

Beproeving van het RotoFlow-beluchtingsysteem

1. Inleiding

In het ontwerp van een tweetal rioolwater-zuiveringsinrichtingen, nl. te Hulst en Twello, wordt de mogelijkheid bestudeerd de geplande beluchtingstanks uit te voeren volgens het RotoFlow-systeem. Dit systeem berust op het inblazen van fijne luchtbelletjes in een ronde tank die is voorzien van een of meerdere propellers. De propellers zorgen voor een rotatie in de tank, waardoor het slib in suspensie blijft en de zuurstofoverdracht wordt begunstigd.

Vanwege de geringe ervaring in Nederland



IR. J. H. J. M. VAN DER GRAAF
Witteveen + Bos
Raadgevend Ingenieursbureau
Deventer

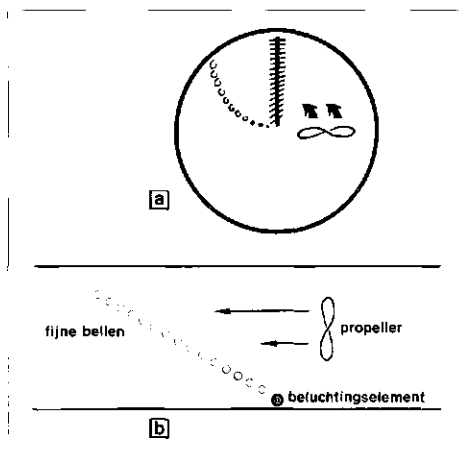
met belletjesbeluchtingsystemen in het algemeen en met het RotoFlow-systeem in het bijzonder is besloten een beproeving uit te voeren aan een bestaande installatie; deze mogelijkheid werd geboden op de industriële zuiveringsinrichting van de Glücksklee Milchgesellschaft te Bad Essen in West-Duitsland.

De beproeving is uitgevoerd in de periode van 29 - 31 juli 1976 door het ingenieursbureau Witteveen + Bos in nauwe samenwerking met vertegenwoordigers van het Zuiveringsschap Veluwe, het Waterschap Hulster Ambacht, de Gemeenschappelijke Technologische Dienst van de Zeeuwse Waterschappen en de firma Menzel, de fabrikant van het RotoFlow-systeem. Aangezien het tijdsbestek kort was, kon slechts een beperkt aantal metingen worden uitgevoerd. Hierbij was het echter mogelijk toch een redelijke indruk van de werking van het systeem te verkrijgen. De beproeving viel uiteen in vermogensmetingen ter bepaling van de blowerprestaties in relatie met het leidingsysteem en beluchtingselementen, snelheidsmetingen ter karakterisering van de werking van de propeller en in metingen ter bepaling van het zuurstofinbrengvermogen van het systeem.

2. Situatie

2.1. RotoFlow-systeem

Het RotoFlow-beluchtingsysteem (zie afb. 1), berust in principe op een door TNO uitgevoerd onderzoek [1, 2] waaruit bleek, dat belletjesbeluchting in een horizontaal stromend medium hogere zuurstofinbrengprestaties levert dan in een stilstaand medium. Dit gegeven is verder uitgewerkt door de fa. Menzel, die tot de volgende



Afb. 1 - Schematisch overzicht van de werking van het RotoFlow-systeem.
a. onder in de tank worden fijne luchtbelletjes ingeblazen, een propeller zorgt voor een tangentiële stroming van het water in de tank;
b. als gevolg van de horizontale vloeistofstroming wordt het belletjesdrijf afgebogen.

conceptie is gekomen:

In een ronde tank vindt beluchting plaats door middel van een fijne belletjesbeluchtingsysteem. Tevens wordt het water door een verticale propeller met relatief grote diameter (2 m) en laag toerental (ca. 30 omw/min) in een roterende beweging gebracht en gehouden.

Het voordeel is drieledig:

a. Door de functiesplitsing — beluchting/beweging actief slib — kan onder minimale beluchttingsintensiteiten toch het actief slibmengsel in suspensie worden gehouden. Bij laagbelaste actief-slibinstallaties, uitgevoerd bijvoorbeeld in rechthoekige tanks, is de hoeveelheid lucht per volume eenheid zodanig laag dat het slib moeilijk in suspensie kan worden gehouden (of het beluchttingsysteem moet worden uitgevoerd met een sterke walswerking — spiral flow — hetgeen nadelig is voor het zuurstofinbrengrendement).

b. Door de stroming van het slibwatermengsel wordt de beluchttingsweg verlengd hetgeen een gunstige invloed heeft op het beluchttingsrendement.

c. Nevelvorming, spatten en geluidsemisatie treden praktisch niet op.

2.2. Beluchtingstank

De industriële zuiveringsinstallatie van Glücksklee bestaat uit twee actief-slibinstallaties, één met oppervlaktebeluchters en één volgens het RotoFlow-systeem. Deze laatste installatie bestaat uit een ronde beluchtingstank en een nabezinkingstank. De beluchtingstank (afmetingen: diameter 18 m, hoogte 4 m, zijwaterhoogte max. 3,60 m) is voorzien van een fijne belletjes-

beluchttingsysteem met luchtvoorziening door middel van twee blowers.

2.3. Apparatuur

a. Blowers.

De luchttoevoer naar de beluchtingstank wordt verzorgd door twee blowers (type Aerzener G.Ma 12.5); de aandrijving geschiedt door een elektromotor (vermogen 14,5 kW) met twee toerentallen. Bij een tegendruk van 0,36 atmosfeer is voor het lage toerental (blower 1175 opm) het luchtdebiet 3,4 m³/min; voor het hoge toerental (blower 2350 opm) is het luchtdebiet 10,8 m³/min.

b. Beluchtingselementen.

