variation in hydraulic conductivity (non-homogeneity). These data can be obtained in a simple and inexpensive way, when short tests are carried out on a single well, without additional observation wells. Such short tests have been carried out on a test-location at The Hague (Holland). Two different methods have been studied. Tests that can be performed on a pumping well (well-tests) and tests on a so-called point-source. Point sources are used to create a 3-dimensional groundwater-flow.

Well-tests results are in a good mutual agreement. Recommended for application on a large scale are recovery tests, after a pumping period of 15-30 minutes. Test results with point-source methods however show some discrepancies. The influence of additional well-losses, due to filter resistance cannot be eliminated. More over these well losses are not constant in time but increase, probably by clogging of the filterscreen. To avoid this problem an arrangement with separated observation wells can be chosen. This method, however, will be more expensive because at least two boreholes are necessary.

1.

inleiding

Door de opkomst van digitale en analoge modeltechnieken is men tegenwoordig in staat geohydrologische berekeningen uit te voeren voor gebieden die door hun complexe geologische opbouw en/of ingewikkelde randvoorwaarden voor een analytische rekenmethode niet toegankelijk zijn. Hoewel een zekere schematisatie nodig zal blijven kan men toch bij een modelonderzoek de heterogeniteit van het gebied (variatie in bodemeigenschappen) beter tot haar recht laten komen dan voorheen bij een analytische benadering mogelijk was. Het spreekt vanzelf dat men over voldoende gegevens, zo goed mogelijk verspreid over het te onderzoeken gebied, dient te beschikken om dit voordeel werkelijk te benutten. Bij de meeste regionale studies betekent dit, dat ter aanvulling van bestaande gegevens een nieuwe serie bepalingen van bodemkonstanten in het veld gewenst is.

Eén van de belangrijkste gegevens bij een geohydrologisch onderzoek is de doorlatendheid van de betrokken watervoerende pakketten. Voor de bepaling van de doorlatendheid is het houden van een pompproef nog altijd de meest betrouwbare methode. Pompproeven zijn echter kostbaar en tijdrovend en derhalve minder geschikt om op grote schaal te worden uitgevoerd. Voor het RID is het daarom belangrijk de mogelijkheid te onderzoeken om met behulp van kortdurende en betrekkelijk eenvoudige proeven tot betrouwbare k -waarden te komen. Behalve de tijdwinst heeft een kortdurende proef nog een aantal voordelen:

- het beïnvloede gebied is klein; het geldigheidsgebied van de k -waarde is dus beperkt, hetgeen voor het verkrijgen van inzicht in de heterogeniteit juist gunstig is.
- de proeven lopen minder kans om te worden verstoord door externe invloeden, zoals onregelmatige onttrekkingen in de omgeving, getijfluktuaties, barometrische schommelingen, etc.
- de invloed van voeding door semi-permeabele lagen (semi-spanningswater) is vaak nog zo gering, dat de situatie bij benadering mag worden beschouwd als volkomen spanningswater.
- wanneer voor een in bedrijf zijnde put een korte onderbreking toelaatbaar is, kunnen dergelijke proeven ook op een bestaande produktieput worden uitgevoerd; de kosten van een proefput kunnen dan achterwege blijven.

Aantrekkelijk zijn bijvoorbeeld korte proeven op een pompfilter waarbij geen aparte waarnemingsputten worden gebruikt maar uitsluitend waterstandsverande-



ringen in de beproefde put worden waargenomen. Het achterwege laten van waarnemingsputten betekent echter wel dat rekening moet worden gehouden met het afwijkend stijghoogteverloop dat altijd bij een pompput optreedt. Deze afwijking is allereerst een gevolg van de eigen weerstand van de put, terwijl bij niet-stationaire proeven ook de berging van water in de stijgbuis een rol speelt. Bovendien blijkt (slingerproef) dat bij snelle waterstandsveranderingen de traagheid van de waterkolom in de put niet langer mag worden verwaarloosd. Lukt het echter om deze invloeden apart te bepalen en de waarnemingen hiervoor te corrigeren dan kan niet alleen de doorlatendheid van het zandpakket worden bepaald maar komt er tevens informatie beschikbaar over de toestand van de put. Hiermee kan men dan een inzicht krijgen in de mate van verstopping, het effect van schoonpompen, de invloed van de boorspoeling en toegepaste boortechniek op het rendement van een put, etc.

In de titel van dit rapport wordt gesproken van putproeven en puntproeven. Dit onderscheid behoeft enige nadere toelichting.

De benaming putproef zal hier worden gebruikt wanneer de beproefde put een bestaande of toekomstige produktieput is. Meestal is zo'n put uitgerust met een filter dat een aanzienlijk deel van de pakketdikte beslaat, zodat een overwegend horizontale stroming zal ontstaan. De doorlatendheid (kD -waarde) hiermee bepaald, is representatief voor de totale dikte van het pakket.

Bij puntproeven wordt echter een zuiver experimenteel filter toegepast, waarvan de lengte ten opzichte van de pakketdikte zo gering is dat er een drie-dimensionaal stromingsbeeld ontstaat. Het pakket mag hierbij zowel in horizontale als in verticale richting als oneindig uitgestrekt worden beschouwd. Met een dergelijk filter, dat bij benadering als puntbron mag worden opgevat, kunnen slechts stijghoogteveranderingen in een vrij beperkt gebied worden gekreëerd. Derhalve heeft de hiermee bepaalde doorlatendheid, ook in verticale zin slechts een beperkte geldigheid.

Wanneer men in hoofdzaak geïnteresseerd is in de kD -waarde van het totale pakket moeten dus op verschillende diepten puntproeven worden gehouden, terwijl een putproef direkt een waarde voor het gehele pakket geeft.

Om ervaring op te doen met een aantal korte put- en puntproeven is door het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening aan de Parkweg te Den Haag een proefterrein ingericht waar op een aantal nieuwe boringen put- en puntproeven zijn gehouden. Bovendien is, ter vergelijking, een pompproef uitgevoerd.

Naast het onderzoek " k -waarden-bepaling in situ" is thans bij het RID een studie gaande om op grond van de granulaire samenstelling van grondmonsters,



al of niet aangevuld met gegevens uit geofysische boorgatmetingen, te komen tot k -waarden. In dit kader zijn tijdens het boren ook grondmonsters genomen die in het geohydrologisch laboratorium nader zijn onderzocht. Bovendien is door DGV - TNO ter plaatse een geofysische boorgatmeting uitgevoerd. De resultaten van het laboratoriumonderzoek zullen hier, voor zover beschikbaar, als vergelijkingsmateriaal worden gepresenteerd, maar aangezien dit onderdeel van het k -waarden onderzoek nog niet volledig afgerond is, zullen deze cijfers in dit rapport niet nader worden besproken.

Na een korte beschrijving van het proefterrein en de afwerking van de uitgevoerde boringen zullen achtereenvolgens worden besproken :

- pompproef
- skinproeven
- slingerproeven
- stijgproeven
- debietproeven
- minipompproeven.

De eerste drie genoemde proefmethoden zijn uitgevoerd op een put met een volkomen filter en vallen dus, met uitzondering van de pompproef in de categorie putproeven. De overige proeven zijn uitgevoerd op filters van zeer geringe afmetingen en zijn voorbeelden van wat hierboven als puntproef werd omschreven.

2.

beschrijving van het proefterrein

2.1 De geohydrologische gesteldheid

Ten behoeve van het k -waarde onderzoek zijn aan de Parkweg te Den Haag vier nieuwe boringen uitgevoerd. De onderlinge ligging hiervan is aangegeven in figuur 1. Hierin is tevens een pompput van oudere datum (30D - 72) opgenomen (de zgn. "oude" pompput).

Op grond van de beschrijving van de bij het boren genomen grondmonsters blijkt de ondergrond in grote trekken als volgt te zijn opgebouwd:

Tot ca. 20 à 22 m treft men fijn zand aan, afkomstig uit het holocene, waartussen zich op ca. 12 à 14 m diepte een kleiige leemlaag bevindt. Aan de onderkant (22 m) van deze fijnzandige afzettingen wordt steeds een laag met veel veenresten aangeboord, die, naar men mag aannemen, een verticale grondwaterstroming aanzienlijk zal belemmeren.

Vanaf 22 m gaat het pakket geleidelijk over in grover en beter doorlatend materiaal dat achtereenvolgens behoort tot de formaties van Twente, Eem en Urk en zich uitstrekt tot ca. 68 m -m.v. De dieper dan 68 m gelegen lagen, vermoedelijk van pleisto-pliocene oorsprong kunnen als slecht-doorlatend worden beschouwd.

Uit peilwaarnemingen tijdens de pompproef blijkt het bovenste fijnzandige pakket nauwelijks te worden beïnvloed door een onttrekking uit de dieper gelegen grofzandige afzettingen. Voor de uitwerking van de putproeven is daarom het geohydrologisch profiel geschematiseerd tot een enkel watervoerend pakket van 22 - 68 m, aan boven en onderzijde begrensd door ondoorlatende lagen (volkomen spanningswater). Zie fig. 2. Voor de uitwerking van de puntproeven waarbij juist k -waarde variaties met de diepte aan het licht behoren te komen, is een dergelijk profiel echter te schematisch. Derhalve is eveneens een overzicht van de gelaagdheid door middel van de boorprofielen samengesteld (fig. 3).

2.2 Afwerking van de boringen

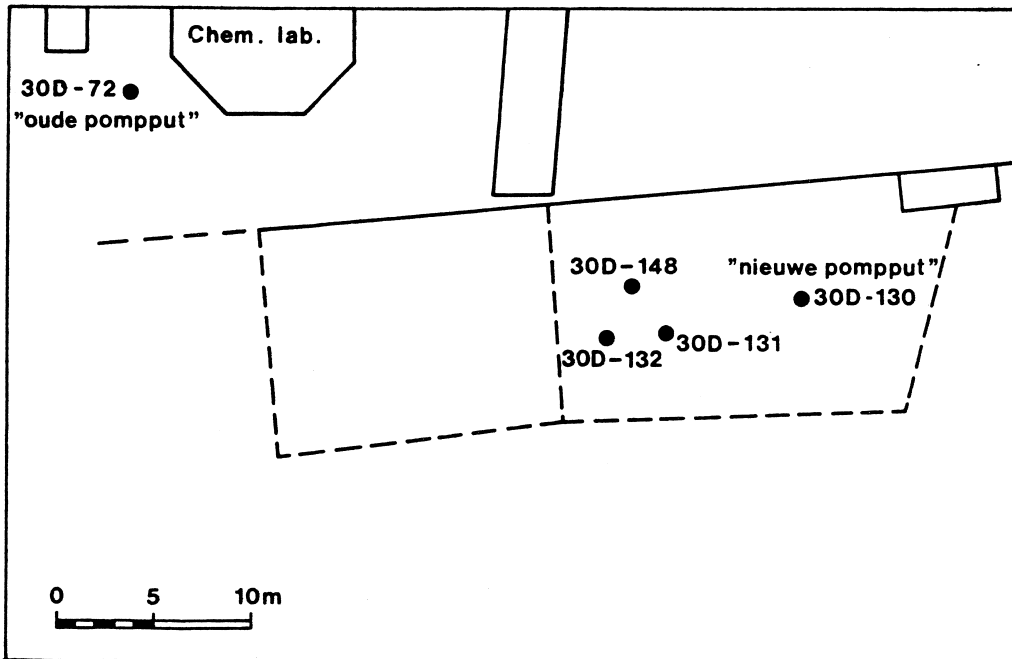
Boring 30D-130 (rotary-zuigboring) is afgewerkt tot pompput met een p.v.c.-filter van 27 - 61 m -m.v. ($\emptyset$ 101/110). Er is een normale omstorting toegepast (1.2 - 1.7 mm). Door de Dienst Grondwaterverkenning TNO zijn voor de afwerking geofysische boorgatmetingen verricht waarvan de resultaten zijn weergegeven in fig. 4.



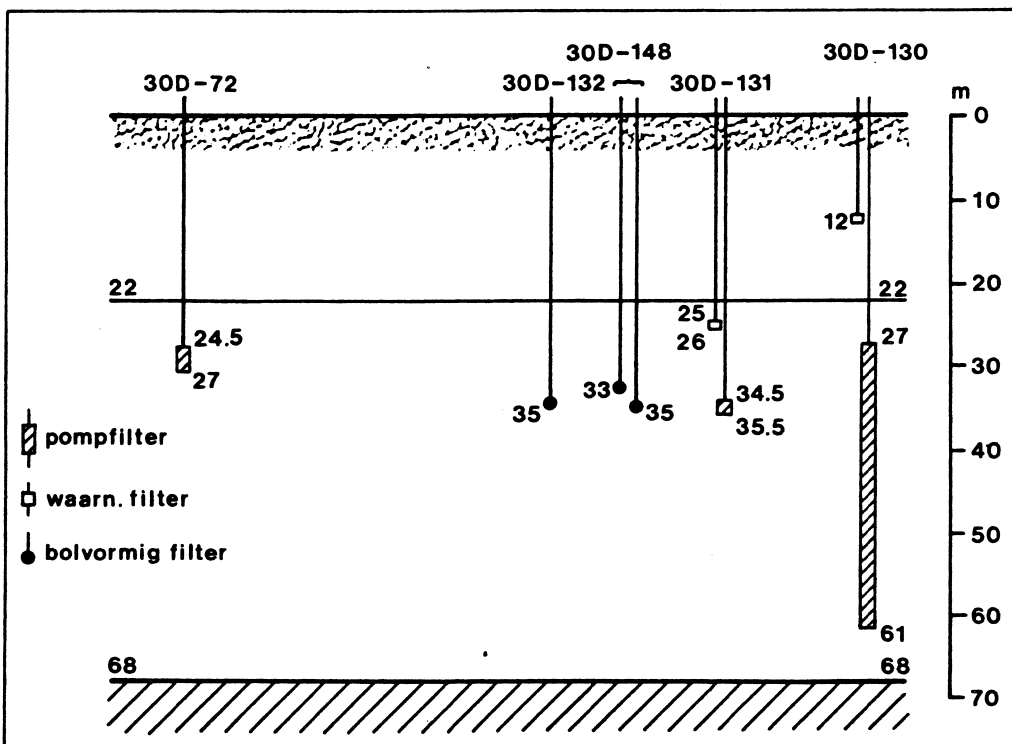
Boring 30D-131 is uitgevoerd als puls boring. Op vier verschillende diepten zijn steekmonsters genomen en puntproeven uitgevoerd (hoofdstuk 5). Bij de afwerking heeft men het boorgat niet aangevuld met een omstorting, zodat bij het trekken van de boorbuizen het boorgat rondom de filters is ingestort. De opstelling van de filters is als volgt: Van 34.5 tot 35.5 m -m.v. is een 1 m lang filter ($\emptyset$ 50/60 mm) aangebracht dat met een nylon-filterkous is overtrokken. Aan dit filter zijn met behulp van afstandhouders drie zogenaamde mini-filters bevestigd. Deze mini-filters bestaan uit een 15 cm lang stuk p.v.c.-elektriciteitsbuis dat is opgevuld met glaswol. Aan de onderzijde is het buisje open, terwijl de bovenzijde is aangesloten op een nylon slang $\emptyset$ 2 x 3 mm die naar maaiveld voert (zie fig. 5). Daarnaast is op 25 m -m.v. een eveneens met nylon-filterkous overtrokken waarnemingsfilter geplaatst (lengte 1 m) Zie fig. 2.

Boring 30D-132 is eveneens uitgevoerd als puls boring. Op twee verschillende dieptes zijn tijdens het boren puntproeven gehouden en steekmonsters genomen. De boring is ook ditmaal zonder omstorting afgewerkt en voorzien van een met een nylon filterkous overtrokken filter. Het hier toegepaste zgn. "bolvormig" filter bestaat uit een cylinder, waarvan de hoogte gelijk is aan de diameter (110 mm). Behalve de cylindermantel is ook de onderkant voorzien van perforaties. Aangenomen wordt dat een filter van dergelijke afmetingen bij benadering als bolvormig kan worden beschouwd. Aan dit filter zijn twee "mini"-filters bevestigd (fig. 6).

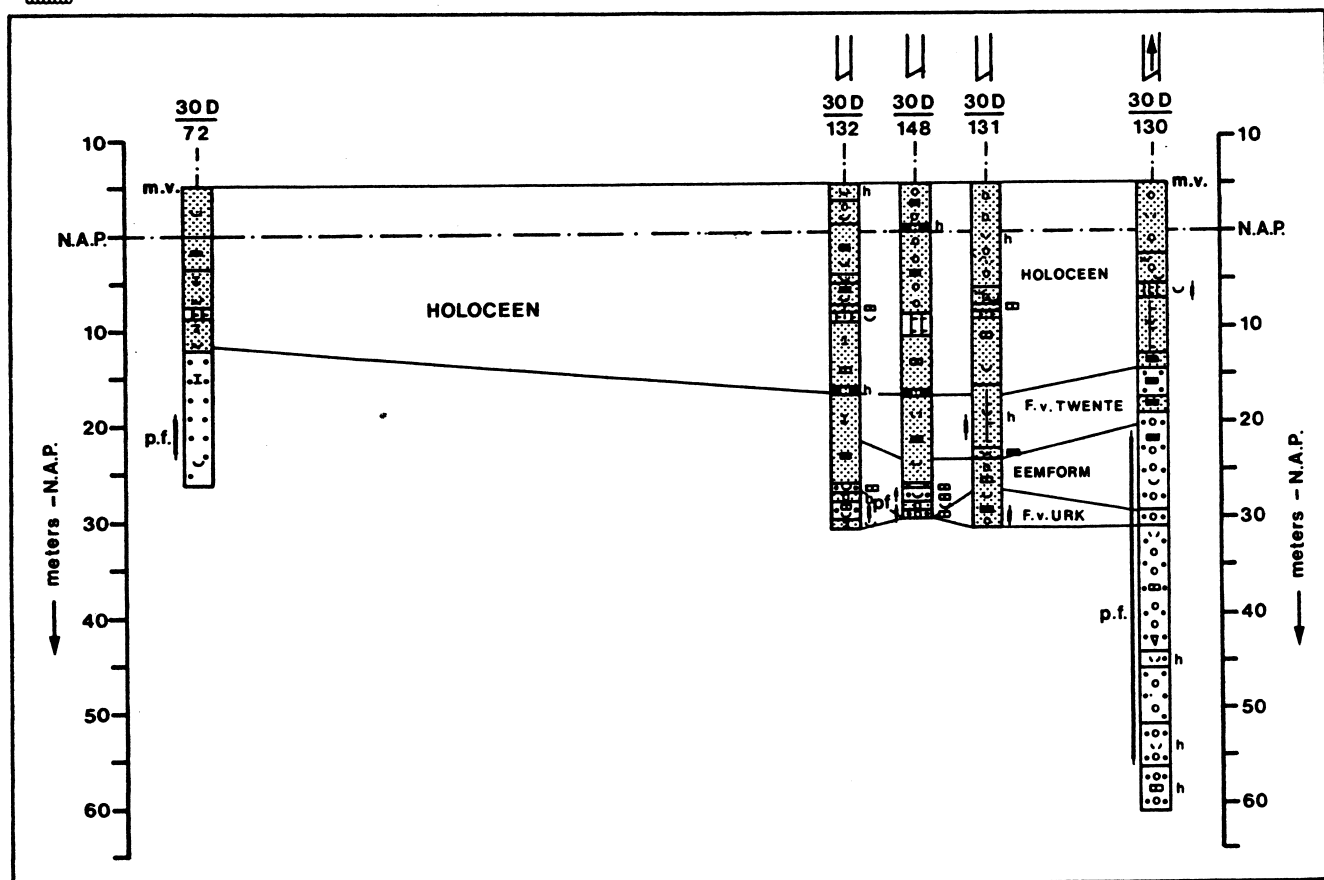
Boring 30D-148 (puls boring) is afgewerkt met twee boven elkaar geplaatste bolvormige filters, waarvan de diameter 250 mm bedraagt (zie fig. 7). Ook hier zijn de filters overtrokken met een nylon filterkous en is geen omstorting aangebracht.



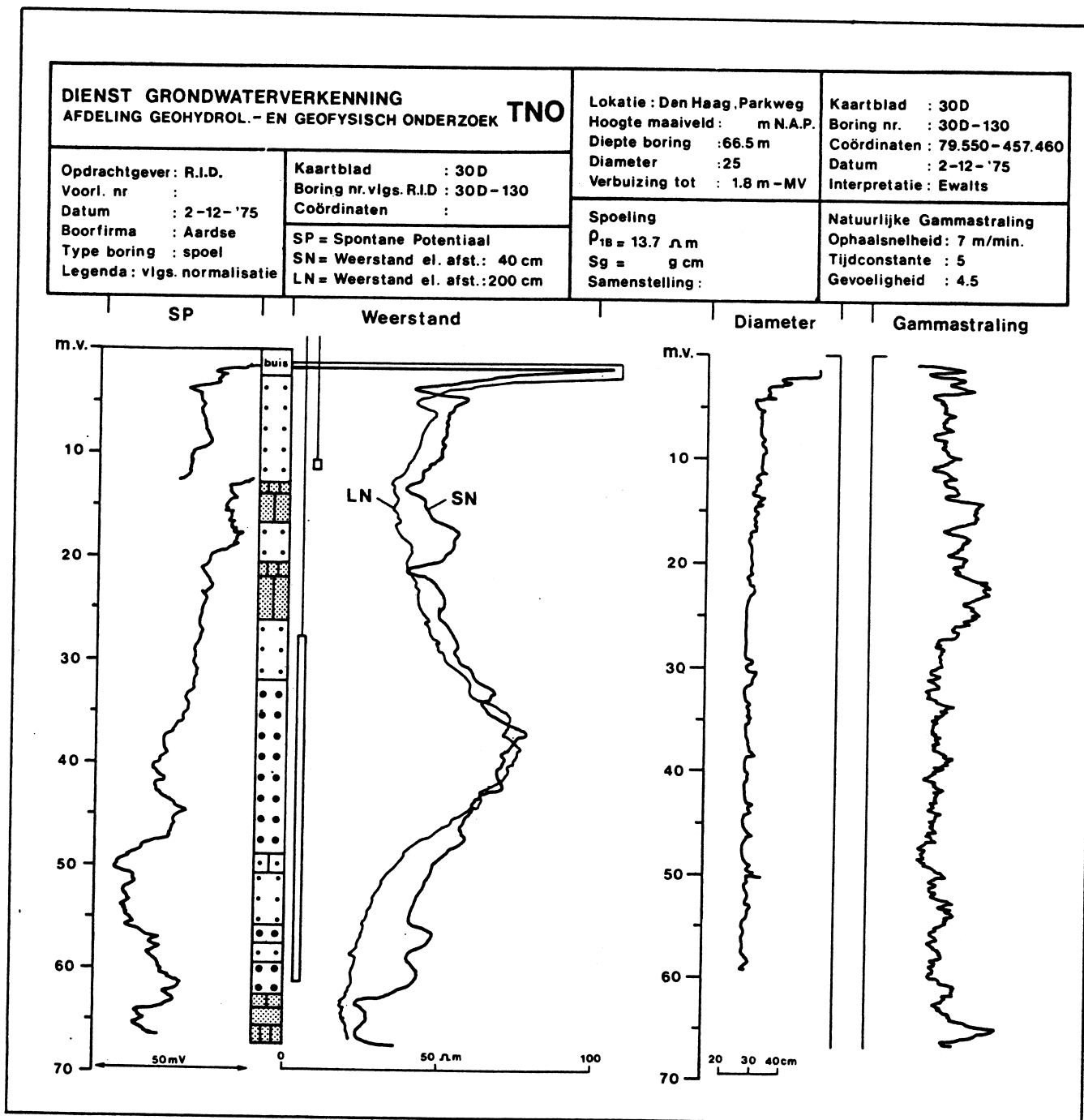
Figuur 1.
Situatie proefterrein aan de Parkweg, Den Haag.



