

Bepaling van de verticale doorlatendheids-koefficient door middel van een pompproof op een onvolkomen pompput

1. Inleiding en theoretische achtergronden
 Indien het filter van een pompput ten behoeve van grondwateronttrekking over de volle beschikbare hoogte van een watervoerend pakket wordt aangebracht dan spreekt men van een volkomen pompput. Is er sprake van het tegendeel, dus indien het filter slechts over een gedeelte van de beschikbare hoogte van het pakket wordt aangebracht, dan spreekt men van een onvolkomen pompput. Vooral wanneer het te exploiteren watervoerend pakket een aanzienlijke hoogte



IR. N. A. AMESZ

Geo-hydroloog. Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO BV, Rotterdam

heeft is het veelal gerechtvaardigd of soms gewenst, gebruik te maken van onvolkomen putten. Doordat de afpompings in de directe omgeving van een onvolkomen put groter is dan bij een volkomen put (bij dezelfde onttrekking) is het juist voor bemalingen van bouwputten vaak beter met onvolkomen pompputten te werken mits het filter boven in het pakket wordt aangebracht. Het waterbezuur kan gemineraliseerd worden, hetgeen ten goede komt aan het beheer van grondwaterreserves en tevens voordelen biedt ingeval er sprake is van brak of zout grondwater.

Door het minimaliseren van de onttrekking worden ook de eventuele schadelijke gevolgen van de grondwaterstandsval op grotere afstand tot een minimum beperkt. Maar ook voor blijvende grondwaterwinningen (drinkwater- en industriewatervoorzieningen) is het onder bepaalde omstandigheden verantwoord gebruik te maken van onvolkomen putten. Veelal bestaat er een economisch optimum bij het afwegen van de kontant gemaakte extra energiekosten in verband met de grotere afpompings bij een onvolkomen put én de extra investeringen die nodig zijn voor het dieper installeren van de put. Vooral bij het installeren van pompputten onder moeilijke omstandigheden in een dik watervoerend pakket kan een dergelijk optimum aanwezig zijn. Verder geldt het reeds eerder gestelde inzake het aanwezig zijn van verschillende grondwaterkwaliteiten in de watervoerende laag in bijzonder sterke mate voor de drinkwatervoorziening. Omtrent de problematiek rond het opkegelen van horizontale scheidingvlakken wordt verwezen naar de recente publikatie van Ir. G. A. Bruggeman.

Indien onttrekking plaats vindt door middel van een onvolkomen pompput treedt er in de omgeving van de put in het watervoerend pakket behalve de radiaal-symmetrische horizontale stroming tevens een verticale stroming op.

Om de bovengenoemde effecten te kunnen berekenen is het noodzakelijk om naast de gebruikelijke geohydrologische parameters ook over de verticale doorlatendheidskoefficient te beschikken, die in vele gevallen verschilt van de horizontale. In de navolgende hoofdstukken wordt een methode behandeld om de horizontale én verticale doorlatendheidskoefficient plus de lekfactor van een watervoerend pakket te bepalen met behulp van een pompproof op een onvolkomen put. Voor het interpreteren van een dergelijke pompproof zijn methoden bekend [4], doch dan betreft het steeds een homogeen isotroop watervoerend pakket (dus de verticale doorlatendheidskoefficient is gelijk aan de horizontale of $k_h = k_z$). In dit artikel zal het meer algemene geval van $k_h \neq k_z$ (homogeen anisotroop) worden behandeld. De methode wordt toegelicht aan de hand van een uitgevoerde pompproof.

