

Aspekten van de bellenbeluchting

Voordracht uit de 11de vakantiecursus in de behandeling van afvalwater 'Beluchting', die op 22 en 23 april 1976 werd gehouden aan de TH Delft.

1. Inleiding

Reeds meer dan een halve eeuw wordt bij het aktiefslibproces gebruik gemaakt van bellenbeluchting om de voor het zuiveringsproces benodigde zuurstof in de aeratie-tank te brengen. Uit de veelheid van in de praktijk toegepaste varianten valt af te lezen dat er van oudsher een ontwikkeling gaande is geweest in de richting van het optimaliseren van het beluchtingssysteem. Daarbij werd aanvankelijk een belangrijke rol gespeeld door de factoren onderhoud en bedrijfszekerheid.



K. F. DE KORTE
Dienst der Publieke Werken
Gemeente Amsterdam

In de laatste jaren zijn de technologische aspecten meer op de voorgrond getreden. Dit gebeurde niet alleen onder invloed van de sterk stijgende energiekosten, maar ook door een beter inzicht in het zuiveringsproces als geheel, waarvan de beluchting een essentieel onderdeel is.

In dit artikel zal naast aandacht voor de elektromechanische en economische kant het zwaartepunt worden gelegd bij de technologische aspecten van de bellenbeluchting. De theoretische aspecten worden in dit artikel niet behandeld omdat over dit onderwerp voldoende literatuur beschikbaar is [3, 11, 13].

2. Bellenbeluchtingssystemen

Bij de verschillende bellenbeluchtingssystemen kan onderscheid gemaakt worden naar:

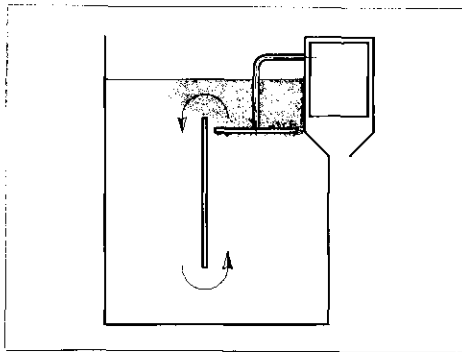
- inblaasdiepte;
- bellengrootte;
- tankvorm;
- plaatsing van diffusoren.

2.1. Inblaasdiepte

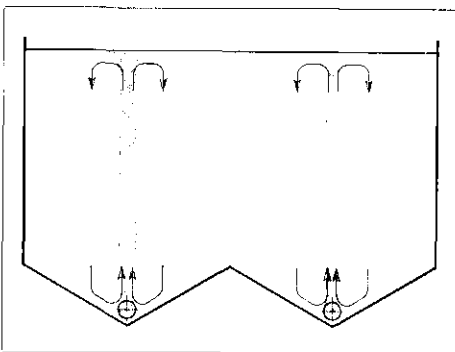
Deze bedraagt in het algemeen ca. 0,8 m (relatief lage druk) of 3 tot 5 m (relatief hoge druk). In enkele gevallen waarin weinig oppervlakte beschikbaar was voor de aeratietanks zijn aanmerkelijk grotere inblaasdiepten toegepast (USA, Japan). Bij de beluchting met relatief lage druk wordt gebruik gemaakt van ventilatoren en bij de beluchting met relatief hoge druk van compressoren.

2.2. Bellengrootte

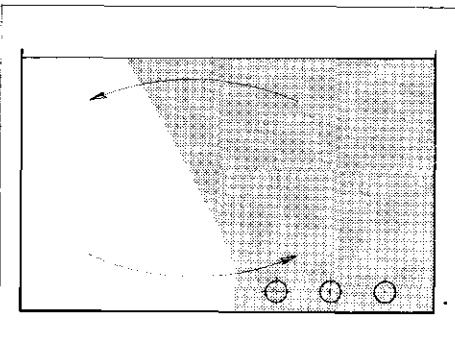
De grootte van de bellen wordt, naast het luchtdebiet, bepaald door de grootte van de



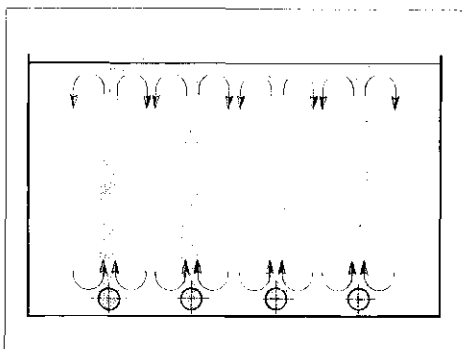
Afb. 1 - INKA-beluchting.



Afb. 2 - Ridge and furrow.



Afb. 3 - Spiralflow.



Afb. 4 - Bodembeluchting.

openingen van de diffusoren. Men onderscheidt

- beluchting met kleine bellen (2 - 6 mm diameter) bij diffusoren van poreus materiaal met poriëngrootte van max. 0,1 mm;



Afb. 5 - Bodembeluchting op r.i. Zuid in Amsterdam.

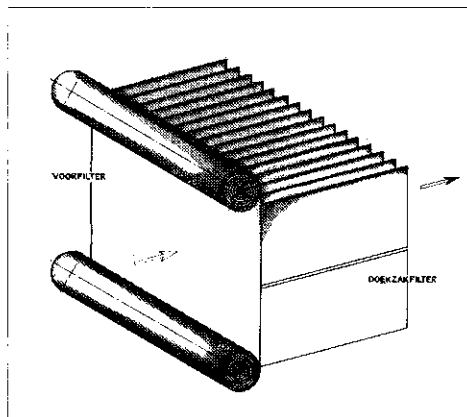
- beluchting met middelgrote bellen (6 - 15 mm diameter) bij toepassing van buizen of platen met openingen van 2 - 5 mm;

- beluchting met grote bellen (> 15 mm diameter) als gebruik gemaakt wordt van openingen groter dan 5 mm.

2.3. Tankvorm en plaatsing diffusoren

Bij het beluchtingssysteem met relatief lage druk, dat beter bekend is onder de naam INKA-beluchting, wordt de lucht uitgeblazen over de halve breedte van de tank op ca. 0,8 m onder de vloestofspiegel. Tengevolge van het inblazen van lucht ontstaat er in de aeratietank een draaiende beweging van de inhoud. Om de gehele inhoud mee te laten draaien is er in de lengterichting van de tank een schot aangebracht van de beluchtingselementen tot op enige afstand van de bodem (afb. 1). Bij beluchtingssystemen met relatief hoge druk bestaat meer diversiteit in uitvoeringsvormen. Vroeger werd vaak gebruik gemaakt van het 'ridge and furrow' systeem (afb. 2).

