

Beluchting onder hoge druk

Het doel van de beluchting bij het actief-slibproces is tweeledig, nl.:

1. de toevoer van zuurstof, die nodig is voor de biologische processen;
2. het mengen van afvalwater en actief-slib zodanig, dat het actief-slib homogeen verdeeld blijft.

In de ca. 50 jaar dat het actief-slibproces is toegepast, zijn verschillende beluchtingssystemen ontwikkeld. Het onderwerp van deze voordracht beperkt zich tot de beluchting met behulp van druklucht. In de praktijk van de druklucht-beluchting zijn een aantal varianten te onderscheiden. Het is niet mogelijk in deze voordracht alle varianten en alle facetten uitvoerig te bespreken. Zo zal de variant van de druklucht-beluchting, de zgn. Inka-beluchting, in een aparte voordracht worden behandeld.

Door de reeds middelbare leeftijd van het actief-slibproces zijn talrijke publicaties verschenen over de aan dit systeem inherente beluchting. De beluchting door middel van druklucht is historisch gezien één van de oudste systemen en ook de meest toegepaste. Vooral de laatste twintig jaar zijn talrijke onderzoeken gewijd aan deze wijze van beluchten, mede door het toegenomen inzicht in de er aan ten grondslag liggende theorieën.

In het tijdsbestek van de voor deze voordracht beschikbare tijd is de beluchting onder hoge druk uiteraard niet uitputtend te behandelen.

Ik zal mij derhalve beperken tot het aantippen van een aantal achtergronden van deze wijze van beluchten, en u voorts een overzicht geven van enkele experimentele gegevens van het Emschergenossenschaft, die naar mijn mening de verschillende belangrijke facetten van deze beluchtingswijze concreet weergeven.

Onder beluchting door middel van druklucht verstaat men de zuurstof-overdracht vanuit de lucht in de vloeistof door middel van in de vloeistof gebrachte luchtbellen. Indien de lucht hiertoe wordt samengedrukt met behulp van een compressor, spreekt men over hoge druk en over lage druk, indien hiervoor een ventilator is gebruikt. Het essentiële onderdeel van de druklucht-beluchting is derhalve de luchtbel. Het fenomeen luchtbel geeft

aanleiding tot de volgende beschouwing.

Een luchtbel, gehecht aan het oppervlak van een vast lichaam, dat ondergedompeld is in een vloeistof, bevindt zich praktisch in een rusttoestand, ook als het vaste lichaam langzaam beweegt. De vorm en andere eigenschappen zoals het volume, de inwendige gasdruk alsmede de wetmatigheden betreffende de hechting worden dan bepaald door moleculaire krachten, de kapillaire krachten, die werkzaam zijn in de grensvlakken tussen de drie fasen vast, vloeibaar en gasvormig. Deze krachten veroorzaken in de grensvlakken de zgn. grensvlakte-spanningen, die in het grensvlak vloeibaar-gasvormig, b.v. aan de vrije oppervlakte van vloeistoffen ook aangeduid wordt met oppervlakte-spanning.

Indien zich in een vloeistof een gasbel bevindt, wordt in de bel door de in het grensvlak tussen gas en vloeistof werkzame oppervlaktenspanning een kapillaire druk gevormd. De grootte van deze kapillaire druk op een willekeurige plaats A van het oppervlak is weer te geven door:

$$p_K = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

waarin p_K = kapillaire druk in het punt A (dyn/cm²)

R_1, R_2 = grootste en kleinste straal in punt A (cm)

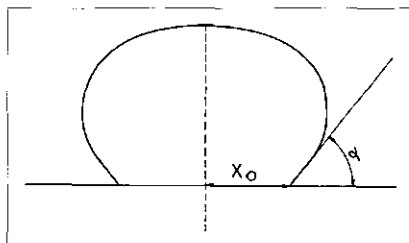
σ = oppervlaktenspanning (dyn/cm)

In kleine bellen, waarin bij benadering $R_1 = R_2 = R$, wordt de kapillaire druk dan:

$$p_K = \frac{2\sigma}{R}$$

Op een kwadraat van de bel-wand werken van buiten naar binnen de

Afb. 1 - Gasbel aan vast lichaam.



atmosferische druk p_o , de hydrostatische druk p_h en de kapillaire druk p_K . Deze drukken zijn in evenwicht met de naar buiten gerichte gasdruk in de bel, p_g , zodat geldt:

$$p_g = p_o + p_h + p_K$$

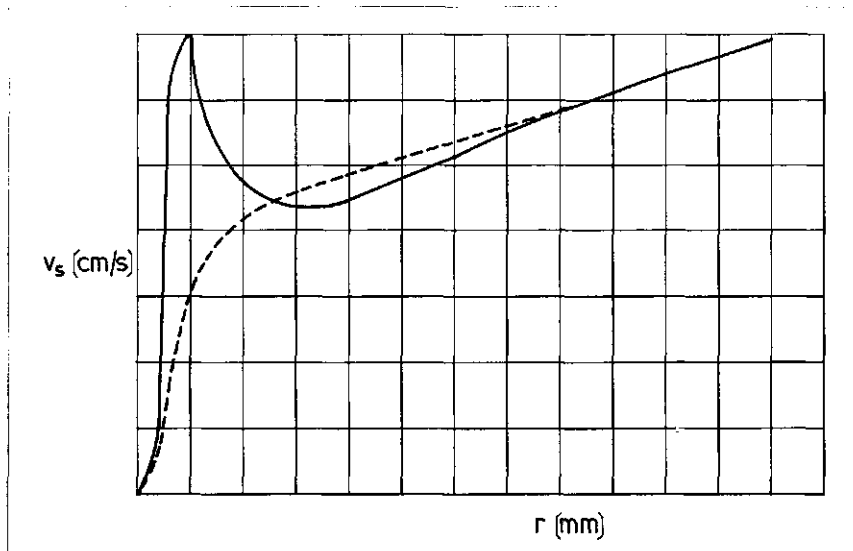
Een mathematische uitwerking van deze vergelijking levert een differentiaalvergelijking van de tweede orde, waarmede de vorm van de gasbel is vastgelegd.

Een gasbel gehecht aan een vast oppervlak, grenst aan dit oppervlak onder een randhoek α (afb. 1). Deze randhoek is evenals de oppervlaktenspanning te beschouwen als een materiaalconstante van het betreffende driefasen systeem. Het grensvlak met het vaste lichaam vormt een cirkel met straal X_o . Uit het hier niet nader te behandelen mathematische verband tussen de grootheden V (volume), X_o en α blijkt een maximale waarde te bestaan voor het volume van de gasbel.

Een gasbel zal derhalve bij constante randhoek groter worden door gas toevoer, tot een zekere maximale waarde. Voert men dan nog meer gas toe, dan zal het evenwicht worden verstoord en de bel uit elkaar spatten of loslaten. Maatgevend voor de grootte van de loslatende bel is dan de opwaartse druk en de kapillaire krachten. De beweging van de opstijgende bel wordt gekenmerkt door de stijgsnelheid en de bellenbaan. Ze is evenals de bellenvorm in de eerste plaats afhankelijk van de bellengrootte en de fysische eigenschappen van de vloeistof. Gezien in de problematiek van de vorm en de beweging kunnen de luchtbellen in water in drie door de grootte bepaalde groepen worden ingedeeld:

1e. de kleine luchtbellen met een belendoorsnede tot ongeveer $d = 1,2$ mm ($V = 0,8$ mm³) hebben een kogelvorm en stijgen rechtlijnig omhoog;

2e. bij de middelgrote bellen met een doorsnede van $d = 1,2$ tot 16 mm ($V = 0,0008$ tot 2,2 cm³) ontstaan met toenemende grootte afgeplatte rotatie-ellipsoiden, die ongeveer vanaf $d = 6$ mm ($V = 0,10$ cm³) steeds sterker wordende onregelmatige defor-



Afb. 2 - Stijgsnelheid als functie van de belradius.

maties vertonen. De aanvankelijk rechtlijnige bellenbaan gaat in dit groottebereik spoedig over in een slingerbeweging en later in een onregelmatige spiraalvormige baan;

3e. de grote bellen met $d > 16$ mm zijn instabiel en neigen tot uiteenvallen. Ze hebben de vorm van een „paddestoel” en stijgen bij benadering rechtlijnig omhoog. Het ontstaan van de verschillende bellenvormen is te verklaren uit de samenwerking van gasdruk, kapillaire drag, hydrodynamische krachten en hydrostatische druk.

