

OC-metingen in de praktijk

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

1. Inleiding

De aanwezigheid van voldoende zuurstof is een eerste voorwaarde voor een goed verloop van het aerobe biologische zuiveringsproces.

Een overdosis is echter kostbaar en kan bovendien de procesafloop nadelig beïnvloeden.

Kennis van het zuurstofinbrengend vermogen van het beluchtingssysteem is derhalve onontbeerlijk bij het ontwerp en bij de bedrijfsvoering van een rwzi.

In het bestek voor een rwzi wordt altijd



IR. J. W. VAN SLUIS
Ingenieursbureau
Dwars, Heederik en Verhey BV
Amersfoort

een beluchtingsinstallatie met nauwkeurig omschreven specificaties geëist. Ter controle van deze specificaties bij de oplevering van de installatie worden meestal een of meer OC-metingen verricht.

Verder zijn talloze OC-metingen noodzakelijk bij de ontwikkeling van een nieuw beluchtingssysteem om tot een optimaal produkt te komen.

In deze bijdrage zal het accent liggen op de uitvoering van OC-metingen volgens verschillende methoden en op de interpretatie van de meetresultaten.

Wil men echter de beperkingen en de mogelijkheden van de verschillende methoden goed kunnen begrijpen, dan valt er niet aan te ontkomen om ook aan de theoretische achtergrond ruime aandacht te besteden.

Definitie

Bij het beluchtingsproces gaat het in feite om de overdracht van zuurstof uit de gasfase (meestal lucht) naar de vloeistoffase (meestal actief slib). Deze zuurstofoverdracht wordt door een groot aantal factoren beïnvloed. Onder andere door Pöpel [1] is daarvan een overzicht gegeven. Deze factoren (o.a. temperatuur, luchtdruk en medium waarin wordt gemeten) zullen per situatie sterk variëren.

Om de meetresultaten toch te kunnen vergelijken, wordt het zuurstofinbrengend vermogen herleid tot standaardcondities. Onder meer in Nederland neemt men hiervoor:

gasfase: lucht van atmosferische samenstelling;

temperatuur: 10 °C;

druk: 760 mm Hg (101,3 kPa);

waterfase: 'schoon water' met een zuurstofgehalte dat permanent gelijk is aan nul.

Een goede omschrijving van 'schoon water' is moeilijk te geven. Bedoeld wordt hier een waterfase met een zodanige samenstelling, dat de daarin gemeten stofoverdrachtsnelheid niet merkbaar afwijkt van die in chemisch zuiver water.

Het zuurstofinbrengend vermogen onder standaardcondities wordt OC (oxygenation capacity) genoemd.

Bij een OC-meting wordt de waarde van de beluchttingsconstante ($k_{L,a}$) gemeten.

Met behulp van vergelijking (1) wordt hieruit de OC berekend.

$$OC = k_{L,a} \cdot V \cdot 0,01133 \cdot \frac{f_T}{\alpha} \quad (\text{kg O}_2/\text{h}) \quad (1)$$

waarin:

$k_{L,a}$: beluchttingsconstante (h^{-1});

V: volume beluchttingsbassin (m^3);

0,01133: verzadigingsconcentratie van zuurstof in 'schoon water' bij 760 mm Hg en 10 °C uitgedrukt in $\text{kg O}_2/\text{m}^3$;

f_T : correctiefactor voor de invloed van de temperatuur op de beluchttingsconstante (—);

α : verhouding tussen de beluchttingsconstante in het medium waarin de meting wordt uitgevoerd en de beluchttingsconstante in 'schoon water' (—).

2. Theoretische achtergrond van de meetmethoden

OC-metingen kunnen op de meest uiteenlopende manieren worden uitgevoerd.

Grondslag voor alle berekeningen is echter de zgn. zuurstofbalans. De algemene zuurstofbalans voor een beluchttingsbassin luidt als volgt:

$$\frac{d(V \cdot c)}{dt} = \underbrace{q \cdot c_{in}}_{\text{stroming}} - \underbrace{q \cdot c_{uit}}_{\text{reactie}} - R \cdot V + k_{L,a} \cdot V \cdot (c^s - c^{opp}) \quad (2)$$

waarin:

c: zuurstofgehalte ($\text{kg O}_2/\text{m}^3$);

s: verzadigingswaarde;

in: inkomende stroom;

uit: uitgaande stroom;

opp: aan het grensvlak;

V: volume van het bassin (-gedeelte) (m^3);

q: doorvoerdebiet (m^3/h);

R: zuurstofverbruikssnelheid ($\text{kg O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h}$);

$k_{L,a}$: beluchttingsconstante (h^{-1}).

De term $c^s - c^{opp}$ wordt vaak aangeduid als het zuurstofdeficiet, dat is de drijvende kracht achter de zuurstofoverdracht.

Bij een deficiet gelijk aan nul is de vloeistof verzadigd ($c^{opp} = c^s$) en vindt er geen overdracht meer plaats. De OC is gedefinieerd bij het maximale deficiet ($c^{opp} = 0$).

2.1. Ideaal gemengde bassins

OC-metingen in doorstroomde ideaal

gemengde bassins zijn weinig praktisch vanwege de grote hoeveelheden schoon water die dan beschikbaar moeten zijn (4 à 5 maal de basisinhoud).

2.1.1. Niet-stationaire methode

De bekendste niet-stationaire methode is de 'reaeratiemethode'. In de angelsaksische landen wordt deze methode de 'unsteady state method' genoemd. Verreweg de meeste OC-metingen worden volgens deze methode uitgevoerd. Ze komt er in het kort op neer dat het water in het beluchttingsbassin zuurstofloos wordt gemaakt en vervolgens weer met behulp van het beluchttings-aggregaat, waarvan de OC moet worden bepaald, wordt belucht.

Omdat het bassin niet wordt doorstroomd ($q = 0$), ideaal gemengd is ($c^{opp} = c$) en tijdens het beluchtingsproces geen zuurstof wordt gebruikt ($R = 0$) kan de algemene zuurstofbalans (vgl. (2)) worden vereenvoudigd tot:

$$\frac{dc}{dt} = k_{L,a} \cdot (c^s - c) \quad (3)$$

Na integratie met $c = c^0$ op $t = 0$ als randvoorwaarde volgt:

$$c^t = c^s - (c^s - c^0) \cdot \exp(-k_{L,a} \cdot t) \quad (4)$$

Idem met $c = 0$ op $t = t_0$:

$$c^t = c^s \cdot [1 - \exp\{-k_{L,a} \cdot (t - t_0)\}] \quad (5)$$

In afb. 1 is het verloop van het zuurstofgehalte bij een meting volgens de reaeratiemethode geschetst.