De diffusoren zijn aangebracht in de laagste delen van de tank. Wanneer weinig lucht ingeblazen wordt zou anders door de geringe turbulentie het aktiefslib op niet beluchte plaatsen tot bezinking kunnen komen. Bij een vlakke bodem kan het 'spiral-flow' systeem toegepast worden (afb. 3). Daarbij worden de diffusoren aan één zijde van de aeratietank aangebracht, waardoor loodrecht op de stroomrichting de tankinhoud gaat draaien en de waterdeeltjes een spiraalvormige baan gaan volgen. Tegenwoordig wordt algemeen het systeem toe-



Afb. 6 - Doekzakfilter met voorfilter

gepast waarbij de diffusoren gelijkmatig (afb. 4 en 5) over 'de vlakke bodem van de aeratietank zijn verdeeld (bodembeluchting). Daarbij kan al dan niet gebruik gemaakt worden van 'tapered aeration', d.w.z. dat naarmate het zuiveringsproces verder is voortgeschreden minder zuurstof in de aeratietank gebracht wordt door de ingeblazen hoeveelheid lucht en het aantal diffusoren te verminderen.

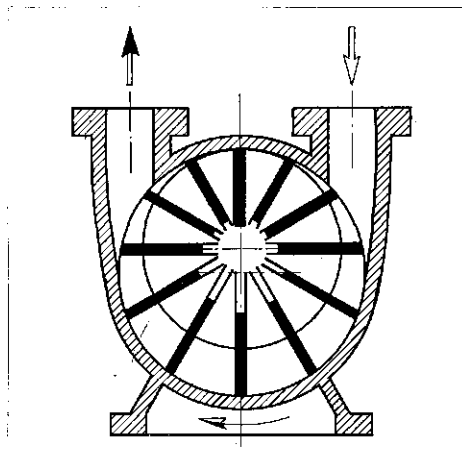
Naast deze systemen bestaan er nog een aantal bijzondere uitvoeringen op het gebied van tankvorm en plaatsing van de diffusoren.

3. Elektromechanische aspecten

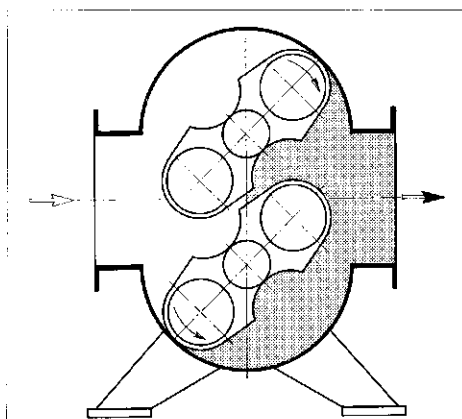
Het beluchtingssysteem met fijne bellen en relatief hoge druk ('diffused air') wordt gekenmerkt door een luchtdruk in de orde van grootte van 50 kPa en poreus filtermateriaal als diffusoren. Het systeem bestaat uit luchtfilters, compressoren, een luchtleidingnet en de diffusoren.

3.1. Luchtfilters

Om verstopping van de binnenzijde van de diffusoren te voorkomen is het noodzakelijk de lucht te filtreren. Het luchtfilter wordt in de zuigleiding van de compressoren geplaatst om ook deze te beschermen tegen vervuiling. Om een optimaal resultaat te krijgen moet de luchtbehandeling voldoen aan hoge eisen, die kunnen worden bereikt met een doekzakfilter in combinatie met een voorfilter (afb. 6) of een elektrostatisch filter. De zuigleidingen van de compressoren moeten met een grof rooster beveiligd worden tegen kapotte doekzakken en moeten bovendien afsluitbaar zijn om te voorkomen dat na werkzaamheden aan het luchtfilter (bijv. verwisselen van doeken) toch nog stof aangezogen wordt. Het verwisselen van het doekzakfilter vindt in Amsterdam elk jaar plaats terwijl het voorfilter elke week doorgedraaid wordt.



Afb. 7 - Schottenkompressor.



Afb. 8 - Roots-blower.

3.2. Compressoren

Gezien de benodigde combinatie van luchtdrukt en debiet komen een drietal typen compressoren voor toepassing in aanmerking.

— Schottenkompressor (afb. 7).

Deze compressoren leveren 0,008 - 1,7 m³/s bij een druk tot 300 kPa. Doordat de lamellen een intensieve smering vereisen is de lucht niet olievrij en moeten olieafscidders toegepast worden.

— Roots-blower (afb. 8).

Bij een druk van 70 - 100 kPa varieert de capaciteit tussen 0,003 en 17 m³/s. Omdat de draaizuigers noch elkaar noch het huis raken is geen smering nodig en de lucht olievrij.

— Centrifugaalkompressor (afb. 9).

De capaciteit varieert tussen 0,14 en 17 m³/s bij een druk van max. 70 kPa. Ook hier is de lucht olievrij.

Van deze compressoren worden de rootsblowers en centrifugaalkompressoren het meest toegepast.

Uit de karakteristieken (afb. 10) blijkt dat bij de rootsblowers, zoals te verwachten bij een kompressor volgens het verdringerprincipe, Q praktisch onafhankelijk is van Δp . De regeling van een roots-blower kan niet geschieden door smoren in de persleiding, omdat dan, hoewel Q iets terugloopt, het opgenomen vermogen sterk stijgt. Regeling kan wel plaats vinden door verandering van het toerental of, als de totale capaciteit gespreid is over meerdere eenheden, het uit bedrijf nemen van één of meer eenheden. Het rendement blijft dan praktisch gelijk.

Bij de centrifugaalkompressor, waar Q wel afhankelijk is van Δp , kan de regeling van Q plaatsvinden door smoren in de persleiding. Hoewel het rendement dan terugloopt, wordt ook het opgenomen vermogen lager. De besparingen zijn echter gering. Wanneer bijv. Q van 1,94 m³/s teruggebracht wordt tot 1,75 m³/s (10 %) daalt het opgenomen asvermogen slechts van 147 naar 140 kW

Afb. 9 - Centrifugaalkompressoren op r.i. West in Amsterdam. Op de achtergrond de omkasting van de luchtfilters.



(4,8 %). Bij voorkeur dient de regeling hier dus te geschieden door het uit bedrijf nemen van eenheden. Bij frekwent in- en uitschakelen moet rekening gehouden worden met grotere slijtage dan bij continu bedrijf. Op het punt van bedrijfszekerheid voldoen zowel de roots-blowers als centrifugaalkompressoren aan hoge eisen. Een leverancier van roots-blowers geeft een voorbeeld van 200.000 bedrijfsuren zonder reparatie, terwijl in Amsterdam een centrifugaal kompressor reeds 230.000 uur in bedrijf is geweest zonder reparatie. De aandrijving van de kompressoren geschiedt met elektromotoren of gasmotoren.