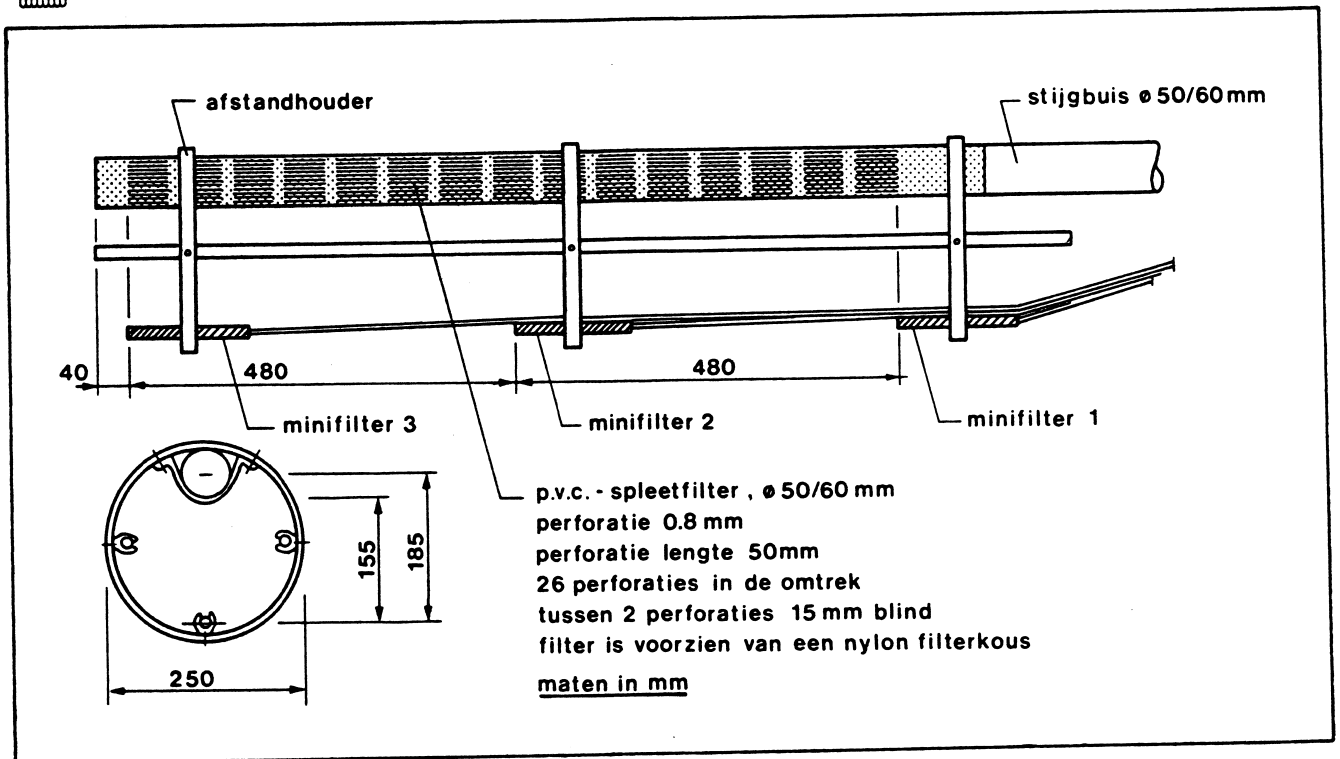
Figuur 2.
Schematische doorsnede van watervoerendpakket met filterdiepten



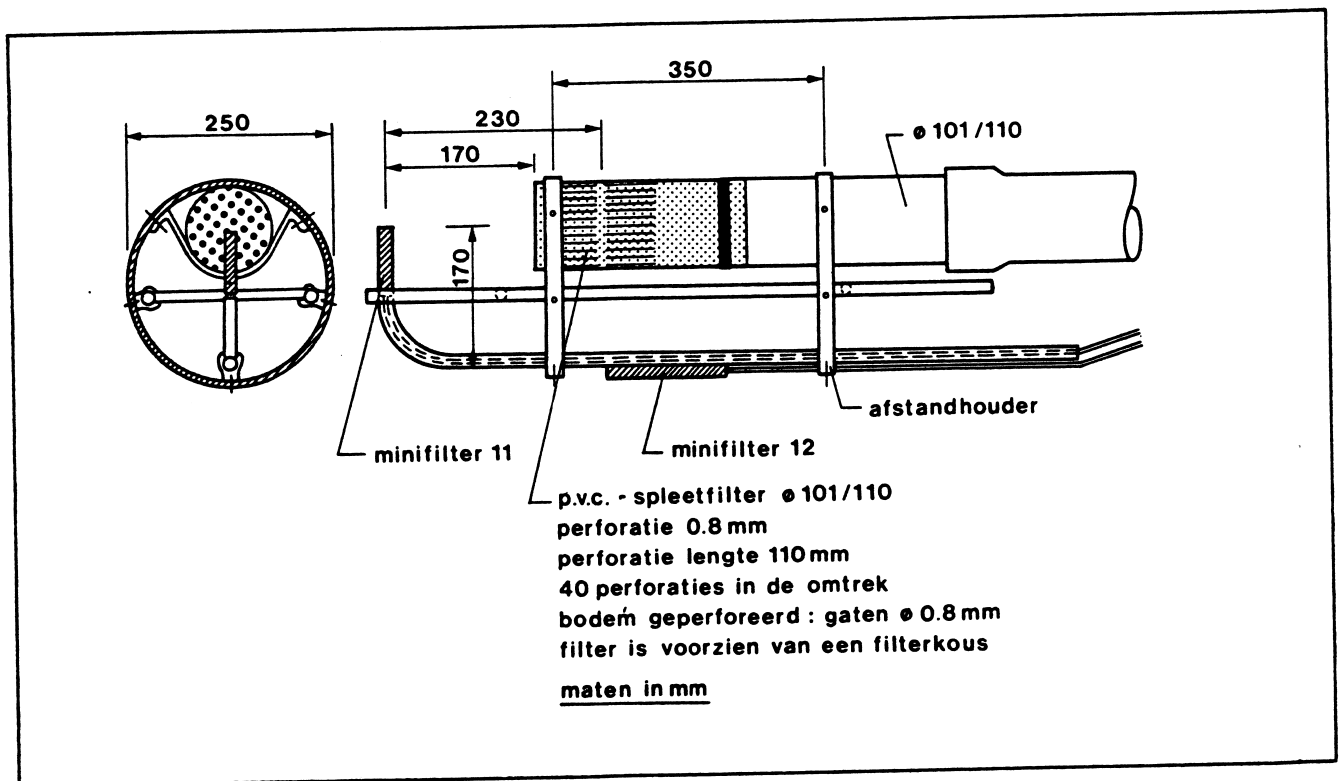
Figuur 3.
Geologisch profiel.



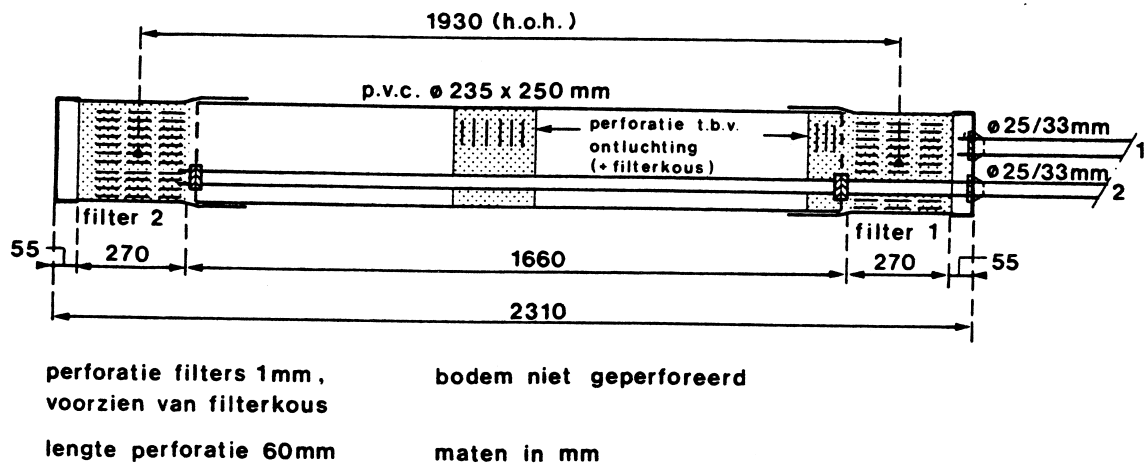
Figuur 4.
Geofysische boorgatmeting in boring 30D-130 (zuigboring).



Figuur 5.
Filter met minifilters in boring 30D-131.



Figuur 6.
Filter met minifilters in boring 30D-132.



Figuur 7.
Konstruktie filters in boring 30D-148.

3.

pompproef

Van 29 juni t/m 2 juli 1976 is een pompproef en een daarop aansluitende stopproef gehouden op de "nieuwe" pompput (30D-130). Peilwaarnemingen zijn hierbij verricht in de filters van de boringen 30D-131, 30D-132 en in de "oude" pompput 30D-72. Uit een eerder uitgevoerde pompproef (26-1-1976) bleek, dat de grondwaterstand in de pomp- en waarnemingsputten aan getijschommelingen onderhevig was. Een goede analyse van de meetgegevens werd daarom onmogelijk. Teneinde ditmaal de invloed van het getij uit de meetgegevens te kunnen elimineren is gedurende zes dagen, voorafgaand aan de pompproef, de stijghoogte in de oude pompput kontinu geregistreerd. Hieruit bleek het volgende:

- De grondwaterstand vertoont een periodieke slingering met een slingertijd T gelijk aan die van het getij (12 uur, 25 min.), terwijl tussen de hoogste en de daaropvolgende laagste waterstand een verschil optreedt van $\hat{h} = 0.025$ m. Voorts is er sprake van een faseverschuiving ten opzichte van de getijbeweging. Deze faseverschuiving bedraagt ongeveer 150 minuten.
- Op de tweede en derde dag van de voorwaarnemingen heeft zich een "natuurlijke" daling voorgedaan van ca. 25 cm. Waarschijnlijk is deze daling een gevolg geweest van het inschakelen van een aantal extra putten door de DWL-Den Haag ter plaatse van "Klein-Zwitserland" (ca. 1 km verwijderd van het proefterrein).

3.1 Korrektes

Met betrekking tot de korrektes op de waarnemingen voor de getijinvloed is gebruik gemaakt van het in de fysika bekende verschijnsel dat een willekeurig verlopend periodiek signaal, dat zich met een zekere demping in een medium voortplant, steeds meer een sinusvormig verloop aanneemt. Hiervan uitgaande kan men het tijdens de pompproef gemeten stijghoogteverloop opvatten als een "Theis"-functie met daarop gesuperponeerd een sinusfunctie:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi kD} W(u) + \frac{\hat{h}}{2} \sin \omega(t + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{met } u &= r^2 S / 4kDt \\ W(u) &= \text{Theis-Well-functie} \end{aligned}$$



φ	=	grondwaterstandsaling ten opzichte van het tijdstip $t = 0$ (aanvang pompproef)	(m)
Q	=	pompdebiet	(m ³ /d)
KD	=	doorlatendheid watervoerend pakket	(m ² /d)
S	=	bergingscoëfficiënt	
r	=	afstand tot pompput	(m)
t	=	tijd sinds de start van de pompproef	(d)
$\hat{h}$	=	verschil hoogste en opeenvolgende laagste grondwaterstand tijdens de voorwaarneming	(m)
ω	=	hoeknelheid getijbeweging	(1/d)
ϵ	=	verschuivingsfaktor	(d)

De verschuivingsfaktor ϵ wordt bepaald door (zie ook fig. 8)

- het tijdstip waarop de pompproef gestart werd ten opzichte van de getijbeweging in het buitenwater (geregistreerd in haven Scheveningen)
- het faseverschil tussen het getij in het buitenwater en de getijschommelingen in het grondwater.

Het bij de voorwaarnemingen geregistreerde waterstandsverloop vertoont, door de geringe verticale uitslag van de schrijver, slechts een flauwe slingerbeweging. Het tijdstip van een maximum of minimum kan daarom niet nauwkeurig worden bepaald zodat het faseverschil slechts bij benadering kan worden aangegeven. Dit leidt er toe dat de verschuivingsfaktor ϵ (fig. 8) binnen zekere marges kan variëren, namelijk

$$300 < \epsilon < 400 \text{ min.}$$

Voor verschillende waarden van ϵ is nu de tijdszakkingslijn getekend na getijkorrektie. Bij een waarde voor ϵ van 370 min. (of $\epsilon = 0.25$ dag) bleek de tijdszakkingslijn het meest "vloeiende" verloop te hebben. De bij deze waarde van de verschuivingsfaktor ϵ verkregen tijdszakkingslijnen na getijkorrektie zijn afgebeeld in fig. 9.

De verlagingslijnen vertonen tussen $t = 3540$ en $t = 4320$ min steeds een stijging in plaats van een verlaging. Aangezien het tijdsverschil tussen deze waarnemingen (780 min) nagenoeg gelijk is aan één getijomwenteling kan deze stijging slechts door andere nog onbekende invloeden zijn veroorzaakt. Bij uitwerking van de pompproefgegevens dient derhalve aan de laatst waargenomen verlagingen niet een te groot gewicht te worden toegekend.

Hoewel het niet zeker is of de bij de voorwaarnemingen gekonstateerde dalende trend bij het starten van de pompproef tot stilstand was gekomen is op de meetresultaten hiervoor geen correctie toegepast.



3.2 Uitwerking/resultaten

Voor waarden van $u < 0.01$ ($u = r^2 S / 4kDt$) mag de Theis-functie worden vervangen door een logaritmische functie (methode Jacob), namelijk:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi kD} \ln \left(\frac{2.25kDt}{r^2 S} \right) \quad (2)$$

Uitgaande van deze benadering kunnen de meetgegevens op drie manieren worden uitgewerkt (zie lit. 1). Een overzicht van de resultaten geeft tabel 3.1. Worden de gevonden waarden voor kD en S ingevuld in het criterium voor de Jacob-benadering ($r^2 S / 4kDt < 0.01$) dan levert dit voor de desbetreffende waarnemingsputten op:

30D - 72	:	$t > 12$ min
30D - 132	:	$t > 1$ min
30D - 131	:	$t > 0.5$ min
30D - 130	:	$t > 2 \times 10^{-4}$ min

Nagenoeg alle waarnemingen voldoen hieraan, uitgezonderd de eerste waarnemingen in de "oude" pompput (30D-72). Voor deze reeks waarnemingen is daarom tevens een analyse met de matchpoint-methode van Theis uitgevoerd (zie lit.1).

De uitwerking van de stopproef levert vrijwel dezelfde waarden op. Hierbij is aangenomen dat de dalingen als gevolg van de voorafgaande pompproef mogen worden verwaarloosd ten opzichte van de gedurende de eerste uren van de stopproef optredende verhogingen. In dit geval kan men dan de stopproef behandelen als een pompproef met een negatieve onttrekking.

Een methode waarbij wel rekening wordt gehouden met de dalingen ten gevolge van de pompproef is die van de restverlagingen (Theis-recovery method).

Hierbij geldt:

$$\varphi_r = \frac{Q}{4\pi kD} \ln \frac{t'}{t''} \quad (3)$$

waarbij t' = tijd vanaf het begin van het pompen (d)

t'' = tijd vanaf het begin van het stoppen (d)

Voor de pomptijd t_p kan dus geschreven worden

$$t_p = t' - t'' \quad (3a)$$

Opvallend is dat de methode Jacob II (verhanglijnen-methode) duidelijk van de rest afwijkende resultaten geeft. Een bevredigende verklaring is hier-



voor niet gevonden. Een mogelijke bron van fouten bij het toepassen van de verhanglijn-methode kan zijn gelegen in het feit dat voor de bepaling van de

Tabel 3.1.

Methode Jacob I		
30D 72	$kD = 1900 \text{ (m}^2/\text{d)}$	$S = 9 \times 10^{-4}$
30D 132	$kD = 1850 \text{ (")}$	$S = 3 \times 10^{-4}$
30D 131 (1)	$kD = 1900 \text{ (")}$	$S = 2 \times 10^{-4}$
30D 131 (2)	$kD = 1975$	$S = 1 \times 10^{-4}$
30D 130 (pompput)	$kD = 2375$	---
Methode Jacob II		
$t = 30 \text{ mm}$	$kD = 1270$	$S = 2 \times 10^{-3}$
$t = 550 \text{ mm}$	$kD = 1330$	$S = 6 \times 10^{-3}$
$t = 3540 \text{ mm}$	$kD = 1370$	$S = 7 \times 10^{-3}$
Methode Jacob III		
	$kD = 1900$	$S = 5 \times 10^{-4}$
Methode Theis		
30D 72	$kD = 2060$	$S = 2.7 \times 10^{-4}$
Methode "Theis-recovery"		
30D 131	$kD = 1920$	

helling van de verhanglijn per logcyclus slechts vier meetpunten gebruikt worden die in de grafiek niet ver uiteen liggen (ca. 0.7 deel van een logcyclus). Daarnaast kan het feit, dat de beide filters in boring 131 verschillende verlagingen aangeven, er op duiden dat de stroming ter plaatse een verticale component heeft, hetgeen meestal ook met extra verlagingen gepaard gaat. Een dergelijke extra verlaging beïnvloedt niet de helling van de tijdsverzakkingslijn (extra-verlaging is konstant in de tijd), maar wel de helling van de verhanglijn.