De blowers zijn gekoppeld aan een centrale luchtleiding die over de brug naar het midden van de tank loopt. Daar wordt de lucht verdeeld over vier luchtstrengen. Door middel van een afsluiter kan een dergelijke luchtstreng worden afgesloten. Door de luchtstreng gaat de lucht naar de bodem van de tank; via de beluchttingselementen, 20 stuks per streng, wordt de lucht in de tank ingeblazen. De beluchttingselementen, type Brandol 60, zijn van een keramisch materiaal en zijn buisvormig (lengte ca. 1 m, diameter ca. 70 mm).

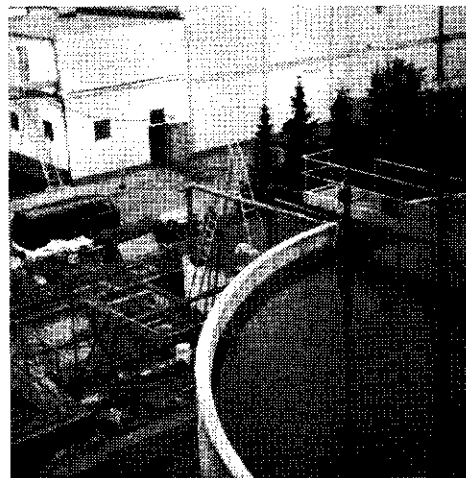
c. Propeller.

In de tank is aan de brug één propeller gemonteerd. De propeller heeft een diameter van ca. 2 meter en wordt met een toerental van 30 opm aangedreven door een onderwatermotor (vermogen 3 kW). De propeller bevat vier schoepen. De spoed van deze schoepen kan in de praktijk worden ingesteld. Met behulp van een lier kan de propeller omhoog worden gehaald.

2.4. Situatie tijdens de beproevingen

De beluchtingstank is ten behoeve van de

Overzicht zuiveringsinrichting van Glücksklee, Bad Essen (rechts onder beluchtingstank).



beproeving gevuld met bronwater.

De waterhoogte in de tank bedroeg tijdens de metingen 3,52 m.

Tijdens de beproevingen stonden alle afsluiters in de aan- en afvoerleidingen van het watergedeelte dicht, zodat ook geen waterverlies werd waargenomen.

3. Vermogensmetingen

3.1. Uitvoering

Tijdens de beproeving zijn regelmatig vermogensmetingen uitgevoerd.

De metingen zijn uitgevoerd in de schakelkast in het blowergebouw. Het opgenomen vermogen kon niet direct worden gemeten. Uit metingen van de stroomsterkte en de spanning kon het opgenomen vermogen wel worden berekend.

Voor de verschillende schakelmogelijkheden van de blowers werd het opgenomen vermogen van de elektromotoren bepaald; zowel van de blowers als van de propeller.

De waterdiepte tijdens de metingen bedroeg 3,52 m zodat de hoogte van de waterkolom boven de elementen ca. 3,37 m was.

De afstand schakelkast - elektromotoren was ca. 3 m (dit in verband met eventuele kabelverliezen); bij deze geringe afstand konden de kabelverliezen worden verwaarloosd.

Tijdens de metingen werd ook de persdruk gemeten.

3.2. Resultaten

De resultaten van de vermogensmetingen zijn weergegeven in tabel I.

Bij de berekening van het opgenomen vermogen is uitgegaan van een waarde voor $\cos \phi$ van 0,65 voor laag toerental en 0,80 voor hoog toerental.

De persdruk was bij lage luchthoeveelheid ca. 0,36 ato. Bij hogere luchthoeveelheden nam de persdruk toe (max. 0,39 ato).

TABEL I - Vermogensmetingen.

Meting nr.	Blower in bedrijf *	Meting op	Persdruk ato	Opgenomen vermogen kW ¹	Berekend asvermogen kW ²	Theoretisch asvermogen kW ³
OC1	1 LT	1	0,36	6,5	5,4	4,0
OC2	1 HT + 2 HT	1	0,39	10,7	8,9	8,9
		2	0,39	10,7	8,9	8,9
OC3	1 HT	1	0,37	10,6	8,8	8,6
OC4	1 HT + 2 LT	1	0,38	10,5	8,7	8,7
		2	0,38	6,5	5,4	4,2

* LT = laag toerental, HT = hoog toerental.

¹ Berekend uit: $N_1 = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \phi$ ($\cos \phi = 0,65$ voor LT en 0,80 voor HT).

² Berekend uit: $N_2 = \eta \cdot N_1$ (η , motorrendement = 0,83).

³ N_3 volgens opgave fabrikant.

Bij een effectieve waterhoogte van 3,37 m (ofwel 0,337 ato tegendruk) betekent dit dat de weerstand van de leidingen en beluchtingselementen ca. 0,02 - 0,05 ato bedroeg.

3.3. Verwerking

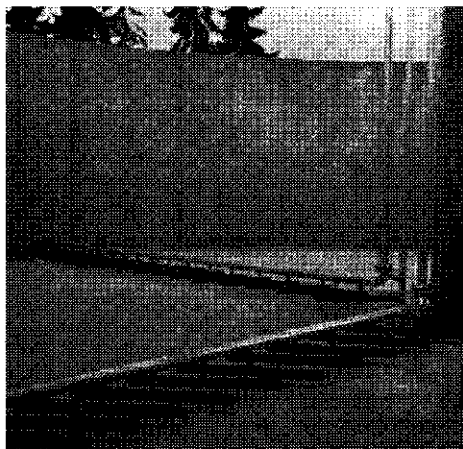
Aan de hand van de metingen kunnen een aantal berekeningen worden uitgevoerd, waarvan de resultaten tevens in tabel I zijn vermeld.