Bij kleine langzaam opstijgende bellen heeft de kapillaire druk de overhand op de hydrostatische en hydrodynamische krachten. De bellen zijn hierdoor kogelvormig. Met toenemende belgrootte neemt de stabiliserende invloed van de oppervlaktespanning meer en meer af, de invloed van de hydrodynamische krachten daarentegen nemen door de snel toenemende stijgsnelheid toe. Daardoor heeft afplating plaats en in toenemende mate een slingerbeweging bij het opstijgen. In afb. 2 is de stijgsnelheid weergegeven als functie van de belradius. In vloeistoffen met geringe viscositeit, zoals b.v. leidingwater kan het daarbij zelfs tot een afname van de stijgsnelheid komen. Bij verder toenemend belvolume treden deformaties op onder invloed van de hydrodynamische krachten afkomstig van stromingen in de vloeistof. Bij sterke storingen kunnen de bellen daarbij uiteenvallen. De stijgsnelheid neemt in dit bereik met de belgrootte langzaam toe en onder invloed van de hydrodynamische

en hydrostatische krachten ontstaan luchtbellen met een paddestoelvorm. De oppervlaktespanning heeft op deze belvorm geen noemenswaardige invloed meer.

Wordt de viscositeit van water door b.v. toevoeging van glycerine verhoogd, dan stijgen de bellen natuurlijk langzamer omhoog en de overgang naar de snelheid van de grote bellen met $d > 6$ mm gebeurt geleidelijk zonder dat eerst een maximum wordt gevormd. Een vergelijking van beide in afb. 2 weergegeven curven doet zien, dat de invloed van de viscositeit op de stijgsnelheid met toenemende belgrootte afneemt. Met het omhoog stijgen van bellen ontstaat een vloeistofstroming. Deze stromingen zijn er de oorzaak van, dat twee bellen, waarvan de banen bij ongestoorde stijgbewegingen zouden kruisen, uit elkaar worden gedreven. Tot een bellenvereniging komt het met bellen tussen $d = 0,5$ en 2 mm slechts als twee bellen precies verticaal onder elkaar en op zo'n geringe afstand van elkaar opstijgen, dat de onderste in de stroming van de bovenste terecht komt.

De stijgsnelheid van de onderste neemt dan met de snelheid van deze stroming toe, zodat de bovenste bel wordt ingehaald en een botsing kan volgen. Komt op deze wijze een aanraking van twee bellen tot stand, dan vindt een vereniging van de bellen alleen plaats in vloeistoffen met naar verhouding hoge oppervlaktespanning en geringe viscositeit. Zo kon een bellenvereniging in zuiver water worden waargenomen, echter niet in huishoudelijk afvalwater, waarin de bellen aan elkaar kleefden, zonder samen te

vloeien. Bij de samentrekking van twee bellen tot één grotere bel wordt het gezamenlijk oppervlak kleiner waardoor oppervlakte-energie vrijkomt. Na een samentreffen kan het slechts dan tot versmelting komen, als de vrijkomende energie groter is dan de bij de bellenvorming te leveren vormveranderingsarbeid. De oppervlakte-energie neemt toe met de oppervlaktespanning, de vormveranderingsarbeid neemt toe met de viscositeit van de vloeistof. Met groter wordende oppervlaktespanning groeit dus de neiging tot samentrekken, terwijl ze met toenemende viscositeit kleiner wordt. Met betrekking tot de afmetingen van de luchtbellen kan het volgende worden opgemerkt.

Bij een zeer langzame bellenvorming aan een ringvormige opening, een quasi-statische vorming dus, is de beldoorsnede na het loslaten van de bel bij kleinere openingen in verhouding tot de doorsnede van de opening groter dan bij grotere openingen. De beldoorsnede is dus bij de quasi-statische vorming niet evenredig met de uittree-opening.

In de praktijk heeft men bij het beluchten van vloeistoffen niet met zo'n quasi-statische toestand te maken. Immers ook gedurende de tijdspanne van het losraken van de bel tot de volledige losmaking blijft nog lucht in de bel stromen, waardoor het werkelijk volume altijd groter is dan de theoretische en onder quasi-stationaire omstandigheden experimenteel gevonden waarde.

Het belvolume is groter naar gelang meer lucht per tijdseenheid door de uittree-opening stroomt en groeit bij gelijkmatig toenemend aantal bellen per tijdseenheid zo lang aan, tot de lucht tenslotte niet meer in de vorm van losse bellen, maar als een gesloten straal uit de opening komt. Tot dit stadium is bereikt neemt het belvolume toe tot het 15 à 25-voudige van zijn voor quasi-statische verhoudingen geldende waarde. Volgens onderzoeken van Siemes is het belvolume bij uittree-openingen tussen $0,4$ en 4 mm onder omstandigheden dat nog geen luchtstraalvorming optreedt, weer te geven met:

$$V = V_m + c \cdot G$$

V = belvolume (cm^3)

V_m = theoretische volume bij quasi-statische belvorming (cm^3)

c = constante van de uittree-opening (s)

G = luchthoeveelheid (cm^3/s)

De invloed van de grootte van de uittree-opening op het belvolume, die reeds bij langzame belvorming gering is als de opening erg klein is, is nog geringer, zodra de luchthoeveelheid de normaal in de praktijk voorkomende hoeveelheid benadert en de bellen snel de opening verlaten. Het ontstaan van luchtbellen kleiner dan ongeveer $d = 1$ mm in water is dan, ook bij zeer fijne uittree-opening derhalve niet mogelijk.

De poriënwijsdte van poreuze filters uit kwarts of keramisch materiaal is niet gelijkmatig. Men werkt bij deze filters derhalve met een gemiddelde poriënwijsdte. Bij zeer fijne filters bedraagt ze enkele μ , bij grove filters tot 2000 μ .

Bij quasi-statische belvorming zijn de omstandigheden bij poreuze filters vergelijkbaar bij die aan een cirkelvormige uittree-opening. De beldoorsnede wordt dan hoofdzakelijk door de poriënwijsdte bepaald. Niet proportioneel, maar bij kleinere poriën naar verhouding groter dan bij grotere.

In tabel I zijn enkele door Seeliger gemeten waarden, voor de horizontale beldoorsnede bij verschillende poriënwijsdten weergegeven:

TABEL I

Poriën diameter D (mm)	Gasbellen diameter d (mm)		d/D
0,020 - 0,030	0,5	0,5	20
0,025 - 0,035	0,5	0,8	20
0,045 - 0,070	0,8	1,2	18
0,130 - 0,160	1,2	2,8	15
0,200 - 0,380	2,2		8

De poriëngrootte kan worden bepaald uit de overdruk, waarmee het filter begint te gassen.

Met toenemende overdruk begint eerst één, nl. de grootste porie te gassen tot tenslotte het gehele filter gelijkmatig gast. De belgrootte neemt toe met toenemende poriëngrootte. Maar altijd is de beldoorsnede aanzienlijk groter dan de poriëndoorsnede. Een verkleining van de poriëngrootte onder een bepaalde maat met de bedoeling kleine bellen te verkrijgen, heeft derhalve geen zin. De beide reeksen voor d zijn afkomstig van verschillende filtersoorten. De tabel geldt voor leidingwater van 20° C voor het geval dat het gehele filteroppervlak juist begint te gassen. Wordt de luchttoevoer naar het filter voorzichtig geopend, dan ontstaan eerst slechts aan enkele poriën langzaam fijne luchtbellen die na losraken bij zeer fijne poriën een doorsnede tot minder dan 0,1 mm kunnen hebben. Het losraken

kost enige tijd gedurende welke nog lucht in de bel stroomt. Bij toenemende luchttoevoer neemt daardoor het belvolume (na losraken) toe en wordt meer en meer door de luchthoeveelheid door het filter ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ sec.}$) bepaald.

Gelijktijdig neemt ook de frequentie waarmee de bellen ontstaan, langzaam toe. Geheel overeenkomstig dus als bij een cirkelvormige uittree-opening. Raken naburige bellen elkaar aan het filteroppervlak voordat ze losraken dan verenigen ze zich. De daardoor gevormde grotere bel breidt zich op het filteroppervlak zo lang uit, tot de opwaartse druk de kleeftkracht overwint. Deze laatste komt in de randhoek α tot uitdrukking en wordt door de oppervlaktespanning van de vloeistof en de chemisch-fysische oppervlakte-eigenschappen (bevochtiging) van het filteroppervlak bepaald. Naast de luchtstroming door het filter zijn derhalve deze eigenschappen van de vloeistof en van het filteroppervlak voor de belgrootte maatgevend. De belgrootte kan dan ook verminderd worden door de oppervlaktespanning van de vloeistof met behulp van bevochtigmiddelen te verminderen. Omgekeerd neemt de belgrootte toe wanneer het filteroppervlak vettig, hydrophoob, en de randhoek α groter is.

