

zuurstoftoevoer aan water met behulp van roterende lichamen

door Prof. Dr. J. K. Baars en Dr. J. Muskat

rapport no. 28

INSTITUUT VOOR GEZONDHEIDSTECHNIEK **TNO**

zuurstoftoevoer aan water met behulp van roterende lichamen

door Prof. Dr. J. K. Baars en Dr. J. Muskat



rapport no. 28

INSTITUUT VOOR GEZONDHEIDSTECHNIEK 

april 1959

voorwoord

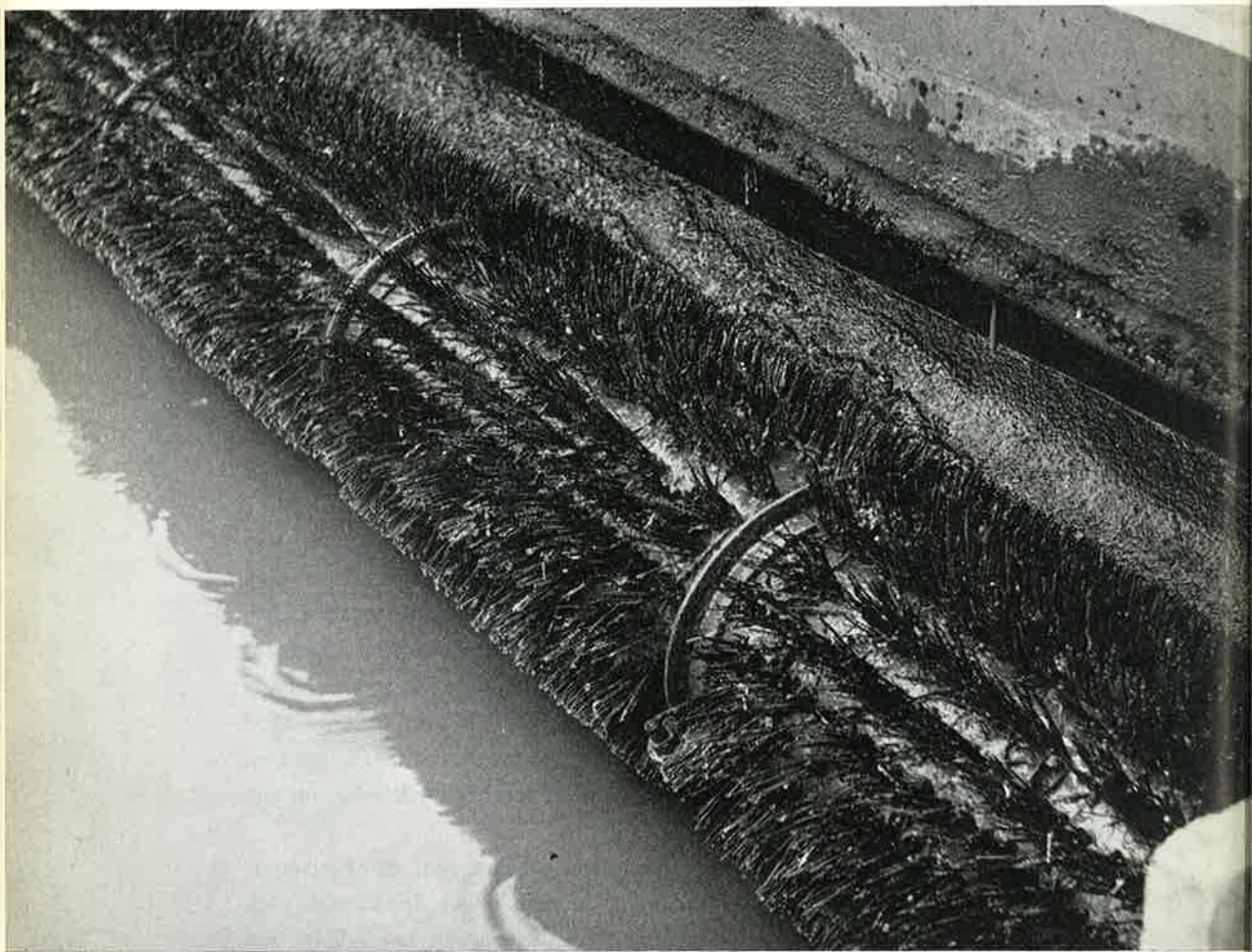
Bij de behandeling van afvalwater vormt een belangrijk onderdeel van het zuiveringsproces de toevoer van zuurstof, die op verschillende manieren kan worden bewerkstelligd. Naast andere procédé's wordt reeds sinds enige decennia met goed resultaat gebruik gemaakt van zg. Kessener borstels.

De vraag was echter of wellicht met behulp van andere roterende lichamen van gelijke lengte een grotere zuurstoftoevoer kon worden bereikt, hetgeen bij de bouw van nieuwe zuiveringsinstallaties een besparing op de investeringskosten zou betekenen, omdat het te installeren aantal meters rotor dan kleiner kan zijn. Een tweede vraag was of het ook mogelijk zou zijn eenzelfde hoeveelheid zuurstof toe te voeren met een geringer energieverbruik, waardoor een verlaging van de bedrijfskosten kan worden verwacht.

Dit rapport geeft een overzicht van een uitvoerig vergelijkend onderzoek van een aantal beluchtingsrotoren. De resultaten van dit onderzoek zijn van dien aard, dat de bovengestelde vragen in positieve zin kunnen worden beantwoord. Het onderzoek vond plaats in intensieve samenwerking met de firma Passavant (Michelbach, Duitsland) die o.m. een proeftank ter beschikking stelde. Voorts had de medewerker van genoemde firma Dr. J. Muskat, die van 1954 tot 1956 bij het Instituut voor Gezondheidstechniek was gedetacheerd, een belangrijk aandeel aan de onderzoeken. Een woord van dank is hier dan ook zeker op zijn plaats.

Ten slotte zij vermeld dat de gevonden resultaten, behalve voor de afvalwaterzuivering, ook van belang kunnen zijn bij de bereiding van drinkwater. Ook daarbij wordt veelvuldig aeratie toegepast ter verhoging van het gehalte aan opgeloste zuurstof terwijl de rotoren tevens gebruikt kunnen worden ter verwijdering van een teveel aan opgelost koolzuur.