De algemene vergelijking voor de axiaal-symmetrische potentiaal-verdeling ten gevolge van een onttrekking door een onvolkomen put in een homogeen anisotroop semi-spanningswatervoerend pakket luidt [1]:

$$\Phi(r,z) = \frac{Q_w}{2\pi k H} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{\lambda} \right) + \frac{2H}{\pi L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\sin \frac{n\pi b}{H} - \sin \frac{n\pi a}{H} \right) \cdot \cos \frac{n\pi z}{H} \cdot K_0 \left(\frac{n\pi r}{H} \cdot \sqrt{\frac{k_z}{k}} \right) \right\} \quad (1)$$

waarin:

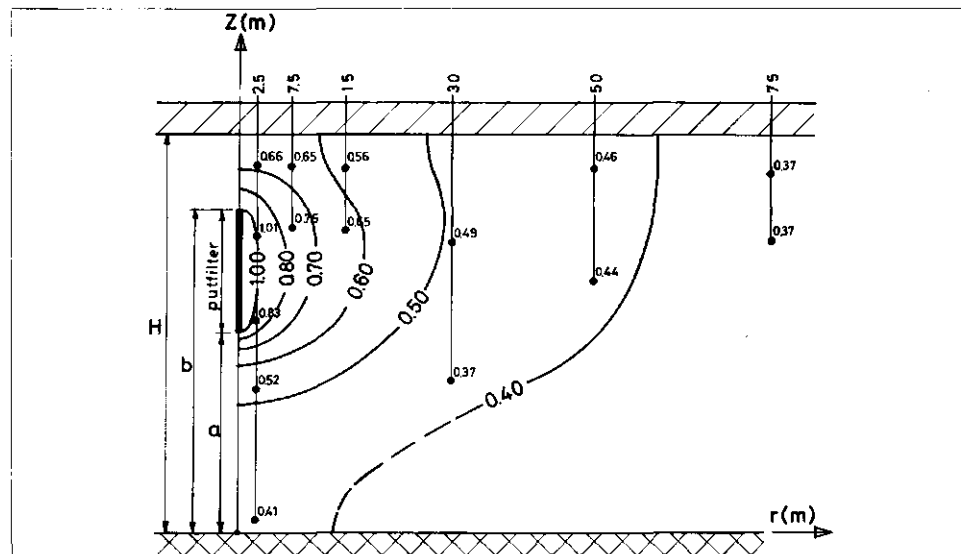
- $\Phi(r, z)$ = potentiaal-verlaging in [m] op afstand r [m] van de pompput op hoogte z [m] ten opzichte van onderkant watervoerend pakket.
- Q_w = onttrekking [m^3/etm]
- λ = lekfactor [m]
- a, b, L = parameters die lengte en plaats van het pompputfilter aangeven [m] (zie afb. 1)
- H = hoogte van het watervoerend pakket [m]
- k, k_h = horizontale doorlatendheidskoefficient [m/etm]
- k_z = verticale doorlatendheidskoefficient [m/etm]
- K_0 = Besselfunctie

Met behulp van de tijdens de pompproof bepaalde eindverlagingen $\Phi(r, z)$ moeten nu de geohydrologische parameters k, k_z en λ worden bepaald.

2. Geologie en pompproof opstelling

Het onderzochte watervoerende pakket bestaat voornamelijk uit grof tot uiterst grof zand met veel fijn grind en is afgedekt door een slecht doorlatende laag van 2 tot 6 meter dikte. Aan de onderzijde (op N.A.P. - 59 m) wordt het pakket begrensd door een 15 meter dikke kleilaag. De dikte van het watervoerend pakket bedraagt 56 meter en het pompputfilter (lengte $L = 17,2$ m) was gesitueerd tussen N.A.P. -13,20 en -30,40 m (dus $a = 28,6$ m en $b = 45,8$ m). Gedurende een periode van 4 dagen werd gemiddeld een debiet van $104 m^3/uur$ ($2496 m^3/etm$) aan de pompput onttrokken. De gemeten eindafpompings zijn gegeven

Afb. 1 - Gemeten eindafpompings bij een onttrekking van $104 m^3/uur$.



in de volgende tabel en zijn tevens in afb. 1 in het verticale vlak r, z aangegeven.

peilbuis no.	r (m)	z (m)	Φ (m)
1	7,50	43	0,76
2	2,50	42,3	1,01
3	2,50	30	0,83
4	2,50	20,2	0,52
5	15	42,2	0,65
6	15	52	0,56
7	30	41	0,49
8	2,50	52	0,66
9	7,50	52	0,65
10	2,50	2	0,41

3. Interpretatie van de pompproef

In principe kan het probleem omschreven worden als het oplossen van 10 vergelijkingen met 3 onbekenden. Aangezien de theoretische uitgangspunten (homogeen anisotroop) in de praktijk niet geldig zijn, bestaat er geen combinatie van λ, k en k_z waarbij de spreiding in de uitkomsten het geringst is.

