

Beluchtingsprocessen

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

1. Inleiding

Beluchtingsprocessen bij de zuivering van afvalwater m.b.v. actief slib hebben twee belangrijke aspecten:

— op 'micro'-schaal, d.w.z. op de schaal van het grensvlak tussen water en lucht, is het proces van stofoverdracht kenmerkend. In het tweede hoofdstuk wordt op de theoretische grondslagen hiervan ingegaan, waarbij het accent uiteraard op de overdracht of inbreng van zuurstof komt te liggen. Deze beschouwingen brengen een aantal invloedsfactoren naar voren, die



PROF. DR.-ING. H. J. PÖPEL
TH Delft

— op 'macro'-schaal, d.w.z. bij de technische realisatie van een beluchtingsproces, bepalend zijn voor de zuurstofinbreng. In het derde hoofdstuk wordt aan de hand van de verscheidene bekende beluchtingsmethoden nagegaan, welke van de vernoemde factoren bij ontwerp en bedrijfsvoering moeten worden betrokken om een zo hoog mogelijke zuurstofinbreng te verkrijgen. In deze beschouwingen wordt ook de voor de zuurstofoverdracht benodigde energie opgenomen.

Niet ingegaan wordt op andere eisen, die m.b.t. het actief-slibproces aan de beluchting moet worden gesteld, zoals opwekking van (minimale) stroomsnelheden ter voorkoming van slibafzettingen, benodigde hoeveelheid zuurstof en bijbehorende dimensionering van de beluchting. Ook meer praktijkgeoriënteerde aspecten van de verschillende beluchtingsmethoden worden hier niet behandeld.

2. Theoretische aspecten van zuurstofoverdracht

2.1. De verzadigingsconcentratie

Zuurstof kan slechts in zeer beperkte mate in water worden opgelost. Het maximaal te bereiken zuurstofgehalte, de verzadigingsconcentratie c_s ($\text{g O}_2/\text{m}^3$), heeft een grote invloed op de snelheid van zuurstofoverdracht. c_s is afhankelijk van

- de watertemperatuur T ($^\circ\text{C}$);
- de partiële druk van zuurstof in de lucht p (kPa) ¹;

¹ 1 kPa = 10^3 Newton/ m^2 = 10 mbar = 7,50 mm Hg \approx 0,1 m waterkolom. Zie ook 'lijst van symbolen'.

— de soort en hoeveelheid van in het water opgeloste stoffen.

De temperatuursafhankelijkheid van c_s in zuiver water bij een luchtdruk van 101,3 kPa en bij met waterdamp verzadigde lucht kan binnen een temperatuurtraject van 5°C tot 25°C met grote nauwkeurigheid ($r = 0,99996$) door de volgende empirische vergelijking worden weergegeven

$$c_s = \frac{483,7}{32,71 + T} \text{ g O}_2/\text{m}^3 \quad (1)$$

De verzadigingsconcentratie verandert evenredig met de partiële druk p van zuurstof in de lucht. Daar de lucht gemiddeld $\pi_v = 20,95$ volumepercent zuurstof bevat, bedraagt de partiële druk

$$p = 0,21 \cdot (P - p_w) \text{ kPa} \quad (2)$$

of algemeen

$$p = \pi_v \cdot (P - p_w) \text{ kPa} \quad (3)$$

met p_w = verzadigingsdruk van water bij een temperatuur van T $^\circ\text{C}$

$$\approx 0,642 \cdot 1,067^T \text{ kPa} \quad (5 \leq T \leq 25^\circ\text{C})$$

De partiële druk p kan variëren t.g.v. veranderingen van de atmosferische druk P (verg. 2 en 3). Bij grensvlakken beneden de waterspiegel van een bassin (bellenbeluchting, 'deep shaft' beluchting) wordt de plaatselijke druk nog verhoogd door de boven het grensvlak aanwezige waterkolom van h (m) hoogte. De totale druk P_T bedraagt dan

$$P_T = P + h \cdot \rho \cdot g / 10^3 \text{ kPa} \quad (4)$$

Tenslotte kan de partiële zuurstofdruk p door veranderingen van het gemiddelde zuurstofgehalte van de lucht worden beïnvloed. Zuurstofopname door het actief-slib doet het genoemde volumepercentage π_v in geringe mate dalen, terwijl het bij toepassing van zuivere zuurstof van 0,21 naar 1,00 stijgt.

In de praktijk van de beluchting zullen t.g.v. de besproken invloeden zelden de bekende 'theoretische' (of met verg. 1 berekende) verzadigingsconcentraties c_s kunnen worden bereikt. De praktijkwaarde c_s^* voor zuiver water bedraagt met inachtneming van deze invloeden

$$c_s^* = c_s \cdot \frac{\pi_v \cdot (P_T - p_w)}{0,21 \cdot (101,3 - p_w)} \text{ g O}_2/\text{m}^3 \quad (5)$$

Uit vergelijking (5) volgt, dat

— aanzienlijke variaties van de atmosferische druk P de c_s^* -waarde met niet meer dan 3% zullen veranderen;

— de c_s^* -waarde op een inblaasdiepte van h (m) ongeveer met een factor $(1 + 0,1 \cdot h)$ toeneemt en voor opstijgende bellen evenredig met de diepte tot c_s afneemt indien geen zuurstofopname plaatsvindt, d.w.z. π_v konstant blijft;

— opname van zuurstof door het water en afgifte van CO_2 aan de lucht c_s^* doen dalen;

— de toepassing van zuivere zuurstof de verzadigingsconcentratie c_s^* op ongeveer $5 \cdot c_s$ brengt.

In water opgeloste stoffen doen de verzadigingsconcentratie c_s steeds dalen. Dit effect is moeilijk te kwantificeren, maar kan in afvalwater tot c_s -redukties van 10% oplopen.

Een nauwkeurige overeenstemming van in de zuiveringspraktijk gemeten verzadigingsconcentraties met de bekende 'theoretische' waarden kan derhalve niet worden verwacht.

2.2. De snelheid van zuurstofoverdracht

Wordt een zeker volume water V (m^3) via een grensvlak A (m^2) met lucht in contact gebracht, dan wordt de het grensvlak vormende zeer dunne laag water meteen met zuurstof verzadigd. Tengevolge van het concentratieverschil ($c_s - c$) tussen het grensvlak en de daaronderliggende waterlagen wordt zuurstof in de richting van afnemende concentratie getransporteerd. Dit transportproces wordt door moleculaire diffusie beheerst en verloopt uiterst langzaam. In stilstaand water met een zuurstofgehalte van c ($\text{g O}_2/\text{m}^3$) wordt door een stagnant grensvlak binnen de tijd t (s) de volgende massa zuurstof M (g O_2) opgenomen:

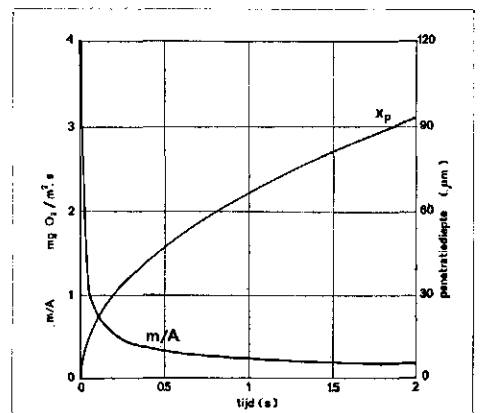
$$M = 2 \cdot A \cdot (c_s - c) \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \text{ g} \quad (6)$$

De snelheid van zuurstofoverdracht m ($\text{g O}_2/\text{s}$) bedraagt dan

$$m = \frac{dM}{dt} = A \cdot (c_s - c) \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t}} \text{ g/s} \quad (7)$$

Bij $t = 0$ is de opnamesnelheid oneindig groot en daalt binnen enkele tienden van seconden naar relatief lage waarden (zie afb. 1). De indring- of penetratiediepte

Afb. 1 - Verloop van de snelheid van zuurstofopname en penetratie in stilstaand zuurstofloos water van 10°C .