IR. D. VAN ZUILEN
Directeur



1. Aeratiewals met piassave borstels

inhoud

1	Inleiding	7
2	Het onderzoek	11
2.1	De methodiek der bepalingen	11
2.1.1	De bepaling van het zuurstoftoevoervermogen	11
2.1.2	De meting van de verbruikte energie	14
3	De resultaten van het onderzoek der verschillende rotortypen	17
3.1	De Kessener borstel en daarvan afgeleide rotortypen	17
3.1.1	Klassieke Kessener borstel van 42 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1 (grafiek nr. 1)	18
3.1.2	Rotor van 42 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1,5 (grafiek nr. 2)	18
3.1.3	Rotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1 (grafiek nr. 3)	18
3.2	De hoekijzerrotor	18
3.2.1	Hoekijzerrotor van 42 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1,5 (grafieken nrs. 4 en 5)	21
3.2.2	Hoekijzerrotor van 50 cm diameter	24
3.2.2.1	Hoekijzerrotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1,5 (grafieken nrs. 6 en 7, tabel 1)	24
3.2.2.2	Hoekijzerrotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1 (grafiek nr. 8)	27
3.2.2.3	W-profielrotor van 50 cm diameter	27
3.3	Andere rotortypen	27
3.3.1	Plaatrotor van 50 cm diameter	28
3.3.2	Gaasrotor van 50 cm diameter	28
3.3.3	Gaasrotor van 42 cm diameter	28
3.4	Analyse van de met de rotortypen 3.1 t/m 3.3 bereikte resultaten	28
3.5	Rotoren van 50 cm diameter met plaatvormige tanden	29
3.5.1	Rotor met rechthoekige tanden	29
3.5.1.1	Rotor met tanden van 3 cm breedte (grafiek nr. 9)	29
3.5.1.2	Rotor met tanden van 4,5 cm breedte (grafiek nr. 10)	30

3.5.1.3	Rotor met tanden van 5 cm breedte (grafiek nr. 10)		30
3.5.1.4	Rotor met tanden van 7 cm breedte (grafiek nr. 11)		30
3.5.1.5	Rotor met tanden van 10 cm breedte (grafiek nr. 11)		30
3.5.2	Rotor met deltavormige tanden (grafiek nr. 12)		32
3.6	Analyse van de met de rotortypen 3.5.1 t/m 3.5.2 bereikte resultaten		32
3.7	Kooirotor van 70 cm diameter, met plaatvormige rechthoekige tanden (grafieken nrs. 13 en 14)		36
4	Samenvatting		41
	Overzicht van tabellen, grafieken en afbeeldingen		70

1 Inleiding

Het oplossen van zuurstof in water met behulp van een daarin roterend systeem is een werkwijze, die door HAWORTH reeds in 1916 werd toegepast in de vorm van zg. Haworth 'paddels'. Deze methodiek wordt, in slechts weinig gewijzigde vorm, in Engeland nog steeds toegepast, oa. te Manchester.

Men heeft echter in de loop der jaren gestreefd naar een intensievere zuurstoftoevoer. KESSENER stelde voor een borstelwals te gebruiken bestaande uit een houten cilinder van 60 à 70 cm diameter, bezet met bundeltjes piassave borstel materiaal, die met een toerental van ongeveer 60 omwentelingen per minuut roteert (foto 1). In 1926 werd zulk een borstelinstallatie aangebracht bij het slachthuis te Apeldoorn en daarop volgden de slachthuizen in Beverwijk (1929), Helmond, Heerlen en Zwolle (1930). Het systeem bleek goed te voldoen, doch de bouw van de borstel was uiteraard aanleiding dat men streefde naar verdere verbeteringen.

HUSMANN¹ zocht naar een meer technische constructie; hij verkleinde daartoe de borsteldiameter en veranderde de borstelwals door de piassave borstel haren te vervangen door 'federnde Metallflächen'. 'Men kan het beste roestvrij staal gebruiken', zegt hij in zijn octrooi, 'maar ook ander materiaal is bruikbaar; essentieel is slechts dat de verende eigenschappen van de piassave borstels behouden blijven of zelfs nog overtroffen worden'. De inplanting van de kammen op de borstelas was radiaal.

In 1935 verkreeg Kessener² een Duits octrooi, waarin de kammen niet radiaal, doch onder zekere hoek op de as werden ingeplant (foto 2), zodat zij het wateroppervlak in horizontale stand zouden raken. Het zal duidelijk zijn dat dit slechts bij één bepaalde indompelingsdiepte mogelijk is. In zijn octrooi vermeldt Kessener voorts dat de agitatie van het wateroppervlak door de daarop slaande kampunten en de aanwezigheid van bellenbanen, die door de beweging van de kammen in het water worden teweeggebracht, als zeer belangrijk moeten worden beschouwd. Met

1 Dr. Ing. W. Husmann: Belüftungsbecken für Belebtschlammkläranlagen D.R.P. Nr. 545.897, dd. 28 januari 1930.

2 H. J. N. H. Kessener: Flüssigkeitsbelüfter, insbesondere für Abwässer D.R.P. Nr. 680.099, dd. 1 oktober 1935, prioriteit in Groot-Brittannië sinds 6 oktober 1934.

zijn nieuwe opstelling zou hij, gerekend naar hetgeen destijds mogelijk was, meer dan tweemaal zoveel zuurstof in het water kunnen brengen. Ook in de Verenigde Staten meldde hij deze vinding aan (27 september 1935, Serial Nr. 42.518) en verkreeg daarop octrooi (U.S. Pat. Nr. 2.098.152, dd. 2 november 1937).

Aanvankelijk werd de borstel uitgevoerd met een diameter van 32 cm, daarna volgde 36 cm diameter en in de nieuwere installaties zoals te Tilburg, werden borstels van 42 cm doorsnede toegepast (foto's 3, 4 en 5).

Er bestond echter geen reden hierin de maximaal toelaatbare borsteldiameter te zien en proefnemingen met borstels van bv. 50 cm hebben dan ook volkomen aan de verwachtingen voldaan.

Wanneer men het systeem der aeratie d.m.v. roterende lichamen wil vergelijken met andere systemen (bv. werkend met perslucht) dan zijn er drie factoren die van belang zijn:

