

Fijne bellenbeluchting (door middel van schijfvormige beluchtingselementen) op de RWZI Steenwijk

1. Inleiding

De rioolwaterzuiveringsinstallatie te Steenwijk is de eerste installatie van het zuiveringschap West-Overijssel waarbij de in de aeratietanks benodigde zuurstof wordt verkregen door toepassing van het zgn. fijne bellenbeluchtingssysteem. Hoewel reeds tientallen jaren ervaring is opgedaan met fijne bellenbeluchting (zie onder andere de overzichtsartikelen van Wismeijer en De Korte [10, 4]), is de toepassing hiervan in Nederland tot voor kort slechts beperkt gebleven tot enkele installaties (bijv. de

rendement) van deze uitvoering van het fijne bellenbeluchtingssysteem te vergelijken met enerzijds de resultaten van buis-, doos-, en plaatvormige beluchtingselementen en anderzijds de resultaten van oppervlaktebeluchting. Mede met het oog op de door de leveranciers van de beluchtingselementen verstrekte garanties betreffende het zuurstoftoevoerend vermogen, is besloten op de rwzi Steenwijk enige metingen te verrichten aan het daar toegepaste beluchtingssysteem. Teneinde zoveel mogelijk aansluiting te vinden bij de praktijkomstandigheden zijn deze metingen niet met behulp van een proefopstelling verricht (zoals voor bellenbeluchting veelvuldig wordt toegepast), maar is gebruik gemaakt van de nieuw gebouwde aeratietank.

nisch-biologische zuiveringssystemen, waarbij het voorbezonden water in laag belaste aeratietanks wordt behandeld. Het rioolslib wordt gestabiliseerd in gistingstanks en na indikking in de landbouw afgezet. Een 'derde trap' is aanwezig waarmee de fosfaten uit het afvalwater worden verwijderd.

In afb. 1 is de situering van de verschillende onderdelen van de installatie aangegeven.

2.2. Beluchtingssysteem

2.2.1. Aeratietanks (afb. 2)

De beide aeratietanks zijn opgezet volgens het propstroom concept en bestaan ieder uit twee rechthoekige compartimenten, die tegen elkaar zijn gebouwd en via een opening in de gemeenschappelijke wand met elkaar in verbinding staan. De afmetingen van de aeratietanks zijn: breedte 6,75 m, diepte 4,0 m en (ontwikkelde) lengte 100 m.

Voor de beluchting van afvalwater is het principe van de 'tapered aeration' toegepast. Daartoe zijn de aeratietanks in vier sekties van gelijke afmetingen verdeeld (één compartiment bestaat dus uit twee sekties). Gerekend vanaf de kop van de beluchtingstank doorloopt het water achtereenvolgens de sekties 1, 2, 3 en 4, waarin resp. 34 %, 25 %, 25 % en 16 % van de totale beluchtingcapaciteit wordt gebruikt. De benodigde zuurstof wordt ingebracht volgens het fijne bellenbeluchtingssysteem, waarbij de luchttoevoer plaatsvindt door kompressoren.

2.2.2. Kompressoren

Voor de benodigde luchttoevoer zijn een tweetal kompressoren geïnstalleerd (één voor iedere aeratietank); een derde kompressor fungeert als reserve. De kompressoren zijn meertraps centrifugaal kompressoren (fabrikaat VEB PGW, Leipzig; type 3 Na/6 en type 4 Na/4), aangedreven door elektromotoren.

De karakteristieken van de voor normaal bedrijf geïnstalleerde kompressoren (type 3 Na/6), zoals bepaald op de proefstand, zijn weergegeven in afb. 3.

In de zuigleiding van de kompressoren is een luchtfilterkast opgenomen van het fabrikaat Schirp type RO 70/N S 200.

2.2.3. Luchtleidingen

De kompressoren zijn aan de perszijde aangesloten op een centrale luchtleiding (diameter 400 mm, lengte ca. 24 m, materiaal gietijzer) die onder het maaiveld naar de beluchtingstank is gelegd. Vlak voor de beluchtingstank splitst deze leiding zich in twee hoofdleidingen (diameter 300 mm, lengte ca. 40 m, materiaal gietijzer) die over het bordes naar het midden van de beide



IR. M. W. ILSINK
Zuiveringschap West-Overijssel



ING. F. A. BRANDSE
Zuiveringschap West-Overijssel

rwzi's Amsterdam West en Zuid).

De laatste jaren komt de fijne bellenbeluchting als alternatief voor de in ons land traditioneel toegepaste oppervlaktebeluchting meer in de belangstelling. De fijne bellenbeluchting wordt bewerkstelligd in de vorm van poreuze buizen, dozen, platen of schijven. De toepassing van schijfvormige elementen (domes), zoals op de rwzi Steenwijk, is voor Nederland een nieuwe ontwikkeling. Het is daarom van belang de prestaties (zuurstoftoevoerend vermogen,

2. Beschrijving van de rwzi Steenwijk

2.1. Algemeen

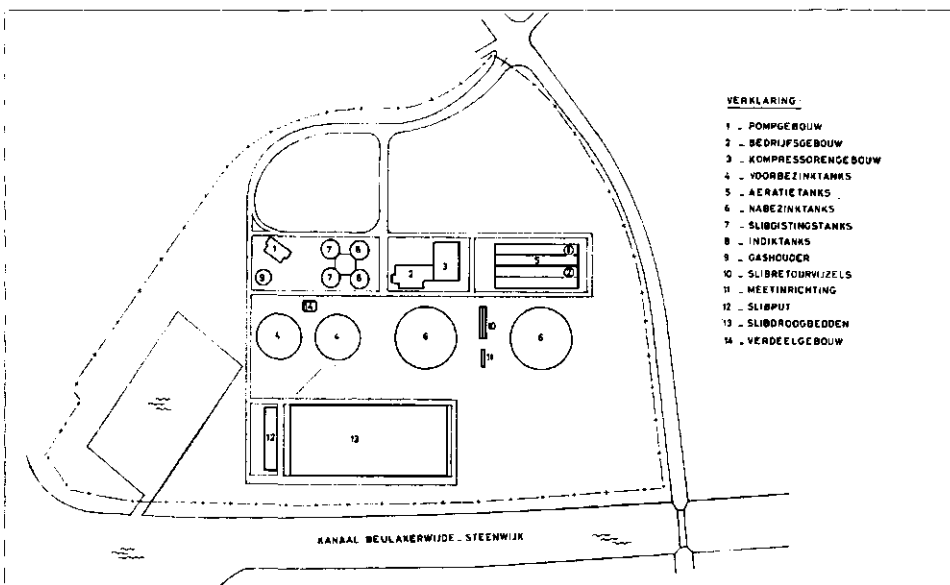
De rwzi Steenwijk is bestemd voor de behandeling van het huishoudelijk en industrieel afvalwater van Steenwijk en vijftien omliggende kernen, die door middel van transportleidingen op de installatie zijn aangesloten.