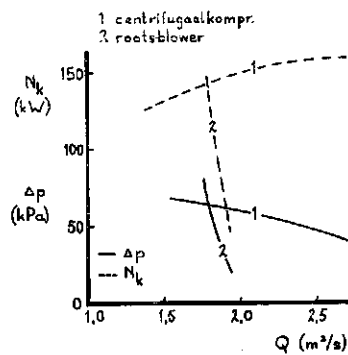
Voor alle hiergenoemde kompressoren moet rekening gehouden worden met maatregelen ter voorkoming van geluids-overlast. Bij de centrifugaalkompressoren is het mogelijk door adequate maatregelen het geluidsniveau op 300 m van het kompressorengedouw te beperken tot 35 dB(A). In de kompressorenhal echter kan een geluidsniveau van 89 dB(A) bestaan, zodat zonder bescherming en bij langdurige blootstelling gehoorschade veroorzaakt kan worden.

3.3. Luchtleidingnet

Met het luchtleidingnet wordt de in te blazen lucht verdeeld over de diffusoren. De buitenkant van de diffusoren wordt schoongehouden door de doorstroomde lucht. Als een diffusor eenmaal vervuild is, en dus minder lucht doorlaat, zal deze snel geheel verstopt raken. Wanneer deze verschijnselen optreden zal door de ongelijke luchtverdeling het zuurstofinbrengrendement dalen.

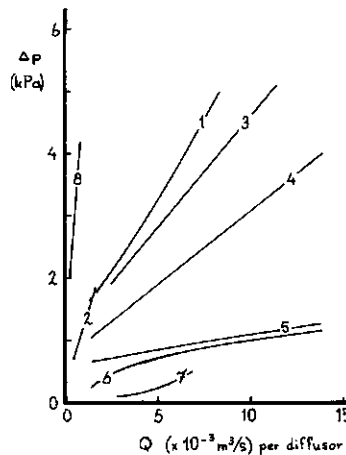
Een methode om een gelijkmatige luchtverdeling te verkrijgen en in de stand te houden, is het aanbrenge van een extra weerstand in het luchtleidingnet juist voor elke diffusor. Deze kan bestaan uit een blindflens met een gat van enkele mm. De extra weerstand is verantwoordelijk voor een groter opgenomen vermogen van de kompressor, zodat de grootte van het gat door optimalisering gevonden moet worden.

Bij de materiaalkeuze voor het luchtleidingnet dient grote aandacht geschonken te worden aan het voorkomen van corrosie omdat anders het gevaar bestaat dat, ondanks de luchtbehandeling, de binnenkant van de diffusoren toch nog snel vervuilt. De luchtleidingen met de diffusoren kunnen vast op de bodem van de aeratietank gemonteerd worden. Dit leidt tot geringere investeringen en grotere mechanische betrouwbaarheid vergeleken met een ophaalbaar systeem. Dit laatste heeft echter het voordeel dat onderhoudswerkzaamheden, zoals het reinigen van diffusoren, kunnen geschieden terwijl de aeratietank normaal in

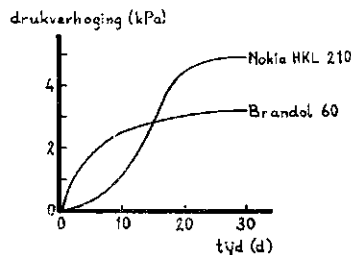


Afb. 10 - Karakteristieken centrifugaalkompressor en roots-blower.

- 1 Nokia HKP 600
- 2 " HKL 210
- 3 Brandol 60 (100/60 Ø)
- 4 " " (70/40 Ø)
- 5 Schuler Flexolith V400
- 6 " " V900
- 7 Flygt 4701
- 8 Activated sludge dome



Afb. 11 - Karakteristieken van diffusoren.



Afb. 12 - Verstopping van diffusoren.

bedrijf is. Voor toepassing op zuiveringsinstallaties met één aeratietank komt dus in feite alleen het ophaalbare systeem in aanmerking.

3.4. De diffusoren

De diffusoren bestaan uit een poreus materiaal. Van oudsher wordt daarvoor

een soort keramisch materiaal gebruikt maar tegenwoordig zijn ook diffusoren leverbaar van kunststof (polyethyleen en polystyreen). Veel gebruikt worden de buis- en schotelvormige diffusoren, terwijl ook plaat- en kussenvormige diffusoren leverbaar zijn.

Het drukverlies over de diffusor is afhankelijk van het luchtdebiet. In afb. 11 zijn voor een aantal diffusoren de karakteristieken gegeven van door de leveranciers verstrekte gegevens. Hoewel het drukverlies belangrijk is in het kader van het energieverbruik wordt uit deze grafiek duidelijk dat zelfs bij hoge luchtdebieten het drukverlies over de diffusor een gering deel is van het totale drukverlies (ca. 50 kPa) en diengevolge een ondergeschikte rol speelt.

Bij de vervuiling van de diffusoren spelen twee zaken een rol. Allereerst de vervuiling van de binnenkant die met een adequate luchtbehandeling en juiste materiaalkeuze van het luchtleidingnet geen problemen geeft. Daarnaast de vervuiling van de buitenkant van de diffusoren die veroorzaakt wordt door het aktiefslib en eventueel de precipitatiemiddelen bij simultane defosfatering.

Door deze soort vervuiling neemt de weerstand aanvankelijk snel toe om na enkele weken konstant te worden. In afb. 12 is dit weergegeven voor Brandol 60 in aktiefslib [2] en voor Nokia HKL 210 in aktiefslib met $0,1 \text{ kg FeSO}_4 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O/m}^3$ waarbij de beluchting elke dag gedurende 10 - 210 min gestopt werd (opgave leverancier). In Amsterdam heeft de ervaring geleerd dat eens in de 10 jaar de diffusoren (Brandol 60) gereinigd dienen te worden. Dit reinigen kan geschieden met water onder hoge druk (meer dan 2000 kPa).

4. Technologische aspecten

4.1. Factoren die het rendement van de zuurstofinbreng bepalen

De energiekosten ten behoeve van de zuurstofinbreng vormen een belangrijk deel van de totale exploitatiekosten van een aktiefslibinstallatie. Het is daarom van groot belang aandacht te besteden aan de optimalisering van de zuurstofinbreng.

Het rendement van de zuurstofinbreng (uitgedrukt in $\text{kg O}_2/\text{kWh}$), wordt bepaald door een aantal factoren van uiteenlopende aard. Bij een beschouwing van deze factoren is het van belang na te gaan in hoeverre de invloed ervan te beheersen is en op welke tijdstippen dit het geval is. Dit leidt tot een indeling in drie groepen.

