

Gunstige ervaringen met een proefinstallatie voor flotatie

Inleiding

Flotatie is in Nederland nog steeds een vrij onbekend proces. Dit ondanks enkele publicaties hierover [1, 2] en de toepassing ervan in het drinkwaterproductiebedrijf te Zevenbergen [2]. Nog steeds bestaan er over het flotatieproces bepaalde misverstanden zoals bijvoorbeeld de gedachte dat het duur is vanwege hoge energiekosten of dat men kan floteren onder vlokmiddeldosering. Van Melick [1] heeft de verschillende vormen van het proces beschreven en er tevens op



J. VAN PUFFELEN
Duinwaterleiding van 's-Gravenhage



P. L. BUIJINK
Duinwaterleiding van 's-Gravenhage

gewezen, dat de belangstelling voor flotatie sinds 1974 is gegroeid. De KIWA-speurwerksgroep 'Flotatie' is actief op dit punt. Het belangrijkste gedeelte van dit speurwerk wordt door de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage uitgevoerd met behulp van een semi-technische roefinstallatie voor ongeveer 15 l/s (50 m³/h) op het pompstation te Brakel.

Dit onderzoek, dat sinds 1976 gaande is, heeft geleid tot enkele optimalisaties aan het flotatieproces. Deze publicatie eoogt in het kort daar een weergave aan te geven. De gegevens zijn in detail vastgelegd in een vijftal rapporten [3] en als zodanig uitvoerig besproken in de verslaggroep 'Flotatie'. Een deel van de gegevens is ook gepresenteerd op het WSA congres in 1978 te Kyoto in Japan. Dit als discussiebijdrage naar aanleiding van de rapportering van het uitgebreide onderzoek in Engeland bij het Water Research Centre (WRC), dat sinds 1969 loopt. Dit Engelse onderzoek is voornamelijk vastgelegd in een vijftal technische rapporten [4]. Over flotatie is in Engeland ook een congres gehouden (juni 1976). Het rapport daarover [5] geeft vele voorbeelden van technische toepassingen van het flotatieproces ook bij de waterzuivering tot drinkwater. Vrijwel alle grote tot grote installaties zijn vooral in Scandinavië te vinden. In de afvalwatersector zijn er honderden technische installaties in bedrijf onder

andere ook voor slibindikking. In Nederland staan diverse installaties voor de zuivering van industrieel afvalwater opgesteld.

2. Doel van het flotatieproces bij de Duinwaterleiding

De Duinwaterleiding is in 1955 begonnen met de infiltratie in de duinen tussen Scheveningen en Wassenaar van voor-gefiltreerd Lekwater (Rijnwater). In het begin van de zestiger jaren werd reeds de wenselijkheid onderkend ten behoeve van deze infiltratie water van betere kwaliteit te gebruiken. De reden hiervoor was vooral de verslechterende kwaliteit van het Rijnwater.

Overmatige algengroei had een ernstige verslechtering van de waterkwaliteit in de duinplassen tot gevolg en leidde regelmatig tot tijdelijke, soms ernstige verstopping van de bodem.

Als boosdoener werd het steeds toenemend fosfaatgehalte van het infiltratiewater gezien. Nadat uit laboratoriumproeven was gebleken, dat het fosfaat uitstekend door coagulatie was te verwijderen werd in 1970 te Scheveningen een nieuw gebouwde vlokkendekeninstallatie in gebruik genomen. Het in deze installatie gecoaguleerde en snelgefiltreerde water werd gebruikt voor infiltratie in een proefplas (70 l/s). In deze plas trad in de drie jaar van het onderzoek nagenoeg geen algengroei op, was geen spoor van verstopping te bekennen en keerden enkele hogere waterplanten terug. Uitbreiding van de voorzuivering met coagulatie viel dus aan te bevelen.

Ondertussen was gebleken, dat alleen snelgefiltreerd Lekwater met nog milligrammen zwevende stof zich slecht leende voor een gewenste diepinfiltratie in de duinen door middel van putten. Om deze reden werd vanaf 1974 het filtraat van de vlokkendekeninstallatie gebruikt voor infiltratie in een proefput (CIP). Dit leidde tenslotte tot het inzicht, dat het mogelijk moest zijn om met een geoptimaliseerd en bedrijfszeker coagulatieproces water te produceren, dat geschikt is voor diepinfiltratie.

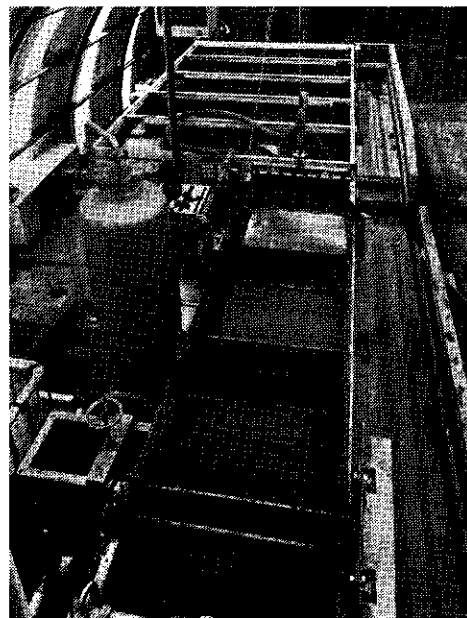
Het vlokkendekenapparaat voldeed aan deze eis van bedrijfszekerheid onvoldoende en dit gold ook voor de daarna onderzochte lamellenseparator. Een van de belangrijkste problemen daarbij was een onvoldoende bezinksnelheid van de gevormde vlokken vooral bij lage watertemperaturen als gevolg van onder andere ook de relatief lage gehalten aan zwevende stoffen. Het is noodzakelijk een groot deel van het jaar vlokhulpmiddelen te gebruiken en relatief lage volumestroomdichtheden (oppervlaktebelastingen)