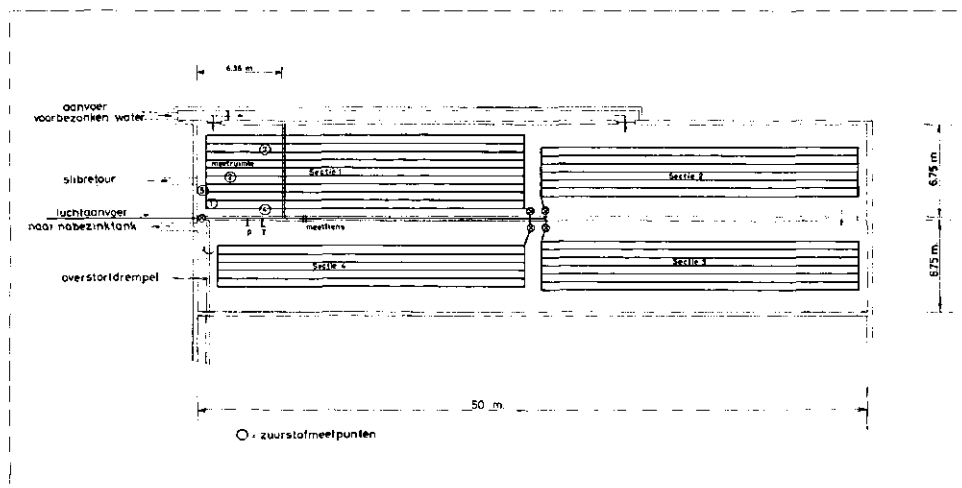
De ontwerpcapaciteit bedraagt 74.000 i.e., terwijl een hoeveelheid afvalwater van 2.250 m³/uur kan worden verwerkt. De installatie is in oktober 1976 in gebruik genomen en vervangt een uit 1961 daterende zuiveringsinrichting.

Met de inbedrijfname van deze installatie en de daarop aangesloten transportleidingen is de sanering van de afvalwaterlozingen in Noord-West Overijssel vrijwel geheel voltooid.

De installatie is in samenwerking met het ingenieursbureau Van Hasselt en De Koning ontworpen volgens het conventionele mecha-

Afb. 1 - Situering van de onderdelen van de rwzi Steenwijk.





Afb. 2 - Schematisch overzicht aeratietank 1.

beluchtingstanks lopen. In deze beide leidingen is een meetflens (fabr. Siemens) opgenomen. Enkele meters voor de meetflenzen zijn aansluitingen aangebracht om de temperatuur en de druk van de gecompriëerde lucht te meten.

Het einde van de hoofdleiding is aangesloten op vier verdeelleidingen (diameter 200 mm, lengte 6 m (materiaal r.v.s.-p.v.c.) die ieder (voorzien van een afsluiter) naar één sectie van de aeratietank leiden. Op de bodem van de tank is de verdeelleiding aangesloten op een aantal luchtstrengen (diameter 110 mm, lengte ca. 24 m, materiaal p.v.c.), die op de vloer van de aeratietank zijn gemonteerd (afstand h.o.h. 500 m). Per sectie varieert het aantal luchtstrengen; in de secties 1, 2, 3 en 4 zijn resp. 10, 7, 7 en 6 luchtstrengen geplaatst (zie afb. 2).

2.2.4. Beluchtingselementen

Op de luchtstrengen zijn de beluchtingselementen gemonteerd (afstand h.o.h. 300 mm). De waterhoogte boven de beluchtingselementen bedraagt 3,80 m. In iedere aeratietank zijn in totaal 2358 beluchtingselementen geplaatst.

Het aantal elementen per sectie varieert met het aantal luchtstrengen en bedraagt voor sectie 1, 2, 3 en 4 resp. 800, 560, 560 en 438. De beluchtingselementen zijn van het fabriekaat Activated Sludge Ltd. Zij bestaan uit een poreuze schijf (materiaal alundum) met een diameter van 17,8 cm en zijn met een messing bout op de luchtstrengen bevestigd. In deze centrale bout bevindt zich een gecalibreerde opening (orifice), waardoor de lucht in de poreuze schijf treedt; hiermede wordt een optimale verdeling van de luchthoeveelheid per beluchtingselement verkregen. Volgens de fabrikant worden de beste resultaten ten aanzien van de zuurstofoverdracht verkregen bij luchthoeveelheden van 0,94 - 1,70 m³/uur per beluchtingselement.

3. OC metingen

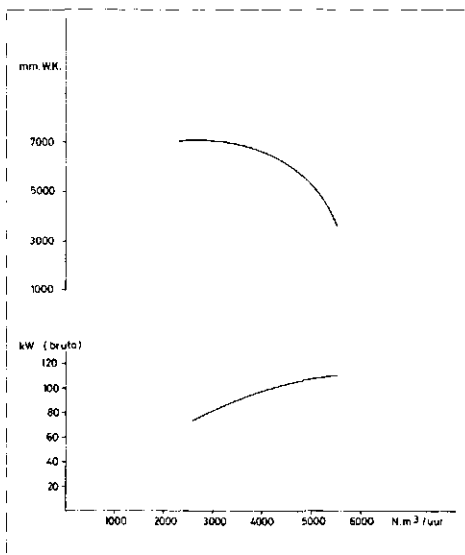
3.1. Inleiding

Als vergelijkingsmaat voor verschillende systemen van oppervlaktebeluchting zijn het zuurstoftoevoerend vermogen — de OC — (uitgedrukt in kg O₂/uur) en het daarmee samenhangende rendement (uitgedrukt in kg O₂/kWh) gebruikelijke grootheden.

Voor de vergelijking van beluchtingssystemen wordt, naast de OC, als karakteristieke maatstaf gehanteerd het zuurstoftoevoerend vermogen gerelateerd aan de per tijdseenheid ingebrachte luchthoeveelheid; men spreekt dan van de specifieke zuurstofoverdracht (uitgedrukt in g O₂/m³). Aangezien de specifieke zuurstofoverdracht de fractie van de met lucht ingeblazen zuurstof die in het water oplost weergeeft, wordt deze parameter ook dikwijls in procenten uitgedrukt.

