

De zuivering van afvalwater volgens het actiefslibproces met behulp van lagedrukbeluchting

Experimenten en gedachten, die tot toepassing van de lagedrukbeluchting hebben geleid

Sinds de uitvinding van het actiefslibproces als methode om afvalwater te zuiveren is veel onderzoek verricht naar de zuurstofoverdracht van in water opstijgende lucht-bellen. In het bijzonder verdient het werk van Ippen en Carver, gepubliceerd in 1954 [1] aandacht. Ze onderzochten bij het beluchten van zuurstofvrij water de absorptie van zuurstof in afhankelijkheid van verschillende variabelen, waarvan in dit bestek van belang zijn de kolom water, die boven de beluchter staat en de grootte van de luchttoevoer per tijdseenheid.

In afb. 1 is het maximale percentage zuurstof, dat opgenomen wordt in water met een zuurstofconcentratie gelijk nul, uitgezet tegen de onderdompelingsdiepte van het beluchtingselement. Hieruit blijkt, dat de zuurstofabsorptie nagenoeg lineair toeneemt met de beluchtingsdiepte bij een bepaald luchtdebiet en een bepaalde luchtdiameter.

In afb. 2 is het maximum percentage opgenomen zuurstof per eenheid van onderdompelingsdiepte (uitgedrukt per voet) uitgezet tegen de hoeveelheid lucht in cm^3 die per minuut uit een capillair stroomt en wel voor verschillende beluchtingsdiepten.

Hieruit trekken Ippen en Carver de volgende conclusies:

1. Voor een gegeven capillair en een gegeven onderdompelingsdiepte is het percentage in de vloeistof opgeloste zuurstof hoger, naarmate het luchtdebiet lager is.
2. Het percentage opgeloste zuurstof per eenheid van indompelingsdiepte (hier uitgedrukt per voet) is groter naarmate de onderdompelingsdiepte van het beluchtingselement geringer is.

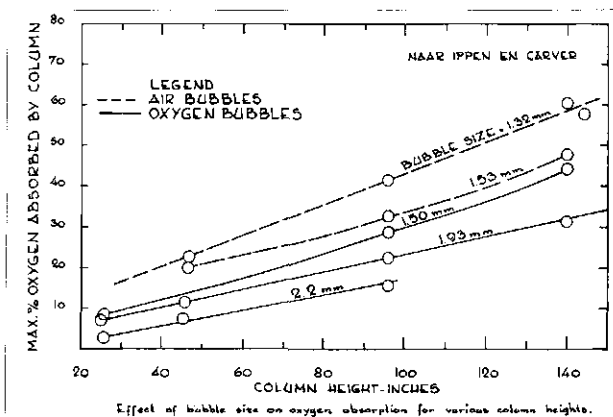
De verklaring, die zij voor de relatief grote zuurstofabsorptie bij geringe beluchtingsdiepte gaven is als volgt: De overdracht van zuurstof verloopt in 3 fasen, beginnend bij de vorming van de luchtbel aan de capillair en eindigend met het barsten van de bel aan het wateroppervlak, terwijl de tweede fase plaats heeft wanneer de luchtbel aan het opstijgen is. Tijdens de eerste en laatste fase voltrekken de veranderingen aan het grensvlak zich zeer snel, terwijl de tweede fase gekarakteriseerd wordt door een min of meer stabiele toestand van zuurstofoverdracht. Juist de snelle verandering, die optreedt tijdens de vorming van de luchtbel aan de capillair, is verantwoordelijk voor een grote zuurstofoverdracht. Het vloeistof-gas grensvlak expandeert voortdurend, waardoor de concentratiegradiënt in de vloeistoffilm groot blijft. Gedurende het opstijgen van de bel blijft de snelheid van zuurstofoverdracht constant, maar bezit een relatief lage waarde. Uiteindelijk barst de bel aan het wateroppervlak. De verstoring van het grensvlak door de uiteenspattende bel bevordert de zuurstofoverdracht uit de atmosfeer. De eerste en laatste fase van het bestaan van de bel gaan dus gepaard met een hogere overdrachtssnelheid dan in de stijgfase. In laatstege-

noemde fase blijft de snelheid constant en is onafhankelijk van de kolomhoogte.

De verlaging in het percentage opgeloste zuurstof bij toenemend luchtdebiet is waarschijnlijk het gevolg van het feit, dat bij de gegeven diameter van de capillair grotere bellen geproduceerd worden bij de hogere luchtsnelheden. Bovendien is de belconcentratie in het water groter zonder voldoende spreiding in het horizontale vlak.

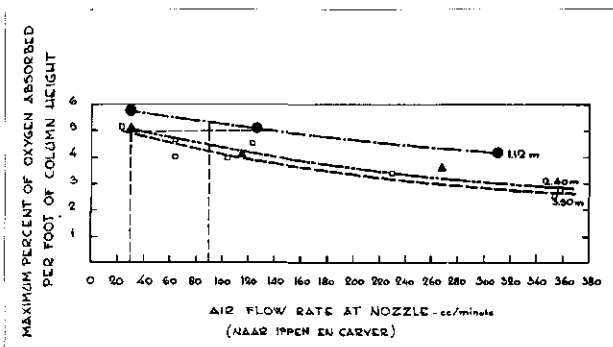
Bij het beluchten van water met perslucht is energie nodig voor het overwinnen van de weerstand in leidingen, in het beluchtingselement en voor het overwinnen van de hydrostatische druk. De benodigde hoeveelheid energie per eenheid van indompelingsdiepte wordt groter bij afnemende diepte aangezien de leidingweerstand en de weerstand in het beluchtingselement gelijk blijven. De economie van de zuurstofoverdracht, uitgedrukt in geabsorbeerde hoeveelheid zuurstof per eenheid van energie (g/kWh) kan desondanks voor geringe beluchtingsdieptes gunstig zijn door de al eerder aangestipte grote zuurstofoverdracht bij de belvorming, mits de verliezen in leiding en beluchter aanzienlijk kunnen worden gereduceerd.

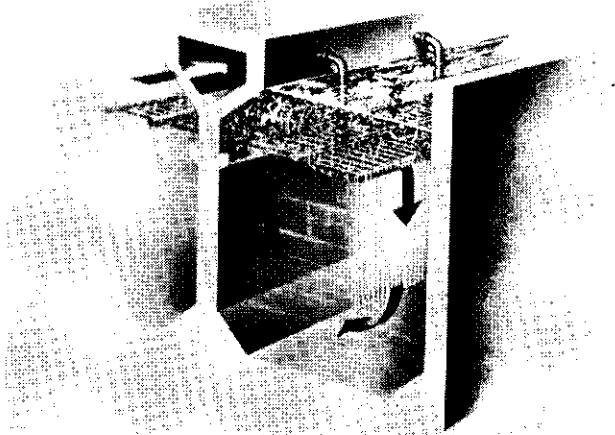
Deze gedachtengang volgde de Zweed Fischerström [2], toen hij gebruik maakte van de ervaringen van Ippen en Carver. Hij kwam op het idee het beluchtingselement



Afb. 1 - Effect of bubble size on oxygen absorption for various column heights.

Afb. 2.





Afb. 3.

op geringe diepte onder te dompelen. Aangezien uit afb. 1 bleek, dat de opgeloste hoeveelheid O_2 bij benadering recht evenredig is met de inblaasdiepte, zal het effect van de geringe indompeldiepte gecompenseerd moeten worden door evenredig vergrote luchttoevoer. De verlaging van de zuurstofabsorptie door een vergrote luchttoevoer uit de openingen van het beluchtingselement voorkwam Fischerström door het aantal beluchtingsopeningen evenredig groter te kiezen, zodat het luchtdebiet per opening constant blijft.

