

B-3

Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen N.V.
KIWA

WEERSTANDSMETINGEN AAN FILTERSPOELKOPPEN

door ir. A. de Lathouder

MEDEDELING No 3
VAN DE COMMISSIE FILTERCONSTRUCTIES (COFICO)
VAN HET KIWA

MOORMANS PERIODIEKE PERS N.V. — DEN HAAG

Sir Winston Churchill-laan 273
RIJSWIJK (Z.H.)



Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen N.V.
KIWA

Van Speykstraat 34 — 's-Gravenhage

WEERSTANDSMETINGEN AAN FILTERSPOELKOPPEN

door ir. A. de Lathouder

MEDEDELING No 3
VAN DE COMMISSIE FILTERCONSTRUCTIES (COFICO)
VAN HET KIWA

DEEL I

1. Inleiding

Over de vraag of de weerstand van een in de bodem van een filter geplaatste spoelkop groot of klein moet zijn lopen de meningen nogal uiteen. Dit is, gezien de dubbele functie van dergelijke spoelkoppen, niet te verwonderen. Enerzijds zal uit economisch oogpunt moeten worden gestreefd naar een lage filtratieweerstand van het filter, dus naar een gering drukverlies van alle onderdelen. Een besparing van enkele cm wk op het drukverlies is bij het verwerken van grote waterhoeveelheden reeds van enige betekenis. Ook ter beperking van het spoelvermogen is het uiteraard gewenst, dat de spoelorganen een geringe weerstand hebben. Anderzijds hangt de gewenste weerstand samen met de voorwaarde, dat de spoelkoppen moeten zorgen voor een gelijkmatige verdeling van het spoelmedium over het filterbed en een gelijkmatige afvoer van het filtraat. Speciaal bij het ontbreken van steunlagen, die door hun weerstand een goede waterverdeling onder het bed bevorderen (1, 2, 3), komt deze functie geheel voor rekening van de spoelkoppen. Om een regelmatige verdeling te verkrijgen is het niet alleen nodig dat de spoelkoppen passend van vorm en aantal zijn, maar ook dat de uittreesnelheid overal gelijk is. Dit laatste betekent dat de spoelbodem, uiteraard met inbegrip van de toevoer, voor alle punten eenzelfde weerstand moet hebben (4). Is dit niet zo, bv. als gevolg van ongelijke toevoerleidingen, van onderlinge verschillen tussen de koppen of van plaatselijke vervuilingen, dan treden onregelmatigheden in de toegen afvoer van het water en lucht op, die op den duur tot ontoelaatbare verstoringen in het filterbed kunnen leiden. De invloed van dergelijke onregelmatigheden kan worden verkleind door vergroting van de spoelkopweerstand. Dit betekent dus dat een gelijkmatige verdeling van het door de bodem gaande water beter is gewaarborgd naarmate de weerstand van de filterbodem c.q. spoelkoppen groter is (5).

Uit het voorgaande volgt dat het zonder meer niet mogelijk is een bepaalde gewenste waarde voor de spoelkopweerstand aan te geven. In het algemeen kan wel worden gezegd dat geen hoge spoelkopweerstand nodig is indien de primaire lucht- en waterverdeling vóór de spoelkoppen gunstig is en verder ook geen onregelmatigheden in de verdeelorganen zijn te verwachten.

De weerstand hangt af van het debiet en de vorm van de spoel-

kop. De doorsnede van de toevoerpijp en de uitstroomspleten spelen hierbij een belangrijke rol omdat daarin vaak hoge snelheden optreden, waardoor vooral bij de uitstroming vrij grote verliezen aan kinetische energie kunnen ontstaan. De weerstand wordt mede bepaald door het zand dat de spoelkop omringt en dat de spleten min of meer blokkeert. De mate van blokkering hangt af van de korrelgrootte en de inklinking van het zand (vaste of losse stapeling). Ook de hoogte van het zandbed en het aantal koppen per m² — dat bij een gegeven debiet per kop de snelheid in het zandbed bepaalt — zijn van invloed. Om een indruk te verkrijgen van de orde van grootte van de spoelkopweerstand en van de factoren die hierop onder verschillende omstandigheden van invloed zijn, werden in het Technisch Laboratorium van het KIWA weerstandsmetingen verricht aan twee willekeurig gekozen spoelkoppen van verschillend type, die hiertoe in een klein proeffilter waren opgesteld.

2. Proeffilter en meetapparatuur

De spoelkoppen waren gemonteerd in een proeffilter van cirkelvormige doorsnede van 4,35 dm² ($\phi = 23,5$ cm), dat was voorzien van een spoelkoppenbodem. In deze bodem konden 3 spoelkoppen worden geplaatst, hetgeen overeenkomt met een dichtheid van 69 koppen per m² filteroppervlak. De beschikbare apparatuur liet echter het gelijktijdig werken met 3 spoelkoppen niet toe, zodat de proeven met 1 kop moesten worden uitgevoerd. Op het effect van deze beperking zal bij de bespreking van de resultaten in punt 5 nader worden ingegaan. De hoogte van het proeffiltertje bedroeg 120 cm, waarvan ca. 30 cm onder de spoelkoppenbodem, zodat ongeveer 90 cm overbleef voor de eigenlijke filtratie- en spoelruimte. Met het oog op de afvoer en de gewenste expansie werd met een zandbed van ten hoogste 65 cm gewerkt. De gegevens van het gebruikte zand waren:

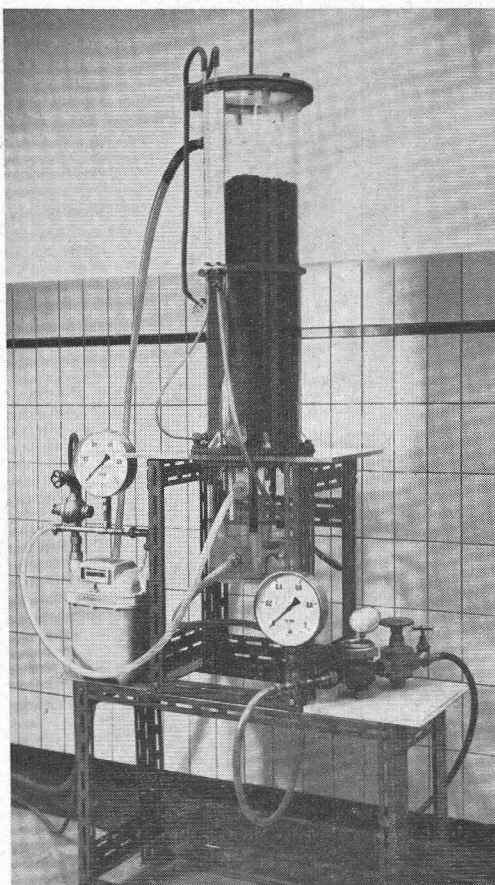
werkzame korrelgrootte	= 0,85 mm;
gemiddelde korrelgrootte	= 1,15 mm;
gelijkmatigheidscoëfficiënt	= 1,35.

De hoogte van het zandbed bedroeg 25, 45 en 65 cm.

Het filtertje had aansluitingen voor het filtreren en voor spoelen met lucht en water, zowel gelijktijdig als afzonderlijk. Tijdens de proeven werd echter geen luchtspoeling toegepast omdat de beschikbare tijd deze uitbreiding van het programma niet toeliet.

De weerstand van de spoelkoppen werd gemeten met een differentiaalwatermanometer die was aangesloten op meetpijpjes, die zich onder en boven de bodem in de nabijheid van de spoel-

*Afb. 1 Proeffilter voor
het beproeven van fil-
terspoelkoppen*

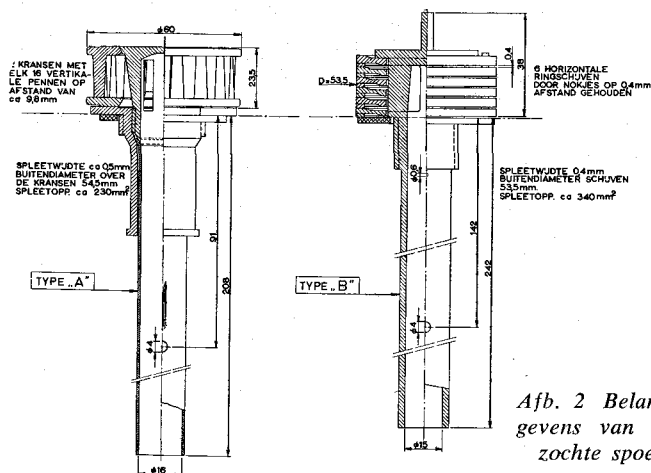


kop bevonden. Het debiet werd voor de grote hoeveelheden tijdens het spoelen met een watermeter bepaald, voor kleine hoeveelheden tijdens het filtreren met een gecalibreerd vat. Afb. 1 toont de opstelling van het proeffilter.

3. Onderzochte spoelkoppen

Er werden twee willekeurige spoelkoppen van geheel verschillend type onderzocht, nl. een spoelkop met verticale spleten en een met horizontale spleten. De opbouw van deze koppen, resp. met A en B aangeduid, is in afb. 2 gegeven.

Spoelkop A bestaat in principe uit 2 kransen met elk 16 verticale pennen die in elkaar grijpen en dan 32 spleten van ca. 0,5 mm breedte en 14,5 mm lengte vormen. De buitendiameter van de kransen is 54,5 mm, het totale spleetoppervlak 230 mm^2 . De



Afb. 2 Belangrijke gegevens van de onderzochte spoelkoppen

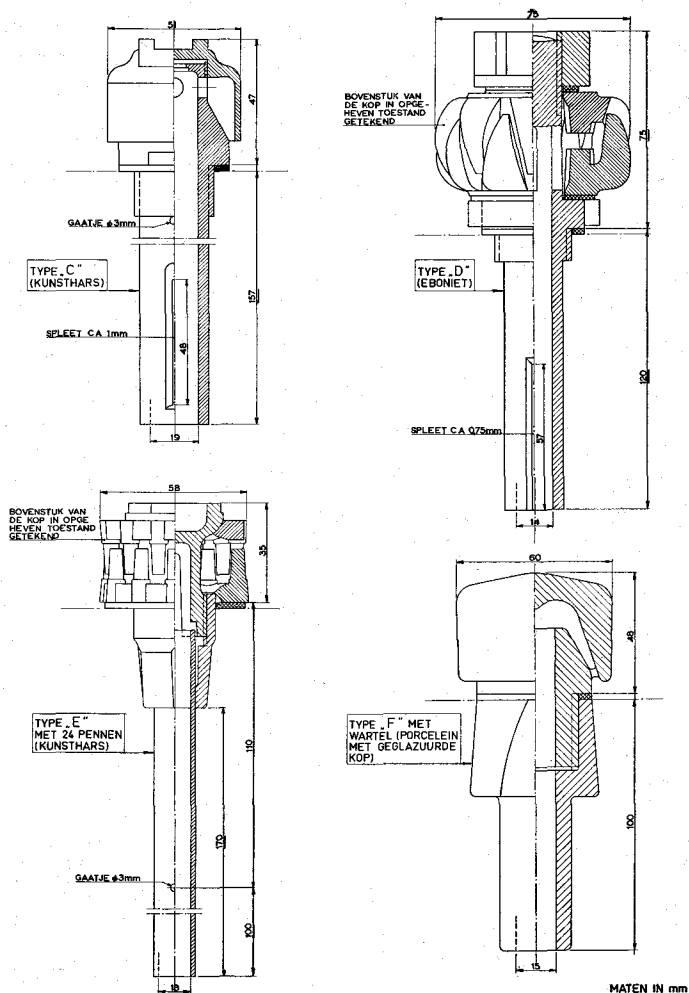
uitstroming aan de cirkelvormige omtrek door de verticale spleten is zijwaarts gericht. Het dompel- of spoelluchtpijpje heeft een inwendige diameter van 16 mm en een luchtgaatje van 4 mm.

