

Bepaling van het zuurstoftoevoer-vermogen (OC) in carrouzels (1)

1. Inleiding

Het verschuiven van de economische bovengrens aan de toepasbaarheid van oxydatiesloten naar grotere aantallen inwoner-equivalenten — een ontwikkeling die in aanzienlijke mate is versterkt met de introductie van het Carrousel-systeem — heeft geleid tot een krachtige toename van het aantal oxydatiesloten en Carrouzels in ons land.



IR. S. SWEERIS

Instituut voor Milieuhygiëne en Gezondheidstechniek TNO, Delft



IR. R. TRIETSCH

Ingenieursbureau Dwars, Heederik en Verhey BV, Amersfoort

Hierdoor werd de behoefte vergroot aan een betrouwbare methode om het zuurstoftoevoer- vermogen (de OC) in deze installaties te bepalen. Was een berekenings- methodiek voor oxydatiesloten met borstelbeluchters en kooiroteren reeds eerder door Sweeris [1] opgesteld, voor het van puntbeluchters gebruik makende Carrousel-systeem ontbrak een dergelijke methodiek tot dusverre. In dit artikel wordt een formule afgeleid, waarmee het zuurstoftoevoer- vermogen kan worden berekend voor Carrouzels. In het laatste gedeelte van het artikel, dat in een volgend nummer zal verschijnen, wordt de afgeleide formule toegepast voor het bepalen van de OC in de rioolwater- zuiveringsinstallatie te Losser, die volgens het carrouselprincipe is gebouwd.

2. Afleiding OC-formule voor carrouzels

2.1. Definitie OC

Onder het zuurstoftoevoer- vermogen, kort- heidshalve OC (van Oxygenation Capacity) genoemd, wordt de zuurstoftoevoer verstaan, die door een beluchter in een bepaalde installatie in zuiver water wordt gerealiseerd onder standaardomstandig- heden, te weten: atmosferische luchtdruk = 760 mm Hg (1013 mbar), temperatuur = 10 °C (USA: 20 °C) en zuurstof- concentratie in het beluchte water gelijk- blijvend aan 0. Afhankelijk van de gehanteerde definitie wordt de OC uitgedrukt in g O₂ per tijdseenheid per

volume-eenheid, of g O₂ per tijdseenheid betrokken op het totale volume van het beluchtingsbassin. De laatste uitdrukking zal hier worden gehanteerd.

De OC hangt af van een aantal grootheden:

- de afmetingen en geometrie van de beluchter;
- de grootte van het volume water en de geometrie van de begrenzing;
- de draairichting van de beluchter (slepend of stotend draaiend);
- de dompeldiepte van de beluchter;
- de rotatiesnelheid van de beluchter;
- de in het water aanwezige stoffen.

Teneinde de onder f. genoemde invloed uit te schakelen wordt de OC in schoon water bepaald. De andere factoren vormen parameters, die bij een OC-meting zijn vastgelegd.

De onder b. genoemde factoren bepalen bovendien de formule die moet worden gebruikt om de OC te berekenen.

Vrijwel algemeen wordt echter een formule gebruikt die is afgeleid voor een beluch- tingstank met ideale menging, nl.:

$$OC = c'_s \cdot k \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} = c'_s \cdot V \cdot 2,303 \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \log \frac{c_s - c_1}{c_s - c_2} \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} \quad (1)$$

De uitdrukking $\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \log \frac{c_s - c_1}{c_s - c_2}$ wordt dan

dikwijls vervangen door $\text{tg} \alpha$, zijnde de helling van de rechte die gevonden wordt wanneer op halflogaritmisch papier het quotiënt van de zuurstofverzadigings- concentratie en het momentane zuurstof- deficiet, $c_s / (c_s - c_x)$, wordt uitgezet tegen de tijd (tijd-as lineair; zie afb. 1).

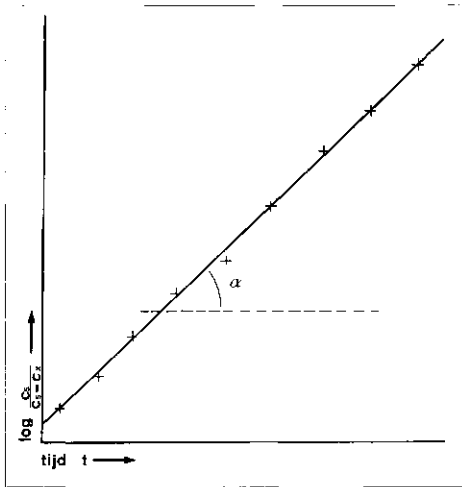
Wordt voor c'_s , d.i. de zuurstofverzadi- gingsconcentratie bij 10 °C en 760 mm Hg, de aan een tabellenboek ontleende waarde van 11,33 g/m³ ingevuld, dan gaat (1) over in

$$OC = 26,1 \cdot V \cdot \text{tg} \alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} \quad (2)$$