4.1.1. Factoren die niet te beheersen zijn

1. Temperatuur in de aeratietank
Deze wordt geheel bepaald door de tem-

peratuur van het afvalwater. Een stijging van de temperatuur veroorzaakt een verlaging van het rendement van de zuurstofinbreng. Deze wordt voornamelijk teweeg gebracht door de invloed van de temperatuur op de waarde van $(c_s - c)$, waarin c_s de temperatuurafhankelijke zuurstofverzadigingsconcentratie is en c de zuurstofconcentratie in de aeratietank. Het rendement is recht evenredig met de waarde van $(c_s - c)$.

2. Oppervlakte-actieve stoffen en actiefslib

Door de oppervlakte-actieve stoffen wordt bij bellenbeluchting een nadelig effect uitgeoefend op het rendement. De concentratie van de oppervlakte-actieve stoffen is in eerste instantie afhankelijk van de concentratie in het afvalwater, maar wordt mede bepaald door het eliminatiepercentage ervan in de aeratietank. De invloed van het actiefslibgehalte is niet geheel duidelijk en zou variëren tussen nihil en sterk nadelig [11]. De invloed van beide wordt tot uitdrukking gebracht in de α -faktor. Deze geeft aan welke fractie de zuurstofinbreng, en daarmee het zuurstofinbrengrendement, in actiefslib bedraagt ten opzichte van die in leidingwater.

4.1.2. Factoren die te beheersen zijn in de ontwerpfase

1. Kompressoren en luchtleidingnet

De hoeveelheid lucht die per kWh via de diffusoren in de aeratietank geblazen wordt is afhankelijk van het rendement van motor + kompressor η_k en het drukverlies Δp in het luchtleidingnet en de diffusoren. Om Q m³ lucht/s in te blazen is een vermogen nodig van:

$$N = \frac{Q \Delta p}{\eta_k} \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

Het rendement van motor + kompressor ligt in de orde van grootte van 0,52 — 0,62 [2, 4, 9]. De roots-blowers hebben een vlakke rendementskromme. Bij de centrifugaalkompressoren daarentegen vertoont de rendementskromme een duidelijk optimum, zodat bij de keuze van de kompressor de nodige zorgvuldigheid geboden is. De drukverliezen in het luchtleidingnet liggen gewoonlijk in de orde van grootte van 1,0 - 1,5 kPa zodat hier geen besparingen van betekenis mogelijk zijn.

Als het drukverschil Δp 44 kPa bedraagt (tankdiepte 4 m) en voor η_k 0,6 aangenomen wordt, volgt uit vergelijking (1) dat voor het inblazen van 1 m³ lucht 0,02 kWh aan elektrische energie nodig is. Dit getal wordt in gunstige gevallen in de praktijk ook gevonden. Droge lucht bevat 0,299 kg O₂/Nm³. Als de ingeblazen zuurstof volledig in oplossing gaat zou voor dit voorbeeld een zuurstofinbrengrendement van

ca. 15 kg O₂/kWh resulteren. In de praktijk gaat echter veel minder dan 100 % in oplossing.

2. Diffusoren en aeratietank

Er zijn een groot aantal factoren aan te wijzen die bepalend zijn voor de fractie van de ingeblazen zuurstof die in oplossing gaat (η_z). Omdat deze in hoge mate met elkaar samenhangen is het van belang die factoren te kennen die hiervoor primair bepalend zijn. In [11] wordt de snelheid van zuurstofoverdracht, uitgedrukt door de concentratie-toename per tijdseenheid dc/dt , weergegeven door

$$\frac{dc}{dt} = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c} \cdot \frac{A}{V} \cdot (c_s - c)} \quad \frac{\text{kg O}_2}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \quad (2)$$

Vergelijking (2) wordt vaak geschreven als

$$\frac{dc}{dt} = k (c_s - c) \quad \frac{\text{kg O}_2}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \quad (3)$$

waarin de beluchttingsconstante

$$k = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c}} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (4)$$

Op de invloed van de waarde van $(c_s - c)$ wordt in hoofdstuk 4.1.3. nader ingegaan, terwijl D en t_c bepaald worden door de factoren die in hoofdstuk 4.1.1. beschreven zijn en hierbij naar hun aard buiten beschouwing gelaten worden. Daarmee is dan het specifieke grensvlak A/V bepalend voor k en dus ook voor η_z .

De absorptie van zuurstof in water vindt plaats in 3 fasen.

De eerste fase is de belvorming aan het diffusor-oppervlak. Voor een gegeven diffusor varieert de duur van de belvorming en daarmee de zuurstofoverdracht, met het luchtdebiet door de diffusor. Bij de diffusoren met kleine openingen en een laag luchtdebiet kan η_z in deze fase een waarde bereiken van 0,03 [8].

De tweede fase is het opstijgen van de luchtbelletjes. De grootte van het grensvlak

water/lucht kan met de nodige aannamen berekend worden.

Hiertoe wordt één diffusor beschouwd. Het luchtdebiet door deze diffusor bedraagt Q_d m³/s en de indompeldiepte h m. Het volume lucht in de waterfase is dan $Q_d \cdot \tau$ m³ als τ de gemiddelde verblijftijd van een luchtbel in de waterfase is, waarbij de invloed van de diepte waarop de luchtbel zich bevindt op het volume ervan verwaarloosd wordt. De gemiddelde verblijftijd τ volgt uit

$$\tau = \frac{h}{v_1 + v_g} \quad (\text{s}) \quad (5)$$

Voorts geldt voor bolvormige luchtbelletjes dat het specifiek oppervlak

$$S = \frac{6}{d} \quad (\text{m}^2/\text{m}^3) \quad (6)$$

zodat

$$A = \frac{6 Q_d h}{d (v_1 + v_g)} \quad (\text{m}^2) \quad (7)$$

Hierin is de stijgsnelheid van de luchtbel in de waterfase v_g een functie van de bel diameter d , die op zijn beurt voor een gegeven diffusor een functie is van Q_d . In afb. 13 worden een aantal relaties tussen v_g en d in beeld gebracht [6]. Tevens zijn in deze afbeelding de gegevens van Pasveer [10] opgenomen. Het blijkt dat Pasveer vooral in het van belang zijnde gebied tussen $d = 0,002$ en $0,010$ m aanzienlijk lagere stijgsnelheden te zien geeft. Omdat de gegevens van Pasveer op metingen berusten worden deze aangehouden. Voor d tussen $0,002$ en $0,010$ m geldt praktisch dat

$$v_g = 21,8 d - 0,02 \quad (\text{m/s}) \quad (8)$$

De relatie tussen d en Q_d kan voor een bepaalde diffusor beschreven worden door $d = b_1 Q_d + b_2$

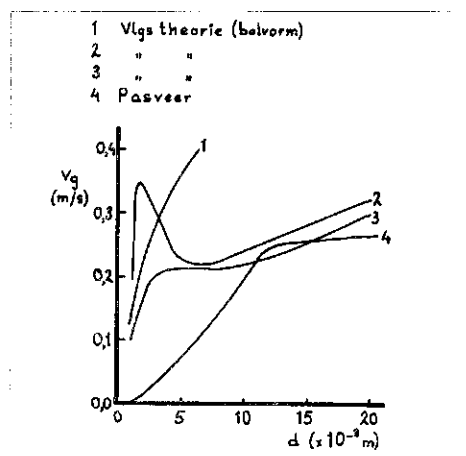
waarin b_1 en b_2 diffusorkonstanten zijn.