van zuurstof in het water x_p is daarbij uiterst gering:

$$x_p = \sqrt{D \cdot t} \cdot \pi \quad \text{m} \quad (8)$$

Deze beschouwingen gelden voor stilstaand water. Zij kunnen ook op turbulent water worden toegepast. In turbulent water is onder stationaire condities een constant grensvlak A (m^2) per watervolume V (m^3) aanwezig. Steeds zullen echter t.g.v. de menging waterdeeltjes van het grensvlak worden verwijderd en andere deeltjes hun plaats gaan innemen. De in het grensvlak opgenomen zuurstof wordt daardoor aan het gehele watervolume overgedragen. De gemiddelde 'verblijftijd' van een waterdeeltje in het grensvlak kan bij stationaire condities ook als constant worden aangenomen. Deze tijd t_c (s) wordt door de intensiteit van de menging (beluchting) bepaald. Komt een waterdeeltje met een zuurstofgehalte van c in het grensvlak, dan zal het gedurende t_c een door vergl. (6) te bepalen massa zuurstof opnemen. De gemiddelde snelheid van zuurstofoverdracht bedraagt dan

$$m' = \frac{M}{t_c} = 2 \cdot A \cdot (c_s - c) \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c}} \quad \text{g/s} \quad (9)$$

terwijl de momentele snelheid volgens vergelijking (7) van oneindig naar

$$m(t=t_c) = A \cdot (c_s - c) \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c}} \quad \text{g/s} \quad (10)$$

terugloopt. Hieruit volgt

$$m' = 2 \cdot m(t=t_c) \quad \text{g/s} \quad (11)$$

Met behulp van afb. 1 kan bijv. worden vastgesteld, dat in een beluchtingsbassin met zuurstofloos water van 10°C en $t_c = 0,05$ s de gemiddelde snelheid van zuurstofoverdracht $2 \cdot 1,0 = 2,0$ mg $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ of $7,2$ g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ zal bedragen.

De concentratieverandering die met de gemiddelde snelheid van zuurstofoverdracht m' gepaard gaat is

$$\frac{ds}{dt} = \frac{m'}{V} = 2 \cdot \frac{A}{V} \cdot (c_s - c) \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c}} \quad \text{g/m}^3 \cdot \text{s} \quad (12)$$

Daar t_c vaak onbekend is, maar toch mag worden aangenomen, dat t_c bij gelijkblijvende beluchtingsintensiteit een bepaalde constante waarde aanneemt, kan een zuurstofoverdrachtscoëfficiënt k_L worden gedefinieerd:

$$k_L = 2 \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c}} \quad \text{m/s} \quad (13)$$

Uit soortgelijke overwegingen m.b.t. het specifieke grensvlak A/V volgt een beluchtingsconstante k

$$k = k_L \cdot \frac{A}{V} = 2 \cdot \frac{A}{V} \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c}} \quad \text{s}^{-1} \quad (14)$$

en met vergl. (12) wordt dan

$$\frac{dc}{dt} = k \cdot (c_s - c) \quad \text{g/m}^3 \cdot \text{s} \quad (15)$$

en na integratie met c_0 als zuurstofgehalte op het tijdstip $t = 0$

$$\frac{c_s - c}{c_s - c_0} = e^{-k \cdot t} \quad (16)$$

De beluchtingsconstante k kan d.m.v. beluchtingproeven en toepassing van verg. (16) worden bepaald. Anderzijds kan m.b.v. verg. (14) worden nagegaan, welke factoren de beluchtingsconstante en daarmee de snelheid van zuurstofoverdracht beïnvloeden:

— de temperatuur; D , t_c en in geringe mate ook A zijn een functie van de temperatuur;

— de oppervlakte-actieve stoffen beïnvloeden t_c , A en in geringe mate D .

Met stijgende temperatuur neemt de diffusiecoëfficiënt D toe. Ook mag worden verwacht, dat de gemiddelde existentiële tijd t_c van de grensvlakken daalt naarmate de temperatuur oploopt. Dit houdt verband met de temperatuursafhankelijkheid van de viscositeit van het water. Tenslotte verlaagt een temperatuurstoename de oppervlaktespanning van het water in geringe mate, met als gevolg dat bij bellenbeluchting iets kleinere bellen ontstaan en het totale grensvlak A wordt vergroot. Voornoemde mechanismen doen de beluchtingsconstante met stijgende temperatuur toenemen. Het meest gebruikelijk model ter beschrijving van deze toename is gebaseerd op een vereenvoudiging van de wet van Arrhenius, welke de invloed van de temperatuur op reactiecoëfficiënten in algemene vorm kwantificeert. De toegepaste vereenvoudiging luidt

$$k_T = k_R \cdot \Theta^{T - T_R} \quad (17)$$

Wordt er van uitgegaan, dat t_c evenredig met de kinematische viscositeit ν (m^2/s) verandert, dan kan de invloed van de temperatuur op k_L via het dimensieloze kengetal (Schmidt getal) $1/S_c = D/\nu$ worden bepaald. Met behulp van de wet van Nernst-Einstein ($D \cdot \mu/\tau = \text{constant}$) kan een temperatuurcoëfficiënt Θ_D voor de diffusie worden berekend; de kinematische viscositeit heeft een temperatuurcoëfficiënt van $\Theta_\nu = 0,974$. Uit deze overweging volgt

$$\frac{k_T}{k_R} = \Theta^{T - T_R} = \left[\frac{\Theta_D}{\Theta_\nu} \right]^{0,5 \cdot (T - T_R)} \quad (18)$$

Met vergelijking (18) wordt voor het temperatuurtraject 0 tot 10°C een waarde van $\Theta = 1,031$, voor 10 tot 20°C $\Theta = 1,028$ en voor 20 tot 30°C $\Theta = 1,027$ gevonden. De geringe invloed van de temperatuur op

het specifieke grensvlak kan iets hogere Θ -waarden voor de beluchtingsconstante k veroorzaken. Proefondervindelijk vastgesteld temperatuurcoëfficiënten voor de k liggen tussen $1,016$ en $1,047$, terwijl in Nederland meestal een door Pasveer (op grond van in 1920 door Adeney en Becker gepubliceerde resultaten) berekende waarde van $1,019$ wordt aangehouden en in de VS $1,024$ gebruikelijk is.

De Arrhenius vergelijking kan ook tot een lineair model worden vereenvoudigd:

$$\frac{k_T}{k_R} = 1 + f_R \cdot (T - T_R) \quad (19)$$

De temperatuurcoëfficiënt f_R ($^\circ\text{C}^{-1}$) is afhankelijk van de gekozen referentietemperatuur T_R . Tussen beide temperatuurcoëfficiënten bestaat de relatie

$$\Theta = [1 + f_R \cdot (T - T_R)]^{1/(T - T_R)} \quad (20)$$

Bij de referentietemperatuur geldt met goede benadering

$$\Theta_R = 1 + f_R \quad (21)$$

Volgens vergelijking 20 is Θ een functie van T en T_R . Bij de Arrhenius-vergelijking is dit ook het geval: een verhoging van T en/of T_R doet Θ afnemen. De bij vergelijking (17) toegepaste vereenvoudiging verwaarloost beide invloeden op Θ , terwijl bij vergelijking (19) de invloed van T op f_R vervalt, degene van T_R op f_R wordt overdreven.

Voor puntbeluchters werden f_{10} -waarden ($T_R = 10^\circ\text{C}$) van $0,025$ en $0,032$ op grond van metingen over een breed temperatuurtraject (3 tot 40°C) gevonden [1, 2].

De tweede belangrijke invloed op de beluchtingsconstante wordt door oppervlakte-actieve stoffen, in het bijzonder door detergents uitgeoefend. Deze stoffen zijn steeds in het afvalwater aanwezig. Ten eerste verlagen deze in belangrijke mate de oppervlaktespanning van het water en vergroten het grensvlak A en daarmee de beluchtingsconstante k . Ten tweede accumuleren deze stoffen aan het grensvlak en kunnen daar de diffusie van zuurstof in het water belemmeren. Voorts worden de hydrodynamische eigenschappen van het grensvlak veranderd met als gevolg een verlenging van de gemiddelde existentiële tijd t_c . Deze mechanismen doen de beluchtingsconstante k afnemen. Het uiteindelijke effect van oppervlakte-actieve stoffen op k hangt derhalve ervan af, welk mechanisme bij een bepaald beluchtingssysteem een overheersende rol speelt.