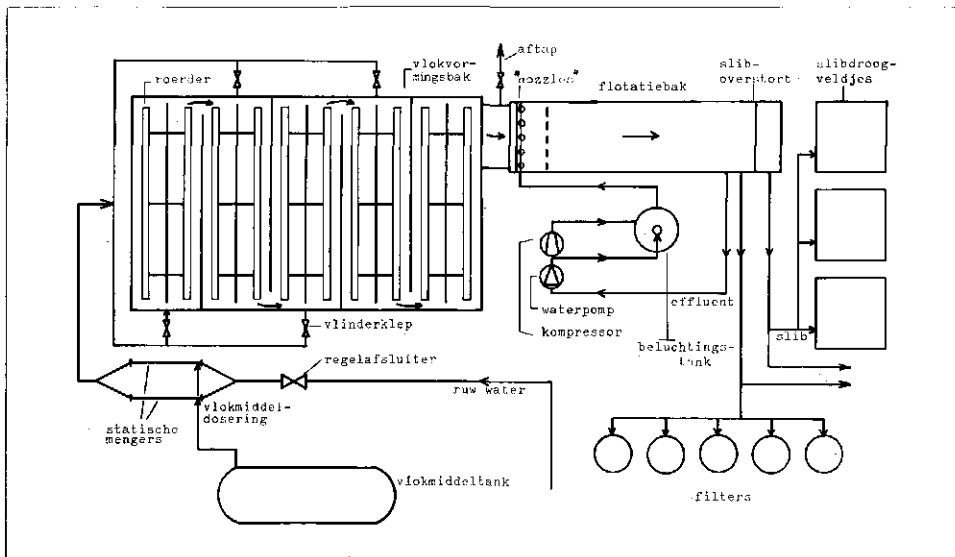
toe te passen. Bovendien trad er bij de lamellenseparator een niet te vermijden, onregelmatige vervuiling van de lamellen op, die de bedrijfszekerheid sterk verlaagde. Om deze redenen is tenslotte alle aandacht bij het onderzoek geconcentreerd op het veelbelovende flotatieproces.

3. Beschrijving van het proces en de installatie

Flotatie is een fase-scheidingsproces. De scheiding treedt op doordat de vaste fase een drijfslaag vormt op een vloeistoffase. Deze drijfslaag kan door een overstort gemakkelijk gescheiden worden afgevoerd. Bij de zuivering van oppervlaktewater tot drinkwater is in het coagulatieproces een vlokverwijderingstechniek vereist. In veel gevallen laat men de gevormde vlokken bezinken. Bij flotatie worden de gevormde vlokken echter lichter dan water gemaakt door aanhechting van microscopisch kleine luchtbelletjes. Er ontstaat een drijfslaag op het water, die continu of discontinu met bijvoorbeeld een kettingschraper over een overstort kan worden afgevoerd. De micro-luchtbelletjes worden verkregen door een deel van het behandelde water onder druk te beluchten en daarna in het water met de gevormde vlokken te laten expanderen. Deze expansie dient zo te geschieden dat er voldoende micro-belletjes worden gevormd, die het water melkachtig doen uitzien. Hiervoor worden aan het begin van het flotatiegedeelte van de installatie zogenaamde 'nozzles' in de waterstroom geplaatst. Dit kunnen naaldventielen, de

Afb. 1 - De proefinstallatie voor flotatie van de Duinwaterleiding.





Afb. 2 - Schema van de proefinstallatie voor flotatie en de bijbehorende snelfilters.

zogenaamde 'AKA nozzles' zijn, maar bijvoorbeeld ook verschillende typen sproeiers en de 'nozzle' zoals die in het WRC-onderzoek is gebruikt. Afbeelding 1 laat de proefinstallatie voor flotatie zien, die sinds februari 1976 op het inname-pompstation te Brakel voor onderzoek is gebruikt. De oorspronkelijke installatie is via de DWL Rotterdam van Esmil International BV (voorheen Stork Werkspoor Water) gekocht. Deze installatie is in de loop van 1976 op een aantal essentiële punten gewijzigd onder andere door plaatsing van een volledig nieuwe vlokformingsbak. Op de foto zijn duidelijk te onderscheiden de vlokformingsseenheid met 5 compartimenten — horizontaal doorstroomd — de 'nozzles', de flotatiebak met kettingschraper en de beluchtingsseenheid met het drukvat. In afbeelding 2 is de gehele installatie inclusief de vijf proefsnelfilters schematisch weergegeven. Het te behandelen water wordt in twee parallel geschakelde statische mixers van het type 'Kenics' met het gedoseerde vlokmiddel gemengd en naar de vlokformingsbak (afmetingen: lang 5 m, breed 3 m, hoog 1 m) gevoerd. Bij alle proeven is deze wijze van menging toegepast. Bij de vlokvorming is het mogelijk twee, drie, vier of vijf compartimenten te gebruiken. De roeders draaien om een in de doorstroombinding geplaatste horizontale as. Na de vlokvorming wordt het water door een duikschot naar beneden gevoerd langs de uitstroombopen van de 'nozzles'. Het water met vlokken en micro-bellen komt weer omhoog via een schuin geplaatste schot. De flotatiebak (afmetingen: lang 4 m, breed 1 m, hoog 2 m) heeft over de lengte een hellende bodem om ophoping van slib te vermijden en optimale stromings-

condities in de bak te verkrijgen. Het effluent na flotatie, in het vervolg flotaat genoemd, kan al of niet naar vijf proefsnelfilters worden gevoerd met variabele filterbedopbouw en filtratiesnelheid. Vier van de vijf snelfilters hebben een middellijn van 0,47 m; de vijfde 0,29 m. De bedhoogte is bij de meeste proeven beperkt tot maximaal 0,8 m. Dit is de beschikbare hoogte van de bestaande snelfilters op het pompstation van de Duinwaterleiding te Bergambacht.

In tabel I zijn enkele kenmerkende kwaliteitsgegevens van het water voor behandeling in de proefinstallatie gegeven. Van oorsprong is het Maaswater afkomstig uit de Maas te Heusden. Via het Heusdens kanaal stroomt dit water langzaam door de Afgedamde Maas over

TABEL I - Enkele kenmerkende kwaliteitsgegevens van het water vóór de proefinstallatie op het pompstation te Brakel (1978, n = 50).

1978 (mg/l)	mini-mum	maxi-mum	gemid-delde
Temperatuur °C	0,1	22,8	11,3
Zuurstofverzadiging %	56	111	79
Zwevende stof (110 °C)	1,4	16,2	5,0
Troebelheid FTU	1,5	9,8	3,7
Waterstofexponent pH	7,56	8,43	7,95
Organische koolstof	3,9	8,2	5,7
Chlorophyll a µg/l	2	41	11
Ammonium (NH ₄ ⁺)	< 0,03	1,09	0,41
Ortho-fosfaat (P) µg/l	< 20	150	50
Totaalfosfaat (P) µg/l	< 20	530	80
IJzer	0,07	2,00	0,23

ongeveer 12 km naar het pompstation te Brakel. Kort na het Heusdens kanaal wordt te Wijk en Aalburg ijzer-II-sulfaat (ca. 9 mg/l ijzer) in deze riviertak gedoseerd ter preventie van overmatige algengroei in het voedselrijke water en ter verbetering van de Maaswaterkwaliteit.

Het gedoseerde ijzerzout bezinkt als ijzerhydroxyde in de rivier tijdens de 2 maanden reistijd. Deels ook door natuurlijke zelfreiniging is het op het pompstation te behandelen water al betrekkelijk helder. Het gemiddelde zwevende stofgehalte is gedaald van 20 mg/l bij Heusden tot 5,0 mg/l; het totaal P-gehalte van 0,53 mg/l tot 0,08 mg/l. Het water bevat soms meer, soms minder algen. Dit water lijkt op voorhand uitstekend geschikt om flotatie in plaats van bezinking toe te passen als vlokverwijderingstechniek. In de volgende paragrafen zal de optimalisatie van de vlokvorming en de flotatie nader worden beschreven.