Beschouwen we nogmaals afb. 2 dan is het dus volgens de gedachte van Fischerström voordeliger om het water met een luchthoeveelheid van 90 ml per minuut bij een indompeldiepte van 1,12 m te beluchten dan met een debiet van 30 ml/minuut bij een driemaal zo grote diepte van 3,50 m. Als bovendien het aantal capillairen per beluchter wordt gereduceerd, zodat weer de oorspronkelijke lucht van 30 ml/minuut per capillair wordt aangehouden, beweegt men zich langs de lijn van 1,12 m naar boven tot een percentage opgeloste zuurstof, betrokken op de hoeveelheid ingeblazen zuurstof, van omstreeks $5\frac{3}{4}$ % bereikt is.

Zorgt men voor een systeem met slechts geringe weerstand in luchtleiding en beluchtingselement, dan kost het nagenoeg evenveel energie, wanneer bij kleine beluchtingsdiepte evenredig meer lucht per tijdseenheid wordt toegevoerd als bij grote diepte. De economie van de zuurstofoverdracht, uitgedrukt in $g O_2/kWh$, zou volgens deze zienswijze dus gunstiger worden voor geringere indompelingsdiepte.

Aangezien men nu met lucht met een lage druk (ongeveer 70 tot 110 cm w.k.) kan werken, is men in staat de compressor te vervangen door een ventilator of een Rootesblower (Zürich).

Het ligt voor de hand om de lagedrukbeluchting zodanig uit te voeren dat het beluchtingsrooster op de bodem van het bassin rust. Hiermede worden stromingsmoeilijkheden voorkomen. Het nadeel van een dergelijke constructie is, dat bij een gegeven verblijftijd van het te zuiveren rioolwater door de geringe diepte van de tank (80 cm) het benodigde grondoppervlak ongeveer met een factor 4 groter wordt, vergeleken met beluchting in tanks met een diepte van 3 à 4 m.

Fischerström past daarom toch een tank van de gebruikelijke diepte toe, echter met een verticaal leidschot in het midden van de tank (afb. 3 en 4). Aan de zijde waar het beluchtingsrooster zich bevindt vormt zich nu een luchtlift, waardoor het water van de bodem naar het

rooster stroomt, terwijl aan de andere zijde van het schot het water naar beneden stroomt. Dit zuiveringsstelsel is in verschillende landen geïmplementeerd en staat bekend als aeratie volgens het Inka-systeem (Industrie Kemiska Aktiefbolaget-Stockholm). Een constructief hierop gelijkend systeem is dat volgens Geiger [3]. Vooral in Zweden en Zwitserland zijn een groot aantal installaties volgens het lagedrukprocédé in bedrijf, doch ook in Nederland ontbreekt dit systeem niet in de bonte rij van aeratieprincipes. In bedrijf zijn op het moment de installatie in Maastricht, Elburg en Amsterdam-noord, terwijl in Haarlem een dergelijke installatie in aanbouw is.

Bespreking van de elementen, waaruit het aeratiesysteem is opgebouwd

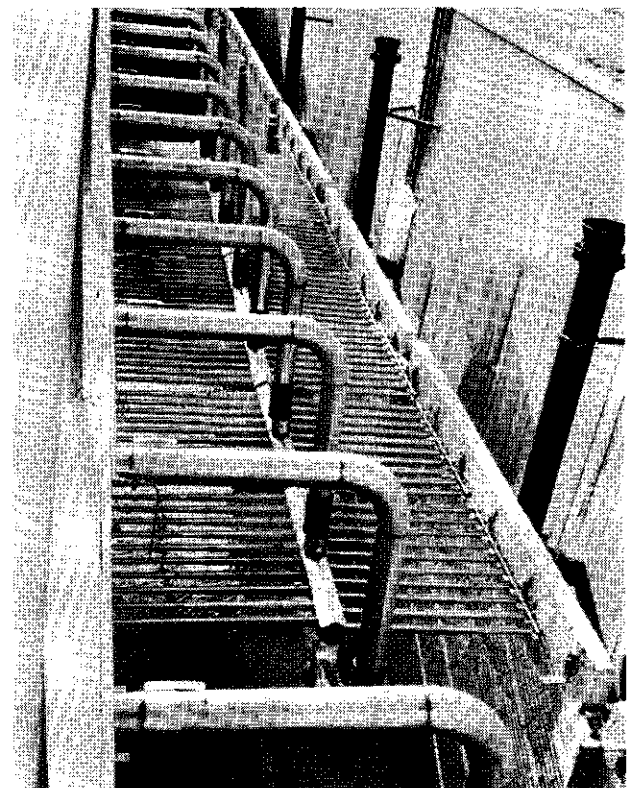
1. Luchtinlaatrooster en luchtaanvoerkanaal.
2. Ventilator.
3. Luchtleidingnet en beluchtingsroosters.
4. Actiefslibtanks.

1. Luchtinlaatrooster en luchtaanvoerkanaal

Aangezien de hoeveelheid benodigde lucht voor aeratie onder lage druk een factor 3 à 4 groter is dan bij hoge druk dienen enorme hoeveelheden lucht aangezogen te worden. De in de literatuur opgegeven cijfers variëren sterk. Brouwer [4] geeft op 100 - 120 m^3 per kg verw. BOD, Inka [5] zelf noemt 120 - 140 m^3 per kg en Dorr Oliver 165 m^3/kg .

Bij experimenten in een Inka proefinstallatie, die in de beginjaren '60 in Amsterdam werden uitgevoerd, werd pas een bevredigend zuiveringsresultaat (BOD influent 170, effluent 20) gevonden bij een verbruik van 350 m^3 lucht per kg afgebroken BOD. Voor de te bouwen

Afb. 4.



installatie in Amsterdam-noord werd daarom bij een BOD-toevoer van 25 g per inwonerequivalent per dag en een BOD-afbraak van 90 % rekening gehouden met een luchtverbruik van

$$\frac{350}{25 \times 0,9} = 8 \text{ m}^3/\text{i.e. dag.}$$

Voor de eerste bouwphase ten behoeve van 65.000 aangesloten inwonerequivalenten werden 2 ventilatoren met een capaciteit van in totaal 25.000 m³/h opgesteld. Deze grote hoeveelheden aangezogen lucht kunnen aanleiding zijn tot geluidshinder bij de aanzuigroosters, tenzij de luchtsnelheid in deze roosters beperkt wordt tot 3,5 à 5 m per seconde. De luchtinlaat dient voorzien te zijn van een grof filter (met openingen van bijvoorbeeld 8 bij 8 mm) om het aanzuigen van grote voorwerpen zoals vogels te voorkomen. Het in de lucht aanwezige stof hoeft niet gefiltreerd te worden, aangezien de openingen in het beluchtingsrooster tenminste een diameter van 2,5 mm bezitten. Hierdoor wordt de weerstand van het rooster zo laag mogelijk gehouden. Dit betekent een belangrijk voordeel ten opzichte van de fijne bellenbeluchting, waarbij de beluchting plaats heeft door poreuze stenen, zodat luchtfiltratie altijd noodzakelijk is.