Uit het zuurstoftoevoerend vermogen en

Afb. 3 - Karakteristieken van kompressor 3 NA/6 bepaald op de proefstand.



het opgenomen vermogen van de compressor wordt het bruto zuurstoftoevoerend vermogen van het systeem bepaald.

Uit verschillende onderzoeken [4, 5, 7, 10] is gebleken dat voor een gegeven fijne beluchtingssysteem, waarbij de inblaasdiepte en de geometrie van de aeratietank vastliggen, de specifieke zuurstofoverdracht in schoon water bepaald wordt door:

- het luchtdebiet per beluchtingselement;
- het aantal beluchtingselementen;
- de rangschikking van de beluchtingselementen.

Bij het fijne beluchtingssysteem, zoals dit op de installatie te Steenwijk is toegepast, is bij verschillende luchtdebieten per beluchtingselement de specifieke zuurstofoverdracht bepaald.

Tevens is de invloed van het aantal en de rangschikking van de beluchtingselementen op de specifieke zuurstofoverdracht nagegaan door zowel in sectie 1 als in sectie 4 van de aeratietank de specifieke zuurstofoverdracht te bepalen.

Het zuurstoftoevoerend vermogen, waarvan de specifieke zuurstofoverdracht is afgeleid, is bepaald in leidingwater volgens de reaeratie methode (non steady state method). Dit komt neer op het zuurstofloos maken van het water door toevoeging van natriumsulfiet in aanwezigheid van cobaltsulfaat als katalysator, waarna, na inschakeling van de beluchting, de toename van het zuurstofgehalte met de tijd wordt gemeten.

3.2. Beschrijving van de meetopstelling

3.2.1. De meetruimte (afb. 2)

Voor de bepaling van het zuurstoftoevoerend vermogen is gebruik gemaakt van een afgesloten gedeelte van sectie 1 van aeratietank 1. Om verschillende redenen (benadering ideaal mengende tank, verdeling sulfiet) is gekozen voor een vrijwel vierkante meetruimte die werd verkregen door plaatsing van een waterdichte houten wand (bestaande uit watervast multiplex) op 6,36 m van de kop van de aeratietank 1. Onderin de houten wand is een afsluiter geplaatst welke noodzakelijk was voor het opvullen van de ruimten aan weerszijden van de wand.

De breedte van de aeratietank ter plaatse van de meetruimte is 6,70 m. De natte inhoud van de meetruimte bedraagt bij een waterhoogte van 4,0 meter 170,3 m³ (het volume van de luchtstrengen en beluchtingselementen is verwaarloosd).

In de proefruimte bevinden zich 10 luchtstrengen. Op elke streng zijn 20 beluchtingselementen gemonteerd (in totaal 200 elementen). Zoals uit afb. 2 blijkt zijn de beluchtingselementen niet volkomen regel-

matig over het bodemoppervlak verspreid, de afstand van de zijwanden van de aeratietank tot de buitenste luchtstrengen bedraagt 1,10 m. In de meetruimte kan de rangschikking van de beluchtingselementen zoals deze in sectie 4 van de beluchtingstank bestaat, worden nagebootst door de beluchtingselementen gemonteerd op vier luchtstrengen (aan weerszijden de twee buitenste) af te blinden (er resteren dan nog 120 elementen). De beluchtingselementen gemonteerd in aeratietank 1 waren ongebruikt; direct na de montage zijn ze alleen in contact geweest met schoon water.

3.2.2. Zuurstofmeetapparatuur

Het zuurstofgehalte werd met enige zuurstofmeters en nat chemisch volgens Winkler op verschillende plaatsen gemeten. De in afb. 2 aangegeven meetpunten zijn in onderstaand staatje omschreven.

Meetpunt 1	O ₂ meter (W&S mod. 3000) Op ca. 1 m van de bodem met registratie door recorder.
Meetpunt 2	O ₂ meter (W&S mod. 300) Op ca. 2 m van de bodem.
Meetpunt 3	O ₂ meter (W&S mod. 300) Op ca. 3 m van de bodem met registratie door recorder.
Meetpunt 4	O ₂ meter (EIL) Op ca. 3,5 m van de bodem.
Meetpunt 5	Zuurstofbepaling volgens Winkler Op ca. 3,5 m van de bodem.

Voor de zuurstofbepaling volgens Winkler werden monsters getrokken met behulp van een continu werkende slangenpomp, waarvan de zuigzijde was aangesloten op een trechter, waarmee werd getracht het meevoeren van bellen te voorkomen.

3.2.3. Luchtdebietmeting

De luchtdebietmeting vond plaats met behulp van de meetflens, die gemonteerd is in de hoofdleiding van aeratietank 1. De in de hoofdleiding heersende temperatuur werd gemeten met een ingebouwde thermometer. De druk ten opzichte van de atmosferische luchtdruk werd gemeten met een U-vormige kwikmanometer. Met behulp van bovenstaande gegevens is door gebruikmaking van de algemene gaswet het gemeten luchtvolume omgerekend naar een temperatuur van 0 °C en een druk van 760 mm Hg (Nm³). Het toegevoerde luchtdebiet naar de meetruimte werd gevarieerd door in aeratietank 1 meer of minder sekties in gebruik te nemen, dan wel inschakeling van 1 of 2 kompressoren. Verondersteld werd dat het totale geleverde luchtdebiet gelijkmatig over de beluchtingselementen wordt verdeeld.

3.3. Werkwijze

De meetruimte, alsmede het resterende gedeelte van sectie 1 en sectie 2, werden

gevuld met leidingwater tot een niveau van 4,0 m. De sekties 3 en 4 werden gevuld met oppervlaktewater tot een niveau van 4,0 m. Aan de inhoud van de proefruimte werd een hoeveelheid van ca. 0,1 kg CoSO₄ toegevoegd. Na enkele uren beluchten werd de verzadigingsconcentratie volgens Winkler bepaald.

Voor iedere OC meting werd een hoeveelheid natriumsulfiet (in opgeloste vorm) toegevoegd die bepaald werd uit de hoeveelheid nodig om de aanwezige zuurstof te binden, vermeerderd met een geschatte hoeveelheid om de zuurstof te binden die wordt ingebracht tijdens het toevoegen en mengen van het natriumsulfiet.