Spoelkop B is opgebouwd uit zes op elkaar geklemde horizontale ringvormige schijven, die door nokjes zodanig op afstand worden gehouden, dat 5 spleten van 0,4 mm breedte ontstaan. De buitendiameter van de schijven is 53,5 mm, de totale spleetoppervlakte bedraagt ca. 340 mm². De uitstroming aan de cirkelvormige omtrek door de horizontale spleten is zijwaarts gericht. Het dompelpijpje heeft een inwendige diameter van 15 mm en een spoelluchtgaatje van 4 mm.

4. Uitgevoerde metingen

Om de invloed van het zand op de kopweerstand te bepalen, werden drukverliesmetingen uitgevoerd mét en zónder aanwezigheid van het zandbed. In hoofdzaak werden de metingen verricht met leidingwater en een bed van schoon zand ter dikte van 65 cm. Spoelkop A werd echter ook gemeten bij 25 en 45 cm zandbeddikte. Om een indruk te krijgen van de reproduceerbaarheid en de meetnauwkeurigheid werden enkele meetseries drie maal uitgevoerd. De resultaten van de metingen met schoon zand worden besproken in punt 5.

De ervaringen betreffende enkele metingen met vervuild zand zijn in punt 6 vermeld. De spoelkoppen werden onderzocht voor toestanden die overeenkomen met spoelen en filtreren. Het debiet werd bij alle meetseries opgevoerd van nul tot de maximale waarde, die met de beschikbare apparatuur bereikbaar was. Deze was juist voldoende om het zandbed in de toestand „spoelen met



Afb. 3 Spoelkoppen waarvan de weerstand bij spoelen met water zonder zand tijdens vroeger uitgevoerde metingen werd bepaald

zand” tot enige expansie te brengen. In het bijzonder werden voor laatstgenoemde toestand diverse controlemetingen uitgevoerd in verband met het optreden van instabiele toestanden bij het begin van expansie.

Ter vergelijking met de resultaten van vroeger uitgevoerde proeven met andere spoelkoppen (zie afb. 3) voor de toestand „spoelen zonder zand” zijn bedoelde resultaten eveneens in dit overzicht opgenomen.

Het beschouwde gebied was beperkt tot een debiet dat voor de

TABEL 1
Filtratie- en spoelsnelheden als functie van het debiet en het aantal koppen per m²

Aantal koppen per m ²	Lineaire snelheid in m/h voor een debiet in l/min/kop van										
	1	2	3	4	6	8	10	15	20	25	30
40	2,4	4,8	7,2	9,6	14,4	19,2	24,0	36,0	48,0	60,0	72,0
60	3,6	7,2	10,8	14,4	21,6	28,8	36,0	54,0	72,0	90,0	108,0
80	4,8	9,6	14,4	19,2	28,8	38,4	48,0	72,0	96,0	120,0	144,0

verschillende onderzochte filtratietoestanden varieerde tussen maximale waarden van 5 tot 9 l/min. Voor het spoelen lag het debiet in de buurt van 14 l/min. De resultaten zijn in l/min per spoelkop uitgedrukt. De hiermee overeenkomende snelheden voor filtratie en spoelen hangen uiteraard mede af van het aantal per m² toegepaste spoelkoppen. Om voor een gegeven debiet per kop en een bepaalde dichtheid de filtratie- of spoelsnelheid gemakkelijk te kunnen vaststellen is deze snelheid berekend en in tabel 1 gegeven als functie van het debiet Q in l/min per kop en dichtheden van 40, 60 en 80 koppen per m².

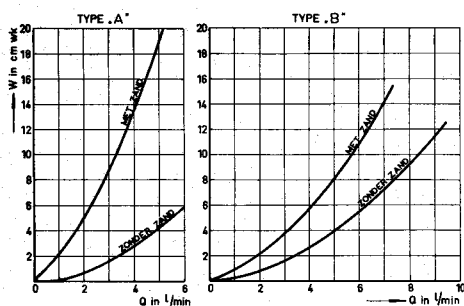
5. Beschouwing van de resultaten

5.1. Algemeen

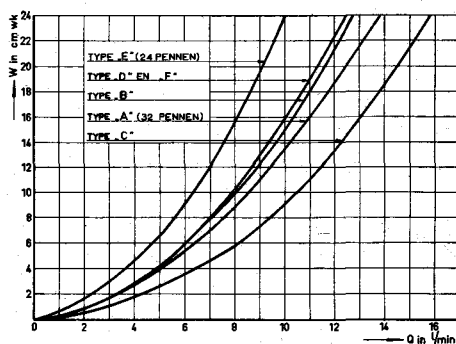
De resultaten van de weerstandsmetingen zijn als functie van het debiet uitgezet in de afb. 4 t/m 7. De weerstand W is uitgedrukt in cm wk, het debiet Q in l/min.

Uit de resultaten bleek dat de toestanden voor 25, 45 en 65 cm zand wel enig verschil vertoonden, maar dat dit ten opzichte van de verschillen die de andere factoren te zien gaven klein was. Het leek daarom alleszins toelaatbaar de bedoelde krommen te vervangen door gemiddelde curven, waardoor tevens aan overzichtelijkheid werd gewonnen. De resultaten die in de diagrammen zijn uitgezet gelden derhalve zonder onderscheid naar de dikte van het zandbed.

De in drievoud uitgevoerde meetseries bleken goed overeen te stemmen. Zij wezen, met uitzondering van het gebied waar het debiet maximaal was (en waar instabiliteiten optraden), op een redelijke reproduceerbaarheid. Uit een later uitgevoerd systematisch onderzoek naar de invloed op de spoelkopweerstand van de korrelafmeting, de zandhoogte, het inklinken van het zand en



Afb. 4 Spoelkopweerstand tijdens het filtreren met en zonder zand



Afb. 5 Spoelkopweerstand tijdens het spoelen zonder zand

het aantal koppen per m² bleek, dat deze factoren — in het bijzonder de zandkorrelgrootte — van belang kunnen zijn. De resultaten van dat onderzoek zijn opgenomen in Deel II van dit rapport (zie blz. 19). Gezien echter de samenhang met het hier beschreven onderzoek wordt aan deze materie in punt 5.4 een korte beschouwing gewijd.

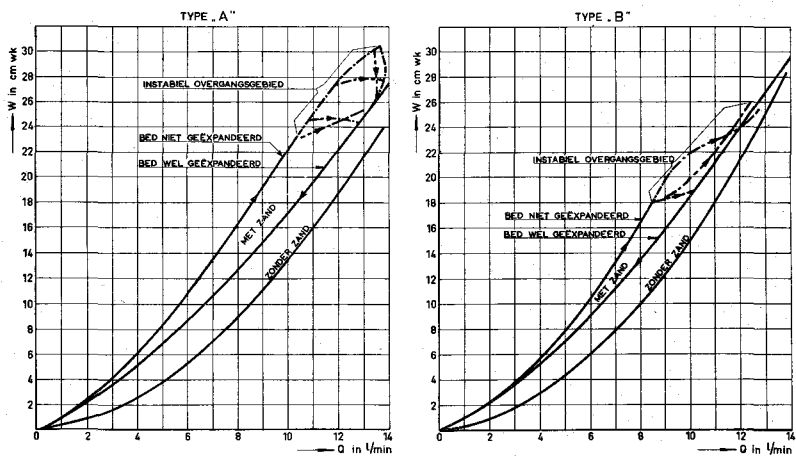
5.2. *Toestanden voor filtreren en spoelen, doch zonder zand*

De weerstandskrommen voor de toestanden die corresponderen met filtreren en spoelen, evenwel zonder toepassing van zand — kortweg „filtreren en spoelen zonder zand” genoemd — zijn in de afb. 4, 5 en 6 uitgezet. Uit vergelijking van de afbeeldingen 4 en 5 blijkt dat de stromingsrichting weinig invloed op de weerstand heeft. Uit afb. 5 blijkt dat de beide koppen slechts betrekkelijk kleine onderlinge verschillen in drukverlies geven. In deze grafiek zijn bovendien de krommen voor spoelen van de in afb. 3 gegeven koppen, die indertijd zijn beproefd, uitgezet. Spoelkop type E had een vrij klein spleetoppervlak, een paar kleine toelaatopeningen in de kop en een dompelpijpje van slechts 13 mm diameter, redenen waarom de weerstand iets groter is dan die van de andere koppen. Type C heeft een lage weerstand omdat de uitstroming plaatsvindt door één ruime rondgaande spleet, terwijl een wijde toevoerpijp wordt toegepast (diameter 19 mm).

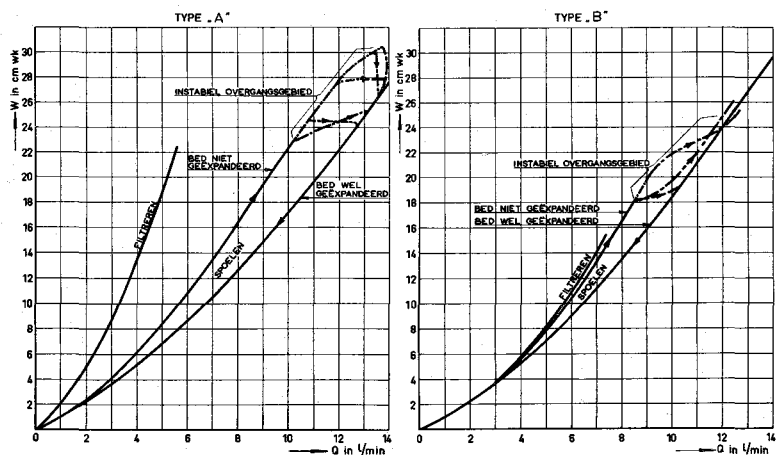
5.3. *Filtreren met zand*

De weerstand voor filtreren met zand is naast die zonder zand in afb. 4 uitgezet. Ten opzichte van de toestand zonder zand is de weerstand belangrijk toegenomen.

Bij toepassing van zand zijn de weerstanden van de spoelkoppen A en B voor normale filtratiesnelheden, die naar gelang van de dichtheid van het aantal koppen een gebied van $Q = 1$ tot 3 l/min bestrijken, resp. 5 tot 10 en 2 tot 3 maal zo groot als zonder zand. Als gevolg van de blokkering van de spleten door de zandkorrels wordt blijkbaar een intreeweerstand opgebouwd, die belangrijk groter is dan de inwendige spoelkopweerstand die zonder zand wordt gemeten. Type A heeft een grotere intreeweerstand dan type B, vermoedelijk als gevolg van de intensievere blokkering in de convergerende spleten (bij type A), waar de zandkorrels steviger op elkaar gepakt liggen en in het nauwer wordende deel in een gebied van hogere snelheid liggen. Bovendien is de spleetsnelheid bij spoelkop A groter dan bij B. De totale weerstand is hierdoor dan ook groter dan die van kop B.