Uit de praktijk blijkt, dat de nadelige invloeden op de beluchtingsconstante bij bellenbeluchting overheersen, en wel in toenemende betekenis naarmate de bellen kleiner zijn, en voorts, dat positieve en

negatieve invloeden elkaar bij de mechanische beluchting ongeveer opheffen. Soms zijn zelfs de positieve overheersend.

De ondervindingen betreffende de invloed van het actief-slib op de beluchtingsconstante k zijn controversieel. Enerzijds wordt geen noemenswaardige invloed op k door drogestofgehaltes tussen 0,3 en 6 kg/m³ geconstateerd [3], anderzijds wordt een dergelijke invloed zelfs gekwantificeerd en zouden bovenvermelde drogestofgehaltes aanleiding geven tot een reductie van k van resp. 7 en 53 % [4].

In de praktijk wordt de invloed van oppervlakte-actieve stoffen en van het actief slib op de snelheid van zuurstofinbreng door een faktor α tot uitdrukking gebracht. De faktor α geeft aan in welke mate de in schoonwater gemeten snelheid van zuurstoftoevoer door deze stoffen worden teruggebracht:

k (actief slibproces) = $\alpha \cdot k$ (schoon water)

Veelal worden de volgende waarden van α voor de verschillende beluchtingssystemen aangehouden:

beluchting d.m.v. fijne bellen	$\alpha = 0,7$
beluchting d.m.v. middelgrote bellen	$\alpha = 0,8$
beluchting d.m.v. grote bellen	$\alpha = 0,8$
beluchting d.m.v. rotoren	$\alpha = 0,9$
beluchting d.m.v. puntbeluchters	$\alpha = 0,9$

Experimenteel gevonden waarden van α variëren tussen 0,2 (fijne bellen) en 1,9 (rotoren).

2.3. Het zuurstoftoevoervermogen

In plaats van de beluchtingsconstante k (of $k_L \cdot A/V$) wordt dikwijls het zuurstoftoevoervermogen OC (= oxygenation capacity) als parameter voor de snelheid van zuurstofoverdracht toegepast. De OC is gedefinieerd als de toenamesnelheid van het zuurstofgehalte (dc/dt) bij een concentratie van $c = 0$, een temperatuur van $T = 10^\circ\text{C}$ en een normale luchtdruk van $P = 101,3$ kPa.

Uit vergelijking (15) volgt derhalve

$$OC = k_{10} \cdot c'_s \text{ g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{s} \quad (21)$$

met $c'_s = 11,3$ g O₂/m³, zijnde de verzadigingsconcentratie bij voornoemde condities. Oppervlakte-actieve stoffen hebben op de OC dezelfde invloed die deze op de beluchtingsconstante k uitoefenen. De temperatuurinvloed op de OC is echter uiterst gering, daar k met stijgende temperatuur toeneemt, c_s daarentegen daalt. Kwantitatief volgt deze geringe invloed uit

$$\frac{OC_T}{OC} = \frac{k_T/k_{10}}{c'_s/c_s} = \frac{1 + f_{10} \cdot (T - 10)}{1 + 0,0234 (T - 10)} \quad (22)$$

De teller van vergelijking (22) komt met vergelijking (19) overeen, terwijl de noemer uit vergelijking (1) is afgeleid.

3. Praktische aspecten van zuurstofoverdracht

Uit de voorgaande besprekingen van de theoretische aspecten, met name uit vergelijking (12),

$$\frac{dc}{dt} = 2 \cdot \frac{A}{V} \cdot (c_s - c) \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_c}} \text{ g/m}^3 \cdot \text{s} \quad (12)$$

is duidelijk, dat vier parameters de snelheid van zuurstofoverdracht bepalen:

1. de snelheid van diffusie van zuurstof in de bovenlaagjes van het grensvlak, gekenmerkt door de diffusiecoëfficiënt D ;
2. de gemiddelde existentietijd (t_c) van het grensvlak, of de snelheid van verversing van het grensvlak ($1/t_c$);
3. de 'drijvende kracht', d.w.z. het verschil tussen verzadigingsconcentratie en zuurstofgehalte van het water: $(c_s - c)$;
4. de grootte van het grensvlak A tussen water en lucht per volume-eenheid van water: het specifieke grensvlak A/V .

Door ontwerp en bedrijfsvoering van beluchtingsprocessen kan slechts op enkele van deze factoren invloed worden uitgeoefend:

1. Op de diffusiecoëfficiënt kan door externe maatregelen (behalve temperatuurveranderingen) niet worden ingegrepen.
2. Ook de verversingssnelheid van het grensvlak ($1/t_c$) wordt door technische maatregelen nauwelijks beïnvloed. Bij bellenbeluchting hangt deze van de bellengroote (d_B) en de daarbij behorende stijgsnelheid ($v_s = 0,2$ à $0,3$ m/s) af ($t_c = d_B/v_s$). Dientengevolge is t_c bij kleine bellen omstreeks 1/100 seconde en neemt tot ongeveer 5/100 seconden toe bij grote bellen. Bij mechanische beluchting zal de existentietijd in de directe omgeving van de beluchter korter zijn dan 1/100 seconde, terwijl t_c van ingeslagen luchtbellen weer door de bellengroote d_B wordt bepaald. Het grensvlak van in de lucht verspreid water wordt niet ververs. t_c hangt derhalve van de gemiddelde opvoerhoogte h (m) van de beluchter af ($t_c = \sqrt{2h/g}$) en zal tussen 0,2 en 0,5 s liggen. Dit zijn zeer lange existentietijden en aan de snelheid van zuurstofoverdracht bij het verspreide water mogen dan ook geen hoge verwachtingen worden gesteld.

3. De grootste invloed op de snelheid van zuurstofoverdracht kan via het specifieke grensvlak worden uitgeoefend. Hierop wordt in de volgende hoofdstukken dieper ingegaan. Samenvattend kan worden gesteld, dat de grootte van het grensvlak
 - a. bij bellenbeluchting door het luchtdebiet, door de bellengroote en door de inblaasdiepte en

- b. bij mechanische beluchting (rotoren en puntbeluchters) door de grootte, de indompeldiepte en het toerental van de beluchter wordt bepaald.

Bij beide systemen hebben ook de vorm van de aeratietank en het daarin opgewekte stromingspatroon een belangrijke invloed op het grensvlak.

4. T.b.v. een zo groot mogelijke snelheid van zuurstofoverdracht moet de drijvende kracht $(c_s - c)$ zo groot mogelijk worden gehouden. Dit kan worden verwezenlijkt
 - a. door het zuurstofgehalte in het beluchtingsbassin c zeer laag te houden (1 à 2 g/m³);
 - b. door de verzadigingsconcentratie c_s te verhogen. Dit kan door toepassing van zuivere zuurstof of extreem grote inblaasdieptes worden gerealiseerd.

Naast de snelheid van zuurstofoverdracht is de voor de zuurstofinbreng benodigde energie van grote praktische betekenis. De te besteden bruto energie kan in principe in de volgende 3 soorten van verbruik worden onderverdeeld:

- rendementen van motoren, compressoren, tandwielkasten, etc. en wrijvingsverliezen in het gehele luchtverdelingssysteem. Dit gedeelte kan niet nuttig voor het actief-slibproces worden besteed;
- de voor de zuurstofoverdracht benodigde energie. Een deel hiervan wordt verbruikt om of lucht in het water of water in de lucht te brengen (potentiële energie). Het tweede gedeelte wordt voor het verdelen van de ingebrachte massa's in kleine bellen of druppels ter vergroting van het grensvlak verbruikt;
- de voor het in stand houden van turbulentie (stromingssnelheden) in de beluchtingstank vereiste energie. De turbulentie moet de aan het grensvlak opgenomen zuurstof aan het gehele watervolume overbrengen en het bezinken van actief-slib voorkomen.

De turbulentie wordt in het algemeen door de beluchting opgewekt. Ten behoeve van een zo laag mogelijk energieverbruik voor de zuurstofoverdracht moet echter een stromingspatroon worden geschapen, dat de in het water gebrachte lucht zo lang mogelijk daarin doet verblijven.