Na instelling van het gewenste luchtdebiet werd het oplopen van het zuurstofgehalte tegen de tijd gevolgd tot ca. 90 % van de gemeten verzadigingswaarde. Tevens werd de watertemperatuur bepaald.

Na afloop van elke proef werd de luchttoevoer naar de meetruimte gestopt en werd na het tot rust komen van het water de exacte waterhoogte bepaald. Tevens is het water uit de meetruimte bemonsterd en onderzocht op het gehalte aan cobalt, detergents, indamprest en de CZV. Na enkele metingen is, afhankelijk van de hoeveelheid gedoseerd natriumsulfiet, de inhoud van de meetruimte ververst.

3.4. Wijze van berekening

Uit de afname van het zuurstofdeficiet (bepaald uit de gemeten verzadigingswaarde en de op tijdstip *t* gemeten concentratie *c*) tegen de tijd kan het zuurstoftoevoerend vermogen worden bepaald, volgens de door Sweeris [8] gegeven formule

$$OC = 2,303 c_s^* V \operatorname{tg} \alpha \sqrt{\frac{D_{10}}{D_T}}$$

OC: zuurstoftoevoerend vermogen onder standaard condities bij een temperatuur van 10 °C en druk van 760 mm Hg (kg O₂/uur).

c_s^{}*: zuurstofverzadigingsconcentratie die de betreffende beluchting zal hebben bij 10 °C en een atmosferische luchtdruk van 760 mm Hg (kg O₂/m³).

V: inhoud van de meetruimte (m³).

*tg*α: de helling van de lijn bepaald door de waarde $\log\left(\frac{c_s}{c_s - c}\right)$ uitgezet tegen de tijd.

D₁₀: diffusieconstante van zuurstof in water bij 10 °C.

D_T: diffusieconstante van zuurstof in water bij *T* °C.

Door de overdruk in de op grotere diepte aanwezige luchtbelletjes is de zuurstofverzadi-

gingswaarde bij een bepaalde temperatuur groter dan die welke overeenkomt met de standaard verzadigingswaarde zoals die in de gebruikelijke tabellen wordt gegeven. De waarde van *c_s^{*}* is (tenzij de watertemperatuur 10 °C is) dan ook niet experimenteel te bepalen.

Wanneer wordt aangenomen dat de oververzadiging bij beluchting onder standaard condities even groot is als onder de proefomstandigheden kan de waarde van *c_s^{*}* worden afgeleid uit de volgende betrekking

$$c_s^* = \frac{\text{gemeten } c_s \text{ bij } T \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{standaard } c_s \text{ bij } T \text{ } ^\circ\text{C}} \times \text{standaard } c_s \text{ bij } 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(de invloed van de heersende luchtdruk op de *c_s^{*}*, alsmede de invloed van opgeloste zouten op de zuurstofverzadigingswaarde wordt verwaarloosd).

De eerste term van het bovenstaande product geeft de oververzadigingsfaktor aan die met het systeem kan worden bereikt.

Uit het zuurstoftoevoerend vermogen wordt de specifieke zuurstofoverdracht (*η* O₂) bepaald volgens

$$\eta \text{ O}_2 = \frac{OC}{Q} \text{ (kg O}_2\text{/Nm}^3\text{)}$$

waarbij *Q* het aan de meetruimte toegevoerde luchtdebiet is (Nm³/uur). Om de invloed van de inblaasdiepte te elimineren drukt men de specifieke zuurstofoverdracht dikwijls uit per m inblaasdiepte (kg O₂/Nm³ · m).

Uitgaande van een hoeveelheid van 300 g O₂ per Nm³ geleverde lucht kan men de specifieke zuurstofoverdracht eveneens opgeven in het percentage dat van de ingebrachte zuurstof in oplossing gaat.

3.5. Uitvoering

In totaal zijn 12 OC metingen uitgevoerd. De eerste zes metingen werden verricht volgens de rangschikking van de beluchtingselementen overeenkomstig sectie 1 van de beluchtingstank. Na OC 6 werd het aantal en de rangschikking van de beluchtingselementen conform sectie 4 gewijzigd. Een en ander kon, met hulp van een amateur duiker, worden gerealiseerd zonder dat het bassin leeg gemaakt behoefde te worden. Tevens zijn door de duiker enige onderwater foto's gemaakt waarvan er enkele in dit artikel zijn opgenomen.

3.6. Resultaten

De resultaten van de OC metingen uitgevoerd voor de situatie sectie 1 zijn samengevat in tabel I, de resultaten voor de situatie sectie 4 zijn vermeld in tabel II. In tabel III zijn de analyse-resultaten van het beluchte water na iedere OC meting weergegeven.

TABEL I - Resultaten OC metingen situatie sectie 1.

	OC 1	OC 2	OC 3	OC 4	OC 5	OC 6
Luchtdebiet per dome (Nm ³ /uur)	0,808	1,146	1,525	2,312	3,190	4,879
Luchtdebiet naar meetruimte (Nm ³ /uur)	161,7	229,2	304,9	462,5	638,1	975,7
Temperatuur van het water (°C)	6	6	9	9	9	9
Gemeten zuurstofverzadigingswaarde (mg/l)	14,8	14,8	13,6	13,2	13,2	13,2
Oververzadigingsfactor	1,18	1,18	1,17	1,14	1,14	1,14
meetpunt 1	2,18	3,13	3,77	5,46	7,61	9,88
meetpunt 2	2,11	2,90	4,16	6,17	7,61	12,04
tgα meetpunt 3	—	—	4,19	5,71	6,66	12,76
meetpunt 4	2,13	3,05	3,66	6,04	8,14	11,83
meetpunt 5	2,23	3,08	—	6,59	8,85	14,80
gemiddelde + standaarddeviatie	2,16 ± 0,06	3,04 ± 0,10	3,95 ± 0,27	5,99 ± 0,44	7,77 ± 0,81	12,26 ± 1,78
OC meetruimte (kg O ₂ /uur)	12,21	17,18	20,91	30,78	39,92	62,99
Specifieke zuurstofoverdracht (g O ₂ /Nm ³)	75,5	75,0	68,6	66,6	62,6	64,6
Specifieke zuurstofoverdracht (%)	25,2	25,0	22,9	22,2	20,9	21,5
Specifieke zuurstofoverdracht per meter inblaasdiepte (g O ₂ /Nm ³ · m)	19,9	19,7	18,1	17,5	16,5	17,0

TABEL II - Resultaten OC metingen situatie sectie 4.

