

Het skineffect*

Een van de belangrijkste taken van een boorspoeling is om voldoende tegendruk op de boorgatwand uit te oefenen, ten einde het boorgat tegen instorten te behoeden. Beschouwen wij een deel van de boorgatwand, dan doet zich het volgende verschijnsel voor. Vanwege de grotere vloeistofdruk in de boorspoeling dan in de formatie dringt de boorspoeling in de doorboorde laag en verdringt het formatiewater. Wordt de druk in het boorgat kunstmatig op peil gehouden, door bijvoorbeeld een constant niveau in de spoelvijver te handhaven, dan

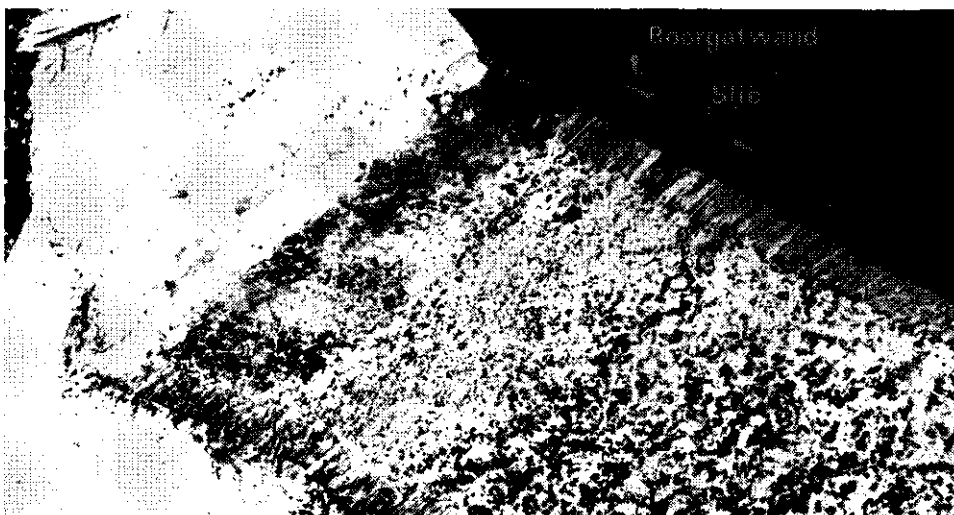


IR. C. DEELDER
Dienst Grondwaterverkenning
TNO

kunt u zich voorstellen, dat zo lang geen verstoppingen optreden dit verdringingsproces blijft bestaan, waardoor uiteindelijk grote hoeveelheden spoeling de formatie binnendringen en deze verontreinigen. Wanneer zich dit voordoet schiet de boorspoeling in zijn taak te kort en heeft u te maken met een slechte spoeling ofwel met water (zie afbeelding 1). Naast het feit, dat de formatie wordt verontreinigd, wat op zich bijzonder bezwaarlijk kan, en meestal zal zijn, levert een dergelijke spoeling ook uit boortechnisch oogpunt bezwaren op. Want ook al wordt de druk in het boorgat kunstmatig op een *hoger* peil gehouden dan de vloeistofdruk in de poriën van de formatie dan blijft nog het gevaar van instorten van het boorgat aanwezig, omdat

*) Voordracht gehouden tijdens het KIWA-colloquium 'Putten voor winning en aanvulling van grondwater' op 31 augustus '77 te Bunnik.

Afb. 1 - Horizontaal steekmonster uit een boorgat dat zonder speciale spoelingsstoeslagen werd geboord. Het monster is sterk verontreinigd met slib (foto Grondboorbedrijf H. Haitjema & Zn. B.V.).



het ter voorkoming van instorten gaat om een tegendruk tegen de formatiekorrels. En zo lang de boorspoeling vrijuit in de formatie kan doordringen zal van tegendruk op de korrels weinig sprake zijn.

Wat is nu het gevolg van dit indringen van de boorspoeling in de formatie? Het fysisch-chemisch evenwicht tussen de formatie en het formatiewater wordt verstoord. De maagdelijke en onbesmette formatie wordt verontreinigd met werkwater vanaf de oppervlakte, dat een geheel andere chemische samenstelling heeft en dat bovendien rijk is aan bacteriën.