Uit de waarde voor het opgenomen vermogen kan het asvermogen worden be-

rekend; het rendement van de elektromotoren moet hiertoe worden geschat. Met behulp van gegevens van de elektromotoren wordt het rendement gesteld op 83 %.

Anderzijds kan uit de prestatiegrafieken van de blowers het asvermogen worden afgeleid, mede als functie van de persdruk. Bij vergelijking van de uit de meting berekende asvermogens met de theoretische asvermogens blijkt dat voor het hoge toerental redelijke overeenstemming wordt gevonden; voor het lage toerental is de overeenkomst minder, hetgeen waarschijnlijk veroorzaakt wordt doordat de $\cos \phi$ lager is dan is aangenomen (dus lager dan 0,65).

Twee rijen beluchtingselementen.



3.4. Vermogen propeller

Aan de propeller zijn ook metingen uitgevoerd wat betreft het opgenomen vermogen. Het geïnstalleerde vermogen van de propeller bedroeg 3 kW.

Door middel van verdraaiing van de schoepen kan de pompwerking worden verhoogd, hetgeen ook tot uiting komt in het opgenomen vermogen.

Tijdens de beproeving werd een opgenomen vermogen gemeten van ca. 3 kW.

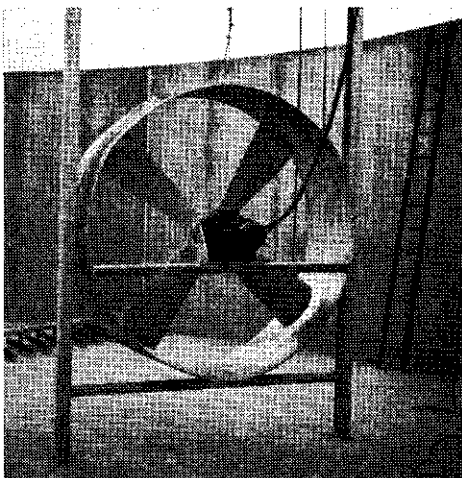
4. Snelheidsmetingen

In de beluchtingstank treedt door de werking van de propeller een ronddraaiende, tangentiële, stroming op.

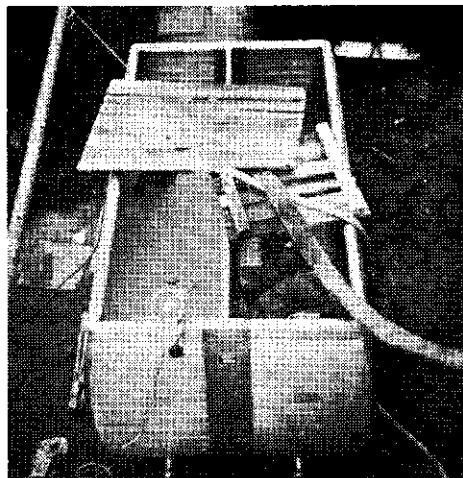
Uit waarnemingen bleek, dat deze stroming zich vrij snel (binnen ca. 10 min) instelde. De snelheidsmetingen zijn verricht met behulp van een Ott-molen, type 10.152, bevestigd aan een lange lat; door meting van het aantal omwentelingen per tijdseenheid kon de bijbehorende snelheid worden berekend.

Gemeten is de tangentiële snelheidscomponent op ca. 1,25 m van de bodem van de tank op diverse plaatsen op de brug; de metingen werden uitgevoerd bij de diverse beluchtingsituaties; bij deze metingen werd veelal een fluktuërend beeld verkregen; de snelheid was niet gelijkmatig, maar soms hoog, soms laag.

Propeller.



Oplosvat met roerder en doseerpomp.



Waarschijnlijk moet de oorzaak hiervan worden gezocht in de invloed van de propeller die aan de brug, dus niet ver van de meetpunten af, gemonteerd is. Voor de resultaten kan worden verwezen naar tabel II. Vooral de resultaten van de meting bij één blower op laag toerental worden verstoord door het onregelmatige stromingspatroon.

TABEL II - Snelheidsmetingen; tangentiële snelheidskomponent op 1,25 m van de bodem op 0,50, 2,25, 4,50 en 6,75 cm van de tankwand (resp. punt 1, 2, 3 en 4).

Blowers in bedrijf	Snelheden in tangentiële richting m/s				gem.
	1	2	3	4	
1 LT	0,24	0,14	0,25	0,09	0,18
1 HT	0,18	0,47	0,42	0,09	0,29
1 HT + 2 LT	0,26	0,22	0,47	0,11	0,27
1 HT + 2 HT	0,18	0,21	0,41	0,11	0,23

Uit de metingen blijkt, dat de snelheid over de doorsnee niet konstant is maar kan variëren; aan de binnenkant worden veelal de laagste snelheden gemeten.

Tevens kan duidelijk worden gemaakt dat de snelheid vermindert naarmate meer lucht in de tank wordt geblazen; dit duidt erop dat de luchtinblazing leidt tot een bellen gordijn met een aanzienlijke weerstand.

Uit visuele waarnemingen bleek, dat ook de verschuiving, tussen de plaats van luchtinblazing en de plaats van uitrede van de bellen aan het oppervlak, groter was bij laag luchtdebiet dan bij hoog luchtdebiet. Bij beluchting met één blower op laag toerental was de verschuiving ca. 1/4 tank, bij beluchting met twee blowers op hoog toerental ca. 1/8.

Wat betreft minimale snelheden aan de bodem kan worden vermeld dat in de meeste gevallen waarden groter dan 0,20 m/s worden gevonden.