	OC 7	OC 8	OC 9	OC 10	OC 11	OC 12
Luchtdebiet per dome (Nm ³ /uur)	0,718	1,175	1,765	2,667	3,467	5,329
Luchtdebiet naar meetruimte (Nm ³ /uur)	86,2	141,0	211,9	320,0	416,0	639,5
Temperatuur van het water (°C)	6	6	9	9	8	8
Gemeten zuurstofverzadigingswaarde (mg/l)	14,4	14,4	13,4	13,9	13,2	13,3
Oververzadigingsfactor	1,15	1,15	1,16	1,20	1,11	1,12
meetpunt 1	1,332	1,871	2,09	3,23	3,93	5,84
meetpunt 2	1,247	1,657	2,15	3,34	4,41	6,47
tgα meetpunt 3	1,264	1,738	2,14	3,34	4,44	6,44
meetpunt 4	1,252	1,760	2,19	3,40	4,30	6,29
meetpunt 5	1,375	1,935	2,47	3,48	4,90	7,06
gemiddelde + standaarddeviatie	1,294 ± 0,257	1,729 ± 0,111	2,21 ± 0,15	3,36 ± 0,09	4,40 ± 0,35	6,42 ± 0,44
OC meetruimte (kg O ₂ /uur)	7,12	9,51	11,47	18,09	22,23	32,68
Specifieke zuurstofoverdracht (g O ₂ /uur)	82,6	67,5	54,1	56,5	53,4	51,1
Specifieke zuurstofoverdracht (%)	27,5	22,5	18,0	18,8	17,8	17,0
Specifieke zuurstofoverdracht per meter inblaasdiepte (g O ₂ /Nm ³ · m)	21,7	17,8	14,3	15,0	14,2	13,6

TABEL III - Analyseresultaten.

	Detergenten (mg/l Manoxol)	CZV (mg/l)	Cobalt (mg/l)	Indamp- rest (mg/l)
OC 1	0,01	8	0,57	850
2	0,02	4	0,55	565
3	0,01	3	0,67	536
4	0,01	2	0,44	1912
5	0,05	2	0,41	1366
6	0,01	4	0,38	2562
7	0,02	8	0,14	1192
8	0,03	10	0,16	1455
9	0,01	4	0,62	646
10	<0,01	4	0,38	912
11	0,01	4	0,16	1012
12	0,02	3	0,21	1461

3.7. Bespreking van de resultaten

3.7.1. Zuurstofverzadigingswaarde

Zoals uit de tabellen I en II blijkt liggen de gemeten zuurstofverzadigingswaarden voor verschillende temperaturen en luchtdebieten een faktor 1,11 - 1,20 hoger dan de overeenkomstige standaard zuurstofverzadigingswaarde zoals deze wordt weergegeven in de gebruikelijke tabellen.

Over de diepte van de meetruimte konden bij inwerking zijnde beluchting geen verschillen in de zuurstofverzadigingswaarde worden aangetoond. De gemeten verzadi-

gingswaarde komt goed overeen met de theoretische verzadigingswaarde zoals die op de halve inblaasdiepte zou gelden.

In vergelijking met oppervlaktebeluchting, waar gewoonlijk de zuurstofoververzadiging kan worden verwaarloosd, is bij bellenbeluchting de drijvende kracht van de zuurstofoverdracht, — het zuurstofdeficiet — groter.

3.7.2. Spreiding van de waarnemingen bij de verschillende meetpunten

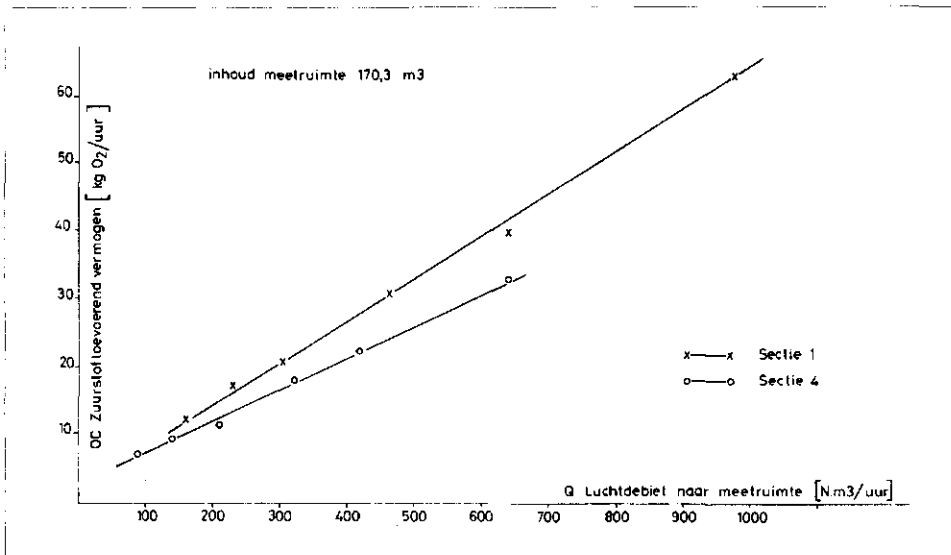
Uit de tabellen I en II blijkt dat voor alle OC metingen de tgα van meetpunt 5 (zuurstofbepaling volgens Winkler) groter is dan de tgα van de overige meetpunten. Dit verschil neemt globaal toe naarmate het ingestelde luchtdebiet groter is. De oorzaak van deze afwijking moet wellicht gezocht worden in de traagheid waarmee de zuurstofmeters reageren, dan wel in de mogelijkheid dat er ondanks de getroffen voorzieningen luchtbellens aanwezig waren in de monstern ten behoeve van de Winkler bepalingen. Bovendien kan het vrij hoge gehalte aan cobalt de Winkler bepaling hebben gestoord [3, 7].