Nieuwe chemische evenwichten zullen zich trachten in te stellen en ook fysisch-chemische evenwichten zoals adsorptie aan kleimineralen. Hiernaast treden gedurende het indringen van de boorvloeistof ook verschijnselen op van meer mechanische aard. Silt, slib en kleideeltjes welke zich in de spoeling bevinden worden meegesleurd tussen de zandkorrels door van de formatie en zullen afhankelijk van hun grootte ver of minder ver kunnen doordringen. Dit allemaal leidt ertoe, dat de doorlatendheid van de formatie rondom het boorgat wordt verlaagd. En het is deze verlaging in de doorlatendheid welke wordt aangeduid met het skineffect en waarover ik het de rest van mijn lezing zal hebben. Met het begrip skineffect wordt dus het verschijnsel bedoeld, dat de doorlatendheid van de betreffende laag rondom het boorgat als gevolg van het boorproces geringer is dan in het niet verontreinigde deel van de laag. Afbeelding 2 illustreert het optreden van dit effect.

Voorbeeld

Stel dat u een schone pompput heeft met een filterdiameter van 40 cm. Bij een bepaald debiet meet u dan een bepaalde afpomping. Was de doorlatendheid als gevolg van het

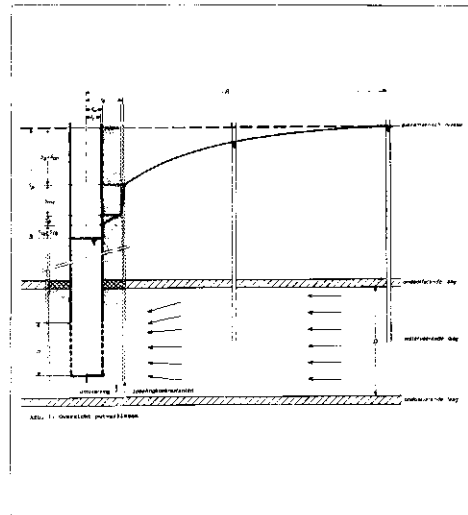
binnendringen van de spoeling over een afstand van 10 cm met een factor 10 verlaagd (en een factor 10 met betrekking tot de doorlatendheid is maar gering) dan blijkt dat de benodigde totale afpomping voor de onttrekking van hetzelfde debiet reeds 33 % hoger ligt. Bij een verlaging in de doorlatendheid met een factor 100 blijkt een circa vijfmaal grotere totale afpomping nodig te zijn. Een en ander is het gevolg van het feit, dat de afpomping rondom een pompput niet afhankelijk is van de afstand, maar van de logaritme van de afstand. Hierdoor komen veranderingen in de doorlatendheid dicht bij de pompput relatief harder aan.

Welke factoren beïnvloeden de grootte van de skinfactor?

Het spreekt vanzelf, dat hoe meer silt, slib, klei en fijn zand de formatie binnendringt, hoe meer de doorlatendheid daardoor wordt verlaagd. Het zal duidelijk zijn, dat de grofheid van de formatie zelf een belangrijke rol speelt; maar de structuur van de laag is een vast gegeven waar wij niets aan kunnen veranderen.

Een tweede factor welke van invloed is, is de grootte van de overdruk in het boorgat. Alhoewel een zekere overdruk nodig is, ten eerste om toestroming van formatiewater naar het boorgat te vermijden, omdat dit gepaard zal gaan met de instorting van het boorgat en ten tweede om druk op de formatiekorrels uit te oefenen om de boorgatwand enige stevigheid te geven, dient deze druk niet overmatig te worden opgevoerd. Slechts in die gevallen waar doorlagen met spanningswater moet worden geboord is verdere verhoging noodzakelijk. Onnodig hoge drukken geven alleen maar onnodig grote spoelingsverliezen. Een derde factor welke de grootte van de skinfactor