3.1. Bellenbeluchting

De systemen van bellenbeluchting kunnen worden onderscheiden naar de vereiste luchtdruk, welke voornamelijk door de inblaasdiepte wordt bepaald en naar de grootte van de geproduceerde bellen, die van de grootte van de openingen van de diffusoren en ook van het luchtdebiet af-

hangt. Het eerste criterium maakt een onderverdeling mogelijk in:

- systemen met relatief hoge druk (inblaasdiepte 2,5 tot 5 m, afb. 2);
- systemen met relatief lage druk (inblaasdiepte 0,8 m, Inkabeluchting, afb. 3);

en het tweede criterium in:

- systemen met fijne bellen (2 à 6 mm diameter), die d.m.v. keramische filterbuizen, schuimplastiek en golfplaatstaalbuizen met daar omheen gewikkeld kunststofdraad met effectieve openingen van hoogstens 0,1 mm doorsnede, tot stand worden gebracht;

- systemen met middelgrote bellen (6 à 15 mm doorsnede, die d.m.v. openingen van 2 à 5 mm doorsnede in geperforeerde buizen of platen of d.m.v. kruisgewijze op een verdeelbuis opgezette buisstukjes (Sparger) worden geproduceerd;

- systemen met grote bellen (> 15 mm), die d.m.v. loodrecht geplaatste buizen of geperforeerde horizontale buizen of platen met openingen van 5 à 25 mm ontstaan. Systemen met middelgrote en grote bellen worden ondanks het kleinere bereikbare lucht-water-grensvlak toegepast, indien voor verstoppingen aan de lucht- en/of waterzijde van diffusoren met kleine openingen gevreesd moet worden.

Het specifieke grensvlak A/V is afhankelijk van het luchtdebiet G ($= Q_g/V$; m^3/s lucht per m^3 water), de inblaasdiepte d_i (m) en de grootte van de bellen. A/V kan m.b.v. de volgende benadering worden geschat. Wordt het ingeblazen luchtdebiet G in bolvormige bellen met een diameter van d_B (m) verdeeld, dan worden

$$v_A = 6 \cdot G/d_B \quad m^2/m^3 \cdot s \quad (22)$$

m^2 grensvlak per m^3 water en per seconde gevormd. Het aanwezige specifieke grensvlak A/V wordt door de snelheid van grensvlakvorming v_A en de gemiddelde verblijftijd t_A (s) van de bellen in het water bepaald:

$$A/V = v_A \cdot t_A \quad s \quad (23)$$

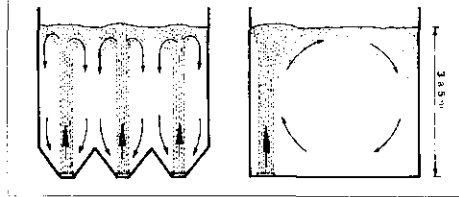
t_A is afhankelijk van de inblaasdiepte d_i en de snelheid v_v waarmee de bellen in het beluchtingsbassin opstijgen. v_v heeft twee componenten: de stijgsnelheid van de bellen v_s (0,2 à 0,3 m/s) en het vertikaal gerichte aandeel van de stromingssnelheid van het water v_w in de omgeving van de bel.

Hieruit volgt voor t_A

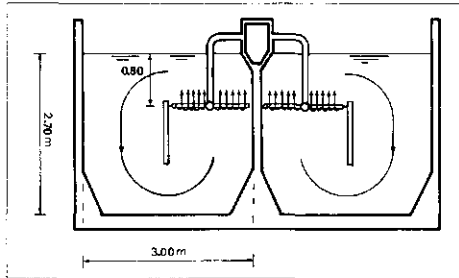
$$t_A = \frac{d_i}{v_v} = \frac{d_i}{v_s + v_w} \quad s \quad (24)$$

Samengevat is dan

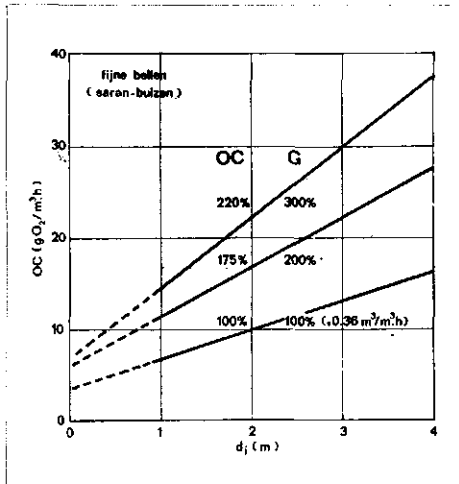
$$A/V = \frac{6 \cdot G \cdot d_i}{(v_s + v_w) \cdot d_B} \quad m^2/m^3 \quad (25)$$



Afb. 2 - Beluchting d.m.v. fijne bellen bij relatief hoge druk.



Afb. 3 - Beluchting d.m.v. middelgrote bellen bij relatief lage druk (Inkabeluchting).



Afb. 4 - De invloed van het luchtdebiet G en de inblaasdiepte d_i op de OC [8].

A/V en derhalve ook de OC nemen evenredig met de inblaasdiepte d_i toe (afb. 4). Een lineair verband tussen A/V of OC en het luchtdebiet G mag echter niet worden verwacht. Een verhoging G doet de belgrootte d_B bij de vorming en t.g.v. smensmelten van bellen toenemen en vergroot de stijgsnelheid van de bellen v_B en vooral de opwaarts gerichte watersnelheid v_w . Dit laatste effect is bijzonder sterk in een

TABEL I - Richtlijnen voor bellenbeluchting.

systeem	leidingwater		afvalwater	
	$g \text{ O}_2/m^3 \cdot m$	$kg \text{ O}_2/kWh$	$g \text{ O}_2/m^3 \cdot m$	$kg \text{ O}_2/kWh$
<i>hoge druk</i>				
fijne bellen	10—13	1,7—2,9	7 —10	1,2—2,0
middelgrote bellen	6— 8	1,1—1,7	4,5— 6	0,8—1,4
grote bellen	5— 7,5	0,9—1,6	4 — 6	0,7—1,3
<i>lage druk</i>				
middelgrote bellen	8—10	1,5—1,8	6,5— 8	1,2—1,5

aeratie-tank met spiraalvormige waterbeweging. Ter illustratie van deze bevindingen kan uit afb. 4 worden geconcludeerd, dat een verdubbeling van G de OC met een factor van 1,75 doet toenemen; een verdrievoudiging van G verhoogt de OC slechts met een factor van 2,2.

De invloed van het luchtdebiet op de bellegrootte d_B hangt voornamelijk af van de openingen en de constructie van de diffusoren, terwijl deze invloed op de opwaarts gerichte watersnelheid v_w door de rangschikking van de beluchtingselementen in het beluchtingsbassin en de grootte en vorm van de tank wordt bepaald. Hoewel deze invloeden tot op zekere hoogte empirisch kunnen worden gekwantificeerd, wordt m.b.t. de snelheid van zuurstofoverdracht in de praktijk veelal gebruik gemaakt van empirische richtgetallen. Deze zijn voor de verscheidene systemen van bellenbeluchting in tabel I samengevat. In plaats van de OC is de zuurstofopname Z ($g \text{ O}_2$ -opname per m^3 ingeblazen lucht per m inblaasdiepte) vermeld: $Z = OC/G \cdot d_i$.

In een beluchtingsbassin met spiraalachtige waterbeweging bedraagt de opwaarts gerichte stromingssnelheid v_w ongeveer het twee- tot drievoudige van v_s . Een reductie van v_w tot zeer lage waarden zou volgens vergelijking (25) het specifieke grensvlak A/V en de OC met een factor van 3 à 4 kunnen opvoeren. De ter voorkoming van slabafzettingen benodigde turbulentie moet dan door een horizontaal gerichte stroming in een circuit worden geschapen. Enkele nieuwere ontwikkelingen van de bellenbeluchting berusten op dit principe. Bij de 'tegenstroombeluchting' wordt een horizontale stroming m.b.v. een met stuwschotten uitgeruste roterende brug verkregen (afb. 5).

De beluchting m.b.v. straaldiffusoren berust op het bekende ejectorprincipe (afb. 6). De bij de diffusor behorende dompelpomp brengt de horizontale stroming tot stand, terwijl de ingeblazen lucht d.m.v. de ge-ejecteerde waterstraal in fijne bellen wordt verdeeld.