Overigens blijkt uit de opgegeven standaard deviaties behorende bij de gemiddelde tgα

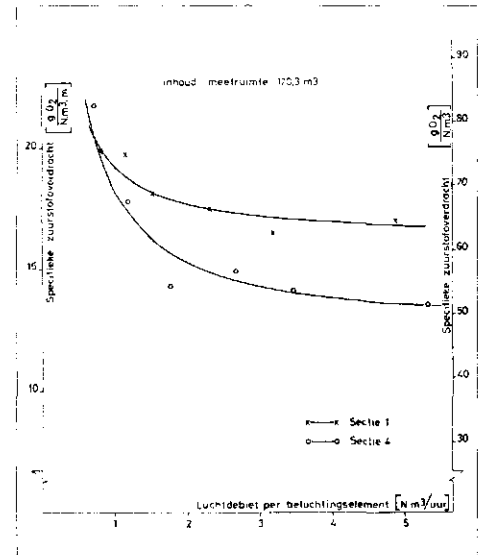
van de meetpunten dat de onderlinge verschillen gering zijn. Een zuurstofgradiënt over de diepte van de meetruimte is dan ook niet waarschijnlijk. Dit wijst er op dat als gevolg van circulatiestromingen de inhoud van de proeftank gedurende de meting goed gemengd was.

3.7.3. De invloed van het luchtdebiet op het zuurstoftoevoerend vermogen en de specifieke zuurstofoverdracht

In afb. 4 is het zuurstoftoevoerend vermogen gevonden voor sectie 1 en sectie 4, uitgezet tegen het luchtdebiet. Hieruit blijkt dat voor beide secties een rechtevenredig verband tussen beide parameters wordt gevonden. Een dergelijke evenredigheid wordt ook door Wismeijer [10] beschreven. Extrapolatie naar een luchtdebiet gelijk aan nul, toont aan dat beide rechten niet door de oorsprong gaan. Dit kan verklaard worden uit de diffusie van zuurstof vanuit de atmosfeer in het wateroppervlak. Uit de vergelijking van beide rechten (sectie 1: $OC = 0,063 Q + 2$; sectie 4: $OC = 0,047 Q + 3$) blijkt dat dit verschijnsel bij geringe luchtdebieten van betekenis is. Naarmate het naar de meetruimte toegevoerde luchtdebiet vermeerderd kan deze bijdrage aan



Afb. 4 - Verband tussen het zuurstoftoevoerend vermogen en het luchtdebiet toegevoerd naar de meetruimte.



Afb. 5 - Verband tussen de specifieke zuurstofoverdracht en het luchtdebiet per beluchtingselement.

de hoeveelheid opgeloste zuurstof gaandeweg verwaarloosd worden.

Een inzicht in de efficiency van de zuurstofoverdracht verschaft afb. 5, waar de specifieke zuurstofoverdracht is uitgezet tegen het luchtdebiet per beluchtingselement. Uitgaande van het beschreven rechtlijnige verband tussen het zuurstoftoevoerend vermogen en het toegevoerde luchtdebiet vinden we de in afb. 5 aangegeven hyperbolische curven.

In het gebied van de geringe luchtdebieten per beluchtingselement (tot ca. 2,0 Nm³/uur) wordt, naarmate het luchtdebiet toeneemt, een sterke afname van de specifieke zuurstofoverdracht gevonden. Voor luchthoeveelheden van ca. 2 - 5 Nm³/uur is de specifieke zuurstofoverdracht vrijwel onafhankelijk van het luchtdebiet per beluchtingselement.

Een indruk van het beluftpatroon wordt gegeven door de foto's 1, 2 en 3.

3.7.4. Het verschil in zuurstofvoerend vermogen en specifieke zuurstofoverdracht tussen sectie 1 en sectie 4

Uit afb. 4 blijkt dat naarmate het luchtdebiet naar de meetruimte wordt vermeerderd, het zuurstoftoevoerend vermogen in sectie 1 in toenemende mate groter is dan in sectie 4. Het verloop van het verschil in specifieke zuurstofoverdracht tussen sectie 1 en sectie 4, zoals weergegeven in afb. 5, sluit hierbij aan. Voor geringe luchtdebieten per beluchtingselement (ca. 0,8 Nm³/uur) zijn de verschillen in specifieke zuurstofoverdracht tussen beide secties te verwaarlozen. Bij hogere luchtdebieten per beluchtingselement is de specifieke zuurstofoverdracht in sectie 1 in toenemende mate groter dan in sectie 4. Voor lucht-

hoeveelheden van ca. 2 - 5 Nm³/uur blijft het verschil in specifieke zuurstofoverdracht vrijwel constant. Een en ander hangt samen met het verschil in aantal en rangschikking van de beluchtingselementen.

In tegenstelling tot sectie 1, waar de beluchtingselementen vrijwel volledig gelijkmatig over de bodem zijn verdeeld, zijn in sectie 4 minder beluchtingselementen in het midden van de tankbodem geplaatst. Bij beluchting wordt in beide secties een spiraalachtige beweging van het water (double spiral flow) teweeggebracht (zie foto 4) waardoor het denkbaar is dat de

contacttijd tussen luchtbellens en water (en dus de specifieke zuurstofoverdracht) ongunstig wordt beïnvloed. Uit visuele waarnemingen is gebleken dat voor overeenkomstige hogere luchtdebieten (boven de 1 Nm³/uur) de spiralfloei in sectie 4 heftiger is dan in sectie 1, hetgeen een verklaring zou kunnen zijn voor de geringere specifieke zuurstofoverdracht bij de rangschikking volgens sectie 4.

3.7.5. Bruto zuurstoftoevoerrendement

Het bruto zuurstoftoevoerrendement (kgO₂/kWh) bij een zeker luchtdebiet is

Foto 1 - Beluftpatroon in sectie 1 bij een luchtdebiet per beluchtingselement van ca. 0,5 Nm³/uur (foto W. W. Chr. Kolvoort).



bepaald uit het produkt van de specifieke zuurstofoverdracht ($\text{kg O}_2/\text{Nm}^3$) en de specifieke opbrengst van de kompressor (Nm^3/kWh). Voor de geïnstalleerde centrifugaal compressoren blijkt het opgenomen vermogen en het luchtdebiet beperkt terug te regelen door smoren in de pers- of zuigleiding (hierdoor wordt evenwel het rendement van de kompressor ongunstiger, hetgeen blijkt uit een daling van de specifieke opbrengst).

Foto 2 - Bellenpatroon in sectie 1 bij een luchtdebiet per beluchtingselement van ca. $2 \text{ Nm}^3/\text{uur}$ (foto W. W. Chr. Kolvoort).