2.1.2. Stationaire methoden

Bij de reaeratiemethode is het zuurstofdeficiet een functie van de tijd.

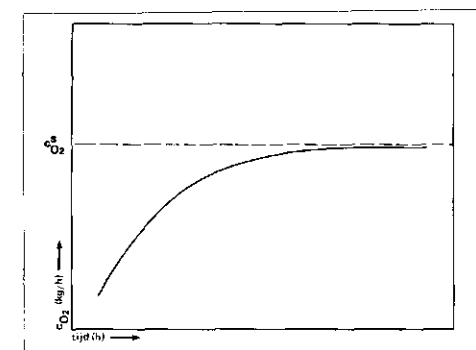
Wanneer de overgedragen zuurstof in de waterfase kan wegreageren dan zal het deficiet, eventueel na een zekere aanlooptijd, constant blijven.

We onderscheiden hier twee gevallen:

a. Grote reactiesnelheid

Als de reactiesnelheid groter is dan de

Afb. 1 - Verloop van het zuurstofgehalte als functie van de tijd bij de beluchting van zuurstof-arm water in een ideaal gemengd bassin zonder doorstroming en reactie van zuurstof.
 $q = 0$; $R = 0$

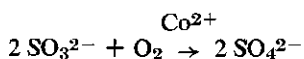


maximale zuurstofoverdrachtsnelheid, kan het zuurstofgehalte gelijk aan nul blijven.

Een reactie waarbij dit het geval is, is de oxydatie van sulfiet tot sulfaat, gekatalyseerd door kobaltionen.

De OC-metmethode die hierop is gebaseerd (sulfietoxidatiemethode; engels: steady state method) is ontwikkeld in de chemische procesindustrie en is vooral geschikt voor systemen met een grote beluchttingsconstante ($k_L a$).

Bij deze methode wordt voordat de meting begint een grote overmaat sulfiet (meestal Na₂SO₃) in opgeloste vorm in het beluchttingsbassin gebracht. Doordat een katalysator is toegevoegd, reageert dit sulfiet na inschakeling van de beluchter zeer snel met de ingebrachte zuurstof volgens:



1 gram sulfiet bindt hierbij 0,2 gram zuurstof.

Het zuurstofgehalte blijft gelijk aan nul, totdat alle sulfiet is verbruikt. De drijvende kracht is dus constant en gelijk aan c^s . Derhalve geldt:

$$c^{opp} = 0 \tag{6a}$$

Tijdens de oxydatie van het sulfiet is de toestand stationair, zodat

$$\frac{dc}{dt} = 0 \tag{6b}$$

Wanneer we ons beperken tot een ideaal gemengd bassin, dat niet wordt doorstroomd, geldt tevens:

$$c = c^{opp} \text{ en} \tag{6c}$$

$$q = 0 \tag{6d}$$

De algemene zuurstofbalans gaat na substitutie van 6a t/m 6d over in:

$$0 = k_L a \cdot c^s - R_{O_2} \tag{7a}$$

De sulfietbalans over het beluchttingsbassin luidt:

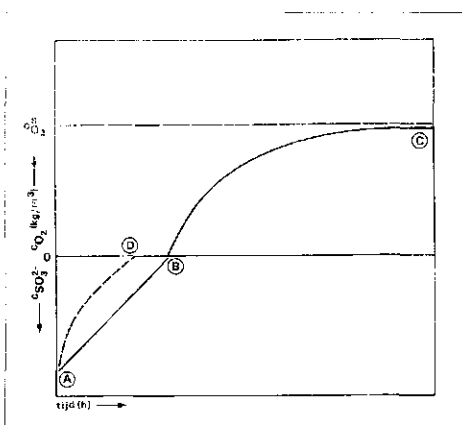
$$\frac{d\text{SO}_3^{2-}}{dt} = -R_{\text{SO}_3^{2-}} \tag{7b}$$

Beide balansen zijn gekoppeld door de reactievergelijking:

$$R_{O_2} = -0,2 \cdot R_{\text{SO}_3^{2-}} \tag{7c}$$

Door via monstername de daling van het sulfietgehalte te volgen kan de hoeveelheid ingebrachte zuurstof en daaruit de beluchttingsconstante worden berekend (zie 5.2.). Nadat alle sulfiet is opgebruikt zal het zuurstofgehalte op dezelfde wijze als bij de reaeratiemethode beginnen op te lopen. Het concentratieverloop gedurende het beluchttingsproces van het sulfiet en de zuurstof zijn weergegeven in afb. 2.

Bij deze sulfietoxidatiemeting zit een



Afb. 2 - Het concentratieverloop van sulfiet en zuurstof bij de beluchting van een sulfietoplossing in een ideaal gemengd beluchttingsbassin zonder doorstroming. $q = 0$

addertje onder het gras, dat de oorzaak kan zijn van veel te hoge uitkomsten.

Zoals gezegd, is, om onmiddellijk alle ingebrachte zuurstof te binden (limitering door stofoverdracht), een minimale reactiesnelheid noodzakelijk.

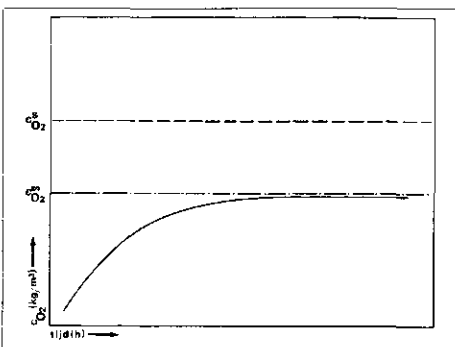
Deze snelheid wordt verkregen m.b.v. de katalysator. Voor dit doel wordt meestal een tweewaardig zout van kobalt gebruikt. Het is bekend dat men, wanneer de reactiesnelheid boven een zekere waarde wordt opgevoerd, te maken krijgt met zgn. 'chemische versnelling' d.w.z. dat de stofoverdrachtsnelheid groter wordt als gevolg van de chemische reactie in de waterfase. De lijn A-B in afb. 2 gaat in dat geval steiler lopen en is meestal ook niet recht meer.

Gebleken is dat een kobaltconcentratie van 3×10^{-6} M (ca. 0,8 mg kobalt (II) sulfaat/l) sprake is van een voldoende snelle, lineaire sulfietafbraak, zonder dat chemische versnelling optreedt.