Afb. 6 Spoelkopweerstand tijdens het spoelen met en zonder zand



Afb. 7 Spoelkopweerstand tijdens het filtreren en spoelen met zand

Uit de krommen blijkt dat de weerstand in geval van filtreren, afhankelijk van de toegepaste filtratiesnelheid en het type spoelkop, voor de hier beschouwde toestand met een bepaalde mate van inklinken, een gegeven zandbedhoogte, korrelgrootte en aantal koppen per m^2 ongeveer ligt tussen 1 en 9 cm wk.

5.4. Spoelen met zand

De krommen voor de spoeltoestand met zand zijn gegeven in de afb. 6 en 7. In afb. 6 zijn ze vergeleken met de spoeltoestand zonder zand en in afb. 7 met filtreren met zand. In de meeste gevallen liggen de toestanden die voor het spoelen van belang zijn

in het gebied van $Q = 2$ tot 10 l/min. Bij toepassing van een groot aantal spoelkoppen heeft men uiteraard te maken met een klein debiet per kop; met een klein aantal koppen is het debiet per kop groot (vgl. tabel 1). Voor een klein aantal spoelkoppen en een betrekkelijk grote spoelsnelheid, bv. 35 koppen per m^2 en 30 m/h, komt men al op ca. 14 l/min per kop.

Met zand is de weerstand van de koppen in het genoemde gebied 1,3 tot 2,5 maal zo groot als zonder zand (zie afb. 6). De blokkering door de zandkorrels geeft ook hier een extra weerstand, in dit geval dus de zg. uittreeweerstand. De spoelweerstanden zijn voor beide koppen ongeveer gelijk, maar vooral voor type A kleiner dan de filtratieweerstand (zie afb. 7). Dit betekent dat de door het zand veroorzaakte uittreeweerstand kleiner is dan de intreeweerstand die het zand bij filtreren veroorzaakt. Het grote, bij spoelkop A geconstateerde verschil wetigt de veronderstelling dat de korrels bij het spoelen enigszins uit de convergerende spleet — waar een hoge uittreesnelheid heerst — worden weggedrukt.

Een typisch verschijnsel dat zich bij het spoelen met zand voordoet, is het optreden van een soort hysteresis als gevolg van de toestand waarin het zandbed op het moment van de meting verkeert. Wordt nl., uitgaande van een vast liggend bed, de spoelsnelheid opgevoerd, dan wordt het zand langzamerhand losgewerkt en men bereikt op een gegeven ogenblik een expansie, waarbij een instabiele toestand optreedt. De zandkorrels voor de spleet komen bij verminderde druk van boven enigszins vrij van de spleet, in de omgeving waarvan hoge uittreesnelheden heersen. De weerstand neemt hierdoor bij het verder opvoeren van de snelheid naar verhouding minder toe of valt plotseling af, waardoor een meestal vrij discontinue overgang (in de grafieken met een streep-punt lijn aangegeven) naar een lager gelegen kromme ontstaat. Het merkwaardige is dat de losse geëxpandeerde toestand van het bed zich bij vermindering van het debiet van de maximale waarde naar nul schijnt te handhaven, waardoor de weerstandskromme dus een lus vormt. Dit wijst erop dat de vrijere doortocht, die zich in het gebied van hoge uittreesnelheden in de onmiddellijke omgeving van de spleten tijdens de expansie heeft kunnen vormen, zich ook bij verminderende expansie (dus weer toenemende druk van boven) nog geruime tijd kan handhaven. Aangezien de kopweerstand tijdens spoelen met zand sterk afhankelijk is van de blokkering door het zand en deze weer samenhangt met de toestand van het bed, mag worden aangenomen dat deze weerstand nauw samenhangt met:

1. de korrelgrootte van het zand;
2. het aantal spoelkoppen per m²;
3. de mate van inklinking van het bed;
4. de hoogte van het zandbed.

Ad 1. Het behoeft geen nadere toelichting dat de blokkeringsweerstand van de spleten zal verminderen als met een grotere korrel wordt gewerkt. Aan de andere kant echter treedt de expansie later op naarmate de korrel groter is, waardoor de spleten met het opvoeren van de snelheid langer geblokkeerd blijven. Door later voor verschillende korrelgrootten uitgevoerde proeven, waarvan de resultaten niet in dit rapport zijn opgenomen, werd dit bevestigd. Overigens zullen ook de vorm en het s.g. van het zand een rol spelen. Er is echter geen reden te veronderstellen, dat hierdoor de geconstateerde typische vorm van de krommen verloren zou gaan.

Ad 2. De proef kwam overeen met een toestand voor 23 koppen per m², dus met een geringe dichtheid. De toevoercapaciteit van het water liet in de proefopstelling bij het gewenste maximale debiet per spoelkop geen grotere waarden toe. Bij een groter aantal koppen wordt de spoelsnelheid in het zandbed bij eenzelfde debiet per kop uiteraard groter en er treedt dus eerder expansie op, waardoor het weerstandsverloop iets anders kan zijn. Uit later genomen proeven met een groter aantal koppen per m² bleek, dat de invloed van de expansie bij een grotere dichtheid inderdaad eerder optrad, terwijl het karakter van de krommen overigens gelijk bleef.

Ad 3. Uit de voortgezette onderzoeken is verder gebleken, dat de resultaten soms minder goed reproduceerbaar waren. De oorzaak bleek te liggen in het verschil in de mate van inklinking bij de aanvang van de meetseries. Hierdoor kunnen verschillen optreden in de dichtheid (stapeling) van het zand tussen de spoelkop en het daarnaast geplaatste meetpijpje, waardoor kleine weerstandsvariëaties ontstaan.

Ad 4. Naarmate het bed dikker is zal de samendrukking van het zand groter zijn. Deze invloed bleek echter niet groot te zijn (zie ook punt 5.1.).

Hoewel de voor het spoelen gegeven beschouwingen over het optreden van hysteresis in principe ook bij wijziging van bovengenoemde factoren opgaat, dient er rekening mee te worden gehouden dat de krommen bij toepassing van een andere stapeling en afmeting van de zandkorrels, een andere beddikte, een ander aantal koppen per m² en vanzelfsprekend voor andere spoelkop-typen, van de hier gegeven krommen zullen afwijken.

6. Spoelen met vervuild zand

Door de welwillende medewerking van de Drinkwaterleiding der Gemeente Rotterdam konden bij dat bedrijf enkele proeven worden genomen met het aldaar beschikbare ruwe water. De installatie werd daartoe enige tijd in Rotterdam opgesteld. Het bleek na een intensieve vervuiling niet mogelijk aaneengesloten spoelkrommen te meten, omdat tijdens het opvoeren van de snelheid grote discontinuïteiten optraden. Dit was het gevolg van het aaneenkoeken van de zandmassa, de gladde filterwand waarlangs het zand in het proeffilter soms als een zuiger omhoog ging en het optreden van plotselinge doorbraken in het bed en langs de wand. De meetpunten lagen zowel boven als onder de met schoon zand gemeten krommen maar vertoonden een zo grote spreiding, dat het niet mogelijk was hieruit betrouwbare conclusies te trekken.

In het algemeen kan ten aanzien van de vervuiling worden opgemerkt, dat het niet de bedoeling is het vuil in een filter tot in of bij de spoelkoppen te laten doordringen. Deze zullen dus ook in de praktijk in schoon of althans redelijk schoon zand werken. De met schoon zand genomen proeven zullen dus, afgezien van in de praktijk optredende discontinuïteiten, representatief moeten zijn voor een normaal werkend filter.

7. Enkele berekeningen

7.1. *Opbouw van het drukverlies van de spoelkop*

In de spoelkop passeert het water meestal enkele vernauwingen en bij horizontale uitstroming wordt het tevens over een hoek van 90° omgebogen. Bij de hierbij optredende vertragingen van de stroming wordt de snelheidsdruk niet volledig in statische druk omgezet, hetgeen een vermindering van de totale energiedruk betekent. Daarnaast hebben wij te maken met wrijvingsverliezen en met het verlies dat de blokkering van het zand (uittreeweerstand tijdens spoelen) veroorzaakt. Om een indruk van de opbouw van de verliezen te krijgen werden deze bepaald aan de hand van enkele globale berekeningen en de verkregen meetresultaten voor spoelkop A uit afb. 6 voor spoelen met $Q = 10 \text{ l/min}$.

Het water treedt toe door het dompelpijpje en stroomt door het pijpje naar de iets wijdere binnenkamer van de spoelkop. Daarna komt het water, na ombuiging van de stroming over 90° , door 4 scherpkantige openingen in de eigenlijke spoelkopkamer die omgeven is door de tandkransen. Tenslotte stroomt het water

TABEL 2
Opbouw van het drukverlies in een spoelkop

Omschrijving	Drukverlies	
	in cm wk	in %
Instromingsverlies aan onderkant dompelpijpje	3,4	17
Wrijvingsverliezen in dompelpijpje en spoelkop	2,5	12,5
Vertragsingsverliezen door verwijding	4,2	21
Bochtverliezen	2,9	14,5
Uittreeweerstand door zandblokkering	7,0	35
Totale weerstand	20,0	100

door de nauwe spleten van de tandkransen naar buiten. Volgens afb. 6 is de weerstand zonder zand ca. 13 cm wk. Stellen wij de totale weerstand met zand op 20 cm wk (als gemiddelde van de beide spoelkrommen), dan veroorzaakt het zand een weerstandsverhoging van 7 cm wk. Na globale berekening — o.a. (6) — van de overige verliezen werd de in tabel 2 gegeven samenstelling van de verliezen verkregen.

Uit deze cijfers blijkt dat de vertragsingsverliezen als gevolg van instroming (3,4 cm) en uitstroming (4,2 cm) tezamen een vrij belangrijk aandeel in de totale weerstand hebben en ruim 1/3 van de spoelkopweerstand vormen. Door afrondingen, vloeiende overgangen naar verwijdingen en vermijding van nauwe doortochten in de spoelkop kunnen deze verliezen worden beperkt.

7.2. Verband tussen weerstand en debiet

Om na te gaan op welke wijze de weerstand met het debiet — dus met de snelheid — toeneemt is dit verband voor de krommen van afb. 7 op logaritmische schaal uitgezet. Voor het spoelen zijn de krommen gekozen die betrekking hebben op het geëxpandeerde bed. Wordt het verband voorgesteld door de vergelijking

$$W = a Q^x,$$

dan blijkt de exponent x zich te bewegen tussen ca. 1,2 voor waarden van Q tot ongeveer 3 l/ min en ca. 1,5 voor grote waarden van Q . De gemiddelde exponentiële krommen die voor de verschillende gevallen gelden hebben de volgende gedaante:

Spoelkop A, filtreren: $W = 1,9 Q^{1,4}$;
 Spoelkop A, spoelen: $W = 0,9 Q^{1,3}$;
 Spoelkop B, filtreren: $W = 0,9 Q^{1,3}$;
 Spoelkop B, spoelen: $W = 0,8 Q^{1,3}$.