De term onder het wortelteken is een correctiefactor voor het verschil in temperatuur T tijdens de zuurstofmetingen

Lijst van symbolen

c	(g/m ³)	zuurstofconcentratie aan het einde van het carrouselcircuit, vlak voor de kop.
c ₁	(g/m ³)	zuurstofconcentratie ten tijde t = t ₁ .
c ₂	(g/m ³)	zuurstofconcentratie ten tijde t = t ₂ .
c _s	(g/m ³)	zuurstofverzadigingsconcentratie tijdens meting.
c' _s	(g/m ³)	zuurstofverzadigingsconcentratie bij T = 10 °C en p = 760 mm Hg.
c*	(g/m ³)	zuurstofconcentratie in carrousel-kop.
c _x	(g/m ³)	zuurstofconcentratie in punt x ten tijde t = t.
(c _x) ₀	(g/m ³)	zuurstofconcentratie in punt x ten tijde t = 0.
D _T	(m ² /s)	diffusiecoëfficiënt van zuurstof in water bij T °C.
D ₁₀	(m ² /s)	diffusiecoëfficiënt van zuurstof in water bij 10 °C.
k	(m ³ /h)	beluchttingsconstante (algemene OC-formule).
k*	(m ³ /h)	beluchttingsconstante behorende bij ideale menging, d.w.z. betrokken op het zuurstofgehalte van het afstromende water.
k'	(m ³ /h)	beluchttingsconstante behorende bij een propstroomtoestand, d.w.z. betrokken op het zuurstofgehalte aan het einde van het circuit.
l	(m)	ontwikkelde lengte van de benen.
OC	(g O ₂ /h)	zuurstoftoevoer- vermogen onder standaardcondities, betrokken op het totale volume van het beluchtingscircuit.
Q	(g)	hoeveelheid opgeloste zuurstof.
q	(m ³ /h)	waterdebiet.
t	(h)	tijd, gerekend vanaf begin meting.
T	(°C)	temperatuur.
v	(m/h)	stroomsnelheid in de benen.
V	(m ³)	totale volume beluchtingscircuit.
V ₁	(m ³)	volume carrousel-kop.
V ₂	(m ³)	volume carrousel-benen (V ₂ = V - V ₁).
η _{O₂} (bruto)	(kg O ₂ /kWh)	bruto zuurstofinbrengrendement.
η _{O₂} (netto)	(kg O ₂ /netto as-pkh)	netto zuurstofinbrengrendement.



Afb. 1 - Bepaling $tg\alpha$.

en de standaardtemperatuur van 10 °C waarvoor de OC is gedefinieerd. Door Pasveer [2] is afgeleid

$$\sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} = 1,01875^{(10-T)} \quad (3)$$

Voor een oxydatiesloot waarin praktisch een propstrooming bestaat is in [1] afgeleid $OC = 26,1 \cdot V \cdot tg\alpha$.

$$\sqrt{\frac{D_{10}}{D_T} \cdot \frac{1}{1,1515 \cdot V/q \cdot tg\alpha + 1}} \quad (4)$$

Voor niet te grote waarden van $V/q \cdot tg\alpha$ ($V/q \cdot tg\alpha < 0,2$) gaat (4) bij benadering over in

$$OC = 2,303 \cdot c'_s \cdot V \cdot tg\alpha \cdot (1 - V/q \cdot tg\alpha) \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} \quad (5)$$

2.2. OC-formule voor carrousel

In tegenstelling tot een beluchtingstank waarin het gehele volume water op elk tijdstip intensief wordt gemengd of een oxydatiesloot met borstelbeluchters, waar over het gehele circuit praktisch een propstrooming aanwezig is, moet bij een carrousel onderscheid worden gemaakt tussen twee verschillende stromingspatronen: het patroon in de beluchtingskop van de carrousel, waar menging plaatsvindt, en het patroon in de benen, waar nagenoeg een propstrooming bestaat. Om het beluchtingsproces in de carrousel mathematisch te kunnen omschrijven moet het mengproces worden vastgelegd. Daartoe wordt de menging in de kop, evenals dit ter afleiding van formule (1) voor een beluchtingstank wordt gedaan, als ideaal verondersteld. In de benen wordt een ideale of nagenoeg ideale propstrooming aangenomen. Voor het bepalen van een OC wordt

gedurende enige tijd het stijgen van het zuurstofgehalte tijdens een beluchting gemeten. Daartoe moet in het circuit zuurstofarm water zonder zuurstofverbruik aanwezig zijn. Is dit het geval en wordt de beluchter plotseling gestart dan neemt het zuurstofgehalte in de beluchtingskop, vooral als het water aanvankelijk ook nog geheel in rust verkeerde, in korte tijd snel toe. Dit met zuurstof verrijkte water stroomt vanuit de kop het ene been binnen en stroomt daarin verder, voorafgegaan door het zuurstofarme water. De ontstane steile sprong in de zuurstofconcentratie verplaatst zich door het circuit en blijft ook bestaan, zij het met een verminderde steilheid, bij het passeren van de beluchtingskop.