4. Vlokvorming

4.1. De energie-inbreng

Tijdens de vlokvorming moeten de vlokken worden gevormd en aangroeien tot goed floteerbare deeltjes. De vlokvorming wordt beoordeeld aan de hand van de kwaliteit van het flotaat onder standaardcondities. De kwaliteit van het flotaat wordt afgemeten aan de troebelheid of liever aan het restgehalte aan vlokmiddel (ijzer of aluminium). De troebelheid kan namelijk worden beïnvloed door nog aanwezige luchtbelletjes. Het uitgangspunt voor de beoordeling van de vlokvorming is de wens een zo laag mogelijk ijzergehalte (of aluminiumgehalte) van het flotaat te verkrijgen ten einde de navolgende filtratie zo min mogelijk te belasten.

Vlokvorming wordt verkregen door het water, na de dosering van het vlokmiddel, te roeren gedurende een bepaalde tijd: de vlok tijd. Dit roeren geschiedt in compartimenten die elk zijn voorzien van horizontaal draaiende roerwerken met variabele rotatiefrequentie. De roerwerken bestaan uit aan de as bevestigde latten evenwijdig aan de asrichting. De vorm en de grootte van dit lattenwerk, de rotatiefrequentie, de vorm van de compartimenten en de temperatuur van het water bepalen grotendeels de energie-inbreng voor de vlokvorming. Het is bij het coagulatieproces gebruikelijk om dit vast te leggen in de arbitraire grootte G, de zogenaamde snelheidsgradiënt. G is berekend met de formule:

$$G = f \sqrt{\frac{\rho n^3}{\eta}}$$

f = factor afhankelijk van type roerder [m],

ρ = volumieke massa van water [kg m⁻³],

η = viscositeit [Pa s],

n = rotatiefrequentie [s⁻¹].

Voor het roerwerk, waarmee de proeven

zijn gedaan, is volgens Molt [7] een waarde berekend van $1,9 \times 10^{-3}$ m. In afbeelding 3 zijn de zo berekende en over e vijf compartimenten gesommeerde i-waarden [s^{-1}] bij verschillende rotatiefrequenties uitgezet tegen het ijzergehalte van het flotaat. Deze proef is meermalen uitgevoerd bij verschillende watertemperaturen. In afbeelding 3 is een resultaat weergegeven bij $1,5^\circ C$ (20 december 1978) en bij $19^\circ C$ (15 augustus 1979). Alle variabelen zijn verder onstant gehouden dat wil zeggen en ijzerdosering als ijzer-III-chloride van 5 mg/l , vlok tijd van 1.800 s , vijf compartimenten, flotatie tijd van 800 s , 50% recirculatiewater onder 600 kPa druk, acht 'AKA nozzles' en geen drijf laag van enige dikte maar overstortend water. Vat dit laatste betreft is namelijk ebleken, dat dergelijke proeven alleen eproduceerbaar zijn uit te voeren bij ijzervrijheid van een drijf laag, vanwege nregelmatig optredende sedimentatie anuit de drijf laag. Alle verder te beschrij en proeven zijn, tenzij anders vermeld, nder deze standaardcondities uitgevoerd. n de afbeelding is te zien, dat de resul aten elkaar bij hoge en lage temperaturen iet veel ontlopen bij deze relatief nge vlok- en flotatie tijd.

bij de lage temperatuur treedt er wel en verslechtering op van het flotaat bij G -waarden boven 400 s^{-1} . Er is een minimum tussen $200 - 400 \text{ s}^{-1}$. Bij hogere watertemperatuur is dit minimum og niet bereikt in het meetgebied. Het eeste resultaat wordt bereikt indien lle roeders op maximale frequentie taan, hetgeen nogal afwijkt van de vlok- ormingscondities ten behoeve van ezinking. Een belangrijke randvoorwaarde ij bezinking is dat de gevormde, grote lokken niet kapotgeslagen mogen worden oor te grote energie-inbreng in het atste compartiment. In de praktijk wordt m deze reden vaak een over de ompartimenten trapsgewijs dalende nergie-inbreng toegepast, de zogenaamde apered flocculation'. Bij de vlok vorming oor flotatie heeft dit geen zin; integen eel. Er is op 11 oktober 1977 een proef itgevoerd, waarbij achtereenvolgens:

- 1. alle roeders dezelfde rotatiefrequentie 10 omw/min);
- 2. de roeders een lineair dalende rotatie- frequentie ($15, 12,5, 10, 7$ en 4 omw/min);
- 3. de roeders een exponentieel dalende otatiefrequentie ($20, 10, 7, 5$ en 4 omw/min) en
- 4. de roeders een lineair stijgende rotatie- frequentie ($4, 7, 10, 12,5$ en 15) hadden.

De gesommeerde G -waarde bedroeg in alle

gevallen ongeveer 285 s^{-1} . De eerste drie proeven leverden vrijwel hetzelfde resultaat op (ijzergehalte flotaat $0,6 \text{ mg/l}$), terwijl de vierde zelfs een beter resultaat opleverde (ijzergehalte $0,4 \text{ mg/l}$). Ook deze proef laat dus zien dat een zeer kleine, compacte vlok, ontstaan door relatief snel roeren, de flotatie gunstig beïnvloedt. De gevormde vlokken zijn kort voor de flotatie nog zo klein, dat ze nauwelijks met het blote oog zichtbaar zijn en gemakkelijk de vrij hevige turbulentie bij de uitstroomopeningen van de 'nozzles' kunnen doorstaan. Een totale G -waarde van ongeveer 200 s^{-1} is voldoende.