Bij $[\text{Co}^{2+}] = 3 \times 10^{-5}$ M is echter de chemische versnelling reeds duidelijk merkbaar (lijn A-D in afb. 2).

b. Geringe reactiesnelheid
Bij de sulfietoxidatiemeting gold:

Afb. 3 - Het zuurstofgehalte als functie van de tijd bij een reactiesnelheid $\neq 0$.



$$R_{O_2} = k_L a \cdot c^s_{O_2} \tag{7a}$$

Indien de reactiesnelheid een waarde heeft tussen nul en de maximale overdrachtsnelheid

$$0 < R_{O_2} < k_L a \cdot c^s_{O_2}$$

dan zal de limietwaarde van het zuurstofgehalte kleiner zijn dan de verzadigingswaarde, maar ongelijk zijn aan nul.

De algemene zuurstofbalans (2) gaat dan over in:

$$\frac{dc}{dt} = k_L a \cdot (c^s - c) - R \tag{8}$$

Na integratie met $c = c^0$ op $t = 0$ als randvoorwaarde krijgt men:

$$c = c^s - \frac{R}{k_L a} - (c^s - c^0 - \frac{R}{k_L a}) \exp(-k_L a \cdot t) \tag{9}$$

Voor $t \rightarrow \infty$ nadert het zuurstofgehalte tot een limietwaarde (zie afb. 3):

$$c^\infty = c^s - \frac{R}{k_L a} \tag{10}$$

Het eerste gedeelte van de curve zou eventueel kunnen worden uitgewerkt volgens de 'unsteady state' methode. Na voldoende lange tijd geldt $c = c^\infty$ en kan de beluchttingsconstante worden berekend uit het verschil tussen c^∞ en c^s (zie 5.2.).

De minimaal benodigde aanlooptijd is een functie van de restafwijking:

$$k_L a \cdot t = \ln \frac{c^\infty - c^0}{c^\infty - c^t} = \ln \frac{100}{\Delta} \tag{11}$$

Indien men een restafwijking van max. 1 à 2 % van de limietwaarde toelaatbaar acht, dan bedraagt de aanlooptijd resp. 5 à 4/ $k_L a$ (zie tabel I).

TABEL I - Restafwijking van de evenwichtsconcentratie als functie van de tijd.

Δ (%)	$\ln \frac{100}{\Delta}$
10	2,3
5	3,0
2	3,9
1	4,9

Het noodzakelijke zuurstofverbruik kan in de praktijk worden verkregen door de toevoeging van een constante stroom van een sulfietoplossing, die momentaan met een deel (ondermaat) van de ingebrachte zuurstof reageert, of door gebruik te maken van het zuurstofverbruik door actief slib (methode Kayser).

De bepaling van de reactiesnelheid geschiedt bij de sulfietmethode door het sulfietgehalte en het debiet van de sulfietstroom te meten. Hierbij geldt:

$$R_{O_2} = \frac{0,2 \cdot q^d_{SO_3^{2-}} \cdot c^d_{SO_3^{2-}}}{V} \quad (12)$$

2.2. Propstroombassins

Een propstroombassin kan, ook zonder aanvoer, voor een OC-meting niet als een ideale menger worden beschouwd. De enige manier om dan de OC te bepalen is een deel van het beluchtingsbassin, waarin wel ideale menging te realiseren is, af te scheiden van de rest en daarin de beluchttingscapaciteit te meten.

Bij systemen met 'tapered aeration' zullen aparte metingen in de verschillende compartimenten noodzakelijk zijn om de beluchttingscapaciteit van het hele systeem te leren kennen.

2.3. Omloopssystemen (circuits)

2.3.1. Niet stationaire methode

De klassieke oxidatiesloot en de carrousel kunnen niet worden beschouwd als een ideale menger of als een propstroomreactor, maar hebben speciale reactorkundige eigenschappen.

In het volgende worden ze aangeduid als omloopssystemen.

De reeratiecurve die in afb. 1 is geschetst krijgt als gevolg van de discrete beluchttingszones een 'hobbelig' verloop. Zie afb. 4. De longitudinale menging (in de stromingsrichting) is met name in carrousel echter nog zo groot, dat in de praktijk toch nog een curve met een tamelijk vloeiend verloop verkregen kan worden.

Uit de gemeten curve kan echter niet zonder meer een beluchttingsconstante worden berekend.

Door de beperkte verblijftijd in de beluchttingszone neemt het deficiet daar sneller af dan bij ideale menging in het hele circuit het geval zou zijn, terwijl de rest van de circuitinhoud niet belucht wordt. Hierdoor

krijgt de reeratiecurve een flauwer verloop dan de curve die met dezelfde beluchter in een even groot ideaal gemengd bassin gevonden zou worden. De uit de meetresultaten berekende beluchttingsconstante zal dus kleiner zijn dan de werkelijke beluchttingsconstante.

Met behulp van de volgende formules, die enige jaren geleden door Sweeris [2] en Sweeris en Trietsch [3] werden gepubliceerd, wordt voor dit effect gecorrigeerd:

— formule voor oxidatiesloten:

$$f_v = \frac{1}{V \left(1 + \frac{1}{2q} \cdot \text{tg} \alpha \cdot \ln 10 \right)} \quad (13)$$

— carrouselformule:

$$f_v = \frac{V1 \cdot V2}{2q \cdot V \left(1 - \frac{V1 \cdot V2}{2q \cdot V} \cdot \text{tg} \alpha \cdot \ln 10 \right)} \quad (14)$$

waarin:

$\text{tg} \alpha \cdot \ln 10$: schijnbare beluchttingsconstante, c^s

d.i. de helling van $\log \frac{c^s}{c^s - c}$ als functie

van de tijd (zie hoofdstuk 4) (h^{-1});

q : omloopdebiet door de benen (m^3/h);

V : totaal volume van het beluchttingsbassin, gedeeld door het aantal ingeschaalde beluchters (m^3);

$V1$: volume van een beluchttingszône (m^3);

$V2$: beenvolume per beluchter, gelijk aan $V \cdot V1$ (m^3).

2.3.2. Stationaire metingen

In een omloopstelsel kunnen op hetzelfde tijdstip op verschillende plaatsen verschillende zuurstofgehalten voorkomen.