Aangaande de verticale stijgsnelheid van de lucht kunnen ook globale berekeningen worden uitgevoerd. Bij geringe beluchting wordt deze berekend op 0,15 m/s, bij intensieve beluchting op ca. 0,20 m/s.

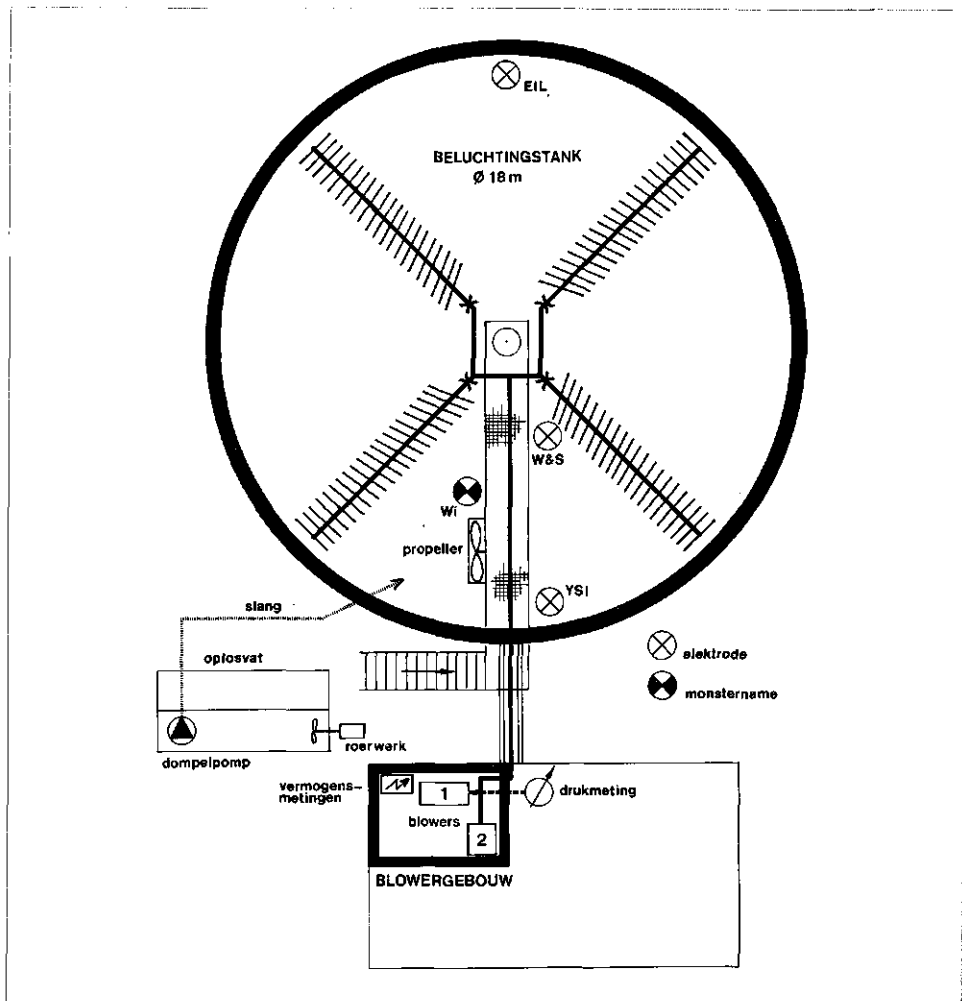
In de situatie met beluchting door één blower hoog toerental en de propeller uit, d.w.z. geen tangentiële stroming, is met de Ott-molen getracht de verticale stijgsnelheid van het water te meten in de bellenkolom boven een streng beluchtingselementen; gemeten is ca. 0,25 m/s; uit de meting volgt dat de luchtstijgsnelheid t.o.v. het water in dit geval meer dan 0,25 m/s bedraagt.

5. OC-metingen

5.1. Opzet van de metingen

Voor de meting van het zuurstofinbrengvermogen van het beluchtingssysteem, de zgn. OC, werd gebruik gemaakt van de reaëratie methode [3].

De methode komt neer op het zuurstofloos



Afb. 2 - Situatie van de RotoFlow-beluchtingstank te Bad Essen tijdens de beproevingen.

maken van het water in de tank door toevoeging van sulfiet en vervolgens de stijging van de zuurstofconcentratie in de tijd te volgen met één of meerdere zuurstofelektrodes en met de chemische methode volgens Winkler. Op een aantal aspecten wordt nader ingegaan (zie afb. 2).

a. Water.

De tank was gevuld met bronwater. Een gedeelte van het bronwater was in de fabriek reeds gezuiverd (de fabriek heeft eigen watervoorziening). De kwaliteit van het bronwater was uitstekend, het bevatte geen zwevende of bezinkbare stoffen en was zeer helder.

Voorafgaande aan de OC-metingen is het water gedurende een halve dag belucht,

terwijl tijdens de OC-metingen het water regelmatig is gecontroleerd en geanalyseerd (zie tabel III).

Tevens is na de beproevingen op laboratoriumschaal onderzocht of het toegepaste bronwater invloed heeft op de beluchtingsprestaties.

Daartoe is de volgende proef uitgevoerd:

— leidingwater waaraan toegevoegd enig kobaltsulfaat wordt belucht in een beker-glas door een aquariumpompje; sulfiet wordt toegevoegd; het zuurstofgehalte, gemeten met een zuurstofelektrode, daalt tot nul; na enige tijd stijgt het zuurstofgehalte en gaat langzaam naar de verzadigingswaarde; dit resulteert in een bepaalde waarde voor het zuurstofinbrengvermogen: OC (leidingwater);

TABEL III - Analysegegevens van het gebruikte water.

		voor OC1	na OC1	na OC2	na OC3	na OC4	na OC5	na OC6
indamprest	mg/l	950			1160			1530
CZV	mg/l	8			9			14
chloride	mg/l	205	209	206	210	209	210	210
sulfaat	mg/l	123	205	270	370	480	570	710
ijzer driewaardig	mg/l		0,03					0,04

— deze proef wordt herhaald maar dan met het bronwater in plaats van leidingwater; ook dit levert een OC op : OC (bronwater);

— uit de metingen bleek, dat er geen verschillen tussen de OC (leidingwater) en OC (bronwater) optreden.

b. Sulfiëtdosering.