Gezocht dient te worden naar een combinatie van λ, k en k_z, waarbij de spreiding in de uitkomsten het geringst is. Deze combinatie kan dan representatief gesteld worden voor de geohydrologische gesteldheid van het gebied.

Een moeilijkheid is dat de drie onbekenden in formule (1) allen in een reeksontwikkeling voorkomen en in eerste instantie niet expliciet gemaakt kunnen worden. Echter door gebruik te maken van de eigenschap dat voor r << λ geldt:

$$K_o(r/\lambda) \approx \ln\left(\frac{1,123 \lambda}{r}\right) \tag{2}$$

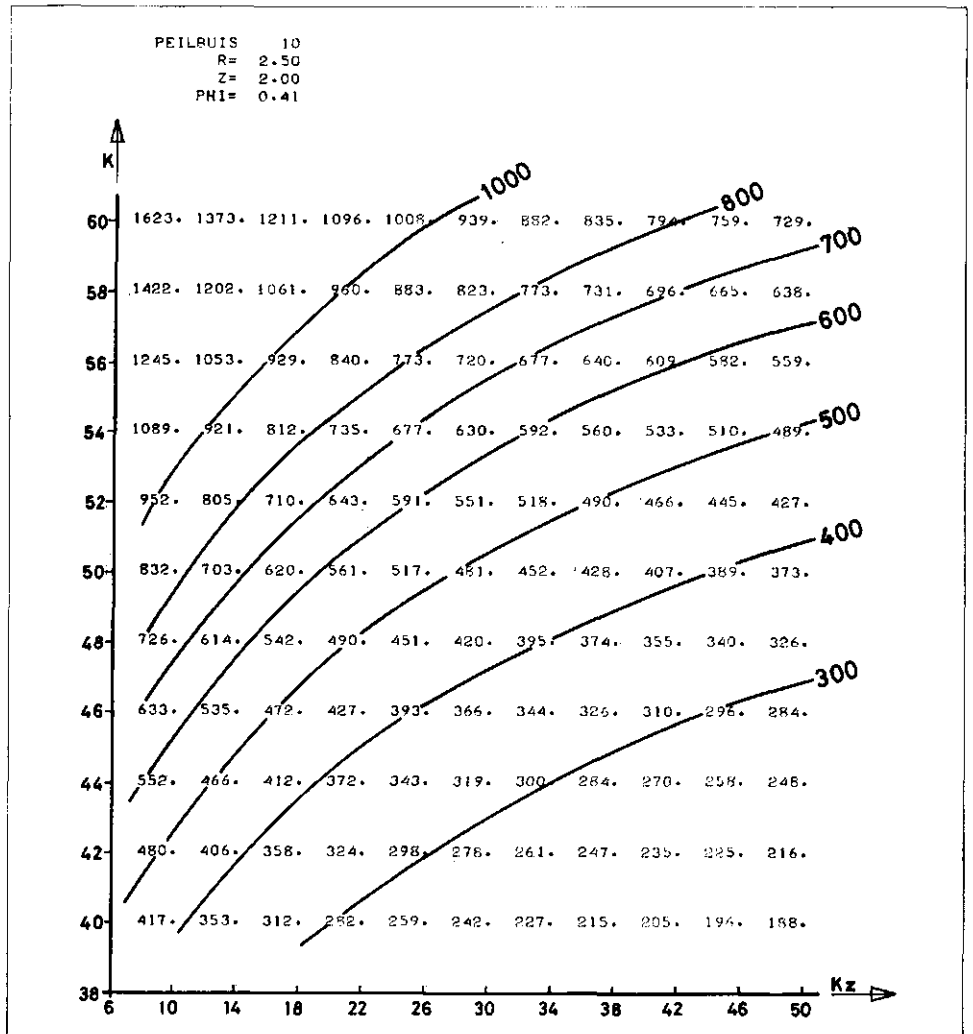
is de formule (1) na enig omwerken te schrijven als:

$$\lambda = \frac{r}{1,123} \exp \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H \cdot \Phi(r, z)}{Q_w} + \frac{2H}{\pi L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\sin \frac{n\pi b}{H} - \sin \frac{n\pi a}{H} \right) \cdot \cos \frac{n\pi z}{H} \cdot K_o \left(\frac{n\pi r}{H} \cdot \sqrt{\frac{k_z}{k}} \right) \right] \tag{3}$$

Aangezien vergelijking (2) met inachtnaeme van 1 % nauwkeurigheid nog opgaat voor r/λ = 0,15 en het effect van partieel penetreren juist voor betrekkelijk kleine r

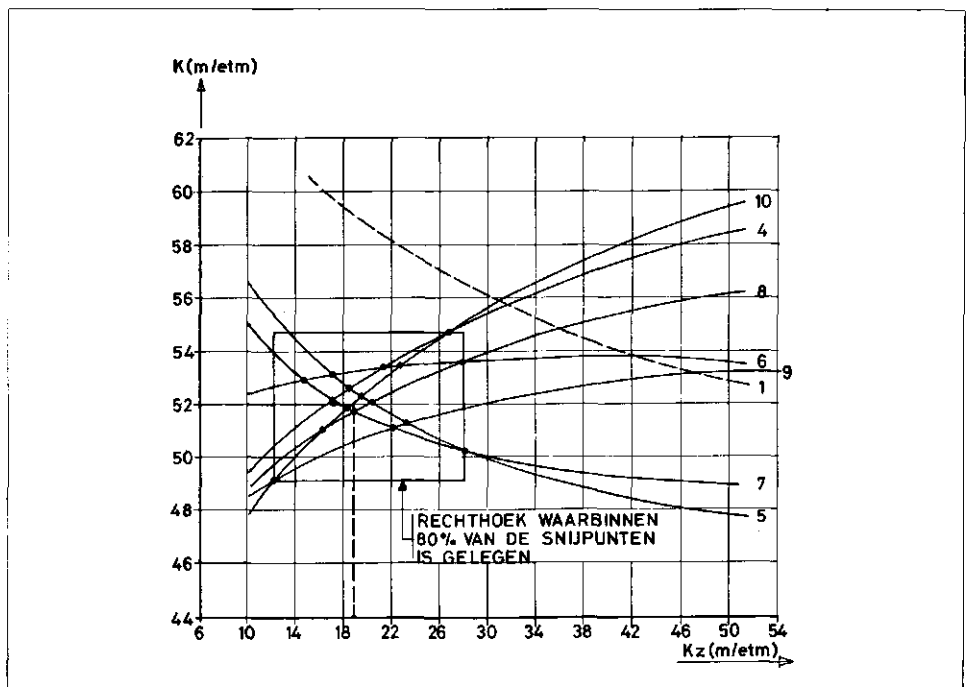
$$(r < 1,5 H \sqrt{\frac{k_z}{k}}) \tag{2} \text{ van belang is, zal de}$$

omwerking in de meeste gevallen wel toe-
pasbaar zijn.



Afb. 2 - λ-waarden voor peilbuis 10: r = 2,50 m, z = 2,00 m, Φ = 0,41 m.

Afb. 3 - Spreiding in uitkomsten bij λ = 700 m.



In formule (3) is de grootheid λ nu expliciet gegeven als functie van een aantal parameters:

voor de pompput: a, b, L, H en Q_w

voor de peilbuizen: r, z en Φ

bodemkonstanten: k_z en k

De interpretatie loopt nu verder als volgt:

1. Voor iedere peilbuis (r, z en Φ) zijn met behulp van (3) de waarden van λ berekend voor een netwerk van punten, dat bepaald wordt door de k en k_z te laten variëren binnen gekozen grenzen en gekozen stapgrootte.