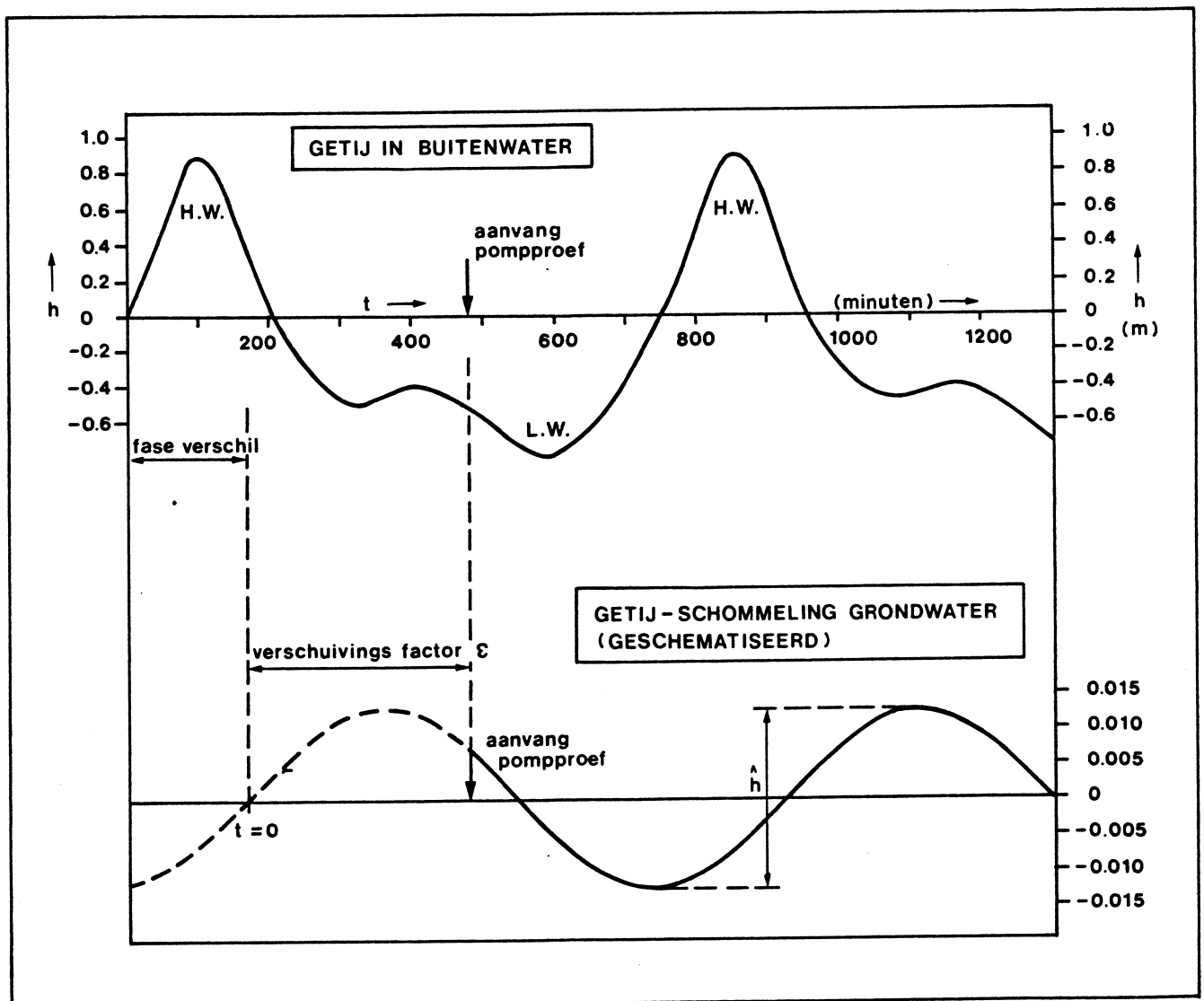
Bij een uitwerking van de meetgegevens volgens Hantush (semi-spanningswater) worden voor de weerstand van de semi-permeabele laag waarden gevonden die zeer



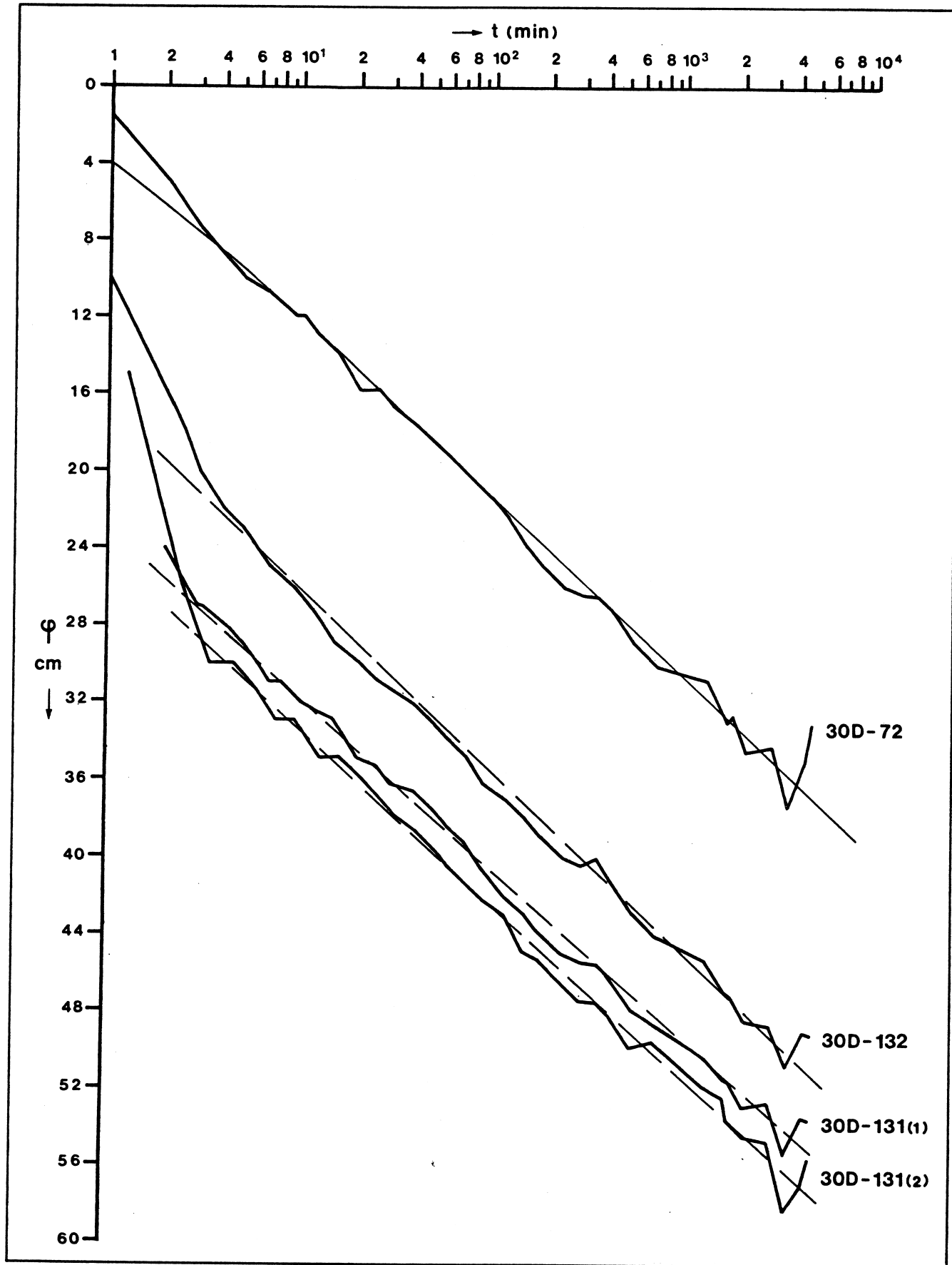
sterk uiteen lopen (van ca. 2.000 - 20.000 dagen). Deze weerstandswaarden worden voornamelijk bepaald door de waarnemingen aan het eind van de pomp-proef. Deze waarnemingen (zie fig. 9) zijn echter zeer onregelmatig en waarschijnlijk door externe invloeden verstoord. Men moet derhalve konkluderen, dat c -waarde bepaling aan de hand van deze pompproefgegevens niet mogelijk is.

Samenvattend kan worden gesteld, dat op grond van de pomp- en stopproef voor de doorlatendheid (kD) en bergingscoëfficiënt (S) de volgende waarden mogen worden aangenomen:

kD	$=$	$1900 \text{ m}^2/\text{d}$
S	$=$	5×10^{-4}



Figuur 8.
Getijkorrektie.



Figuur 9.
Verlagenen na getijkcorrectie bij verschuivingsfactor van 370 min.

4.

putproeven

4.1 Algemeen

Van een putproef wordt hier gesproken, wanneer de te beproeven put met een volkomen of bijna volkomen filter is uitgerust. De stroming naar een dergelijke put is dan overwegend horizontaal, zodat het verschil tussen horizontale en verticale doorlatendheid (anisotropie) dat men in de meeste watervoerende pakketten aantreft, hierbij geen rol speelt.

Een putproef geeft dus slechts de horizontale doorlatendheid en geen enkele informatie over de mate van anisotropie. Voor de meeste regionale studies is een inzicht in de horizontale doorlatendheid voldoende. Het is echter duidelijk, dat voor drie-dimensionale stromingsproblemen, waarbij de anisotropie een belangrijke invloed heeft, putproeven nooit alle noodzakelijke gegevens kunnen verschaffen. In dat geval zullen dan andere proefopstellingen moeten worden toegepast (zie puntproeven).

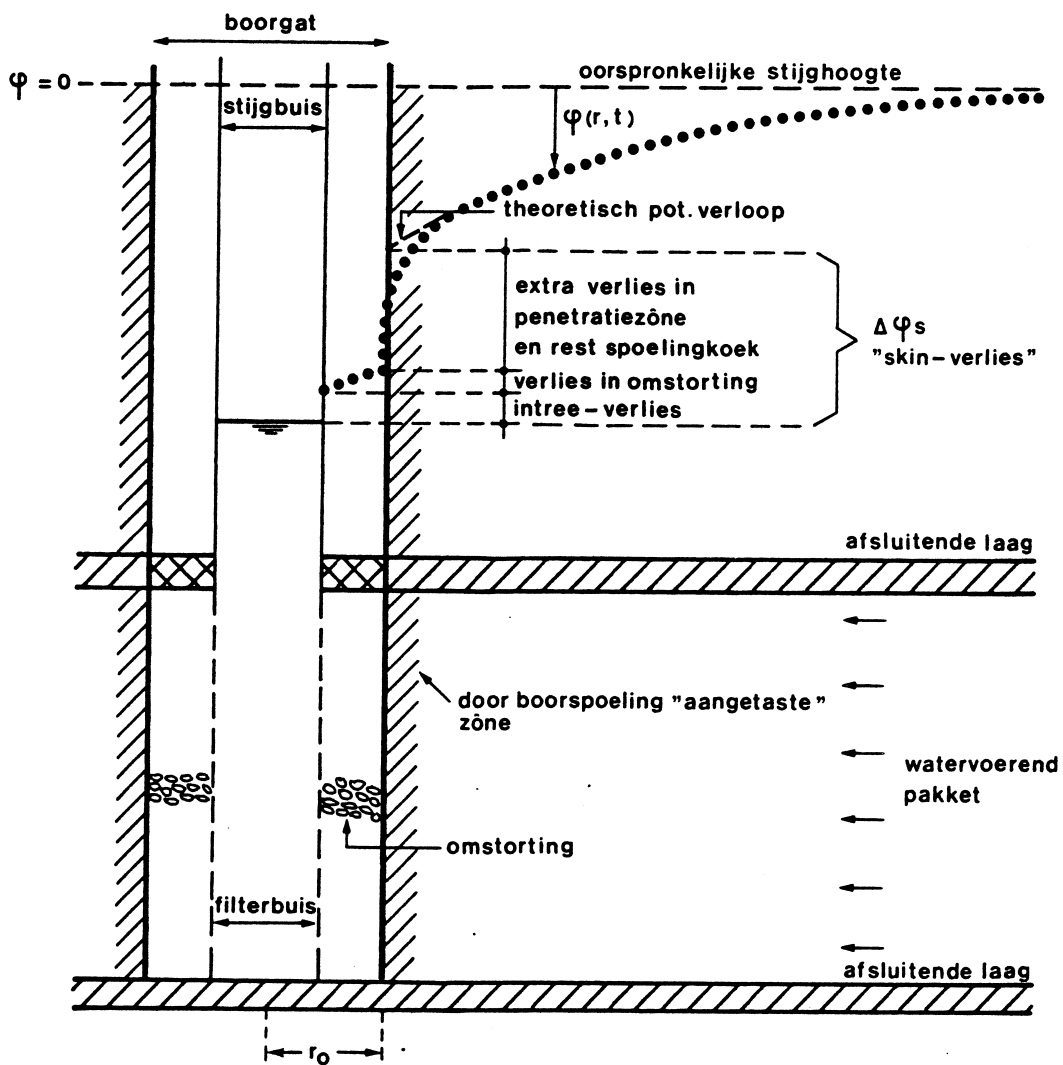
Stroming naar het putfilter is hier gekreëerd door middel van een konstant ont-trekkingsdebiet (skinproef) of door een plotseling aangebrachte waterstandsverandering in de put (slingerproef), terwijl uitsluitend het waterstandsverloop in de put zelf wordt waargenomen. Dit waterstandsverloop wordt niet alleen bepaald door de eigenschappen van het zandpakket maar wordt tevens bepaald door:

- de eigen weerstand van de put (skinfactor)
- berging van water in de stijgbuis
- traagheidskrachten op de watermassa in de put.

In het volgende zal op deze drie aspecten nader worden ingegaan.

4.1.1 De skinfactor

In figuur 10 is het potentiaalverloop geschetst voor een put met een volkomen filter (diameter filter- en stijgbuis zijn gelijk gesteld) bij een stationaire toestroming. De gestippelde lijn geeft het theoretisch verloop van de stijghoogte aan als de watervoerende laag tot aan de boorgatwand homogeen wordt verondersteld. De getrokken lijn, die het werkelijke potentiaalverloop aangeeft, toont allereerst een extra grondwaterstandsdaling ten gevolge van een verminderde doorlatendheid rondom het boorgat. Meestal is deze verminderde doorlatendheid een gevolg van de tijdens de boring in de aquifer geïnfiltreerde boorspoeling en/of de resten van de tegen de boorgatwand opgebouwde spoelingkoek. Bij een puls boring kan echter door



Figuur 10.
Stijghoogte verloop vlakbij de put.



verdichting van de korrelstapeling eveneens rondom het boorgat een k -waarde vermindering ontstaan. Behalve deze extra verliezen treden er potentiaalverliezen op in de omstortingszone, verliezen door kontraktie van de stroomlijnen ten gevolge van partiële perforatie van het filter, en vertragsingsverliezen bij het binnenstromen van het water in de put (intreeverlies). Voor een gedetailleerd overzicht van de verliezen in de omstorting en het putfilter wordt verwezen naar Kruytzer (lit. 2).

Bij de vanuit de olieindustrie afkomstige theorie van het skineffekt (lit. 3,4) gaat men er vanuit dat de extra verliezen ter plaatse van de boorgatwand (ten gevolge van resten spoelingkoek) en in de penetratiezone de overige putverliezen vaak ver overtreffen. Men neemt voor het rekenschema dan hierbij aan, dat de aquifer homogeen is tot aan het boorgat, terwijl alle extra weerstanden worden gediskretiseerd tot een weerstandbiedend laagje (de skin) dat zich tegen de boorgatwand bevindt. Er wordt nu een dimensieloze skinfactor F geïntroduceerd die als volgt is opgebouwd. Stel dat het laagje op de boorgatwand een weerstand w heeft (dagen). Voor het potentiaalverlies $\Delta \varphi_s$ (skinverlies) over dit laagje geldt dan:

$$\Delta \varphi_s = w \cdot v$$

waarbij v gelijk is aan de (filter-)snelheid ter plaatse van de boorgatwand. Bij stationaire radiale stroming naar een volkomen put kan hiervoor worden geschreven:

$$\Delta \varphi_s = w \frac{Q}{2\pi r_o \cdot D}$$

Hierbij is

r_o	=	straal van het boorgat	(m)
D	=	pakketdikte	(m)
Q	=	debiet	(m ³ /d)

In dimensieloze grootheden geschreven wordt dit:

$$\Delta \varphi_s \frac{2\pi k D}{Q} = \frac{wk}{r_o} \quad (4)$$

De skinfactor F wordt nu gedefinieerd als het dimensieloze skinverlies volgens

$$F = \Delta \varphi_s \cdot \frac{2\pi k D}{Q} = \frac{wk}{r_o} \quad (5)$$

Vergelijking (5) geeft duidelijk aan met welke fysische grootheden de skinfactor samenhangt. De skinfactor is evenredig met de doorlatendheid van het pakket



(k) en de weerstand van de skin zelf en omgekeerd evenredig met de straal van het boorgat. Er wordt nogmaals op gewezen, dat in deze gedachtengang het skinverlies niet uitsluitend bestaat uit het potentiaalverlies, dat in werkelijkheid bij de boorgatwand kan optreden. Onder het skinverlies wordt hier verstaan: de som van de verliezen die optreden bij een put in vergelijking tot een volkomen schone put zonder enige instroomweerstand.

4.1.2 Berging in de stijgbuis

Bij de klassieke pompproefformules (Theis, Jacob, Hantush) wordt de put steeds opgevat als lijnbron, d.w.z. de straal van de put wordt oneindig klein verondersteld. Een dergelijke benadering komt in feite neer op het verwaarlozen van de bergingscapaciteit van de put zelf. Vergeleken met de bergingscapaciteit van eenzelfde volume grond, is de bergingscapaciteit van een put echter enorm groot.

De toe te voegen hoeveelheid water ΔV (m^3) voor een stijghoogteverandering $\Delta \varphi$ is voor een cylinder (straal r_o ; hoogte D) gevuld met zand :

$$\Delta V_z = \pi r_o^2 S \Delta \varphi$$

S is hierbij de elastische bergingscoëfficiënt van het watervoerend pakket (dimensieloos). Meestal ligt S in de orde van grootte van 10^{-3} tot 10^{-5} .

De hoeveelheid toe te voegen water voor een stijghoogteverandering $\Delta \varphi$ in een put bedraagt:

$$\Delta V_p = \pi r_c^2 \Delta \varphi$$

(r_c = straal van de stijgbuis [m])

De verhouding tussen deze twee hoeveelheden wordt gedefinieerd als de dimensieloze bergingsfaktor α

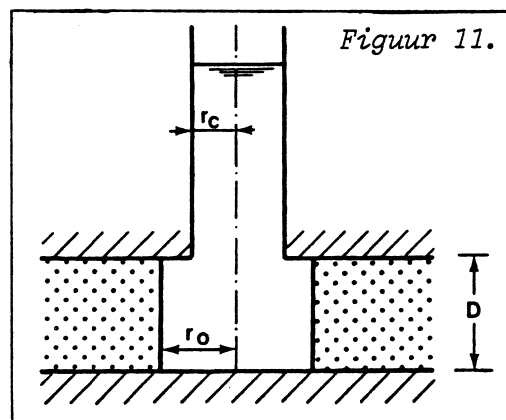
$$\alpha = \frac{r_o^2 S}{r_c^2}$$

(6)

Bij de meeste putten is $\alpha \approx 4 \times S$ en dus veel kleiner dan 1.

Een formule voor de waterstandsverandering in de put waarbij ook de berging in de stijgbuis in rekening wordt gebracht geeft Papadopoulos (lit.5) maar deze houdt geen rekening met een eventueel skineffekt.

Jaeger (lit.6) heeft echter voor warmtestroming eenzelfde probleem opgelost waarbij





tevens een skineffekt is ingevoerd. Jaeger geeft bovendien een reeks voor niet te kleine waarden van t , waaruit is af te leiden na welke tijd de invloed van berging in de put verwaarloosd mag worden.

Wanneer u/α klein is ten opzichte van 1 en hogere machten van (u/α) verwaarloosd mogen worden luidt deze benaderingsformule:

$$\varphi \cdot \frac{4\pi kD}{Q} = \ln \frac{2.25kDt}{r^2 S} \cdot \left[1 + 2u - \frac{2u}{\alpha} + \dots \right] + 2F \left[1 - \frac{2u}{\alpha} + \dots \right] \quad (7)$$

Aangezien α veel kleiner is dan 1, kan de term $2u$ verwaarloosd worden ter opzichte van $2u/\alpha$. De bergingsinvloed is nu kleiner dan 2% wanneer:

$$t > \frac{25r_c^2}{kD} \quad (8)$$

4.1.3 Traagheidskrachten

Bredenhoeft e.a. (lit. 7) hebben met een elektrisch analogon aangetoond, dat bij zeer snelle waterstandsveranderingen traagheidskrachten op de watermassa in de put een belangrijke invloed hebben op het waterstandsverloop. De put reageert hierbij op dezelfde wijze als een massa-veersysteem met een viskeuse wrijving in de klassieke mechanika.

De massaterm wordt bepaald door de lengte van de waterkolom in de stijgbuis ($L_{\text{stijgb.}}$) en een gedeelte van de filterlengte, volgens Cooper (lit.8)

$$L = L_{\text{stijgb.}} + 3/8 L_{\text{filter}}. \quad (9)$$

terwijl de zgn. veerconstante hier overeenkomt met de versnelling g (m/sec^2) ten gevolge van de zwaartekracht.

De overige eigenschappen van put en aquifer zitten "verwerkt" in de wrijvings-term:

(zie ook lit. 14)

$$C_w = \frac{gr_c^2}{4kD} \left[\ln \left(\frac{1.26kD}{r_c^2 S} \sqrt{\frac{L}{g}} \right) + 2F \right] \quad (10)$$

Wanneer de wrijvingsterm kleiner is dan een bepaalde kritieke waarde ($C_w < 2\sqrt{gL}$) zal in de put na een plotselinge waterstandsverandering een slingerbeweging ontstaan. Een dergelijke slingering kan men bijvoorbeeld ook bij een gewone pompproef waarnemen vlak na het in of uitschakelen van de pomp.

Door de enigszins gekompliceerde vorm van de wrijvingsterm is een criterium voor



het al of niet optreden van slingering niet eenvoudig op te stellen. Wel kan men afleiden dat oscillatie eerder zal optreden naarmate

- L groter is
- kD groter is
- r_c kleiner is
- F (skinfaktor) kleiner is

Wanneer we dit vergelijken met het criterium voor de bergingsinvloed (8) dan blijkt, dat berging een belangrijke rol speelt in relatief slecht doorlatende pakketten bij putten met een grote stijgbuisdiameter, terwijl traagheidseffekten juist een rol spelen bij goed doorlatende pakketten en putten met een kleine stijgbuisdiameter. Wanneer de wrijvingsterm (10) groter is dan de kritieke wrijving spreekt men van overdemping en blijft het oscillatieverschijnsel achterwege. Volgens Bredehoeft (lit. 7) heeft in dat geval de traagheid slechts zeer weinig invloed meer op het verloop van de waterstand en kan dan worden verwaarloosd.

4.2 Skinproeven .

In geval van overdemping kan men voor de verlaging in een put met konstante onttrekking schrijven, als $t > 25 r_c^2 / kD$:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi kD} \left[\ln \frac{2.25 kDt}{r_o^2 S} + 2F \right] \quad (11)$$

In principe kan men nu met een korte pompproef de kD bepalen uit de helling van de tijdzakingslijn (op half logaritmisch papier). Als vervolgens de S -waarde met een redelijke nauwkeurigheid kan worden geschat kan tevens door invullen in (11) de skinfaktor worden berekend. Aangezien echter bij een "konstante" onttrekking meestal juist in het begin onregelmatigheden in het debiet voorkomen is het beter de waarnemingen tijdens de stopproef te gebruiken. Een dergelijke korte stopproef (pomptijd 15 - 30 min), waarmee door middel van waarnemingen in de put zelf de doorlatendheid en de skinfaktor worden bepaald, zal in het vervolg korthedshalve skinproef worden genoemd.

4.2.1 Waarnemingen en resultaten

Ter bepaling van de skinfaktor van de nieuwe pompput (30D-130) zijn in totaal vier skinproeven uitgevoerd. Tussen de eerste en tweede proef, die beiden plaatsvonden op 4 februari 1976, is de put schoongepompt. Na afloop van de pompproef (d.d. 29-06-1976) zijn nogmaals twee skinproeven gehouden op respectievelijk 7 en 8 juli 1976. Tussen de derde en vierde proef heeft men een in de put gevallen stuk stijgbuis en een terugslagklep verwijderd.



De tijdsduur van de proeven (30 à 40 min.) is dusdanig, dat mag worden aangenomen, dat getijfluktuaties en eventuele andere schommelingen in de grondwaterstand te verwaarlozen zijn.