Voor iedere meting moest 100 kg watervrij natriumsulfië worden opgelost in ca. 1,5 m³ water.

Dit gebeurde in een oplosvat (0,6 m x 2,0 m x 1,6 m); toegevoegd werden 2 zakken van 50 kg in ca. 1,5 m³ water. Het oplossen werd versneld door toepassing van een roerder (ca. 1,5 kW).

Binnen een half uur is het sulfië opgelost, waarbij slechts een zeer gering gedeelte achterbleef als een harde aankoeking.

Met behulp van een pomp werd de sulfiëtoplossing bij aanvang van de proef in de beluchtingstank gepompt. De tijdsduur van de dosering was ca. 5 minuten.

Vooraf is aan het water in de tank ca. 0,8 kg kobaltsulfaat (CoSO₄ · 7 H₂O) toegevoegd. De sulfiëdosering vond plaats terwijl alleen de propeller in werking was; na de dosering vond nog gedurende ca. 10 minuten opmenging plaats, zodat overal het zuurstofgehalte tot nul werd teruggebracht.

Vervolgens is de beluchting aangezet op de gewenste stand. In de meeste gevallen duurde het nog 5 à 10 minuten voordat het zuurstofgehalte in de tank begon te stijgen.

c. Zuurstofmetingen.

De zuurstofconcentratie werd op verschillende manieren en plaatsen gemeten.

Meetpunten:

EIL: EIL elektrode; ca. 1,80 m van de bodem, ca. 1,00 m van de kant; registratie door middel van recorder.

W & S: W & S elektrode; ca. 2,80 m van de bodem, op de brug ca. 4 m van het midden.

YSI: YSI elektrode; ca. 2,00 m van de bodem, op de brug ca. 2 m van de kant.

Wi: monsterpunt ten behoeve van zuurstofbepaling volgens Winkler; door middel van een kontinu werkende slangenpomp (ca. 0,5 - 1,0 l/min) werden monsters getrokken ca. 2 m boven de bodem, op de brug ca. 5,5 m van de kant.

Door toepassing van een aangepaste zuigmond aan de monsterleiding werd het meetrekken van bellen nagenoeg volledig voorkomen.

Tijdens iedere OC-meting werden ongeveer 10 Winkler-bepalingen gedaan met tussenpozen van 1,5 tot 5 minuten.

d. Verdere metingen.

De temperatuur van het water werd bij iedere OC-meting bepaald.

Tevens vonden snelheids- en vermogensmetingen plaats (zie hoofdstuk 3 en 4).

5.2. Wijze van berekening

De gemeten curves, ontstaan bij stijging van het zuurstofgehalte, worden als volgt verwerkt.

Op het tijdstip *t* wordt gemeten de zuurstofconcentratie *C*. Hieruit wordt berekend $\log(C^*_s - C)/C^*_s$; hierin is *C**_s de verzadigingswaarde van de zuurstofconcentratie bij de heersende omstandigheden.

(*C**_s is in dit geval groter dan de normale verzadigingswaarde *C*_s, wat wordt veroorzaakt door het feit dat de zuurstofoverdracht niet aan het bovenvlak maar overal in de tank plaatsvindt.)

Wordt nu deze waarde uitgezet voor verschillende waarden van *t* dan ontstaat er een rechte lijn. De helling van deze lijn (absolute waarde) is *tgα* (in 1/h).

De waarde van *tgα* is grafisch te bepalen maar wordt hier bepaald met behulp van de methode der kleinste kwadraten (meestal in het gebied van 80 % tot 30 % deficiet).

Vervolgens kan het zuurstofinbrengvermogen worden berekend met de formule:

$$OC = C_s \cdot 2,303 \cdot V \cdot tg \alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}} \cdot \frac{C^*_s}{C_s}$$

waarin is:

OC zuurstofinbrengvermogen in kg/h (onder standaardcondities);

*C**_s verzadigingswaarde zuurstofconcentratie bij 10 °C in kg/m³ = 11,3 · 10⁻³ kg/m³;

V totaal volume tank in m³;

$\sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}}$ correctie diffusieconstante voor temperatuur *T*;

$\frac{C^*_s}{C_s}$ correctiefactor voor de verzadigingswaarde die met het systeem kan worden bereikt.

Hierna wordt de specifieke zuurstofoverdracht berekend uit:

$\eta_{O_2} = \frac{OC}{Q_L}$

waarin:

η_{O_2} de specifieke zuurstofoverdracht in g O₂/m³ lucht;

*Q*_L het luchtdebiet in m³ lucht/h.

TABEL V - Resultaten OC-metingen.