4.2. De vlok tijd

De vlok tijd is de volumestroom gedeeld door het benutte volume van de vlok- vormingsbak:

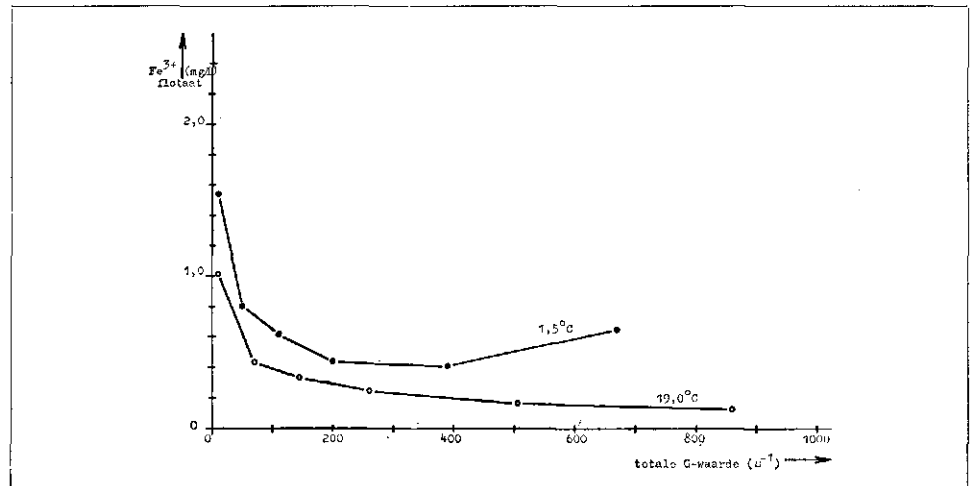
$$t = \frac{q}{V}$$

In afbeelding 4 is de invloed van deze variabele weergegeven. De proeven zijn bij lage watertemperatuur (ongeveer $2^\circ C$

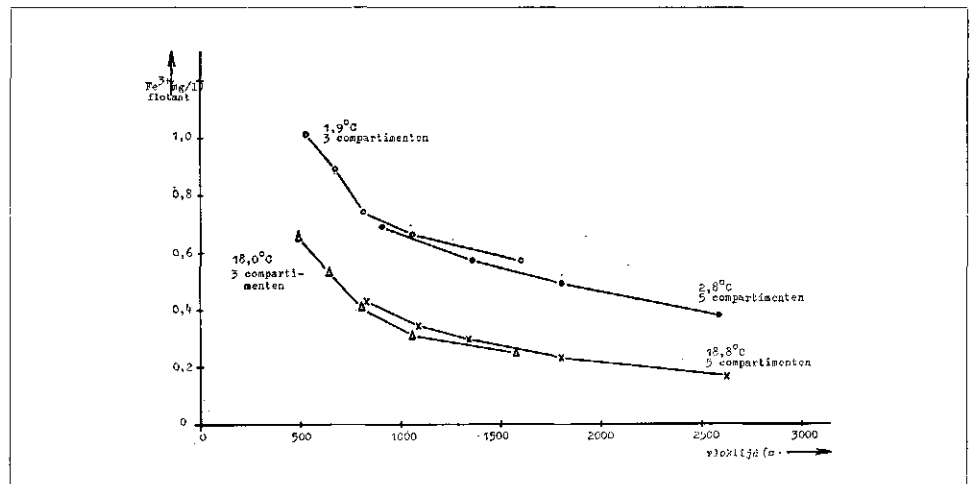
op 6 en 7 december 1978) en bij hoge watertemperatuur (ongeveer $18^\circ C$ op 14 en 30 augustus 1979) uitgevoerd. Om ook kortere vlok tijden te kunnen onderzoeken is het nodig de proeven met 3 en 5 compartimenten uit te voeren. De totale G -waarden bedroegen $250 - 300 \text{ s}^{-1}$. De overige omstandigheden zijn gelijk aan die onder 4.1. vermeld. Tot een vlok tijd van ongeveer 900 s (15 minuten) is er een sterke daling in het ijzergehalte van het flotaat waarneembaar, gevolgd door een geleidelijke verdere daling.

Opvallend is het betrekkelijk grote verschil tussen de resultaten van de proeven bij lage en hoge watertemperaturen. Een eis van bijvoorbeeld $0,5 \text{ mg/l}$ ijzer wordt in de zomer al bereikt bij een vlok tijd van 660 s en in de winter pas bij 1.740 s , ruim $2,5$ keer zo lang. Deze gegevens zijn bepalend voor het ontwerpvolume van de vlok vormingseenheid. De resultaten bij lage watertemperaturen zijn hiervoor maatgevend, waarbij men mag rekenen met het waterverbruik in de winter, dat lager is dan in de zomer.

Afb. 3 - De invloed van de totale G-waarde tijdens vlok vorming op het ijzergehalte na flotatie.



Afb. 4 - De invloed van de vlok tijd op het ijzergehalte na flotatie.



4.3. Het aantal compartimenten

In afbeelding 4 valt het reeds waar te nemen en in afbeelding 5 is het nog duidelijker, dat het er weinig toe doet of het aantal compartimenten 2, 3, 4 of 5 is. In afbeelding 5 zijn de resultaten samengevat van 4 weken onderzoek van 12 oktober tot 8 november 1977. De watertemperatuur bedroeg ongeveer 10 °C. De proeven zijn bij een groot aantal G-waarden uitgevoerd, waarvan die bij 50 en 400 s⁻¹ zijn weergegeven.

Vooraf bij de hoge G-waarde is de invloed nihil. De licht stijgende waarden aan de linkerkant van de afbeelding zijn het gevolg van de kortere vloktijden. De keuze van een of twee compartimenten is waarschijnlijk nog wel van belang, althans volgens Van Melick [1]. In een technische installatie zal er toch altijd voor minimaal twee compartimenten worden gekozen om onder andere kortsluitstromingen tussen in- en uitvoer te voorkomen. Het is bij het onderzoek overigens niet gebleken, dat een variatie in de spreiding in de verblijftijd van het water (en dus van de vlokken) in de vlokformingsbak veel invloed heeft op het resultaat.

4.4. De invloed van de pH

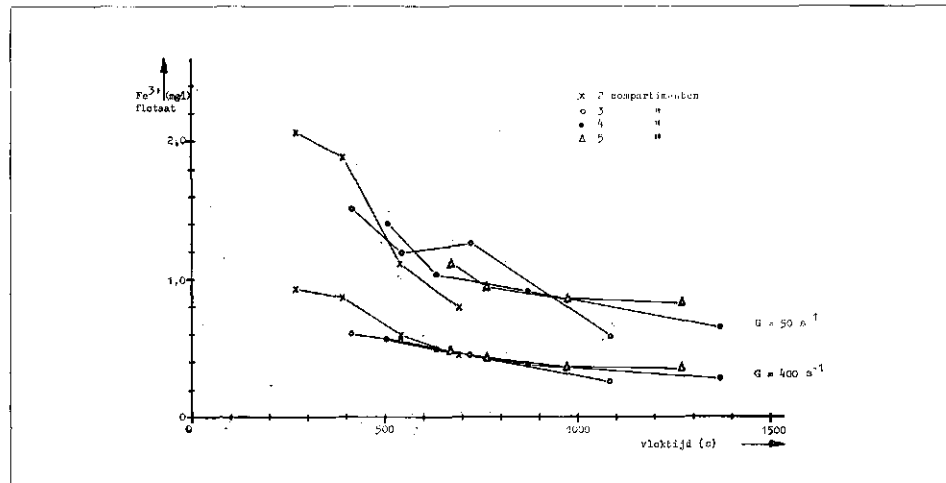
Bij het WRC-onderzoek is grote aandacht gegeven aan de invloed van de pH tijdens de vlokvorming op het ijzergehalte van het flotaat [4].