Voor de restverlagingen tijdens de stopproef kan men nu schrijven (zie ook (3) en (3a))

$$\varphi_r = \frac{2.3Q}{4\pi kD} \log \frac{t'}{t''} \quad (12)$$

De restverlaging bevat geen term voor het skinverlies omdat (theoretisch) tijdens het stoppen geen water de put instroomt (zolang berging verwaarloosbaar is). Uit de helling van de lijn die ontstaat door φ_r lineair uit te zetten tegen t'/t'' op logaritmische schaal kan de kD worden bepaald volgens:

$$kD = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta \varphi_r} \quad (13)$$

waarbij $\Delta \varphi_r$ staat voor het verschil in restverlaging per logcyclus (zie fig. 12 t/m 15). Dezelfde grafiek kan worden gebruikt voor een grafische bepaling van de skinfactor (lit. 9). Daarbij is het noodzakelijk de afpompingsvlak voor het stoppen te kennen. Deze methode verloopt verder als volgt:
De afpompingsvlak voor het stoppen is: ($t' = t_p$)

$$\varphi_{t_p} = \frac{Q}{4\pi kD} \ln \frac{2.25kDt_p}{r_o^2 S} + \Delta \varphi_s \quad (14)$$

terwijl men voor de verhoging h na het stoppen kan schrijven:

$$\begin{aligned} h &= \varphi_{t_p} - \varphi_r \\ &= \frac{Q}{4\pi kD} \ln \frac{2.25kDt_p}{r_o^2 S} + \Delta \varphi_s - \frac{Q}{4\pi kD} \ln \frac{t'}{t''} \end{aligned} \quad (15)$$

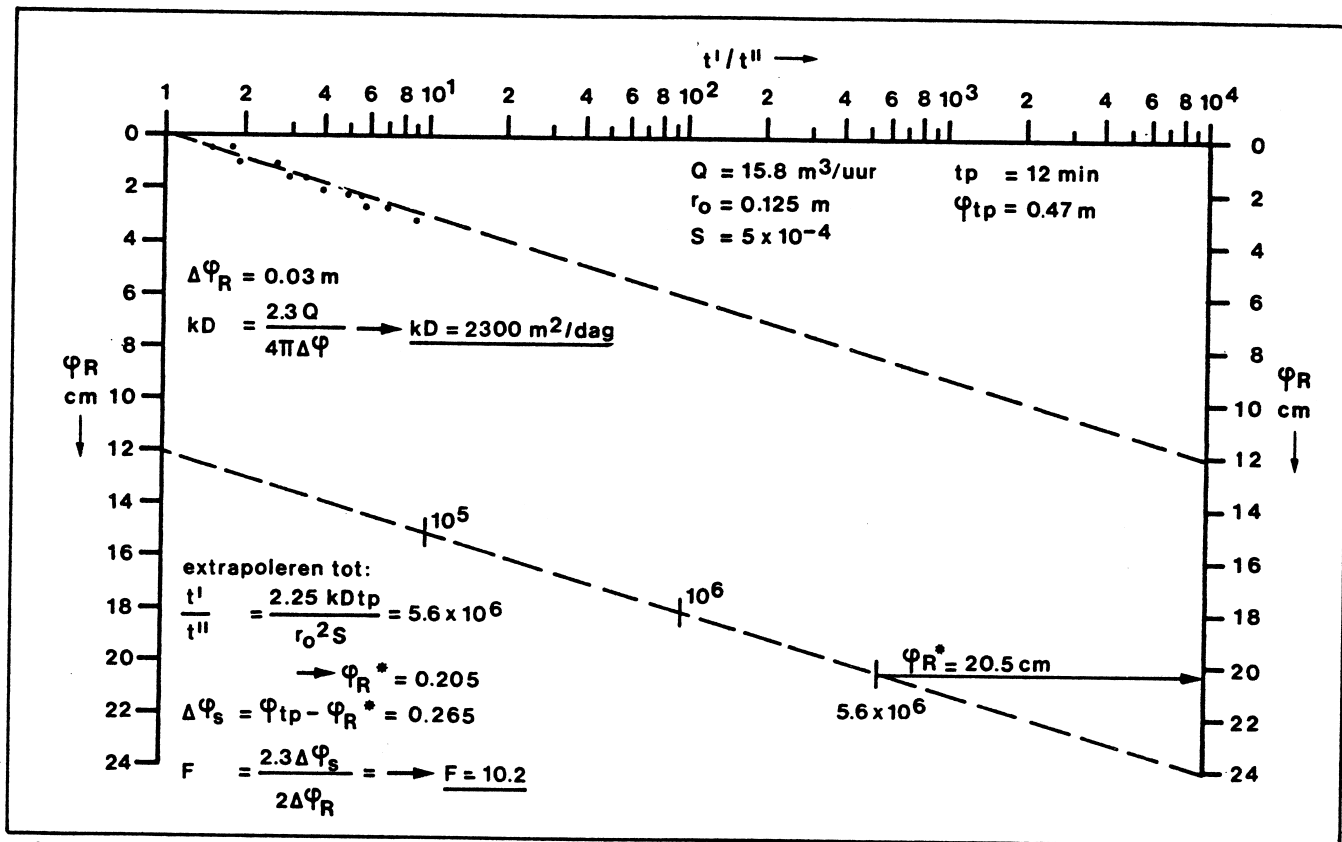
Beide logaritmische termen vallen juist tegen elkaar weg als

$$\frac{t'}{t''} = \frac{2.25kDt_p}{r_o^2 S} \quad (16)$$

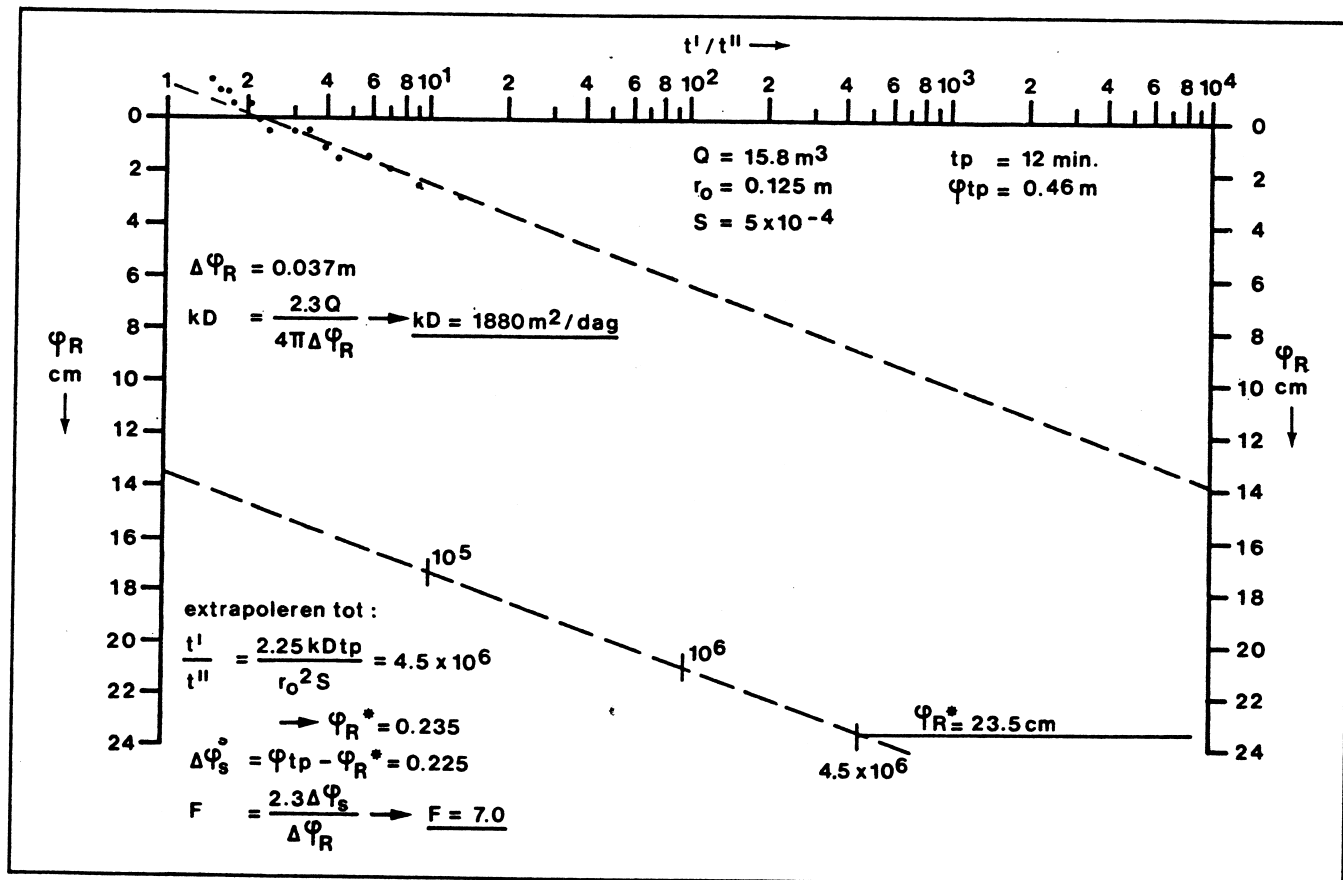
waarmee (15) overgaat in:

$$h = \Delta \varphi_s \quad (15a)$$

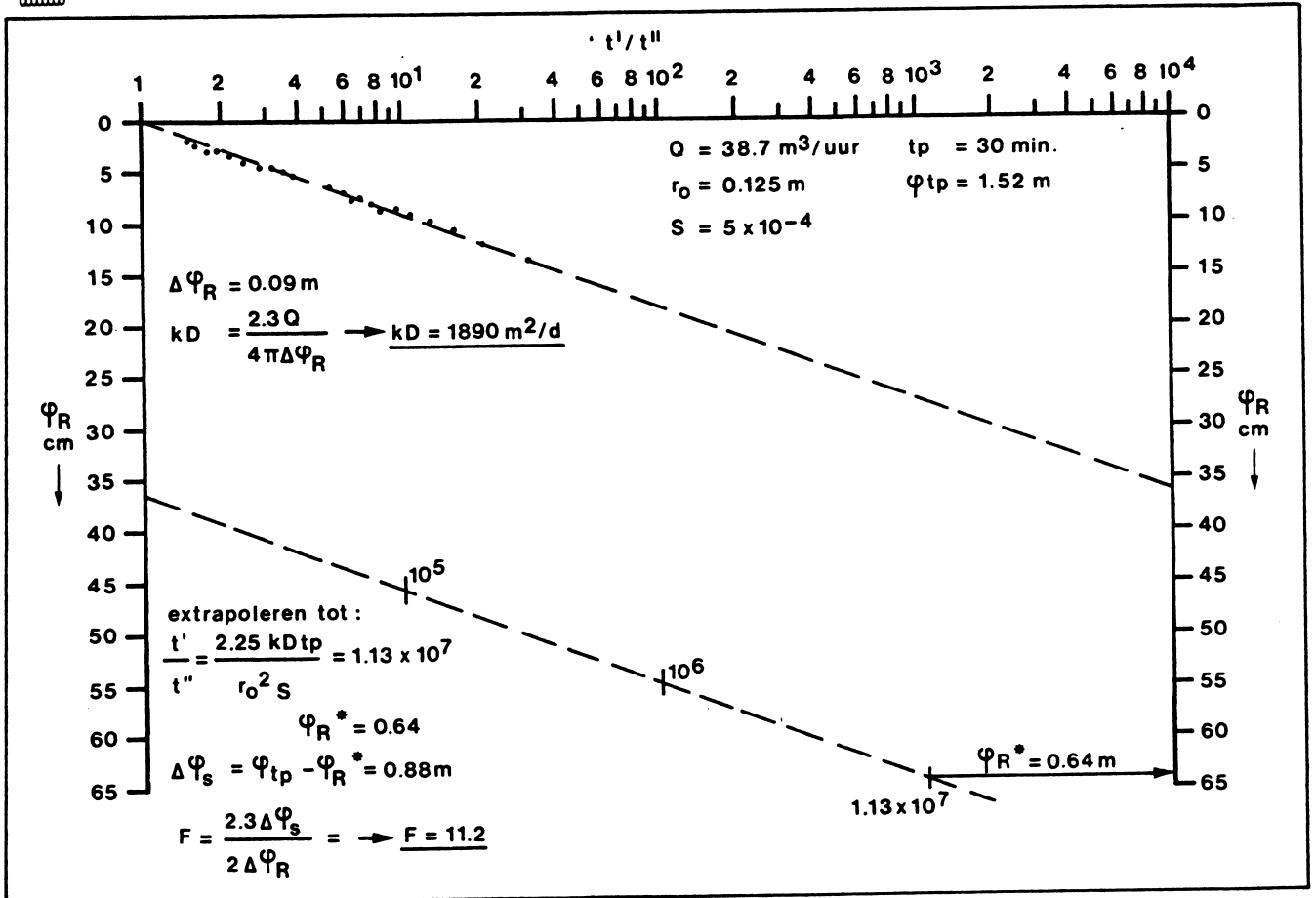
Wanneer S bekend is (of kan worden geschat) kan het rechterdeel van (16) worden berekend. Het lineaire gedeelte van de restverlagingslijn wordt nu naar rechts geëxtrapoleerd tot de met (16) berekende waarde van t'/t'' . De hierbij



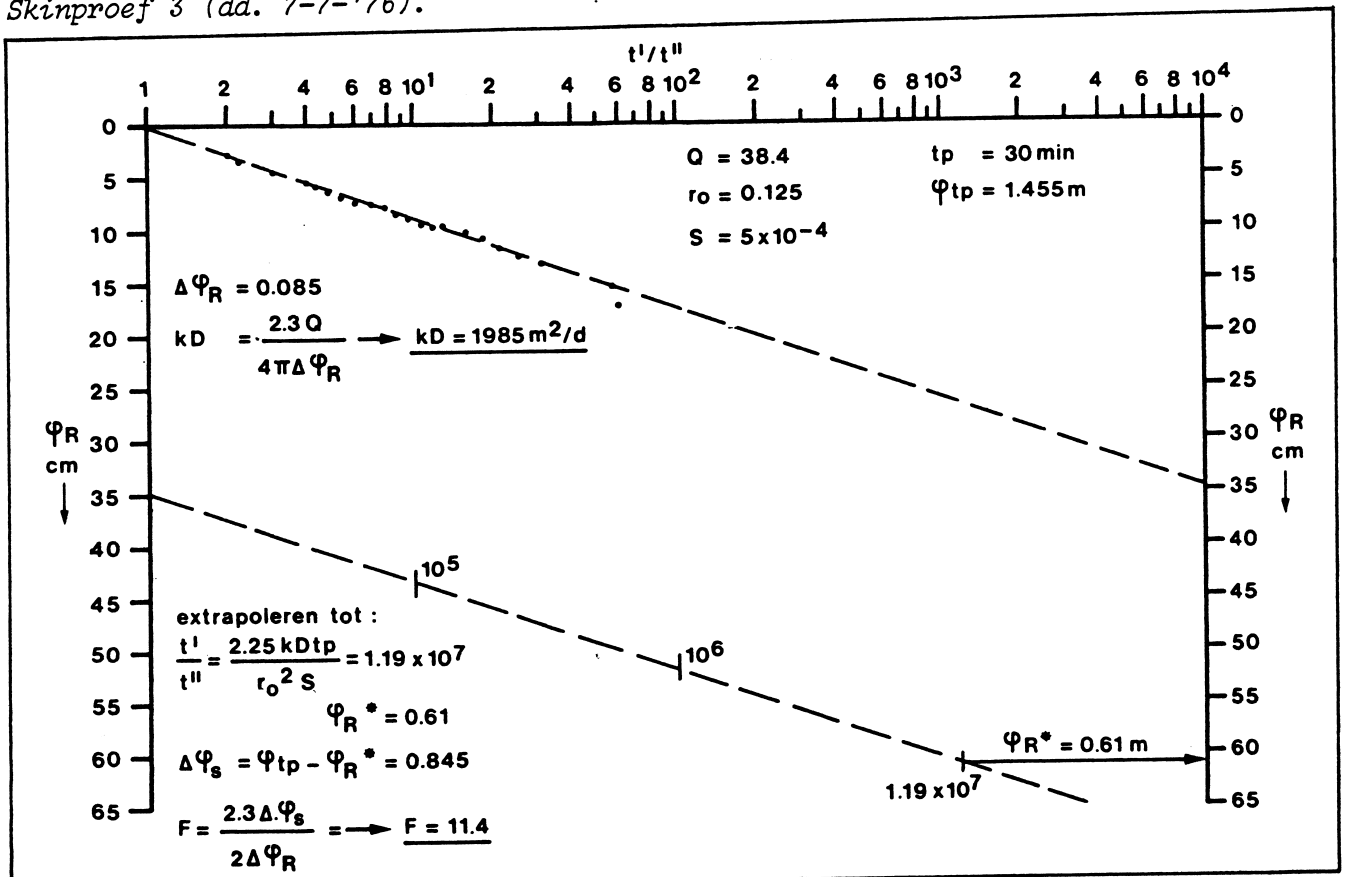
Figuur 12.
Skinproef 1 (dd. 4-2-'76).



Figuur 13.
Skinproef 2 (dd. 4-2-'76).



Figuur 14.
Skinproef 3 (dd. 7-7-'76).



Figuur 15.
Skinproef 4 (dd. 8-7-'76).



horende restverlaging (φ_r^*) wordt op de verticale as afgelezen waarna het skinverlies $\Delta \varphi_s$ volgt uit (15a)

$$\Delta \varphi_s = h = \varphi_{t_p} - \varphi_r^* \quad (17)$$

De skinfactor F berekent men vervolgens met (5)

$$F = \frac{2\pi kD}{Q} \Delta \varphi_s$$

of gekombineerd met (13)

$$F = \frac{2.3}{2} \frac{\Delta \varphi_s}{\Delta \varphi_r} \quad (18)$$

De gevonden waarden voor de doorlatendheid en skinfactor zijn nu gegeven in tabel 4.1. Voor de s -waarde is hierbij het resultaat van de pompproef aangehouden, n.l. $s = 5 \times 10^{-4}$.

Tabel 4.1.
Resultaten skinproeven.

proefnr.	kD (m^2/d)	F
1	2300	10.2
2	1880	7.0
3	1890	11.2
4	1985	11.4

De gevonden waarden voor de doorlatendheid blijken goed overeen te komen met de kD -waarde uit de pompproef ($kD = 1900 m^2/d$). Op grond hiervan zou men kunnen stellen dat deze methode voor de kD -waardebepaling een redelijke betrouwbaarheid heeft. Voor een meer algemene beoordeling van de skinproef wordt verwezen naar de volgende paragraaf.

De lagere waarde voor de skinfactor bij de 2e proef zou in verband kunnen staan met het gunstige effect van het schoonpompen. De tweede skinproef moet echter als minder betrouwbaar worden gekwalificeerd aangezien na afloop van het stoppen de waterstand in de put ca. 1.5 cm is gestegen boven de stand vlak voor het pompen. In figuur 13 komt dit tot uiting doordat de rechte lijn niet door de oorsprong gaat. Het is onwaarschijnlijk dat deze stijging in het grondwater na ca. 40 min een gevolg is van de getijbeweging. Wel is mogelijk dat de stijging van het peil na afloop van het schoonpompen nog niet was beëindigd op het tijdstip waarop met de 2^e skinproef werd aangevangen.



4.2.2 Invloed van berging, semi-spanningswater en duur van de pomptijd

In het algemeen kunnen er zich bij de uitwerking van een skinproef moeilijkheden voordoen wanneer er geen duidelijk rechtlijnig traject in de restverlagingslijn valt te ontdekken. Afwijkingen van het rechtlijnig verloop treden op vlak na het stoppen van de pomp, wanneer de berging in de put zelf het stijghoogteverloop bepaalt, maar ook op langere termijn kan een afbuiging van de restverlagingslijn worden gekonstateerd. Dit laatste is bijvoorbeeld het geval bij semispanningswater, waarbij na enige tijd de voeding door de semipermeabele laag merkbaar wordt (zie ook fig. 16). Door combinatie van deze verschijnselen kan het voorkomen, dat het rechte deel moeilijk te herkennen is of in het geheel niet aanwezig is. Door een geschikte keuze van de pomptijd kan men dan trachten het rechtlijnige traject zo lang mogelijk te laten zijn.

Uitgangspunt bij de uitwerking van een skinproef is de logaritmische benadering van Jacob (zie ook vergl. (11)) en het lijkt daarom zinvol de geldigheid hiervan nader te bekijken.

In 3.2 is reeds opgemerkt, dat de formule van Theis mag worden vervangen door een logaritmische functie (Jacob) wanneer:

$$t > \frac{25 S r_o^2}{kD}$$

terwijl voor het verwaarlozen van de eigen berging in 4.1.2. het criterium werd gegeven, namelijk: (8)

$$t > \frac{25 r_c^2}{kD}$$

In de meeste gevallen zal dit laatste criterium maatgevend zijn.