Door de berekende waarden worden dan lijnen van 'gelijke λ ' ingetekend, waardoor

dan voor iedere peilbuis een bundel λ -krommen ontstaat.

Ter illustratie is dit in afb. 2 gedaan voor peilbuis 10.

2. Op transparant papier worden in één grafiek voor alle peilbuizen de kromme voor één bepaalde λ overgetrokken. Dit is gebeurd voor een aantal λ -waarden. In afb. 3 en afb. 4 is dit gedaan voor resp. $\lambda = 700$ m en $\lambda = 1000$ m.

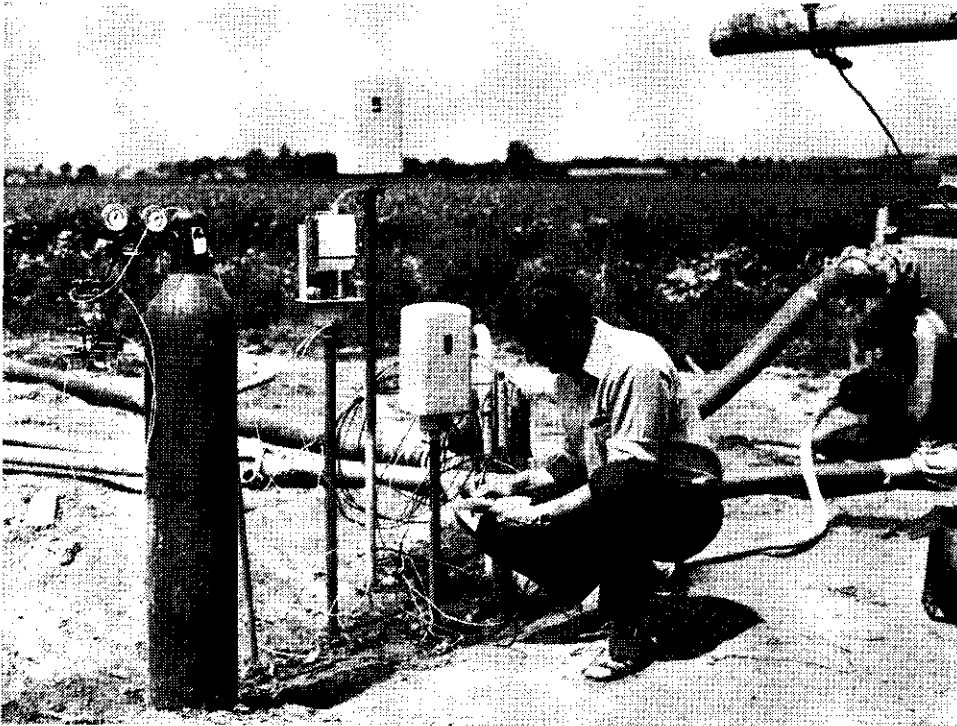
3. In het theoretische geval van een homogeen anisotroop pakket zullen voor één bepaalde λ -waarde alle ingetrokken krommen elkaar snijden in één punt (k, k_z). In de praktijk echter zal bij toepassing van 3 peilbuizen of meer een spreiding ontstaan in de snijpunten. De waarde van λ , waarbij de spreiding in deze snijpunten het geringst is, mag dan representatief gesteld worden voor het watervoerend pakket ter plaatse. Deze oplossing kan worden bepaald via de methode der kleine kwadraten.

4. Eventueel kan bovengenoemde procedure worden herhaald voor tussengelegen λ -waarden en voor een verfijnd netwerk van k en k_z (in afb. 3 en afb. 4 is dit reeds het geval).