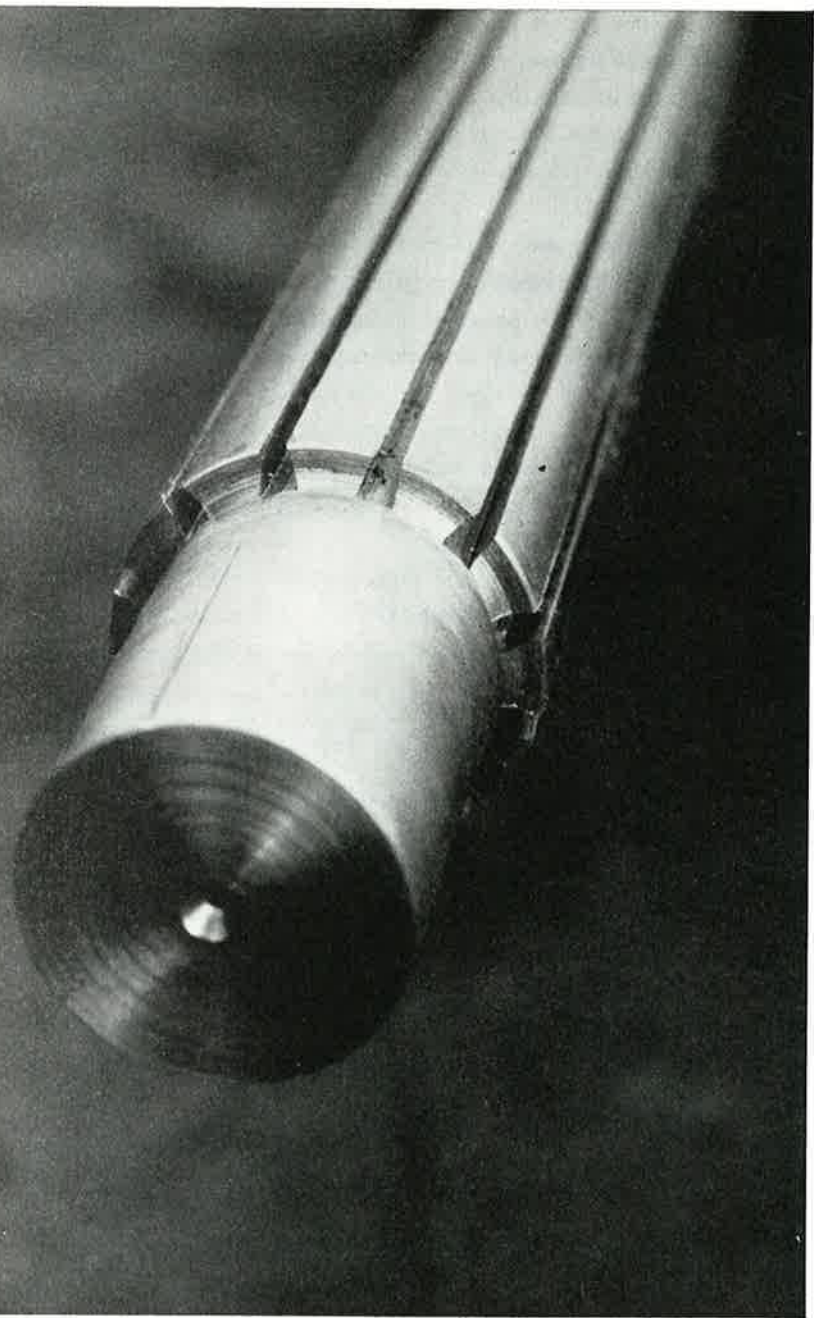
1. De bouwkosten van beluchtingsbassins en andere voor de verschillende systemen nodige voorzieningen.
2. De hoeveelheid zuurstof die met een bepaalde methodiek in het water kan worden gebracht.
3. De daarvoor nodige hoeveelheid energie, of met andere woorden: hoeveel energie voor het oplossen van een bepaalde hoeveelheid zuurstof wordt vereist.

Wat betreft het eerste punt kan gezegd worden dat door PASVEER³ is aangetoond, dat bij de biologische oxydatie van afvalwater de oxydatiesnelheid der organische stoffen bij de tot nu toe gebruikelijke systemen meestal belangrijk zou kunnen worden opgevoerd. Wanneer de zuurstoftoevoer vergroot wordt kan de oxydatie naar rato sneller verlopen. De verblijftijd van het afvalwater in het zuurstofrijkere milieu kan daardoor evenredig korter zijn. Een grotere zuurstofconcentratie kan bv. worden bereikt door de aeratietank kleiner te maken. Dat het reinigingseffect in een kleine tank hetzelfde blijft (meer dan 90%) is uit de resultaten van een proefinstallatie in het sanatorium 'De Klokkenberg' gebleken. Op genoemd principe werd octrooi aangevraagd en verkregen⁴.

Wat betreft het tweede punt is gebleken dat de hoeveelheid zuurstof die door roterende lichamen in water kan worden gebracht, afhankelijk is van de doorsnede

3 Dr. Ir. A. Pasveer: Research on activated sludge. Publikatie nr. 40 van het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO. Verschenen in 'Sewage and Industrial Wastes' (1953-1956).

4 T.N.O.: Werkwijze en inrichting voor het zuiveren van afvalwater. Ned. Octrooi nr. 75.389, dd. 16 augustus 1954.



2. Kessener borstelas met ingefraise groeven

van het roterende lichaam en het toerental, de indompelingsdiepte der op de as aangebrachte beluchtingselementen en hun kenmerkende vorm. Zoals later zal worden beschreven is het bv. mogelijk om, bij toepassing van speciale rotortypen, 4 à 5000 gram zuurstof in het water te brengen, in plaats van de onder dezelfde omstandigheden bij de Kessenerborstel gebruikelijke 600 gram.

Wat betreft het derde punt zij hier vermeld dat, behalve de hoeveelheid zuurstof die in het water wordt gebracht, mede van belang is de hiervoor benodigde hoeveelheid energie. Deze bepalen gezamenlijk de economie van een beluchtingssysteem, en dit nu is een belangrijk gegeven bij de vergelijking van de exploitatiekosten van diverse systemen.

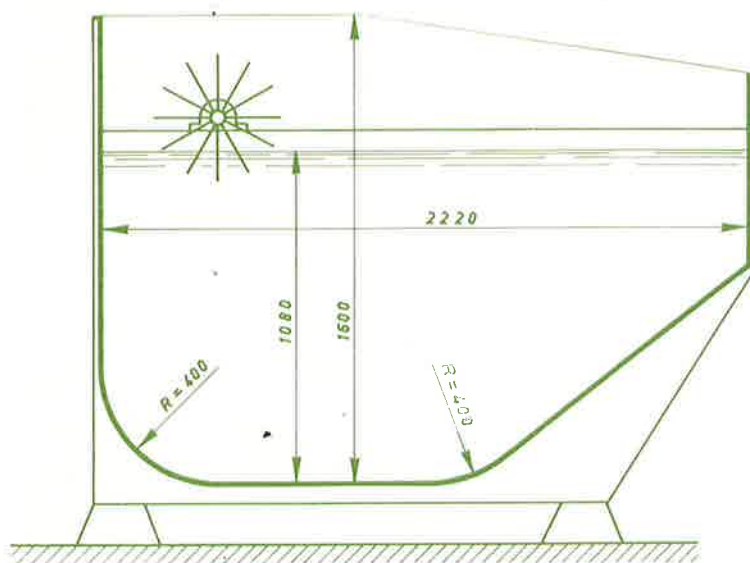


fig. 1. Doorsnede van de proeftank

2 Het onderzoek

In 1954 werd door samenwerking met de Passavant Werke, Michelbach (Duitsland), de beschikking verkregen over een proeftank (zie figuur 1) voorzien van een stalen as, waarop verschillende beluchtingselementen van 1 m lengte kunnen worden aangebracht volgens een speciaal systeem, waarop inmiddels door de Passavant Werke in Duitsland octrooi is verkregen⁵.