Voor de Nokia HKP 600 diffusor kan uit gegevens van de leverancier bij $1,3 \cdot 10^{-3} < Q_d < 3,5 \cdot 10^{-3}$ m³/s en een indompeldiepte van 2 m berekend worden dat $b_1 = 0,29$ s/m² en $b_2 = 2,9 \cdot 10^{-3}$ m. Dat d mede afhankelijk is van o.a. de concentratie aan oppervlakte-actieve stoffen wordt buiten beschouwing gelaten. Uit de vergelijkingen (7), (8) en (9) kan na verwaarlozing van een relatief onbelangrijke term worden afgeleid dat

$$A = \frac{6 h}{(43,6 b_1 b_2 + \frac{21,8 b_2^2}{Q_d}) + (b_1 + \frac{b_2}{Q_d}) (v_1 - 0,02)} \quad (\text{m}^2) \quad (10)$$

Het is te verwachten dat v_1 ondermeer bepaald kan worden door plaatsing van de

Afb. 13 - Stijgsnelheid van luchtbelletjes in water.



diffusoren, het aantal diffusoren, het luchtdebiet per m³ aeratietank Q_s, Q_d en de geometrie van de aeratietank.

— Uit [7] kan gekonkludeerd worden dat v₁, gegeven het aantal diffusoren, Q_d en de aeratietank, in belangrijke mate bepaald wordt door het aantal rijen diffusoren in de aeratietank. Hoe meer rijen hoe lager de vloeistofsnelheden. Dit heeft ook duidelijk invloed op η_z. Voor één resp. twee en drie rijen diffusoren bedroeg η_z 0,098 resp. 0,133 en 0,162. Deze uitkomsten komen redelijk overeen met de verhouding van de orde van grootte van de vloeistofsnelheden.

— Tevens wordt in [7] gesteld dat voor 0,83 · 10⁻³ < Q_s < 1,39 · 10⁻³ Nm³/m³ · s v₁ onafhankelijk is van Q_s voor een 'spiral-flow' systeem. Theoretisch is een relatie tussen Q_d en v₁ te verwachten. De drijvende kracht achter de vloeistofstroming is het dichtheidsverschil tussen de vloeistofkolommen boven en naast de diffusor. Het drukverschil Δp is evenredig met de hoeveelheid lucht die zich boven de diffusor in de waterfase bevindt, dus met Q_d h/(v₁ + v_g). Gezien het turbulente karakter van de stroming zal gelden dat Δp ∼ v₁². Afhankelijk van de grootte van v₁ en v_g zal dan v₁ ∼ √Q_d à √³Q_d. Omdat bij gegeven aeratietank en aantal diffusoren Q_s ∼ Q_d is, geldt ook dat v₁ ∼ √Q_s à √³Q_s.

Door de afdeling Riolering en Waterverversing van de Dienst der Publieke Werken Amsterdam zijn enkele metingen uitgevoerd om de relatie tussen v₁ en Q_s vast te stellen bij bodembeluchting.

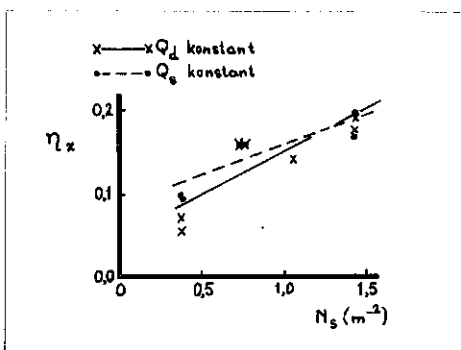
In een ca. 4 m diepe tank (Brandol 60, N_s = 1,38 m⁻²) is op ca. 2 m boven de diffusor de gemiddelde vloeistofsnelheid v₁ in duplo bepaald. De meettijd bedroeg 600 s. De watertemperatuur was 14 °C en de actiefslibconcentratie 3,8 kg/m³. De resultaten zijn in tabel I weergegeven.

TABEL I.

| Q _s (Nm ³ /m ³ s) | v ₁ (m/s) |
|--|----------------------|
| 0,139 · 10 ⁻³ | 0,07 |
| 0,197 · 10 ⁻³ | 0,08 |
| 0,231 · 10 ⁻³ | 0,09 |
| 0,278 · 10 ⁻³ | 0,13 |
| 0,406 · 10 ⁻³ | 0,15 |
| 0,544 · 10 ⁻³ | 0,17 |
| 0,694 · 10 ⁻³ | 0,16 |

De relatie v₁ = 7,26 √Q_s - 0,01 bleek de waarnemingen goed te beschrijven (korrrelatiecoëfficiënt is 0,929 en voor Q_s = 0 is v₁ praktisch gelijk aan nul).

— In 1964 heeft onderzoek door de afdeling Riolering en Waterverversing uitgezeten dat het specifieke aantal diffusoren N_s (aantal diffusoren per m² aeratietank) een grote invloed heeft op η_z. Dit onderzoek



Afb. 14 - Relatie tussen η_z en N_s.

is uitgevoerd in een tank met een lengte van 2,80 m, een breedte van 1,00 m en een grootste diepte van 3,30 m welke op de bodem in de lengterichting verlopende afgeschuinde wanden had. De totale inhoud van de tank van 8,54 m³. De diffusoren waren Brandolbuizen (100/60 mm Ø, 500 mm lang, Körnung 60). In afb. 14 worden de resultaten van dit onderzoek weergegeven. Er zijn twee regressielijnen weergegeven, één voor constante Q_d en één voor constante Q_s. Het lineaire verband (in het onderzochte gebied) is in beide gevallen statistisch significant bij een betrouwbaarheid van 95 %.

— De geometrie van de aeratietank zal bij bodembeluchting, met name bij hoge N_s, naar verwachting geen rol van betekenis spelen.