Daardoor is het mogelijk om het effect van een beluchter op de rondstromende

watermassa direct te meten via de toename van het zuurstofgehalte. De formule die het verband geeft tussen de concentratiesprong en de capaciteit van de beluchter kan worden afgeleid uit een zuurstofbalans over de beluchttingszône.

$$c^\infty = \frac{q \cdot c^{in}/V + k_L a \cdot c^s - R}{k_L a + q/V} \quad (15)$$

waarin in dit geval:

V : Volume van de beluchttingszone, die als ideaal gemengd wordt beschouwd (m^3);

q : Omloopdebiet door de benen (m^3/h).

Wanneer de meting wordt uitgevoerd in schoon water ($R = 0$), kan de beluchttingsconstante worden berekend uit:

$$k_L a = \frac{q \cdot (c^\infty - c^{in})}{(c^s - c^\infty) \cdot V} \quad (16)$$

waarin $c^\infty - c^{in}$ de concentratiesprong is.

Voorwaarde voor de uitvoerbaarheid van deze meting is de eerste plaats dat de omlooptijd van het systeem lang genoeg is om binnen een omloop een stationaire toestand te bereiken.

Deze tijd moet minimaal gelijk zijn aan (zie tabel I):

$$t_{\min} \geq \frac{4}{k_L a + q/V} = \frac{4 \cdot V}{OC/c^s + q}$$

waarin:

V : Volume van een beluchttingszône (m^3);

OC : Capaciteit van een beluchter ($kg O_2/h$).

Bij deze t_{\min} komt nog de tijd die nodig is om de noodzakelijke monsters te nemen en — indien er sprake is van sterke terugmenging in de benen — een extra aanlooptijd.

3. Verschillende beluchttingsystemen

De mogelijkheid om een OC-meting op een van bovengenoemde manieren uit te voeren wordt onder meer bepaald door de mate waarin er van ideale menging gesproken kan worden.

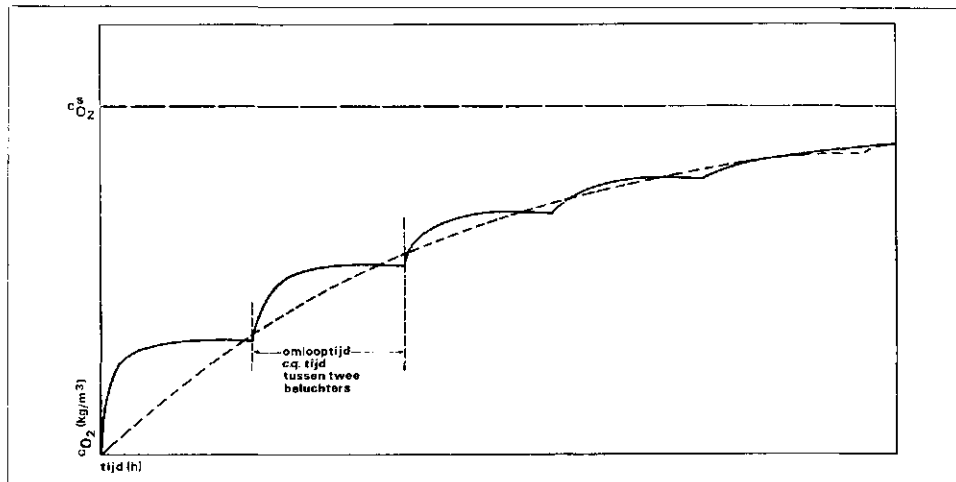
Bij puntbeluchters die in vierkante bassins zijn geplaatst is in het algemeen wel aan deze voorwaarde voldaan.

Bij systemen met fijne beluchting hangt het af van de plaatsing van de beluchttingselementen op de bodem van het bassin.

Bij 'mass lay-out' en waarschijnlijk ook bij 'ridge and furrow' en 'spiral flow'-systemen lijkt de aanname van ideale menging wel gerechtvaardigd.

Zoals reeds werd opgemerkt bij propstroombassins (2.2), dienen systemen met 'tapered aeration' daarentegen te worden opgedeeld in eenheden met een uniforme verdeling van de beluchttingselementen.

Afb. 4 - Theoretische reeratiecurve voor omloopssystemen.



Een complicatie bij diepe bellenbeluchting is de bepaling van de geldende verzadigingswaarde, die immers een functie is van de inblaasdiepte.

Bij de uitwerking van de meetresultaten wordt meestal gewerkt met de verzadigingswaarde op de halve inblaasdiepte (6):

$$c^{s*}_{O_2} = c^{s_{O_2}} \cdot \left(1 + \frac{h}{2 \cdot 10,35}\right) \quad (17)$$

h = inblaasdiepte (m).

Indien men rekening houdt met de overdracht van zuurstof vanuit de bel tijdens het opstijgen, dan wordt de correctieformule:

$$c^{s*}_{O_2} = c^{s_{O_2}} \cdot \left(\frac{h + 10,35}{20,7} + \frac{x^{opp}}{2 \cdot x_{bodem}}\right) \quad (18)$$

waarin x staat voor het volumepercentage zuurstof in het ingeblazen gasmengsel, resp. in het aan het oppervlak ontwijkende gas.

4. Uitvoeringsaspecten

4.1. Zuurstofloos maken van de bassininhoud

Voor de aanvang van de meting in schoon water wordt het zuurstofgehalte van het beluchtingsbassin tot een lage waarde teruggebracht.

In de praktijk geschiedt dit meestal met een geconcentreerde oplossing van natriumsulfiet. Het verdient de voorkeur om de kobaltkatalysator vooraf in het bassin op te lossen.

De optimale concentratie bedraagt: 3×10^{-6} M, dit is ca. 0,7 mg CoCl₂ · 6 H₂O/l of ca. 0,8 mg CoSO₄ · 6H₂O/l.

Veel lagere kobaltconcentraties zijn onwerkzaam, terwijl een hogere dosis de Winklerbepaling van het zuurstofgehalte stoort.

De dosering vindt plaats met ingeschakelde beluchter(s).

4.1.1. Reaeratiemethode

Bij de reaeratiemethode in vierkante bassins wordt de theoretische hoeveelheid sulfiet gedoseerd die nodig is om de opgeloste zuurstof weg te nemen + een overmaat om de beluchting tijdens het inpompen en mengen te compenseren. In omloop-systemen moet nog een extra overmaat worden gegeven (20 à 40 %) om te zorgen dat de discontinuïteiten ten gevolge van de eerste maal beluchten (afb. 4) voldoende zijn afgevlakt voordat de monsters moeten worden genomen.