De kammen worden niet in gefraiseerde groeven met lood vastgezet, zoals bij de Kessener borstel, doch door middel van trapeziumvormige stroken, die op de as kunnen worden geschroefd (foto 6). Behalve met deze combinatie van stroken en kammen kunnen ook met afzonderlijke constructies die als geheel (zie foto 7) op de as worden geschroefd, aeratierotoren worden verkregen.

De indompelingsdiepte der rotoren werd, aangezien de rotoras niet in verticale richting verplaatsbaar is, geregeld door de waterspiegel in de tank te verhogen of te verlagen. Dit bracht met zich dat de waterinhoud varieerde van 2,1 tot 2,5 m³. Het te aereren volume bij de verschillende indompelingsdiepten is steeds voor de aanvang der proeven nauwkeurig bepaald.

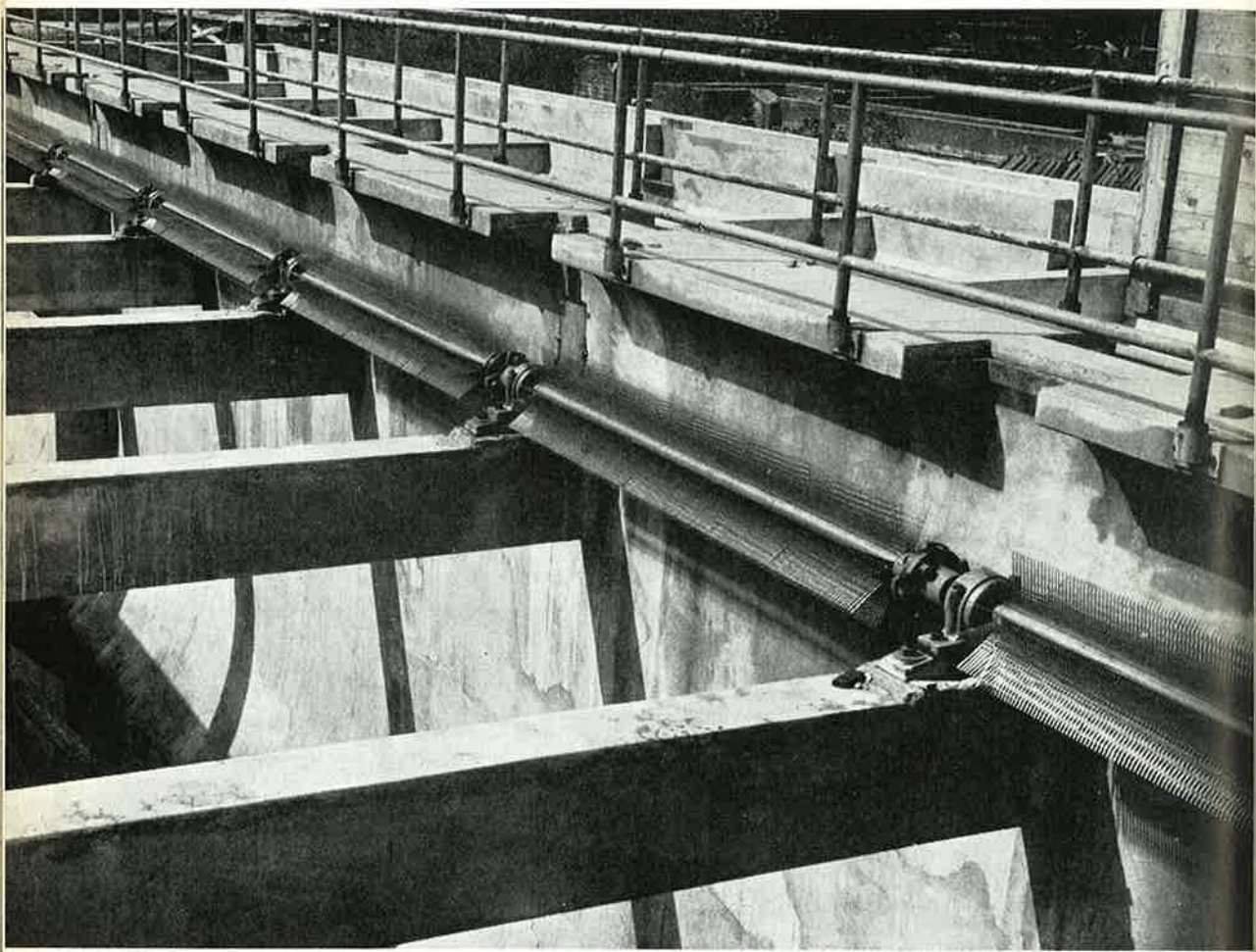
Dit rapport bevat de resultaten van het onderzoek naar het zuurstoftoevoervermogen per meter rotor en van het onderzoek naar het rendement dezer zuurstoftoevoering bij gebruik van verschillende rotortypen, t.w. de klassieke Kessener borstel en andere roterende constructies, bv. gevormd door hoekijzers, rechthoekige platen of platen welke aan de basis smaller zijn dan aan het uiteinde. Bovendien zullen ook de resultaten verkregen met een asloze zg. 'kooirotor', geschikt voor toepassing bij variërende waterspiegel, worden vermeld.

2.1 De methodiek der bepalingen

2.1.1 De bepaling van het zuurstoftoevoervermogen

De waterinhoud van de proeftank wordt met behulp van ferrosulfaat in een zwak-alkalisch milieu nagenoeg zuurstofvrij gemaakt. Een eventueel overschot

⁵ P. Schramm und Dipl.-Ing. L. Fechter: Bürstenwalze zur Belüftung und Reinigung von Wasser bzw. Abwasser. D.P.A. Nr. 937.160, dd. 1 december 1955.



3. Kessener borstels in de zuiveringsinstallatie te Tilburg

aan ferrozouten wordt door enige rotaties van de borstel weggenomen en zodoende is het mogelijk in de tankinhoud een zuurstofconcentratie van 0-1 mg/l te scheppen. Dit gehalte wordt ten tijde 0 zeer nauwkeurig bepaald. Dan wordt de borstel ingeschakeld en na bepaalde korte of lange tijdintervallen, al naar gelang het zuurstoftoevoervermogen van de borstel groter of kleiner is, het in het water bereikte zuurstofgehalte bepaald. Het is mogelijk om bij kleine zuurstoftoevoervermogens meerdere opeenvolgende bepalingen te verrichten door tijdens de beluchting monsters te nemen.