Wanneer sprake is van semispanningswater is de verlaging volgens Hantush (zie lit. 1, 10)

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} \cdot W(u, r/\lambda) \quad (19)$$

$$\text{waarbij } W(u, r/\lambda) = \int_u^\infty \frac{e^{(-y - r^2/4\lambda^2 y)} dy}{y}$$

$$u = S r^2 / 4 k D t$$

$$\lambda = \sqrt{k D c} \quad (m)$$

$$c = \text{weerstand semipermeabele laag} \quad (d)$$

Wanneer $r/\lambda < 0.1$, hetgeen bij een pompput altijd het geval zal zijn, mag de Hantush-Well-function worden vervangen door die van Theis (lit. 10) indien



tevens:

$$u > 5r^2/\lambda^2$$

of

$$t < \frac{\lambda^2 S}{20kD}$$

(20)

De logaritmische benadering is dus slechts in een beperkt traject geldig n.l. (fig.17).

$$t_1 < t < t_2$$

Hierbij zal in de meeste gevallen de ondergrens t_1 bepaald zijn door het bergingskriterium (8), terwijl de bovengrens t_2 wordt bepaald door de invloed van voeding door semipermeabele lagen. (20)

De restverlagingsvergelijking (3) waarvan bij de uitwerking van de skinproef wordt uitgegaan, is ontstaan door superpositie van een onttrekking vanaf het tijdstip $t' = 0$ en een even grote injectie beginnende op het tijdstip $t'' = 0$, waarbij voor de tijd na het stoppen (t'') ook geschreven kan worden

$$t'' = t' - t_p \quad (3a)$$

Wanneer zowel de invloed van de onttrekking als de invloed van de injectie door een logaritmische term kunnen worden beschreven is het superpositieresultaat: (3)

$$\varphi_r = \frac{Q}{4\pi kD} \ln \frac{t'}{t''} \quad (3)$$

Dit verband is dus slechts geldig wanneer gelijktijdig geldt

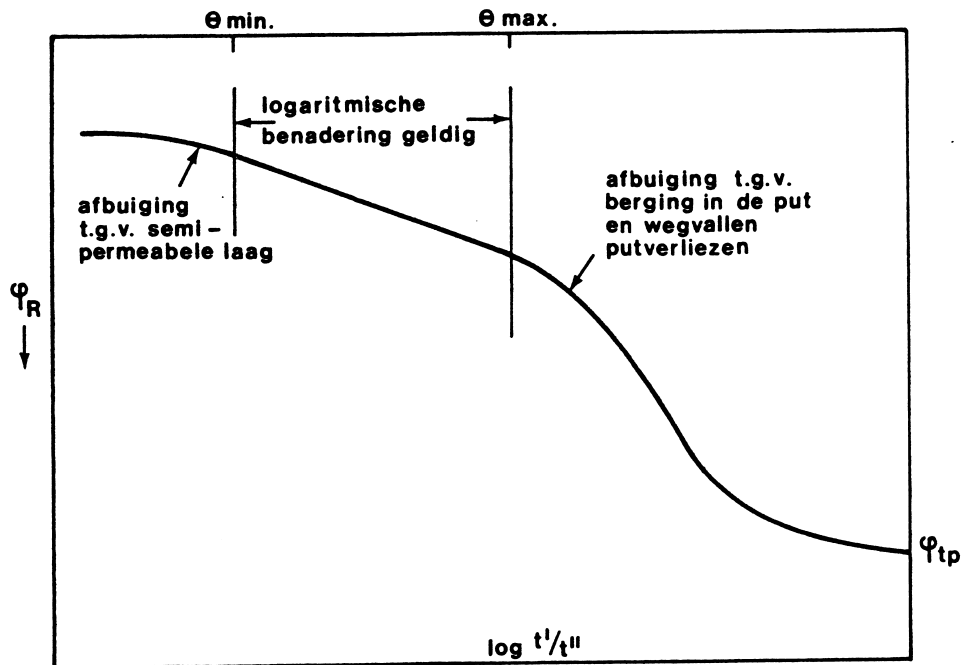
$$t_1 < t' < t_2 \quad (21)$$

$$\text{en} \quad t_1 < t'' < t_2 \quad (22)$$

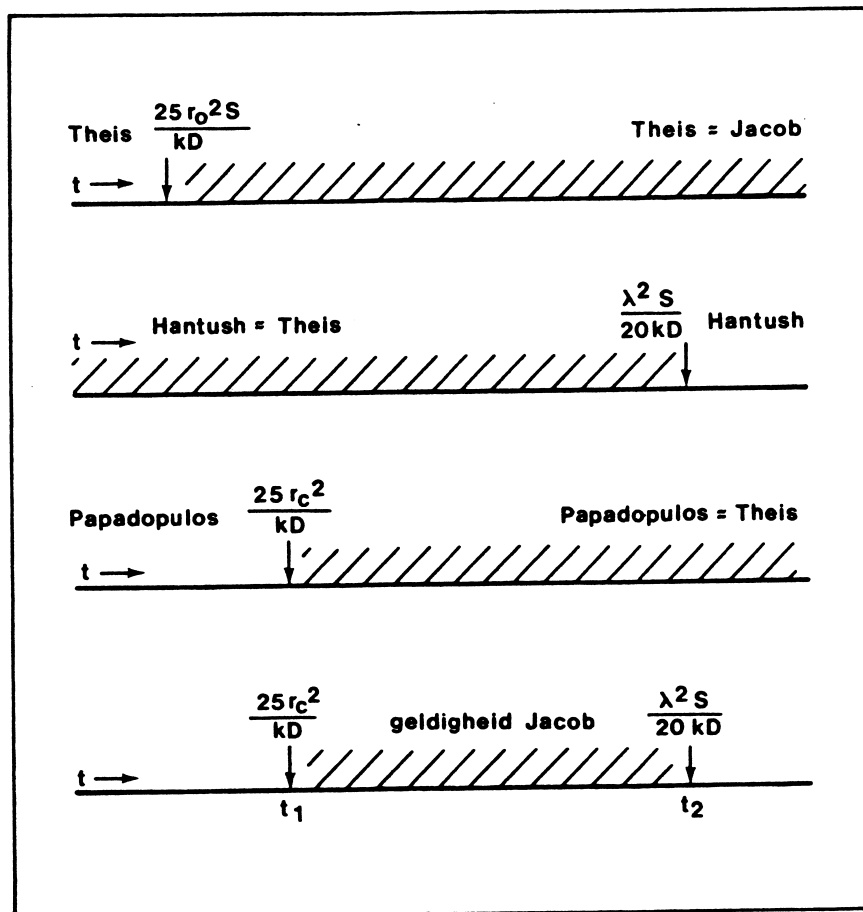
Voor de laatste ongelijkheid kan m.b.v. (3a) ook geschreven worden

$$t_1 + t_p < t' < t_2 + t_p \quad (22a)$$

Hiermee is direct in te zien dat aan (21) en (22) slechts gelijktijdig kan worden voldaan wanneer



Figuur 16.
Algemeen restverlagingsverloop.



Figuur 17.
Geldigheid Jacob benadering.



$$t_1 + t_p < t' < t_2$$

(23)

Stellen we de verhouding t'/t'' gelijk aan θ , dan is met behulp van de relatie

$$\theta = \frac{t'}{t' - t_p} = 1 + \frac{t_p}{t' - t_p}$$

en de ongelijkheid (23) af te leiden dat de maximale, resp. minimale waarden van θ waarvoor de logaritmische restverlagingsformule (3) mag worden toegepast, luiden:

$$\theta_{max} : [t' = t_1 + t_p] \Rightarrow \theta_{max} = \frac{t_1 + t_p}{t_1}$$

$$\theta_{min} : [t' = t_2] \Rightarrow \theta_{min} = \frac{t_2}{t_2 - t_p}$$

De lengte van het rechtlijnig traject in de restverlagingslijn (fig. 11) wordt bepaald door de verhouding:

$$\frac{\theta_{max.}}{\theta_{min.}} = \frac{1}{t_1 t_2} [-t_p^2 + t_p(t_2 - t_1) + t_1 t_2] \quad (24)$$

en is dus afhankelijk van de pomptijd.

De optimale pomptijd, waarbij het rechte traject zo lang mogelijk is, volgt uit

$$\frac{d}{dt_p} \left(\frac{\theta_{max.}}{\theta_{min.}} \right) = 0 \Rightarrow t_p = \frac{t_2 - t_1}{2}$$

In de meeste gevallen is $t_1 \ll t_2$ zodat

$$t_p \approx \frac{t_2}{2} \quad (25)$$

De gunstigste pomptijd bedraagt dus ongeveer de helft van het tijdstip waarop de laatste waarneming verricht wordt die voor de restverlagingsmethode nog bruikbaar is (t_2). Wanneer het criterium (20) groot genoeg is (bijv. bij een grote λ -waarde) en er tijdens de skinproef geen merkbare invloed t.g.v. voeding uit aangrenzende pakketten optreedt kan voor t_2 gelezen worden: som van pomp- en stoptijd. Volgens (25) is dan dus de meest ideale pomptijd gelijk aan de stoptijd.



Invullen van (25) in (24) geeft bij een optimale pomptijd:

$$\theta_{max}/\theta_{min} = \frac{(t_1 + t_2)^2}{4t_1t_2} \approx \frac{t_2}{4t_1}$$

Stelt men als eis dat het rechte deel tenminste een logcyclus bedraagt dan is:

$$\theta_{max}/\theta_{min} = 10$$

$$\Rightarrow t_2 = 40t_1$$

$$t_p = 20t_1$$

Een waarde van $t_1 = 1$ min lijkt in de meeste gevallen een voldoende veilige aanname te zijn, zodat in het algemeen goede resultaten verwacht mogen worden bij een pomptijd van ca. 20 min. en een evenlange stoptijd. In geval van semi-spanningswater geldt bovendien dat de totale duur van de skinproef korter zal moeten zijn dan $\lambda^2 S / 20kD$.

4.3 Slingerproeven

Men spreekt van een slingerproef wanneer na een plotselinge waterstandsverandering in de put (de put is aanvankelijk in rust) de waterstand via een geleidelijk uitdempende slingerbeweging naar haar oorspronkelijke niveau terugkeert. Een plotselinge verandering van de waterstand is bij dit onderzoek als volgt gerealiseerd. In de stijgbuis wordt een opblaasbare rioolafsluiter (Lansas) geplaatst waar in plaats van een afsluitdop een p.v.c.-buis is aangeschroefd. Via deze p.v.c.-buis wordt met perslucht de waterspiegel omlaag gedrukt. Na enige tijd zal het grondwater in de aquifer weer de oorspronkelijke stijghoogte hebben aangenomen en wordt in de put het gewicht van de weggeperste hoeveelheid water juist gecompenseerd door de overdruk van de perslucht. Laat men nu de perslucht plotseling ontsnappen dan valt deze compensatie weg en ontstaat in de put een toestand die overeenkomt met een zeer snelle waterstandsval.

De vrij korte duur (enkele minuten) maakt een dergelijke proef erg aantrekkelijk. Wel is een goede opname van de slingerbeweging met handpeilingen praktisch onmogelijk, zodat goede, liefst continu registrerende peilapparatuur onmisbaar is.



4.3.1 Uitwerking

Een gedempte harmonische trilling kan door twee kengetallen worden gekarakteriseerd. Het een geeft informatie over de frequentie van de trilling, terwijl het ander iets zegt over de mate van uitdemping. In de diverse literatuur over slingerproeven (zie lit. 8, 11, 12, 13) treft men hiervoor steeds andere grootheden aan.

Bij Krauss (lit. 13) wordt de slingerbeweging uitgedrukt in de zgn. natuurlijke of dempingsvrije hoeksnelheid ω_0 , en een dempingscoëfficiënt δ die bepaald wordt door de verhouding tussen de werkelijke hoeksnelheid ω en de dempingsvrije hoeksnelheid ω_0 volgens:

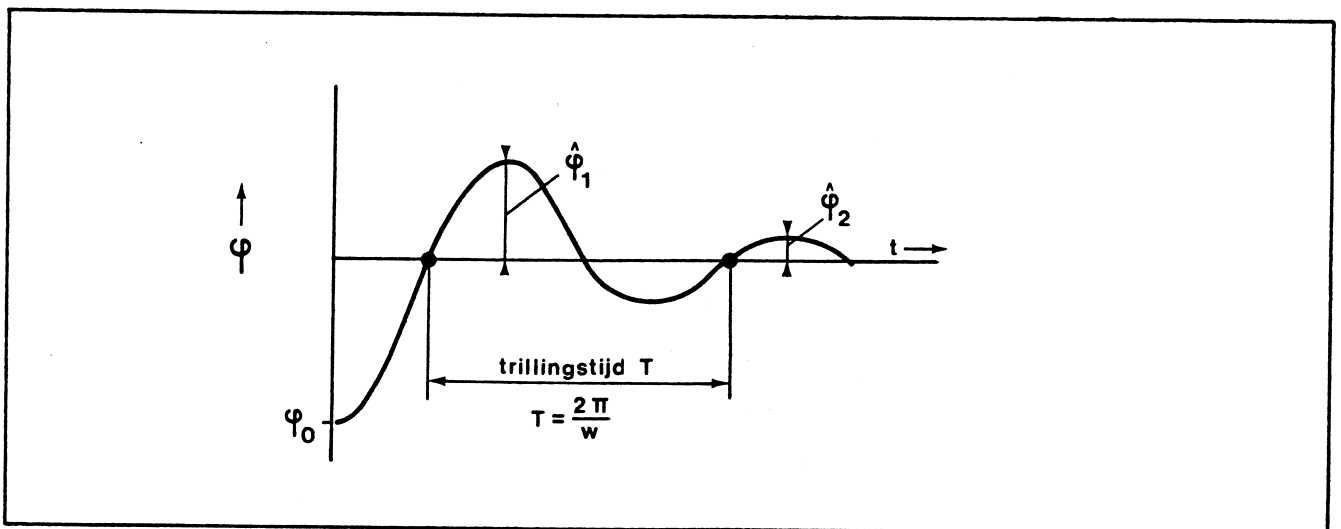
$$\delta = \sqrt{1 - (\omega / \omega_0)^2} \quad (26)$$

Voor de waterstand in de put kan men dan schrijven

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\omega_0 \delta t} \cos(\omega_0 \sqrt{1 - \delta^2} t) \quad (27)$$

Helaas kunnen δ en ω_0 niet direct uit een opgemeten slingerbeweging worden afgeleerd. Dit is wel het geval voor de slingertijd T en een grootheid δ die het logaritmisch decrement wordt genoemd (zie fig. 18). Dit is de natuurlijke logaritme van de verhouding tussen twee opeenvolgende maxima (of minima) n.l.

$$\delta = \ln \frac{\hat{\varphi}_n}{\hat{\varphi}_{n+1}} \quad (28)$$



Figuur 18.
Gedempte harmonische trilling.



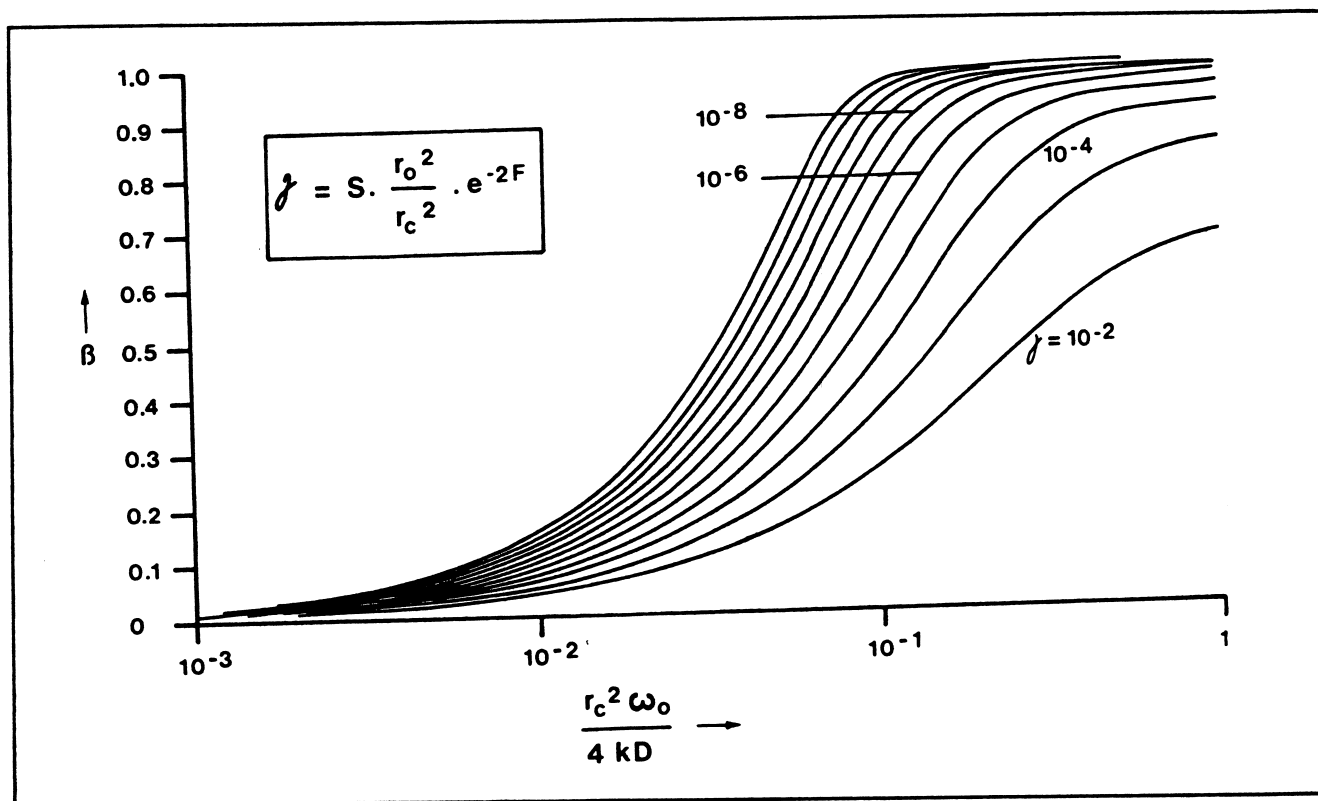
Slingertijd en logaritmisch decrement kunnen op eenvoudige wijze uit een waargenomen slingerbeweging worden afgeleid waarna δ en ω_0 kunnen worden berekend met behulp van

$$\delta = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (29)$$

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}}{T} \quad (30)$$

Zowel Krauss als v.d. Kamp (litt. 12, 13) besteden geen aandacht aan de invloed van het skineffekt bij slingerproeven. Gebleken is bij de aan de Parkweg gehouden slingerproeven dat verwaarlozing van het skineffekt een veel te lage kD -waarde oplevert (400 m²/dag i.p.v. 1900 m²/dag). Derhalve is voor de slingerproef een theorie ontwikkeld (interne RID-nota litt. 14) waarbij skinverliezen wel in rekening zijn gebracht. Voor de verdere uitwerking van een slingerproef kan nu gebruik worden gemaakt van de in fig. 19 gegeven krommen. Hierbij is de dempingsfaktor δ uitgezet tegen $(r_c^2 \omega_0) / 4kD$ voor verschillende waarden van een parameter γ :

$$\gamma = \frac{S r_0^2}{r_c^2} e^{-2F} \quad (31)$$



Figuur 19
Verband tussen dempingsfaktor en overige parameters.



Dit impliceert dat voor de bepaling van de kD -waarde zowel S als F bekend moeten zijn.

4.3.2 Resultaten

Op de pompput aan de Parkweg is tweemaal een serie slingerproeven uitgevoerd, d.d. 25-5-1976 en d.d. 3-1-1978. De eerste maal werden waterstanden gemeten d.m.v. een zgn. borrelbuis gekoppeld aan een continue schrijver. De grootste draaisnelheid van deze schrijver bedroeg $19 \text{ mm}/2\frac{1}{2} \text{ min}$, waardoor de trillingstijd, die in de orde van 10 sec. ligt, niet met voldoende nauwkeurigheid kon worden bepaald. Toen eind 1977 de afdeling de beschikking kreeg over een snellere recorder en een nauwkeurige drukopnemer zijn de proeven nogmaals uitgevoerd (zie fig. 20).

De voor de uitwerking benodigde waarden van S en F zijn hier gesteld op:

$$S = 5 \times 10^{-4} \quad (\text{pompproef})$$

$$F = 10.5 \quad (\text{skinproeven}).$$

De straal van het boorgat en de stijgbuis bedragen resp:

$$r_o = 0.125 \text{ m}$$

$$r_c = 0.05 \text{ m}.$$

Hiermee vinden we voor de parameter γ een waarde van ca. 2×10^{-12}

Tabel 4.2.

Resultaten slingerproeven.

	25-5-76	3-1-78
δ	1.66	1.27
T	11 sec	12 sec
β	0.26	0.20
ω_o	0.58 sec^{-1}	0.534 sec^{-1}
kD	1760	$2060 \text{ m}^2/\text{d}$

In verband met de veel nauwkeurigere registratie-apparatuur moet meer waarde worden toegekend aan de uitkomsten van de 2^e serie (3-1-78). Deze waarde voor de kD ($2060 \text{ m}^2/\text{d}$) komt bijzonder goed overeen met de resultaten van pompproef en skinproeven.

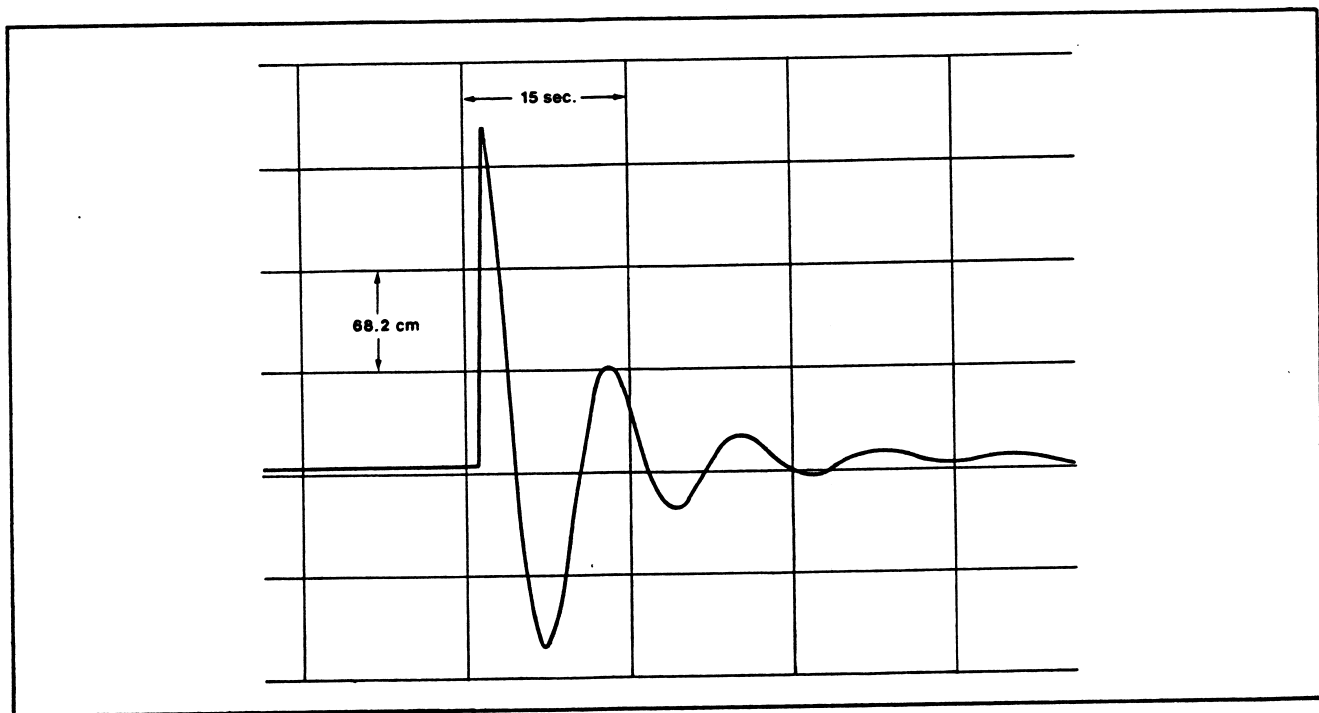


Een slingerproef kan meestal in enkele minuten worden afgewerkt hetgeen een grote tijdwinst betekent. Bovendien zal door de korte duur een verstoring van de proef door min of meer "natuurlijke" grondwaterstandschommelingen (getijfluktuaties, onttrekkingen in de omgeving, barometrische schommeling) nauwelijks kunnen optreden.