De wel eens geuite veronderstelling, dat de weerstand van spoelkoppen wegens de betrekkelijk hoge spleetsnelheden met het kwadraat van de snelheid zou toenemen, wordt door het onderzoek dus geenszins bevestigd.

8. Conclusies

Algemeen

- a. Het is zonder meer niet mogelijk een gewenste waarde voor de spoelkopweerstand aan te geven. Naar een kleine weerstand dient te worden gestreefd indien de primaire lucht- en watervdeling vóór de spoelkoppen gelijkmatig is en verder ook geen onregelmatigheden in de verdeelorganen zijn te verwachten. De invloed van optredende onregelmatigheden kan worden verkleind door vergroting van de spoelkopweerstand.
- b. De spoelkopweerstand wordt behalve door de spoelkopvorm en het debiet per kop ook bepaald door de korrelgrootte van het zand, de zandbedhoogte, de mate van inklinking van het zandbed, de stromingsrichting (filtreren of spoelen) en het aantal spoelkoppen dat per m^2 wordt toegepast.
- c. De metingen zijn uitgevoerd met waterspoeling zonder lucht en schoon zand, dat een werkzame en een gemiddelde korrel-diameter van 0,85 resp. 1,15 mm had. De zandbedhoogte bedroeg als regel 65 cm. Er werden 2 typen spoelkoppen toegepast in een toestand overeenkomende met een dichtheid van 23 koppen per m^2 . Bij toepassing van soortgelijke andere typen, een ander zandbed en een andere dichtheid zullen uiteraard afwijkende resultaten worden verkregen, doch deze zullen eenzelfde karakter vertonen.
- d. Proeven uitgevoerd met vervuild zand gaven, als gevolg van plotseling optredende toestandsveranderingen, een grote spreiding ten opzichte van de met schoon zand gemeten krommen. Deze laatste worden evenwel verondersteld een redelijke maatstaf te vormen voor de beoordeling van de toestand in een goed werkend filter met vervuild zand.
- e. De spoelkopweerstand is opgebouwd uit de inwendige weerstand en de in- of uittreeweerstand ten gevolge van de blokkering van de spoelkopspeten door het filterzand. De inwendige weerstand wordt voor een groot deel bepaald door de zg. vertragings-

verliezen. Volgens globale berekening bedroegen deze laatste voor een bepaald geval in de spoeltoestand ruim een derde deel van de totale weerstand. Ook de door het zand veroorzaakte uittreeweerstand vormde ca. een derde van de weerstand.

f. In het verband $W = a Q^x$ bleek de exponent x te variëren van 1,2 voor lage waarden van Q (Q tot 3 l/min) tot 1,5 voor hogere waarden van Q .

Toestand zonder zand

g. De stromingsrichting heeft voor beide typen weinig invloed op de weerstand. Beide koppen vertonen slechts een betrekkelijk klein verschil in weerstand.

h. Vroeger uitgevoerde metingen met andere spoelkoppen geven soortgelijke resultaten.

Filtreren (toestand met zand)

i. Door de intreeweerstand wordt de spoelkopweerstand ten opzichte van de toestand zonder zand in het gebied van $Q = 1 - 3$ l/min belangrijk verhoogd en wel met een factor 5 à 10 voor spoelkop type A en ca. 3 voor type B.

j. Spoelkop A heeft, vermoedelijk als gevolg van de convergerende ingang bij de spleten van deze kop voor filtreren met zand, een grotere weerstand dan type B.

k. De weerstand ligt, afhankelijk van de toegepaste filtratiesnelheid en het aantal koppen, voor $Q = 1 - 3$ l/min in de hier onderzochte gevallen tussen 1 en 9 cm wk.

Spoelen (toestand met zand)

l. Door de uittreeweerstand wordt de spoelkopweerstand ten opzichte van de toestand zonder zand verhoogd doch — en dit geldt in het bijzonder voor type A — niet in die mate als de filtratieweerstand door de intreeweerstand wordt verhoogd. In het gebied van $Q = 2 - 10$ l/min is de weerstand 1,3 à 2,5 maal zo groot als voor de toestand zonder zand. De weerstand is voor beide koppen ongeveer gelijk.

m. Voor spoelkop A is de uittreeweerstand belangrijk kleiner dan de intreeweerstand, vermoedelijk omdat de korrels bij het spoelen uit de naar buiten divergerende spleten worden weggedrukt ten gevolge van de daar heersende hoge snelheden.

n. De weerstandskrommen van beide koppen vertonen voor de spoeltoestand een duidelijke hysteresis. De weerstand is sterk afhankelijk van de toestand van het bed, welke toestand (expansie),

o.a. afhangt van de zandkorrelgrootte en de spoelsnelheid (aantal koppen per m²).

o. Wordt een enigszins vastliggend bed door vergroting van de spoelsnelheid langzamerhand tot expansie gebracht, dan treedt op een gegeven moment een instabiele toestand op die een discontinue overgang vormt naar een kromme van lagere weerstand, welke lagere weerstand zich handhaaft bij geleidelijke vermindering van het debiet.

p. Het onder o. genoemde verschijnsel kan worden verklaard uit de bij expansie optredende gebiedjes van vrijere doortocht in de onmiddellijke omgeving van de spleten, die zich als gevolg van de hoge uittreesnelheden nog geruime tijd kunnen handhaven bij vermindering van de spoelsnelheid.

q. De weerstand ligt, afhankelijk van de toegepaste spoelsnelheid en het aantal koppen, voor $Q = 2 - 10$ l/min in de hier onderzochte gevallen tussen 2 en 22 cm wk.

Literatuur

1. H. S. Turner — *Waterworks & Sewerage* 85(1938)941.
2. M. Pirnie — *England News Record* (1920) 11 en 18 november.
3. W. Wiederhold — *Gas- und Wasserfach* 95(1954)658, 719.
4. E. Naumann — *Gas- und Wasserfach* 92(1951)250.
5. H. Marting — *Der Städtische Tiefbau* (1931)110.
6. L. Huisman — *Stromingsweerstand in buisleidingen* (Med. No 14 v. h. KIWA).

DEEL II

1. Inleiding

In deel I van deze mededeling is het resultaat van weerstandsmetingen aan een aantal filterspoelkoppen besproken. Daaruit blijkt dat het drukverlies afhangt van het debiet en de vorm van de spoelkop, alsmede van de stromingsrichting (spoelen of filtreren). Daarenboven wordt de weerstand voor een belangrijk deel bepaald door de eigenschappen van het zand dat de spoelkop omringt en de uitstroomspleten blokkeert. Na nauwkeurige metingen bleek deze zg. blokkeringsweerstand een variabele te zijn, die wordt bepaald door een aantal factoren, die onafhankelijk van de spoelkop zijn. Deze factoren zijn de zandkorrelgrootte, de hoogte van het zandbed, de mate van inklinken van het bed en het aantal koppen dat per m^2 filteroppervlak wordt toegepast. De invloed van elk van deze factoren afzonderlijk werd in een nieuwe serie metingen onderzocht. Hierbij doet uiteraard het type spoelkop en de absolute waarde van de weerstand niet ter zake, wel het verschil dat door variatie van de genoemde factoren wordt teweeg gebracht.

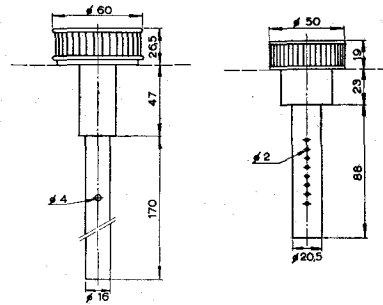
2. De onderzochte spoelkoppen en de daarbij gebruikte proefinstallaties

Tijdens het eerste deel van het onderzoek was reeds gebleken dat de invloed van de eerder genoemde factoren zich bij verschillende gebruikelijke spoelkoptypen openbaarde. Een aantal spoelkoppen werd daarom nader onderzocht. Ter illustratie zijn hieruit twee spoelkoppen gekozen die de geconstateerde verschijnselen duidelijk demonstreerden. De ene is de reeds in het eerste deel van deze mededeling genoemde spoelkop A. De andere kop zal verder worden aangeduid als spoelkop G. De hoofdafmetingen van deze koppen en van de proeffilters waarin zij werden onderzocht, zijn in afb. 1a en 1b weergegeven. Het proeffiltertje voor spoelkop G is gebruikt om op snelle wijze een groot aantal oriënterende metingen uit te voeren. Het heeft echter maar ruimte voor één spoelkop en de dikte van het zandbed is gering. Voor de bestudering van de invloed van het aantal koppen per m^2 werd daarom gebruik gemaakt van het grotere filter met koppen van het type A, dat ook voor het eerste deel van het onderzoek diende. Tenslotte werden in dit filter ook de overige invloeden nog

Afb. 1a Hoofdafmetingen van de beproefde spoelkoppen (maten in mm)

Links: spoelkop A, 32 spleten, ca. $14,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$; spleetoppervlak ca. 230 mm^2

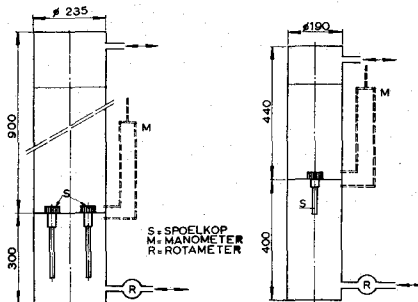
Rechts: spoelkop G, 1 spleet $\phi 50 \times 0,5 \text{ mm}^2$, 1 spleet $\phi 50 \times 0,25 \text{ mm}^2$, 32 spleten $10,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$; spleetoppervlak 286 mm^2



Afb. 1b Hoofdafmetingen van de gebruikte filters (maten in mm)

Links: filteroppervlak $4,35 \text{ dm}^2$; 23, 46 of 69 koppen per m^2 ; spoelkoptype A

Rechts: filteroppervlak $2,84 \text{ dm}^2$; 35 koppen per m^2 ; spoelkoptype G



eens nauwkeurig bestudeerd. Beide filters waren voorzien van een manometerinstallatie voor de weerstandsmeting en een rotameter voor de bepaling van de doorgestroomde hoeveelheid water per tijdseenheid.

3. Uitgevoerde metingen

Een overzicht van de hier besproken metingen is gegeven in tabel 1. Het debiet werd voor de filtratietoestand gevarieerd van 0-ca. 12 l/min per kop voor spoelkop A en van $0-15$ à 18 l/min per kop voor spoelkop G. De spoeltoestand werd gemeten van 0 tot 20 l/min per kop. Beide toestanden werden onderzocht voor toe- en afnemend debiet, waarbij, zoals reeds bekend, de heen- en teruggaande krommen voor de spoeltoestand een hysteresislus vormden. Met het oog op de spreiding in het instabiele overgangsgebied werden de spoelkrommen telkens 2 of 3 maal bepaald.