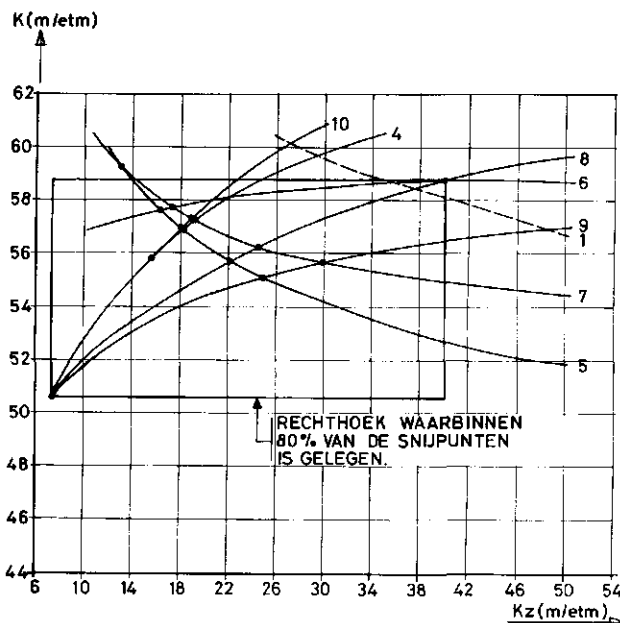
5. k en k_z worden bepaald door het zwaartepunt der snijpunten.

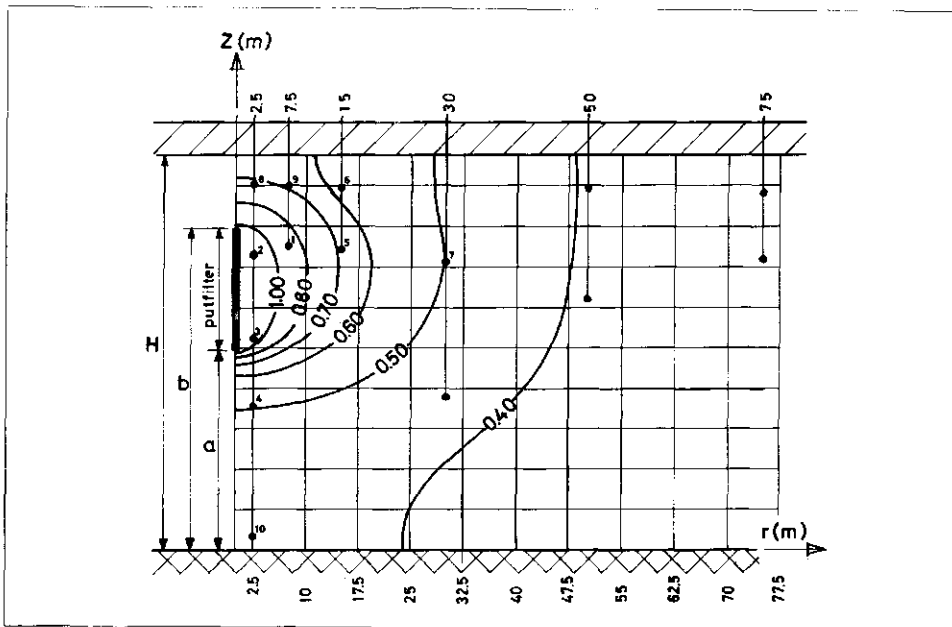
Een belangrijk gegeven voor de pompproof interpretatie is het pompdebiet. Met regelmatige tussenpozen wordt het debiet bepaald door middel van de watermeter en een stopwatch.

Tijdens de pompproof worden de verlagingen gemeten met kontinu registrerende pneumatische niveauschrijvers.



Afb. 4 - Spreiding in de uitkomsten bij $\lambda = 1000$ m.





Afb. 5 - Berekende eindverlagingen voor: $\lambda = 700$ m, $k = 52$ m/etm ($kH = 2912$ m²/etm), $k_z = 19$ m/etm.

4. Resultaten

De geohydrologische parameters van het watervoerend pakket zijn op bovenomschreven wijze bepaald als (zie afb. 3):

$$\begin{aligned} \lambda &= 700 \text{ m} \\ k &= 52 \text{ m/etm, dus } kH = 2912 \text{ m}^2/\text{etm} \\ k_z &= 19 \text{ m/etm} \end{aligned}$$

De peilbuizen 2 en 3 geven afwijkende resultaten.