Een groot nadeel is echter dat voor een bepaling van de kD zowel de S -waarde als de skinfaktor F bekend moeten zijn. De laatste grootte is meestal pas bekend als een skinproef is gehouden, zodat de slingerproef als een onafhankelijke methode ter bepaling van de kD niet in aanmerking kan komen. Wel kan een slingerproef waardevol zijn als aanvulling en controle op een skinproef.

Een andere toepassingsmogelijkheid voor de slingerproef is bijv. voor en na het schoonpompen van een put. Door onderlinge vergelijking van de resultaten kan worden geconstateerd of inderdaad vermindering van de skinweerstand heeft plaatsgehad. Bij een in gebruik zijnde put kan men bijv. snel inzicht krijgen in de mate van verstopping (bijv. bij retourputten) waarbij de put slechts korte tijd uit bedrijf genomen behoeft te worden.

Bij deze toepassing van een slingerproef gaat het daar niet meer zozeer om de kD -waarde maar tracht men de veranderingen in de skinweerstand aan te tonen uitgaande van eerder bepaalde (of geschatte) kD - en S -waarden. In deze vorm valt de slingerproef in feite buiten het kader van het k -waarden onderzoek.



Figuur 20.
Oscillatie in pompput 30D-130.

5.

puntproeven

5.1 Algemeen

Zoals is vermeld in de inleiding wordt bij puntproeven een filter toegepast van zeer geringe afmetingen, waardoor een drie-dimensionaal stromingspatroon kan worden gekreëerd. Het gebied waarbinnen de stijghoogteveranderingen merkbaar zijn is zo klein ten opzichte van de pakketdikte, dat men bij de beschrijving van het stromingspatroon het watervoerend pakket in alle richtlijnen als oneindig uitgestrekt kan opvatten. Een belangrijk verschil met de in het vorige hoofdstuk beschreven putproeven is, dat ditmaal niet de kD -waarde van het gehele watervoerend pakket wordt gevonden maar een slechts voor een bepaalde diepte geldende k -waarde.

Voor de beoordeling van de doorlatendheid van het totale pakket zijn dus een aantal, op verschillende diepten uitgevoerde, puntproeven noodzakelijk. Ten opzichte van een putproef, waarmee een kD -waarde bepaling in een enkele proef mogelijk is, is dit een nadeel. Hier staat echter tegenover dat men met behulp van puntproeven tevens een inzicht krijgt in de verticale variatie van de doorlatendheid hetgeen bij sommige studies erg belangrijk kan zijn.

Teneinde na te gaan of in een enkel boorgat k -waarde bepalingen op verschillende diepten mogelijk zijn, zijn tijdens de uitvoering van de boringen 30D-131 en 30D-132 puntproeven op verschillende diepten gehouden. De uitvoering hiervan zoals deze in het onderstaande wordt beschreven is alleen mogelijk bij een puls boring: Wanneer het boorgat de te onderzoeken diepte heeft bereikt wordt het zgn. bolvormig filter in het boorgat neergelaten. Voor een beschrijving van dit filter wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Wanneer het filter op de juiste diepte is, worden de boorbuizen enigszins omhoog getrokken zodat het boorgat rondom het filter instort. Nadat het filter is schoongepompt kunnen dan enkele proeven worden uitgevoerd. Na afloop van deze proeven wordt het filter weer opgetrokken zodat dit niet verloren gaat.

Evenals bij putproeven wordt de stroming van of naar het filter opgewekt door een plotselinge waterstandsverlaging in de stijgbuis (stijgproef) of met behulp van een konstant injectie- of onttrekkingsdebiet (debietproef, minipompproef). Wanneer bij de proef met konstant debiet waarnemingen worden verricht in aparte



waarnemingsfilters ontstaat een situatie die enigszins doet denken aan een pomp-proef op zeer kleine schaal. Om die reden wordt bij deze versie van puntproeven in dit verslag gesproken van de minipompproef.

Bij de overige proefopstellingen (stijgproef, debietproef) worden uitsluitend waterstandsveranderingen waargenomen in de stijgbuis van het beproefde filter zelf. Hierbij zal in principe ook ditmaal rekening gehouden moeten worden met :

- de eigen weerstand van het filter (skinfactor)
- de berging van water in de stijgbuis
- de traagheidskracht op de watermassa in de stijgbuis.

5.1.1 Skinfactor bij bolvormige filters

Aangezien bij de vervaardiging van het boorgat voor de puntproeven geen boor-spoeling gebruikt wordt (pulsboring) en bij het plaatsen van het bolvormig filter in de formatie geen omstorting wordt toegepast (boorgat stort in), is het hier niet zinvol bij toepassing van de skin-vergelijking (4) de straal van het boorgat te gebruiken. De skin-weerstand bestaat in dit geval in hoofdzaak uit extra verliezen ter plaatse van het filter zelf, zodat het meer voor de hand ligt om ditmaal de straal r_b van het bolvormig filter te gebruiken. Analoog aan de definitie van de skinfactor bij volkomen putten (par. 4.1.1.) kan men ook hier een skinfactor F introduceren. Voor het skinverlies kan men schrijven

$$\Delta \varphi_s = w \cdot v = w \cdot \frac{Q}{4\pi r_b^2}$$

Hierbij is w de weerstand van de skin (in dagen) en v het specifiek debiet (m/d). Stelt men nu $F = k \cdot w / r_b$ overeenkomstig (4) dan vindt men voor het skinverlies

$\Delta \varphi_s$

$$\Delta \varphi_s = F \frac{Q}{4\pi k r_b}$$

(32)

5.1.2 Berging in de stijgbuis en invloed van traagheidskrachten

In vergelijking met het volkomen filter, dat bij putproeven wordt toegepast, is de capaciteit van het bolvormig filter erg gering, zodat hier per eenheid



van debiet een veel grotere afpompings noodzakelijk is. Dit houdt tevens in dat de hoeveelheid water die vrijkomt door de verlaging van de water-spiegel in de stijgbuis, in verhouding tot het totale debiet veel groter zal zijn dan bij een volkomen filter. Er kan dus worden verwacht dat bij puntproeven in de niet-stationaire fase de berging in de stijgbuis een zeer belangrijke rol zal spelen.

Bij de stijgproef blijkt dit inderdaad in hoge mate het geval te zijn. Wanneer in analogie met de putproeven een dimensieloze bergingsfaktor wordt gedefinieerd volgens

$$\alpha = \frac{4r_b^3 S_s}{r_c^2} \quad (33)$$

waarbij: S_s = specifieke bergingscoëfficiënt (m^{-1})
 r_b = straal bolvormig filter (m)
 r_c = straal stijgbuis (m)

dan kan worden aangetoond (lit. 15) dat, indien $\alpha < 10^{-3}$, de bergingsverschillen in het zandpakket verwaarloosd kunnen worden ten opzichte van de bergingsverschillen in de stijgbuis. Aangezien de specifieke bergingscoëfficiënt S_s meestal een waarde heeft van 10^{-4} à 10^{-6} zal aan dit criterium praktisch altijd zijn voldaan.

De overheersende rol van het bergend vermogen in de stijgbuis komt ook tot uiting wanneer de invloed van traagheidskrachten wordt bekeken. Door de grote dempende werking blijft nu het oscillatieverschijnsel achterwege, hetgeen als volgt kan worden aangetoond.

Een criterium voor het uitblijven van oscillatie (lit. 15) bij een bolvormig filter in een oneindig pakket is :

$$L < \frac{gr_c^4}{64k^4r_b^2} \quad (34)$$

waarbij : L = lengte van de waterkolom in de stijgbuis (m)
 k = doorlatendheid (m/d)
 g = versnelling ten gevolge van zwaartekracht (m/d^2)

Voor het hier toegepaste "bolvormig" filter is $r_c = r_b = 0.055$ m. Stel $k = 50$ m/d dan vindt men met behulp van (33)



$$L < 1380 \text{ m.}$$

Hieruit blijkt dat oscillatie bij stijgproeven op het bolvormig filter in praktijk zeer onwaarschijnlijk is.

5.2 Stijgproeven

5.2.1 Algemeen

Bij de stijgproef kan de plotselinge waterstandsverlaging op dezelfde wijze worden gerealiseerd als bij de slingerproef (zie par. 4.3.), d.w.z. "wegdrukken" van de waterspiegel met perslucht, vervolgens na enige tijd plotseling "loslaten".

Wanneer de invloed van elastische berging in het pakket en traagheidskrachten in de stijgbuis mag worden verwaarloosd (zie par. 5.1) kan men voor het waterstandsverloop schrijven : (lit. 16)

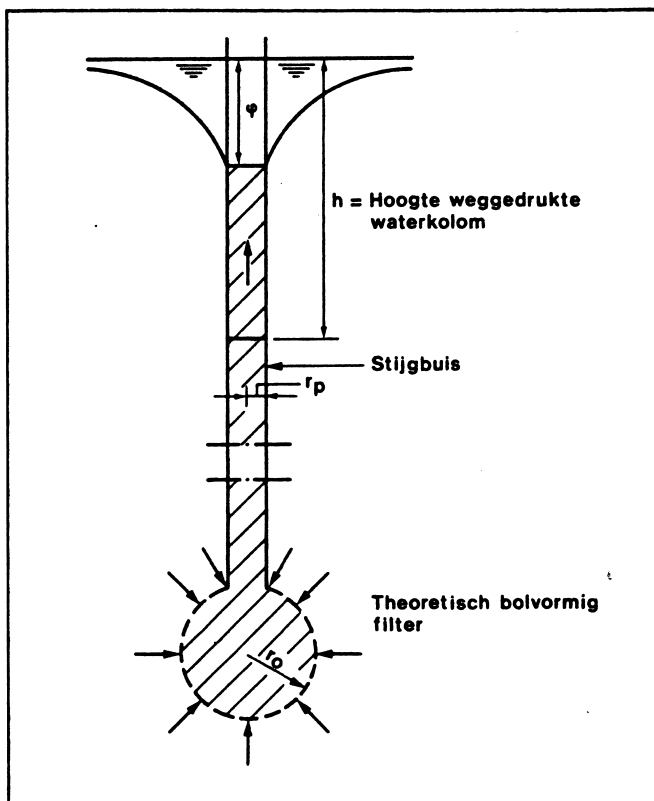
$$\varphi = h \exp \left(- \frac{4kr_b t}{r_c^2} \right) \quad (35)$$

waarbij φ = waterstandsverlaging in stijgbuis t.o.v. oorspronkelijke niveau (m)

h = hoogte van "weggedrukte" waterkolom (m)

t = tijd vanaf het moment van "loslaten" (d)

(zie fig. 21)



*Figuur 21.
Stijgproef.*



Hierbij is tevens aangenomen dat bij het filter geen extra weerstand aanwezig is (skinfactor $F = 0$). Op de invloed van de eigen weerstand bij de k -waarde bepaling zal elders nader worden ingegaan.

De registratie van de stijging van de waterspiegel vindt plaats met behulp van een speciaal voor dit doel door het RID ontwikkelde sonde. Op deze sonde bevinden zich op zekere afstand van elkaar een aantal (12) kontaktpunten. Wanneer de waterspiegel een bepaald kontaktpunt bereikt, wordt dit geregistreerd op een recorder. De uitwerking van deze gegevens verloopt verder als volgt: op half-logaritmisch papier zet men de stijghoogte (logaritmisch) uit tegen de tijd (lineair). Volgens de theorie liggen deze punten op een rechte lijn. Het verschil op de tijdschaal (Δt) per logcyclus wordt nu bepaald waarna de k -waarde kan worden berekend met behulp van

$$k = \frac{2.3}{4} \frac{r_c^2}{r_b} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (36)$$

5.2.2 Stijgproeven tijdens het boren

Stijgproeven zijn gehouden tijdens het boren van de boringen 30D-131 en 30D-132. Het bolvormig filter is hier benaderd door een cilindervormig filter met een hoogte gelijk aan de diameter (11 cm). Voor r_b is hierbij de helft van de uitwendige diameter gehanteerd ($r_b = 0.055$ m.) In hoeverre deze benadering aanvaardbaar is zal o.a. uit vergelijking met andere methoden voor de k -waardebepaling moeten worden afgeleid.

Een overzicht van de resultaten is gegeven in tabel 5.1. Hierin zijn tevens opgenomen de zgn. M -cijfers. Dit is de bij de beschrijving van de boormonsters geschatte gemiddelde korreldiameter in μ 's.

Van 21.35 - 22.30 m -mv. is in boring 30D-131 een sterk veenhoudende laag aangetroffen, die waarschijnlijk zeer slecht doorlatend zal zijn. De stijgproef op 22.70 m is vlak onder deze slecht doorlatende laag gehouden, zodat van het gebied rondom het filter slechts de onderste helft aan stroming deelneemt (half-oneindig veld). De op deze diepte gevonden k -waarde is dus vrijwel zeker onjuist.

Wanneer men ervan uitgaat dat het pakket van ca. 23 - 68 m -mv. bestaat uit homogeen materiaal, dan zou men op grond van een kD van $1900 \text{ m}^2/\text{d}$ (pompproef en putproeven) hier een k -waarde verwachten van ca. $40 \text{ m}/\text{d}$. De op 30 en 35 m gevonden waarden zijn echter aanmerkelijk lager.

Uit de M -cijfers blijkt echter dat de zandafzettingen van boven naar onder overgaan



Tabel 5.1. Resultaten stijgproeven tijdens het boren.

30D-131			30D-132			Bijzonderheden
diepte-mv	k (m/d)	M	diepte-mv	k (m/d)	M	
10.10	12.2	160	10	11.1 11.5	170	Holoceen
22.70 "	(2.5) (2.3)	75-150	-	-	-	vlak onder veenlaag
30.70	6.8	160	-	-	-	
35.70 "	11.6 12	220	35	9.3 8.8	375	
na 35 m: M = 250 - 360 in boring 130 (zuigboring)						

De straal van de stijgbuis bedroeg bij deze stijgproeven 0.025 m.

van fijn (matig fijn) naar grover materiaal, zodat op zichzelf een lagere k -waarde in het bovenste deel van het pakket niet onjuist behoeft te zijn. Voor overige opmerkingen en konklusies wordt verwezen naar par. 5.3.1. waar de stijgproefresultaten kunnen worden vergeleken met de resultaten van de debietproeven en het laboratoriumonderzoek op de aldaar genomen grondmonsters.

5.2.3 Stijgproeven op de definitieve filters

Boring 132 is afgewerkt met eenzelfde "bolvormig" filter als is toegepast bij de proeven tijdens het boren. Bij de uitwerking hiervan kan dus dezelfde waarde voor r_b worden aangehouden. Bij het plaatsen van het definitieve filter is ook nu geen omstorting toegepast en heeft men het boorgat rondom het filter laten instorten.

De proef is eenmaal uitgevoerd met de lansasafsluiter boven de waterspiegel en eenmaal eronder.

De stijging vond dus eenmaal plaats in de stijgbuis van de put zelf ($r_c = 5.05$ cm) en eenmaal in de buis van de lansasafsluiter ($r_c = 2.5$ cm). Het bolvormig filter bevond zich bij deze proef op een diepte van 35 m-mv, dus op dezelfde diepte als de laatste stijgproeven tijdens de puls boring.

De nu gevonden k -waarden zijn echter aanzienlijk hoger (zie tab. 5.2.)



Tabel 5.2.

Resultaten stijgproeven op het definitieve filter.

30D-132 (25-5-1976)		
r_p (m)	t (sec)	k (m/d)
0.0505	73	31.5
0.025	17.8	32

Ditmaal komen de k -waarden wel redelijk overeen met de op grond van de pompproef te verwachten waarde van 40 m/d. Met betrekking tot dit cijfer moet wel worden bedacht, dat dit een gemiddelde betreft over de dikte van het pakket en bovendien slechts betrekking heeft op de horizontale doorlatendheid.

In de meeste zandafzettingen is echter de verticale doorlatendheid (k_z) kleiner dan de horizontale doorlatendheid (k_r). Volgens Bruggeman (lit. 16) is in dat geval de met behulp van de stijgproef gevonden k -waarde gelijk aan het zgn. meetkundig gemiddelde van k_r en k_z :

$$k_{gem} = \sqrt{k_r k_z}$$

Bij anisotrope grond zal deze k_{gem} altijd lager zijn dan de horizontale doorlatendheid.

5.2.4 De invloed van de eigen weerstand van het filter

Voor het waterstandsverloop in de stijgbuis bij aanwezigheid van een skin-effekt kan indien $\alpha < 10^{-3}$ (zie lit. 15) geschreven worden:

$$\varphi = h \exp \left\{ - \frac{4kr_b t}{r_c^2 (1+F)} \right\}$$

Hierbij is F de skinfactor volgens (32).

Wanneer de stijgproef wordt uitgewerkt volgens de in par. 5.2.1. beschreven methode, dan levert vergl. (36) ons niet direkt de k -waarde op maar een waarde voor $k/(1+F)$ die we gemakshalve de schijnbare k -waarde, k_s , zullen noemen. Voor de werkelijke k -waarde geldt dus

$$k = (1+F) \cdot k_s$$



De stijgproefresultaten in tabel 5.1 respektievelijk 5.2 zouden dus nog vermenigvuldigd moeten worden met een korrektieterm $1 + F$. Dit betekent dus dat bij een eigen weerstand van het filter de k -waarden te laag zullen uitvallen. Tot nu toe is echter nog geen methode beschikbaar waarmee de skinfaktor bij het bolvormig filter kan worden bepaald.

5.3 Debietproeven .

Aangetoond kan worden (lit. 14) dat bij een konstante onttrekking (of injectie) binnen enkele minuten een stationaire toestand wordt bereikt. Afgezien van een term voor het eventuele extra-verlies ten gevolge van de eigen weerstand geldt dan voor de verlaging (respektievelijk verhoging) in de stijgbuis:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi k r_b}$$

(37)

Wanneer de stijghoogteverandering φ wordt gemeten kan de k -waarde worden berekend uit:

$$k = \frac{Q}{4\pi r_b \varphi}$$

(38)

Indien een skineffekt aanwezig is zoals beschreven in par. 5.1.1. gaat (37) echter over in

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi k r_b} (1 + F)$$

Tabel 5.3.
Resultaten puntproeven tijdens boren.

30D - 131						
	debietproeven		stijgproeven	steekmonsters		
diepte	Q_{inj} (l/u)	k (m/d)	k (gem.)	k_r	k_z	k ber.
10.10	810 690 420	21.3 22 21	12.2	7.7		14
22.70	750 210 330	(6.7) (4.1) (4.1)	2.5	7.7	0.15	5
30.70	780 660 375	13.7 17.0 13.4	7	20.2	1	12
35.70	780 540 660	18.7 20.8 21.0	11.8			25



Tabel 5.4.

Resultaten puntproeven tijdens boren.

30D - 132			
debietproeven			stijgproeven
diepte	Q_{inj}	k (m/d)	k (m/d)
10	660	14.4	11.3
	300	12.9	
	540	14.1	
35	900	24.4	9
	540	24.7	
	690	24.4	

zodat, net als bij de stijgproef, vlg. 38 een waarde oplevert voor $k/(1+F)$, of een schijnbare k -waarde k_s waarvoor geldt :

$$k = k_s (1+F)$$

De debietproefresultaten worden dus in dezelfde mate door de eigen weerstand van het filter beïnvloed als de stijgproefresultaten.

5.3.1 Debietproeven tijdens het boren

In aansluiting op de stijgproeven zijn tijdens het boren van de pulsboringen 30D-131 en 30D-132 debietproeven gehouden. Op iedere diepte werden drie verschillende injectiedebieten toegepast. De resultaten hiervan zijn gegeven in tabel 5.3 en 5.4.

Van de boring 30D-131 zijn tevens op verschillende dieptes steekmonsters genomen waarop door het ICW granulaire onderzoek en doorlatendheidsproeven (permeameter) zijn uitgevoerd. Bij de doorlatendheidsproeven werd de horizontale en de verticale doorlatendheid bepaald. Aan de hand van de granulaire samenstelling is vervolgens met behulp van een empirische formule (lit.17) de doorlatendheid berekend.

Ter vergelijking zijn in onderstaande tabellen de resultaten van stijg- en debietproeven naast naast elkaar gezet, aangevuld met resultaten van het laboratoriumonderzoek.

Bij boring 131 ziet het er weliswaar naar uit, dat de debietproefresultaten



ongeveer een faktor 2 groter zijn dan de stijgproefresultaten, maar deze konklusie gaat niet meer op wanneer we bij boring 132 met name naar de proef op 10 m diepte kijken. Op 10 m is de verhouding tussen debietproef en stijgproef veel minder dan 2 terwijl op 35 m deze verhouding ruim 2.5 is. Van een systematisch verschil is dus kennelijk geen sprake, tenzij dit door andere onregelmatigheden is versluierd. Er kan wel worden gekonstateerd, dat de stijgproef steeds een lagere k -waarde oplevert dan de debietproef. In het voorgaande is echter reeds uiteengezet, dat de eigen weerstand van het filter hiervoor geen verklaring kan zijn, aangezien deze de debiet- en stijgproefresultaten in gelijke mate beïnvloeden.