Niet zelden is bij verschillende water-soorten een vrij grote invloed van de pH waargenomen. Met het water vanuit de Afdamde Maas is deze pH-invloed bij diverse onderzoeken niet gebleken. Bij een pH van 6,5 tot 8,5 zijn de resultaten in de meeste gevallen ongeveer gelijk, wat betreft het ijzergehalte van het flotaat. De pH van het te behandelen water varieert ongeveer van 7,5 tot 8,5. Door de dosering van het vlokmiddel (meestal 5 mg/l ijzer) daalt de pH enkele tienden. Gezien het bovenstaande zijn daarom alle proeven zonder enige pH-correctie uitgevoerd, omdat het streven erop gericht is ook bij een definitieve installatie de dosering van chemicaliën zoveel mogelijk te vermijden.

4.5. Vlokmiddelen en vlokhelpmiddelen

Bij de meeste proeven is een 40 %'s oplossing van ijzerchloride in water als vlokmiddel gebruikt. Verder zijn als vlokmiddel onderzocht:

a. aluminiumsulfaat na oplossen in water;



Afb. 5 - De invloed van het aantal compartimenten op het ijzergehalte na flotatie bij verschillende vloktijden en G-waarden.

b. een oplossing van aluminiumhydroxychloride (Sachtoklar);

c. AVR, een mengsel van aluminium- en ijzerverbindingen (Hoechst, Boliden AG) na oplossen;

d. een geoxideerde oplossing van ijzer-II-sulfaat. Oxidatie vond plaats met chloor of volgens het Oxorbon/Lurgiproces met zuurstof en poederkool.

Na flotatie waren de resultaten met de verschillende vlokmiddelen meestal niet veel verschillend. Bij doseringen van ongeveer 4 mg/l als ijzer en ongeveer 2 mg/l, dat wil zeggen bij gelijke molaire hoeveelheden, als aluminium werden reeds minimale ijzer- en aluminiumgehalten in het flotaat verkregen onder standaardcondities. Wel is een vrij grote invloed waargenomen van de grootte van een vlokmiddeldosering op de kwaliteit van het water na sneefiltratie.

Deze gegevens zullen in het volgende kort worden aangeduid. Ze zullen uitvoeriger in een volgende publikatie worden verwerkt.

Vanwege de minder goede resultaten van de vlokvorming bij lage watertemperaturen en korte vlok- en flotatietijden is diverse malen geprobeerd door dosering van een vlokhelpmiddel die te verbeteren. Gebruikt zijn onder andere Wisprofloc 20 S, Praestol P2900 en geactiveerd kiezelzuur in combinatie met een aluminiumhoudend vlokmiddel. Het effect van deze doseringen was in alle gevallen nihil. Dit is alleszins te verklaren uit het feit, dat vlokhelpmiddelen kleine vlokjes vergroten tot beter bezinkbare; dus specifiek voor bezinking gunstig werken. Bij flotatie is dit mechanisme van ondergeschikte betekenis.

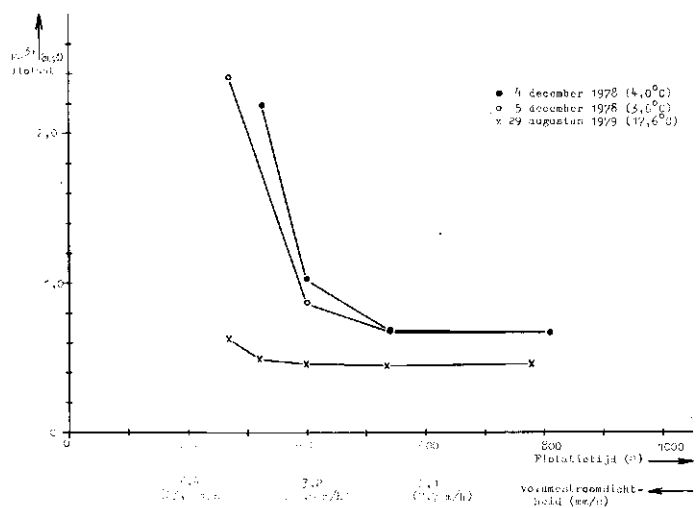
5. De flotatie

5.1. De flotatietijd en/of de volumestroomdichtheid

Ook bij de flotatie is de verblijftijd van het water met vlokken en micro-belletjes, al of niet aan elkaar gehecht, in de flotatie bak van belang. Tijd is niet alleen nodig om de vlokken met aangehechte belletjes zich vanuit het water naar de oppervlakte te laten verplaatsen, maar ook om de belletjes en vlokjes met elkaar te laten botsen en te laten hechten. Nog steeds is niet geheel duidelijk welk mechanisme en welke krachten bij de botsing en de hechting een hoofdrol vervullen. Aan de TH te Delft is er door Visser enig onderzoek naar deze wat meer fundamentele vragen verricht [6].

Elektrostatische krachten spelen geen rol van betekenis. Ook mechanisch invangen van bellen in onregelmatigheden van de vlokken treedt niet op, gezien het feit dat veel bellen zich juist aan de bovenzijde van vlokken bevinden. De vlokjes worden niet omhoog geduwd, maar getrokken door de aangehechte belletjes. Mogelijk spelen de oppervlaktetenspanningen bij het drie-fasen-contact water-luchtbelvlok een hoofdrol in navolging van de verschijnselen bij de scheiding van erts door flotatie. Nader onderzoek op dit gebied blijft gewenst.

Evenals bij bezinking is bij flotatie de volumestroomdichtheid (oppervlaktebelasting) een belangrijke ontwerp-grootte. Door het plaatsen van de hellende bodem in de flotatiebak in het voorjaar 1977 werd de volumestroomdichtheid niet beïnvloed, maar de flotatietijd wel. Het beschikbare volume van de flotatiebak werd namelijk teruggebracht van ongeveer 6 m³ naar 4,5 m³. De resultaten werden hierdoor niet direct meetbaar beïnvloed in nadelige zin. Op



fb. 6 - De invloed van de flotatietijd c.q. de volumestroomdichtheid op het ijzergehalte na flotatie.