Het op een bepaalde plaats in het circuit gemeten zuurstofgehalte vertoont elke keer bij het passeren van de sprong een plotselinge stijging. Daardoor is $tg\alpha$ niet nauwkeurig te bepalen.

Door de menging in de kop, maar ook door geringe menging in de benen wegens het niet ideaal zijn van de propstrooming, wordt de sprong in het zuurstofgehalte steeds minder steil en verdwijnt tenslotte geheel. In de benen bestaat er dan vanaf de bovenstroomse zijde van de kop tot aan de benedenstroomse zijde van de kop een regelmatig verval in het zuurstofgehalte. Het op een bepaalde plaats gemeten zuurstofgehalte neemt nu regelmatig toe met de tijd. Daar het echter ondertussen vrij hoog is opgelopen is de $tg\alpha$ ook nu niet nauwkeurig te bepalen.

Het bovenstaande probleem is op te lossen door de beluchter te starten terwijl er in het water een grote hoeveelheid natriumsulfiet aanwezig is. De in oplossing gaande zuurstof oxydeert het sulfiet, er ontstaat nu een zich door het circuit bewegende steile sprong in de sulfietconcentratie, die na verloop van tijd afvlakt en verdwijnt. Dan bestaat er in de benen in de lengterichting praktisch een lineair verloop in de sulfietconcentratie. Na oxydatie van al het sulfiet ontstaat er een nagenoeg zelfde verloop in de zuurstofconcentratie, zodat $tg\alpha$ goed is te bepalen. Deze methode vraagt vrij veel sulfiet.

Met minder sulfiet wordt praktisch hetzelfde resultaat verkregen door eerst de beluchter te starten en nadat het water geheel op snelheid is gekomen (het water zal dan bijna met zuurstof verzadigd zijn) de sulfiet op een aantal gelijkelijk over het hele circuit verdeelde punten met een constante snelheid in een bepaalde tijd toe te voegen. Bij de metingen in Losser is deze laatste methode toegepast (zie 3.3). Het toevoegen en verdelen van het sulfiet moet met enige zorg gebeuren daar een eenmaal gevormde ongelijkmatigheid in het

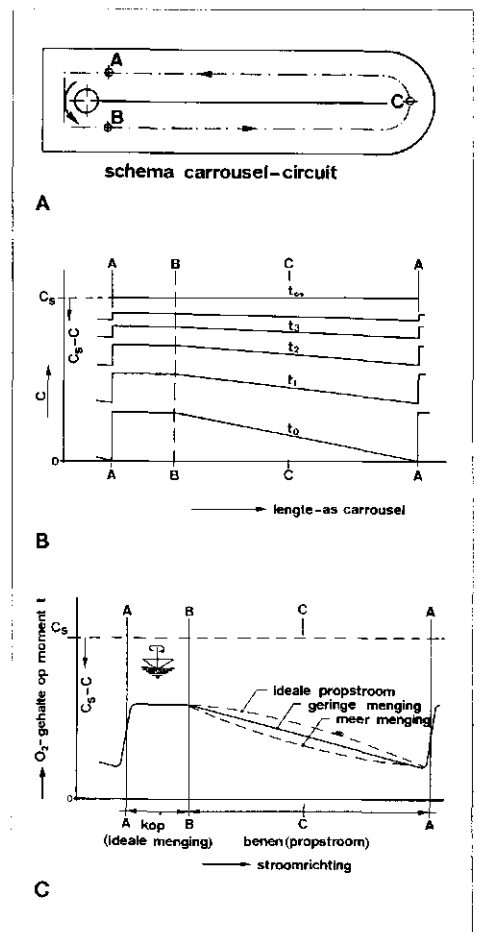
concentratieverloop lang kan blijven bestaan. Dit blijkt wel uit de na OC₅ genomen en in 3.2 (afb. 6) beschreven proef. Nadat alle sulfiet is geoxydeerd — het langst is sulfiet aanwezig net bovenstrooms van de beluchtingskop — bestaat er op de achtereenvolgende momenten $t_0, t_1, \dots, t_{\infty}$ in de lengterichting van het circuit een verdeling van de zuurstof zoals geschetst in de grafiek van afb. 2B.

Afb. 2C geeft de verdeling meer gedetailleerd weer op het moment t . Door de aangenomen ideale menging is het zuurstofgehalte in de kop overal gelijk (wordt met c^* aangeduid).