Hanisch heeft experimenteel het belvolume bepaald bij een fijn poreus filter en minimale filterbelasting. Daartoe mat hij de horizontale doorsnede d_h van luchtbellen in leidingwater van 20° C met een filter uit

glasachtig materiaal met een poriënwijsdte van 10-15 μ bij toenemende luchthoeveelheid. De resultaten werden logaritmisch uitgezet (afb. 3).

Daar het totale filteroppervlak eerst bij een filterbelasting van ongeveer 7 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ min.}$ begon te gassen, hebben alleen de punten boven deze filterbelasting geldigheid. Ze liggen langs een rechte met de parabolische betrekking $V = 0,002 L^{1,90}$, waarin V het belvolume in mm^3 en L de filterbelasting in $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ min.}$ is.

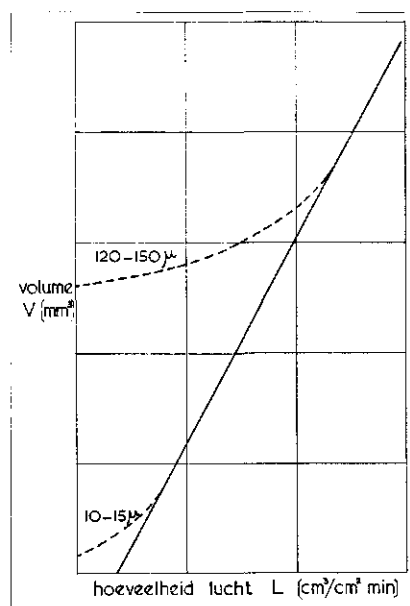
Voor geringere filterbelastingen wijken de punten (langs de gestippelde lijn) meer en meer af van de rechte, omdat de lucht dan slechts door een steeds kleiner wordend deel van het filteroppervlak uittreedt, terwijl de filterbelasting op het totale filteroppervlak is betrokken. Wordt hiervoor in de plaats het werkelijk gassende oppervlak in rekening gebracht dan zouden ook deze meetpunten naar de rechte lijn verschuiven.

De kleinste bij zeer geringe filterbelasting ($< 1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \text{ min.}$) waargenomen bellen hadden een doorsnede van ongeveer 0,1 mm. Werd de luchttoevoer vergroot tot het gehele filteroppervlak gaste en de filterbelasting dus de minimale voor praktisch gebruik nog in aanmerking komende waarde bereikte, dan bedroeg de gemiddelde beldoorsnede reeds $d = 0,5 - 0,6$ mm ($V = 0,09 \text{ mm}^3$). Bij normale filterbelastingen moet ook bij zeer fijne poriën met belgrootten van minstens $d = 1$ mm worden gerekend. Voor de afhankelijkheid van het belvolume van de filterbelasting geldt de algemene vorm: $V = b.L^m$.

Om de invloed van de poriëngrootte vast te stellen werd het experiment herhaald met een filter van hetzelfde materiaal, maar met een poriëngrootte van 120-150 μ . De grootheden b en m bleken niet van de poriëngrootte afhankelijk te zijn. De vergelijking is dus voor alle filters van gelijksoortige oppervlaktemateriaal geldig.

Bij grotere poriën is enkel een hogere filterbelasting nodig, om het hele filteroppervlak te laten gassen. Ze bedroeg bij de grove filter ongeveer 200 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ min.}$ tegenover 7 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ min.}$ bij het fijne filter. Beneden deze luchthoeveelheid wijken de gemeten waarden weer af van de rechte. De invloed van de poriëngrootte op de belgrootte neemt derhalve met stijgende luchttoevoer af en houdt op zodra alle poriën gassen. Komt de filterbelasting boven een bepaalde waarde, dan worden geen losse bellen meer gevormd, maar de lucht verlaat

Afb. 3 - Volume luchtbel bij poreus filter als functie van de filterbelasting.



het filter als een gesloten straal. Bij de onderzochte filters lag dit in een orde van grootte van $1000 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$. min. De grootheden b en m worden op een niet nader onderzochte wijze bepaald door de structuur en het bevochtigend vermogen van het filteroppervlak alsmede door de oppervlaktenspanning en de viscositeit van de vloeistof. Van deze eigenschappen hangt het immers af wanneer de luchtbellen loslaten.

Samenvattende kan worden gesteld:

1e. de aard van de vloeistof is medebepalend voor de afmetingen van de luchtbellen. Een grotere oppervlaktenspanning begunstigt de vorming van grote bellen, terwijl bij een grotere viscositeit van de vloeistof kleinere bellen worden gevormd.

2e. bij de belvorming aan een cirkelvormige uittree-opening is de diameter van deze opening alleen bij een zeer langzame vormingssnelheid van de bellen van invloed op de grootte van de bel. Ook bij deze quasi-statische omstandigheden is de belgrootte echter niet proportioneel afhankelijk van de uittree-opening. Ook bij de kleinste uittree-opening is de beldiameter in schoon water groter dan $d = 0,2 \text{ mm}$.

Bij de in de praktijk voorkomende vormingssnelheden van de luchtbellen is de beldiameter naast de onder 1e genoemde eigenschappen, uitsluitend afhankelijk van de luchthoeveelheid per oppervlakte-eenheid van de uittree-opening en bedraagt meer dan $d = 1 \text{ mm}$.

3e. de belvorming bij poreuze filters verloopt volgens dezelfde wetmatigheden als die bij een cirkelvormige uittree-opening. Alleen bij zeer langzame belvorming is de poriëgrootte van invloed op de belgrootte. Onder deze omstandigheden worden ook bij de fijnste filters geen bellen gevormd met een kleinere diameter dan $d = 0,1 \text{ mm}$ (schoon water). Zodra de filterbelasting zo groot wordt, dat het gehele filter gaat gassen, is de beldoorsnede onafhankelijk van de poriëgrootte en wordt alleen bepaald door de filterbelasting. In schoon water is de beldiameter dan altijd groter dan $d = 0,5 \text{ mm}$. Bij de in de praktijk gebruikelijke filterbelastingen zal men ook bij filters met zeer kleine poriën luchtbellen krijgen met een diameter van $d \geq 1 \text{ mm}$.

In het voorgaande is het één en ander behandeld over de vorm en de afmetingen van de luchtbellen. Het facet van de beluchting van vloeistoffen, dat

nu aandacht zal krijgen, betreft de gasuitwisseling tussen bel en vloeistof. Tijdens het opstijgen van de bel verandert de hydrostatische druk, die op de gasbel wordt uitgeoefend. De druk neemt af met de hoogte en dit veroorzaakt een volumetoename van de bel, overeenkomstig de gaswetten.

Zoals reeds eerder behandeld, geldt voor de uitwendige en inwendige drukken de vergelijking:

$$p_g = p_o + p_h + p_K$$

Voor de gasdruk p_g volgt uit de gaswet:

$$p_g v = p_g \cdot \frac{4}{3} r^3 \pi = \text{constant of}$$

$$[(p_o + p_h) + \frac{2\sigma}{r}] \cdot \frac{4}{3} r^3 \pi = \text{constant}$$

Wanneer de bel op een diepte van h (cm) aanwezig is en op de vloeistof atmosferische druk staat, is $p_o + p_h = 10^6 + h \cdot 10^3$ (dyn/cm²) en men krijgt (belradius r in cm, σ in dyn/cm) voor de afhankelijkheid van de belradius van de diepte uit beide vergelijkingen, $r^2 [(10^6 + h \cdot 10^3)r + 2\sigma] = \text{constant}$. Nu is σ van de grootte-orde 10^2 (b.v. bij 20° voor water tegen lucht 75, bij 100° voor water tegen damp 57). De kapillaire druk is derhalve vergelijkbaar met de hydrostatische druk voor een belradius onder ca. 10^{-4} cm en voor grotere bellen kan de kapillaire druk in de vergelijking worden verwaarloosd. Het groter worden van de bellen bij het omhoogstijgen wordt kwantitatief niet alleen veroorzaakt door het afnemen van de hydrostatische druk. De volgende redenering maakt dit aanschouwelijk.

Stel een gasbel bevindt zich in een vloeistof, waarin het gas ook is opgelost. Dan is in de onmiddellijke aan de bel grenzende laag de vloeistof met gas verzadigd en wel volgens de oplossingswet van Henry in overeenstemming met de gasdruk in de bel, die opgebouwd is uit de kapillaire druk en de hydrostatische druk. De bel bevat dus per volume-eenheid een bepaalde hoeveelheid gas, die evenredig is met de beldruk p_g . Aan de andere kant heerst in de vloeistof de druk p_v , in overeenstemming met de hoeveelheid opgelost gas op enige afstand van de bel, zodat een osmotisch drukverschil $\approx (p_v - p_g)$ van het gas tussen bel-oppervlak en vloeistof-innerlijk aanwezig is, die zich door diffusie of convectie in de vloeistof zal proberen te vereffenen. Een dergelijke bel zal zich dan door de kapillaire druk proberen te verkleinen waarbij gas in

oplossing gaat; de uitwisseling volgt onder ideale omstandigheden door diffusie, in de praktijk hoofdzakelijk door convectie.