— Dit alles leidt tot de konklusie dat bij bodembeluchting v₁ bepaald wordt door het specifieke aantal diffusoren N_s en het luchtdebiet per diffusor Q_d.

De derde fase van de zuurstofoverdracht is tijdens het breken van de luchtbelleten aan het wateroppervlak. De zuurstofoverdracht hierbij is gering [8] en wordt verder buiten beschouwing gelaten.

Bij bodembeluchting kan voor de grootte van het grensvlak water/lucht A tijdens de drie fasen van de zuurstofoverdracht (met de nodige voorzichtigheid, gezien de aandnamen en het gedeeltelijk ontbreken van een gefundeerde theoretische achtergrond) het volgende verband geformuleerd worden waarin de belangrijkste effecten op A, en daarmee op η_z, tot uitdrukking worden gebracht.

$$A = f_1(Q_d) + \frac{6h}{(43,6 b_1 b_2 + \frac{21,8 b_2^2}{Q_d}) + (b_1 \sqrt{Q_d} + \frac{b_2}{\sqrt{Q_d}}) f_4(N_s)} \quad (m^2) \quad (11)$$

Hierin staat de eerste term voor A tijdens de eerste fase en de tweede term voor A tijdens de tweede fase van de zuurstofoverdracht. Het effect van de derde fase is

verwaarloosd. De tweede term is verkregen uit vergelijking (10) door aan te nemen dat (v₁ - 0,02) = √Q_d f₄(N_s). Vergelijking (11) kan kortweg geschreven worden als

$$\eta_z \approx A = f_1(Q_d) + \frac{6h}{f_2(Q_d) + f_3(Q_d) f_4(N_s)} \quad (12)$$

Hierin worden f₁, f₂ en f₃ bepaald door de diffusoreigenschappen. Deze functies zijn eenvoudig te bepalen. Omdat A (via η_z) te meten is, is dan ook f₄ te achterhalen. Het zal duidelijk zijn dat de vergelijkingen (11) en (12), hoewel zij theoretisch gefundeerd zijn, toch een dusdanig empirisch karakter dragen dat zij niet zonder meer geschikt zijn voor ontwerpdoeleinden. Zij dienen in eerste instantie meer gezien te worden als model voor de interpretatie van onderzoekgegevens. Eerst als inderdaad zou blijken dat de experimentele resultaten goed aansluiten bij het door deze vergelijkingen geformuleerde verband kunnen de vergelijkingen ook voor ontwerpdoeleinden worden gebruikt.

Een hoge η_z impliceert dat de energie-inbreng in het systeem laag wordt. Daardoor kan theoretisch de mengfunctie van de beluchting in gevaar komen. Bij oxydatiesloten en caroussels, systemen met een lage vermogensinbreng per m³ aeratietank, wordt gewerkt met ca. 12,5 W/m³.

Bij de hierboven vermelde metingen van v₁ is tevens menging beoordeeld. Aktiefslib met een slibindex van 85 ml/g kwam na 2 uur niet merkbaar tot bezinking bij een vermogensinbreng van 10 W/m³. Dit is gezien een v₁ van 0,07 m/s, vergeleken met de oppervlaktebelasting van een nabezink-tank van 2,8 · 10⁻⁴ m/s ook niet te verwachten.

4.1.3. Factoren die steeds controleerbaar zijn Zoals blijkt uit vergelijking (3) is uitsluitend de actuele zuurstofconcentratie c in de aeratietank steeds controleerbaar. Het rendement van de zuurstofinbreng (in kg O₂/kWh) is recht evenredig met de waarde van (c_s - c). Een hogere zuurstofconcentratie in de aeratietank dan voor het proces noodzakelijk is, zal dus het rendement nadelig beïnvloeden. Door de invloed van de temperatuur op (c_s - c) zal het nadelig effect toenemen bij hogere temperauren [11].

4.1.4. Het zuurstofinbrengrendement

In het voorgaande is de zuurstofinbreng beschouwd als een op zichzelf staand ver-

schijnsel dat kan worden bestudeerd aan de hand van beluchtingsproeven in leidingwater.

Een rendement van 3,3 kg O₂/kWh is daarbij haalbaar [7].

Ook eigen metingen geven resultaten in deze orde van grootte. Wellicht is het mogelijk het rendement nog verder te verhogen. De mogelijkheden hiertoe lijken echter vrij beperkt. Wel is het mogelijk om met behulp van de theorie in hoofdstuk 4.1.2. gericht onderzoek te verrichten.

4.2. Procestechnologische consequenties en mogelijkheden van de bellenbeluchting in een propstroomsysteem

Bij een keuze van bellenbeluchting als beluchtingssysteem wordt meestal tevens voor een propstroomreactor gekozen, hoewel ook bij de volledig gemengde reactor bellenbeluchting toegepast kan worden.

De keuze van een propstroomreactor heeft een aantal consequenties die gedeeltelijk op een ander gebied dan dat van de zuurstofinbreng liggen.

4.2.1. Aktiefslibconcentratie

Bij een gegeven retourslibconcentratie wordt de aktiefslibconcentratie in de aeratietank, die zo konstant mogelijk moet zijn, volledig bepaald door de verhouding tussen het influentdebiet en het retourslibdebiet. Omdat het retourslibdebiet niet ongelimiteerd verlaagd kan worden (de verblijftijd van het aktiefslib in de nabezinktank zou dan te lang worden) mag het influentdebiet niet beneden een zekere grens dalen. Dit kan gerealiseerd worden door effluent te recirkuleren. Hoewel het mogelijk is het recirkulatie-effluent direkt in de aeratietank te brengen is het uit het oogpunt van stankbestrijding (tegenaan van lange verblijftijden in de voorbezinktank) aantrekkelijk om influent en gerecirkuleerd effluent voor de voorbezinktank samen te voegen.

4.2.2. Slibindex

Het is een bekend feit dat de slibindex in een propstroomsysteem in het algemeen lager is dan in een volledig gemengd systeem onder overigens gelijke omstandigheden [5].

4.2.3. Eliminatiepercentages

Met de Monod-reactiekinetiek als uitgangspunt is aan te tonen dat de eliminatiepercentages onder gelijke omstandigheden (dezelfde slibbelasting) in een propstroomsysteem hoger zijn dan in een volledig gemengd systeem. Het verschil in eliminatiepercentage wordt groter naarmate het eliminatiepercentage zelf hoger wordt.

Omgekeerd geldt, dat om een gelijk eliminatiepercentage te realiseren bij een propstroomsysteem een hogere slibbelasting gekozen kan worden.