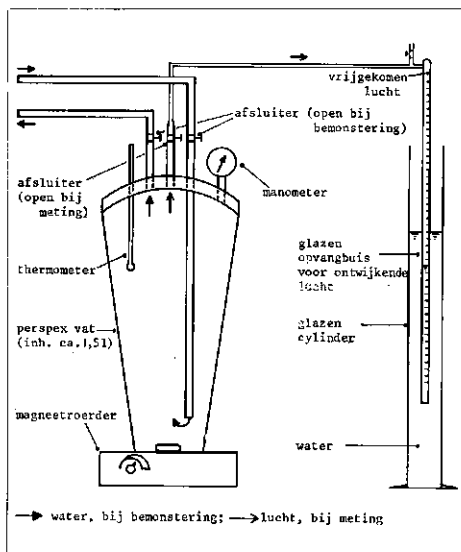
ch zegt dit niet veel, zoals in afbeelding 6 is te zien, omdat in een vrij groot gebied flotatietijd en volumestroomdichtheid geen invloed hebben op het zergehalte van het flotaat. Opvallend is het verschil tussen de resultaten bij hoge en lage watertemperaturen respectievelijk ongeveer 18 °C op 29 augustus 1979 en ongeveer 4 °C op 4 en 5 december 1978. Bij de hogere watertemperatuur kan de flotatietijd worden teruggebracht tot 50 s en waarschijnlijk korter en kan de volumestroomdichtheid (oppervlaktebelasting) worden opgevoerd tot ruim 5 mm/s (15 m/h). Bij lage temperatuur is de flotatietijd minimaal 540 s te zijn en de volumestroomdichtheid maximaal 5 mm/s (11 m/h). De proeven van afbeelding 6 zijn uitgevoerd bij een flotatietijd van 900 s en een gesommeerde Q -waarde van 250 à 300 s⁻¹. De condities zijn verder gelijk aan die onder 4.1. vermeld.

2. Het recirculatiepercentage en de verzadigingsdruk

en deel van het flotaat wordt door een waterpomp naar een 'venturi-beluchter' pompt, die is geplaatst in een verticaal opgestelde cilindrische tank (afmetingen: hoog 2,5 m, middellijn 0,6 m). Een luchtcompressor zorgt voor de aanvoer van lucht onder druk naar deze tank. De 'venturi' bestaat uit een uitwisselbaar messing pijpje met bekende inwendige middellijn, die een vernauwing vormt in een buis waar het water doorheen wordt geperst. Hierdoor wordt lucht uitgezogen en vindt de beluchting plaats. In de verder lege tank verblijft het water enige minuten door regeling van het waterpeilniveau, waardoor grote luchtballen binnen ontsnappen. In 1976 is deze

beluchter nader onderzocht, waarbij is gebleken, dat bij een juiste keuze van de stroomsnelheid in het messing pijpje verzadigingspercentages boven 90 % bij de heersende druk haalbaar zijn. De meting van het verzadigingspercentage van het water onder druk vond plaats met behulp van een door het KIWA ontworpen bemonsteringsvatje (afbeelding 7). Voor alle verdere proeven is gekozen voor een messing pijpje met een middellijn van 12 mm en een constante volumestroom van 1,4 l/s (5 m³/h). Afhankelijk van de behoefte werd deze hoeveelheid deels voor flotatie gebruikt, het recirculatiepercentage, en deels geloosd. De stroomsnelheid in het pijpje is op deze manier constant 12 m/s. Behalve

Afb. 7 - KIWA-apparaat voor de meting van het verzadigingspercentage van lucht in water bij verhoogde druk.



hiervan is het verzadigingspercentage ook afhankelijk van de druk. Bij lagere drukken neemt het af. De druk bepaalt ook de beschikbare hoeveelheid opgeloste lucht, omdat de oplosbaarheid van lucht in water recht evenredig met de druk verloopt. De derde invloed van de druk betreft het aantal gevormde bellen (zie het hiernavolgende artikel van Meijers en Van Bennekom). Bij de meeste proeven is een druk van 600 kPa gebruikt. Het wekelijks gemeten verzadigingspercentage is dan vrijwel constant 80 %.

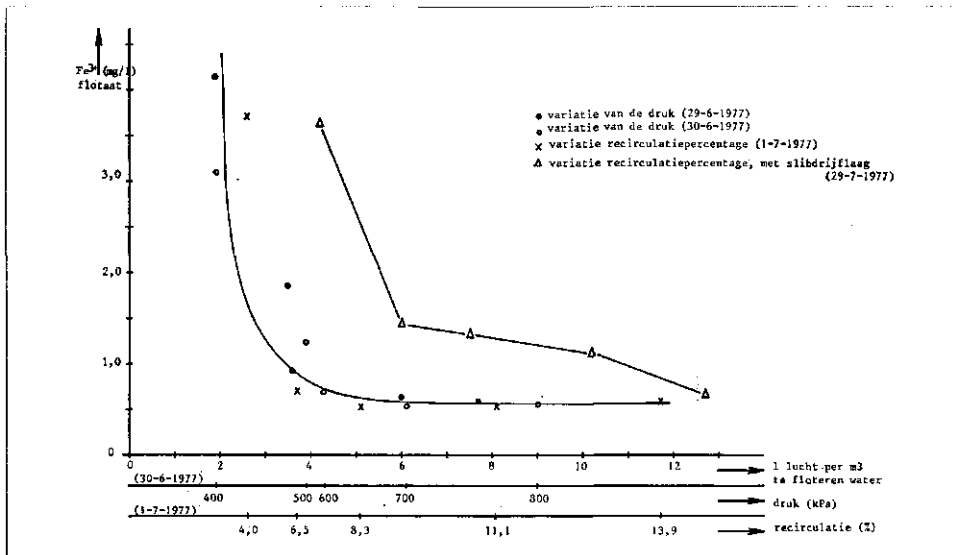
Het recirculatiepercentage en de druk bepalen tezamen de hoeveelheid lucht, die in principe beschikbaar is voor flotatie. De invloed van deze twee variabelen is onafhankelijk van elkaar onderzocht.

In afbeelding 8 is het resultaat weer gegeven met als horizontale as het aantal liters beschikbare lucht per m³ te floteren water. De proeven zijn in juni en juli 1977 uitgevoerd onder standaardcondities met uitzondering van de 'nozzles', die van het WRC afkomstig waren. De minimaal benodigde hoeveelheid lucht is ongeveer 5 l (6,5 gram) per m³ te floteren water. Dit komt redelijk goed overeen met dat wat het WRC heeft waargenomen (8 gr/m³). De overeenkomst is aanzienlijk beter indien de proeven met drijfslag worden uitgevoerd zoals ook in afbeelding 8 is te zien. Druk en recirculatiepercentage kunnen dus binnen zekere grenzen onderling worden gevarieerd. Het minimale recirculatiepercentage is ongeveer 4 - 5 % en bij drukken lager dan ongeveer 400 kPa treedt geen flotatie op. Bij de meeste proeven is gekozen voor 6 % recirculatie en een druk van 600 kPa (dat wil zeggen ongeveer 5 l lucht per m³ te floteren water).