Zijn in de vloeistof bellen van verschillende grootte aanwezig, dan groeien de grotere bellen ten koste van de kleinere bellen, tot deze laatste geheel zijn opgelost. Als het oplossingsevenwicht in de vloeistof door een verandering van de druk wordt verstoord, b.v. doordat men de buitendruk snel verandert, dan zal bij vergroting van de buitendruk de druk in de bel evenveel malen vergroot worden en dan moet gas uit de bel in de vloeistofgrenslaag overgaan, d.w.z. de bel wordt kleiner en omgekeerd moet gas uit de vloeistof in de bel overgaan bij verlaging van de buitendruk.

De snelheid, waarmee de zuurstof uit de luchtbel oplost in het water, is afhankelijk van drie factoren, nl.

1. de grootte van het grensvlak lucht en water;
2. het zuurstofdeficiet;
3. de grensvlakvernieuwing voor het instandhouden van een maximaal zuurstofdebiet in de grenslaag.

De grootte van de grensvlakken en daarmee de grootte van de zuurstofoverdracht is recht evenredig met het oppervlak van de luchtbellen. De beldiameter is echter niet onbeperkt te verkleinen, maar zal in de praktijk, zoals is uiteengezet, 1 mm of meer bedragen. De zuurstofoverdracht heeft bij de beluchting met druklucht in 3 fasen plaats:

1. bij de vorming van de bel;
2. gedurende het opstijgen van de bel;
3. bij het openbreken van de bel aan het wateroppervlak.

Het aandeel van de zuurstofinbreng bij het vormen van de bel zal worden beïnvloed door de aard van de beluchter. Bij poreuze beluchters, die in verhouding tot de doorstromende hoeveelheid lucht kleine openingen en een groot diffusorenoppervlak hebben, worden de bellen aan het oppervlak tot de definitieve grootte gevormd en veranderen na losraken niet meer in belangrijke mate. De zuurstofoverdracht in de eerste fase kan dan van belang zijn. Bij een beluchting met grote uittree-openingen en een grote luchthoeveelheid per opening komt de lucht in aparte grote bellen of in een constante bellen-ketting naar buiten en verdeelt zich gedurende het opstijgen in kleine stabiele bellen. De zuurstofoverdracht is hier bij de belvor-

ming praktisch te verwaarlozen. Het procentuele aandeel van de zuurstof-inbreng bij de belvorming wordt voor poreuze materialen met ongeveer 3 % en voor enkelvoudige openingen met 0,4 % aangegeven. De derde fase van de zuurstofopname, nl. aan het wateroppervlak bij het uiteenspatten van de bellen is ook van ondergeschikte orde van grootte. Door proefnemingen met „beluchten” met stikstof kon men het aandeel vaststellen van het oppervlak aan de zuurstoftoevoer. In het algemeen bedroeg dit aandeel onder de in de praktijk gebruikelijke omstandigheden van indompeldiepte en luchthoeveelheid ongeveer 3 %.

De tweede fase van het beluchten, nl. het opstijgen van de bellen is derhalve van de grootste betekenis. Hierbij speelt de opstijgsnelheid van de bellen, die in belangrijke mate van de bellengrootte en vorm afhankelijk is, een rol. In deze fase wordt de zuurstofoverdracht bepaald door de snelheid, waarmee het grensvlak luchtwater wordt vernieuwd. Pasveer heeft berekend, dat op het moment van het ontstaan van de grensvlakken de monomoleculaire waterlaag momentaan, d.w.z. in 10^{-7} s, wordt verzadigd. Op dit moment begint dan ook dadelijk de gasdiffusie uit de monomoleculaire grenslaag naar dieper gelegen lagen. Men kan dus stellen, dat in de grenslaag luchtwater de monomoleculaire waterlaag altijd met zuurstof is verzadigd, tot een concentratie die in overeenstemming is met de partiële druk van de zuurstof. Bij de overgang van zuurstof in bewegend water wordt het water in de grenslaag vervangen door water met een lager zuurstofgehalte, zodat het concentratieverschil in de grenslaag weer groter wordt. Daaruit volgt dat de energie die toegevoerd moet worden, met het doel om zuurstof in het water te brengen, gebruikt moet worden voor de vorming van nieuwe grensvlakken. De snelheid waarmee zuurstof uit een luchtbel in het water diffundeert, is afhankelijk van de snelheid, waarmee de waterlagen aan het grensvlak met de luchtbel worden vernieuwd. Voor een luchtbel van 2-3 mm wordt over een afgelegde weg van 1 cm het grensvlak 4 maal vernieuwd. Dit gegeven resulteert uit experimentele waarnemingen van Pasveer aan een opstijgende gasbel in een stilstaande waterkolom van ongeveer 3 m hoog. Over deze afstand werd het grensvlak zo'n 1000 x vernieuwd. Deze voortdurende grensvlakvernieuwing is voor de diffusie van zuurstof uit de luchtbel

in het water natuurlijk een zeer gunstige omstandigheid. Bij deze experimenten ging ca. 40 % van de zuurstof in de luchtbel in oplossing.

Helaas wordt dit getal in de praktijk van het actief-slibproces niet gehaald. Bij de genoemde experimenten had het water zelf geen stijgsnelheid. In de praktijk van het actief-slibproces heeft het water echter altijd een aanzienlijke stijgsnelheid, waardoor de contacttijd met het water voor het grootste deel van de luchtbellen aanzienlijk lager is.

De stijgsnelheid van het water in een beluchtingsbassin is 2-3 maal groter dan de stijgsnelheid van de luchtbellen, waardoor de contacttijd op 1/3 of 1/4 teruggebracht wordt. Dientengevolge gaat in de praktijk bij een waterhoogte van 3-4 meter dan ook niet 35 of 40 % van de luchtzuurstof in oplossing, maar gemiddeld slechts ca. 10 %.

In het voorgaande is gewezen op de betekenis van het grensvlak luchtwater bij de zuurstofoverdracht. Nu komen er in afvalwater stoffen voor, die van betekenis zijn voor de zuurstofoverdracht, nl. stoffen, die de diffusieconstante, het vormen van de grensvlakken, het concentratieverval en het mechanische zuurstoftransport beïnvloeden. Dit geldt vooral voor oppervlakte-actieve stoffen. Door vermindering van de oppervlaktetension wordt weliswaar de vorming van grensvlakken vergemakkelijkt — bij aanwezigheid van oppervlakte-actieve stoffen zullen daardoor gewoonlijk de gasbellen kleiner zijn — ze veranderen echter gelijktijdig de aard van deze grenslagen door de eigenschap, zich in de grenslagen op te hopen. De oppervlakte-actieve stoffen hebben nl. de eigenschap zich in aanwezige of zich vormende grenslagen te verzamelen. Door de verrijking met detergenten ontstaat in de grensvlakken een meervase-systeem, met een nieuwe diffusieconstante, die kleiner is dan die voor het twee-stoffensysteem, waterlucht.

Ook electrolyten hebben deze eigenschap. Hun invloed is echter niet zo groot als die van detergenten. De invloed van detergenten is niet constant maar hangt af van de omstandigheden van het beluchtingssysteem. Dit is als volgt verklaarbaar: bij de vorming van een luchtbel zijn in het grensvlak nog geen of slechts weinig detergenten aanwezig. Bij het opstijgen door de vloeistof zal het detergentengehalte op het grensvlak toenemen, zodat het grensvlak van de luchtbellen tenslotte

met een laag van detergentenmoleculen is bedekt. De zuurstof uit de luchtbel moet bij een dergelijk grensvlak eerst door de detergentenlaag dringen en kan eerst dan in de mono-moleculaire grenslaag van het water diffunderen. De ophoping van de detergenten hangt derhalve vooral af van de bestaansduur van de grensvlakken en daarmee van de weglengte die de luchtbellen in het water moeten afleggen. Beluchting met een geringere levensduur van de luchtbellen zal derhalve minder door detergenten worden beïnvloed dan een beluchting met een langere bestaansduur van de grensvlakken luchtwater. Terwijl bij beluchten met druklucht op grotere indompeldiepten de zuurstofoverdracht door de aanwezigheid van detergenten in de grenslagen sterker kan verminderen dan de zuurstofoverdracht kan toenemen door een vergroting van de grensvlakken door de veranderde oppervlakte-spanning kan b.v. bij oppervlakte-beluchters de positieve invloed van de vergrote grensvlakvorming overwegen.