Het oplossen van de zuurstof is afhankelijk van het in het water heersende deficit, de temperatuur en de barometerstand.

Het zuurstoftoevoervermogen (oxygenation capacity, afgekort OC) voor aëratiesystemen in het algemeen kan worden berekend volgens de volgende formule:

$$OC = 26,1 \cdot \frac{1}{\tau_1 - \tau_0} \log \frac{c_s - c_0}{c_s - c_{\tau_1}} \cdot \sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}} \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$$

waarin:

26,1 = 2,303 · 11,33, waarin 2,303 voorstelt de factor voor de omrekening van Neperiaanse op Briggse logarithmen en 11,33 de verzadigingswaarde⁶ van zuurstof in water bij 10°C en 760 mm kwikdruk, uitgedrukt in g/m³

c_s = de verzadigingswaarde van zuurstof in water bij de temperatuur van de proef

c_0 = de zuurstofconcentratie bij het begin van de proef

c_{τ_1} = de zuurstofconcentratie na een bepaalde tijd

$\tau_1 - \tau_0$ = de tijd, uitgedrukt in uren, gedurende welke de proef verricht wordt

k = de diffusieconstante

$\sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$ = de factor ter omrekening van de waarde van de diffusiesnelheid bij de temperatuur van de proef tot die bij 10°C.

Ook voor aëratie met behulp van roterende lichamen wordt dus gevonden de hoeveelheid zuurstof die per m³ per uur aan het water kan worden toegevoerd. Uit deze grootheid, uitgedrukt in g/m³h, is door vermenigvuldiging met de waterhoeveelheid af te leiden de hoeveelheid zuurstof die onder de proefomstandigheden per uur aan het water wordt toegevoerd door een rotor van 1 meter lengte. In de

6 Ontleend aan: Standard methods for the examination of water and sewage (10e uitgave).

grafieken van de meetresultaten is deze afgeleide grootheid (g zuurstof per uur per m rotor, of korthedshalve: OC per m rotor) als vergelijkingsmaatstaf voor de verschillende typen rotoren gebruikt.

De verkregen waarden zijn omgerekend tot standaardomstandigheden bij 10°C en 760 mm kwikdruk en tot een aanvangsconcentratie van 0 mg zuurstof per l, waardoor het mogelijk is de OC-waarden van verschillende aeratiesystemen onderling te vergelijken.

2.1.2 De meting van de verbruikte energie

Voor het meten van de bij de aeratie verbruikte hoeveelheid energie zijn er twee mogelijkheden. Ten eerste zou met een schrijvende Wattmeter de totale door de motor opgenomen hoeveelheid elektrische energie kunnen worden geregistreerd. Naar de borstel wordt echter een hoeveelheid energie doorgegeven die afhankelijk is van de werkingsgraad van de motor bij de gegeven belasting. Aangezien deze belasting sterk varieert, is voor zover dit mogelijk was de voorkeur gegeven aan een andere methode.

Het is nl. ook mogelijk om alleen de energie te meten die op de borstelas wordt overgebracht, en wel met behulp van een balans (met verschuifbaar gewicht), waarvan de as samenvalt met de motoras. De motor die gemonteerd is op een draaibaar support, zal zich na het inschakelen door het optredende koppel een weinig draaien ten opzichte van de ruststand. Deze draaiing nu is op te heffen door middel van genoemde balans, waarmee het motorcomplex in de oorspronkelijke stand kan worden teruggebracht. Het aangebrachte tegenkoppel is een maat voor de hoeveelheid energie die op de borstelas wordt overgebracht. De formule voor deze torsiebalans luidt:

$$N = \frac{m \cdot d \cdot n_w \cdot 1000 \cdot \alpha}{K} \text{ Watt}$$

waarin:

N = aandrijvend vermogen

m = het gewicht dat langs de balans wordt verschoven

d = afstand waarover het gewicht wordt verschoven

n_w = het toerental van de borstel

α = de transmissiefactor van de riemschijven

K = omrekeningsfactor

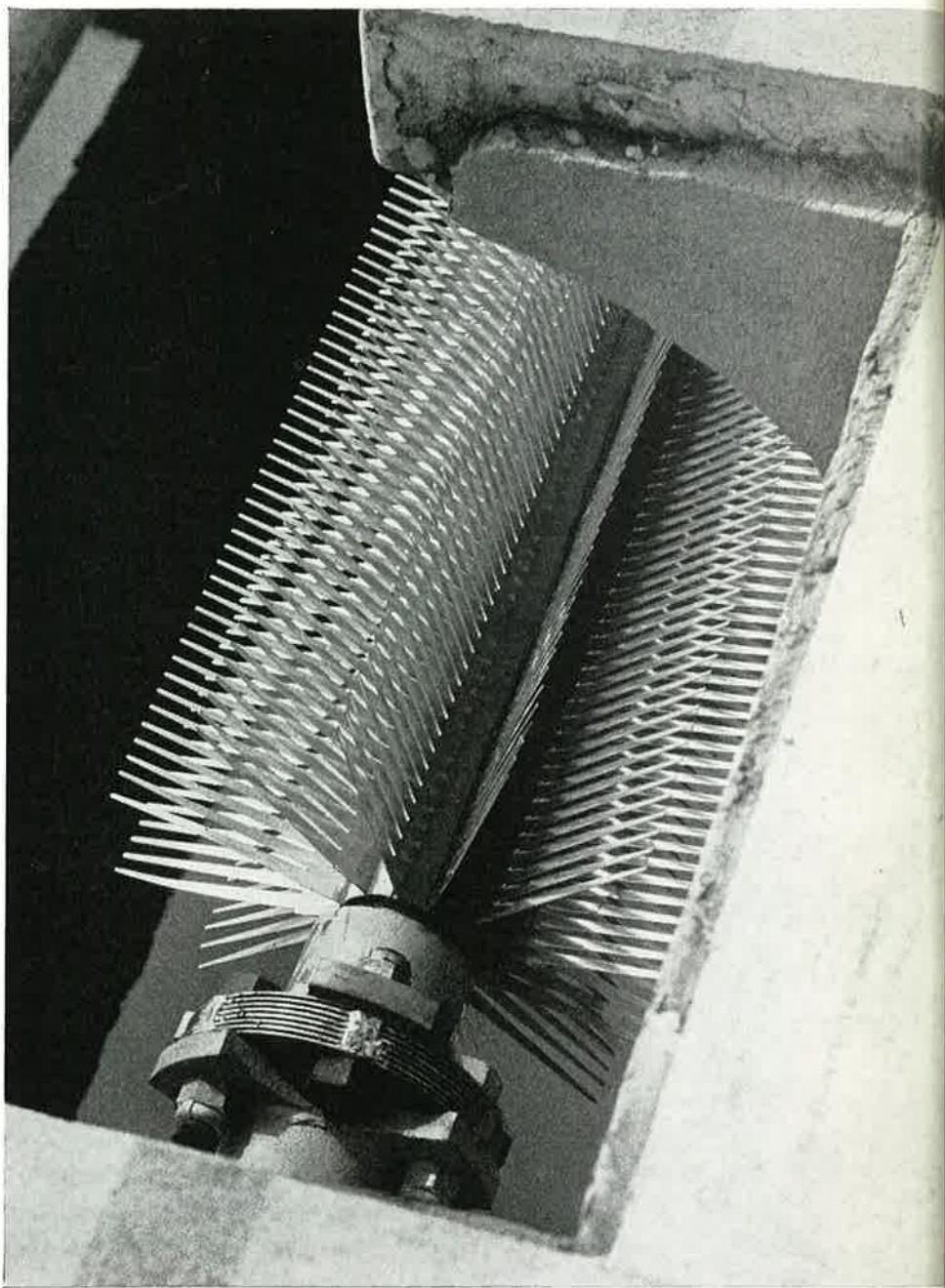
Men zou kunnen opmerken dat de meting in feite geschiedt bij de riemschijf die op de motoras gemonteerd is en dat nog verliezen zullen optreden bij de riemschijf op