2. Ventilator

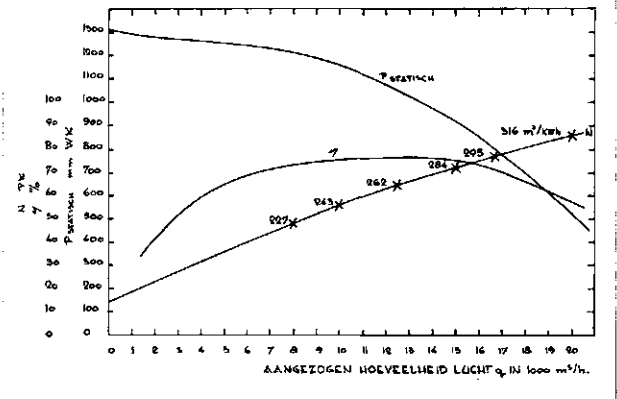
Voor de productie van lucht onder lage druk kan men volstaan met een zogenaamde hogedruk-ventilator. Ook hier heeft men een aanzienlijk voordeel ten opzichte van het gebruik van een compressor, omdat de ventilator veel eenvoudiger van constructie is, dus goedkoper is in aanschaf dan een compressor van vergelijkbaar vermogen.

Koeling van de lagers en dus koelwaterbeveiliging is niet noodzakelijk, omdat bij de ventilator kogellagers in plaats van glijlagers toegepast kunnen worden. In het geval dat kogellagers toegepast worden, ontbreken ook de oliepompen en olieleidingen. De kans op storingen is dus geringer en de bedrijfszekerheid groter. In afb. 5 zijn drie ventilator-karakteristieken aangegeven. In de eerste plaats is het rendement (η) gegeven van een ventilator in afhankelijkheid van de aangezogen hoeveelheid lucht per uur. In dit geval is de ventilator er één met roterende diffusor, waardoor de hoge dynamische druk in het spiraalhuis met slechts geringe verliezen in statische druk wordt omgezet. Men verkrijgt een hoog rendement, terwijl dit hoog blijft over een groot werkgebied.

Voorts is de Q-h kromme getekend, die aangeeft de hoeveelheid door de ventilator aangezogen lucht in afhankelijkheid van de tegendruk P-statisch in het leidingstelsel.

De leidingkarakteristiek, die aangeeft welke voordruk nodig is om een bepaald luchtvolume per tijdseenheid door de leiding te sturen, is niet aangegeven, maar kan worden gedacht schuin omhoog te lopen. De leidingkarakteristiek snijdt de Q-h kromme onder elke bedrijfsomstandigheid slechts éénmaal, aangezien deze Q-h kromme geen maximum bezit.

Het snijpunt van de leiding-kromme van de ij-as komt overeen met de indompelingsdiepte van het beluchtingsrooster. Het gevreesde pendelen of pompen ofwel een onregelmatige gasstroom gepaard gaande met drukstoten in de leidingen kan daardoor nooit optreden.



Afb. 5 - Kiekens centrifugaalventilator met roterende diffusor.

De derde kromme (N) volgt uit de beide andere volgens de formule:

$$N \text{ (kW)} = \frac{Q \text{ (m}^3/\text{h)} P \text{ (mm wK)}}{3600 \times 102 \times \eta}$$

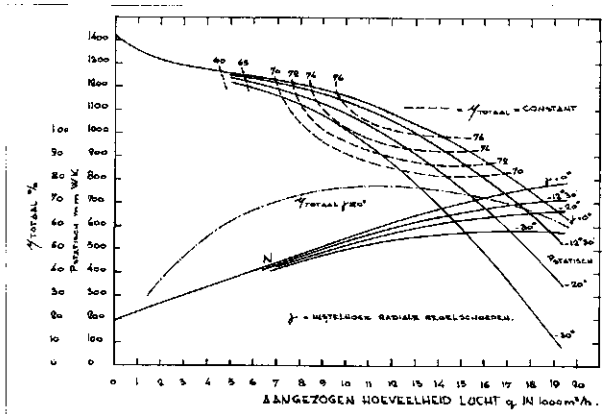
waarin η het rendement voorstelt.

Uit de Q-h kromme blijkt, dat men de grootste hoeveelheid lucht per uur in de aeratietank kan brengen, indien men zorg draagt voor een zo gering mogelijke weerstand in de leidingen, zodat de benodigde statische druk zo gering mogelijk is. Het vermogen van de ventilator stijgt weliswaar, doch het aantal aangezogen m³'s per verbruikte kWh (dat berekend kan worden uit de in de afb. gegeven krommen) wordt groter, de hoeveelheid gebruikte energie om aan de luchtbehoefte te voldoen wordt kleiner. In de grafiek ziet men bv., dat het energieverbruik per aangezogen m³ lucht bij het werken met een druk van 1.050 mm wK 12 % hoger is dan bij een druk van 800 mm wK. Bij de lagedruk-aeratie kan men deze geringe weerstand in het leidingstelsel in stand houden door elke dag de ventilator korte tijd af te zetten, waardoor slibophopen in het beluchtingsrooster door het binnendringende water worden gesuspenderd en bij aanzetten van de ventilator naar buiten worden geblazen.

Met behulp van het aantal geleverde m³'s lucht per verbruikte kWh kan nu de economie van de beluchting berekend worden, nadat men experimenteel bepaald heeft hoeveel gram zuurstof per m³ lucht in oplossing gaat.

Men dient evenwel rekening te houden met het nuttig effect van de aandrijfmotor. De hoeveelheid aangezogen lucht in m³ per kWh dient hiermede vermenigvuldigd te worden.

De belasting van de aeratietanks met rioolwater varieert van uur tot uur, van dag tot dag en van seizoen tot seizoen. Het is van belang de geleverde luchthoeveelheid aan de wisselende zuurstofbehoefte aan te passen, zonder het nuttig effect van de beluchting te veel te verkleinen. Uiteraard is het mogelijk om meer of minder ventilatoren voor de beluchting in te schakelen, doch een fijner afgestelde regeling wordt verkregen door onder andere voorrotatie van de aangezogen lucht toe te passen. Voor de zuigopening van de ventilator is een vaste ring met verstelbare leischoppen aangebracht. Door de schoepen te draaien treedt de lucht niet radiaal in doch onder een hoek. Door de voorrotatie te variëren vormen de Q-h krommen een bundel, evenals de vermogenskrom-



Afb. 6 - Kieken centrifugaalventilator met roterende diffusor.

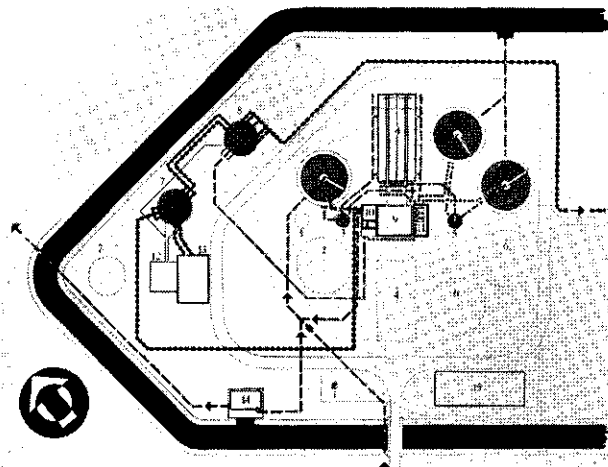
men, terwijl de leidingkarakteristiek gelijk blijft (afb. 6). Men verkrijgt dus een kleiner luchtdebiet bij verlaagde druk naarmate men de aangezogen lucht meer voorrotatie geeft. Ook het opgenomen vermogen wordt kleiner. Het rendement, dat door de gestippelde curven wordt gegeven wordt iets minder, doch blijft binnen redelijke grenzen.