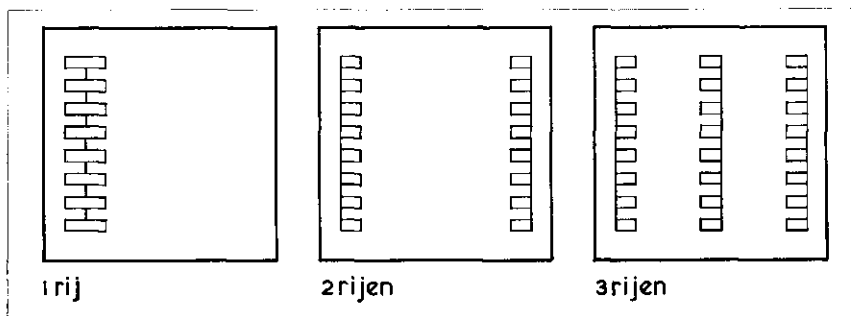
De invloed van de detergenten op de zuurstofoverdracht wordt aangegeven met een factor α , die dus zowel kleiner als groter dan 1 kan zijn.

Ook andere opgeloste stoffen zijn van invloed op de zuurstofoverdracht doordat de oplosbaarheid van zuurstof er door vermindert. De verlaging van de zuurstofverzadiging en daarmee van de zuurstofoverdracht door de aanwezigheid van opgeloste stoffen, wordt uitgedrukt in een factor β . In tegenstelling tot de α -waarde zal de indompeldiepte vrijwel geen invloed hebben op de β -waarde.

In de praktijk van de bellenbeluchting is de zuurstofoverdracht nog afhankelijk van een aantal technische omstandigheden, nl.

1. de kenmerken van het beluchtings-element;
2. de luchthoeveelheid en het aantal beluchtingselementen;
3. de indompeldiepte van het beluchtingselement en de waterdiepte;
4. de rangschikking van de beluchtingselementen;
5. de vorm van de beluchtingstank.

In de literatuur worden zeer vele experimenten beschreven, die tot doel hadden de efficiëncy van de drukluchtbeluchting vast te stellen in afhankelijkheid van de genoemde technische variabelen. Het is ondoenlijk in het kader van deze voordracht uitvoerig op al deze experimenten in te



Afb. 4 - Plaatsing van de beluchtingselementen.

gaan. Er moet derhalve een keuze gemaakt worden. In het hiernavolgende zal een summiere beschrijving worden gegeven van de onderzoeken van het Emschergenossenschaft, zoals deze van 1962-1964 op technische schaal met verschillende druklucht-beluchtingssystemen zijn uitgevoerd.

De beluchting met druklucht kan in 3 hoofdgroepen worden ingedeeld, en wel op grond van de afmetingen van de luchtbellens in:

1. beluchting met fijne bellen. Inblaasdiepte tussen 3 en 4 meter. Beluchtingselement poreuze filters, met poriëndoorsnede tot ca. 100 μ .
2. middelgrote bellen. Openingen 1,5-3,0 mm. Indompeldiepte meestal 2-3 meter, soms 4 meter. Uitzondering Inka op 80 cm.
3. grote bellen. Verschillende indompeldiepten.

De bellenbeluchting wordt gewoonlijk bewerkstelligd door middel van beluchtingselementen in de vorm van poreuze dozen, buizen of zgn. domen. Ook dunwandige, geperforeerde buizen, omwikkeld met kunststofdraad, zijn van toepassing.

Al deze systemen hebben gemeen, dat zij vlakbij de bodem van de tanks zijn geplaatst. Deze plaatsing heeft voordelen in verband met de stroming van het water en — door de lengte van de bellenweg — voor het oplossen van de zuurstof.

Het nadeel is echter de te overwinnen waterdruk. Tegenover het voordeel van de kleine bellen staat dan ook de energie die nodig is om het drukverlies in de diffusoren op te vangen. De proeven van het Emschergenossenschaft werden, wat de beluchting met fijne bellen betreft, uitgevoerd met zgn. Saranbuizen, Brandolbuizen en met dozen van poreuze kunststof.

De Saran-buis is een cilindrische buis van dun gegolfd staalplaat. In de gerilde verdiepingen zijn op een lengte van ca. 60 cm 144 boringen met een diameter van 3 mm aangebracht. Over

de golvingen is van het begin tot het eind van de buis spiraliserend dicht op elkaar een Saran kunststofdraad gewikkeld. De door de verdeler ingevoerde lucht treedt eenzijdig axiaal in de buis binnen, van daar door de openingen en door de tussenruimten tussen de wikkelingen naar buiten. De capaciteit van de buis is voor bepaalde luchthoeveelheden naar onderen en boven begrensd. De onderste grens wordt gegeven door de noodzaak, de buis over de gehele lengte en omtrek te laten gassen, daar anders water en slib kunnen binnendringen. De bovenste grens wordt bepaald door de uitrekking van de draad, die tot een ongewenste vergroting van de bellen voert. De optimale belasting bedraagt volgens de fabrikant 12 Nm³/buis en uur of 7,9 NI/cm².h. Ze kan tussen 5 en 20 Nm³/h variëren.

De Brandol-buis is een poreus filter, gevormd uit korrelachtig materiaal, dat gebonden is met phenol-formaldehyde hars. Brandol wordt in verschillende fijnheden gemaakt, die b.v. aangeduid worden met brandol 60 of brandol 80 (zie tabel II).

TABEL II

Korrelgrootte aanduiding	Poriëndoorsnede in μ	
	Gemiddeld	Maximaal
Brandol 20	50	70
Brandol 30	80	100
Brandol 40	120	150
Brandol 56	140	170
Brandol 60	190	280
Brandol 80	290	400
Brandol 100	310	410
Brandol 120	500	800
Brandol 300	800	1200

Hoe kleiner de korrelgrootte, des te kleiner de bellen zouden zijn en des te hoger het drukverlies is. Het poriënvolume zou 30-42 % bedragen.

Het brandolbeluchtingselement bestaat meestal uit twee horizontaal liggende, door trekankers bij elkaar gehouden cilindrische buizen. De cylinders worden in doorsnede van 70 of 100 mm gemaakt. De lengte bedraagt 500 mm.

Bij het verbindingsstuk van beide cylinders bevindt zich de opening voor de luchttoevoer. Vandaar verdeelt de lucht zich over de cylinder en dringt door het poreuze materiaal naar buiten. Het optimale bereik ligt voor Brandol 60 en Brandol 80 bij 12-15 Nm³/h per beluchter (dubbele cylinder) = 3,8 — 4,8 NI/cm².h.

De beluchtingsdozen met kunststofdeksel als filtermateriaal zijn ontwikkeld op grond van het feit, dat eventuele verstoppingen gemakkelijk zijn op te heffen door het uitwisselbaar zijn van de poreuze platen. De doos is een vlakke 5-zijdige gesloten doos van staalplaat of kunststof met een intree-opening voor de lucht aan één van de smalle kanten. De luchttoevoerbuis gaat tot in het midden van de doos en heeft aan 2 kanten 8 openingen van \varnothing 14 mm. Het optimale bereik bedraagt 15-20 Nm³/h per doos = 4,4 — 5,8 NI/cm².h. De kunststofolie is van polyaethyleen.

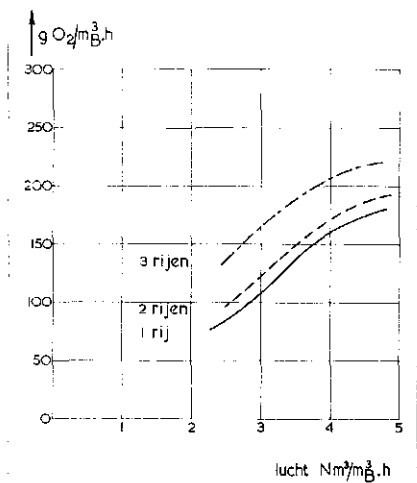
De drukverliezen per beluchtingselement zijn in tabel III weergegeven. Voor de praktijkomstandigheden zal het drukverlies een tweetal decimeter bedragen.

TABEL III - De drukverliezen per beluchtingselement.

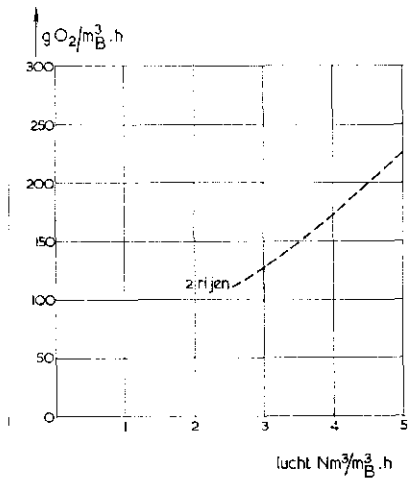
	luchthoeveelheid per element in m ³ /h	drukverlies in mm WS
Saran	6	153
	12	160
	18	173
Brandol	10	200
	20	300
	30	400
	40	500
Kunststof- doos	10	170
	20	180
	30	190
	40	198
	50	206

Met bovenbeschreven beluchters werden bij het Emschergenossenschaft proeven genomen, waarbij de plaatsing van de beluchters werd gevarieerd (afb. 4).