Ook de waterstraalbeluchting (afb. 7) moet als bellenbeluchting worden beschouwd. Met behulp van een propellerpomp worden via een straalpijp waterstralen

in het beluchtingsbassin gespoten. De waterstralen sleuren lucht mee in het water in de vorm van fijne bellen en wekken tevens de benodigde horizontale circulatiesnelheid op. Tenslotte schijnt de in de waterleidingwereld bekende putbeluchting zijn ingang bij het actief-slibproces te vinden.

Het afvalwater wordt d.m.v. inpersen van lucht in een diepe put gerecirculeerd (afb. 8). Daartoe is de ronde put in een binnenput (downcomer) en een buitenring (riser) gescheiden. De neerwaarts gerichte stroming v_w bewerkstelligt een groot grensvlak A/V en de druktoename doet de verzadigingsconcentratie sterk toenemen. Beide mechanismen brengen een hoge OC tot stand. De in de buitenring ingeblazen lucht en vooral de waterkolom van de binnenput zorgen voor voldoende recirculatie. ICI denkt aan putdieptes van 100 à 300 m.

Het energieverbruik bij de bellenbeluchting wordt bepaald door het rendement van de compressor en de elektromotor van samen ca. 60 %, door de drukverliezen ΔP in de luchtfilters, de verdelingsleidingen en de diffusoren, alsmede door de tegendruk van het water in het beluchtingsbassin P_w . Deze is afhankelijk van de inblaasdiepte en bedraagt

$$P_w = d_i \cdot \rho \cdot g / 10^3 \text{ kPa} \quad (26)$$

Daar de drukverliezen bij diepliggende beluchting ongeveer 10 % van de tegendruk van het water uitmaken, wordt bij het inbrengen van lucht in water slechts een totaal rendement van $\eta \approx 50 \%$ verkregen. Bij de hoogliggende Inka-beluchting kunnen ventilatoren met een hoger rendement worden toegepast en het nuttig bestede aandeel van de bruto energie bedraagt dan $\eta \approx 65 \%$. De energie die voor het verdelen van de ingeblazen lucht in bellen moet worden opgebracht is uiterst gering, ook bij fijne bellen, en kan t.o.v. de overige genoemde energieën worden verwaarloosd. Bij een totaal rendement van η is het benodigde vermogen ϵ per m³ watervolume

$$\epsilon = G \cdot d_i \cdot \rho \cdot g / \eta \text{ W/m}^3 \quad (27)$$

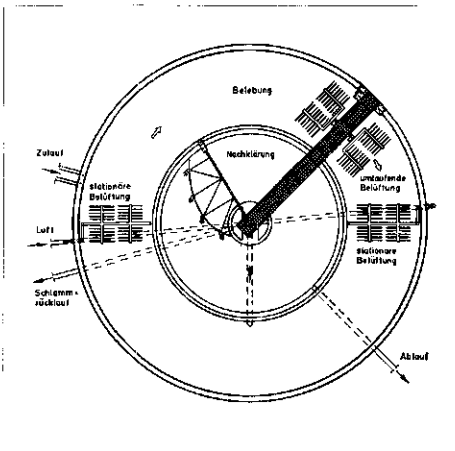
Met behulp van vergelijking (27) kan worden berekend, dat voor het inblazen van 1 m³/h lucht per m³ water ($G = 1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^3 = 1/3600 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^3$) op een diepte van $d_i = 1 \text{ m}$ bij $\eta = 50 \%$ een vermogensinbreng van $\epsilon = 5,5 \text{ W/m}^3$ en bij $\eta = 65 \%$ van $\epsilon = 4,2 \text{ W/m}^3$ vereist is.

De zuurstofopbrengst $ZO = OC/\epsilon$ ($g \text{ O}_2/\text{J}$) kan m.b.v. de vergelijkingen (14), (21) en (27) worden geschat:

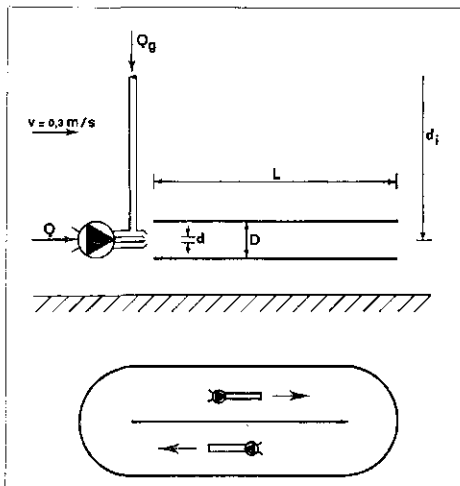
$$\frac{OC}{\epsilon} = \frac{k_L \cdot c'_s \cdot A \cdot \eta}{\rho \cdot g \cdot V \cdot G \cdot d_i} \text{ g/J} \quad (28)$$

Wordt het specifieke grensvlak A/V hierin door vergelijking (25) vervangen, dan geldt

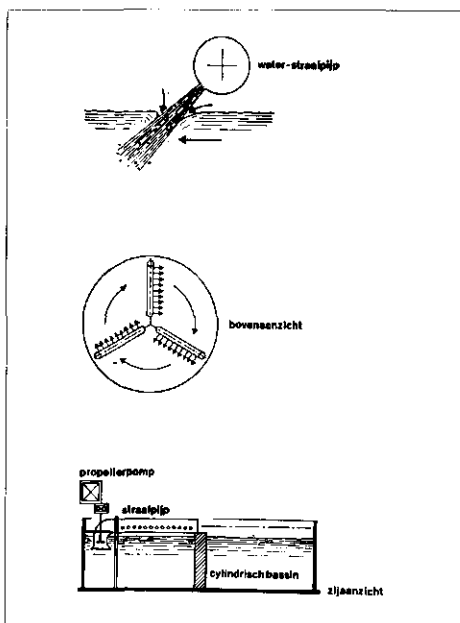
$$\frac{OC}{\epsilon} = \frac{6 \cdot k_L \cdot c'_s \cdot \eta}{\rho \cdot g \cdot (v_s + v_w) \cdot d_B} \text{ g/J} \quad (29)$$



Afb. 5 - Tegenstroombeluchting [9].



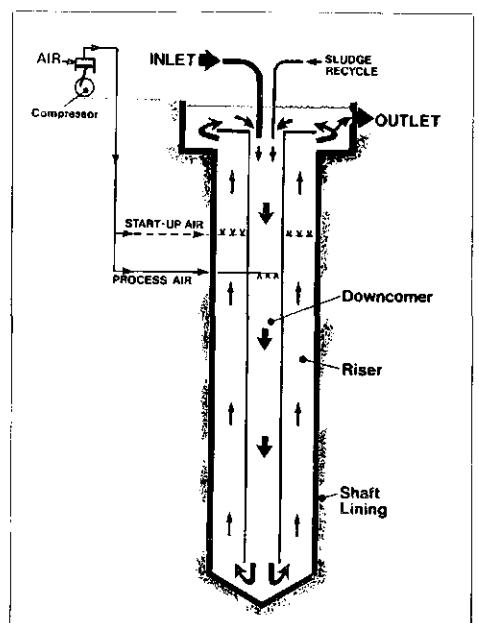
Afb. 6 - Straaldiffusor.



Afb. 7 - Praktijkuitvoering waterstraalbeluchting [10].

In eerste instantie is de zuurstofopbrengst onafhankelijk van de inblaasdiepte en blijkbaar ook van het luchtdebiet G . Een toename van G doet echter de opwaarts gerichte watersnelheid v_w en de belgrootte d_B verhogen en het rendement via het drukverlies verlagen met als gevolg een afname van de zuurstofopbrengst. De omvang van deze verlaging hangt zoals bij de OC af van het type en de rangschikking van de diffusoren, de grootte en vorm van het beluchtingsbassin en het daarin opgewekte stromingspatroon. Een nauwkeurige berekening van de zuurstofopbrengst is derhalve niet mogelijk. De in de praktijk te bereiken waarden zijn in de vorm van richtgetallen in tabel I samengesteld.