de rotoras en ook in de lagers van deze as, doch deze verliezen zijn, vergeleken met de totale energie benodigd voor het laten draaien van de borstel in het water, zelfs bij geringe indompelingsdiepte te verwaarlozen.

Incidenteel werd ook de verhouding vastgelegd tussen de door de motor opgenomen (bruto) en de aan de borstel afgegeven (netto) energie.

Bij het onderzoek van de kooirotor was het nodig een zwaardere motor te gebruiken waarop geen balans kon worden gemonteerd. In dit geval konden dus uitsluitend brutowaarden worden bepaald, die met behulp van een door de fabriek verstrekte energiecurve op nettowaarden werden omgerekend.

Voor de berekening van de economiewaarden werd steeds de netto energie genomen.



4. Detail van Kessener borstel (42 cm Φ) met elastische koppeling

Voor een aantal rotortypen is de OC per meter borstel en het daarbij behorende energieverbruik bij verschillende toerentallen bepaald en vastgelegd in grafieken. Bij het meest gunstige type hoekijzerborstel en de kooirotor is dit zeer uitvoerig geschied, t.w. bij resp. 6 en 4 verschillende indompelingsdiepten. Daarnaast is ter karakterisering van een aantal andere typen volstaan met deze gegevens te bepalen voor slechts één indompelingsdiepte, nl. 13 cm, hetgeen bij een rotordiameter van 50 cm een zeer reële waarde moet worden geacht.

Voorts nog in een derde diagram aangegeven het quotiënt van de OC- en de energiewaarden, als maatstaf voor de economie der beluchting. Als in de loop der jaren de belasting van een zuiveringsinstallatie toeneemt, zal meer zuurstof moeten worden toegevoerd, hetgeen te bereiken is door of het toerental te verhogen, dan wel door een grotere indompelingsdiepte toe te passen. Aan de hand van de OC/N-curven is het mogelijk een keuze te doen tussen deze beide mogelijkheden, waarvan de financiële consequenties belangrijk kunnen verschillen.

3.1 De Kessener borstel en daarvan afgeleide rotortypen

Onder de klassieke Kessener borstel is te verstaan een borstel waarvan de bladen in gefraïste groeven op de as bevestigd zijn; de verhouding tand : tussenruimte bedraagt 1 : 1 en de borsteldiameter 42 cm.

De bij dit onderzoek gebruikte Kessener borstels (zie foto 6) wijken alle enigszins af van het klassieke model. De bladen zijn nl. door middel van speciale klemstroken op de as bevestigd. Type 2 heeft een afwijkende verhouding tand : tussenruimte, t.w. 1 : 1,5 en type 3 heeft een diameter van 50 cm.

Er moge hier nog uitdrukkelijk worden geconstateerd dat bij de Kessener borstels de tanden der opeenvolgende kammen zich achter elkaar bevinden, zodat overeenkomstig geplaatste tanden dezelfde baan doorlopen. Bij later te bespreken typen zijn de tanden daarentegen vaak verspringend gemonteerd.

3.1.1 Klassieke Kessener borstel van 42 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1 (grafiek nr. 1)

Daar met dit onderzoek bedoeld werd na te gaan of wellicht rotortypen mogelijk zijn die per m borstel meer zuurstof in het water kunnen brengen dan de Kessener borstel - bij voorkeur met minder energieverbruik - werd begonnen met laatstgenoemde aan een analyse te onderwerpen, waartoe op de reeds beschreven wijze het zuurstoftoevoervermogen (OC) en het energieverbruik werden bepaald.

3.1.2 Rotor van 42 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1,5 (grafiek nr. 2)

Vergelijking met het vorige borsteltype leert ons dat pas bij een 10 omwentelingen hoger toerental hetzelfde energieverbruik wordt bereikt. Voor de OC-lijnen bedraagt dit verschil ca. 20 toeren. Een en ander heeft tot resultaat dat in de grafiek OC/N het maximum wordt bereikt bij 160 toeren in plaats van bij 140 in het vorige geval, terwijl de waarde van dit maximum voor 13 cm indompeling 2600 in plaats van 3000 bedraagt.

3.1.3 Rotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1 (grafiek nr. 3)

Uiteraard zijn bij deze 50 cm rotor het energieverbruik, doch ook de OC-waarden, groter dan bij de 42 cm rotor.

Het is opmerkelijk dat de economiecurve bij de onderzochte toerentallen geen duidelijk maximum te zien geeft. Dit zal vermoedelijk beneden de 100 omwentelingen liggen. Speciaal bij 10 cm indompelingsdiepte daalt de economie tot een zeer lage waarde.