Uit tabel 1 blijkt dat in elke serie vergelijkingsmetingen telkens slechts één van de genoemde factoren is gewijzigd. Voor het zand is een nadere specificatie in tabel 2 gegeven. Hierin zijn behalve de werkzame of effectieve korreldiameter (10% grens) nog vermeld de gemiddelde diameter (60% grens), de gelijkmatigheidscoëfficiënt (gemidd. ϕ : werkz. ϕ) en de werkelijke

TABEL 1
Overzicht van de metingen

Omschrijving	Invloed van							
	korrelafm.		hoogte bed		inklinken		aantal koppen/m²	
spoelkoptype	G		A		A		A	
filterdiameter in mm	190		235		235		235	
watertemperatuur in °C	14,0		15,5		17,5		17,5	
resultaten gegeven in	afb. 2		afb. 3		afb. 4		afb. 5	
werkzame korreldiam. in mm	0,86	1,37	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
zandbedhoogte in cm	30	30	30	70	70	70	70	70
bed al of niet ingeklonken	ja	ja	ja	ja	ja	neen	ja	ja
aantal spoelkoppen per m²	35	35	23	23	23	23	23	69

korrelafmetingen waartussen 90% van het materiaal ligt. De capaciteit van de installatie was nu — in tegenstelling tot het eerste deel van het onderzoek — zo groot, dat het instabiele gebied volledig kon worden gemeten. Daardoor kon een betere indruk van het verloop van de krommen in en boven dit gebied (expansie) worden verkregen dan tijdens de in het eerste deel van dit onderzoek uitgevoerde metingen.

TABEL 2
Specificatie van de zandafmetingen

werkzame korreldiameter (d_w)	0,86 mm	1,37 mm
gemiddelde korreldiameter	1,12 mm	1,64 mm
gelijkmatigheidscoëfficiënt	1,30	1,19
korrelvariatie (voor 90% v.h. zand)	0,75 - 1,50 mm	1,30 - 2,00 mm

Om de invloed van het verschil in inklinking op de andere factoren zoveel mogelijk te elimineren en om goed reproduceerbare resultaten te verkrijgen, werd het bed bij de beoordeling van die factoren vóór het begin van elke meetserie door trillen van het filter telkens tot een zelfde beginwaarde ingeklonken. Opgemerkt zij, dat de mate van inklinken in de praktijk in het algemeen kleiner zal zijn en daar o.a. afhankelijk is van de gegeven expansie, het slib en de wijze waarop de spoelperiode wordt beëindigd (langzaam of snel, met of zonder lucht).

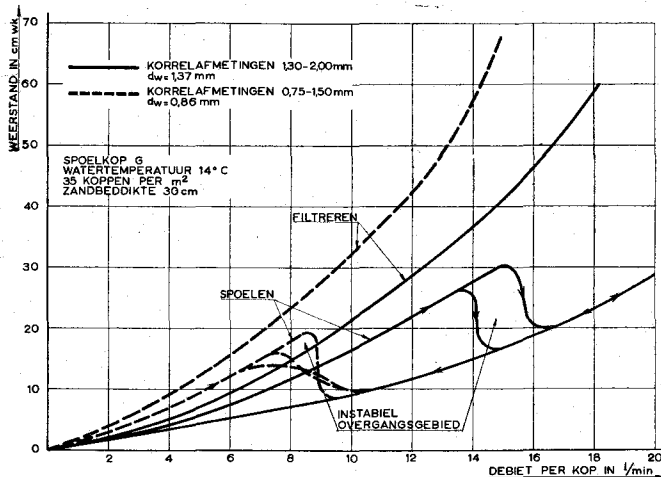
De weerstand W is, evenals in het eerste deel, uitgedrukt in cm wk en uitgezet als functie van het debiet Q per spoelkop in l/min.

4. Beschouwing van de resultaten

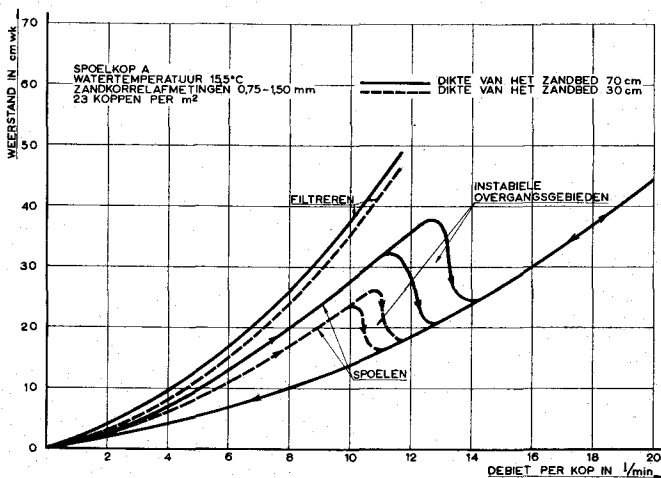
4.1. Invloed van de korrelgrootte (afb. 2)

Uit een vergelijking van de resultaten voor verschillende korrelgrootte blijkt, dat de spoelkopweerstand bij filtratie groter wordt naarmate fijner zand wordt toegepast. Tijdens het spoelen is de weerstand bij gebruik van fijn zand groter dan voor grof zand, zolang het bed niet is geëxpandeerd. De weerstandsvergroting wordt teweegebracht door een intensievere blokkering van de spleten in de spoelkop bij toepassing van fijnere korrels. Ten gevolge van de eerder optredende expansie bij toepassing van een fijnere korrel, valt de weerstand bij toenemend debiet echter op een vroeger tijdstip af, waardoor deze kleiner wordt dan bij gebruik van een grote korrel.

De geschetste invloed is groot. Het verschil tussen soorten zand met werkzame korrelgrootten van 0,86 mm en 1,37 mm kan tot verschillen in de spoelkopweerstand van meer dan 50% leiden.



Afb. 2 Invloed van de korrelgrootte van het zand

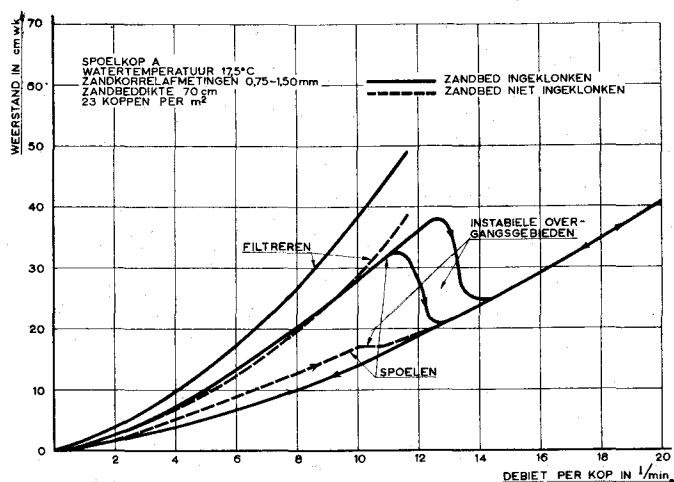


Afb. 3 Invloed van de dikte van het zandbed

4.2. Invloed van de dikte van het zandbed (afb. 3)

Door vergroting van de dikte van het zandbed blijkt de spoelkopweerstand zowel tijdens filtreren als spoelen iets te worden vergroot. Naarmate het zandbed dikker is worden de zandkorrels blijkbaar vaster tegen de spleten van de spoelkop gedrukt. Bij het spoelen treedt het instabiele gebied tevens bij een iets groter debiet op.

Een vergroting van de dikte van het zandbed van 30 tot 70 cm gaf in het hier besproken geval een verhoging van de spoelkopweerstand van 10 à 20%. Uit met andere spoelkoppen verrichte



Afb. 4 Invloed van het inklinken van het zand

metingen over de invloed van de dikte van het bed is gebleken dat de invloed van kleine verschillen in dikte bij de gebruikelijke beddikte gering is.

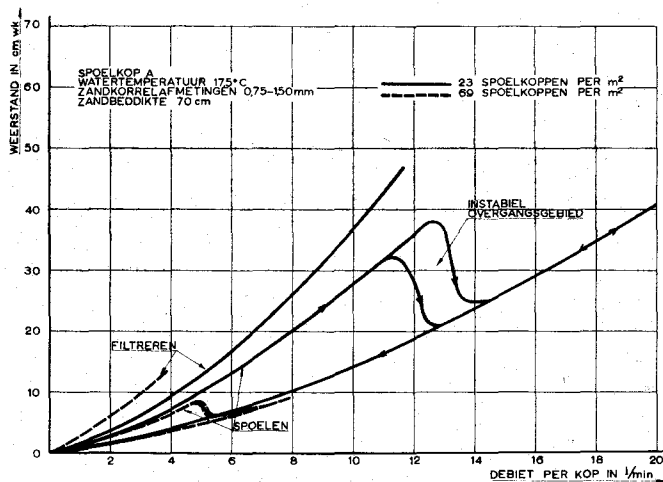
4.3. Invloed van het inklinken van het bed (afb. 4)

Naarmate het bed meer is ingeklonken is de weerstand groter en het instabiele gebied treedt eerst bij een groter debiet op. Het verschijnsel laat zich eenvoudig verklaren. Naarmate de inklinking groter is treedt nl. een vastere aandrukking van het zand tegen de spleten van de spoelkop op. De invloed van de inklinking van het bed kan groot zijn doch dit hangt uiteraard af van de mate van inklinken. In de onderzochte gevallen werden na inklinken weerstanden gemeten die tot meer dan 50% groter waren dan de weerstanden die zonder inklinking van het bed werden gemeten.

Naarmate de inklinking minder sterk is, blijkt de hysteresislus kleiner te zijn. Dit betekent dat de invloed van de overige factoren, welke invloed voor de spoeltoestand afhangt van de grootte van deze lus, kleiner zal zijn naarmate de inklinking kleiner is. De wederzijdse beïnvloeding van de besproken factoren is echter niet nader onderzocht.

4.4. Invloed van het aantal spoelkoppen per m² (afb. 5).

De weerstand van de spoelkop, gerekend bij een zelfde debiet per kop, is bij het filtreren groter naarmate het aantal koppen per m² groter is. Dit ligt voor de hand omdat de filtratiesnelheid



Afb. 5 Invloed van het aantal spoelkoppen per m²

in het zandbed groter wordt als het aantal koppen (bij gelijkblijvend debiet per kop) toeneemt, waardoor dus het zandbed vaster wordt aangedrukt. De omvang van deze invloed hangt vanzelfsprekend af van het beschouwde verschil in aantal koppen per m². In het hier gegeven geval wordt de spoelkopweerstand bij vermeerdering van het aantal koppen van 23 tot 69 per m², *gerekend bij een zelfde debiet per kop*, voor de filtratietoestand met ca. 50% verhoogd.

Uit de resultaten kan verder worden afgeleid dat een vermindering van het aantal spoelkoppen bij *gelijkblijvende filtratiesnelheid* een kleinere weerstandsverhoging geeft dan men volgens de weerstandskromme van het oorspronkelijke (grotere) aantal spoelkoppen per m² zou verwachten.