3. Het luchtleidingnet en beluchtingsroosters

Zoals onder 2 besproken, kan men bij de beluchting onder lage druk weinig drukverlies in de luchtleidingen accepteren. Actiefslibinstallaties, die van een dergelijk beluchtingsprincipe zijn voorzien, zal men dan ook tegen het ventilatorgebouw aangedrukt vinden om de leidingafstand zo kort mogelijk te houden (afb. 7). Bovendien worden grote leidingdiameters toegepast. Op de rioolwaterzuiveringsinstallatie van Amsterdam-noord bijvoorbeeld wordt een hoeveelheid lucht van 12.500 m³/uur door een leiding met een diameter van 80 cm gestuurd naar één der actiefslibinstallaties. De luchtsnelheden bedragen dan 5 tot 10 m/sec. in de persleiding, terwijl het drukverlies zoveel mogelijk beperkt wordt tot 10 mm w.k. De weerstand in de beluchtingroosters is veel groter (20 tot 40 mm, afhankelijk uiteraard van het luchtdebiet en van de vervuiling).

Men verkrijgt hierdoor een gelijke verdeling van de lucht over de roosters, zonder dat er afsluiters geplaatst behoeven te worden in de aftakleidingen. Drukverliezen

Afb. 7.



Afb. 8.

en dus energieverliezen door geheel of gedeeltelijk geknepen afsluiters worden hierdoor op elegante wijze voorkomen. Aan deze gelijke luchtverdeling over de aeratietank beantwoordt een retourlibaanvoer aan de kop van de installatie en trapsgewijze toevoeging van het voorbezonden water [6, 7]. Dit is de zgn. Steploading. Indien retourlib en al het voorbezonden water tegelijk aan de kop van de actief slibinstallatie worden toegevoerd, dient men een relatief sterke beluchting aan het begin van de aeratietank te scheppen door bijvoorbeeld het aantal boringen in de eerste roosters te vergroten en het aantal te verkleinen in de roosters, die aan het einde van de beluchtingstank zijn geplaatst (tapered aeration)[7]. Het beluchtingsrooster bestaat uit roestvrij staal (Inkarooster) of uit een combinatie van kunststof en staal (Geigerrooster) en beslaat de halve tankbreedte. De onderkant van het Inkarooster (afb. 8) was oorspronkelijk voorzien van gaatjes van 2,5 mm en later van 6 mm, waardoor de verstoppingskansen kleiner worden, terwijl de economie van de zuurstofoverdracht toch gelijk blijft. De Geigerroosters zijn aan de bovenzijde van openingen van 2,5 mm voorzien.

De meting van de hoeveelheid lucht, die per uur naar de actiefslibinrichting wordt gevoerd, kan bij de lagedrukbeluchting niet plaatsvinden door een meetflens, omdat deze een extra weerstand introduceert in de leiding. Men kan beter gebruik maken van de pitotbuis volgens Prandtl. Hiermede wordt de dynamische druk, dat is het verschil van totale- en statische druk, gemeten.

De luchtsnelheid kan hieruit berekend worden met de formule:

$$v = \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\delta}}$$

(v in m/sec., $g = 9,8$ m/sec.², Δp in kg/m², δ in kg/m³).

4. De actiefslibtank

De vormgeving van de actiefslibtanks wordt in de eerste plaats bepaald door traditie en ten tweede door zodanige constructies, waardoor men hoopt een verbetering van de watercirculatie te verkrijgen.

De natte doorsnede van de tank is meestal 3 - 4 m in het vierkant. Bij lage-druk aeratie is het gebruikelijk om de hoeken van de natte doorsnede af te schuinen.

Door de bovenafschuiningen worden ruimten vrijgemaakt, waardoor de lucht en het rioolwater kunnen worden toegevoerd. Op de merites van deze constructie wordt later teruggekomen.

De beluchtingsroosters dienen zodanig in de actiefslibtanks geplaatst te worden, dat bij beluchting voldoende stroomsnelheid op de bodem van de tank optreedt, zodat het slib niet kan bezinken. Bovendien dient in de gehele tankdoorsnede zuurstof aanwezig te zijn. De aerobe microbiologische processen kunnen dan overal voortgang vinden.

De indompelingsdiepte van het rooster dient economisch optimaal te zijn, dat wil zeggen dat het aantal kg opgeloste zuurstof per verbruikte kWh zo hoog mogelijk is. Ganczarzyk [8] kwam tot de conclusie (zie afb. 9) dat voor drinkwater het netto zuurstoftoevoervermogen (OC) in kg per kWh toeneemt bij toename van de onderdompelingsdiepte van 40 tot 80 cm. Bij een diepte van 80 cm bedroeg de netto economie 3 tot 3,3 kg per kWh. Deze waarde bleef behouden tot een diepte van 1 meter. Opgemerkt moet worden, dat genoemde onderzoeker met zeer grote luchthoeveelheden per uur per m³ tankinhoud werkte. Onder praktische omstandigheden is de grootte ongeveer 15 m³/m³.h; het lijkt waarschijnlijk, dat de conclusies van Ganczarzyk niettemin gehandhaafd kunnen blijven. Dit betekent niet, dat verschillen in indompelingsdiepte in één en dezelfde actiefslibinrichting van geen belang zouden zijn. Integendeel, minder diepliggende roosters geven onevenredig meer lucht dan de d'epergeplaatste. Wenst men dus altijd een gelijkmatige beluchting over de gehele tanklengte, dan dient het verhang niet te sterk met de rioolwateraanvoer te variëren, omdat anders een verschillende diepteligging een feit is (constructie van een tank zonder tussenwanden en grote overstortlengte aan het eind van de beluchtslibinstallatie). Een gelijke beluchting over de gehele tanklengte verkrijgt men door de beluchtingsroosters volgens de gemiddelde verhanglijn te monteren.

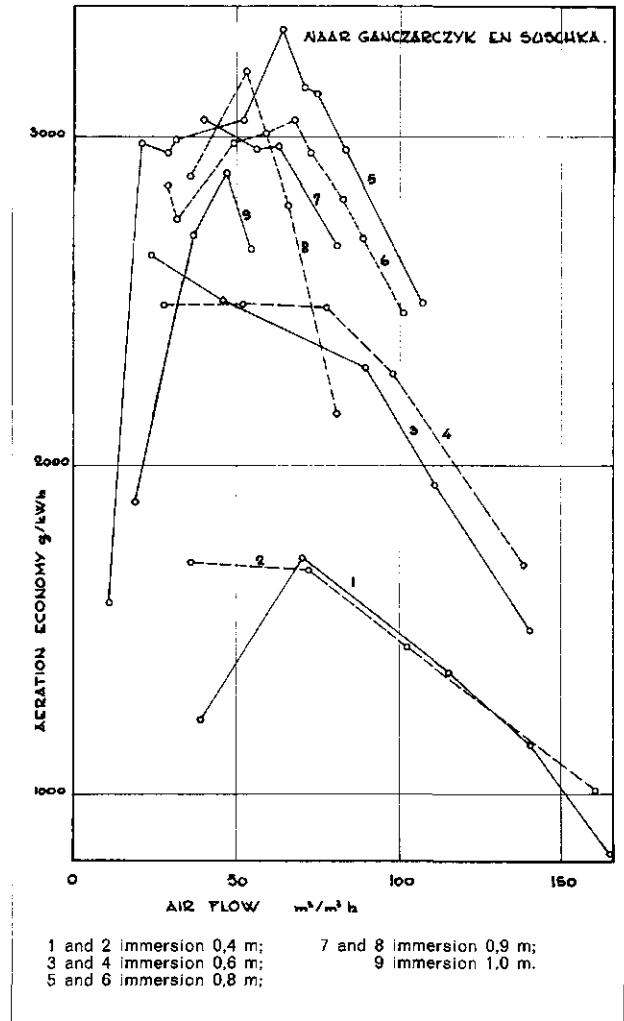
Involed van de aard van het afvalwater en de constructie van het aeratiebassin op de circulatiestroming

Indien drinkwater in een Inka-installatie wordt belucht, wordt de stroomsnelheid van het water over de bodem groter naarmate sterker belucht wordt.