De sterk verminderde doorlatendheid op 22.70 diepte is ook bij de debietproef te zien en kan worden verklaard door de aanwezigheid van een sterk veenhoudende laag (half-oneindig stromingsveld) van 21.35 - 22.30 m-mv.

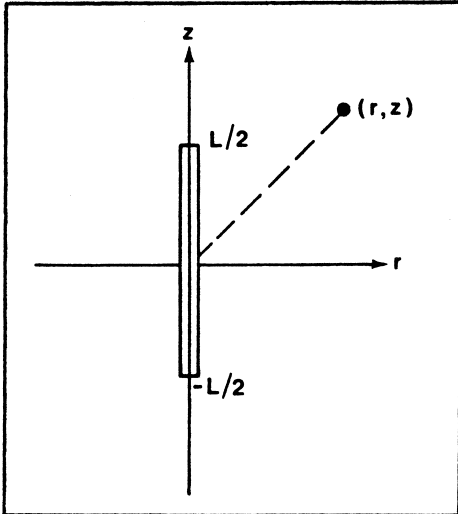
Met betrekking tot de verschillen tussen de resultaten van de puntproeven en die van het laboratoriumonderzoek kunnen een aantal opmerkingen worden gemaakt.

In de eerste plaats wordt op een zeer verschillende schaal gemeten, waardoor de resultaten zelfs bij ideale proefmethoden nooit dezelfde behoeven te zijn. De puntproeven geven een zeer "lokale" k -waarde maar het invloedsgebied is toch nog wel enkele meters in doorsnede. Hierbij vergeleken is de inhoud van een steekmonster zeer gering. Bij het permeameteronderzoek kunnen de metingen dan onevenredig beïnvloed worden door een "toevallig" aanwezige grindkorrel of sliblaagje.

In de tweede plaats zijn de omstandigheden waaronder de proeven worden uitgevoerd totaal verschillend (stroomsnelheid en -richting, porositeit) en wordt bij puntproeven de eigenweerstand van het filter meegemeten.

5.3.2 Debietproeven op definitieve filters

Voor het bolvormig filter waarmee boring 132 is afgewerkt, kan verg. (38) onveranderd worden toegepast. Voor het 1 m lange filter is deze vergelijking echter niet zonder meer geldig. Theoretisch geldt voor de stijghoogte bij stroming naar een lijnbron ter lengte L (zie lit. 18).



Figuur 22.

$$\varphi(r, z) = \frac{Q}{4\pi k L} \left[\text{bgsinh} \left(\frac{L/2 - z}{r} \right) + \text{bgsinh} \left(\frac{L/2 + z}{r} \right) \right] \quad (39)$$

waarbij: z = hoogte t.o.v. midden filter

$$\text{bgsinh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$$

Voor de gemiddelde stijghoogte op een afstand $r = r_b$ krijgt men dan

$$\varphi_{\text{gem}} = \int_{-L/2}^{+L/2} \varphi(r, z) dz = \frac{Q}{A \cdot \pi k r_b} \quad (40)$$

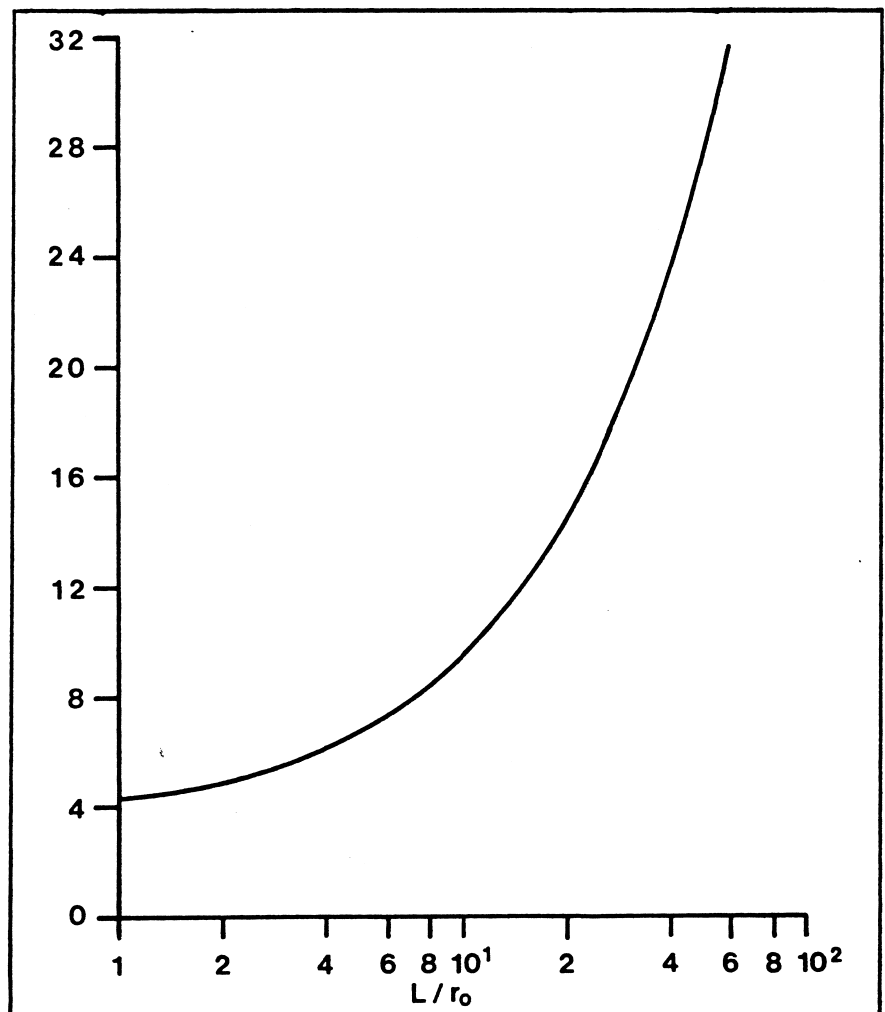
waarbij A een vormfaktor is die afhangt van de lengte/breedte verhouding van het filter:

volgens:

$$A = \frac{2\mu^2}{\mu \text{bgsinh}(\mu) - \sqrt{1 + \mu^2} + 1}$$

(41)

Zie figuur 23.



Figuur 23.
Korrektiefactor A bij
cylindervormig filter.



Voor het 1 m lange filter met straal $r_b = 0.03$ m. geldt $\mu = 33.33$, hetgeen voor A oplevert $A = 20.64$. De k -waarde kan men in dit geval dan berekenen met

$$k = \frac{Q}{20.64 \pi r_o \varphi} \quad (42)$$

Zowel op het bolvormig filter als op het 1 m lange filter is een serie van drie debietproeven uitgevoerd op 24-5-1976. Nadien zijn op beide filters proeven uitgevoerd ("tracerproef", "minipompproef") die niet in eerste instantie waren opgezet als debietproef, maar waarbij wel de mogelijkheid aanwezig was om op het filter zelf een verhoging/verlaging te meten bij een konstant injectie- respectievelijk onttrekkingsdebiet. Om de invloed van de filterlengte in de praktijk te toetsen, is bovendien op het 1 m lange filter een serie proeven gehouden, waarbij de lengte van het filter steeds werd ingekort. Deze inkorting vond plaats met behulp van een met cement verzwaarde pvc-buis die nauw in het filter paste.

De resultaten van al deze proefnemingen zijn gegeven in de tabellen 5.5 t/m 5.7. Om een en ander over de toename van de eigen weerstand op te kunnen merken is in deze tabellen ook opgenomen de verhoging c.q. verlaging per eenheid van debiet: φ/Q .

Het valt op dat de verhouding φ/Q zowel bij het bolvormig als bij het 1 m lange filter in de loop der tijd is toegenomen. Een mogelijke oorzaak hiervoor kan zijn een geleidelijke verstopping van de filters. Bij het bolvormig filter is de toename ca. 50 % en bij het 1 m lange filter is de toename bij het begin van de proeven met het ingekorte filter zelfs ruim 55 %.

Wat betreft de k -waarden komt de eerste serie debietproeven (24-05-76) wel vrij goed overeen met de waarden die tijdens het pulsen op 35 m diepte gevonden zijn. (30D-131 : $k = 20$ m/d; 30D-132 : $k = 24.5$ m/d), dit in tegenstelling tot wat de stijggroeven lieten zien. Voorzichtigheid bij het trekken van conclusies blijft echter geboden. Van een skinweerstand die in hoofdzaak is opgebouwd uit intree-verliezen in het filter zou verwacht kunnen worden dat deze bij alle proeven dezelfde waarde zou hebben en dus de resultaten in dezelfde mate zou beïnvloeden. Nu echter blijkt, dat waarschijnlijk door verstopping, de meetwaarden in de loop der tijd met meer dan 50 % kunnen gaan afwijken, worden uitspraken op grond van vergelijking van verschillende meetseries zeer twijfelachtig.

Bij het inkorten van het 1 m lange filter doet zich bovendien het vreemde verschijnsel voor dat de verhouding φ/Q niet noemenswaardig verandert. Volgens

Tabel 5.5.
Resultaten debietproeven op het definitieve filter.

30D-132 (bolvormig filter)				
	Q_{inj} (m ³ /u)	φ (m)	φ/Q	k (m/d)
debietproeven 24-05-76	1.140	1.33	1.167	30
	.900	0.97	1.078	32
	.360	0.4	1.111	31
tracerproef	2.020	2.30	1.139	30.5
miniproef 6-04-'77	* -2.33	- 3.38 ⁵	1.453	24
	-0.67	- 0.97	1.448	24
	-1.16	- 1.66 ⁵	1.435	24
minipompproef 14-04-77	-3.41	- 5.64	1.654	21
	-6.53	-10.83 ⁵	1.659	21

Tabel 5.6.
Resultaten debietproeven op het definitieve filter.

30D-131 (1 m lang filter)					
	L	Q_{inj}	φ	φ/Q	k
debietproeven 24-05-76	1.00	1.140	0.66	0.579	21
	1.00	.840	0.49	0.583	21
	1.00	.840	0.24	0.593	21
tracerproef	0.50	-2.010	- 1.27	0.632	31
minipompproef 14-4-'77	1.00	-4.330	- 2.80	0.647	19
	1.00	-2.610	- 1.74	0.667	18.5
debietproeven 13-12-77	1.00	.852	0.775	0.910	13
	1.00	.636	0.66	1.038	
	1.00	.120	0.125	1.042	
	1.00	.396	0.355	0.896	

* het - teken duidt op een onttrekking

Tabel 5.7.
Proeven met ingekort filter.

13 t/m 19-12-77

30D - 131					
L (m)	A	$q_{inj} \text{ m}^3/\text{u}$	ψ (m)	ψ/q	k (m/d)
1.00	20.64	0.852	0.775	0.910	13
	"	0.636	0.66	1.038	
	"	0.120	0.125	1.042	
	"	0.396	0.355	0.896	
.90	19.2	0.840	0.855	1.018	13
	"	0.654	0.675	1.032	
	"	0.372	0.405	1.089	
.80	17.7	0.852	0.785	0.921	15.5
		0.540	0.50	0.926	
		0.270	0.25	0.927	
.70	16.2	0.912	0.83	0.910	17
		0.600	0.545	0.908	
		0.348	0.32	0.920	
.60	14.6	0.894	0.75	0.839	20
		0.675	0.60	0.800	
		0.366	0.32	0.874	
.50	13.0	0.858	0.73	0.851	23
		0.594	0.495	0.833	
		0.300	0.255	0.850	
.40	11.4	0.900	0.79	0.878	25.5
		0.588	0.51	0.867	
		0.288	0.255	0.885	
.30	9.7	0.912	0.835	0.912	30
		0.528	0.46	0.871	
		0.246	0.22	0.894	
.20	7.9	0.900	0.88	0.978	34
		0.534	0.52	0.974	
		0.300	0.285	0.950	
.10	6.2	0.780	0.845	1.083	42
		0.540	0.57	1.056	
		0.312	0.33	1.028	



de theorie is φ/a gelijk aan $1/(A\pi k r_0)$, dus zou deze term bij het inkorten van het filter steeds groter moeten worden (A neemt af, zie fig. 18). Dit is echter geheel niet het geval. In eerste instantie neemt φ/a zelfs enigszins af tot een filterlengte van $L = 0.50$. Bij verder inkorten is er een lichte toename tot bij een filterlengte van 10 cm de oorspronkelijke waarde weer is bereikt. Het is echter uitermate onwaarschijnlijk dat een filter van 10 cm lengte nageenough dezelfde capaciteit heeft als een 1 m lang filter, zodat kan worden betwijfeld of met de hier gebruikte methode van inkorten wel het gewenste effect is bereikt.

De eigenweerstand van het filter en de grootte van de vormfactor A zijn van essentieel belang voor de betrouwbaarheid van de bepaling van k -waarden door middel van puntproeven en nader onderzoek hieromtrent is dan ook beslist noodzakelijk.

5.4 Miniproeven

De moeilijkheden met de eigenweerstand van het filter kunnen worden vermeden door, behalve de verlaging in de puntbron zelf, ook verlagingen in nabij gelegen waarnemingsfilters te meten. Bij een dergelijke opstelling lijkt de puntproef in zekere zin op de klassieke pompproef, zij het dat het hier om een 3-dimensionaal stromingsbeeld gaat en het beïnvloede gebied veel kleiner is. Een puntproef in deze uitvoering zal daarom hier "minipompproef" genoemd worden.

De aanvankelijke opzet was om de puntbron samen met de zgn. "mini"-filters (zie hoofdstuk 2) in het boorgat te plaatsen, zodanig, dat na het trekken van de mantelbuizen en het invallen van het boorgat de minifilters zich in de oorspronkelijke formatie zouden bevinden. Ter controle werden tijdens de proeven ook waarnemingen verricht in de filters van de omliggende boringen. Bij uitwerking bleken echter alleen de laatst genoemde waarnemingen tot zinnige resultaten te leiden.

Mogelijke verklaringen hiervoor zijn:

- . verstoring van de samenstelling van het zandpakket bij het invallen van het boorgat;
- . verstopping van de minifilters (bij elders uitgevoerde minipompproeven bleek inderdaad een dergelijk filter na verloop van tijd niet meer te reageren).

5.4.1 Invloed van begrenzing

Zowel het zgn. bolvormig filter (30D-132) als het 1 m lange filter bevindt zich ca. 13 m onder een als zeer slecht doorlatend aangenomen laag. De invloed



van een dergelijke begrenzing kan worden gekompenseerd door het introduceren van een zgn. spiegelbron van gelijke sterkte op dezelfde afstand (13 m) boven de ondoorlatende laag. De verlaging ten gevolge van de spiegelbron ter plaatse van de puntbron zelf is relatief zo gering dat men deze bij de debiet- en stijgproef buiten beschouwing kan laten. Voor de verlagingen buiten het beproefde filter is dit niet meer het geval en hiervoor is de volgende formule voor de stijghoogte van toepassing.

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{\bar{r}^2 + (\bar{z} - 1)^2}} + \frac{1}{\sqrt{\bar{r}^2 + (\bar{z} + 1)^2}} \quad (42)$$

De formule is hier gegeven in dimensieloze grootheden die als volgt zijn gedefinieerd;

$$\bar{\varphi} = \varphi / \frac{Q}{4\pi k_r d}$$

$$\bar{r} = ar/d$$

$$\bar{z} = z/d$$

$$a = \sqrt{(k_z/k_r)}$$

Hierbij zijn:

Q = onttrekkingsdebiet;

φ = grondwaterstandsverandering;

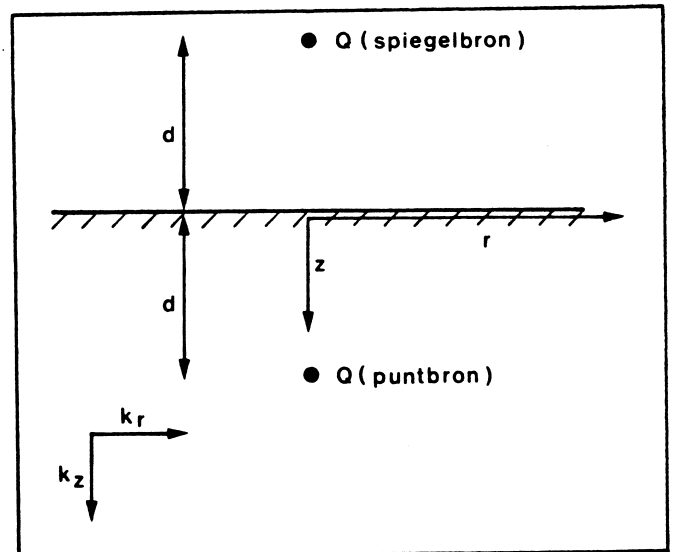
r } cylindercoördinaten als aangegeven in bovenstaande
 z } schets;

d = afstand pompfilter tot afsluitende laag

a = anisotropie faktor (zie boven);

k_r = horizontale doorlatendheid;

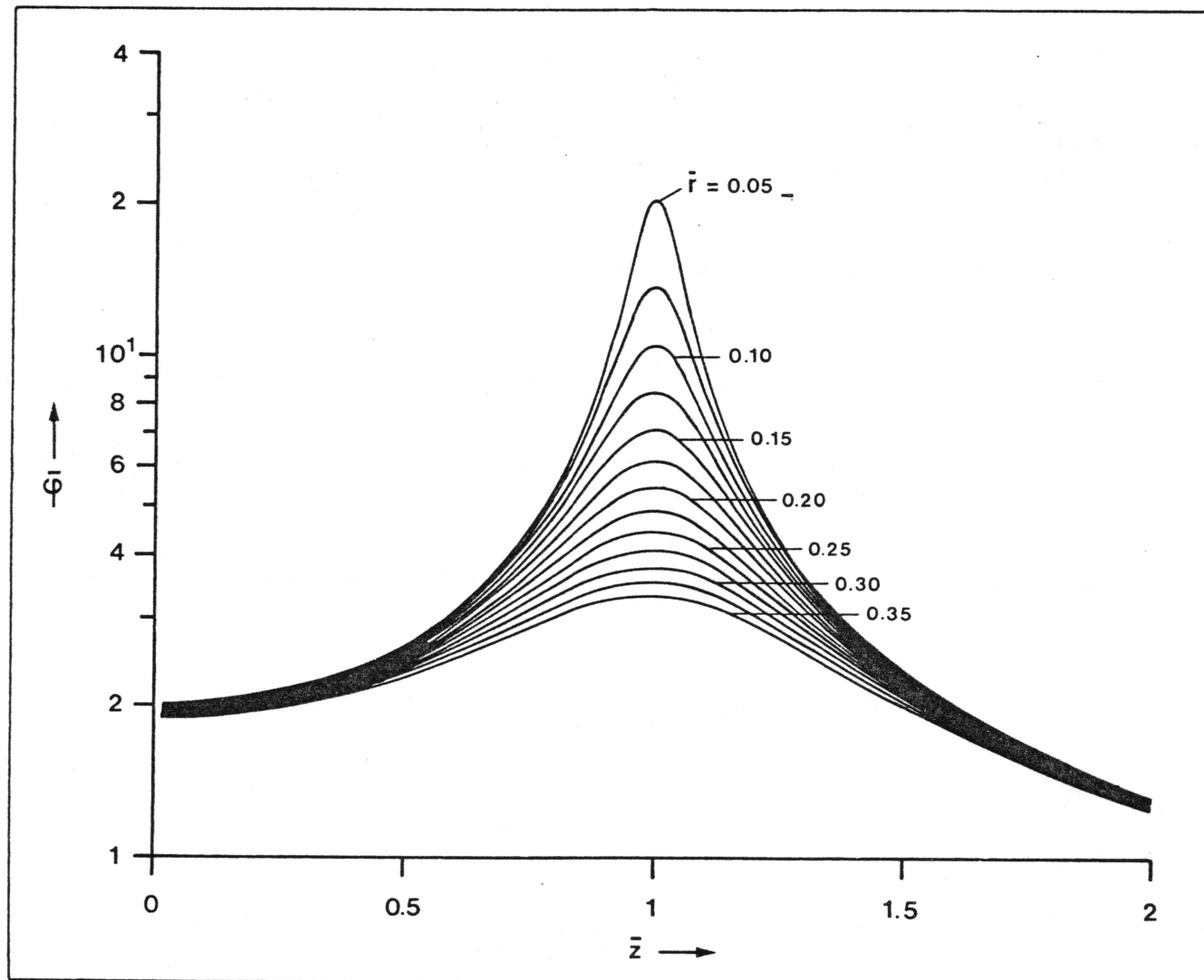
k_z = verticale doorlatendheid.



Figuur 24.

Voor de uitwerking van de meetgegevens is nu de volgende procedure toegepast: Voor verschillende waarden van $\bar{r}$ zijn van (42) standaardkrommen getekend door $\bar{\varphi}$ (logaritmisch) uit te zetten tegen $\bar{z}$ (lineair). Op deze wijze ontstaat er een bundel standaardkrommen (zie figuur 25).

De gemeten verlagingen van waarnemingsfilters die zich in een vertikaal ($\bar{r}$ = konstant) bevinden zijn op dezelfde wijze uitgezet tegen $\bar{z}$ op transparant papier



Figuur 25.

Standaardkrommen puntbron in anisotroop pakket bij ondoorlatende grens.

Dit levert een aantal punten op die alle bij dezelfde (nog onbekende) waarde van $\bar{r}$ behoren.

Door nu het papier met de gemeten waarnemingen op de bundel standaardkrommen te leggen en deze zodanig te verschuiven dat uitgezette punten op een standaardkurve liggen kan de waarde van $\bar{r}$ worden bepaald. (Bij het verschuiven dienen de verticale assen door bijvoorbeeld het punt $\bar{z} = 0$ en $\bar{z} = 1$, van beide tekeningen steeds samen te vallen; dus alleen in verticale richting verschuiven).

Uit de r -waarde kan nu direkt de anisotropiefactor a berekend worden, aangezien $\bar{r}$, r en d bekend zijn.