Bij het spoelen werkt het effect in tegengestelde zin. Bij vergroting van de spoelsnelheid door toepassing van een groter aantal koppen (bij gelijkblijvend debiet per kop) wordt het zandbed minder vast tegen de spoelkoppen aangedrukt, als gevolg waarvan de spoelkopweerstand kleiner wordt. Verhoging van de spoelsnelheid betekent echter ook een eerder optreden van de expansie en dus een verschuiving van het daarmee samenhangende instabiele gebied. Bij het spoelen ligt het effect in hoofdzaak in de verschuiving van dit instabiele gebied. Daar geeft een vermindering van het aantal spoelkoppen van 69 tot 23 stuks per m², weer *gerekend bij een zelfde debiet per kop*, weerstandsverhogingen tot ca. 100% te zien.

Uit de resultaten kan tenslotte nog worden afgeleid dat een

vermindering van het aantal spoelkoppen bij *gelijkblijvende spoelsnelheid* een grotere weerstandsverhoging geeft dan de weerstandskromme van het oorspronkelijke (grotere) aantal spoelkoppen doet verwachten.

5. Conclusies

- a. De korrelgrootte van het zandbed is van grote invloed op de weerstand van de spoelkop. Naarmate de korrel groter is, is de weerstand zowel bij filtreren als spoelen van het niet geëxpandeerde bed kleiner; het instabiele gebied treedt bij een groter debiet per kop op.¹
- b. Een vergroting van de dikte van het zandbed doet de spoelkopweerstand toenemen. Deze invloed is niet groot.
- c. Naarmate het bed meer is ingeklonken, is de spoelkopweerstand groter en het instabiele gebied treedt bij een groter debiet per kop op. Bij sterke inklinking kan deze factor van grote invloed op de weerstand zijn.
- d. Een wijziging van het aantal spoelkoppen per m² bij gelijkblijvend debiet per kop veroorzaakt een verandering van de spoelkopweerstand als gevolg van de hiermee gepaard gaande snelheidsveranderingen in het zandbed. Vergroting van het aantal spoelkoppen geeft bij filtreren een weerstandsvergroting, bij spoelen een weerstandsverlaging. Vooral de verschuiving van het instabiele gebied naar een kleiner debiet per kop kan grote verschillen opleveren.
- e. Naarmate de inklinking minder sterk is, is de hysteresislus in de spoelkromme kleiner.
- f. Naarmate de inklinking minder sterk is, is de invloed van de drie andere factoren op het verloop van de weerstandskromme voor spoelen kleiner als gevolg van het onder e genoemde verschijnsel.

¹ Vgl. conclusie o. uit deel I van deze mededeling.

Januari 1961

SAMENVATTING

van

*Mededeling no 3 van de Commissie Filterconstructies (Cofico)
van het Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen N.V. KIWA*

„Weerstandsmetingen aan filterspoelkoppen”

Een beschouwing wordt gegeven over de gewenste waarde van het drukverlies dat optreedt bij in de bodem van snelfilters geplaatste spoelkoppen. De resultaten van weerstandsmetingen aan 2 spoelkoppen van verschillend type worden geanalyseerd. De totale weerstand blijkt voor een groot deel te worden gevormd door het filterzand, dat een blokkering van de spleten in de spoelkop veroorzaakt. Bij gelijke snelheid is de weerstand bij spoelen kleiner dan die bij filtreren. De weerstand W , als functie van het debiet Q , vertoont bij het spoelen een hysteresis als gevolg van de verschillende toestanden (mate van samendrukking of expansie) waarin het bed zich kan bevinden.

De invloed die het aantal spoelkoppen per m^2 , de korrelgrootte, de dikte en de mate van inklinken van het filterbed op de weerstand van de spoelkoppen hebben, is afzonderlijk onderzocht. Wijziging van deze factoren, kan, mede als gevolg van de hiermee gepaard gaande verandering van de hysteresis, van belangrijke invloed op de weerstand zijn.

De uitgevoerde metingen geven aanleiding tot de volgende conclusies.

Algemene conclusies

a. Het is zonder meer niet mogelijk een gewenste waarde voor de spoelkopweerstand aan te geven. Naar een kleine weerstand dient te worden gestreefd indien de primaire lucht- en waterverdeling vóór de spoelkoppen gelijkmatig is en verder ook geen onregelmatigheden in de verdeelorganen te verwachten zijn.

De invloed van optredende onregelmatigheden kan worden verkleind door vergroting van de spoelkopweerstand.

b. De spoelkopweerstand wordt behalve door de spoelkopvorm en het debiet per kop ook bepaald door de korrelgrootte, de dikte en de mate van inklinken van het zandbed, de stromingsrichting (filtreren of spoelen) en het aantal spoelkoppen dat per m^2 wordt toegepast.

c. De metingen zijn uitgevoerd met waterspoeling zonder lucht en

in hoofdzaak met schoon zand dat een werkzame (10% grens) korreldiameter van 0,85 mm had. De zandbeddikte bedroeg als regel ca. 65 cm. Er werden enkele typen spoelkoppen onderzocht, meestal in een toestand overeenkomende met een dichtheid van 23 koppen per m². Bij toepassing van soortgelijke andere typen, een ander zandbed en een andere dichtheid zullen uiteraard afwijkende resultaten worden verkregen, doch deze zullen een zelfde karakter vertonen.

d. Proeven uitgevoerd met vervuild zand gaven, als gevolg van plotseling optredende toestandsveranderingen, een grote spreiding ten opzichte van de met schoon zand gemeten krommen. Deze laatste worden evenwel verondersteld een redelijke maatstaf te vormen voor de beoordeling van de toestand in een goed werkend filter met vervuild zand.

e. De spoelkopweerstand is opgebouwd uit de inwendige weerstand en de in- of uittreeweerstand ten gevolge van de blokkering van de spoelkopspleten door het filterzand. De inwendige weerstand wordt voor een groot deel bepaald door de z.g. vertragsingsverliezen. Volgens globale berekening bedroegen deze laatste voor een bepaald geval in de spoeltoestand ruim een derde deel van de totale weerstand. Ook de door het zand veroorzaakte uittreeweerstand vormde ca. een derde van de weerstand.

f. In het verband $W = a Q^x$ bleek de exponent te variëren van 1,2 voor lage waarden van Q (Q tot 3 l/min.) tot 1,5 voor hogere waarden van Q .

Conclusies betreffende het eerste deel

Toestand zonder zand

g. De stromingsrichting heeft voor de onderzochte typen weinig invloed op de weerstand. De koppen vertonen slechts een betrekkelijk klein verschil in weerstand.

h. Vroeger uitgevoerde metingen met andere spoelkoppen geven soortgelijke resultaten.

Filtreren (toestand met zand)

i. Door de intreeweerstand wordt de spoelkopweerstand ten opzichte van de toestand zonder zand in het gebied van $Q = 1-3$ l/min. belangrijk verhoogd en wel met een factor 5 à 10 voor spoelkoptype A en ca. 3 voor type B.

j. Spoelkop A heeft, vermoedelijk als gevolg van de convergerende ingang bij de spleten van deze kop voor filtreren met zand, een grotere weerstand dan type B.

k. De weerstand ligt, afhankelijk van de toegepaste filtratiesnel-

heid en het aantal koppen voor $Q = 1-3$ l/min. in de hier onderzochte gevallen tussen 1 en 9 cm wk.

Spoelen (toestand met zand)

l. Door de uittreeweerstand wordt de spoelkopweerstand ten opzichte van de toestand zonder zand verhoogd doch — en dit geldt in het bijzonder voor type A — niet in die mate als de filtratieweerstand door de intreeweerstand wordt verhoogd. In het gebied van $Q = 2-10$ l/min. is de weerstand 1,3 à 2,5 maal zo groot als voor de toestand zonder zand. De weerstand is voor beide koppen ongeveer gelijk.

m. Voor spoelkop A is de uittreeweerstand belangrijk kleiner dan de intreeweerstand, vermoedelijk omdat de korrels bij het spoelen uit de naar buiten divergerende spleten worden weggedrukt ten gevolge van de daar heersende hoge snelheden.

n. De weerstandskrommen vertonen voor de spoeltoestand een duidelijke hysteresis. De weerstand is sterk afhankelijk van de toestand van het bed, welke toestand (expansie) o.a. afhangt van de zandkorrelgrootte en de spoelsnelheid (aantal koppen per m²).

o. Wordt een enigszins vastliggend bed door vergroting van de spoelsnelheid langzamerhand tot expansie gebracht, dan treedt op een gegeven moment een instabiele toestand op die een discontinue overgang vormt naar een kromme van lagere weerstand, welke lagere weerstand zich handhaaft bij geleidelijke vermindering van het debiet.

p. Het onder *o* genoemde verschijnsel kan worden verklaard uit de bij expansie optredende gebiedjes van vrijere doortocht in de onmiddellijke omgeving van de spleten, die zich als gevolg van de hoge uittreesnelheden nog geruime tijd kunnen handhaven bij vermindering van de spoelsnelheid.

q. De weerstand ligt, afhankelijk van de toegepaste spoelsnelheid en het aantal koppen voor $Q = 2-10$ l/min. in de hier onderzochte gevallen tussen 2 en 22 cm wk.

Conclusies betreffende het tweede deel

De invloed van enkele kenmerkende grootheden

r. De korrelgrootte van het zandbed is van grote invloed op de weerstand van de spoelkop. Naarmate de korrel groter is, is de weerstand zowel bij filtreren als spoelen van het niet geëxpandeerde bed kleiner, terwijl het instabiele gebied (vgl. concl. *o*) bij een groter debiet per kop optreedt.

s. Een vergroting van de dikte van het zandbed doet de spoelkopweerstand toenemen. Deze invloed is niet groot.

t. Naarmate het bed meer is ingeklonken, is de spoelkopweerstand groter en het instabiele gebied treedt bij een groter debiet per kop op. Bij sterke inklinking kan deze factor van grote invloed op de weerstand zijn.

u. Een wijziging van het aantal spoelkoppen per m^2 bij gelijkblijvend debiet per kop veroorzaakt een verandering van de spoelkopweerstand als gevolg van de hiermee gepaard gaande snelheidsveranderingen in het zandbed. Vergroting van het aantal spoelkoppen geeft bij filtreren een weerstandsvergroting, bij spoelen een weerstandsverlaging. Vooral de verschuiving van het instabiele gebied naar een kleiner debiet per kop kan grote verschillen opleveren.

v. Naarmate de inklinking minder sterk is, is de hysteresislus in de spoelkromme kleiner.

w. Naarmate de inklinking minder sterk is, is de invloed van de drie andere factoren op het verloop van de weerstandskromme voor spoelen kleiner als gevolg van het onder v genoemde verschijnsel.

SUMMARY

of

Communication no 3 of the Committee for the Construction of Filters (Cofico) of the Institution for the Testing of Waterworks Materials Ltd. KIWA

„Measurements of pressure loss in filternozzles”

A treatise is given on the desirable value of the pressure loss occurring in filternozzles placed in the bottom of rapid filters. The results of the measurements of the pressure loss in some filternozzles of different types are analysed. The total pressure loss proves largely to be formed by the filtersand causing a blocking up of the slits in the filternozzle. Backwashing gives a smaller pressure loss than filtering with the same velocity. The headloss W as a function of the rate of flow Q shows a hysteresis in backwashing as a result of the different conditions (degree of compression or expansion) in which the bed may be.