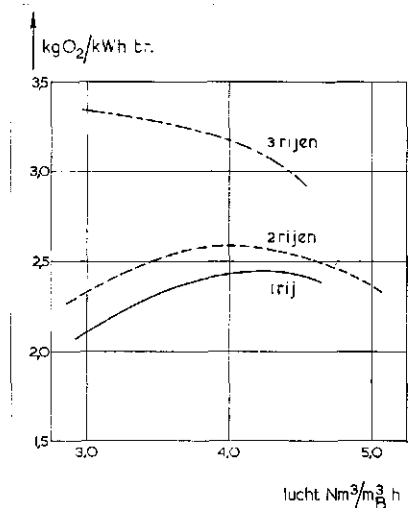
De beluchtingselementen werden nl. in één, twee of drie rijen gerangschikt nabij de bodem van de tank. Voor de verschillende beluchters werd uitgegaan van de optimale bereiken, zodat het aantal werd aangepast aan de luchthoeveelheid. In afb. 5 is het resultaat weergegeven van de proeven met Saran-buizen. De ingebrachte hoeveelheid zuurstof per m³ van de tank per uur (g O₂/m³B.h) is weergegeven als functie van de hoeveelheid lucht die per m³ van de tank per uur is toegevoerd.



Afb. 5 - Saran buizen in leidingwater.



Afb. 6 - Brandol buizen in leidingwater.



Afb. 7 - Saran buizen.

Het zuurstoftoevoervermogen varieëde tussen 100 en 200 g O₂/m³·h of 29-55 g O₂/Nm³ toegevoerde lucht. De ingebrachte hoeveelheid zuurstof (g O₂/m³·h) neemt ruwweg ongeveer evenredig toe met de hoeveelheid lucht. Ten aanzien van het nuttig rendement van de zuurstofopnamen geeft de hoeveelheid zuurstof, die per m³ lucht per meter inblaasdiepte (g O₂/Nm³·m_E) wordt opgelost, een goed inzicht. Voor de op een diepte van 3,40 m geplaatste Saran-buizen bedroeg het zuurstofrendement bij plaatsing van de diffusoren in 1, 2 en 3 rijen resp. 11,0; 11,8 en 12,3 g O₂/Nm³·m_E. De rangschikking aan twee kanten geeft een geringe verbetering ten opzichte van die aan één kant. De vlakverdeling in 3 rijen geeft een duidelijke stijging van het rendement. Het specifiek zuurstofrendement nam bij de proeven toe van 9,8 tot 11,7 g O₂/Nm³·m_E voor inblaasdiepten van 2,60 tot 3,40 meter. Variatie in diepte werd echter bewerkstelligd door wijziging van de waterspiegel, zodat een verandering van de natte doorsnede en derhalve van de hydraulische omstandigheden optrad.

De beluchtingsexperimenten werden, behalve in leidingwater, ook uitgevoerd in leidingwater waaraan detergenten waren toegevoegd en in biologisch gezuiverd afvalwater.

In deze twee milieu's werd de zuurstofinbreng voor de tweezijdige rangschikking van de Saran-buizen gereduceerd tot resp. 55 en 53 % van de in leidingwater gevonden getallen. Bij de proeven met Brandol-buizen (afb. 6) bedroeg het zuurstoftoevoervermogen 130 tot 285 g O₂/m³·h of 42 — 58 g O₂/Nm³ verplaatste lucht. Ook bij de Brandol-buizen, zoals te ver-

wachten was, een nagenoeg evenredige toename van de zuurstofinbreng met de hoeveelheid lucht. Bij ca. 3,50 m inblaasdiepte bedroeg het zuurstofrendement bij plaatsing van de diffusoren in 1, 2 en 3 rijen resp. 12,9; 12,5 en 14,8 g O₂/Nm³·m_E. Rangschikking in 2 rijen gaf hier geen verbetering, wel in 3 rijen.

Proeven met detergenten en biologisch gezuiverd afvalwater gaven een vermindering van het rendement te zien tot resp. 65 en 81 % van die in leidingwater. Voor de kunststofdozen lag het zuurstoftoevoervermogen tussen 100 en 200 g O₂/Nm³·h, of 37-47 g O₂/Nm³ toegevoerde lucht. De rangschikking in 2 rijen gaf gemiddeld 13,2 g O₂/Nm³·m_E tegen 10,8 bij één rij. Proeven op verschillende inblaasdiepten (3,36 tot 4,88 m) gaven geen verschil te zien.

Detergenten en biologisch gezuiverd water verminderden het zuurstoftoevoervermogen tot 57 resp. 60%. Uit de metingen van snelheid en richting van de vloeistofstroming aan de bodem van de proeftank met Saran- en Brandolbuizen bleek de snelheid bij 1 rijbeluchting 40-70 cm/s te bedragen en bij meerdere rijen te verminderen tot 8-40 cm/s. De invloed van de luchthoeveelheid op deze grootheden was in het onderzochte bereik van 3 tot 5 Nm³ per m³·h per uur praktisch van geen betekenis.

Ook de toevoeging van detergenten tot 10 mg/l alsmede proeven met bio-

logisch gezuiverd afvalwater met een detergentengehalte van 3-4 mg/l gaven slechts ondergeschikte veranderingen in de snelheid aan de bodem. Het bruto energieverbruik is berekend uit de gemeten hoeveelheid lucht en de tegendrukken met behulp van de formule:

$$N_B = \frac{Q_L \cdot \gamma_w \cdot h_t}{n \cdot 102}$$

waarin:

N_B = bruto energieverbruik in kW

Q_L = hoeveelheid lucht in Nm³/s

γ_w = soortelijk gewicht van water = 1000 in kg/m³

h_t = totale tegendruk in mWs

η = rendement van compressor en motor

102 = omrekeningsgetal van m kg/s in kW

De totale tegendruk h_t omvat de som van alle drukverliezen tengevolge van de inblaasdiepte h_w plus de met 0,05 mWs aangenomen wrijvingsverliezen in de buisleidingen h_l, plus de uittredeverliezen bij de luchtverdelers h_v. Daar de hoeveelheden lucht en het aantal beluchtingsbuizen zo gekozen is, dat de beluchters een constante doorstroomhoeveelheid hadden per oppervlakte-eenheid, zijn de uittredeverliezen voor elk systeem zelve constant.

Met de volgende uittredeverliezen kon worden gerekend.

	Saran	Brandol 80	kunststofdozen
luchthoeveelheid per diffusor in Nm ³ /h	11-12	11-15	34-56
drukverlies h _v in mWs	0.16	0.23	0.20

Het rendement van compressor + motor werd op 60 % aangenomen. De formule kan dan vereenvoudigd worden tot:

$$N_B = \frac{Q_L \cdot h_t}{220} \text{ [kw]},$$

waarin nu Q_L in Nm^3/h .

Dit komt overeen met 4,55 W (br) per Nm^3 lucht per uur per m inblaasdiepte. Combinatie van de aldus berekende energie met de ingebrachte hoeveelheid zuurstof levert de bruto zuurstofopbrengst op in $\text{kg O}_2/\text{kWh}$. In afb. 7 is de zuurstofopbrengst voor Saranbuizen uitgezet als functie van de per m^3 tank per uur toegevoerde hoeveelheid lucht.

Het blijkt dat de opbrengst met toenemende dichtheid van de diffusoren op de bodem gunstiger wordt. De berekende maximale waarden zijn voor:

- rangschikking in 1 rij : 2,45 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$
- rangschikking in 2 rijen: 2,6 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$
- rangschikking in 3 rijen: 3,35 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$

De vergelijking van de zuurstofopbrengst bij Saran- en Brandolbuizen bij tweezijdige rangschikking toont goede overeenstemming in het bereik van 2,5 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ (afb. 8).