In omloopssystemen dient de doseertijd precies een veelvoud te zijn van de

stroomtijd tussen twee opvolgende ingeschakelde beluchters. Indien de beluchteropstelling asymmetrisch is, dient gedurende een geheel aantal malen de totale omlooptijd te worden gedoseerd.

In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de benodigde hoeveelheden sulfiet in installaties van verschillend type en verschillende grootte.

TABEL II - Benodigde hoeveelheden sulfiet bij de reaeratiemethode.

II.1. laagbelast actief slib; doseertijd 5 minuten

OC (kgO ₂ /h)	V (m ³)	Na ₂ SO ₃ · 0 H ₂ O (kg)	(m ³ opl. 15 %)
50	1.000	170	1,1
100	2.000	340	2,3
250	5.000	680	4,5

II.2. oxidatiesloot (pasveercondities); doseertijd 15 minuten

OC (kgO ₂ /h)	V (m ³)	Na ₂ SO ₃ · 0 H ₂ O (kg)	(m ³ opl. 15 %)
112	5.000	815	5,4
225	10.000	1.630	10,9
450	20.000	3.260	21,7

4.1.2. Sulfietmethoden

Beide sulfietmethoden zijn alleen toepasbaar in beluchtingsbassins die als ideaal gemengd kunnen worden beschouwd. Bij de sulfietoxydatiemethode wordt een zodanige overmaat sulfiet in het bassin gebracht dat naast de tijd die nodig is voor het doseren en mengen voldoende sulfiet aanwezig is om gedurende 30 à 40 minuten de afname van het sulfietgehalte te meten.

TABEL III - Benodigde hoeveelheden sulfiet bij de sulfietmethoden.

III.1. sulfietoxydatiemethode; doseertijd 10 min.; meettijd 40 min.

OC (kgO ₂ /h)	V (m ³)	Na ₂ SO ₃ · 0 H ₂ O (kg)	(m ³ opl. 15 %)
50	1.000	425	2,8
100	2.000	850	5,7
250	5.000	1.700	11,3

III.2. sulfietdosering (stationair); proefduur 1½ uur; c_∞ = 30 %

OC (kgO ₂ /h)	V (m ³)	Na ₂ SO ₃ · 0 H ₂ O (kg)	(m ³ opl. 15 %)
50	1.000	510	3,4
100	2.000	1.020	6,8
250	5.000	2.550	17,0

Bij de permanente sulfietdosering wordt het meeste sulfiet gedoseerd tijdens de aanloopperiode, die 1 à 1,5 uur kan duren. De per tijdseenheid benodigde hoeveelheid wordt bepaald door de capaciteit van de beluchter en de limietwaarde die men kiest voor het zuurstofgehalte. Een overzicht van de bij deze methoden benodigde hoeveelheden sulfiet voor

beluchtingssystemen in laagbelaste actief slibinstallaties van verschillende grootte wordt gegeven in tabel III.

4.1.3. Stationaire meting (sprongmethode)

Bij de sprongmethode wordt de keuze van het doseerpunt bepaald door de tijd die nodig is om het sulfiet gelijkmatig te verdelen over de dwarsdoorsnede van het been en de tijd voor de reactie met zuurstof.

De menging is het traagste proces. Daarom dient te worden gedoseerd voor of bij een ingeschakelde beluchter, die als mengerg wordt gebruikt.

Het sulfiet dient om:

1. de opgeloste zuurstof in het aanstromende water weg te nemen;
2. de zuurstofoverdracht door de (meng-)beluchter te compenseren.

In een carouselcircuit van 20.000 m³ met een OC van 120 kg O₂/h per beluchter is een sulfietstroom vereist van circa 40 kg/min.

Bij een meetduur van 40 minuten is dus per meting circa 1.300 kg water vrij natriumsulfiet nodig.

4.1.4. Aantal uit te voeren metingen per bassinvulling

Om beïnvloeding van de zuurstofoverdracht door opgeloste zouten uit te sluiten, wordt er in het algemeen van uitgegaan dat het zoutgehalte niet hoger mag zijn dan 1500 à 2000 mg/l.

Bij een startwaarde van 500 mg/l mag dus slechts ca. 1000 mg/l zout worden toegevoegd.

Uit de per meting benodigde hoeveelheden sulfiet kan worden afgeleid dat bij de reaeratiemethode, onafhankelijk van de bassinvorm, ca. 180 mg/l zout per meting wordt gedoseerd, zodat dan maximaal 6 à 9 metingen mogelijk zijn. Bij de sprongmethode in een pasveercarroussel neemt het zoutgehalte per meting met ca. 70 mg/l toe. Bij beide sulfietmethoden bedraagt de toename per meting ca. 500 mg zout/l.

4.2. Meet- en analysemethoden

4.2.1. Zuurstofgehalte

Het verloop van de reaeratiecurve wordt vastgelegd door het zuurstofgehalte als functie van de tijd te meten.

Bij toepassing van een stationaire methode wordt pas nadat de evenwichtstoestand is bereikt het zuurstofgehalte gemeten.

Het gehalte aan opgeloste zuurstof kan worden bepaald volgens de Winklermethode en ook direct worden gemeten met behulp van een membraan-elektrode. De plaats van monsternamen, resp. opstelling

van de elektrode dient met zorg te worden gekozen. Het is aan te bevelen om met tenminste twee monsterpunten te werken. Meting met een elektrode geeft direct een uitkomst en maakt tevens registratie mogelijk, waardoor de tijdwaarneming vervalt. We introduceren echter een ijkingsprobleem, terwijl de apparatuur onbruikbaar wordt bij storingen in de elektrische voeding, iets wat op bouwterreinen niet denkbeeldig is.

De tijdwaarneming bij de Winklers en beluchting van het monster tijdens de monsternamen kunnen problemen opleveren. Een te hoge dosering van kobalt ($> 3 \times 10^{-6} \text{ M}$) stoort, zoals gezegd de de Winklerbepaling.

Ook al worden de metingen t.b.v. de berekening van de OC verricht met de Winklerbepaling, dan nog is het aan te bevelen om het verloop van de meting met een elektrode te volgen. Op deze wijze kunnen de meest gunstige tijdstippen voor de monsternamen worden bepaald.

4.2.2. Andere bepalingen

Ter controle van de waterkwaliteit kunnen voorafgaand aan de meting nog aanvullende analyses worden uitgevoerd.

Te noemen zijn:

zoutgehalte, droogrest, COD, BOD, Cl^- , p- en m-getal, hardheid en oppervlakte-spanning.

Tijdens de meting worden de watertemperatuur en de luchtdruk vastgelegd.