Juist benedenstrooms van de kop wordt hetzelfde zuurstofgehalte gevonden. Net bovenstrooms van de kop is het zuurstofgehalte het laagst (wordt c genoemd). In de benen loopt het zuurstofgehalte in de stroomrichting zonder sprongen af van c^* tot c . Hoe het verloop precies is zal afhangen van de vorm van de carrousel. Voor de afleiding van een formule wordt hier echter een lineair verloop aangenomen. Op deze aanname wordt in 2.4 nog teruggekomen.

Bij de OC-metingen in de carrousel te Losser is op 4, soms op 5 verschillende

Afb. 2 - Zuurstofprofiel langs lengte-as carrousel.



plaatsen in de benen de toename van het zuurstofgehalte gemeten en voor elke plaats zijn de meetresultaten in een grafiek zoals in afb. 1 uitgezet. $\text{tg}\alpha$ bleek voor alle meetplaatsen dezelfde waarde te bezitten (binnen een willekeurige spreiding van ongeveer 5 %).

Experimenteel blijkt derhalve voor een willekeurig punt in het circuit (tenminste bij goede benadering) te gelden

$$\log \frac{c_s}{c_s - c_x} - \log \frac{c_s}{c_s - (c_x)_0} = \text{tg}\alpha \cdot t \quad (6)$$

c_x is de zuurstofconcentratie ten tijde t en $(c_x)_0$ die ten tijde $t = 0$.

Uit (6) volgt

$$(c_s - c_x) = (c_s - (c_x)_0) \cdot 10^{-\text{tg}\alpha \cdot t} \quad (7)$$

De zuurstof-overdracht van de puntbeluchter wordt weergegeven door

$$dQ/dt = k(c_s - c) \quad (8)$$

k is een beluchtingconstante.

Het is de bedoeling om met k de intensiteit van een beluchtingsproces te karakteriseren. dQ/dt is de hoeveelheid zuurstof die de beluchter op een moment t per tijdseenheid in oplossing doet gaan en $(c_s - c)$ is een op het moment t bestaand zuurstofdeficiet dat, met k , bepalend is voor dQ/dt .

In een beluchtingstank met ideale menging is het zuurstofdeficiet overal gelijk zodat k eenduidig is bepaald.

Is k bekend dan wordt de OC uit (8) verkregen door c gelijk nul te stellen.

In een carrousel echter heeft het zuurstofdeficiet op moment t een van plaats tot plaats verschillende waarde.

Het is duidelijk dat een op het tijdstip t op een willekeurige plaats in een been aanwezig zuurstofdeficiet op dat tijdstip t geen enkele invloed kan uitoefenen op de zuurstofoverdracht van de in de kop aanwezige beluchter.

Voor de zuurstofoverdracht is het zuurstofdeficiet van het op moment t in de kop aanwezige water dat door de beluchter wordt aangezogen en belucht bepalend, zodat voor de beluchting in de carrousel geldt:

$$dQ/dt = k^*(c_s - c^*) \quad (8a)$$

De OC wordt ook hier verkregen door voor c^* de waarde nul in te vullen.

Deze OC is te vergelijken met de OC die in een beluchtingstank met complete menging wordt verkregen (zie hiervoor echter ook de opmerkingen in 2.3).

Vergelijking 8a geldt ongeacht de zuurstofgehalten in de benen. Voor het geval dat de zuurstofgehalten over het circuit zijn verdeeld volgens afb. 2 bestaat er een verband tussen $(c_s - c^*)$ en het zuurstofdeficiet $(c_s - c_x)$ op een plaats x in een been.

Door substitutie van die functie in (8a) kan dan een vergelijking worden verkregen waarin de zuurstoftoevoer van de beluchter een functie is van $(c_s - c_x)$. De evenredigheidsconstante k_x heeft een andere waarde dan k^* en de waarde hangt af van de plaats x .

Ditzelfde geldt voor een OC die uit k_x kan worden berekend. Deze berekeningen hebben echter weinig praktisch nut.

Een uitzondering moet worden gemaakt voor de plaats juist bovenstrooms van de kop. Hierop wordt in 2.3 nog teruggekomen. Voor de plaats juist benedenstrooms van de kop is het zuurstofdeficiet gelijk aan $(c_s - c^*)$. Voor deze plaats geldt dus formule 8a.

De zuurstofoverdracht kan worden berekend uit de toename van de zuurstofconcentratie (= afname van het deficiet) in de gehele installatie:

$$dQ/dt = -V_1 \cdot \frac{d(c_s - c^*)}{dt} - V_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d(c_s - c^* + c_s - c)}{dt} \quad (9)$$

De eerste term geeft de afname van het zuurstofdeficiet in de kop weer; de tweede term die in de benen.