OC nr.	T °C	$\sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}}$	$\frac{C^*_s}{C_s}$	<i>tgα</i> 1/h	OC kg O ₂ /h	<i>Q</i> _L m ³ /h	η_{O_2} g O ₂ /m ³ totaal per m ³	N blowers kW totaal	rendement kg O ₂ /kWh
1	13,9	0,9301	1,16	0,692	17,4	282	61,7 18,3	6,5 9,5	1,8
2	13,8	0,9318	1,16	2,425	61,1	1344	45,5 13,5	21,4 24,4	2,5
3	13,9	0,9301	1,16	1,457	36,6	678	54,0 16,0	10,6 13,6	2,7
4	13,9	0,9301	1,16	1,896	47,7	948	50,3 14,9	17,0 20,0	2,4
5	13,4	0,9388	1,16	0,952	24,2	678	35,7 10,6	10,6 10,6	2,3
6	13,8	0,9318	1,16	1,538	38,8	678	57,2 17,0	10,6 13,6	2,8

5.3. Uitvoering

In totaal zijn 6 OC-metingen uitgevoerd. Bij verschillende luchthoeveelheden zijn metingen uitgevoerd:

- OC1, een blower op laag toerental (min.);
- OC2, twee blowers op hoog toerental (max.);
- OC3, een blower op hoog toerental;
- OC4, een blower op laag en een blower op hoog toerental;
- OC5, een blower op hoog toerental, zonder propeller;
- OC6, duplo van OC3.

5.4. Uitwerking

Bij de uitwerking van de metingen werden eerst de berekeningen uitgevoerd ter bepaling van de *tgα* bij een en dezelfde proef met de verschillende meetmethoden (zie tabel IV).

In tabel IV is tevens een overzicht gegeven van de spreiding ten opzichte van het gemiddelde (o.a. door berekening van de standaarddeviatie).

TABEL IV - *tgα*, bepaald met verschillende methoden. *tgα* in 1/h

OC nr.	EIL	W & S	YSI	Wi	Gem.
1	0,710	0,660	0,708	0,690	0,692
2	2,499	2,340	2,418	2,442	2,425
3	1,497	1,410	1,476	1,446	1,457
4	2,011	1,860	1,884	1,830	1,896
5	1,040	0,999	0,873	0,895	0,952
6	1,719	1,638	1,530	1,266	1,538

Onderlinge verschillen; gemiddelde is 100.

OC nr.	EIL	W & S	YSI	Wi	Gem.	st. dev.
1	102,6	95,4	102,3	99,7	100	3,3
2	103,1	96,5	99,7	100,7	100	2,7
3	102,7	96,8	101,3	99,2	100	2,6
4	106,1	98,1	99,4	96,5	100	4,2
5	109,2	104,9	91,7	94,0	100	8,4
6	111,8	106,5	99,5	82,3	100	12,8

Uit vergelijking van de verschillende meetpunten blijkt dat de standaarddeviatie bij de metingen ca. 5 % bedraagt, alleen bij OC6 zijn de afwijkingen groter.

In tabel V staan tenslotte de eindberekeningen van het zuurstofinbrengvermogen, OC, en de specifieke zuurstofinbreng, η_{O_2} .

5.5. Interpretatie

a. Spreiding.

De verschillen tussen de waarden voor τ_{α} , bepaald met de verschillende meetmethoden, zijn zodanig dat het gemiddelde met een redelijk grote betrouwbaarheid kan worden bepaald. Bij dit aantal meetpunten (nl. 4 stuks) betekent bijv. een standaarddeviatie van 5 % dat met een betrouwbaarheid van 90 % de gemiddelde waarde ligt tussen 94 en 106 (bij een berekende waarde van 100).

Bij de uitvoering van een duplo meting, nl. meting OC6 ten opzichte van OC3 kan het verschil tussen twee metingen worden beoordeeld; OC3 geeft 36,6 kg O₂/h, OC6 geeft 38,8 kg O₂/h; het verschil bedraagt 6 %.

Bij de verdere verwerking is het zinvol voor deze beluchtingsituatie uit te gaan van het gemiddelde van OC3 en OC6, nl. 37,7 kg O₂/h.

b. Luchthoeveelheid - specifieke overdracht.

Ter beoordeling van de specifieke overdracht kan tabel VI worden opgesteld:

TABEL VI - Vergelijking specifieke zuurstof-overdracht en specifiek luchtdebiet.

OC nr.	Q _L m ³ /h	OC kg O ₂ /h	η_{O_2} g O ₂ /m ³ · m ³ /h	Q _L ¹ m ³ /h · m _B
1	282	17,4	18,3	3,5
3/6	678	37,7	16,5	8,5
4	948	50,3	14,9	11,9
2	1344	61,1	13,4	16,8

Uit deze tabel blijkt dat de specifieke zuurstofoverdracht die aangeeft de hoeveelheid zuurstof die per ingeblazen eenheid lucht wordt overgedragen afneemt bij een hoger luchtdebiet; tevens is in de tabel de specifieke luchthoeveelheid per m Brandol buis aangegeven (Q_L¹).

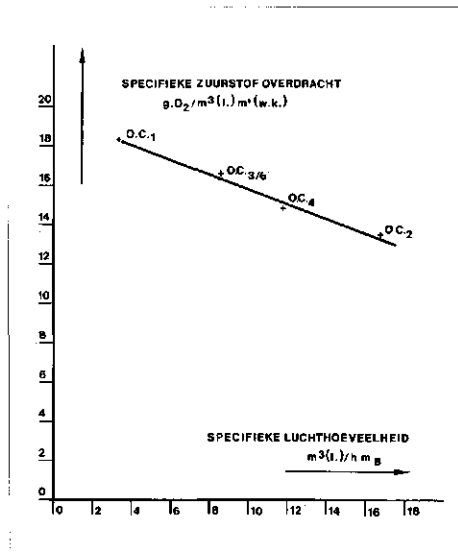
Bij deze metingen wordt dus een afname van de specifieke zuurstofoverdracht waargenomen bij een toename van de specifieke luchthoeveelheid per meter buis (zie ook afb. 3).

Bij beluchting in andere situaties is ook een afname van het rendement gevonden bij toepassing van hogere luchtdebieten (per meter buis).