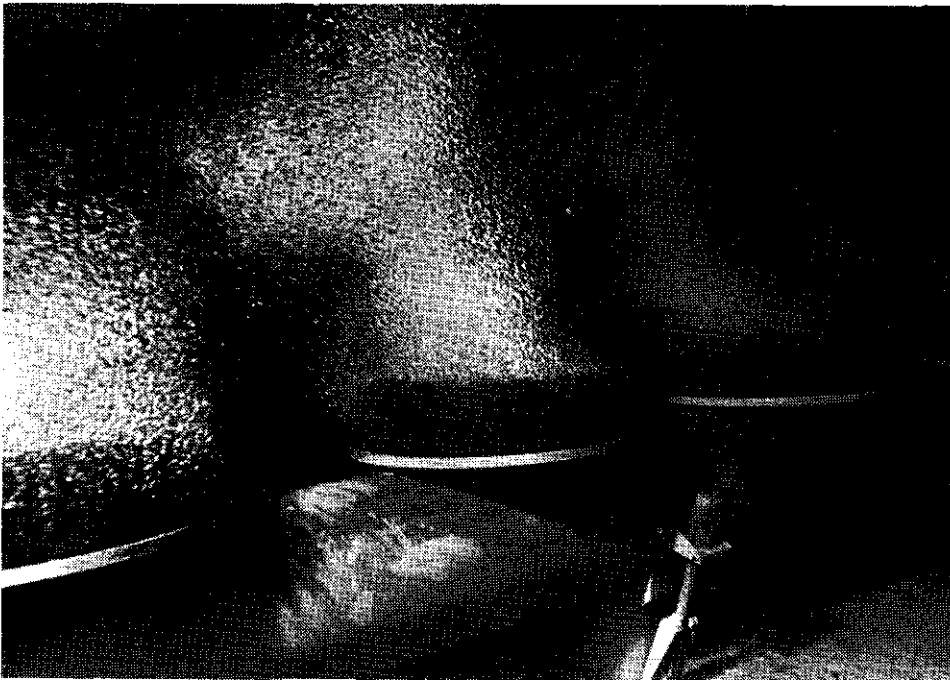


Foto 3 - Bellenpatroon in sectie 1 bij een luchtdebiet per beluchtingselement van ca. $3 \text{ Nm}^3/\text{uur}$ (foto W. W. Chr. Kolvoort).



Bij die OC metingen waarvan het ingestelde luchtdebiet binnen het werkgebied van de kompressor (type 3 Na/6) ligt, zijn de bruto zuurstofrendementen bepaald (tabel IV). Hierbij is gebruik gemaakt van de proefstandgegevens (afb. 3) en werd het opgenomen vermogen dat nodig is voor beluchting van de meetruimte bepaald uit de verhouding van het totale luchtdebiet tot het luchtdebiet naar de meetruimte. Er kunnen zich twee situaties voordoen:



Foto 4 - Overzichtsfoto van de bellenbaan in sectie 1 bij een luchtdebiet per beluchtingselement van ca. $0,5 \text{ Nm}^3/\text{uur}$ (foto W. W. Chr. Kolvoort).

1 kompressor op 1 aeratietank (d.w.z. 2358 beluchtingselementen) en 1 kompressor op 2 aeratietanks (d.w.z. 4716 beluchtingselementen).

Uit tabel IV blijkt dat de specifieke opbrengst van de kompressor een overheersende invloed heeft op de waarde van het bruto zuurstoftoevoerrendement. Voor geringe luchtdebieten per beluchtingselement wordt weliswaar een hoge specifieke zuurstofoverdracht gevonden, doch wegens de geringe specifieke opbrengst van de kompressor in dit gebied, is het bruto zuurstoftoevoerrendement ongunstig. De hoogste rendementen worden verkregen wanneer de kompressor is aangesloten op beide aeratietanks, terwijl zo weinig mogelijk in de pers- of zuigleiding wordt gesmoord. De rendementsverschillen tussen sectie 1 en sectie 4 bij vergelijkbare luchtdebieten per beluchtingselement en overeenkomstige specifieke opbrengsten van de kompressor (OC 2 en OC 8) worden veroorzaakt door verschillen in specifieke zuurstofoverdracht.

Uit bovenstaande blijkt dat een juiste keuze van de capaciteit van de centrifugaal kompressor bij een dergelijk beluchtingssysteem van doorslaggevend belang is voor de grootte van het zuurstoftoevoerrendement.

3.8. Vergelijking met andere beluchtingssystemen

De resultaten gevonden voor het beluchtingssysteem zoals dit is toegepast op de rwzi Steenwijk staan op zichzelf. Hiermee wordt bedoeld dat slechts globaal een vergelijking kan worden gemaakt met de meetresultaten van andere beluchtingssystemen. Dit wordt veroorzaakt door verschillende specifieke omstandigheden (rangschikking en aantal beluchtingselementen, effectief

TABEL IV - Bepaling van het bruto zuurstoftoevoerrendement.

	Sektie 1				Sektie 4		
	OC 1	OC 2	OC 3	OC 4	OC 7	OC 8	OC 9
Luchtdebiet per dome (Nm ³ /uur)	0,808	1,146	1,525	2,312	0,718	1,175	1,765
Luchtdebiet naar meetruimte (Nm ³ /uur)	161,7	229,2	304,9	462,5	86,2	141,0	211,9
Totaal luchtdebiet (Nm ³ /uur)	3811 ¹	5405 ¹	3596 ²	5452 ²	3386 ¹	5541 ¹	4162 ²
Opgenomen vermogen (kW)	95	109,5	92	110	88	110,5	100
Specifieke opbrengst (Nm ³ /kWh)	40,1	49,4	39,1	49,6	38,5	50,1	41,6
Specifieke zuurstofoverdracht (g O ₂ /Nm ³)	75,5	75,0	68,6	66,6	82,6	67,5	54,1
Bruto zuurstoftoevoerrendement (kg O ₂ /kWh)	3,0	3,7	2,7	3,3	3,2	3,4	2,3

¹ 1 kompressor op 2 AT's² 1 kompressor op 1 AT

beluchtingsoppervlak, geometrie van de aeratietank, stromingen van het water in de aeratietank, enz.) die ieder een niet te kwantificeren invloed op het meetresultaat hebben.