4.2.4. Concentratie oppervlakte-actieve stoffen

In een propstroomsysteem wordt de concentratie van een aantal oppervlakte-actieve stoffen (zoals detergenten) lager naarmate het zuiveringsproces verder is voortgeschreden. Het eliminatiepercentage van detergenten is hoger dan 90 %. Dit betekent dat de ongunstige invloed van de detergenten op de α -faktor gaandeweg minder wordt.

4.2.5. Verloop van de respiratiesnelheid

De hoeveelheid zuurstof die per tijdseenheid en per volume-eenheid van de aeratietank wordt gebruikt, wordt aangeduid als respiratiesnelheid (in kg O₂/m³ s). Deze is het hoogst aan het begin van de aeratietank en daalt kontinu; aan het eind is de respiratiesnelheid praktisch gelijk aan de snelheid van de endogene ademhaling. Om de zuurstoftoevoer aan dit verloop aan te passen wordt dan gebruik gemaakt van 'tapered aeration'. Meestal gebeurt dit door een stapsgewijze vermindering van het aantal diffusoren.

4.2.6. Regeling zuurstoftoevoer

Zoals blijkt uit hoofdstuk 4.1.3. wordt het zuurstofinbrengrendement sterk beïnvloed door de zuurstofconcentratie in de aeratietank. In een volledig gemengde reactor kan volstaan worden met een relatief eenvoudig feed-back regelsysteem met de zuurstofconcentratie als parameter. Dit is mogelijk omdat de zuurstofconcentratie op alle plaatsen in de reactor in principe gelijk is en door de menging de verandering in de tijd relatief langzaam is. In een propstroomsysteem ligt dit aanzienlijk gecompliceerder. De grootste verschillen in zuurstofconcentratie treden op aan het eind van de reactor. Op dit punt kan echter de zuurstofconcentratie slechts als parameter dienen voor een feed-back regelsysteem als de zuurstofconcentratie over de aeratietank geen al te grote verschillen vertoont. Dit zal in het algemeen slechts het geval zijn bij een aeratietank met 'tapered aeration' en een konstante hydraulische- en BZV-belasting. Indien dit niet het geval is lijkt een regeling volgens het feed-forward systeem met de respiratiesnelheid als parameter mogelijkheden te bieden voor de regeling van de zuurstoftoevoer naar een propstroomreactor [12].

4.2.7. Biologische denitrifikatie

In elk aktiefslibstelsel vindt een geringe mate van denitrifikatie plaats. Daarbij

wordt de zuurstof uit nitraat gebruikt voor de koolstofoxidatie. In tegenstelling tot een volledig gemengd systeem is het in een propstroomsysteem mogelijk in een bepaald gedeelte van de aeratietank biologisch te denitrificeren en daarbij de zuurstof die gebruikt is voor de nitrifikatie terug te winnen [1].

Naast de besparing op energiekosten is dit ook uit milieuoogpunt aantrekkelijk. Dat de introductie van een dergelijk deelsysteem binnen het aktiefslibstelsel aan de procesbeheersing hoge eisen stelt is duidelijk.

4.2.8. Specifiek energieverbruik

Uit het voorgaande is gebleken dat het energieverbruik ten behoeve van de zuurstofinbreng niet alleen bepaald wordt door de keuze van het beluchtingssysteem, maar tevens in belangrijke mate door de procestechnologische optimaliseringsmogelijkheden die dat beluchtingssysteem in de praktijk biedt. Daarbij spelen dan bovendien nog de procescondities (bijv. slibbelasting, aktiefslibconcentratie) een rol van betekenis. Dit leidt ertoe het energieverbruik te betrekken op de in de aeratietank verwijderde hoeveelheid BZV (of CZV) vermeerderd met 4,57 maal de verwijderde hoeveelheid kjeldahlstikstof. Het specifiek energieverbruik wordt dan uitgedrukt in kWh/kg O₂. In het aldus geformuleerde specifiek energieverbruik zijn dus zowel het karakter van het afvalwater, de kwaliteit van het beluchtingssysteem, de mate van procesoptimalisering en de procescondities verdisconteerd en is daarmee voor het beoordelen van bedrijfsresultaten van groot belang.

Voor de uit 1969 daterende uitbreiding van de rioolwaterzuiveringsinstallatie Zuid in Amsterdam varieerde het specifiek energieverbruik (op BZV-basis en als maandgemiddelde) in 1974 en 1975 tussen 0,45 en 0,98 kWh/kg O₂ en bedroeg gemiddeld 0,78 kWh/kg O₂. De slibbelasting lag daarbij tussen 0,07 en 0,21 kg BZV₅²⁰/kg ds . d en de aktiefslibconcentratie tussen 2,4 en 5,6 kg/m³. Bij deze aktiefslibinstallaties is bodembeluchting toegepast (N_s = 1,38, Brandol 60, h = ca. 4 m) en bij beluchtingsproeven in leidingwater resulteerde een zuurstofinbrengrendement van ruim 3 kg O₂/kWh. Gezien het rendement in leidingwater en de reeds eerder vermelde resultaten van de vloeistofstijgsnelheidsmetingen is het beluchtingssysteem als zodanig als vrij optimaal te beschouwen. Er wordt 'tapered aeration' toegepast door middel van visueel ingestelde verdeling van de luchttoevoer.

Omdat geen zuurstofregeling plaatsvindt en geen denitrifikatiefase aanwezig is, mag verwacht worden dat het genoemde speci-

fiek energieverbruik in niet onbelangrijke mate verbeterd kan worden. Het is evident dat een optimale procesregeling daarbij noodzakelijk is.

5. Economische aspecten

Naast de elektromechanische en technologische aspecten verdienen ook de economische aspecten aandacht.

Aan de hand van richtprijstaanbiedingen van leveranciers en eigen gegevens is een investeringsberekening gemaakt voor een beluchtenbeluchtingssysteem. Daarbij werden de volgende uitgangspunten gehanteerd.

— BZV-belasting aeratietanks 2625 kg BZV₅²⁰ d.

— N_{kj} -belasting aeratietanks 750 kg kj -N/d.

— 2 aeratietanks van 2300 m³ inhoud en 4 m diep.

— Specifiek aantal diffusoren $N_s = 1,38$ m⁻² (Brandol 60).

— Specifiek energieverbruik (BZV-basis) 0,8 kWh/kg O₂.

Als het inblazen van 1 m³ lucht 0,02 kWh aan energie kost, kan berekend worden dat ca. 10.000 m³ lucht/h nodig is om 100 % eliminatie van BZV en N_{kj} te kunnen bereiken.

Van de mogelijke alternatieven worden er vier nader beschouwd, waarbij steeds 3 compressoren met een capaciteit van 5000 m³/h opgesteld worden. Hiervan dient er één als reserve. De aandrijving geschiedt met elektromotoren.