Afb. 2 - Overzicht putverliezen.



bepaalt is de mate waarin de spoeling in staat is de boorgatwand af te pleisteren. Gedurende het indringen van de spoeling in de formatie zullen de hierin zwevende deeltjes de poriënkanaaltjes tussen de zandkorrels verstoppelen. Hebben we te maken met een slecht afpleisterende spoeling, dan zal veel spoeling en derhalve veel klei, slib en silt de formatie binnendringen. Hier is de mate van verontreiniging groot en bovendien ver in de formatie doorgedrongen. Bij een goed afpleisterende spoeling daarentegen dringt slechts weinig spoeling en derhalve weinig klei, slib en silt de formatie binnen. Dit komt omdat de kleideeltjes in een dergelijke spoeling in staat zijn reeds de poriën af te dichten, die vlakbij de boorgatwand liggen. Slechts een enkel deeltje zal in het begin wellicht een paar poriënkanaaltjes kunnen doordringen, doch de rest zal worden afgezeefd op de boorgatwand zelf. Dit heeft tot gevolg, dat een taai, dun huidje ontstaat, dat voornamelijk is opgebouwd uit kleideeltjes en dat een uiterst lage doorlatendheid bezit. Zolang indringing bestaat zullen kleideeltjes worden afgezeefd en zal het huidje, dat wordt aangeduid met de naam spoelingkoek, dikker worden. Het zal daarom duidelijk zijn, dat een goed afpleisterende spoeling zich kenmerkt door een zeer dunne spoelingkoek.

Met betrekking tot de skinfactor kan worden opgemerkt, dat na het schoonpompen van de put de belemmerende werking, die uitgaat van de restanten van de slechts enkele millimeters dunne spoelingkoek wellicht aanzienlijk geringer zal zijn dan die van een grote verontreinigde zone rondom het boorgat.

Een vierde factor die een rol speelt in de grootte van de skinfactor is de viscositeit van de spoeling. Het spreekt vanzelf dat door een hogere viscositeit het indringingsproces wordt vertraagd, waardoor minder verontreiniging plaatsvindt.

Het zal u opgevallen zijn, dat de rol van de spoeling met betrekking tot de skinfactor belangrijk is. Omdat eveneens in tal van andere zaken, met name op boortechnisch gebied, de spoeling centraal staat, is twee jaar geleden onder auspiciën van de KIWA-Werkgroep Onderzoek Boringen een onderzoek op het gebied van boorspoelingen uitgevoerd.

In de KIWA-mededeling nr. 46 zijn de diverse functies en eigenschappen van spoelingen ondergebracht en de mogelijkheden om de eigenschappen (alsmede het afpleisterend vermogen) te controleren en te corrigeren. Alhoewel het nu niet in mijn bedoeling ligt om op deze mededeling verder in te gaan, wil ik toch wijzen op het belang van de spoelingbehandeling met het oog op het afpleisterend vermogen en derhalve op het skineffect. In dit verband wil ik slechts

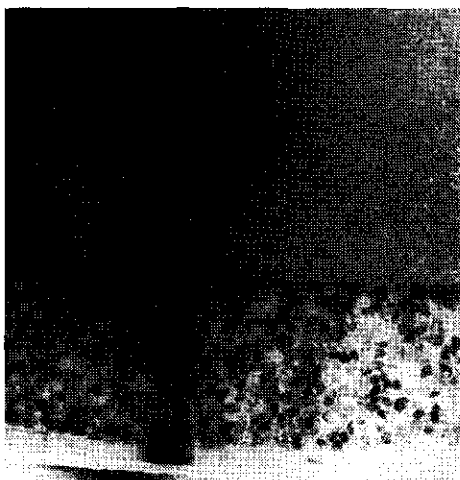


Afb. 3 - Een zandmonster met een daarop aangebrachte spoelingkoek. Als gevolg van het schoonpompen (4 m/uur) zijn op enkele plaatsen doorbraken in de spoelingkoek ontstaan.

volstaan met op te merken, dat spoelingen aangemaakt met bentonietklei, welke zich in een gepeptiseerde toestand bevinden het grootste afpleisterende vermogen vertonen.