5.3. Het aantal en type 'nozzles'

Het onderzoek naar het juiste type 'nozzle' wordt in het artikel van Meijers en Van Bennekom beschreven. Bij verreweg de meeste proeven is de 'AKA-A nozzle' gebruikt, die bij vergelijking met de WRC 'nozzle', die meerdere malen is uitgevoerd, steeds beter uitkwam. De 'AKA nozzle' is in feite een regelbaar naaldventiel. Bij een juiste instelling werd zelden of nooit gebruik gemaakt van deze regelmogelijkheid. In feite is dit overbodig.

Bij de oorspronkelijke proefinstallatie waren 8 'AKA nozzles' over de breedte (1 m) van de flotatiebak geplaatst. Bij voldoende toevoer van lucht per m³ water kan ook met een kleiner aantal worden volstaan mits er maar een goede verdeling van de gevormde micro-bellen over de volume-



Afb. 8 - De invloed van de beschikbare hoeveelheid lucht voor flotatie op het ijzergehalte na flotatie.

stroom plaatsvindt. Vier 'nozzles' gaven nog hetzelfde resultaat als acht.

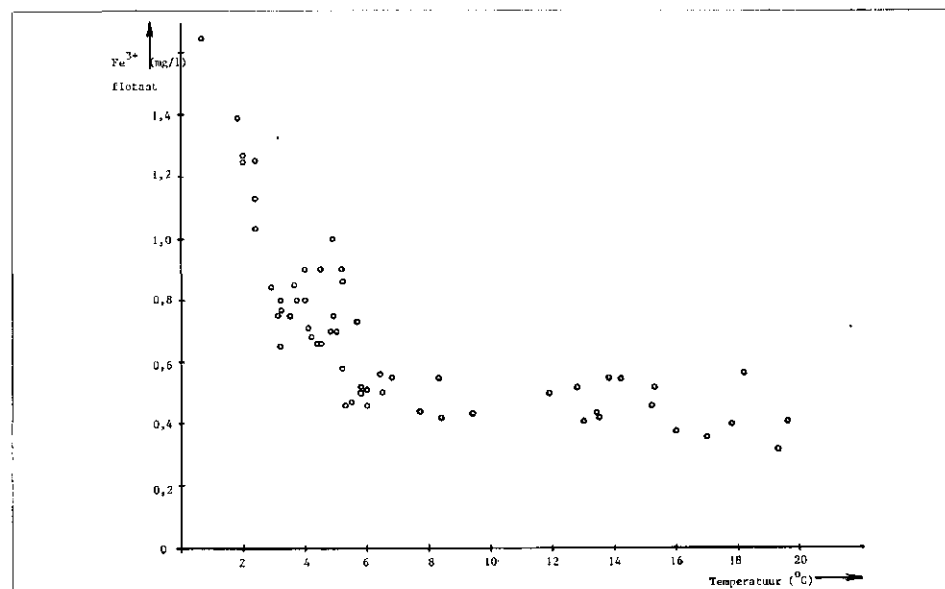
5.4. De afvoer van de drijfslaag

De afvoer van de vlokken na opdrijven is één van de meest cruciale problemen van het gehele flotatieproces. Het heeft veel tijd geveerd voor dit probleem voldoende werd onderkend. Van begin af aan is het de bedoeling geweest met een (centimeters) dikke drijfslaag te werken, die continu over een overstortrand met behulp van een rolschraper wordt afgevoerd. Het aldus afgevoerde slib heeft afhankelijk van de dikte van de drijfslaag en de ruwwaterkwaliteit een droge stofgehalte van 2 tot 8 %, hetgeen een belangrijk voordeel in vergelijking met bezinking is bij de verdere indikking en verwerking van het slib. Tijdens het verblijf van de drijfslaag op het water in de flotatiebak treden er ontluchting en indikking op, waardoor bij geringe storing in de beweging van de drijfslaag een deel van de vlokjes loskomt en bezinkt. Dit komt tot uiting in een meer of minder grote verslechtering van de kwaliteit van het flotaat (zie ook afbeelding 8). In het flotaat zijn dan kleine slibbolletjes zichtbaar, die kennelijk na het bezinken uit de drijfslaag niet of nauwelijks opnieuw floteerbaar zijn. Om deze reden was het nodig bij de procesoptimalisatie de opdrijvende vlokken direct met een overstortend waterfilmpje (ongeveer 1 - 2 % van de hoofdstroom) af te voeren en geen hechte drijfslaag te laten ontstaan. Deze werkwijze levert nog steeds het laagste ijzergehalte van het flotaat op, maar heeft het bezwaar dat het flotatieslib niet wordt ingedikt. Een direct aansluitende indikking in een aparte, veel kleinere flotatie-installatie

is dan noodzakelijk. Als alternatief is onderzocht de afvoer van een centimetersdikke drijfslaag zó rustig en gelijkmatig te laten verlopen, dat er geen scheurtjes in optreden en ook geen bezinking van slibbolletjes plaatsvindt.

Over de lengte van de flotatiebak is een kettingschraper met per 1 m een rubberen schraapblad geplaatst. Dit is aangevuld met de plaatsing van een flauw glooiend 'strandje' bij de overstortrand voor het slib. Door de schraapbladen in het water te steken op een plaats waar nog vrijwel geen drijfslaag is gevormd en deze langzaam in de richting van het 'strandje' te duwen ontstaan geen breukvlakken meer in de drijfslaag. Daarna wordt de drijfslaag het 'strandje' op- en overgeduwd door de buigzame

Afb. 9 - De invloed van de watertemperatuur op het ijzergehalte na flotatie bij gelijkblijvende procescondities.



rubberen bladen en over de overstortrand gewerkt. De aldus verkregen ijzergehalten van het flotaat lagen slechts 0,1 - 0,2 mg/l hoger dan die bij de afwezigheid van een hechte drijfslaag. De procesvoering blijft echter minder betrouwbaar onder andere door invloed van mechanische storingen en plotselinge veranderingen in de kwaliteit van het te behandelen water. Een definitieve keuze uit deze twee alternatieve oplossingen voor de afvoer van de drijfslaag, die met meerdere zijn aan te vullen, is afhankelijk van de afweging van de verschillende voor- en nadelen.

5.5. De watertemperatuur

Diverse pogingen om relaties te leggen tussen de kwaliteit van het te behandelen water en het ijzergehalte na flotatie zijn mislukt. Een uitzondering hierop vormt de watertemperatuur. In afbeelding 9 is het ijzergehalte van het flotaat tegen de watertemperatuur uitgezet, verkregen onder gelijke procescondities. (Zie 4.1., vloktijd is 900 s, flotatietijd 400 s, G-waarde ca. 250 s⁻¹.) Bij temperaturen onder de 6 °C verslechterde de kwaliteit van het flotaat zienderogen. Dosering van vlokhulpmiddelen gaf geen soelaas. In de voorgaande paragrafen is de invloed van de temperatuur op de optimale vlok- en flotatietijd reeds beschreven. Het temperatuureffect kan worden opgeheven door verlaging van de volumestroomdichtheid (oppervlaktebelasting) van de gehele installatie.