Er kan ook een zuurstofbalans voor de kop alleen worden opgesteld:

$$k^* \cdot (c_s - c^*) = -V_1 \cdot \frac{d(c_s - c^*)}{dt} - \frac{1}{2} \cdot V_2 \cdot \frac{d\{(c_s - c^*) + (1 + k^*/q - 2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1/q) \cdot (c_s - c^*)\}}{dt} \quad (15)$$

ofwel, met $V = V_1 + V_2$

$$\frac{d(c_s - c^*)}{(c_s - c^*)} = \frac{-k^*}{(V + k^*/2q \cdot V_2 - \frac{1}{2} \cdot 2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1/q \cdot V_2)} \cdot dt \quad (16)$$

Integratie leidt nu tot

$$(c_s - c^*) = (c_s - c^*_0) \cdot 10^{-\left\{ \frac{1}{2,303} \cdot \frac{k^*}{V + k^*/2q \cdot V_2 - 1,1515 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1/q \cdot V_2} \cdot t \right\}} \quad (17)$$

Bovendien geldt volgens (7)

$$(c_s - c^*) = (c_s - c^*_0) \cdot 10^{-\text{tg}\alpha \cdot t} \quad (18)$$

waarna door gelijkstellen van (17) aan (18) wordt gevonden

$$\text{tg}\alpha = \frac{1}{2,303} \cdot \frac{k^*}{V + k^*/2q \cdot V_2 - 1,1515 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1/q \cdot V_2} \quad (19)$$

ofwel:

$$k^* = 2,303 \cdot V \cdot \text{tg}\alpha \cdot \frac{1 - 1,1515 \cdot V_1/V \cdot V_2/q \cdot \text{tg}\alpha}{1 - 1,1515 \cdot V_2/q \cdot \text{tg}\alpha} \quad (20)$$

Het zuurstofvermogen OC is derhalve

$$OC = c'_s \cdot 2,303 \cdot V \cdot \text{tg}\alpha \cdot \frac{1 - 1,1515 \cdot V_1/V \cdot V_2/q \cdot \text{tg}\alpha}{1 - 1,1515 \cdot V_2/q \cdot \text{tg}\alpha} \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} \quad (21)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -V_1 \cdot \frac{d(c_s - c^*)}{dt} + q \cdot (c_s - c) - q \cdot (c_s - c^*) \quad (10)$$

waarin q het debiet in de benen is in m^3/uur .

Uit de vergelijkingen (7), (8a), (9) en (10) wordt volgens onderstaande wiskundige bewerking de functie die tussen k^* en $\text{tg}\alpha$ bestaat (verg. 20) afgeleid.

Uit (8a) en (10) volgt

$$k^* \cdot (c_s - c^*) = -V_1 \cdot \frac{d(c_s - c^*)}{dt} + q \cdot (c_s - c) - q \cdot (c_s - c^*) \quad (11)$$

Wordt (7) nu toegepast op de kop ($c_x = c^*$) en het resultaat vervolgens naar t gedifferentieerd, dan volgt hieruit:

$$\frac{d(c_s - c^*)}{dt} = -2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot (c_s - c^*) \quad (12)$$

en substitutie hiervan in (11) levert

$$k^* \cdot (c_s - c^*) = 2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1 \cdot (c_s - c^*) + q \cdot (c_s - c) - q \cdot (c_s - c^*) \quad (13)$$

ofwel:

$$c_s - c = (1 + k^*/q - 2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1/q) \cdot (c_s - c^*) \quad (14)$$

Uit een combinatie van de vergelijkingen (8a), (9) en (14) volgt nu

2.3. Een nadere beschouwing van de verschillende OC-formules

In het voorgaande is de carrousel beschouwd als een model waarin het totale volume V is gesplitst in een gedeelte V₁ met ideale menging en een gedeelte V₂ met een propstrooming.

Door of V₁ of V₂ tot nul te laten naderen zal het carrousel-model overgaan in het model van de oxydatiesloot met borstelbeluchting resp. het model van de beluchtingstank met ideale menging. Vergelijking (21) zal dan moeten overgaan in vergelijking (4) resp. vergelijking (2). Dit zal in het volgende worden nagegaan.

a. Beluchtingstank

Daar hier alleen ideale menging en geen propstroom voorkomt is V₁ = V en V₂ = 0. Hiermee gaat verg. (20) over in

$$k^* = 2,303 \cdot V \cdot \text{tg}\alpha \quad (22)$$

of $OC = c'_s \cdot 2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V \cdot$

$$\sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} = 26,1 \cdot V \cdot \text{tg}\alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}}$$

Dit is de reeds eerder vermelde formule 2.

b. Oxydatiesloot met borstelbeluchting

Hier doet zich een kleine moeilijkheid voor. Vergelijking 4 voor de oxydatiesloot is nl. afgeleid voor het punt juist bovenstrooms van de borstelbeluchter. Daarom moet bij de carrousel van de overeenkomstige formule worden uitgegaan.