Zoals reeds vermeld, zou een aanzienlijke verbetering van de zuurstofoverdracht en de zuurstofopbrengst kunnen worden verkregen indien de opwaarts gerichte watersnelheid v_w wordt verlaagd. De omvang van de te verwachten verhoging van de zuurstofopbrengst hangt uiteraard ervan af, hoeveel energie voor het opwekken van een horizontale stroming bij de besproken systemen benodigd wordt. Bij tegenstroombeluchting zijn waarden van 3,0 tot 3,6 kg O₂/kWh in afvalwater bepaald en de verbetering t.o.v. konventionele beluchting met fijne bellen bedraagt ruim 50 %. Van de beluchting m.b.v. straaldiffusoren wordt een zuurstofopbrengst van 1,8 tot 3 kg O₂/kWh verwacht, terwijl de waterstraalbeluchting t.o.v. fijne bellen geen verbetering oplevert. ICI meent met de 'deep-shaft' 6 kg O₂/kWh te kunnen bereiken. Daar d.m.v. putbeluchting van grondwater bij een putdiepte van 20 m waarden tot 6,5 kg O₂/kWh geconstateerd



Afb. 8 - ICI Deep Shaft Unit [11, 12].

werden, lijkt de verwachte zuurstofopbrengst haalbaar te zijn.

3.2. Mechanische beluchting

De mechanische beluchters kunnen in twee groepen worden onderverdeeld:

1. Rotoren met 0,5 tot 1,0 m doorsnede en 2,5 tot 9,0 m lengte, draaiende om een horizontale as. Bij de klassieke uitvoering worden rotoren aan één zijkant van een langwerpige tank met ronde of vierhoekige doorsnede geplaatst (afb. 9), waarin een roterende beweging van het water wordt opgewekt. Tegenwoordig worden rotoren voornamelijk in een circuitachtige tank toegepast, waarin een stroming loodrecht op de rotoras wordt geïnduceerd (afb. 10).

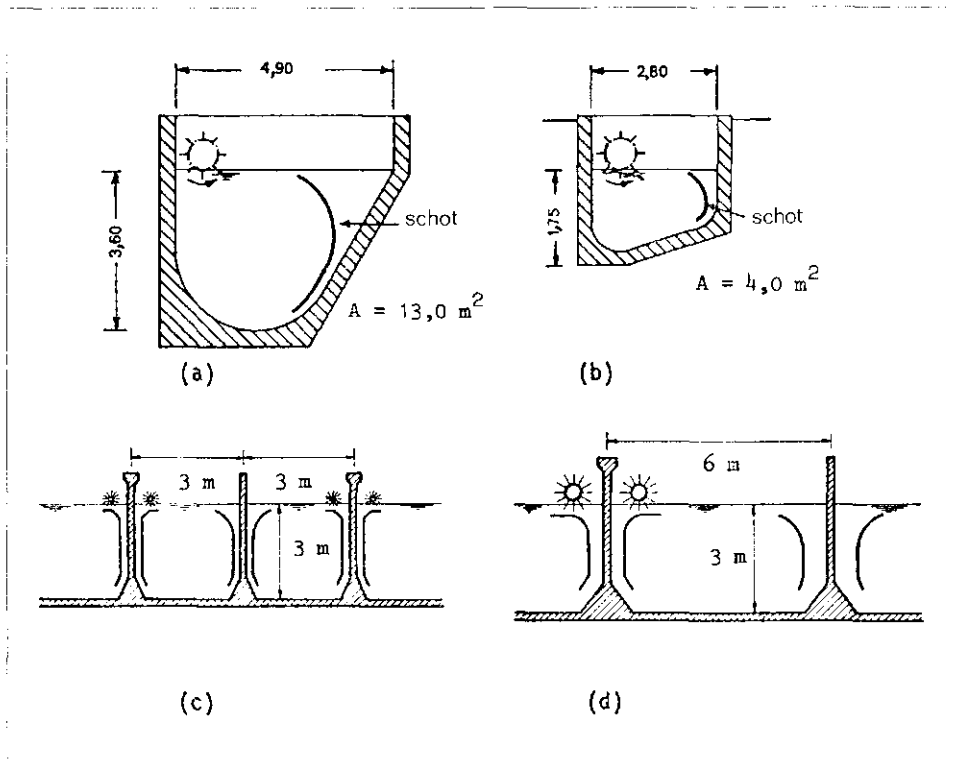
2. Puntbeluchters met 0,5 tot 4 m diameter, draaiende om een verticale as. Puntbeluchters worden in bassins met een ronde of vierkante plattegrond toegepast waarin een langzame horizontale rotatie en een intensieve opwaartse stroming van het water in het tank-centrum, gepaard met een neerwaartse stroming aan de tankrand, wordt opgewekt (afb. 11). Een horizontale stroming wordt door plaatsing van puntbeluchters in een circuitachtige tank (carrousel) verkregen. Daarin wordt de door de beluchter opgewekte opvoerhoogte en horizontale rotatie omgezet in een langsstroming (afb. 12). Op de verschillende konstrukties van rotoren en puntbeluchters wordt in dit verband niet nader ingegaan.

Bij de mechanische beluchting wordt de grootte van het grensvlak A en diens gevolgde snelheid van zuurstofopname door een aantal mechanismen beïnvloed:

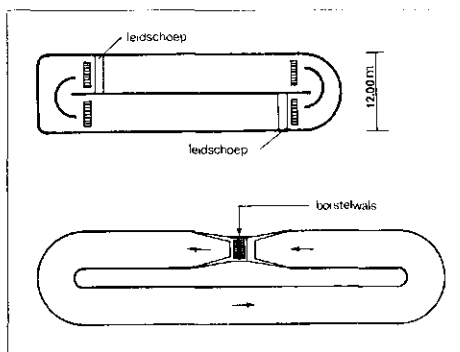
- door de tanden of schoepen van de beluchter wordt het wateroppervlak steeds opnieuw opengescheurd en lucht in de watermassa geslagen;
- door de centrifugale werking van de beluchter worden waterfilms en druppels vlak boven de waterspiegel door de lucht weggeslingerd;
- bij het indompelen van de versproeiende watermassa's in het bassin wordt lucht in het water meegesleurd;
- het door de beluchter opgewekte stromingspatroon in de aeratietank heeft een intensieve beweging en verversing van het wateroppervlak en een lange verblijftijd van de ingeslagen lucht in het water in de vorm van bellen tot gevolg.

De intensiteit van deze effecten is afhankelijk van:

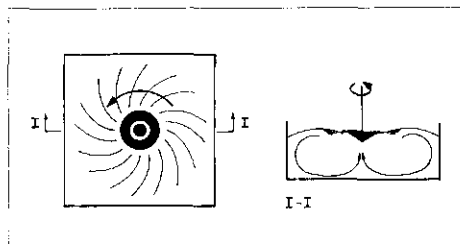
- de grootte van de beluchter: het zuurstoftoevoervermogen is ongeveer evenredig aan het kwadraat van de diameter van de beluchter;



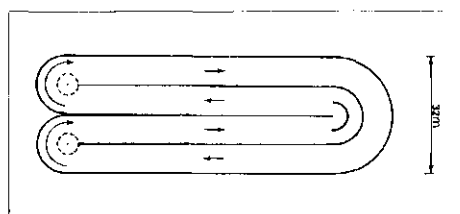
Afb. 9 - Doorsnede van beluchtingsbassins met rotoren.



Afb. 10 - Beluchtingscircuits met rotoren.



Afb. 11 - Stromingspatroon opgewekt door een puntbeluchter.



Afb. 12 - Beluchtingscircuit met puntbeluchters (carrousel).

— de omtreksnelheid van de beluchter v_0 (m/s). Deze varieert bij rotoren tussen 2,5 en 4 m/s en bij puntbeluchters tussen 3 en 6 m/s. De OC is evenredig aan de omtreksnelheid tot de macht 2,5 à 3,0;

— de indompeldiepte van de beluchter in het water. Bij rotoren kan de indompeldiepte tot ongeveer 30 % van de diameter worden opgevoerd, bij puntbeluchters tot ca. 10 %. De OC is ongeveer evenredig aan de indompeldiepte;

— de stroomsnelheid van het water in de tank. De opwaarts gerichte stroomsnelheid onder de beluchter geeft een indicatie van de hoeveelheid water, die door de beluchter wordt verspreid, terwijl de neerwaartse snelheid aan de buitenkant van de tank de verblijftijd van de ingeslagen lucht-bellen in het water bepaalt.