The influence of the number of filternozzles per square metre, the grainsize, the depth and the setting of the filterbed on the pressure loss of the filternozzles has separately been examined. Alternation of these factors may influence the pressure loss considerably, partly in consequence of the alternation of the hysteresis attending it.

The measurements carried out lead to the following conclusions:

General conclusions

a. One cannot, straight off, state a desirable value for the pressure loss of the filternozzle. A small pressure loss should be aimed at, if the primary air and water distribution before the filternozzles is even and farther on no irregularities in the distribution system are to be expected either.

The influence of occurring irregularities can be reduced by increasing the pressure loss of the filternozzle.

b. Besides by the form of the filternozzle and the rate of flow per nozzle the pressure loss is also determined by the grainsize, the depth and the setting of the sandbed, the direction of flow (filtering or backwashing) and the number of nozzles applied per square metre.

c. The measurements were performed by means of backwashing with water without air and mainly with clean sand of an effective

(10% limit) grainsize of 0,85 mm. As a rule the depth of the sandbed was c. 65 cm. Some types of nozzles were examined, most of them in such a condition that the density per square metre was 23. When using other types of the same kind, a different sandbed and a different density, deviating results will naturally be gained, but they will prove to be of the same character.

d. Tests carried out with polluted sand showed curves which largely diverged from those with clean sand as a result of changes in the conditions suddenly occurring. The latter, however, are supposed to constitute a reasonable standard for judging conditions in a well functioning filter with polluted sand.

e. The pressure loss of the filternozzle has been built up from the inner pressure loss and the in- or outflow resistance resulting from the blocking up of the nozzle-slits by the filtersand. For the most part the inner resistance is determined by the so called „slowing-down losses”. According to a rough calculation the latter amounted to more than a third of the total resistance for a certain case with backwashing. The outflow resistance caused by the sand also formed one third of the total loss.

f. In the equation $W = a Q^x$ the exponent proved to range from 1,2 for low values of Q (Q up to 3 l/min) to 1,5 for higher values of Q .

Conclusions relating to the First Part

State of things without sand

g. The resistance is little affected by the direction of flow in the types examined. It appears that the nozzles have only small differences of resistance.

h. Measurements carried out at an earlier date with other nozzles gave similar results.

Filtrating (state of things with sand)

i. As compared with the state of things without sand, the pressure loss of the filter nozzle is considerably raised by the inflow resistance, the factor being 5 to 10 in the case of nozzle type A and c. 3 in that of type B.

j. When filtrating with sand, nozzle A has, presumably by the converging entrance, a greater head-loss between the slits than type B.

k. Dependent on the velocity of filtration and the number of nozzles applied the headloss for $Q = 1-3$ l/min. is between 1 and 9 cm wc in the cases mentioned here.

Backwashing (state of things with sand)

l. As compared with the state of things without sand the pressure loss of the nozzle is raised by the outflow loss; but — and this holds good particularly in the case of type B — not in the same degree in which the filtration-headloss is raised by the inflow resistance. In the area of $Q = 2-10$ l/min. the headloss is 1,3 to 2,5 times as large as that without sand. The headloss is broadly the same for the two nozzles.

m. The outflow resistance of nozzle A is considerably smaller than the inflow loss, presumably because the grains are pushed away through the slits diverging outwards in consequence of the high speed in the nozzles during backwashing.

n. When backwashing the headloss-curves display a clear hysteresis. The headloss is strongly dependent on the condition of the bed, which condition (expansion) depends among other things on the sandgrainsize and the washwater velocity (number of nozzles per square metre).

o. If a somewhat settled bed is gradually brought to expansion by quickening of the washwater velocity, an instable situation will set in at a given moment, forming a discontinuous transition to a curve of less resistance, which is maintained during a gradual slackening of the rate of flow.

p. The phenomenon mentioned under *o* can be explained from the occurrence, during the expansion, of small areas of freer passage in the immediate surroundings of the slits, which in consequence of the high outflow velocity can maintain themselves for a considerable time while the washwater velocity is slackening.

q. In the cases examined here, the resistance for $Q = 2-10$ l/min is between 2 and 22 cm wc., dependent on the washwater velocity and the number of nozzles applied.

Conclusions relating to the Second Part

The influence of some characteristic magnitudes

r. The grainsize of the sandbed greatly influences the resistance of the nozzle. In proportion as the grain is larger, the resistance is smaller in the case of filtering as well as in backwashing of the non-expanded bed, the instable region (cp. concl. *o.*) occurring with a greater rate of flow per nozzle.

s. Increase of the depth of the sandbed increases the pressure loss of the filternozzle. This influence is not great.

t. According as the bed is more compressed the pressure loss of the filternozzle is greater and the instable region occurs with a

greater rate of flow per nozzle. When strongly compressed this factor may be of great influence on the resistance.

u. A change in the number of nozzles per square metre with an unaltered rate of flow per nozzle causes a change in the pressure loss of the filternozzle in consequence of the changes of velocity in the sandbed attending it. Increase of the number of nozzles causes an increase of headloss in filtering, a decrease in backwashing. Especially a moving of the instable region to a smaller rate of flow per nozzle may give great differences.

v. According as the compression is less strong the hysteresisloop in the curve is smaller.

w. According as the compression is less strong, the effect of the three other factors on the course of the headloss-curve for backwashing is smaller, consequent on the phenomenon mentioned under v.

RÉSUMÉ

de

*la Communication no 3 de la Commission Construction des
Filtres (Cofico) de l'Institut pour la Réception et la Vérification
du Matériel de Services de Distribution d'Eau S.A. KIWA*

„Détermination des pertes de charge de crépines”

La perte de charge recommandable des crépines montées dans le fond de support des filtres à sable rapides est discutée. Les résultats de la détermination des pertes de charge de quelques crépines de types différents sont analysés. La perte de charge en plus grande partie est causée par le sable de filtration, qui est la cause d'un embouteillage des fentes de la crépine. Au même débit pendant le rinçage du sable la perte de charge est plus petite que pendant la filtration. La perte de charge W comme fonction du débit Q pendant le rinçage montre un „hystérésis” comme suite de l'état de la couche filtrante (degré de compression ou expansion).

On a examiné séparément l'influence que le nombre de crépines par m^2 , la granulométrie, l'épaisseur et le degré de compression du lit de filtre ont sur la perte de charge des crépines. Il se peut que la modification de ses facteurs aussi bien par suite du changement de l'hystérésis dont elle est accompagnée, donne une influence considérable sur la perte de charge.

Les résultats mènent aux conclusions suivantes.

Conclusions générales

- a.* Il est impossible d'indiquer une perte de charge recommandable pour les crépines. Il faut appliquer une perte de charge minimale au cas que la distribution de l'air et de l'eau avant les crépines soit régulière et que l'on ne s'attende pas à des dérangements causés par les éléments de distribution; l'influence exercée par ces dérangements sur la distribution de l'air et de l'eau peut être diminuée en augmentant la perte de charge des crépines.
- b.* La perte de charge de la crépine est déterminée non seulement par la forme de celle-ci et le débit d'eau par la crépine, mais également par la granulométrie, l'épaisseur et le degré de compression du lit de sable, la direction du courant d'eau (filtration ou rinçage) et le nombre de crépines par m^2 de la coupe transversale du filtre.

c. Les essais sont exécutés pendant un rinçage sans air et principalement avec du sable propre d'un diamètre des grains actif (10% limite) de 0,85 mm. Le plus souvent l'épaisseur de la couche filtrante était de 65 cm environ. On a examiné quelques types de crépines, essentiellement en nombre de 23 par m². En appliquant d'autres types de crépines semblables, un autre lit de sable et un autre nombre de crépines on aura des résultats différents, bien que du même caractère.

d. Les essais exécutés avec du sable impropre indiquaient comme suite aux changements brusques des conditions de l'essai, une grande divergence en comparant avec les courbes obtenus avec du sable propre. Ces courbes cependant sont considérées comme une base suffisante pour critiquer la condition d'un filtre en rinçage normal avec un médium de filtration impropre.

e. La perte de charge de la crépine est composée de la perte de charge intérieur et celles d'entrée et de sortie, causées par l'embouteillage des fentes de la crépine par le sable du filtre. La perte de charge intérieur en grande partie dépend des „résistances de ralentissement” du liquide. Par un calcul sommaire on déterminait ces dernières dans un cas spécial à un tiers de la perte de charge totale. La perte de charge à la sortie, causée par le sable se montait également à un tiers de la perte de charge totale.

f. Dans le rapport $W = aQ^x$ l'exponent variait entre 1,2 pour les valeurs de Q minimales (Q jusqu' à 3 l/min.) et 1,5 pour celles maximales de Q.

Conclusions concernant la première partie des essais

La condition du filtre sans sable

g. La direction du courant d'eau a peu d'influence sur la perte de charge de la crépine. Les types examinés démontrent une différence très limitée de la perte de charge.

h. Des essais exécutés à une date antérieure ont eu des résultats pareils.

La condition du filtre rempli de sable pendant la filtration

i. A cause de la perte de charge à l'entrée de la crépine la perte de charge augmente considérablement pour $Q = 1-3$ l/min. en la comparant avec celle d'un filtre vide. La perte de charge augmente 5-10 fois pour la crépine du type A et 3 fois pour la crépine du type B.

j. La crépine A probablement à cause de la forme convergente à l'entrée des fentes démontre pendant la filtration avec du sable une perte de charge plus élevée que celle de la crépine du type B.

k. Dans les cas examinés la perte de charge est 1-9 cm, exprimée en hauteur de la colonne d'eau pour $Q = 1-3$ l/min.

Le rinçage du filtre rempli de sable

l. Par la perte de charge causée par le sable à la sortie des fentes, la perte de charge totale de la crépine est augmentée en la comparant avec celle d'un filtre vide. Cependant pas à un tel degré que celle qui est observée pendant la filtration et qui est augmentée par la grande perte de charge causée par le sable à l'entrée des fentes de la crépine, spécialement au cas que l'on utilise la crépine du type A. Pour $Q = 2-10$ l/min. la perte de charge est 1,3-2,5 fois plus grande que celle d'un filtre vide. La perte de charge est à peu près égale pour les deux crépines.

m. Pour la crépine A la perte de charge à la sortie (rinçage) est considérablement plus petite que celle à l'entrée (filtration), probablement parce que pendant la rinçage les grains du sable sont expulsés des fentes divergentes qui s'amplifient dans la direction du courant, par les grandes vitesses élevées à cet endroit.

n. Les courbes indiquant les pertes de charge démontrent une „hystérésis” évident pendant le rinçage. La perte de charge dépend de la condition de la couche de sable. L'Expansion de celle-ci dépend entre autres de sa granulométrie et de la vitesse du courant d'eau (en rapport avec le nombre de crépines par m²).

o. Au cas que la couche de filtration qui s'est posée au préalable se dilate lentement par le courant d'eau de rinçage, à certain moment la couche se trouve dans une condition labile, qui se prolonge irrégulièrement jusqu' au moment où la perte de charge de la couche de filtration atteint la courbe indiquant une perte minimale. Cette perte de charge se maintient encore si l'on diminue graduellement le débit d'eau de rinçage.

p. On explique ce phénomène par la présence aux environs des fentes de la crépine de domaines vides dans le sable de peu de résistance, qui peuvent se maintenir longtemps à cause de la vitesse du courant d'eau élevée à la sortie de la crépine, même en diminuant la vitesse de rinçage.

q. Dans les cas examinés la perte de charge est 2-22 cm de pression d'eau pour $Q = 2-10$ l/min.