Het verband tussen het zuurstofdeficiet juist bovenstrooms van de kop en het zuurstofdeficiet in de kop (en juist benedenstrooms van de kop) wordt bij de carrousel gegeven door vergelijking (14). Substitutie van (14) in (8a) levert dan:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{k^*}{1 + k^*/q - 2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1/q} \cdot (c_s - c) \quad (23)$$

De term die vóór (c_s - c) staat is, daar deze slechts constanten bevat, ook een constante. Deze zullen wij k' noemen zodat geldt

$$\frac{dQ}{dt} = k' (c_s - c) \quad (24)$$

$$\text{met } k' = \frac{k^*}{1 + k^*/q - 2,303 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V_1/q} \quad (25)$$

Substitutie van (20) in (25) levert voor de carrousel op

$$k' = \frac{2,303 \cdot V \cdot \text{tg}\alpha \cdot 1 - 1,1515 \cdot V_1/V \cdot V_2/q \cdot \text{tg}\alpha}{1 + 1,1515 \cdot V_2/q \cdot \text{tg}\alpha} \quad (26)$$

Door voor de oxydatiesloot met borstelbeluchting in te vullen V₁ = 0 en V₂ = V gaat (26) over in:

$$k' = 2,303 \cdot V \cdot \text{tg}\alpha \cdot \frac{1}{1 + 1,1515 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V/q} \quad (27)$$

dus $OC = k' \cdot c'_s = 26,1 \cdot V \cdot \text{tg}\alpha \cdot$

$$\sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} \cdot \frac{1}{1 + 1,1515 \cdot \text{tg}\alpha \cdot V/q}$$

hetgeen formule 4 is.

c. Onderlinge vergelijking van de verschillende OC's

In de praktijk wordt de zuurstoftoevoer niet alleen bepaald door de OC maar ook door het zuurstofdeficiet waarmee in het zuiveringstank wordt gewerkt. Met dat deficiet moet rekening worden gehouden bij berekeningen voor het ontwerpen van een zuiveringsinrichting maar ook bij het eventueel onderling vergelijken van de beluchttingscapaciteiten of de energetische zuurstofinbrengrendementen van beluchters. In een zuiveringsinrichting stelt het zuurstofdeficiet zich automatisch in op een zekere waarde. Bepalend hiervoor is de grootte van het zuurstofverbruik r in het actief slibmengsel.

Het zuurstofverbruik r is de hoeveelheid zuurstof die per tijdseenheid en per volume-eenheid door het slib wordt geconsumeerd (g · m⁻³ · h⁻¹).

In een tank met complete menging zal zich een toestand instellen waarbij het zuurstofgehalte nul is, en dus het zuurstofdeficiet maximaal en de zuurstoftoevoer gelijk aan de OC, indien $r = OC/V$.

Met een zuurstofgehalte gelijk aan nul of een zeer laag zuurstofgehalte wordt in de praktijk veel gewerkt. Er heeft in de gehele tank zuurstofconsumptie plaats.

In de carrousel is de zuurstoftoevoer gelijk aan de OC wanneer het zuurstofdeficiet in de kop maximaal is. Dit is het geval als $r = OC/V_1$. Om deze bedrijfstoestand te doen ontstaan moet r wegens de kleine waarde van V₁ groot zijn.

Er wordt dan vanuit de kop geen zuurstof naar de benen gebracht zodat er in de benen ook geen zuurstofconsumptie plaats heeft. In de praktijk zal in de regel met een zeker zuurstofgehalte in de kop worden gewerkt.

In de oxydatiesloot met een borstelbeluchter is de zuurstoftoevoer gelijk aan de OC als het zuurstofgehalte net bovenstrooms van de borstel nul is.

Dit is het geval als $r = OC/V$. Behalve juist bovenstrooms van de beluchter is er overal in de benen zuurstof en heeft er overal zuurstofconsumptie plaats. Dit geldt voor de oxydatiesloot als het volume-deel waarin de eigenlijke beluchting plaatsvindt, verwaarloosbaar klein is. Met de kop van de carrousel is dit niet het

geval, zodat bij de carrousel niet zonder meer kan worden uitgegaan van een OC die is gebaseerd op de plaats juist bovenstrooms van de kop (zie 2.3.b.).

Bij de bovenstaande beschouwingen is er geen rekening mee gehouden dat de OC in een aktiefslibmengsel eventueel anders kan zijn dan in schoon water.

Op dit probleem wordt hier ook niet nader ingegaan.

2.4. Opmerkingen over de geïdealiseerde modellen

a. De mate van menging in de kop van de carrousel

Bij de afleiding van de formules voor de berekening van de OC is uitgegaan van een geïdealiseerd stromingsmodel ofwel van een geïdealiseerde voorstelling van de verdeling van de zuurstof in het water tijdens de OC-meting.