Voor een platenrotor met 0,5 m doorsnede werd bijv. onder praktijkcondities bij $v_0 = 3,1$ m/s het volgende verband tussen het zuurstoftoevoervermogen per m rotorlengte en de indompeldiepte gevonden [5, 6]:

$$OC_1 = -0,25 + 13,7 \cdot d_i \text{ kg O}_2/\text{m} \cdot \text{h} \quad (30)$$

De OC van puntbeluchters kan dikwijls m.b.t. het volgende model worden beschreven:

$$OC = k_1 (1 + k_2 \cdot d_i) \cdot d_m^2 \cdot v_0^3 \text{ kg O}_2/\text{h} \quad (31)$$

Daarbij wordt de indompeldiepte d_i d.m.v. de afstand tussen de waterspiegel en de bovenkant van de puntbeluchter vastgelegd. Voor een puntbeluchter met een diameter

van $d_m = 2,0$ m werden bijv. in een beluchtingsbassin van 1200 m³ de constanten $k_1 = 0,1$ en $k_2 = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ bepaald [7]. Behalve voornoemde factoren hebben de tankvorm, het daarin opgewekte stromingspatroon en de grootte van de beluchter ten opzichte van het tankvolume een belangrijke invloed op de OC. Wordt bijv. een relatief grote puntbeluchter in een relatief kleine tank geplaatst, dan is de horizontale afstand, die de ingeslagen luchtbellens moeten afleggen voordat deze door de stroming aan de buitenwand neerwaarts worden gebracht, zeer kort. Weinig bellens zullen op deze weg het water kunnen verlaten en het bellengrensvlak is dientengevolge relatief groot.

Het totale specifieke grensvlak A/V kan ten gevolge van de veelvuldige grensvlakscheppende mechanismen niet met aanvaardbare nauwkeurigheid worden gekwantificeerd. Dit geldt vooral voor het (bellens-) grensvlak onder de waterspiegel. Met betrekking tot het versproeide water kan het specifieke grensvlak en de OC in een beluchtingsbassin met V (m³) water worden bepaald uitgaande van een pompcapaciteit van de mechanische beluchter van Q (m³/s), van een gemiddelde sproeihoogte h (m) en een gemiddelde grootte d_d van bolvormige druppels:

$$OC \approx 6,9 \frac{Q \cdot h^{0,25}}{V \cdot d_d} \text{ g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h} \quad (32)$$

Deze bijdrage tot de OC van een mechanische beluchter is bijzonder gering, omdat het grensvlak van het versproeide water niet wordt ververst en relatief lange existentietijden t_c (0,2 tot 0,5 s) worden verkregen. Andere mechanismen dan verspoeien dragen dus voornamelijk tot het zuurstoftoevoervermogen van mechanische beluchters bij.

Het energieverbruik van een mechanische beluchter neemt ongeveer evenredig aan de indompeldiepte en evenredig aan het kwadraat van de diameter en de omtreksnelheid toe. Grote omtreksnelheden zijn derhalve gunstig voor de zuurstofopbrengst (kg O₂/kWh) maar kunnen een nadelig effect op de turbulentie van het water in de tank hebben, vooral indien het oppervlakte-actieve stoffen bevat.

De zuurstofopbrengst (kg O₂/kWh) van de mechanische beluchting komt onder praktijkcondities ongeveer met die van de beluchting met fijne bellens overeen, hoewel oppervlakte-actieve stoffen een minder groot nadelig effect op de mechanische beluchting uitoefenen en bovendien het rendement met $\eta \approx 85\%$ (voor elektromotor en tandwielkast) aanzienlijk hoger is dan bij bellensbeluchting. Gaat men uit van α -waarden voor bellensbeluchting en mechanische beluchting van

Symbolen

A	m ²	grensvlak water - lucht
c	g O ₂ /m ³	zuurstofgehalte
c _s	g O ₂ /m ³	verzadigingsconcentratie in schoon water
c _s [*]	g O ₂ /m ³	verzadigingsconcentratie in (afval)water onder praktijkcondities
c _s [†]	g O ₂ /m ³	verzadigingsconcentratie in schoon water bij T=10°C (11,3 g/m ³)
D	m ² /s	diffusiecoëfficiënt
d _B	m	diameter van een bolvormige bel
d _d	m	diameter van een bolvormige druppel
d _i	m	indompel-, inblaasdiepte
d _m	m	diameter van een mechanische beluchter
f _l	°C ⁻¹	temperatuurcoëfficiënt van het lineaire model bij T _R
f ₁₀	°C ⁻¹	temperatuurcoëfficiënt van het lineaire model bij 10 °C
G	m ³ /h · m ³	luchtdebiet (m ³ lucht per uur per m ³ water)
h	m	gemiddelde opvoerhoogte van een mechanische beluchter
k	s ⁻¹ , h ⁻¹	beluchttingsconstante
k _l	m/s	zuurstofoverdrachtscoëfficiënt
k _R	s ⁻¹ , h ⁻¹	beluchttingsconstante bij referentietemperatuur T _R
k _T	s ⁻¹ , h ⁻¹	beluchttingsconstante bij T °C
k ₁₀	s ⁻¹ , h ⁻¹	beluchttingsconstante bij 10 °C
M	g O ₂	massa zuurstof
m	g O ₂ /s	momentele snelheid van zuurstofoverdracht
m'	g O ₂ /s	gemiddelde snelheid van zuurstofoverdracht
OC		zuurstoftoevoervermogen bij 10 °C
OC _T		zuurstoftoevoervermogen bij T °C
P	kPa	luchtdruk
p	kPa	partiële druk
P _T	kPa	totale druk
P _w	kPa	waterdruk
p _w	kPa	dampdruk
r	—	correlatiecoëfficiënt
t	s, h	tijd
T	°C	temperatuur
T _R	°C	referentietemperatuur
t _A	s	verblijftijd van bellens in water
t _c	s	existentietijd van een grensvlak
V	m ³	watervolume
v _A	m ² /s	snelheid van grensvlakkvorming
v _o	m/s	omtreksnelheid van een mechanische beluchter
v _s	m/s	stijgsnelheid van bellens in water
v _v	m/s	stijgsnelheid van bellens in een bassin (v _v = v _s + v _w)
v _w	m/s	vertikaal aandeel van de stromingssnelheid in een bassin
Z	g O ₂ /m ³ · m	zuurstofopname per m ³ lucht per m inblaasdiepte
ZO	kg O ₂ /kWh	zuurstofopbrengst
	g O ₂ /J	
η	—, %	elektrisch en mechanisch rendement van de beluchting
ε	W/m ³	vermogensinbreng in water
μ	Pa · s	dynamische viscositeit van water
ν	m ² /s	kinematische viscositeit van water
π _v	—, %	volumepercentage van zuurstof in lucht
ρ	kg/m ³	soortgelijke massa van water
τ	K	absolute temperatuur
Θ	—	temperatuurcoëfficiënt van het exponentiële model.

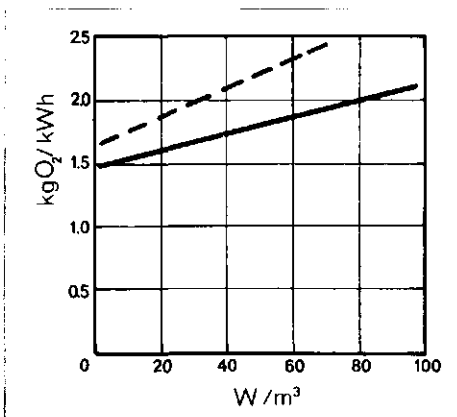
resp. 0,7 en 0,9 en van rendementen van 50 % en 85 %, dan zou de mechanische beluchting bij gelijke effectiviteit van zuurstofoverdracht slechts 0,7 · 0,5/0,9 · 0,85 = 45 % van de voor bellensbeluchting vereiste energie vragen en m.b.t. de zuurstofopbrengst zou het 2,2-voudige kunnen worden verwacht. Mechanische beluchting is derhalve m.b.t. energie-overdracht een efficiënt proces, m.b.t. zuurstofoverdracht daarentegen een inefficiënt proces. Voor bellensbeluchting geldt het omgekeerde.