Bij proeven in Amsterdam werd gevonden, dat indien synthetische detergents zijn toegevoegd in een hoeveelheid van meer dan 6 mg/l deze vloeistofsnelheid nul wordt, wanneer het luchtdebiet stijgt boven 250 m³/h per rooster van 1,50 x 1,00 m ofwel boven 167 m³/m² roosteroppervlak x h.

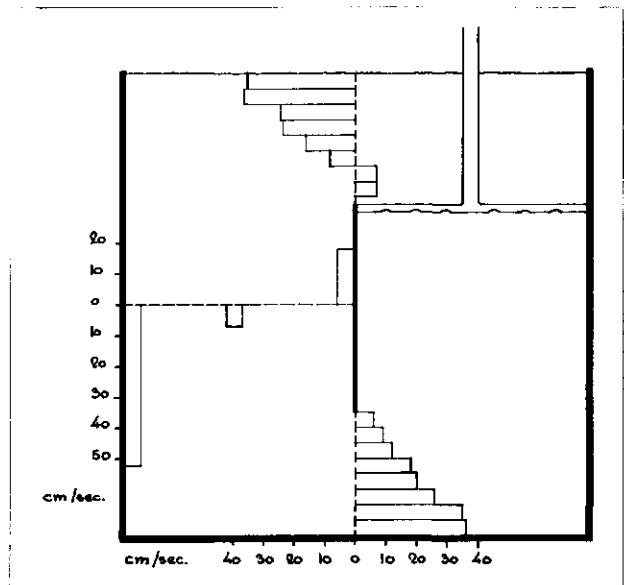
Bij luchtdebieten tot 175 m³/h in een in bedrijf zijnde actiefslibinstallatie bleek het stromingsbeeld van de gedaante te zijn zoals is weergegeven in afb. 10. Hier zijn de stromingsmetingen opgetekend voor een luchttoevoer van 150 m³/h per rooster van 1,50 x 1,00 m.

Men ziet dat de grootste stroomsnelheden aan de periferie van de dwarsdoorsnede optreden. De stroomsnelheid op enige diepte onder het wateroppervlak neemt af



Afb. 9 - Aeration economies for various immersions of air distributor.

Afb. 10 - Stroomsnelheden in actiefslibtank zonder bovenafschuiningen bij een luchthoeveelheid van 150 m³/h.



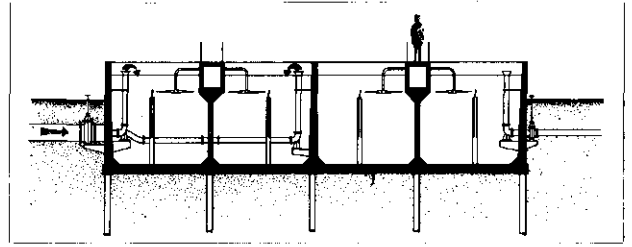
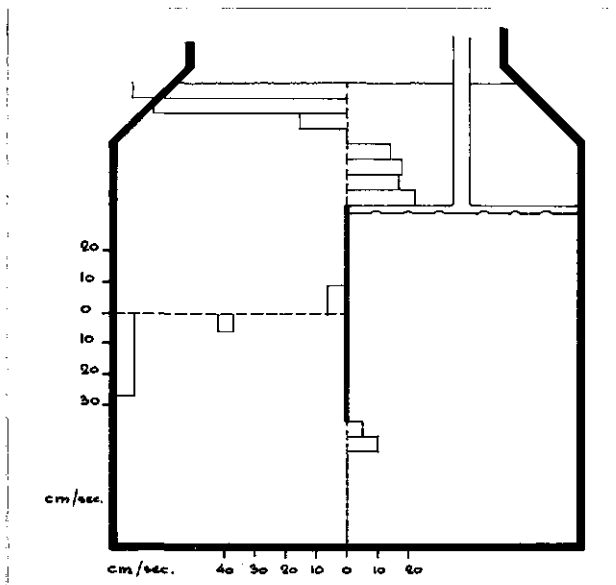
en wordt zelfs negatief vlak boven het schot. Men heeft dus te maken met een neer vlak boven het schot. Naast het leidschot op halve tankdiepte neemt de watersnelheid eveneens af en verandert van richting halverwege de tankwand en het verticale schot. Een neervormige stroming treedt dus ook hier op. Een zelfde stromingspatroon treedt op bij een luchthoeveelheid van 175 m³/h. Bij kleinere luchthoeveelheden zijn de negatieve stromingen langs en boven het schot niet zo uitgesproken. Daar waar de slibconcentratie groot is (reactivering, droge s'ofgehalte 8 g/l), zijn de stroomsnelheden lager, doch voldoende om slibafzettingen te voorkomen.

In de praktijk worden bovenafschuivingen van de tank toegepast om ruimte te scheppen voor kanalen voor de lucht- en rioolwatertoevoer. Op het eerste gezicht lijken dergelijke afschuivingen de stroming van het water alleen maar te bevorderen. Bij meting blijkt echter, dat bij luchtdebieten van 150 m³/h (100 m³/m².h) en hoger de vloeistofstroming beneden het verticale schot vrijwel tot stilstand komt (zie afb. 11), in tegenstelling tot de tank waar geen bovenafschuivingen werden aangebracht. Met een enkele bovenafschuiving verkreeg men hetzelfde ongunstige effect, ongeacht of de afschuiving boven het rooster dan wel aan de tegenovergestelde zijde werd geplaatst. Afschuiving van de hoeken op de bodem van de aeratietank had geen invloed op het stromingspatroon.

De verklaring van de bovengenoemde verschijnselen moet o.i. gezocht worden in de omstandigheid, dat onder invloed van synthetische wasmiddelen de diameter van de geproduceerde luchtbellen kleiner wordt, zodat onder bepaalde zeer turbulente omstandigheden een soortelijk lichte waterluchtdispersie gevormd wordt. Deze dispersie stroomt relatief moeilijk naar beneden. De nadelige invloed, die detergenten op het stromingsbeeld hebben, wordt nog geaccentueerd door het toepassen van bovenafschuivingen, waardoor de ontluftingsmogelijkheid door verkleining van het wateroppervlak wordt beperkt.

Bij de zeer hoogbelaste installatie kan dit verschijnsel een rol gaan spelen. Een gunstige omstandigheid is, dat

Afb. 11 - Stroomsnelheden in actiefslibtank met bovenafschuivingen bij een luchthoeveelheid van 150 m³/h.



Afb. 12 - Actiefslibinstallatie.

de zeepfabrikanten in Nederland besloten hebben voortaan wasmiddelen met biologisch makkelijk afbreekbare detergenten in de handel te brengen. Men kan aannemen dat een belangrijk deel van de detergenten dan in het riool, bij de voorbezinking of op zijn slechtst in het eerste gedeelte van de beluchting zal worden afgebroken. Niettegenstaande dat lijkt het verstandig bij de dimensionering van een beluchtslibinstallatie met lagedrukbeluchting rekening te houden met een bovengrens van het luchtdebiet van 200 m³/h (133 m³/m².h), waarboven in een tank zonder bovenafschuivingen, circulatiemoeilijkheden door aanwezigheid van detergenten beginnen op te treden.