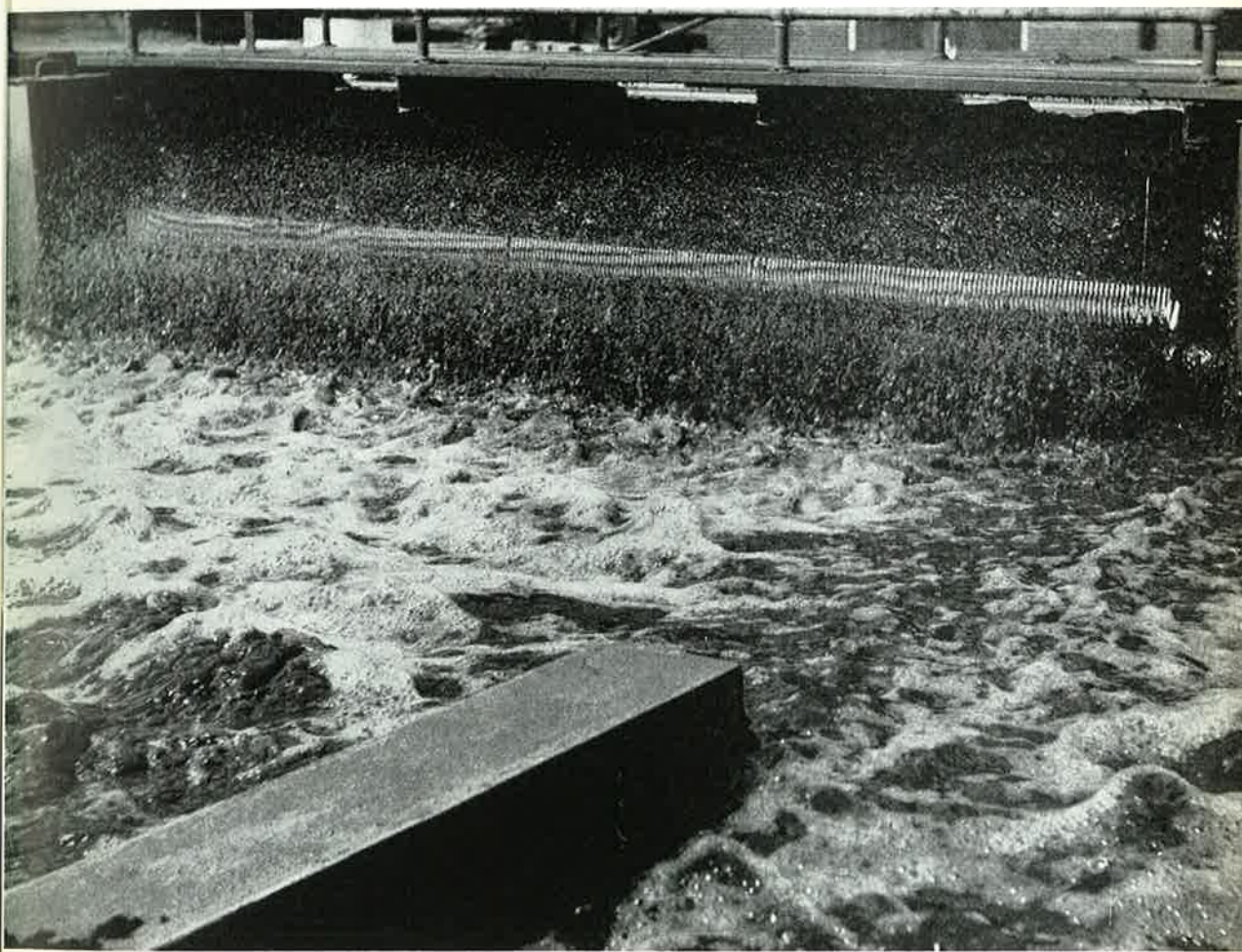
Een ander typisch verschijnsel is dat, terwijl de OC-curven hoger komen te liggen naarmate de indompelingsdiepte groter wordt, de economie voor 10 cm *lager* is dan voor 7 of voor 13 cm indompeling, terwijl voor 13 cm de hoogste waarde wordt gevonden. Dit is te verklaren uit het feit dat de toename van het relatieve energieverbruik groter is bij de overgang van 7 op 10 cm indompelingsdiepte dan bij de overgang van 10 op 13 cm.

Ook de beide voorgaande rotortypen van 42 cm diameter geven dit verschijnsel te zien.

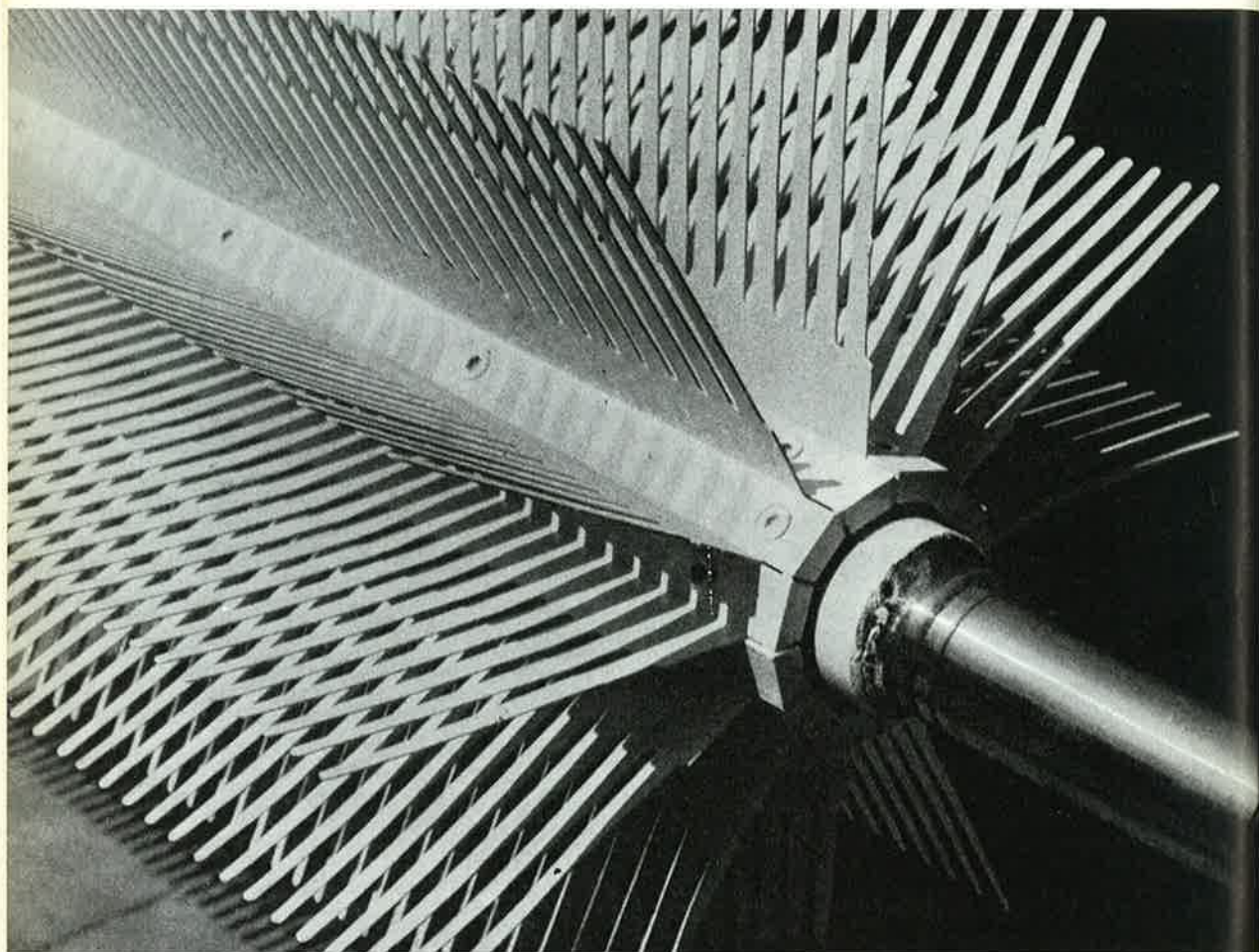
3.2 De hoekijzerrotor ⁷

Hoewel Kessener in zijn octrooiaanvraag een niet-radiale inplanting van de kammen op de borstelas als essentieel beschouwde, zal het duidelijk zijn, dat het hier-

⁷ T.N.O.: Vloeistofbeluchttingsinrichting. Ned. Octrooi nr. 88.506, dd. 16 juni 1958.