Een tweede onderzoek, dat binnen de Werkgroep Onderzoek Boringen is uitgevoerd op het gebied van boorspoelingen, had tot doel om d.m.v. een modellenonderzoek de grootte vast te stellen van het skineffect. Daartoe werd een speciale proefopstelling gebouwd. Op verschillende zandmonsters werd een spoelingkoek aangebracht. Gedurende de verwijdering van de spoelingkoek, door middel van schoonpompen, werd indirect de grootte gemeten van het stijghoogteverlies (skin) uitgedrukt in cm water, dat door de spoelingkoekrestanten werd teweeg gebracht. Door bij steeds grotere stroomsnelheden schoon te pompen kon daardoor een beeld worden verkregen van de afbraak van de spoelingkoek (zie afbeelding 3 en 4). Alhoewel de proeven slechts een oriënterend karakter hadden bleken bijna alle resultaten in dezelfde richting te wijzen: bij het schoonpompen breekt de

Afb. 4 - Hetzelfde zandmonster als in afb. 3, nadat bij een filtersnelheid van 26 m/uur was schoongepompt. Ondanks de zeer hoge snelheid zijn nog steeds delen van de spoelingkoek aanwezig.



spoelingkoek slechts plaatselijk open en het aantal doorbraken neemt, alhoewel steeds langzamer, toe met de grootte van snelheid van schoonpompen. Tevens bleek bij het onderzoek, dat ook de grootte van de skin eerst sterk afneemt en daarna steeds langzamer bij verder opvoeren van de stroomsnelheid. Nòch de spoelingkoek, nòch de skin kon bij doorgaande verhoging van de stroomsnelheid in zijn geheel worden verwijderd. Wel bleek bij diverse proeven, dat door toevoeging van Calgon (handelsnaam voor Na-hexametafosfaat) een verdere verlaging kon worden bewerkstelligd van de grootte van de skin. Deze werking is toe te schrijven aan de dispergerende eigenschappen van het complexe fosfaat-ion. Een soortgelijke werking, alhoewel in veel mindere mate, gaat ook uit van chloorbleekloog, dat in de waterleidingwereld veel toepassing vindt als desinfectiemiddel.

Een uitvoeriger verslag van dit laboratoriumonderzoek kunt u vinden in het jaarverslag van 1975 van de Dienst Grondwaterverkenning TNO.

Ten einde de resultaten van het laboratoriumonderzoek te kunnen toetsen aan praktijkgegevens werd in samenwerking met een waterleidingbedrijf een onderzoek uitgevoerd naar het effect van sectiegewijs schoonpompen op de capaciteit van een aantal putten. De bedoeling was om een verband te leggen tussen de gevonden laboratoriumresultaten (afname van skin bij grotere stroomsnelheid bij schoonpompen) en de verbeterde capaciteit van de putten na het sectiegewijs schoonpompen. Jammer genoeg werden de putten niet met spoeling geoord maar met schoon water. De resultaten van het onderzoek lieten bij geen van de vier putten ook maar enige verbetering zien in de relatie tussen het debiet en de afpomping. Een zeer aannemelijke verklaring hiervoor is, dat de skin wèl bij alle putten aanwezig is, maar ondanks de hoge stroomsnelheid niet kon worden verwijderd. Vanwege de afwezigheid van een goed afpleisterende spoeling drong klei uit de spoeling, afkomstig van aangeboorde kleilagen, overeenkomstig het bovenstaande, in rijke hoeveelheden vèr de formatie binnen, waardoor de verwijdering zeer moeilijk werd.

Ondanks het povere resultaat van de veldexperimenten lijkt het evenwel zeer de moeite waard om dit onderzoek te herhalen en dan met een bentonietspoeling, waarmee dan niet alleen gegevens over de skinfactor kunnen worden verkregen, maar ook over het nut van sectiegewijs schoonpompen, want dat is en blijft een kostbare aangelegenheid. Tevens zou het dan aanbeveling verdienen speciale putproeven uit te voeren, zowel vóór als na het sectiegewijs schoonpompen; putproeven waarmee een idee verkregen kan worden van de grootte van de skinfactor.