6. De snelfiltratie

Eén van de belangrijkste doelstellingen

ABEL II - Enkele kenmerkende kwaliteitsgegevens van het filtraat van proefsnelfilters na flotatie in de proefinstallatie op het pompstation Brakel (1978, n = 36).

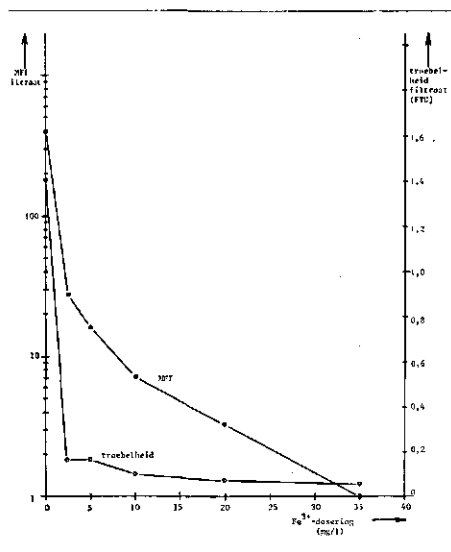
78 (mg/l)	gemiddeld	maximum
roebelheid FTU	0,15	0,30
rganische koolstof	4,5	6,5
hlorophyll a $\mu\text{g/l}$	1,6	5,9
mmonium (NH_4^+)	0,28	1,06
rtho-fosfaat $\mu\text{g/l}$ (P)	3,3	14,8
otaalfosfaat $\mu\text{g/l}$ (P)	10,3	25,1

an het onderzoek is het bereiken van en bepaalde kwaliteit water na flotatie en zelffiltratie, ten behoeve van de infiltratie in de duinen. Deze doelstelling is het punt van onderzoek voor de vijf proefsnelfilters, waarbij de variabelen zijn de vlokmiddel en de grootte van de dosering bij de flotatie, de filteropbouw, de filtratiesnelheid, de kwaliteit van het te filteren water, de watertemperatuur, de pH en een secundaire dosering vlak voor de snelfilters. Dit onderzoek is nog gaande en zal in een volgend artikel worden gerapporteerd.

fb. 10 laat een resultaat zien van de invloed van de grootte van de ijzerdosering in sept. 1978 op enkele voor verstopping bij zelfinfiltratie kenmerkende parameters. De filterbedopbouw hierbij was 0,6 m sand (0,8 - 1,2 mm) en 0,2 m antraciet (1,6 - 2,5 mm) en de filtratiesnelheid 0,4 mm/s (5 m/h). De flotatie werd onder standaardcondities uitgevoerd.

In tabel II staan enkele kwaliteitsgegevens van het filtraat weergegeven. Deze gegevens zijn onder lang niet altijd optimale condities voor de filtratie verzameld en zijn daarom nog niet volledig representatief voor een continu werkende

fb. 10 - De invloed van de grootte van de ijzerdosering voor de vlokvorming op de kwaliteit van het water na snelfiltratie.



bedrijfsinstallatie, met name wat betreft het ammonium-gehalte en de troebelheid. Wat betreft het totaal fosfaatgehalte voldoet het filtraat gemiddeld ruimschoots aan de doelstelling van maximaal 20 $\mu\text{g/l}$ P. Het gemiddelde is 10 $\mu\text{g/l}$ P. Het ortho-fosfaatgehalte is gemiddeld 3 $\mu\text{g/l}$ P. De maximale waarde ligt slechts weinig boven de doelstelling. Wat betreft enkele milieuvreemde stoffen zoals bijvoorbeeld cadmium, kwik en pesticiden kan worden gesteld, dat deze bij het wekelijks uitgevoerde onderzoek van het filtraat zelden worden aangetroffen in gehalten boven de onderste analysegrens.

7. Slot met samenvatting

Na ruim drie jaar onderzoek met een semi-technische proefinstallatie voor flotatie ten behoeve van een verdergaande zuivering van het water uit de Afgedamde Maas te Brakel kan worden gesteld, dat flotatie mits goed uitgevoerd een bedrijfszeker en goed proces is. Optimale condities zijn vastgesteld voor de vlokvorming wat betreft de energie-inbreng, de vloktijd en het aantal compartimenten, en voor de flotatie wat betreft de flotatietijd c.q. de volumestroomdichtheid (oppervlaktebelasting), het recirculatiepercentage, de verzadigingsdruk, het type en het aantal 'nozzles' en de wijze van drijf-laagafvoer. Door een juiste keuze van de vloktijd en de flotatietijd kan het verslechterend effect van temperatuurdaling van het water beneden 6 °C worden opgeheven. In tegenstelling met bezinking als vlokverwijderingstechniek behoeft er geen pH-correctie te worden toegepast; vlokhulpmiddelen zijn nutteloos en de vlokmiddeldosering is relatief laag. Daar staan de extra energiekosten tegenover om ongeveer 6 % van het water op een druk van ongeveer 600 kPa te brengen (enkele tienden centen per m³ water). Er is alle reden om te stellen, dat het flotatieproces meer toepassing verdient niet alleen bij de zuivering van oppervlaktewater tot drinkwater maar ook bij afvalwaterzuivering en bij de slibindikking.

Deze publikatie was alleen mogelijk dank zij de uitvoerders van het onderzoek, te weten de heren R. Looijen, Th. van Lopik en A. H. Knol met de voortdurende technische assistentie van de heren M. Minnaar, J. F. Kroon, A. Dekker en A. T. G. van der Sman, allen werkzaam of werkzaam geweest op het pompstation van de Duinwaterleiding te Brakel.

Literatuur

1. Van Melick, M. J. *Flotatie*. H₂O, 11 (1978), 13-19.

2. Nuhn, P. A. N. M. *Het zuiveringsproces van het drinkwaterproduktiebedrijf Zevenbergen en de eerste resultaten*. H₂O, 12 (1979), 469-474.

3. Buijck, P. L. *Onderzoek naar flotatie als vlokverwijderingstechniek bij het coagulatieproces met Andels Maaswater*. 5 interimrapporten, DWL, (1976-1978).

4. Rees, A. J., Rodman, D. J. and Zabel, T. F. *Waterclarification by flotation*. 5 Technical Report TR 114, april 1979.

5. *Papers and Proceedings of the Water Research Centre Conference on Flotation for Water and Waste Treatment*, Medmenham, 1977, 430 pp.

6. Visser, J. K. *Het flotatieproces als vlokverwijderingstechniek bij de waterzuivering*. Afstudeerwerk bij Prof. dr. ir. P. M. Heertjes, juni 1977.

7. Molt, E. L. *Unit Operations*, International Courses in Hydraulic and Sanitary Engineering (p. 46-56).