Dit komt doordat bij hogere debieten grotere bellen worden gevormd die een grotere stijgsnelheid hebben; in de documentatie betreffende Brandol-elementen [4] wordt de volgende relatie tussen luchtdebiet en overdracht opgegeven voor een konventionele beluchtingstank met een zijwaterdiepte van 3,50 m:

Q _L ¹ m ³ /h · m _B	3,5	8,5	11,9	16,8
η_{O_2} g O ₂ /m ³ · m ³ /h	14,0	13,2	12,7	11,9

Uit vergelijking van deze waarden met de hier gemeten waarden blijkt dat voor het



Afb. 3 - Relatie tussen de specifieke zuurstof-overdracht en de specifieke luchthoeveelheid.

RotoFlow-systeem het luchtdebiet een grotere invloed heeft op de specifieke overdracht.

In dit kader moet tevens worden gewezen op de berekeningen, gedaan in hoofdstuk 4, die indiceren dat bij lage beluchtingsintensiteit de stijgsnelheid ca. 0,15 m/s bedraagt en bij hoge intensiteit ca. 0,20 m/s. Dit duidt erop dat bij lage beluchtingsintensiteit kleinere bellen ontstaan dan bij hoge intensiteit.

c. Invloed propeller.

De invloed van de propeller kan worden getoond door vergelijking van de waarden voor de specifieke zuurstofoverdracht bij de metingen OC3 en OC6 (met propeller) met OC5 (zonder propeller).

met propeller	η_{O_2}	16,5 g O ₂ /m ³ · m ³ /h
zonder propeller	η_{O_2}	10,6 g O ₂ /m ³ · m ³ /h

Uit deze waarden blijkt duidelijk de invloed van de propeller. In het geval dat de propeller werkt, is duidelijk waarneembaar dat de bellenkolom door de rotatiebeweging van het water wordt afgebogen hetgeen resulteert in een hogere specifieke zuurstof-overdracht.

In het geval dat de propeller niet werkt is duidelijk een spiral flow beeld in de tank te onderkennen; dit betekent dat boven de elementen zich een opstijgende zuil vormt van lucht en water waardoor de verblijftijd van de bellen in de vloeistof afneemt. Hierdoor is ook de specifieke zuurstof-overdracht lager dan in het eerste geval. Uit de snelheidsmetingen blijkt, dat de opwaartse snelheid in de zuil ca. 0,25 m/s bedraagt; aan de neerwaartse en horizontale snelheden zijn geen metingen verricht omdat de patronen aanzienlijk fluktuëren. Het blijft echter wel de vraag of in deze

situatie de snelheden aan de bodem voldoende groot zijn om bezinking van slib te voorkomen temeer daar de afstand tussen twee beluchtingsstrengen 2 tot maximaal 14 m bedraagt.

d. Specifieke overdracht in vergelijking tot andere situaties

De specifieke overdracht die met het RotoFlow-systeem wordt bereikt is hoog in vergelijking tot andere systemen. Bij metingen aan bellenbeluchtingssystemen in rechthoekige tanks worden zeer uiteenlopende waarden gemeten, o.a. afhankelijk van type en rangschikking van de beluchtingselementen. Wismeyer [5] beschrijft metingen met hetzelfde soort elementen (Brandol 80) die als specifieke overdracht ca. 12-15 g O₂/m³ · m³ opleverden; de hoogste waarde werd gevonden als de verdeling van de elementen over de bodem zo gelijkmatig mogelijk is waardoor de 'spiral flow' beweging werd onderdrukt. In het ATV Handbuch der Abwassertechnik [6] worden als richtwaarden voor de specifieke zuurstof-overdracht gemiddeld 10 g O₂/m³ · m³ en in gunstige situaties 12 g O₂/m³ · m³ gegeven. Uit de uitgevoerde metingen kan de conclusie worden getrokken dat een hoge specifieke overdracht wordt bereikt enerzijds bij een laag luchtdebiet per element, anderzijds door het verhinderen van 'spiral flow' condities waardoor voorkomen wordt dat de bellen voortijdig de vloeistof verlaten.

e. Bruto zuurstofinbrengrendement.

Voor het onderzochte systeem kunnen ook waarden worden berekend aangaande het bruto zuurstofinbrengrendement in leidingwater. Het zuurstofinbrengvermogen moet worden vergeleken met het totale vermogen dat wordt opgenomen, dat wil zeggen de som van propeller en blower(s) (tabel VII).

TABEL VII - Zuurstofinbrengvermogen en rendement.

OC nr.	OC kg O ₂ /h	N kW blowers	NkW prop.	NkW totaal	rendement kg O ₂ /kWh
1	17,4	6,5	3	9,5	1,8
3/6	37,7	10,6	3	13,6	2,8
4	47,7	17,0	3	20,0	2,4
2	61,1	21,4	3	24,4	2,5

Uit de berekeningen blijkt dat voor het zuurstofinbrengrendement redelijk hoge waarden worden gevonden, zeker in vergelijking met de in Nederland veel toegepaste oppervlaktebeluchtingssystemen waarbij de waarden voor het rendement ca. 1,4 - 1,8 O₂/kWh bedragen.

De waarden hebben betrekking op metingen in leidingwater. In het geval van beluchting in het aktiefslibmengsel moet rekening

worden gehouden met enigszins lagere waarden. Voor de α -faktor — verhouding tussen zuurstofoverdracht in actief-slibmengsel en overdracht in leidingwater — wordt voor beluchtenbeluchtingssystemen veel ca. 0,8 aangehouden, zodat in actief-slib het bruto rendement ca. 80 % van dat in leidingwater bedraagt.