Men kan zich de vraag stellen of deze grens voor de praktijk aanvaardbaar is. Indien men bijvoorbeeld uitgaat van een ruimtelijke BOD-belasting van de actiefslibinrichting met 1000 g BOD/m³.d (waarmede bij een waterverbruik van 100 l/i.e.d. en een BOD-produktie van 25 g/i.e.d. een verblijftijd bij maximale uuraanvoer van

$$\frac{1000}{25} \times 100 \times \frac{10}{100} = 2,5 \text{ uur overeenkomt).}$$

Verder van een zuiveringspercentage van 90 % en een benodigde hoeveelheid lucht (bepaald uit experimenten met de proefinstallatie op rioolwaterzuiveringsinrichting-west te Amsterdam) van 350 m³/kg verwijderde BOD, dan betekent dit een hoeveelheid benodigde lucht van

$$0,9 \times 350 \times \frac{3,5 \times 3,5}{1,75} \times \frac{1}{24} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ roosteropp.h.} = 92$$

m³/m².h. Circulatiemoeilijkheden zullen zich dus onder deze omstandigheden niet voordoen, zelfs niet bij een tank met bovenafschuivingen. Als uitvloeisel van bovengenoemde resultaten zijn bij de rioolwaterzuiveringsinrichting te Amsterdam-noord toch uitkragende constructies in de actiefslibtank vermeden, om de mogelijkheid te behouden met grotere rioolwaterbelastingen te werken (afb. 12).

De economie van het aeratieproces, in het bijzonder bij beluchting onder lage druk

De waarde van een beluchtingsapparaat wordt bepaald door verschillende factoren, waaronder bedrijfszekerheid, doelmatigheid, eenvoud en kosten begrepen kunnen worden. Enige van deze factoren zijn moeilijk in getalwaarden uit te drukken, zoals bijvoorbeeld de bedrijfszekerheid. Geen wonder, dat de keuze van een zekere beluchtingsmethode heden ten dage veelal bepaald wordt door persoonlijke gevoelens en esthetische motieven. Waartoe men in elk geval een poging kan wagen, is het maken van een kostenvergelijking. De verschillen

in kosten bij de bedrijfsvoering van verschillende beluchtingsapparatuur worden bepaald door:

1. de grootte van de afschrijving van de beluchtingsinstallatie en het renteverlies door de gedane investering van beluchtingsapparatuur;
2. de hoogte van de bedienings- en onderhoudskosten;
3. de grootte van het energieverbruik.

ad. 1

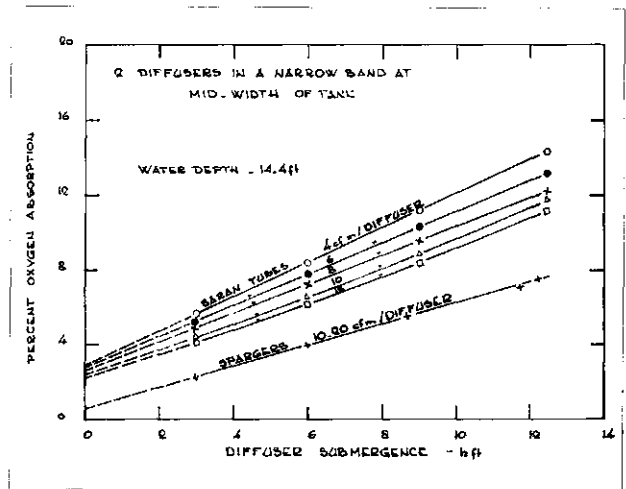
Wat punt 1 betreft, toen in 1961 in Amsterdam een keuze tussen compressor- en ventilatorbeluchting moest worden gemaakt, bleken de installatiekosten van het Inka-beluchtigingssysteem ongeveer 30 % lager te zijn dan de bouw van een beluchtigingssysteem met compressoren. Dit werd voornamelijk veroorzaakt door het grote prijsverschil tussen ventilatoren en compressoren.

ad. 2

Met betrekking tot punt 2 werd in Amsterdam verwacht, dat ook de bedienings- en onderhoudskosten lager zouden uitvallen voor de lagedrukbeluchting, aangezien de installatie minder gecompliceerd is dan die met compressoren. Overigens vallen deze bedienings- en onderhoudskosten in het niet t.o.v. de jaarlijkse lasten, die op het aeratieproces drukken.

ad. 3

Wat punt 3, het energieverbruik van de beluchting aangaat, hiervoor kan men in de literatuur vele opgaven vinden. Terecht wordt mijns inziens juist aan het energieverbruik grote aandacht geschonken, omdat de energiekosten een zeer belangrijk deel uitmaken van de jaarlijkse bedrijfskosten. Zo maakten op de rioolwaterzuiveringsinrichting-West in Amsterdam in 1956 de energiekosten 65 % uit van de totale jaarlijkse bedrijfskosten van f 2,70 per i.e. (exclusief rente en afschrijving). In 1966 waren de stroomkosten nog maar 30 % van de totale uitgaven (f 4,80 per i.e.), omdat de totale onderhouds- en bedieningskosten in de loop der jaren sterk waren gestegen bij nagenoeg gelijkblijvende energiekosten



Afb. 13 - Effect of diffuser submergence and air-flow rate on oxygen absorption (naar Bewtra en Nicholas).

per inwonerequivalent. Nochtans blijft het de moeite waard om een zodanig beluchtigingssysteem te zoeken dat energetisch zo efficiënt mogelijk werkt.

De bruto-economie van de beluchting kan men bepalen in leidingwater en men drukt de economie van de beluchtigingssystemen dan uit als het zuurstoftoevoervermogen in g O₂ per eenheid verbruikte energie, de kWh. Een veelheid van gegevens voor verschillende beluchtigingssystemen wordt gegeven in een publicatie van U. Möller: [9]. In het bijzonder voor de lagedrukbeluchting vond men de volgende cijfers (tabel I).

Uit deze tabel blijkt, dat zelfs voor een zo nauwkeurig gedefinieerd systeem als de Inka-beluchting sterk variërende waarden gevonden worden voor de economie van de zuurstofoverdracht. Dit vloeit voort uit verschillen in tankvorm en -inhoud, in grootte van het beluchtingsrooster, uit verschillen in toegepaste luchtdebieten, verschillende aannamen van het rendement van de ventilator etc. Voor de in de praktijk toegepaste lucht-

TABEL I - Efficiëncy van de lagedrukbeluchting met grote luchtballen *)

Auteur	Type	Luchtdebit	$\frac{m^3}{m^3 \cdot h}$	kg zuurstof
				kWh
v. d. Emde (10)	Inka	—	—	1,9
Fischerström (2)	Inka	6—10	—	1,6—2,0
Fischerström (2)	Inka	45—162	—	2,2—2,5
Möller (9)	Inka	—	—	1,2—1,5
Ganczarczyk (8)	Inka	50	—	netto 3,3
Downing (11)	Inka	13	—	1,9
Scherb (12)	Inka 1,1 x 1,5 m	4,5—16,5	—	1,6
Scherb (12)	Geiger 1,35 x 1,5 m	7,8—16,5	—	2,2
Bewtra - Nicholas (13)	2 Spargers	0,9—2,3	—	1,8
PW Amsterdam	Inka	—	—	1,6—1,8

indompelingsdiepte 70 - 100 cm

Efficiëncy van de hogedrukbeluchting met grote luchtballen *)