4.3. Meting van het zuurstofverbruik van actief slib

Bij metingen in actief slib (Kayser-methode) dient naast het zuurstofgehalte het zuurstofverbruik van het slib te worden vastgelegd.

Om er zeker van te zijn dat deze grootheid tijdens de uitvoering van de OC-meting zo goed mogelijk constant blijft, worden de metingen bij voorkeur uitgevoerd met slib dat in de endogene fase verkeert.

De bepaling van het zuurstofverbruik geschiedt door een monster te trekken uit het beluchtingsbassin, dit te beluchten en na afsluiting van de lucht de snelheid te meten waarmee het zuurstofgehalte afneemt.

Een groot probleem is om de omstandigheden in het meetflesje exact gelijk te houden aan de condities in het bassin. Zo is het moeilijk om een monster met een representatief slibgehalte te trekken.

Omdat bij lage zuurstofgehalten de ademingsnelheid afneemt, mag bij een OC-meting in actief slib het zuurstofgehalte nergens in het bassin beneden 1 à 2 mg O_2/l dalen.

5. Bepaling van de beluchttingsconstante

5.1. Niet-stationaire metingen

Uit vgl. (5):

$$c^t = c^s [1 - \exp \{-k_L a \cdot (t - t_0)\}]$$

kan de formule worden afgeleid waarmee de waarde van de beluchttingsconstante wordt bepaald:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \log \frac{c^s - c^1}{c^s - c^2} = \frac{k_L a}{2,303} = \text{tg } \alpha \quad (19)$$

De verzadigingswaarde van zuurstof ($c^s_{\text{O}_2}$) wordt tijdens de uitvoering van de meting apart bepaald.

Door de grootheid ($c^s/c^s - c$) uit te zetten tegen de tijd t kan uit de helling van de rechte die dan ontstaat de waarde van de beluchttingsconstante worden berekend (afb. 6).

$$k_L a = 2,303 \cdot \text{tg } \alpha \quad (20)$$

Voor omloopsystemen kan dezelfde procedure worden gevolgd; in dat geval wordt de schijnbare beluchttingsconstante gevonden. Met behulp van de in hoofdstuk 3 genoemde correctieformules (13) en (14) wordt deze omgerekend in de werkelijke beluchttingsconstante.

5.2. Stationaire metingen

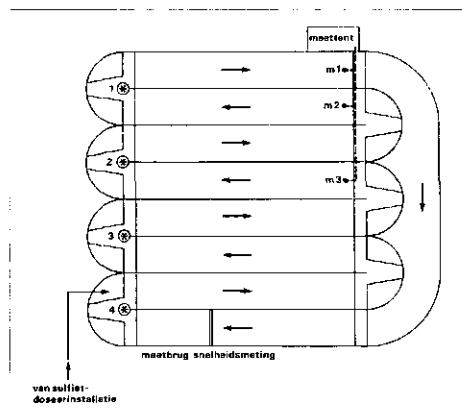
Voor een stationaire meting in een ideaal gemengd bassin kunnen uit de vergelijkingen (10) en (12), afhankelijk van de aard van het zuurstofverbruik, formules voor de berekening van de beluchttingsconstante worden afgeleid.

Voor de Kayser-methode, waarbij de zuurstofverbruikssnelheid direct wordt gemeten (4.3.) levert dit op:

$$k_L a = \frac{R_{\text{O}_2}}{c^s - c^\infty} \quad (21)$$

Bij de methode met permanente sulfiet-

Afb. 5 - Proefopstelling bij de sprongmethode. m_1 , m_2 , m_3 zijn monsterpunten. De OC van de beluchters 1 en 2 wordt gemeten. Beluchter 3 dient als mengbeluchter; beluchter 4 is niet ingeschakeld.



dosering wordt de zuurstofverbruikssnelheid berekend uit de sulfietstroom. Na substitutie volgt:

$$k_L a = \frac{0,2 \cdot q^d_{\text{SO}_3}{}^{2-} \cdot c^d_{\text{SO}_3}{}^{2-}}{(c^s_{\text{O}_2} - c^\infty_{\text{O}_2}) \cdot V} \quad (22)$$

Voor een omloopsysteem is de sprong in het zuurstofgehalte bij de beluchter maatgevend en wordt vgl. (16) gebruikt:

$$k_L a = \frac{q \cdot (c^\infty - c^{\text{in}})}{(c^s - c^\infty) \cdot V} \quad (16)$$

Hierbij heeft c^{in} betrekking op de stroom die de beluchttingszone binnengaat en c^∞ op de stroom die deze zone verlaat.

5.3. Correctiefactoren voor de beluchttingsconstante

5.3.1. α -factor

De beluchttingsconstante is onder meer afhankelijk van de samenstelling van de waterfase. Belangrijke parameters zijn in dit verband het zoutgehalte en het gehalte aan gesuspendeerde stoffen.

Hoewel er enige literatuur is over dit onderwerp is het niet mogelijk om op voorhand een correctiefactor uit de waterkwaliteit te berekenen.

Bij voorkeur voert men een OC-meting uit in 'schoon water' en als dit niet mogelijk is, schat men de α -factor of meet deze in een laboratoriumopstelling.

Hierbij geldt:

$$\alpha = \frac{k_L a \text{ vuil water}}{k_L a \text{ schoon water}} \quad (23)$$

5.3.2. Temperatuurcorrectie

Voor de verrekening van het effect van de temperatuur op de beluchttingsconstante zijn vele correctieformules in omloop.

In afb. 6 is een aantal relaties grafisch weergegeven. Voor een evaluatie van de verschillende formules wordt hier verwezen naar de publikatie van Bakker en Van Sluis [4].

Gezien de grote verschillen waartoe een theoretische benadering van dit probleem leidt, lijkt het gebruik van empirische correctieformules — die vrij goed overeenstemmen — de veiligste aanpak.

Er zijn aanwijzingen dat de intensiteit waarmee de gas- en vloeistoffase met elkaar in contact worden gebracht, een factor is in de invloed van de temperatuur op de stofoverdracht. Derhalve lijkt een nader onderzoek naar de achtergrond van het temperatuureffect en de rol die het beluchttingsysteem (oppervlaktebeluchting of bellenbeluchting) daarbij speelt, zeker op zijn plaats.

6. Meetnauwkeurigheid

6.1. Reaeratiemethode

We onderscheiden hier systematische en toevallige fouten.