Als de werkelijkheid afwijkt van het model kan dit leiden tot het berekenen van foutieve waarden voor de OC.

Kessener en Ribbius [5], die in het begin van de jaren dertig het begrip OC hebben ingevoerd, onderzochten in een gemengde tank bij de toenmaals gebruikelijke matige beluchttingsintensiteiten de verdeling van de zuurstof over het watervolume. De zuurstofgehalten bleken niet overal gelijk te zijn maar de verschillen waren gering. Latere onderzoekers [3, 4] kwamen bij de grotere beluchttingsintensiteiten met puntbeluchters tot dezelfde bevinding.

Bij de carrousel is de beluchter groot ten opzichte van de afmetingen van de kop.

Het water in de kop roteert met de beluchter mee en er is veel turbulentie.

Het aan de onderzijde van de beluchter aangezogen water wordt in alle richtingen weggevoerd.

Een gedeelte dringt zelfs langs de tussen de beide benen gelegen middenwand een tiental meters het bovenstrooms gelegen been, tegen de stroomrichting in, binnen. Het lijkt daarom redelijk om in de kop van de carrousel, evenals in de gemengde tank, van een ideale menging uit te gaan.

b. De propstrooming in de benen

In de benen van de carrousel treedt maar een geringe menging op en er zou hier van een ideale propstrooming kunnen worden uitgegaan.

Daar bij een ideale propstroom het in een bepaald volumedeeltje bestaande zuurstofgehalte tijdens het stromen door de benen niet verandert, kan de op elk tijdstip t over de lengte van de benen bestaande verdeling van de zuurstof worden afgelezen uit de grafiek waarin de op een bepaalde plaats gemeten stijging van het zuurstofgehalte wordt weergegeven.

Het zuurstofgehalte op een bepaalde plaats als functie van de tijd, en het zuurstofgehalte op een bepaald moment als functie van de plaats zijn 2 functies die in de voorafgaande afleidingen regelmatig zijn genoemd en niet met elkaar moeten worden verward.

De grafiek afb. 3 geeft het zuurstofgehalte als functie van de tijd op een bepaalde plaats in een been van een carousel.

Als plaats wordt hier een punt gedacht dat juist bovenstrooms van de carouselkop is gelegen.

Op het tijdstip t is het zuurstofgehalte op die plaats c_t . De enige tijd later gemeten hogere zuurstofgehalten zijn op het tijdstip t reeds aanwezig op meer bovenstrooms van die plaats gelegen punten. Bij een ideale propstroom, een lengte van de benen l en een stroomsnelheid v , geeft het in afb. 3 over een tijdsverloop $\Delta t = l/v = V_2/q$ na tijdstip t verdikte lijngedeelte de verdeling van de zuurstof over de lengte van de benen op het tijdstip t .

Dit geldt voor een ideale propstroom.

Zodra er enige menging is liggen de zuurstofgehalten lager. Bij complete menging in de benen bijv. zou het zuurstofgehalte in de benen overal gelijk zijn aan c_s , met zowel benedenstrooms als bovenstrooms bij de grens met de kop een steile sprong in het zuurstofgehalte.

Het in 2.2. aangenomen lineaire verloop van het zuurstofgehalte in de benen komt tegemoet aan het feit dat de propstroom in werkelijkheid niet ideaal is.

Wordt wél uitgegaan van een ideale propstroom, dus een exponentiële verdeling van de zuurstof, dan wordt in plaats van formule (21) gevonden:

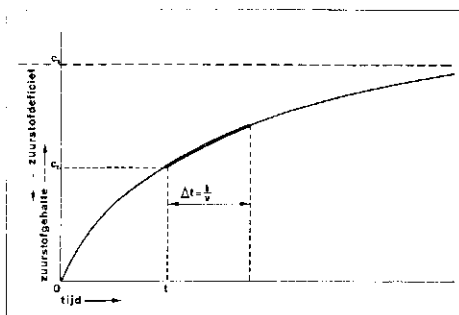
$$OC = c_s \cdot 2,303 \cdot V \cdot tg\alpha \cdot$$

$$\left\{ V_1/v + e^{\frac{2,303 \cdot V_2/q \cdot tg\alpha - 1}{2,303 \cdot V/q \cdot tg\alpha}} \right\} \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} \quad (28)$$

Toegepast op de metingen in de carousel te Losser blijkt deze formule voor de OC waarden op te leveren die 1 tot 2 % lager zijn dan de met formule (21) verkregen waarden.

Indien in de praktijk de verdeling van de zuurstofgehalten enigszins afwijkt van de aangenomen lineaire verdeling leidt dit dus niet direct tot grote fouten.