De theoretische achtergronden van laatstgenoemde putproeven, welke bestaan uit een pomp- en een stopperiode, zijn vorig jaar binnen het kader van de Werkgroep Onderzoek Boringen bestudeerd. Er zijn nog te weinig betrouwbare proeven in het veld uitgevoerd, waardoor te weinig praktijkvoorbeelden voorhanden zijn. Het principe bestaat hierin, dat van de totale grootte van de afpomping in een pompput de component wordt bepaald die wordt veroorzaakt door de onttrekking van het debiet uit het watervoerend pakket, wanneer dit pakket in zijn geheel *niet* verontreinigd zou zijn.

Het verschil tussen de werkelijke gemeten afpomping en deze component is dan gelijk aan de verliezen ten gevolge van het skineffect of verstoppingen. U ziet dus dat niet alleen de verliezen worden bepaald, welke veroorzaakt worden door spoelinginfiltratie en spoelkoekrestanten, maar alle verliezen veroorzaakt door afwijkingen in de doorlatendheid rondom de pompput, waar natuurlijk ook later ontstane verstoppingen onder kunnen vallen. Uiteraard dient wel de gemeten afpomping in de pompput te worden gecorrigeerd voor de wrijvingsverliezen in filter en stijgbuis. Beter is uit te gaan van de peilingen aan waarnemingsfilters die in de omstorting zijn geplaatst. Laten we ons gemakshalve beperken tot onttrekking van grondwater door middel van een pompput uit de totale dikte van een watervoerend pakket, dat van onder en boven is afgesloten door ondoorlatende kleilagen. Wordt vanaf een tijdstip $t = 0$ plotseling een constant debiet Q aan de laag onttrokken, dan kan de stijghoogtedaling in de laag worden berekend volgens:

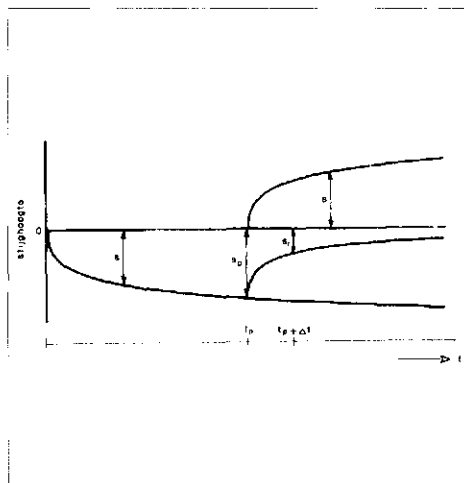
$$s = \frac{Q}{4 \pi kD} \ln \frac{2,25 kDt}{r^2 \cdot S}$$

Vullen wij voor r de boorgatstraal in dan is de stijghoogtedaling in de omstorting gelijk aan:

$$s = \frac{Q}{4 \pi kD} \ln \frac{2,25 kDt}{r_o^2 \cdot S}$$

mits voldaan wordt aan de voorwaarde, dat geen skineffect optreedt.

U ziet in de formule een t staan en wel achter het \ln -teken, hetgeen betekent, dat de stijghoogtedaling afhankelijk is van de tijd. Zouden wij oneindig lang pompen dan zien wij al vlug, dat ook de stijghoogtedaling oneindig groot wordt. In de praktijk gebeurt dit niet, omdat altijd voeding van aangrenzende pakketten optreedt, waardoor vroeg of laat, afhankelijk van de hydraulische weerstand van de scheidende kleilagen, een stationaire toestand ontstaat. De formule heeft dus een zekere begrenzing en mag alleen worden gebruikt zolang de invloed



Afb. 5 - Schematische weergave van het stijghoogteverloop bij een pomp- en stopproef.

van deze voeding nog niet merkbaar is. Zouden wij voor t nul invullen, dan zien wij dat ook hier wat hapert, want $\ln(0) = -\infty$ waardoor ook de afpomping $-\infty$ zou worden. Het blijkt dan ook, dat de formule alleen gebruikt mag worden zolang geldt, dat de term achter het \ln -teken groter is dan een bepaalde waarde.