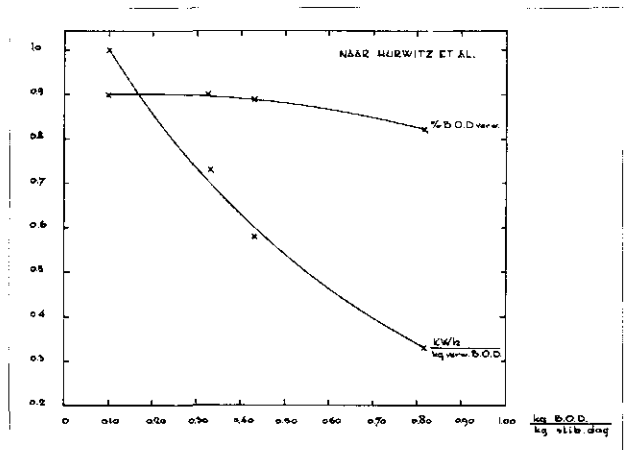
Auteur	diepte	Luchtdebit	$\frac{m^3 \cdot h}{m^3}$	kg zuurstof
				kWh
Knop - Bischofsberger - Stalman (14)	336 cm	4	—	1,6
Bewtra - Nicholas (13)	variërend	0,9—2,3	—	1,8

*) diameter gaatjes in beluchter 2,5 - 6 mm

debieten kan in het algemeen gesteld worden, dat de bruto-economie tussen 1,6 en 1,9 kg O₂ per kWh bedraagt. Verrassend is, dat uit de tabel blijkt, dat de economie van de lagedrukbeluchting die van de hoge druk niet veel ontloopt, dit in tegenstelling tot wat Fischerström [2] verwachtte. Dit beeld stemt overeen met wat de onderzoeken van Bewtra en Nicholas [13] opleverden, die in 1964 gepubliceerd werden (zie afb. 13). Bij beluchting met kleine bellen met Saranbeluchters bleek inderdaad, zoals vroeger al gevonden was, een relatief grote zuurstofabsorptie bij kleine indompelingsdiepte op te treden; bij de beluchting met grote bellen, waarmee gewerkt wordt bij de lagedrukbeluchting, is genoemde absorptie echter relatief gelijk bij kleine en grote indompelingsdiepte. De verklaring zou zijn, dat in het geval belucht wordt met grote bellen, de lucht uit-treedt in een continue bellenketen, waarna door de grote turbulentie pas een verdeling plaats vindt in meer stabiele kleine bellen. Van een vormingsfase van de lucht-bellen aan het beluchtingselement is dus geen sprake meer.

De diameter van de gaten in het beluchtingsrooster blijken weinig invloed te hebben op de grootte van de zuurstofoverdracht [8], hetgeen erop wijst dat de grootte van de grensvlakvernieuwing alleen bepaald wordt door de turbulentie boven het rooster en niet afhangt van de grootte van de bellen zoals ze uit het rooster ontsnappen. Een getalsspreiding voor de economie van de beluchting vindt men ook bij het onderzoek van andere beluchtings-systemen. Bij de beluchting van leidingwater met kleine lucht-bellen bij grote indompelingsdiepte van de beluchter werd in Amsterdam voor de economie een waarde gevonden die varieerde van 1,3 tot 2,6 kg zuurstof/kWh. Deze spreiding trad op door alleen de verdeling van de lucht over de horizontale tankdoorsnede te veranderen. Vergelijking van de verschillende aeratiesystemen in energetisch opzicht is dus zonder meer een hachelijke onderneming. Bovendien zijn deze waarden niet geldig indien rioolwater wordt geaereerd. Men heeft daarom de waarde α ingevoerd, die aangeeft welke fractie het zuurstoftoevoervermogen in afvalwater is van die in leidingwater. Deze α waarde kan evenveel grootten hebben als er soorten afvalwater zijn [15]. Bovendien moet een correctie toegepast worden wegens het feit, dat er niet geaereerd wordt bij het maximale verzadigings-deficiet van zuurstof in water, terwijl bovendien aangetoond is door Gaden [16] en later door v. d. Kroon [17], dat aanwezigheid van gesuspendeerd mycelium, respectievelijk actief slib een verlaging geeft van het zuurstoftoevoervermogen bij bellen-beluchting.

De stelling, dat de economie, die voor verschillende aeratiesystemen in leidingwater gevonden wordt, ook voor rioolwater zou gelden, mits vermenigvuldigd met de genoemde factor α , gaat helaas niet op, zoals door v. d. Emde [10] werd aangetoond. Een bepaald ge-zuiverd afvalwater bijvoorbeeld bleek een α waarde van 0,94 te hebben bij de Inkabeluchting en een α waarde



Afb. 14 - Energieverbruik voor de beluchting bij wisselende belasting.

van 0,77 bij compressorbeluchting met kleine bellen. Ook detergenten beïnvloeden het zuurstoftoevoervermogen van verschillende beluchtingsapparatuur verschillend. Teneinde een zuiver inzicht in de economie van de beluchting te verkrijgen is men derhalve verplicht de beluchtingssystemen op hun merites te toetsen in een vergelijkend onderzoek onder gelijke bedrijfsomstandigheden. Dat wil zeggen, onderzoek in voor elk systeem optimaal gedimensioneerde actiefslib installaties bij gelijke belasting met hetzelfde rioolwater en met dezelfde actiefslibconcentratie. De meting van het zuurstoftoevoervermogen in een dergelijk zuurstofverbruikend milieu geschiedt volgens een recent ontwikkelde techniek [17, 18], waarbij men gebruik maakt van Warburg apparatuur om het zuurstofverbruik te meten en anderszids van apparatuur, waarmee de partiële zuurstofdruk elektrochemisch gemeten kan worden. Vergelijkend onderzoek van het zuurstoftoevoervermogen onder praktijkomstandigheden heeft echter tot dusver nog niet plaatsgehad.

Indien men overgaat tot een dergelijk onderzoek naar de economie van de zuurstofoverdracht in een actiefslib-inrichting, bestaat er nog een tweede mogelijkheid om de economie van de aeratie te meten en wel die uitgedrukt wordt als de benodigde hoeveelheid energie (kWh) per kg afgebroken BOD. Deze grootte zou men afgeleid kunnen beschouwen van de verhouding OC/Load, die uitgedrukt wordt in kg toegevoerde zuurstof per kg aangevoerde BOD.

Voor de lagedrukbeluchting zijn evenals voor de andere beluchtingssystemen vele waarden voor het aantal verbruikte kWh per kg verwijderde BOD gegeven [2, 7]. Deze waarden variëren van 0,28 tot 0,61 afhankelijk van de installatie, waar deze grootte gemeten werd. Ook in Amsterdam werd met behulp van een proefinstallatie deze waarde als onderdeel van een onderzoekprogramma

TABEL II - Resultaten Inka-proefinstallatie te Amsterdam

Ruimtelijke waterbelasting m ³ m ³ · d	Verblijftijd h	Ruimtelijke BOD belasting kg m ³ · d	BOD slib-belasting kg kg · d	Beluchting m ³ m ³ · H ₂ O	Beluchting m ³ kg verw. BOD	BOD infl. mg l	BOD effl. mg l	BOD verw. %	NO ₃ effl. mg l	Energieverbruik kWh kg verw. BOD
4,5	5,3	0,77	0,20	52	350	170	20	88	0	1,18
5,3	4,5	0,86	0,29	44	320	162	26	84	0	1,10
6,7	3,6	1,01	0,40	35	310	150	37	75	0	1,05

bepaald zoals tabel II laat zien. Het bleek dat voor een 88 %-ige afbraak van de toegevoerde BOD per kg afgebroken BOD een hoeveelheid lucht nodig was van 350 m³, dat een hoeveelheid energie kostte van 1,18 kWh. De bedrijfsinstallatie in Amsterdam-west werd hiermede vergeleken, hoewel de vergelijking niet geheel zuiver kon zijn. Het bleek dat in laatstgenoemde installatie per kg afgebroken BOD een hoeveelheid lucht nodig was van 80 tot 100 m³, hetgeen een energie kostte van rond 2 kWh. Bij deze zuivering trad echter een verregaande nitrificatie op, in tegenstelling met de proefinstallatie.