Als gevolg van systematische fouten zal de vorm van de reaeratiecurve afwijken van de verwachte e-macht.

Oorzaken kunnen zijn:

- onvolledige omzetting van het sulfiet (kristallen op de bodem van het bassin);
- onvoldoende menging in het beluchtingsbassin;
- variaties in beluchertoerental, dompel-diepte c.q. luchtdebiet;
- vertraging in de response van de elektrode, algemeen: storing van de apparatuur;
- beluchting van de monsters.

De invloed van de toevallige fout in het gemeten zuurstofgehalte kan worden verkleind door meer dan twee punten van de reaeratiecurve voor de berekening te gebruiken (bijv. 8 punten tussen 20 % en 80 % van de verzadigingswaarde). De verzadigingswaarde van zuurstof onder de meetomstandigheden wordt in duplo of in triplo bepaald.

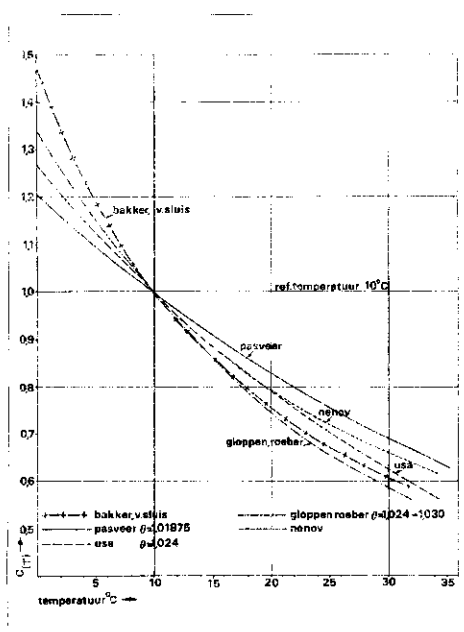
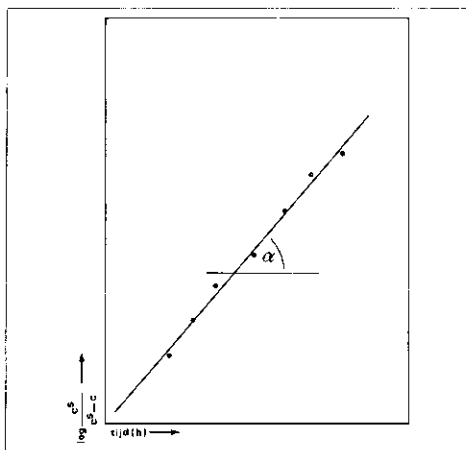
Pöpel [5] wees er op dat de berekening zeer gevoelig is voor fouten in de verzadigingswaarde. Uit de foutenvoortplantingswet van Gauss leidde hij af:

$$\frac{\Delta \text{tg } \alpha}{\text{tg } \alpha} = \frac{c^1 - c^2}{(c^s - c^1)(c^s - c^2)} \cdot \frac{\Delta c^s}{c^s - c^1} \quad (24)$$

Voor $c^1 = 20\%$ en $c^2 = 80\%$ wordt dit:

$$\frac{\Delta \text{tg } \alpha}{\text{tg } \alpha} = -2,7 \cdot \frac{\Delta c^s}{c^s}$$

Afb. 6 - Bepaling van de beluchtingsconstante. $k_L a = 2,303 \cdot \text{tg } \alpha$



Afb. 7 - Verschillende correctiefactoren voor het effect van de temperatuur op de stofoverdrachtsnelheid ($k_L a$).

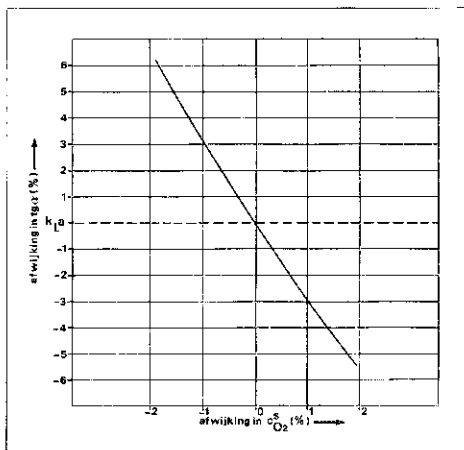
Sweeris [2] komt tot een soortgelijke conclusie.

In beide publicaties is een factor 1/2,3 weggefallen, waardoor het effect van de fout c^s minder ernstig uitvalt.

In afb. 8 is het verband tussen de relatieve fout in de verzadigingswaarde en de afwijking $\text{tg } \alpha$ weergegeven.

Indien de verzadigingswaarde in duplo of in triplo wordt bepaald, dan mag de maximale analysefout worden gesteld op 0,1 mg O₂/l (ca. 1 %). De afwijking in de berekende waarde van de beluchtingsconstante als gevolg van deze analysefout bedraagt dan ca. 3 %.

Afb. 8 - Het effect van variatie van de verzadigingswaarde op de uitkomst van de berekening van de beluchtingsconstante (reaeratiemethode; 10 meetpunten tussen 20 en 80 % van de verzadigingswaarde).



Een en ander is aanleiding om de meting van de verzadigingswaarde met zorg uit te voeren.

De mogelijke fout in de OC-meting volgens de reaeratiemethode is moeilijk op voorhand te berekenen.

Uit een aantal in duplo uitgevoerde praktijkmetingen kan worden afgeleid dat de relatieve meetfout 5 à 10 % bedraagt. Dit houdt in dat voor een nauwkeurige bepaling van de OC de meting tenminste in duplo dient te worden verricht.

6.2. Stationaire methoden

Bij stationaire methoden kunnen dezelfde systematische fouten een rol spelen als boven werden vermeld.

— de omzetting van sulfiet is veel kritischer, daar deze tijdens de meting plaatsvindt;

— de menging is minder belangrijk, alleen zal slechte menging een lange aanlooptijd tot gevolg hebben. In omloopsystemen is dwarsmeting in de benen echter essentieel;

— variaties in de OC worden onmiddellijk zichtbaar via het meetsignaal;

— de reponsiesnelheid van het meet-systeem is veel minder kritisch.

In ideale mixers geldt (vgl. 22):

$$\frac{\Delta k_L a}{k_L a} = \frac{\Delta q^d}{q^d} + \frac{\Delta c_{SO_3}^{2-}}{c_{SO_3}^{2-}} + \frac{\Delta d}{d} \quad (25)$$

$$= 2 + 2 + 5 \approx 10$$

$$= 10 \text{ à } 15 \%$$

q^d : doseerdebiet sulfiet;
 $c_{SO_3}^{2-}$: sulfietgehalte.