Berekening laat zien dat hieraan wordt voldaan, zodra t groter is dan 10^{-3} tot 10^{-2} sec. In de praktijk zullen wij daarom ook nooit met deze begrenzing van de formule te maken hebben.

Zou er wel sprake zijn van een skineffect, dan wordt de formule nog uitgebreid met een extra term s_{skin} . Deze term is onafhankelijk van de tijd omdat mag worden aangenomen, dat in het gebied van verontreiniging en verstopping, vanwege de beperkte omvang, binnen enkele ogenblikken een stationaire stromingstoestand wordt bereikt, zodat in dat geval geldt:

$$s = \frac{Q}{4 \pi kD} \ln \frac{2,25 kDt}{r_o^2 \cdot S} + s_{skin}$$

Deze formule wordt in de geohydrologie vaak gehanteerd ter bepaling van de kD -waarde van het watervoerend pakket; immers bij het uitzetten van de afpomping s versus $\log t$ zal, overeenkomstig de formule, een rechte lijn ontstaan, waarvan de helling bepaald wordt door de kD -waarde. Uit de helling van de lijn kan eenvoudig de grootte van de kD -waarde worden berekend. Maar de formule herbergt meer mogelijkheden. Is eenmaal de kD -waarde bepaald, dan ziet u dat door invulling van de formule, ervan uitgaande dat de grootte van de bergingscoëfficiënt S binnen redelijke grenzen bekend is of geschat kan worden, eenvoudig de grootte van s_{skin} eruit rolt. Voorwaarde is wel, dat een s - en t -waarde wordt ingevuld van een punt dat op

de rechte gelegen is, die door de meetpunten is getrokken.

Wij zien dus, dat door middel van een zeer eenvoudige putproef: de bepaling van de grootte van de afpomping met de tijd (en deze tijd hoeft meestal niet langer te zijn dan één uur) een inzicht verkregen kan worden niet alleen van de kD -waarde maar óók van de skinfactor. Als enig bezwaar tegen de proef geldt, dat vaak de handhaving van een constant debiet moeilijkheden oplevert. Schommelingen van $\pm 10\%$ in het debiet zijn niet denkbeeldig en dus ook niet in de afpomping en dit leidt ertoe, dat in de praktijk de rechte lijn door de meetpunten vaak niet erg betrouwbaar is.

Het is daarom erg gelukkig dat ook de resterende afpomping (dus de afpomping nadat de productie is gestaakt) belangrijke informatie verschaft over de grootte van de kD -waarde. Een belangrijk voordeel van de meetresultaten gedurende de stopperiode is, dat deze géén schommelingen vertonen. Het debiet is namelijk exact gelijk aan nul! De resterende afpomping na beëindiging van de pompperiode kan worden berekend door gebruikmaking van het superpositiebeginsel (zie afbeelding 5).

De resterende verlaging s_r is volgens dit principe gelijk aan het verschil in afpomping, veroorzaakt door onttrekking van een debiet Q vanaf het tijdstip $t = 0$ en veroorzaakt door injectie van hetzelfde debiet Q vanaf het tijdstip $t = t_p$ waarbij t_p het moment is, waarop het pompen wordt gestaakt. In formule levert ons dat op:

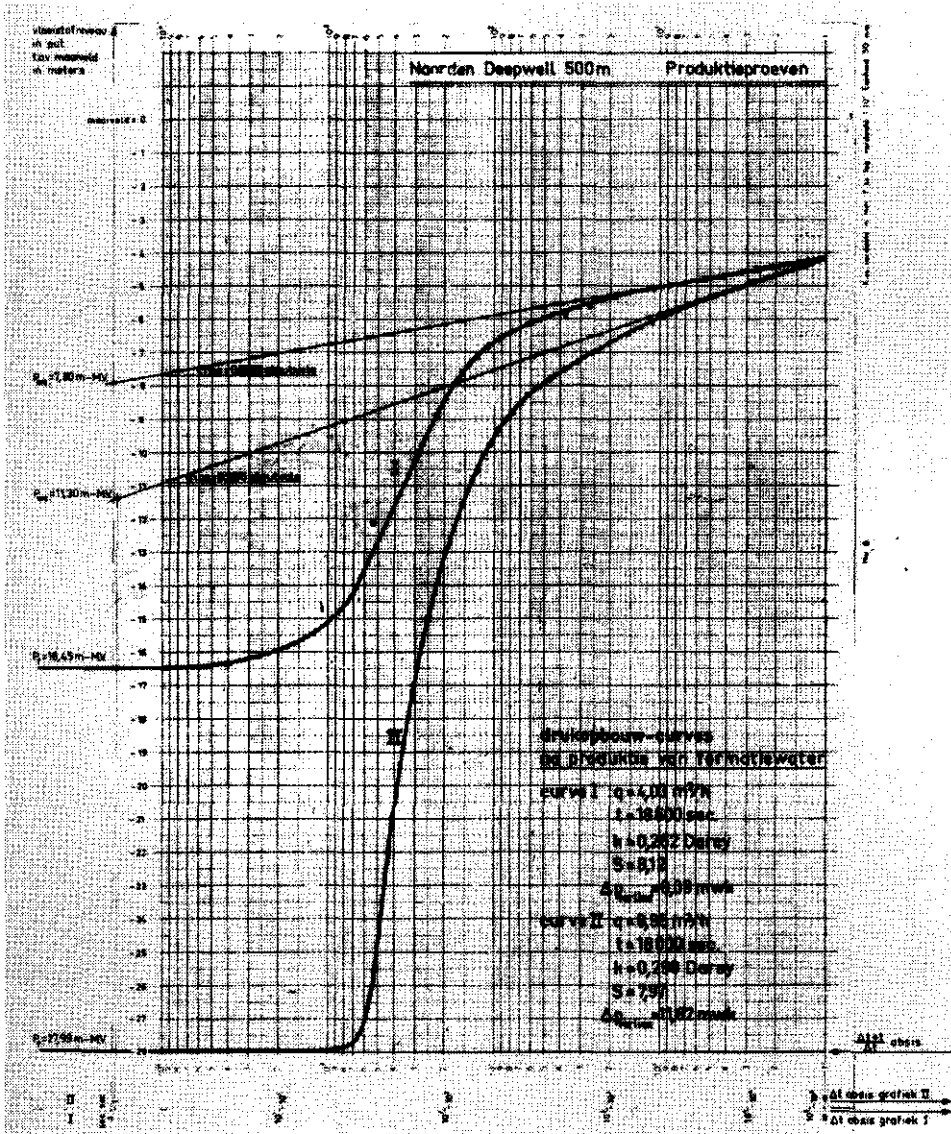
$$s_r = \left\{ \frac{Q}{4 \pi kD} \ln \frac{2,25 kD \cdot (t_p + \Delta t)}{r_o^2 \cdot S} + s_{skin} \right\} - \left\{ \frac{Q}{4 \pi kD} \ln \frac{2,25 kD \cdot \Delta t}{r_o^2 \cdot S} + s_{skin} \right\}$$

ofwel

$$s_r = \frac{Q}{4 \pi kD} \ln \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$$

De term s_{skin} komt niet meer voor in de formule. Het blijkt dus, dat het verloop van de resterende afpomping niet door de grootte van skin wordt beïnvloed, waaruit wij dan de conclusie kunnen trekken, dat het verloop hetzelfde is, of de put nu wél of niet verstopt is. Eigenlijk is dat niet zo verbazingwekkend. Zodra de productie wordt gestaakt, wordt de stroming rondom de put nagenoeg tot stilstand gebracht, waardoor de extra wrijvingsverliezen wegvallen. Met de afleiding van de laatste formule is andermaal een stuk gereedschap verkregen om de kD -waarde te bepalen. Bij het uitzetten van de resterende afpomping s_r versus

de log uit $\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ zal wederom een rechte



Afb. 6 - Het drukopbouwverloop van productieperiodes. Pompproeven uitgevoerd in de Deepwell Naarden 500m (februari 1974).

dienen te ontstaan, waarvan de helling eveneens door de kD -waarde wordt bepaald en die bovendien gelijk is aan de helling van de lijn uit de plot van s tegen $\log t$.