Bij bovenstaande tabel moeten nog enige kanttekeningen worden gemaakt:

— het rendement van de elektromotoren is in deze situatie aangehouden op ca. 83 %; hetgeen normaal is voor motoren van deze grootte (15 kW); bij toepassing van grotere motoren (bijv. 40-50 kW) moet een motorrendement van 89-90 % haalbaar zijn; in de laatste situatie stijgt het zuurstofinbrengrendement met ca. 0,2 kg O₂/kWh.

— de hoeveelheid energie van de propeller is aan de hoge kant (3 kW); normaal wordt in RotoFlow-systemen 2 W/m³ als grondslag aangehouden; in dat geval kan het zuurstofinbrengrendement nog met 0,1 - 0,2 kg O₂/kWh stijgen.

— bij toepassing van het lage toerental (OC1 en 4) worden lagere waarden gevonden hetgeen teruggevoerd kan worden op het vrij slecht draaien van de elektromotor van de blower op laag toerental.

Uit deze kanttekeningen kan worden gekonkludeerd dat door nauwgezette beoordeling van genoemde factoren nog aanzienlijke verbeteringen in het zuurstofinbrengrendement mogelijk zijn.

Uit de berekeningen van het zuurstofinbrengrendement komt naar voren dat enerzijds bij lage luchtdebieten de bijdrage van de propeller in het vermogen aanzienlijk is, anderzijds bij hoge luchtdebieten het teruglopen van de specifieke overdracht een rol gaat spelen. Een en ander resulteert in een optimum in het rendement dat in dit geval ligt bij beluchting door middel van één blower op laag toerental (meting OC3/6).

6. Conclusies en aanbevelingen

Uit de beproeving van het RotoFlow-beluchtingssysteem op de zuiveringsinstallatie van de firma Glücksklee te Bad Essen (West-Duitsland) kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. De gemeten waarden voor het opgenomen vermogen van de blowers komen redelijk overeen met de opgave van de blowerfabrikant; bij laag toerental draaien de elektromotoren met vrij slechte rendementen.

2. De propeller geeft aan de vloeistof in de tank een roterende beweging met een

snelheid van 0,20 à 0,30 m/s; bij lage luchtdebieten is de snelheid het hoogst (de afstelling van de schoepen was echter nog niet optimaal).

3. Een relatie kan worden afgeleid tussen het luchtdebiet en de specifieke overdracht. Bij laag luchtdebiet (een blower op laag toerental) is de specifieke overdracht het hoogst, nl. 18,3 g O₂/m³ m¹; bij hoog luchtdebiet (twee blowers op hoog toerental) het laagst 13,4 g O₂/m³ m¹.

Reden hiervan is dat bij hoger luchtdebiet de belLEN groter worden, hetgeen veelal resulteert in een geringere zuurstofoverdracht.

4. De invloed van de propeller op de zuurstofoverdracht moet beschouwd worden te bestaan uit het onderdrukken van de 'spiral flow' beweging door het creëren van een horizontale vloeistofstroming. De belLEN krijgen hierdoor minder kans voortijdig de vloeistof te verlaten.

Bij het afzetten van de propeller wordt een duidelijke 'spiral flow' situatie gekreëerd; de zuurstofoverdracht is dan ca. 60 % van de waarde in het geval dat de propeller werkt.

5. Bij de berekening van het zuurstofinbrengrendement wordt een optimum gevonden bij bedrijf met één blower op hoog toerental (2,8 kg O₂/kWh); reden hiervan is dat bij lager luchtdebiet de invloed van het vermogen van de propeller groter wordt en bij hoger luchtdebiet de zuurstofoverdracht lager wordt.

6. In vergelijking met andere beluchtingssystemen worden bij het RotoFlow-systeem hoge waarden voor de specifieke zuurstofinbrengprestaties bereikt; de specifieke zuurstofoverdracht (13 - 18 gO₂/m³ · m¹) is hoog in vergelijking met andere beluchtenbeluchtingssystemen (normaal ca. 10 - 12 gO₂/m³ · m¹); voor het zuurstofinbrengrendement worden hogere waarden (ca. 2,4 kg O₂/kWh) gevonden dan bijvoorbeeld bij oppervlaktebeluchters (1,4 - 1,8 kg O₂/kWh).

Tenslotte kunnen nog enige aanbevelingen worden geformuleerd:

Verbeteringen in het bruto rendement van de blowers zijn mogelijk door zorgvuldige selectie van de elektromotoren waarbij vooral moet worden gestreefd naar toepassing van grotere vermogens.

De gevonden waarde voor de zuurstofinbreng eigenschappen is specifiek voor de beproefde situatie.

De relatie tussen specifieke zuurstofoverdracht en luchtdebiet (specifiek debiet per element) lijkt bruikbaar voor toepassing op

andere situaties (zie afb. 3).

Wellicht is nog verbetering in de zuurstofoverdracht mogelijk door een gunstigere rangschikking van de beluchtingselementen en de toepassing van andere beluchtingselementen.

Literatuur

1. Pasveer, A. en Sweeris, S. *Een nieuwe ontwikkeling in de persluchtbeluchting*. Delft, IG-TNO, 1972. Werkrapport A 27.
2. Pasveer, A. en Sweeris, S. *A new development in diffused air aeration*. Jour. Water Poll. Control Fed., (1965), No. 9, blz. 1267-1274.
3. Sweeris, S. *Meting van het zuurstoftoevoervermogen*. H₂O, (1969), No. 23, blz. 610-649.
4. Firma Schumacher. *Dokumentatie Brandol beluchtingselementen*. Merkblatt MA-1-D.
5. Wismeyer, A. A. *Beluchting onder hoge druk*. H₂O, (1969), No. 25, blz. 650-659.
6. ATV. *Lehr- and Handbuch der Abwassertechnik*. Berlijn, 1975. Band II, blz. 467.