Alternatief 1: 3 centrifugaalkompressoren met vast toerental.

Alternatief 2: 3 roots-blowers met vast toerental.

Alternatief 3: 2 roots-blowers met twee toerentallen (poolomschakelbare motoren) en de reserveblower met vast toerental.

Alternatief 4: 2 roots-blowers met traploos variabel toerental en de reserveblower met vast toerental.

De aangezogen lucht wordt behandeld in een luchtfilter-installatie met een capaciteit van 15.000 m³/h. Het luchtleidingnet in de aeratietanks en de diffusoren zijn vast op de bodem gemonteerd. De benodigde investering (prijspeil derde kwartaal 1976) is vermeld in tabel II.

Daarbij moet uitdrukkelijk worden gesteld dat het gaat om richtprijstaanbiedingen en schattingen. Met betrekking tot de prijsverschillen tussen de compressorinstallaties moet worden opgemerkt dat deze berekening betrekking heeft op compressoren met een capaciteit van 5000 m³/h. Bij andere capaciteiten kan het beeld geheel anders worden.

TABEL II.

| | investering in f 1000,— | | | |
|-------------------------------|-------------------------|-----|------|------|
| | alternatief | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| luchtfilterinstallatie | 8 | 8 | 8 | 8 |
| kompressorinstallatie | 196 | 146 | 166 | 203 |
| elektrotechnische componenten | 90 | 90 | 90 | 90 |
| luchtleidingen in gebouw | 95 | 95 | 95 | 95 |
| kraanbaan in gebouw | 30 | 30 | 30 | 30 |
| montage en algemeen gebouw | 81 | 81 | 81 | 81 |
| luchtleidingen naar AT | 115 | 128 | 128 | 128 |
| beluchtingssysteem in AT | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 316 | 316 | 316 | 316 |
| totaal | 1031 | 944 | 1014 | 1051 |

Bij de keuze van een beluchtingssysteem wordt aan de exploitatiekosten, waarin de investeringen een grote rol spelen, terecht een groot gewicht toegekend. Daarnaast moeten ook factoren in beschouwing genomen worden zoals bijv. bedrijfszekerheid, geluidshinder e.d. om het geheel naar waarde te kunnen schatten.

Symbolenlijst

| | |
|---|----------------|
| oppervlak grensvlak tussen lucht en water (m ²) | A |
| diffusorkonstante (s/m ²) | b ₁ |
| diffusorkonstante (m) | b ₂ |
| zuurstofconcentratie (kg/m ³) | c |
| zuurstofverzadigingsconcentratie (kg/m ³) | c _s |
| diameter luchtbel (m) | d |
| diffusiecoëfficiënt (m ² /s) | D |
| indempeldiepte diffusor (m) | h |
| beluchtingskonstante (s ⁻¹) | k |
| vermogen (kW) | N |
| asvermogen (kW) | N _k |
| specifiek aantal diffusoren d.w.z. aantal per m ² aeratietank (m ⁻²) | N _s |
| druk (kPa) | p |
| debiet (m ³ /s) | Q |
| luchtdebiet per diffusor (m ³ /s) | Q _d |
| luchtdebiet per m ³ /aeratietank (m ³ /s) | Q _s |
| specifiek oppervlak luchtbel (m ⁻¹) | S |
| tijd (s) | t |
| tijdsduur dat een grensvlak gemiddeld bestaat (s) | t _c |
| stijgnsnelheid van luchtbel in waterfase (m/s) | v _g |
| stijgnsnelheid waterfase (m/s) | v _j |
| volume water (m ³) | V |
| rendement motor + kompressor | η _k |
| fractie van de ingeblazen zuurstof die in oplossing gaat | η _z |
| verblijftijd van luchtbel in de waterfase (s) | τ |

Literatuur

1. Bayley, R. W., Ayling, R. W. *Automatic control of the activated-sludge process and potential savings in treatment costs*. Instrumentation control and automation for waste-water treatment systems. Pergamon Press, Oxford (1974).
2. Bischofsberger, W., Tofaute, K. *Poröse Kunststoffe zur feinblasigen Belüftung von Abwasser*

in: *Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen der Emschergergenossenschaft und des Lippeverbandes*, Heft 6. Vulkan Verlag, Essen (1964).

3. Dobbins, W. E. *Mechanism of gas absorption by turbulent liquids*. Advances in water pollution reserach. Pergamon Press, Oxford (1964).

4. Downing, A. L. *Aeration in the activated sludge process*. Journal of the Institution of Public Health Engineers, april 1960.

5. Heide, B. A., Pasveer, A. *Oxidation ditch: Prevention and control of filamentous sludge*. H₂O 7, 373 (1974).

6. Hörler, A. *Allgemeine Betrachtungen zum Vergleich von Belüftungssystemen*. Verbandsbericht nr. 81/1. Verband Schweizerischer Abwasserfachleute.

7. Knop, E. E. Bischofsberger, W., Stalman, V. *Versuche mit verschiedenen Belüftungssystemen im technischen Massstab*, Teil 2. Vulkan Verlag, Essen.

8. Lamb, M. Diskussie bij [3].

9. Möller, U. *Berechnung der Sauerstoffaufnahme und wirtschaftliche Gestaltung von Druckluft-Belüftungsbecken*. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 32. Kommissionsverlag R. Oldenbourg, München (1968).

10. Pasveer, A. *Research on activated sludge*. Publikatie no. 40. Afdeling Gezondheidstechniek TNO.

11. Pöpel, H. J. *Zuurstofinbreng*. H₂O 8, 102 (1975).

12. Ruider, E., Schopper, U. *Possibilities for the control of an activated sludge treatment plant*. Instrumentation control and automation for waste-water treatment systems. Pergamon Press, Oxford (1974).

13. Sweeris, S. *Derde vakantiekursus in behandeling van afvalwater*, Delft (1968).

Lezingen van prof. dr. F. G. Pohland

Prof. dr. F. G. Pohland, hoogleraar civiele gezondheidstechniek aan het Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga., USA, thans gasthoogleraar bij de vakgroep gezondheidstechniek, TH Delft, zal in april a.s. de twee volgende lezingen houden:

20 april 1977, 16.00 tot 17.30 uur
The US Environmental Protection Agency
A technical seminar on the organization and functions of EPA and its role in environmental quality control activities in the United States.

27 april 1977, 16.00 tot 17.30 uur
Environmental Assesment and Impact Statements

A technical seminar on progress toward implementation of the provisions of the National Environmental Policy Act in the United States with special emphasis on rationale and procedures for developing environmental impact statements.

Beide lezingen vinden plaats in het Gebouw voor Civiele Techniek, Stevinweg 1, Delft, zaal E. Belangstellenden zijn van harte welkom.