In omloopsystemen geldt voor de beluchttingsconstante de volgende foutenvergelijking (vgl. 16):

$$\frac{\Delta k_L a}{k_L a} = \frac{\Delta d}{q} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta d}{d} \quad (26)$$

q : omloopdebiet $\approx 5\%$;

s : concentratiesprong over beluchttingszone $\approx 5 \text{ à } 10\%$;

d : zuurstofdeficiet $\approx 5 \text{ à } 10\%$.

$$\rightarrow \frac{\Delta k_L a}{k_L a} = 15 \text{ à } 25 \%$$

6.3. Samenvatting meetnauwkeurigheid

In het voorgaande is gebleken dat de OC-meting niet bijzonder nauwkeurig kan worden uitgevoerd.

De reaeratiemethode is met een mogelijke fout van 5 à 10 % de nauwkeurigste. Uitvoering van de meting in duplo is echter noodzakelijk.

De sulfietoxidatiemethode en de stationaire meting met sulfiet zijn waarschijnlijk in een vierkant bassin minder nauwkeurig dan de reeratiemethode; er is echter niet voldoende ervaring mee om een standaardafwijking te kunnen berekenen.

De stationaire meting in een omloopstelsel is het minst betrouwbaar, met name wanneer de te meten sprong of het deficit klein is ($< 2 \text{ mg O}_2/\text{l}$).

7. Overzicht van de toepassingsmogelijkheden van de verschillende meetmethoden

De methode die moet worden gebruikt om in een bepaalde installatie een OC-meting uit te voeren wordt in de eerste plaats bepaald door de vorm van het beluchtingsbassin en de capaciteit van het beluchtingsstelsel.

In een aantal gevallen zijn er meer mogelijkheden, zodat de gewenste nauwkeurigheid van de uitkomst en de omvang van het meetprogramma mede in aanmerking kunnen worden genomen.

In tabel IV zijn de mogelijkheden samengevat.

De reeratiemethode en de sulfietoxidatiemethode geven de meest nauwkeurige resultaten. Bij de sprongmethode is de mogelijke fout het grootst.

Voor de sulfietmethoden geldt dat er veel zout aan de bassinhoud wordt toegevoegd, waardoor beperkingen aan het meetprogramma worden gesteld.

8. Samenvatting

De bekende reeratiemethode ('unsteady state method') is niet de enige manier om de OC van een beluchtingsstelsel te meten. Afhankelijk van de aard van de installaties zijn nog een aantal andere methodieken toepasbaar, te weten de sulfietoxidatiemethode ('steady state method'), de Kaysermethode (met actief slib) en verschillende methodieken die gebaseerd zijn op een stationaire situatie tijdens de meting.

De keuze van een bepaalde methodiek wordt meestal geheel bepaald door de combinatie van bassin en beluchtingsinstallatie. Zo is het in lange omloopstelsels niet mogelijk om de reeratiemethode te gebruiken.

Bij de toepassing van sulfietmethoden in vierkante bassins neemt het zoutgehalte per meting zo sterk toe dat slechts een beperkt meetprogramma kan worden uitgevoerd.

Met name in verband met garantiekwesties is de nauwkeurigheid van een OC-meting matig te noemen. De reeratiemethode en de sulfietoxidatiemethode zijn in dit opzicht de beste.

TABEL IV - Toepassingsmogelijkheden van de meetmethoden.

	ideaal gemengd bassin (-gedeelte)		omloopstelsel	
	lage $k_L a$	hoge $k_L a$	kort	lang
niet stationair	reeratiemethode	sulfietoxydatiemethode	reeratiemethode	—
stationair	Kayser sulfietdoserings	sulfietdoserings	—	sprongmethode

— methode niet toepasbaar

Symbolenlijst

Parameters

α	verhouding tussen stofoverdrachtsnelheden in vuil en in schoon water	(—)
c	concentratie in de waterfase zonder index wordt zuurstof bedoeld	(kg/m^3)
d	zuurstofdeficiet	($\text{kg O}_2/\text{m}^3$)
D	diffusiecoëfficiënt van zuurstof in water	(m^2/s)
exp	staat voor e, grondtal natuurlijke logaritmen	
f	correctiefactor	(—)
h	inblaasdiepte	(m)
\ln	natuurlijke logaritme	
$k_L a$	beluchttingsconstante	(h^{-1})
OC	zuurstof toevoer vermogen onder standaardcondities	($\text{kg O}_2/\text{h}$)
q	debiet	(m^3/h)
R	omzettingssnelheid	($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$)
s	verschil in zuurstofconcentratie over de beluchttingszone	($\text{kg O}_2/\text{m}^3$)
t	tijd	(h)
T	temperatuur	($^{\circ}\text{C}$)
V	volume	(m^3)
V_1	volume beluchttingszone	(m^3)
V_2	volume beengedeelte	(m^3)
x	volume fractie zuurstof in gasmengsel	(—)

Indices

d	stroom die gedoseerd wordt
Δ	absolute fout
i_n	inkomende stroom
O_2	opgeloste zuurstof
o	uitgangstoestand
opp	aan het oppervlak
∞	limietwaarde na instelling van het evenwicht
s	verzadigingswaarde
SO_3^{2-}	opgelost sulfiet
t	waarde op tijdstip t
T	temperatuur
uit	uitgaande stroom
v	bassin vorm

Om een enigszins betrouwbare uitkomst te verkrijgen dienen metingen zeker in duplo te worden uitgevoerd.

Auswertung von OC-Versuchen. GWF Wasser, Abwasser 109 (1968) H12 307-311.

6. Kayser, R., *Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen*. Diss. Techn. Hochschule Braunschweig, 1967.

Literatuur

- Pöpel, H. J., *Beluchttingsprocessen*. 11e Vakantiecursus in behandeling van afvalwater, 22 en 23 april 1976, Delft.
- Sweeris, S., *Meting van het zuurstoftoevoer vermogen*. *H₂O*, 2 (1969) 610-642, 649.
- Sweeris, S., Trietsch, R., *Bepaling van het zuurstoftoevoer vermogen (OC) in carrouzels*. *H₂O*, 7 (1974) 91-4 en 106-111.
- Bakker, K., Sluis, J. W. van, *De invloed van de temperatuur op de zuurstofoverdracht in schoon water bij puntbeluchting*.
- Pöpel, H. J., *Ein einfaches Verfahren zur*