Dat men zeer voorzichtig moet zijn met het beoordelen van de cijfers, die het energieverbruik aangeven, moge blijken uit afb. 14, afgeleid uit opgaven van Hurwitz [19]. Men ziet, dat het energieverbruik bij de aeratie afhankelijk is van de BOD slibbelasting, die naarmate hij kleiner is, resulteert in een groter zuiveringseffect en een groter energieverbruik per kg verwijderd BOD. De laatste loodjes wegen kennelijk het zwaarst. Bij opgaven over de economie van de aerobe zuivering dient men dus altijd eveneens te vermelden, welke BOD-reductie verkregen werd. Dit is evenwel niet voldoende, wat blijkt uit tabel III, ontleend aan v. d. Emde [20]. Vergelijkt men in de tabel bij nagenoeg gelijke BOD-reductie het energieverbruik, dan blijkt dit groter te zijn, naarmate de BOD van het influent lager is. (Vergelijk bijvoorbeeld de eerste met de derde regel bij de compressorbeluchting en de eerste en de tweede regel bij de waarnemingen met de Kessenerborstel). Voorts is waarschijnlijk ook de samenstelling van het afvalwater van invloed op het energieverbruik, aangezien de verschillende substraten in verschillende mate aan actiefslib geadsorbeerd worden en derhalve in verschillende mate aan het dissimilatieproces worden onttrokken [21].

Vergelijking van aeratie-economieën van verschillende be-

luchtingssystemen kan dus eigenlijk alleen betrouwbaar zijn, indien zij het resultaat zijn van vergelijkende proefnemingen. Tot dusver zijn in Kassel (tabel III) experimenten in deze zin uitgevoerd, waarbij de Inkabeluchting werd vergeleken met de hogedrukbeluchting met kleine bellen (Brandol 60) en de borstelbeluchting en in Hamburg (tabel IV), waarbij eveneens de Inka-aeratie werd vergeleken met de borstelbeluchting. Uit de eerste metingen werd door v. d. Emde [20] de conclusie getrokken, dat het energieverbruik bij de drie systemen, berekend per kg verwijderde BOD, nagenoeg overeenstemde. Mijns inziens is het resultaat van de compressorbeluchting wat beter, gezien het feit, dat bij gelijke begin BOD bij hetzelfde energieverbruik een lagere BOD voor het effluent wordt bereikt. In Hamburg werden met genoemde beluchtingssystemen nagenoeg identieke resultaten bereikt [22]. Een vraag blijft, of dezelfde resultaten verkregen zouden zijn bij ander afvalwater. Een vraag blijft hoe de uitslag zal zijn als alle beluchtingssystemen aan een vergelijkend onderzoek zijn onderworpen. Het lijkt me, dat de in 1934 door Kessener en Ribbius [23] geslaakte verzuchting nog steeds opgeld doet, toen zij een uitspraak van dr. Calvert [24] uit 1926 aanhaalden, namelijk:

„It must be admitted that our knowledge of the (activated sludge) process is far from complete . . . , and much fundamental research is necessary before it will be possible to specify the particular type of plant most suitable for the purification of any particular sewage”.

(„Er moet worden toegegeven dat onze kennis van het actiefslibproces verre van compleet is . . . , en dat veel fundamenteel onderzoek noodzakelijk is voor het mogelijk zal zijn om aan te geven welk type installatie het meest geschikt is voor de zuivering van een bepaald soort afvalwater”.)

TABEL III - *Energieverbruik van de beluchting - Kassel (naar W. v. d. Emde)*

	BOD infl. mg	BOD effl. mg	BOD verw. %	Energie- verbruik kWh
	l	l		kg verw. BOD
Compressor beluchting	141	19	87	0,51
Brandol 60	141	25	82	0,48
Inka	84	12	86	0,85
Inka	138	34	75	0,49
Inka	99	23	77	0,67
Inka	141	38	73	0,47
Kessener - Borstel	84	21	75	0,82
Kessener - Borstel	141	34	75	0,45
Kessener - Borstel	141	41	71	0,42

TABEL IV - *Energieverbruik van de beluchting - Hamburg (naar U. Stuewer)*

	BOD infl. mg	BOD effl. mg	BOD verw. %	Energie- verbruik kWh
	l	l		kg verw. BOD
Kessener - Borstel	260	77	70	0,32
Kessener - Borstel	260	78	70	0,32
Inka - rooster	260	72	72	0,32
Inka - rooster	260	82	68	0,33

Literatuur

1. Ippen, A. T. en Carver, C. E., *Sew. Ind. Wastes* 26 (1954) 813 - 829.
2. Fischerström, N. C. H., *J. San. Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civil Eng. S.A.* 5 (1960), 21 - 56.
3. Geiger, H., *Gesundheidsing.* 87 (1966), 238 - 241.
4. Brouwer, W. A. H., *Water* 48 (1964), 355 - 358.
5. *Operating Instructions for the Inka Tube Aerator.*
6. Möller, U., *Diskussionsbeitrag Hamburger Tagung* 1961.
7. Divet, L., et al, paper pres. at the Annual Meeting of the New York Water Pollution Control Arr. jan. 1963.
8. Ganczarczyk, J. en Suschka, J., *Inv. J. Air Water Poll.* 6 (1962), 319.
9. Möller, U., *Berichte des ATV H. 13 (Die Hamburger Tagung 1961)* 132.
10. Emde, W. v. d., *ibid.* 75 - 97.
11. Downing, A. L. et al, *J. Inst. Purif.* (1962) 66.
12. Scherb, K., *Münchener Beitr. zur Abw. Fisch. u. Fl.biol.* 12 330.
13. Bewtra, J. K., Nicholas, W. R., *JWPCF* 36 (1964) 1195.
14. Knop, E., Bischofberger, W., V. Stalmann, *Versuche mit versch. Bel.syst. im techn. Masstab Teil 2.*
15. Eckenfelder Jr., W. W., *Sew. Ind. W* 31 (1959) 60.
16. Gaden, Biol. ir., E. L., *Sew. Ind. Wastes ed. Malabe, J., en Eckenfelder Jr., W. W.,* (1955) 190.
17. Kroon, G. T. M. v. d., Corstjens, G. H., *Water* 50 (1966) 266.
18. Kayser, R., *Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abw. belüf-tern unter Betriebsbedingungen* (1967).
19. Hurwitz, E., et al, *Water Sewage Works R* (1965) 209.
20. Emde, W. v. d., *Int. J. Air. W. Poll* 5 no. 2-4 (1963) 313.
21. Gils, H. W. v., I.G. TNO report no. 32 (1964) 49.
22. Stuewer, U., *GWf* 102 (1961) 667.
23. Kessener, H. J. N. H., en Ribbius, F. J., *Sewage Works J* (1934) 6 430.
24. Calvert Jr., H. T., *Roy. San. Inst. XLV* 11 296 (1926-1927).