Met inachtneming van het bovenstaande kan het volgende worden opgemerkt. De in onze experimenten vastgestelde waarde van de specifieke zuurstofoverdracht heeft voor beide sekties en voor verschillende luchtdebieten een hoge waarde in vergelijking tot andere systemen, zoals uit de volgende literatuurgegevens blijkt. Wismeijer [10] beschrijft de resultaten van Duitse experimenten met buisvormige beluchtingselementen (Saran, Brandol). Hierbij werd een specifieke zuurstofoverdracht vastgesteld van 11 - 14,8 g O₂/Nm³ . m. Sweeris [9] beschrijft de resultaten van enige OC metingen aan doosvormige beluchtingselementen (Flygt kussens). Uit de opgegeven resultaten kan een specifieke zuurstofoverdracht van 6,8 - 10,6 g O₂/Nm³ . m worden afgeleid. Uit metingen aan het Rotoflowsysteem (fijne bellenbeluchting met Brandol buizen in horizontaal stromend water) heeft Van der Graaf [2] specifieke zuurstofoverdrachten gevonden van 13,4 - 18,3 g O₂/m³ . m. Het vastgestelde bruto zuurstoftoevoerrendement heeft een hoge waarde in vergelijking met de gangbare richtlijnen voor fijne bellenbeluchting (1,7 - 2,9 kg O₂/kWh) en oppervlaktebeluchting (1,8 - 2,0 kg O₂/kWh) [6].

Boon [1] beschrijft de resultaten van OC metingen uitgevoerd in een tank van 5,4 m³ met Activated sludge beluchtingselementen. De bodembezetting van deze elementen is vrijwel gelijk met sektie 1 van de aeratietank op de rwzi Steenwijk. Het door ons vastgestelde verband tussen de specifieke zuurstofoverdracht in sektie 1 en het luchtdebiet komt goed overeen met de door Boon gevonden resultaten.

4. Samenvatting en conclusies

Op de rwzi Steenwijk zijn in de aeratietanks schijfvormige beluchtingselementen van het fabrikaat Activated sludge geïnstalleerd. Teneinde de prestaties van dit beluchtingssysteem (tapered aeration) te onderzoeken

hebben OC metingen plaatsgevonden, die zijn uitgevoerd in representatieve gedeelten van sektie 1 en sektie 4 van de aeratietank. Per sektie varieert het aantal en de rangschikking van de beluchtingselementen. In sektie 1 is sprake van een vrijwel gelijkmatige rangschikking van de beluchtingselementen, in sektie 4 zijn minder beluchtingselementen geplaatst, die in het midden op de bodem van de aeratietank zijn geconcentreerd.

Uit de resultaten van deze experimenten kan het volgende worden geconcludeerd.

1. Evenals bij metingen aan het zuurstoftoevoerend vermogen bij oppervlaktebeluchters blijken OC metingen bij fijne bellenbeluchting op praktijkschaal (wanneer in de meetruimte sprake is van een goede menging) geen bijzondere problemen op te leveren.
2. De zuurstofverzadigingsconcentratie blijkt een factor 1,11 - 1,20 hoger te liggen dan de standaard verzadigingswaarde die voor de heersende temperatuur in de gebruikelijke tabellen wordt gevonden. De drijvende kracht van het zuurstoftoevoerend vermogen is hierdoor in de regel groter dan voor systemen met oppervlaktebeluchting.
3. Voor zowel sektie 1 als sektie 4 blijkt een evenredig verband tussen het zuurstoftoevoerend vermogen (OC) en de hoeveelheid ingebrachte lucht.
4. De specifieke zuurstofoverdracht is hoog in vergelijking met andere systemen van fijne bellenbeluchting. Bij geringe luchtdebieten, ca. 0,8 Nm³/uur, worden voor beide situaties (sektie 1 en sektie 4) specifieke zuurstofoverdrachten bepaald van 20 g O₂/Nm³ . m. Wanneer het luchtdebiet per beluchtingselement toeneemt, neemt de specifieke zuurstofoverdracht af en treden verschillen op tussen sektie 1 en sektie 4 (bij 5 Nm³/uur: 17 g O₂/Nm³ . m in sektie 1 en 14 g O₂/Nm³ . m in sektie 4).
5. Het bruto zuurstoftoevoerrendement (kg O₂/kWh) is hoog in vergelijking met andere systemen van fijne bellenbeluchting of oppervlaktebeluchting. Het rendement wordt voornamelijk bepaald door het opgenomen vermogen en de daarbij geleverde luchtdebieten van het centrifugaal kompressor. Bij een hoge specifieke opbrengst

van de kompressor (50 Nm³/kWh), die wordt bereikt door zo weinig mogelijk te smoren in de pers- of zuigleiding, zijn voor beide situeringen (sektie 1 en sektie 4) rendementen gevonden van 3,3 - 3,7 kg O₂/kWh.

Dankbetuiging

Bij de uitvoering van de OC metingen op de rwzi Steenwijk en de rapportage daarvan zijn de auteurs hun collega's van het zuiveringschap West-Overijssel en de medewerkers van het SWLZ laboratorium zeer erkentelijk voor de enthousiaste en nauwgezette wijze waarop zij aan dit onderzoek hebben bijgedragen. In het bijzonder gaat hun dank uit naar de heer drs. J. Verhaagen, hoofd van de technologische dienst, wiens kennis en ervaring van bellenbeluchtingssystemen van grote waarde was voor de totstandkoming van dit artikel en naar de heer W. W. Chr. Kolvoort, medewerker van de afdeling machinedienst, voor de natte en vaak zeer koude experimenten onder het wateroppervlak en het vele werk in de donkere kamer.

Literatuur

1. Boon, A. G., *Rate of Transfer of Oxygen into Water using fine bubble diffused air systems*. WRCS Report (1975) No. 537R.
2. Graaf, J. H. J. M. v. d., *Beproeving van het Rotoflow beluchtingssysteem*. H₂O 9 (1976) 512.
3. Kalinske, A. A. et al, *Cobalt interference in the non-steady state clean water test*. Water & Sewage Works 120 (1973), no. 7, 54.
4. Korte, K. F. de, *Aspecten van de bellenbeluchting*. H₂O 10 (1977) 162.
5. Lister, A. R. et al. *Aeration in Deep Tanks - an Evolution of a Fine Bubble Diffused Air System*. Journal Water Pollution Control 72 (1973) 590.
6. Pöpel, H. J., *Beluchtingsprocessen*. H₂O 10 (1977) 123.
7. Schmit, F. L. et al. *Diffused Air in Deep Tank Aeration*. Water & Sewage Works (1976) R80.
8. Sweeris, S., *Meting van het zuurstoftoevoerend vermogen*. H₂O 2 (1969) 610.
9. Sweeris, S. *Werkrapport A64 IG-TNO* (1972).
10. Wismeijer, A. A. *Beluchting onder hoge druk*. H₂O 2 (1969) 650.