Bij vergelijking van de uitkomsten van de zuurstofopbrengst van de verschillende in de literatuur vermelde experimenten doet zich de moeilijkheid voor, dat de proefomstandigheden ten aanzien van tankvorm alsmede rangschikking en aantal diffusoren zeer verschillend kunnen zijn. Ook is niet altijd duidelijk of een omrekening van de gemeten luchthoeveelheid op normaal m^3 heeft plaatsgehad. Hiermede moet de relatief grote spreiding in de getalwaarde van de specifieke zuurstofinbreng van 7 tot 15 $\text{gram O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}_E$ zijn te verklaren. Ze bedraagt gemiddeld 10 $\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{m}_E$. Ook de gemiddelde bruto zuurstofopbrengst van 1,6 tot 3,3 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ zijn in goede overeenstemming met de door het Emschergerenossenschaft gevonden waarden. In tabel IV zijn de laatste vermeld, met daarnevens de in de literatuur aanbevolen waarden.

De richtwaarden gelden voor diepten tussen 2 en 4 meter bij eenzijdige beluchting in bekkens met ongeveer kwadratische doorsnede of bij meerdere beluchttingsrijen in brede bekkens. Voor de beluchting met middelgrote bellen worden in het algemeen geperforeerde buizen gebruikt. De

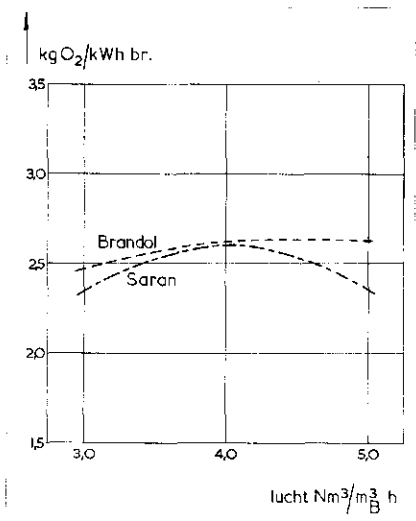
TABEL IV

	Emschergerenossenschaft		richtwaarden (v. d. Emde)	
	optimaal	gemiddeld	optimaal	gemiddeld
Leidingwater:				
O_2 toevoer in $\text{g}/\text{Nm}^3 \cdot \text{m}_E$	13	11	12	10
O_2 opbrengst in kg/kWh	2,9	2,4	2,2	1,7
Biol. gezuiverd afvalwater:				
O_2 toevoer in $\text{g}/\text{Nm}^3 \cdot \text{m}_E$	10	8	8,5	7
O_2 opbrengst in kg/kWh	2,0	1,7	1,5	1,2

grootte van de gaatjes ligt tussen 2 en 5 mm. Met groter wordende opening neemt het zuurstoftoevoervermogen af, tegelijkertijd echter ook de drukverliezen, die bovendien door het aantal openingen worden bepaald. De boorgaten worden meestal in één of meerdere rijen aan de onderkant van de beluchttingsbuis aangebracht. De beluchttingsbuizen kunnen in een rooster zijn samengevat. De beluchttingsproeven van het Emschergerenossenschaft met middelgrote bellen hadden betrekking op een tweezijdige rangschikking. Bij de proeven werden de luchthoeveelheid en het vloeistofmedium gevarieerd. Het zuurstoftoevoervermogen neemt ongeveer evenredig toe met de luchthoeveelheid van 81 tot 117 $\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$. Het gemiddelde rendement lag voor schoon water op 7,6 $\text{g O}_2/\text{Nm}^3 \cdot \text{m}_E$. Door de toevoeging van detergenten of met biologisch gezuiverd afvalwater met een detergentenconcentratie van 4,4 mg/l werd de zuurstofinbreng duidelijk verminderd.

	detergenten mg/l	α -waarde
leidingwater	2.6	0.77
leidingwater	3.3	0.68
biol. gezuiverd afvalwater	4.4	0.59

Afb. 8 - Brandol en Saran buizen in 2 rijen.



De zuurstofopbrengst neemt af met toenemende luchthoeveelheid en lev van 1,7 kg/kWh bij 3 m^3 lucht/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}$ tot 1,46 kg/kWh bij 5 m^3 lucht. Een middelgrote bellen-beluchting met geperforeerde buizen of platen (1-5 mm) of kruisgewijze op een verdeelbuis opgezette kleine buisstukken (zgn. Sparger) heeft naast een eenvoudige constructie het voordeel, dat verstoppingen gemakkelijker zijn op te heffen dan bij fijne bellenbeluchters. De volgende literatuur-gegevens gevonden zuurstoftoevoer per m^3 lucht en m inblaasdiepte ligt in de orde van grootte van 5-6 $\text{g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}_E$.

In tabel V zijn de door Emschergerenossenschaft gevonden waarden en zgn. richtwaarden voor de praktijk (v. d. Emde) voor beluchting met diepliggende middelgrote bellen samengevat.

Ter vergelijking met de diepliggende middelgrote bellen-beluchting zijn in tabel VI de richtwaarden voor de praktijk (v. d. Emde) gegeven voor de hoogliggende middelgrote bellenbeluchting (de zgn. Inka-beluchting).

Deze beluchttingswijze met grote bellen is ontstaan uit de wens het latente gevaar van verstoppingen uit te schakelen. De luchtverdelers bestaan daarom in het algemeen uit loodrecht geplaatste van onderen open buizen met relatief grote doorsnede. Soms worden ook horizontaal gerangschikte geperforeerde buizen of platen gebruikt met openingen groter dan 10 mm. Het tengevolge van de grootte van de luchtbellen slechter zuurstofrendement wordt in verband met de grotere bedrijfszekerheid geaccepteerd. Een zekere verbetering wordt bereikt met schuinstaande verdeelplaatjes boven de uitrede-openingen. Rangschikking in 2 rijen voert bij deze beluchting tot een 6 à 13 % hogere zuurstofinbreng dan bij de beluchting in 1 rij. Het gemiddeld rendement bij een luchttoevoer van 3 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ bedraagt voor:

rangschikking in 1 rij:
6,7 $\text{g O}_2/\text{Nm}^3 \cdot \text{m}_E$ of 1,4 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$

TABEL V - Zuurstoftoevoer voor diepliggende middelgrote bellenbeluchting.

	Emschergenossenschaft		richtwaarden	
	optimaal	gemiddeld	optimaal	gemiddeld
Leidingwater:				
O ₂ toevoer in g/Nm ³ .m _E	8	7,5	7	6
O ₂ opbrengst in kg/kWh	1,7	1,5	1,4	1,1
Biol. gezuiverd afvalwater:				
O ₂ toevoer in g/Nm ³ .m _E	6	5	5,5	4,5
O ₂ opbrengst in kg/kWh	1,4	1,0	1,1	0,8

TABEL VI - Zuurstoftoevoer voor hoogliggende middelgrote bellenbeluchting (INKA)

	Richtwaarden	
	optimaal	gemiddeld
Leidingwater:		
O ₂ toevoer in g/Nm ³ .m _E	9	8
O ₂ opbrengst in kg/kWh	1,8	1,5
Biol. gezuiverd afvalwater:		
O ₂ toevoer in g/Nm ³ .m _E	7,5	6,5
O ₂ opbrengst in kg/kWh	1,5	1,2

TABEL VII - Zuurstoftoevoer voor beluchting met grote bellen.

	Emschergenossenschaft		richtwaarden	
	optimaal	gemiddeld	optimaal	gemiddeld
Leidingwater:				
O ₂ toevoer in g/Nm ³ .m _E	7,5	7	6	5
O ₂ opbrengst in kg/kWh	1,6	1,5	1,2	0,9
Biol. gezuiverd afvalwater:				
O ₂ toevoer in g/Nm ³ .m _E	6,5	5,5	4,5	4
O ₂ opbrengst in kg/kWh	1,3	1,0	0,9	0,7

maatgevend, anderzijds moet de vloeistofstroming optimaal zijn. Voor de drukbeluchting komt hoofdzakelijk de langwerpige vorm in aanmerking, waarbij de beluchtingseenheden aan één of twee lengtezijden liggen. De zuurstofoverdracht uit de lucht in het water verloopt zoals besproken hoofdzakelijk in 2 fasen, nl. op het ogenblik van het ontstaan van de bellen en gedurende het opstijgen van de bellen. Dientengevolge heeft de inblaasdiepte een belangrijke invloed op de absolute grootte van de ingebrachte zuurstof. Afb. 10 geeft de samenhang tussen inblaasdiepte, grootte van de bellen en hoeveelheid lucht.

Na de vorming van de bellen neemt de ingebrachte zuurstof ongeveer lineair met de inblaasdiepte toe. Het snijpunt met de ordinaat (inblaasdiepte = 0 m) geeft de hoeveelheid ingebrachte zuurstof bij de vorming van de luchtbellen.