De juiste werkwijze zou uiteraard zijn om bij elke OC-meting de verdeling van de zuurstof in het circuit te bepalen. Dit geldt ook voor metingen in gewone beluchtingstanks daar de menging hierin beslist ook niet ideaal is. Een dergelijke meetmethode is echter wegens het grote aantal gelijktijdig uit te voeren O_2 -metingen moeilijk uit te voeren.



Afb. 3 - Zuurstofconcentratie-verloop tijdens een OC-meting.

De grootte van het debiet van de stroom water door het circuit is zeer belangrijk. Met die stroom wordt de zuurstof in de benen gebracht, terwijl in de kop een zuurstofdeficiet wordt gehandhaafd. Voor het laatste is een groot debiet gunstig. Bij zeer grote stroomsnelheden in het circuit nemen echter de energieverliezen toe, terwijl de 'greep' van de beluchter op het water kan verminderen.

De factor $V_2/q \cdot tg\alpha$ is, met een ideale propstroom in de benen en geen zuurstofverbruik in het water, een maat voor de verhouding van het zuurstofdeficiet in de beluchterkop en van het zuurstofdeficiet van het de beluchterkop binnestromende water. Uit vergelijking (28) en (14) volgt nl.

$$\frac{c_s - c^*}{c_s - c} = 10^{-V_2/q \cdot tg\alpha} \quad (29)$$

(zie 2.5. voor als er meerdere beluchters in de carousel zijn).

Bij de afleiding van de formules is van een min of meer geïdealiseerde verdeling van de zuurstof over het circuit uitgegaan.

Tijdens de eigenlijke OC-meting is het verder gewenst dat het zuurstofdeficiet niet te klein wordt.

Bij een kleine waarde van $\frac{c_s - c^*}{c_s - c}$ is aan het

bovenstaande moeilijk of niet te voldoen.

Dit laat zich begrijpen als men zich een geval voorstelt waarbij het in de kop aanwezige water reeds voor bijv. 70 % zou zijn verzadigd terwijl het de kop binnestromende water nog zuurstofloos is of zelfs nog sulfiet bevat.

De OC is dan niet goed te meten.

c. Zuurstoftoevoer aan het wateroppervlak

Bij de afleiding van de OC-formule is er geen rekening mee gehouden dat ook zuurstof door het wateroppervlak in de benen van de carousel in oplossing gaat. Alle in oplossing gegane zuurstof wordt dus geacht afkomstig te zijn van de beluchter. Op zich zelf is dit geen bezwaar, maar er wordt hierbij wel een zekere fout gemaakt,

daar het zuurstofdeficiet in de benen een andere waarde heeft dan in de kop. De fout is echter klein omdat de OC door het wateroppervlak (bij een stroomsnelheid van 30 à 40 cm/s slechts 1 à 1,5 g $O_2/m^2 \cdot h$) relatief klein is ten opzichte van die van de beluchter en het deficiet in de kop niet klein ten opzichte van het gemiddelde deficiet in de benen.

2.5. Carrousel met meer dan één beluchter

Indien in een carousel meerdere beluchters tegelijk werken kan onder bepaalde voorwaarden vergelijking (21) worden gehanteerd voor het berekenen van de OC. De beluchters moeten dan op onderling gelijke afstanden over de gehele circuitlengte zijn geplaatst en onder gelijke condities, d.w.z. met gelijke OC, werken. In dat geval kan men zich het circuit verdeeld denken in een aantal gelijke delen met in ieder een op dezelfde wijze geplaatste beluchter.

Uit overwegingen van symmetrie volgt dat het water dat aan de ene zijde zo'n circuitdeel uitstroomt hetzelfde zuurstofgehalte heeft als dat wat aan de andere zijde naar binnen stroomt. Men kan zo'n circuitdeel dus als een in zich zelf gesloten circuit beschouwen en er formule (21) op toepassen. Bij n beluchters wordt de OC van 1 beluchter verkregen door voor V het n^{de} -gedeelte van de gehele carouselinhoud te nemen.

V_1 is het volume van één kop en V_2 het verschil van $1/n$ carouselinhoud en V_1 . Voor $tg\alpha$ wordt de gemeten waarde genomen. De som van alle OC's wordt verkregen als voor V het totale carousel volume, voor V_1 de som van alle kopvolumina, voor V_2 het verschil van het totale volume en de som van de kopvolumina en voor q de som van de debieten, die de beluchters passeren, d.i. n maal het debiet dat door een dwarsdoorsnede van de carousel stroomt, wordt genomen. Bij de toepassing van andere formules zoals bijv. vergelijking (28) of (29) wordt op dezelfde wijze te werk gegaan.

Bij een ongelijke verdeling van de beluchters over de carousel of ongelijke OC's moet van geval tot geval worden nagegaan of en hoe de OC kan worden berekend.

(wordt vervolgd)