In de afleiding van deze en soortgelijke formules wordt er steeds vanuitgegaan dat het *debiet* gelijkmatig over het filter is verdeeld. Als randvoorwaarde is namelijk gesteld:

$r \rightarrow 0$ dan:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(-2\pi kr \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) = \frac{Q_w}{L} \text{ voor } a < z < b.$$

In de praktijk echter zal eerder de *potentiaal* over het filter konstant zijn.

Deze foutieve aanname is vooral belangrijk voor de peilfilters in de directe omgeving van de pompput.

Hoewel de gemeten afstand tussen pompput en de dichtbijzijnde peilput op maatveldhoogte 2,50 m bedroeg, kan het zijn dat de beide boorgaten niet geheel vertikaal zijn en op filterhoogte de afstand niet precies 2,50 m was.

Juist in de directe omgeving van de pompput, waar de gradiënt tengevolge van de radiale stroomlijnkcontractie groot is, kan dit eveneens afwijkingen ten gevolge hebben. In afb. 5 is ter controle met de berekende waarden van k , k_z en λ met behulp van de formule (1) het afpompspatroon in het (r, z) -vlak berekend. De overeenstemming

tussen gemeten en berekend afpompspatroon is redelijk te noemen.

5. Naschrift

Bij het vergelijken van de gemeten afpompingen en de berekende afpompingen moeten enkele onvolkomenheden in het rekenmodel en de pompproefopstelling in acht worden genomen.

In de eerste plaats moet formule (1) gezien worden als een correctie op de formule van De Glee. Het is zeer twijfelachtig of zelfs bij een volkomen put de formule van De Glee van toepassing is, aangezien deze formule ervan uit gaat dat de lek door de semi-doorlatende laag zonder stromingsverliezen over de volle hoogte van het watervoerend pakket wordt verspreid. Vooral bij dikke watervoerende lagen met relatief lage λ -waarde en een hoge anisotropie-

faktor ($a = \sqrt{\frac{k_z}{k_h}}$) is het zeer waarschijnlijk

dat zelfs ingeval van een volkomen put er toch sprake is van een potentiaalgradiënt in verticale zin.

Bij vergelijking van de potentiaalverdelingen in afb. 1 en afb. 5 moet er rekening mee worden gehouden dat op het berekende patroon de hiervoor besproken afwijking moet worden gesuperponeerd.

Met betrekking tot de stroming in een watervoerende laag afgedekt door een laag met een zeer geringe weerstand wordt door het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening een berekeningsmethode uitgewerkt.

In de tweede plaats moet er rekening mee worden gehouden dat het verschil in berekende verticale en horizontale doorlatendheid niet wordt veroorzaakt door een homogeen anisotroop karakter van de laag maar door de aanwezigheid van minuscule slijblaagjes die weinig homogeen verdeeld zullen zijn.

Ten derde is de functie van een peilbuis als middel om de stijghoogte op een diepte z te bepalen enigszins twijfelachtig. Meestal wordt een boorgat enkele meters boven en enkele meters onder een peilfilter afgedicht, zodat de geregistreeerde stijghoogte vaak een gemiddelde is over een traject van minstens 5 meter, hetgeen vooral bij sterke verticale gradiënten (in de omgeving van de pompput) merkbaar zal zijn. Verder is er weinig bekend over de blijvende functie van de mudcake op de boorgatwand en over de afsluitende werking van de kleipropen.

Literatuur

1. *Steady flow of groundwater towards wells.* (Committee for Hydrological Research TNO, Proc. and Inf. 10, 1964).
2. Bruggeman, G. A. *Mathematical analysis of steady- and non steady two- and three-dimensional flow in anisotropic aquifers* (RID, 1973).
3. Bruggeman, G. A. *Analytical analysis of moving fronts in two- and three-dimensional groundwater flow in anisotropic aquifers* (RID, 75-4).
4. Kruseman, G. P. en Ridder, N. A. *Analysis and evaluation of pumping test data.* (Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 1970).