Bij onderzoeken van de Amerikanen Morgan en Bewtra werd met toenemende inblaasdiepte, betrokken op 1 m³ toegevoerde lucht en 1 m inblaasdiepte, een relatief kleiner zuurstofrendement gevonden (afb. 11). Het relatief grotere aandeel van de zuurstofoverdracht bij de vorming van de bellen bij geringere inblaasdiepte wordt als mogelijke reden genoemd. De proeven van het Emschergenossenschaft gaven daarentegen bij een toenemende inblaasdiepte van 2,5 of 3,4 m een eenduidige toename van het rendement (afb. 12). Mogelijk is de

rangschikking in 2 rijen:

7,8 g O₂/Nm³.m_E of 1,6 kg O₂/kWh

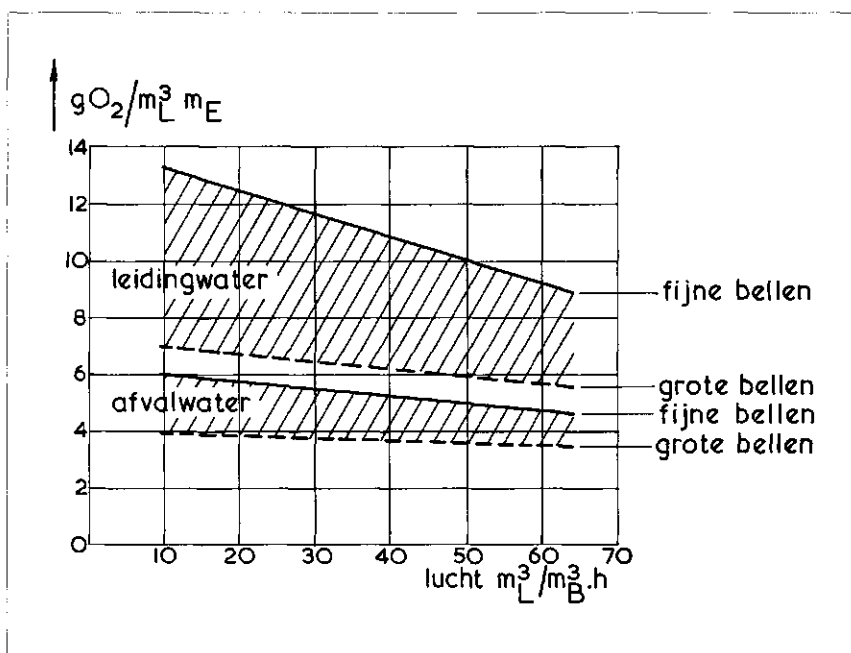
Door de aanwezigheid van detergenen neemt ook hier het rendement af, echter niet zo sterk als bij de beluchting met fijne bellen (afb. 9). Terwijl het zuurstofrendement bij de beluchting met fijne bellen in afvalwater rond 50 % minder is dan in leidingwater, was bij de beluchting met grote bellen de vermindering ca. 40 %.

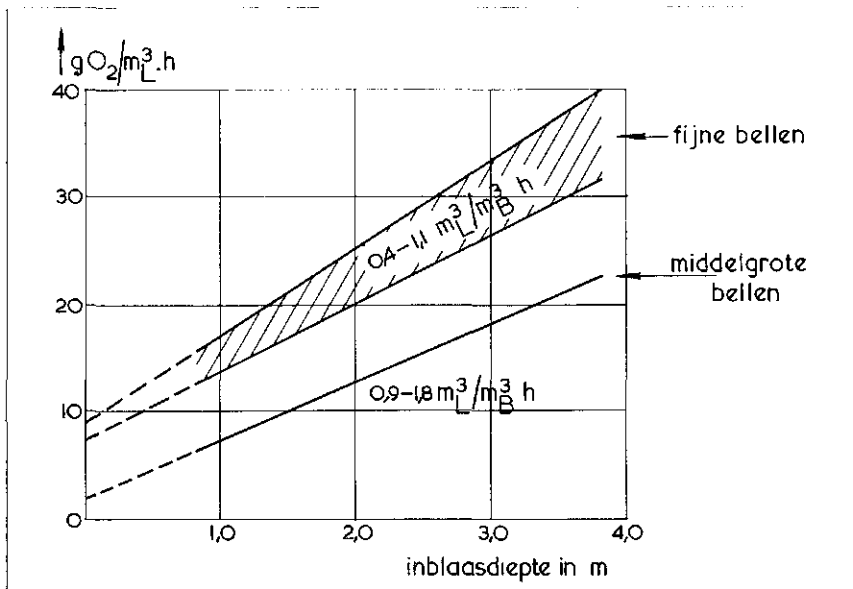
In tabel VII is een vergelijking gegeven van de experimentele waarden van het Emschergenossenschaft en de richtwaarden voor de praktijk (v. d. Emde) voor de beluchting met grote bellen.

In afhankelijkheid van het beluchtingssysteem kunnen verschillende vormen van beluchtingstanks in aanmerking komen.

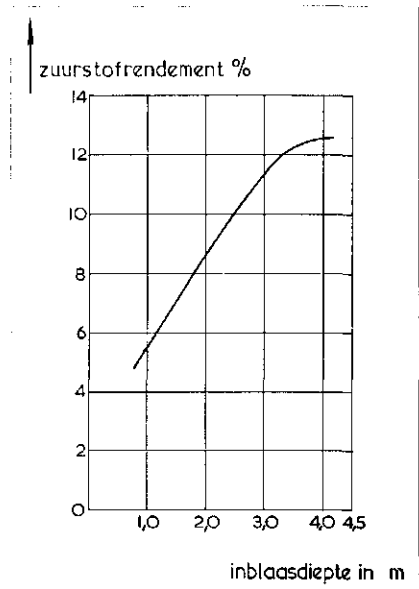
Eenzijds is hierbij de zuurstofinbreng

Afb. 9 - Beluchttingsrendement met fijne en grote luchtbellen.

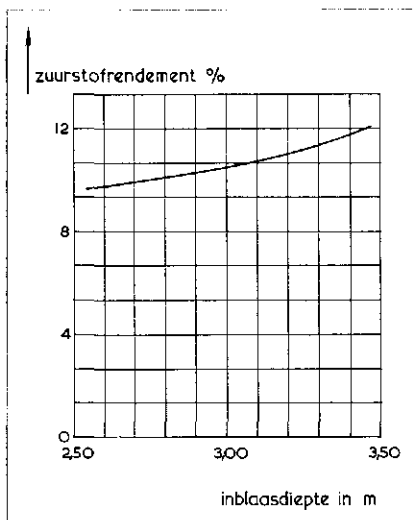




Afb. 10 - Samenhang tussen inblaasdiepte, afmetingen van de luchtbellen en hoeveelheid lucht met betrekking tot het beluchtingsrendement.



Afb. 11 - Saran buizen in 2 rijen (Morgan en Bewtra).



Afb. 12 - Saran buizen in 2 rijen (Emschergenossenschaft).

vormgeving van de tank alsmede de rangschikking van de diffusoren hiervoor verantwoordelijk. De proeven van het Emschergenossenschaft gaven tenslotte, wat de zuurstofopbrengst betreft, al naar gelang

de rangschikking van de beluchters, bij de beluchting met fijne bellen een zuurstofopbrengst van 2,0 tot 3,3 kg O_2 /kWh en bij de beluchting met middelgrote en grote bellen van 1,4 tot 1,8 kg O_2 /kWh. De werking van de

beluchting met grote bellen is door bepaalde constructievormen, die een opdeling van de grote bellen in kleinere bellen bewerkstelligen, vergelijkbaar geworden met die van de beluchting met middelgrote bellen.

Literatuur

1. Seeliger, R., *Die Naturwissenschaften*, 36 (1949) S. 41.
2. Pasveer, A., *Sew. and. Ind. Wastes*, vol. 27, no. 10, 1955.
3. Pasveer, A., *Münchener Beiträge zur Abwasser- Fischerei- und Flussbiologie*, Band 5, 1958.
4. Hanisch, B., *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, Heft 8, 1960.
5. Emde, W. von der, *Berichte der Abwassertechn. Vereinigung e.V.* H. 13. Die Hamburger Tagung 1961.
6. Kalbskopf, K. H., *Gas- und Wasserfach* 102 (1961) H8.
7. Mölker, M., *Kommunalwirtschaft* 9, 1962.
8. McKeown, J. J., Okun, D. A., *Air and Water Pollution*, May 1963.
9. Morgan, P. F., Bewtra, J. R., *Air and Water Pollution*, May 1963.
10. Hörler, A., *Verband Schweizerischer Abwasserfachleute*, Verbands-Bericht Nr. 81/1, 1963.
11. Emde, W. von der, *Schweiz. Zeitschr. für Hydrologie*, XXVI, 1964, fasc. 2.
12. Knop, E., Bischofsberger, W., Stalman, V., *Versuche mit verschiedenen Belüftungssystemen im technischen Maszstab*, Teil 2.
13. Rincke, G., Mölker, M., *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen* no. 1792. 1967.