De horizontale lijn $\bar{\varphi} = 1$ van de standaardkrommen-grafiek snijdt de verticale as van de "meetpunten"-grafiek ergens in een punt $\varphi = \varphi_0$. Nu is:



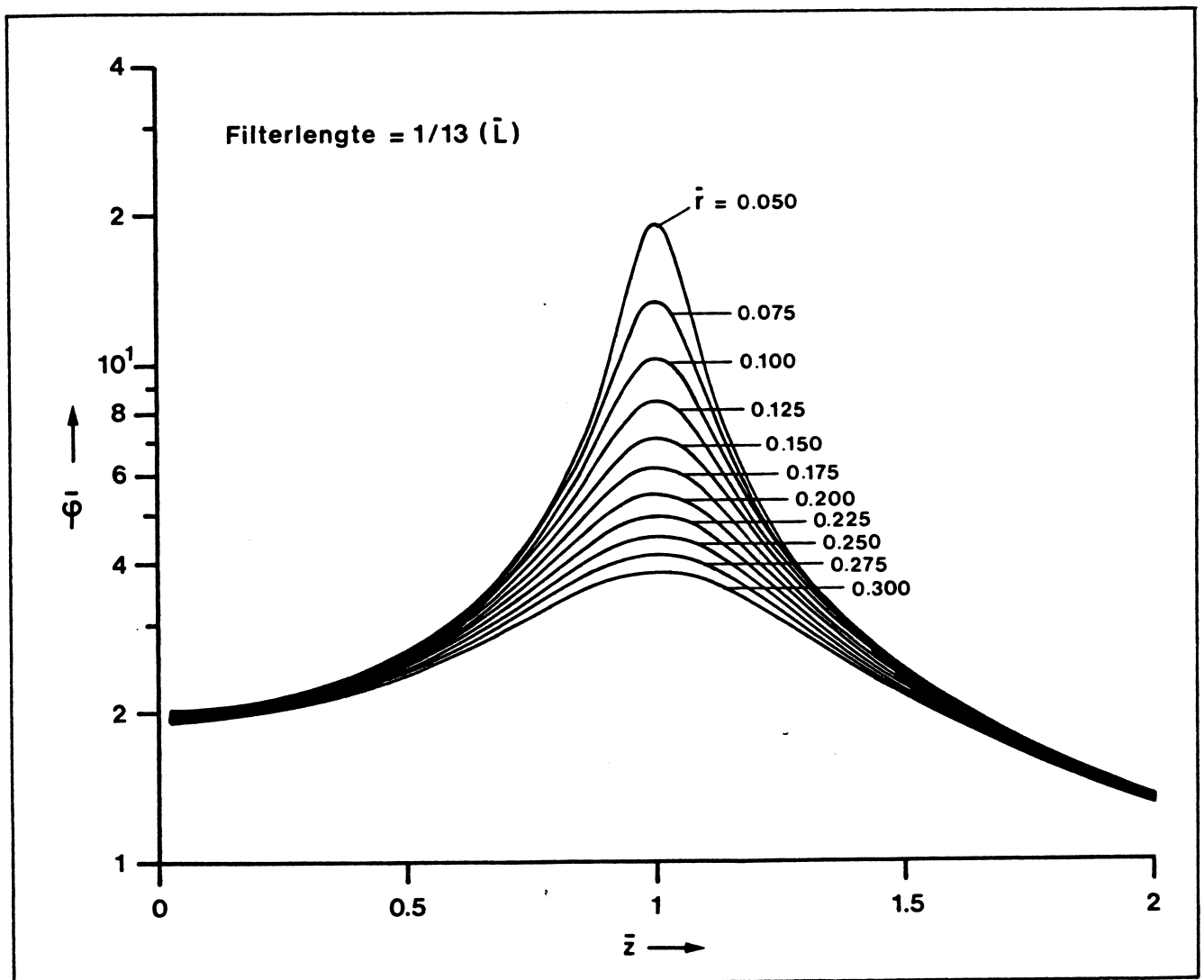
$$\bar{\varphi} = \varphi / \frac{a}{4\pi k_r \cdot d}$$

$$\begin{matrix} \bar{\varphi} = 1 \\ \varphi = \varphi_0 \end{matrix} \Rightarrow k_r = \frac{a}{4\pi \varphi_0 \cdot d}$$

terwijl k_z kan worden berekend uit :

$$k_z = a^2 k_r$$

Voor het 1 m lange filter is vergelijking (42) niet van toepassing maar een soortgelijke vergelijking kan ook hiervoor worden afgeleid. De bijbehorende bundel standaardkrommen is gegeven in figuur (26).



Figuur 26.
Standaardkrommen cilindervormig filter in anisotroop pakket bij een ondoorlatende grens.



5.4.2 Resultaten

De bij de miniproeven betrokken boringen zijn (zie figuur 3) 30D-131; 30D-132 en 30D-148. Als pompfilter is zowel het bolvormig (30D-132) als het 1 m lange filter (30D-131) toegepast, terwijl de waarnemingen daarbij in de filters van de overige twee boringen plaatsvonden. Bij de eerste twee proeven (d.d. 6-4-1977) was het onttrekkingsdebiet te gering om goed meetbare verlagingen in de waarnemingsfilters te creëren. Daarna zijn nog driemaal op 30D-132 en tweemaal op 30D-131 minipompproeven gehouden met verschillende onttrekkingsdebieten. Aangezien bovenbeschreven methode voor de interpretatie van de meetgegevens uitgaat van meer dan een waarnemingsfilter per vertikaal, was boring 30D-132 als waarnemingsboring niet bruikbaar. Onderstaande tabel geeft de gemiddelde waarden per vertikaal.

Tabel 5.8.

	pompfilter 30D-132		pompfilter 30D-131	
waarnemingen	Boring 30D-131	Boring 30D-148	Boring 30D-131	Boring 30D-148
k_r (m/d)	28.4	26.4	28.7	28.5
k_z (")	18.5	17.4	-	16.5
a	0.81	0.81	-	0.76

Bij proeven op het 1 m lange filter kon uit de waarnemingen in het bovenste filter van de boring 30D-131 een waarde voor de horizontale doorlatendheid worden afgeleid door gebruik te maken van het feit dat bij kleine waarden van $\bar{z}$ de standaardkrommen nagenoeg samenvallen. De waarde van $\bar{z}$ is dan niet meer van invloed op de verticale verschuiving.

De resultaten vertonen onderling een goede overeenkomst met gemiddelde waarden van:

$$\begin{aligned}
 k_r &= 28 \quad \text{m/d} \\
 k_z &= 17.5 \quad \text{m/d} \\
 a &= 0.79
 \end{aligned}$$



Nadelen van de "miniproef" zijn

- . er wordt gebruik gemaakt van waarnemingsfilters buiten het boorgat van het pompfilter. Voor één proef moeten dus minstens 2 nieuwe boringen verricht worden.
- . er wordt uitgegaan van een stationaire situatie. In theorie kan echter bij aanwezigheid van twee afsluitende lagen (boven en onder) een echte stationaire toestand nooit optreden. Alleen wanneer één van de twee afsluitende lagen zover weg is dat de invloed hiervan kan worden verwaarloosd is een (quasi) stationaire toestand mogelijk. Toepassing van minipompproeven blijft dus beperkt tot de bovenste of onderste lagen van een watervoerend pakket.

Als voordeel geldt, dat informatie verkregen wordt over de anisotropie. Bovendien is er geen invloed ten gevolge van het skineffekt. Zolang andere eenvoudige puntproeven zoals debiet- en stijgproeven nog in een experimenteel stadium verkeren en de moeilijkheden met de eigenweerstand nog niet opgelost zijn is de minipompproef zeer waardevol en als referentie bij verder onderzoek aan debiet- en stijgproef onmisbaar.

6.

konklusies en aanbevelingen

Wanneer men geohydrologische parameters wil bepalen in het veld aan de hand van waarnemingen in een pompput zelf moet altijd rekening worden gehouden met de eigenweerstand (skineffekt) van de put. Bij niet stationaire proeven is ook de eigen berging (berging in de stijgbuis) belangrijk. Naarmate de diameter van de stijgbuis groter is en de doorlatendheid kleiner, wordt de invloed van berging in de put zelf groter. Bij plotselinge veranderingen in de waterstand kan ook de invloed van traagheidskrachten op de waterkolom in de stijgbuis belangrijk worden.

Direkte informatie over de gehele dikte van het pakket wordt verkregen bij proeven op een volkomen filter (putproeven). De hiermee bepaalde doorlatendheid is slechts geldig voor horizontale stroming. Van een kortdurende stopproef (skinproef) mag men de beste resultaten verwachten. In principe is een pomptijd van ca. 20 minuten en een even lange stoptijd voldoende om een restverlaagingslijn te krijgen met een redelijk lang lineair traject, tenzij er sprake is van semispanningswater met een kleine λ -waarde, nl.:

$$\lambda^2 < 0.56 \frac{kD}{S} \quad (kD \text{ in } m^2/d)$$

In dat geval moet een kortere pomptijd worden toegepast.

Bij de skinproef kan de kD -waarde onafhankelijk van de andere parameters worden bepaald. Wanneer de S -waarde uit andere bronnen bekend is of geschat kan worden kan men met de skinproef tevens de skinfactor F bepalen. Hiermee heeft men dan een maat voor de efficiency van een put. Het verdient aanbeveling om de skinproef als standaard proef in te voeren voor iedere nieuwe pompput, als alternatief voor de huidige capaciteitsproeven. Alle informatie die een capaciteitsproef over de put en de aquifer levert kan men ook afleiden uit de gegevens van de skinproef.

Een zeer kortdurende putproef is de zgn. slingerproef. Een groot nadeel hierbij is echter dat voor een bepaling van de doorlatendheid zowel de S -waarde als de skinfactor F bekend moeten zijn. Waarschijnlijk is de slingerproef een waardevolle proef om bij een gegeven put (kD en F reeds eerder bepaald) een verandering in de eigen weerstand van de put te kunnen aantonen (bijvoorbeeld bij verstopping). Toepassing van de 'slingerproef is uiteraard beperkt tot die putten waar het oscil-



latieverschijnsel ook werkelijk optreedt (onderdamping). Bij het uitwerken van zowel de skinproef als de slingerproef speelt de S -waarde steeds een sleutelrol. Pogingen om door een combinatie van de skinproef en de slingerproef de S -waarde te elimineren leveren niets op omdat S en F steeds samen in de vorm $S e^{-2F}$ voorkomen. Eliminatie van S geeft dus gelijktijdig een eliminatie van F .

Misschien kan het waterstandsverloop in een put met overdamping (geen oscillatie maar wel eigenweerstand en berging in de stijgbuis) het verband tussen S en F op een andere manier vastleggen. In dit verband zou bij een voortzetting van het k -waarden onderzoek op een nieuwe proeflokatie (de kans bestaat dat het huidige proefterrein in de toekomst niet meer beschikbaar zal zijn) overwogen kunnen worden om naast een put met een nauwe stijgbuis een pompput met een zeer wijde stijgbuis aan te leggen, zodat het geval van overdamping en onderdamping naast elkaar kunnen worden bestudeerd.

Inzicht in de variatie van de doorlatendheid met de diepte kan met putproeven niet worden verkregen. Hiertoe zal men moeten overgaan tot het houden van puntproeven. Hierbij kan men geen gebruik maken van bestaande pompputten (tenzij deze zeer onvolkomen zijn), omdat bij puntproeven een zeer klein pompfilter moet worden toegepast. Verreweg het minst gekompliceerd is de debietproef. Hierbij ontstaat een stationaire toestand waarbij de berging in de put en het pakket en de traagheidskracht op het water in de put niet meer van invloed zijn. De eigenweerstand van het filter en de grootte van de vormfaktor zijn hier echter de onbekende factoren die niet uit de meetgegevens kunnen worden geëlimineerd. Dit geldt eveneens voor de stijgproef. Gebleken is bovendien dat bij de hier toegepaste filterkonstruktie in de loop der tijd een toename van de filterweerstand (verstopping) van ca. 50 % optreedt.

Nader onderzoek met betrekking tot de puntproeven zou gericht moeten zijn op de bepaling van de vormfaktor A als functie van lengte en diameter van het filter, en op het zoeken naar een filterkonstruktie die minder aan verstopping onderhevig zal zijn. Daarbij zou men bijvoorbeeld kunnen denken aan een filter met een daarop aangebrachte kunststofomstorting. Van een dergelijk filter zou de eigenweerstand door proeven op laboratoriumschaal kunnen worden bepaald en na een bepaald aantal proeven kunnen worden gecontroleerd.

Nader onderzoek zou ook gericht kunnen zijn op de minipompproefmethode zoals deze oorspronkelijk was opgezet, d.w.z. het pompfilter en de waarnemingsfilters in één boorgat. Een opstelling van de minipompproef zoals deze in dit onderzoek in tweede instantie is toegepast is waarschijnlijk minder geschikt voor een toepassing



op grote schaal door de hogere kosten (minimaal 2 boorgaten) en de niet algemene toepasbaarheid. Hier staat echter tegenover dat bij deze opstelling zowel de horizontale als de verticale doorlatendheid kan worden bepaald. Bovendien is er geen invloed ten gevolge van de eigenweerstand van het filter en onzekerheden betreffende de vormfaktor. De minipompproef zal echter als referentiemethode bij het nader uittesten van stijg- en debietproeven onmisbaar zijn.

7.

literatuur

1. Kruseman, G.P. en De Ridder, N.A. - "Analysis and evaluation of pumping test data", International institute for land reclamation and improvement, Bull. 11, Wageningen, 1970.
2. Kruijtzer, G.F.J. - "Stijghoogteverliezen in en rond putfilters" H_2O (4) 1971 nr. 8, pp. 162 - 172.
3. Van Everdingen, A.F. - "The skineffect and its influence on the productive capacity of a well", Transactions AIME, vol. 198, 1953, pp. 171-176.
4. Hurst, W. - "Establishment of the skin-effect and its impediment to fluid flow into a well bore", The Petroleum Engineer, Oct., 1953, pp. B6 - B16.
5. Papadopoulos, I.S. and Cooper, H.H. - "Drawdown in a well of large diameter", Water Resources Research 3 (1), 1967, pp. 241 - 244.
6. Jaeger, J.C. - "Conduction of heat in an infinite region bounded internally by a circular cylinder of a perfect conductor", Australian Journal of Physics (1956), Vol. 9, no. 2, 167 - 179.
7. Bredehoeft, J.D., Cooper, H.H. and Papadopoulos, I.S. - "Inertial and storage effects in well-aquifer systems: an analog investigation", Water Resources Research, 2 (4), 1966, pp. 697-707.
8. Cooper, H.H. Bredehoeft, I.D., Papadopoulos, I.S. and Bennett, R.R. - "The response of well-aquifer systems to seismic waves", Journal of Geophysical Research, 70, 3915-3926, 1965.
9. Arps, J.J. - "How well completion damage can be determined graphically", World Oil, april 1955, pp. 225-232.



10. Hantush, M.S. - "Hydraulics of wells", in V.T.- Chow ^{L C}
(editor). Advances in Hydrosience Vol. I:
281-432. Academic Press, New York, 1964.
11. Den Hartog, J.P. - "Mechanical vibrations", McGraw-Hill, New
York, 1956.
12. Van der Kamp, G. - "Determining aquifer transmissivity by means of
well-response tests: the underdamped case",
Water Resources Research 12 (1), 1976,
pp. 71-77.
13. Krauss, I. - "Die bestimmung der Transmissivität von
Grundwasserleitern aus dem Einschwingver-
halten des Brunnen-Grundwasserleiter-
Systems". Zeitschrift für Geophysik 40,
1974, pp. 381-400.
14. Uffink, G.J.M. - "Putproeven: de slingerproef en het skin-
effect", interne RID-nota, 1978.
15. Uffink, G.J.M. - "Puntproeven: de invloed van het skinef-
fect, elastische berging en traagheids-
krachten", interne RID-nota,
16. Bruggeman, G.A. - "Bolvormige filters in oneindige pakketten".
interne RID-nota, 1974.
17. Van den Akker, C. - "De schatting van kD-waarden van een water-
voerend pakket aan de hand van granulaire
samenstelling en dikte van het pakket, toe-
gepast op boringen in de Gelderse Vallei",
RID-rapport, 1972.
18. -- - "Steady flow of groundwater towards wells",
verslagen en mededelingen no. 10. Comm.
Hydrologisch onderzoek TNO, Den Haag, 1964.



reeds eerder verschenen mededelingen

1974

- Verwerking van kwikhoudend afval** no. 74 - 1
door drs. E. de Greef
- Bepaling van zware metalen in water** no. 74 - 2
door drs. B.I. Haring
- Threshold odour concentrations in water of chemical substances** no. 74 - 3
door ir. B.C.J. Zoeteman
- De chemische samenstelling van het grondwater van de Veluwe** no. 74 - 4
door ir. C.R. Meinardi
- Enige gegevens over bestemmingen en bijbehorende kwaliteitseisen zoet oppervlakte** no. 74 - 5
door ir. B.C.J. Zoeteman
- The origin of brackish groundwater in the lower parts of the Netherlands** no. 74 - 6
door ir. C.R. Meinardi
- Verlagingen van het freatisch vlak bij grondwateronttrekking in een gebied met vrije afwatering** no. 74 - 7
door drs. J. Blom
- De geohydrochemie van het jongpleistoceen in Salland in relatie tot topografie en geohydrologie** no. 74 - 8
door ir. W. v. Duijvenbooden
- Het bepalen van het gehalte aan chlorofyl in phytoplankton en de waarde van het chlorofyl als maat voor het voorkomen van phytoplankton** no. 74 - 9
door drs. H.J. Kool
- Concentration techniques for ultratrace analysis with high-resolution gas chromatography to be used in waterpollution analysis** no. 74 - 10
door ir. B.C.J. Zoeteman en G.J. Piet

1975

- Brackish groundwater bodies as a result of geological history and hydrological conditions** no. 75 - 1
door ir. C.R. Meinardi
- Water quality management aspects of the Veluwe artificial recharge plan** no. 75 - 2
door ir. B.C.J. Zoeteman - ir. J. Hrubec - drs. F.J.J. Brinkmann
- Toelichting bij het rekenprogramma FLOP - 1** no. 75 - 3
door ir. C. v.d. Akker
- Analytical analysis of moving fronts in two- and three-dimensional groundwater flow in anisotropic aquifers** no. 75 - 4
door ir. G.A. Bruggeman
- Frontverplaatsingen in twee-dimensionale grondwaterstromingen; een toelichting bij het rekenprogramma front - 1** no. 75 - 5
door ir. C. v.d. Akker
- Polynuclear aromatic hydrocarbons in the water environment of the Netherlands; a presentation of measurements in 1973 and 1974** no. 75 - 6
door G.J. Piet - ir. B.C.J. Zoeteman - ir. R. Klomp



Toelichting bij het rekenprogramma FLOP - 2
door ir. C. v.d. Akker

no. 75 - 7

Onderzoek merkstoffen deel I
door ir. W. v. Duijvenbouden

no. 75 - 8

1976

Characteristic example of the natural groundwater composition in the Netherlands
door ir. C.R. Meinardi

no. 76 - 1

De bepaling van lood en cadmium in oppervlaktewater door atomaire absorptie m.b.v. de grafietoventechniek
door P. Lagas

no. 76 - 3

Het isoleren van "entero"-virussen uit diverse typen water met behulp van verschillende concentratie technieken
door drs. H.J. Kool - M. v. Gent - H.J. v. Kranen.

no. 76 - 4

1977

Vorming van organische halogeenvverbindingen tijdens de chloring van drinkwater
door drs. P.H.A.M. Melis

no. 77 - 1

Proefonderzoek naar de dagelijkse inname aan enkele metalen via drinkwater door de bevolking van Hoensbroek en Brunssum
door drs. B.J.A. Haring, W. van Delft, J.D.F. Habbema

no. 77 - 2

Lagere chloorkoolwaterstoffen in het watermilieu
door ir. J. Hrubec

no. 77 - 3

De betekenis van het symposium "identification and system parameter estimation" voor het ontwikkelen van waterkwaliteitsmodellen
door ir. J.B.H.J. Linders

no. 77 - 4

Methods for the sensory evaluation
door drs. F.E. de Grunt, ir. B.C.J. Zoeteman, G.J. Piet, M.P.H. van der Heuvel

no. 77 - 5

De berekening van de temperatuursverhoging in het grondwater ten gevolge van een koelwaterinjectie
door ir. M.C. Brandes en ir. G.J.M. Uffink

De hydraulische weerstand van de Formatie van Sterksel/Kedichem in West-Utrecht
door ir. G.J. Heij en ing. C.G.M. Kester

no. 77 - 7

1978

Samenvatting van de resultaten van de proeven met de infiltratie van voorgezuiverd Rijnwater in Veluwezand
door ir. J. Hrubec

no. 78 - 1

Samenstelling en stroming van zoet grondwater in een West-Nederlands poldergebied het Eiland van Dordrecht
door ir. C.R. Meinardi en ir. G.J. Heij

no. 78 - 2

Vergelijkende onderzoeken betreffende het isoleren van coliformen en faecale colibacteriën in diverse typen water
door drs. H.J. Kool, ir. J.G. de Graan en E. van Welie

no. 78 - 3

Geohydrologische gegevens van Zuidelijk Flevoland en de Gelderse Vallei
door ir. C.R. Meinardi m.m.v. ir. C. van den Akker, ing. C.J. Dekker, ir. G.J. Heij en ir. J.W. Kieft

no. 78 - 4



De tijdsafhankelijkheid van de verlagingen als gevolg van grondwaterwinning nabij Glindhorst (Gelderse Vallei)

door ir. H.A.J. van Lanen, ir. G.J. Hey.

no. 78 - 5

Introduction of chemical compounds into drinking water during distribution

door ir. B.C.J. Zoeteman, drs. B.J.A. Haring.

no. 78 - 6

Doelstelling voor eutrofiërings bestrijding in Nederland

Een discussienota m.b.t. gewenst onderzoek

door dr. ir. B.C.J. Zoeteman, drs. F.I. Kappers, drs. J.C. v.d. Vlugt en ir. L. Postma.

no. 78 - 7

1979

Oriënterend onderzoek naar organische microverontreinigingen in het grondwater bij de vuilstortplaats te Noordwijk

door drs. C.F.H. Morra, ir. W. van Duijvenbouden, P. Slingerland, G.J. Piet

no. 79 - 1