Conclusions concernant la deuxième partie des essais

L'influence de quelques quantités caractéristiques

r. La granulométrie du lit de sable a une grande influence sur la perte de charge de la crépine. Plus le grain est grand, plus la perte de charge aussi bien pour la filtration que pour le rinçage

du lit non expansé est petite, tandis que la région labile (conférez conclusion o.) se produit, quand le débit d'eau par crépine est plus grand.

s. Une agrandissement de l'épaisseur du lit de sable augmente la perte de charge de la crépine. Cette influence n'est pas grande.

t. A mesure que le lit est plus comprimé, la perte de charge de la crépine est plus grande et la région labile se produit à un débit plus grand par crépine. Quand la compression est plus forte, ce facteur peut avoir une grande influence sur la perte de charge.

u. Une modification du nombre de crépines par m^2 à un débit pareil par crépine cause un changement de la perte de charge de la crépine par suite des changements de vitesse dans le lit de sable dont il est accompagné. Une augmentation du nombre de crépines cause lors de la filtration une augmentation de la perte de charge, lors du rinçage, une diminution de la perte de charge. Surtout le déplacement de la région labile à un débit plus petit par crépine peut donner des grandes différences.

v. A mesure que la compression est moins forte, l'hystérésis dans la courbe de rinçage est plus petite.

w. C'est par suite du phénomène nommé sous v. que, à mesure que la compression est moins forte, l'influence des trois autres facteurs sur la perte de charge du rinçage est plus petite.

ZUSAMMENFASSUNG

von

*Mitteilung Nr. 3 des Ausschusses für Filterkonstruktionen (Cofico)
des Prüfungsinstitutes für Wasserleitungartikel KIWA A.G.*

„Widerstandsmessungen an Filterdüsen“

Es wird eine Betrachtung über den gewünschten Wert des Druckverlusts, der bei im Boden von Schnellfiltern angebrachten Filterdüsen auftritt, gegeben. Die Resultate der Widerstandsmessungen an Filterdüsen verschiedener Art werden analysiert. Es zeigt sich dabei, dass der totale Widerstand grösstenteils durch den Filtersand, der eine Blockierung der Spalten in den Düsen verursacht, gebildet wird. Bei gleicher Geschwindigkeit ist der Widerstand beim Spülen kleiner als derjenige beim Filtrieren. Der Widerstand W als Funktion der Leistung Q zeigt beim Spülen eine Hysteresis infolge der verschiedenen Zustände (Grösse des Zusammendrückens oder der Dehnung), worin das Bett sich befinden kann.

Der Einfluss, den die Zahl der Düsenköpfe pro m^2 , die Körnung, die Schichthöhe und die Grösse der Setzung des Filterbettes auf den Widerstand der Filterdüsen haben, wurde einzeln untersucht. Veränderung dieser Faktoren kann, infolge der damit zusammenhängenden Veränderung der Hysteresis, von bedeutenden Einfluss auf den Widerstand sein.

Die ausgeführten Messungen veranlassen zu den folgenden Schlussfolgerungen.

Allgemeine Folgerungen

- a. Es ist nicht ohne weiteres möglich einen gewünschten Wert für den Düsenwiderstand anzugeben. Es muss ein kleiner Widerstand angestrebt werden, wenn die primäre Luft- und Wasserverteilung von den Düsen gleichmässig ist und weiter auch keine Unregelmässigkeiten in den Verteilungsorganen zu erwarten sind. Der Einfluss von auftretenden Unregelmässigkeiten kann durch Vergrösserung des Düsenwiderstandes verkleinert werden.
- b. Der Düsenwiderstand wird ausser durch die Düsenkopfform und die Leistung pro Kopf, auch durch die Korngrösse, die Schichthöhe und die Grösse der Setzung des Sandbettes, die Durchflussrichtung (Filtrieren oder Spülen) und die Zahl der Düsenköpfe, die pro m^2 angewandt wird, bestimmt.

c. Die Messungen sind mit Wasserpülung ohne Luft und hauptsächlich in einem Filter mit sauberem Sand, der einen wirksamen (10% Grenze) Korndurchmesser von 0,85 mm hatte, ausgeführt worden. Die Schichthöhe des Sandbettes betrug ungefähr 65 cm. Es wurden einige Typen Düsenköpfe grösstenteils in einem Zustand entsprechend einer Dichte von 23 Köpfen pro m² untersucht. Bei Anwendung ähnlicher anderer Typen, anderen Sandbetts und einer anderen Dichte werden selbstverständlich abweichende Resultate erzielt werden; diese werden aber einen ähnlichen Charakter zeigen.

d. Versuche, die mit verunreinigtem Sand durchgeführt wurden, gaben infolge plötzlich auftretender Zustandveränderungen, eine grosse Streuung in Bezug auf die mit sauberem Sand gemessenen Kurven. Es wird jedoch angenommen, dass diese letzten Kurven einen guten Massstab für die Beurteilung des Zustandes in einem richtig arbeitenden Filter mit verschmutztem Sand bilden.

e. Der Düsenkopfwiderstand ist aus dem inneren Widerstand und dem Ein- oder Austrittswiderstand infolge der Blockierung von den Düsenkopfspalten durch den Filtersand aufgebaut worden. Der innerere Widerstand wird grösstenteils durch die sogenannten Verzögerungsverluste bestimmt. Nach ungefähren Berechnungen beliefen sich diese letzten für einen bestimmten Fall im Spülzustand auf mehr als ein Drittel des totalen Widerstandes. Auch der durch den Sand verursachte Austrittswiderstand bildete ca. ein Drittel des Widerstandes.

f. In der Gleichung $W = a Q^x$ zeigte sich, dass der Exponent von 1,2 für niedrige Werte von Q (Q bis 3 l/min.) bis 1,5 für höhere Werte von Q schwankt.

Folgerungen bezüglich des ersten Teiles

Zustand ohne Sand

g. Die Durchflussrichtung beeinflusst den Widerstand für die untersuchten Typen wenig. Die Köpfe zeigen nur einen verhältnismässig kleinen Widerstandsunterschied.

h. Früher ausgeführte Messungen mit anderen Düsenköpfen geben ähnliche Resultate.

Filtrieren (Zustand mit Sand)

i. Durch den Eintrittswiderstand wird der Düsenkopfwiderstand in Bezug auf den Zustand ohne Sand im Durchflussgebiet 1-3 l/min. bedeutend erhöht und zwar mit einem Faktor 5 à 10 für den Düsentyp A und ca. 3 für den Typ B.

j. Der Düsenkopf A hat, vermutlich infolge des konvergierenden

Einganges bei den Spalten dieses Kopfes beim Filtrieren mit Sand einen grösseren Widerstand als der Typ B.

k. Der Widerstand liegt, abhängig von der angewandten Filtrationsgeschwindigkeit und der Anzahl Köpfe für $Q = 1-3 \text{ l/min.}$ in den hier untersuchten Fällen zwischen 1 und 9 cm WS.

Spülen (Zustand mit Sand)

l. Durch den Austrittswiderstand wird der Düsenkopfwiderstand in Bezug auf den Zustand ohne Sand erhöht aber — und dies gilt besonders für den Typ A — nicht in dem Masse wie der Filtrationswiderstand durch den Eintrittswiderstand erhöht wird. Im Durchflussgebiet von $2-10 \text{ l/min.}$ ist der Widerstand 1,3 bis 2,5 Mal so gross wie für den Zustand ohne Sand. Der Widerstand ist für beide Köpfe ungefähr gleich.

m. Für die Filterdüse A ist der Austrittswiderstand bedeutend kleiner als der Eintrittswiderstand, wahrscheinlich weil die Körner während des Spülens aus den nach aussen divergierenden Spalten infolge der dort auftretenden hohen Geschwindigkeiten weggedrückt werden.

n. Die Widerstandskurven zeigen für den Spülzustand eine deutliche Hysteresis. Der Widerstand ist stark abhängig von dem Zustand des Bettes, welcher Zustand (Dehnung) unter andern von der Sandkörnergrösse und der Spülgeschwindigkeit (Anzahl Köpfe pro m^2) abhängt.

o. Wird ein einigermaßen festliegendes Bett durch Vergrösserung der Spülgeschwindigkeit allmählich zur Anhebung gebracht, dann tritt auf einmal ein instabiler Zustand auf, der einen diskontinuierlichen Übergang nach einer Kurve von niedrigerem Widerstand bildet; dieser niedrigere Widerstand wird sich bei allmählich fallender Leistung aufrechterhalten.

p. Die unter o genannte Erscheinung kann aus den bei der Hebung auftretenden kleinen Gebieten von freierem Durchfluss in der unmittelbaren Umgebung der Spalten, die sich infolge der hohen Austrittsgeschwindigkeiten noch geraume Zeit bei Abnahme der Spülgeschwindigkeit behaupten können, erklärt werden.

q. Der Widerstand liegt, abhängig von der angewandten Spülgeschwindigkeit und der Anzahl Köpfe, für $Q = 2-10 \text{ l/min.}$ in den hier untersuchten Fällen zwischen 2 und 22 cm WS.

Folgerungen bezüglich des zweiten Teiles

Der Einfluss einzelner kennzeichnender Grössen

r. Die Korngrösse des Filterbettes ist von grossem Einfluss auf den Widerstand der Filterdüse. Je grösser die Körnung ist, desto

kleiner ist der Widerstand, sowohl beim Filtrieren als beim Spülen des nicht ausgedehnten Bettes, während das labile Gebiet (vergleiche Folgerung c) bei einer grösseren Leistung pro Kopf auftritt. s. Eine Vergrösserung der Dicke des Filterbettes hat eine Zunahme des Düsenwiderstandes zur Folge. Dieser Einfluss ist jedoch nicht gross.

t. Je mehr das Filterbett gesetzt ist, desto grösser ist der Düsenwiderstand und desto grösser ist die Leistung pro Kopf bei der das instabile Gebiet auftritt. Bei grosser Setzung kann dieser Faktor von grossem Einfluss auf den Widerstand sein.

u. Eine Änderung der Anzahl Filterdüsen pro m^2 , bei gleichbleibender Leistung pro Kopf, verursacht eine Veränderung des Düsenwiderstandes in Folge der hiermit zusammenhängenden Geschwindigkeitsveränderungen im Filterbett. Vergrösserung der Anzahl Düsen hat beim Filtrieren eine Vergrösserung des Widerstandes, beim Spülen jedoch eine Verkleinerung desselben zur Folge. Vor allem die Verschiebung des instabilen Gebietes nach einer kleineren Leistung pro Kopf, kann grosse Unterschiede verursachen.

v. Je geringer die Setzung ist, desto kleiner ist die Hysteresisschleife.

w. Je kleiner die Setzung ist, desto geringer ist der Einfluss der anderen drei Faktoren auf den Verlauf der Widerstandskurve für Spülen, in Folge des unter v genannten Phänomens.