Door beide te maken, eventueel op transparant papier, kan de meest verantwoorde rechte worden getrokken en de meest betrouwbare kD -waarde worden bepaald. Invulling van deze kD -waarde in eerstgenoemde formule geeft dan de grootte van de skin. In afbeelding 6 worden de resultaten gegeven van twee stopproeven. De gevonden k -waarde (hier uitgedrukt in Darcy) komen goed met elkaar overeen. De skinfactor (hier S -waarde) ligt bij de eerste productieproef iets hoger dan bij de tweede.

Met de bestudering van de theoretische achtergronden van de korte pomp- en stopproeven stond het de Werkgroep voor ogen, na te gaan in hoeverre deze proeven betrouwbare resultaten kunnen opleveren voor

de bepaling van geohydrologische grootte-heden en skinfactor.

Iets wat onvermeld is gelaten is dat uit de meetresultaten eveneens een indruk kan worden verkregen van de grootte van de lekfactor. De lekfactor geeft de mate aan, waarop voeding plaatsvindt van het watervoerend pakket en wordt bepaald door de grootte van de hydraulische weerstand van de scheidende kleilagen. Het lijkt erop dat de proeven, mits aan bepaalde voorwaarden bijvoorbeeld met betrekking tot de penetratie van het filter in de watervoerende laag en met de grootte van de lekfactor wordt voldaan, betrouwbare en nuttige informatie kunnen verschaffen. Naast de bepaling van de kD -waarde en de lekfactor lijken de proeven vooral met de bepaling van de skinfactor hun nut te kunnen hebben in de vergroting van het inzicht in de conditie of rentabiliteit van een pompput. De korte pomp- en stopproeven zijn daarom

niet alleen in het belang van het geohydrologisch onderzoek, maar eveneens in het belang van de techniek van de grondwaterwinning.

Tot slot zou ik bij deze putproeven willen opmerken, dat ik nogal nonchalant met de begrippen skin en skinfactor ben omgesprongen. Onder skin wordt in feite het daadwerkelijke verlies aangeduid in m of cm waterkolom; onder de skinfactor wordt

$$\text{eigenlijk verstaan: } F_{\text{skin}} = \frac{(2 \pi kD)}{Q} \cdot S_{\text{skin}}$$

welke factor dimensieloos is. Wilt u meer weten over deze materie dan kan ik u aanraden de bijlage in het jaarverslag over 1976 van de Dienst Grondwaterverkenning TNO erop na te slaan; u zult daar tevens een literatuurverwijzing in aantreffen.

Ik kan me voorstellen, dat de lezer zich afvraagt of het skineffect in de praktijk inderdaad van die orde van grootte is, dat zoveel aandacht gerechtigd is. Het is mij nog steeds niet duidelijk of in de praktijk dit effect, dat zich slechts zeer moeilijk in het veld direct laat meten, van onmiskenbare invloed is op de capaciteit van een pompput. Ondanks de zeer vele aanwijzingen, dat het wel zo is, is nog nooit een overtuigend bewijs geleverd. Uitgebreide veldexperimenten, waarbij de zo juist beschreven putproeven veelvuldig uitgevoerd dienen te worden, zullen echter wellicht een tip van de sluier rondom het skineffect kunnen oplichten. Voor de Werkgroep Onderzoek Boringen derhalve genoeg werk aan de winkel en hopelijk ook voor diverse waterleidingbedrijven, die in samenwerking met de Werkgroep hun aandacht op dit probleem willen richten.