Als oorzaak hiervan moet vooral het versproeien van water worden gezien,

hetgeen in geringe mate tot de zuurstofoverdracht bijdraagt maar veel energie vraagt. De zuurstofopbrengst ZO van alleen het versproeien bedraagt bij de voornoemde uitgangspunten slechts

$$ZO \approx \frac{7,1 \cdot 10^{-4}}{d_d \cdot h^{0,75}} \text{ kg O}_2/\text{kWh} \quad (33)$$

en zal onder praktijkcondities 0,3 kg O₂/kWh niet overschrijden. De reeds genoemde andere mechanismen van zuurstofoverdracht hebben een aanzienlijk hogere zuurstofopbrengst. In wezen berusten deze mechanismen op het inbrengen van



Afb. 13 - Invloed van het door een puntbeluchter per m³ ingebrachte vermogen (W/m^3) op de zuurstofopbrengst [7].

lucht in water door mechanische beluchting en de intensiteit ervan wordt voornamelijk door het per volume-eenheid ingebrachte vermogen ϵ (W/m^3) bepaald. Een verhoging van ϵ doet derhalve de zuurstofopbrengst in het algemeen toenemen. Afb. 13 verduidelijkt deze relatie voor twee verschillende puntbeluchters. De toename van de zuurstofopbrengst kan slechts dan worden verwacht, indien het toenemende vermogen de verticale circulatiesnelheid verhoogt en daardoor de verblijftijd van de ingeslagen luchtbelletjes in het water verlengt. Hierop hebben de tankvorm, het opgewekte stromingspatroon en de grootte van de beluchter t.o.v. het bassinvolume een belangrijke invloed.

De proefindervindelijk vastgestelde waarden van de zuurstofopbrengst van mechanische beluchters lopen uiteen van 1,2 tot 3,7 kg O₂/kWh, terwijl 1,8 à 2,0 kg O₂/kWh als richtwaarde wordt gehanteerd. Oppervlakte-actieve stoffen hebben nauwelijks een verlagende invloed op het zuurstof-toevoervermogen en de zuurstofopbrengst. Een toename van beide parameters na toevoeging van detergenten van 30 à 90 % is geconstateerd. De vermelde richtwaarden houden met dit gunstige effect geen rekening.

Aanzienlijke verbeteringen van de zuurstofopbrengst kunnen bij de mechanische beluchting waarschijnlijk niet worden verwacht. Indien verbeteringen mogelijk zijn, zouden deze door een vergroting van het grensvlak, dat de mechanische beluchter in het water schept, tot stand moeten worden gebracht. Het versproeien van water in de lucht vraagt t.o.v. de daardoor te verkrijgen zuurstofoverdracht te veel energie.

Literatuur

1. Bakker, K., Shuis, J. W. van: *De invloed van de temperatuur op de zuurstofoverdracht in schoon water bij puntbeluchting*, H₂O 8 (1975), blz. 537-542.

- Nenov, N.: *Techniques and pitfalls in measuring efficiencies of aeration equipment*, 77th National Meeting of AIChE, June 2-5, 1974, Pittsburg, Pa.
- Downing, A. L., Boon, A. G., Bayley, R. W.: *Aeration and biological oxidation in activated sludge process*, Journ. and Proc. Inst. Sew. Purif. (1962).
- Kroon, G. T. W. van der, Cortjens, G. H.: *Zuurstofoverdracht aan water en kunstmatige actief slib-watremengsels*, Water 50 (1966), blz. 266.
- Heeb, A., Rau, E.: *Betriebsergebnisse mit der neuen Schlammbelebungsanlage im Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen*, GWF 101 (1960), blz. 758.
- Pöpel, H. J.: *Aeration and gas transfer*, Collegedictaat, TH Delft, 1974.
- Emde, W. von der: *Belüftungssysteme und Beckenformen*, in: *Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie*, Band 5, 2. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München 1968.
- Bewtra, J. K., Nicholas, W. R.: *Oxygenation from Diffused Air in Aeration Tanks*, JWPCF (1964), blz. 1195.
- Triebel, W. (ed.): *Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik*, Band 2, 2e editie, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1975, blz. 488.
- Jennekens, H.: *Waterstraalbeluchting voor biologische zuiveringsinstallaties*, H₂O 8 (1975), blz. 479-482.
- Hiner, D. A., Bailey, M., Ousby, J. C., Roesler, F. C.: *The ICI Deep Shaft Aeration process for effluent treatment*, Conference of the Inst. of Chemical Engrs., 16/17 april 1975, New York.
- ICI information on the 'ICI Deep Shaft Process'.



Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland

Vergaderingen

- 9 maart 1977, 10.00 uur:
RIG 'Oost', Enschede.
- 9 maart 1977, 10.30 uur:
Contactorgaan Voorlichters Waterleidingbedrijven, WMN, Utrecht.
- 10 maart 1977, 10.00 uur:
RIG 'Zuid', Gemeentebedrijven, Eindhoven.
- 11 maart 1977, 10.30 uur:
Werkgroep Herziening AVWI, Gemeentewaterleidingen, Amsterdam.
- 17 maart 1977, 10.30 uur:
Commissie Voorlichting Waterleidingbedrijven, Holiday Inn, Utrecht.
- 23 maart 1977, 9.30 uur:
RIG 'West', VEWIN-kantoor.
- 24 maart 1977, 10.30 uur:
Dagelijks Bestuur VEWIN, VEWIN-kantoor.
- 24 maart 1977, 14.00 uur:
Bestuur VEWIN, VEWIN-kantoor.

- 25 maart 1977, 9.45 uur:
Commissie Leerprogramma Waterleidingstechniek, WMN, Utrecht.
- 29 maart 1977, 14.00 uur:
Orgaan van Overleg Inspectie Volksgezondheid - VEWIN, VEWIN-kantoor.
- 30 maart 1977, 14.00 uur:
Commissie Opleiding in de Waterleidingstechniek, WMN, Utrecht.
- 31 maart 1977, 10.00 uur:
Commissie voor de Examen in Waterleidingstechniek, VEWIN-kantoor.
- 7 april 1977, 10.15 uur:
College van Bedrijfsdirecteuren, VEWIN-kantoor.
- 14 april 1977, 9.00 uur:
Dagelijks Bestuur VEWIN, VEWIN-kantoor.
- 20 april 1977, 10.15 uur:
Raad van Advies voor de redactie van H₂O, RIZA, Lelystad.
- 12 mei 1977, 10.30 uur:
Dagelijks Bestuur VEWIN, VEWIN-kantoor.
- 12 mei 1977, 14.00 uur:
Bestuur VEWIN- VEWIN-kantoor.

Regenciifers

	Neerslag in mm tijdvak 15 t/m 28 jan. 1977
Valkenburg (ZH)	41,2
Den Helder (De Kooy)	38,6
Schiphol	39,6
De Bilt	46,9
Leeuwarden	31,1
Groningen	34,2
Twente (vliegveld)	43,9
Vlissingen	23,7
Gilze Rijen	34,1
Eindhoven	36,5
Maastricht	28,7

Neerslag in december 1976 (definitieve cijfers). De hoeveelheid neerslag gemiddeld over het gehele land bedroeg 84 mm tegen 62 mm normaal. De grootste hoeveelheid was 144 mm te Westbeemster, de kleinste 30 mm te Noorbeek. De grootste etmaalhoeveelheid (43 mm) werd op 1 dec. te Oost-Vlieland gemeten.

	Neerslag in mm	
	gem. hoeveelheid	afwijking van N *
Den Helder	117	+ 50
Leeuwarden	102	+ 39
Eelde	104	+ 45
Hoorn (NH)	112	+ 48
Lelystad	93	+ 45
Dedemsvaart	77	+ 15
Naaldwijk	97	+ 33
De Bilt	77	+ 11
Winterswijk	63	+ 2
Andel	68	+ 8
Vlissingen	73	+ 15
Oudenbosch	74	+ 14
Gemert	61	+ 2
Venlo	49	- 5
Beek (L)	49	- 9
Landgemiddelde	84	+ 23

* Gemiddelde over het tijdvak 1931-1960.
Bron: KNMI.