5. Kessener borstel (36 cm Φ) in bedrijf (IJsselmonde)



6. Rotor met gemakkelijk te monteren bladen

mede beoogde effect, t.w. een platte aanraking van het wateroppervlak door de kammen, slechts mogelijk is bij een bepaalde indompelingsdiepte. Bij wisselende hoogte van de waterspiegel zal nl. ook de trefhoek variëren.

Bij de thans te beschrijven rotortypen is dit principe losgelaten en zijn de kammen radiaal bevestigd.

De plaatsing der tanden kan al dan niet verspringend ten opzichte van elkaar zijn, waarbij nog te onderscheiden valt dat ofwel de open zijde der hoekijzers, ofwel de gesloten zijde het wateroppervlak het eerste raakt. Dit geeft de volgende vier constructiemogelijkheden, die alle zijn onderzocht:



3.2.1 Hoekijzerrotor van 42 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1,5 (grafieken nrs. 4 en 5)

De bepalingen zijn gedaan voor:

7, 10, en 13 cm indompeling bij de opstelling

13 cm indompeling bij de opstelling

7, 10, en 13 cm indompeling bij de opstelling

13 cm indompeling bij de opstelling



Onverwacht is de knik in de energiecurve voor de draairichting $\nabla \downarrow$ bij 13 cm indompeling : verhoging van het toerental van 153 tot 160 geeft géén groter energieverbruik.

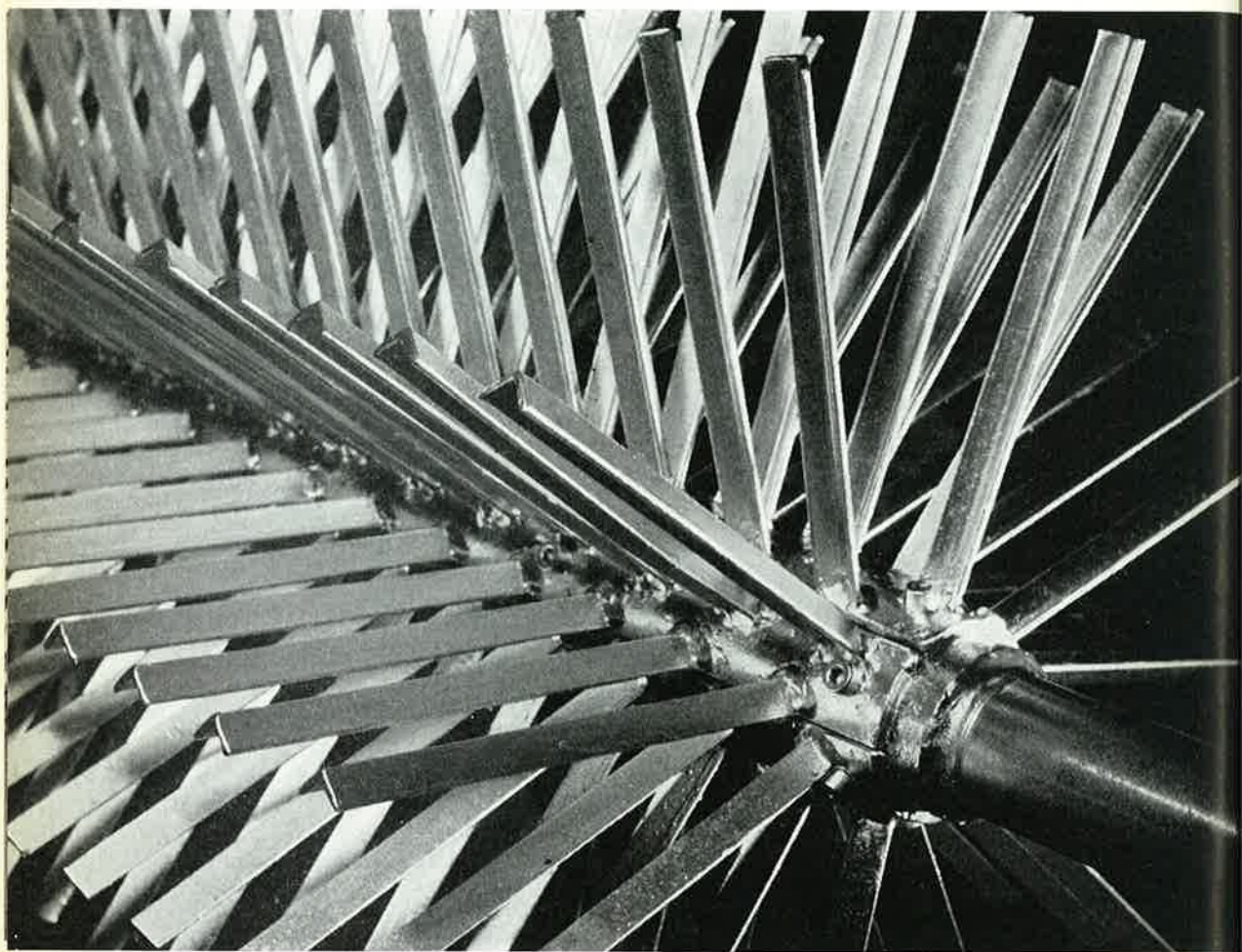
Ter verklaring van deze discontinuïteit zou men kunnen veronderstellen dat het stromingsbeeld om de tandranden bij een bepaald toerental verandert, bv. van laminair in turbulent, waarbij de tandvorm van essentiële invloed kan zijn. Voorts bestaat de mogelijkheid dat de stroming in de tank op dat moment zou veranderen, hetgeen eveneens het energieverbruik zou beïnvloeden.

Opvallend is het verloop der drie economiecurven: bij ca. 120 toeren een **minimum**, dan een maximum bij 160-170 en daarna een daling.

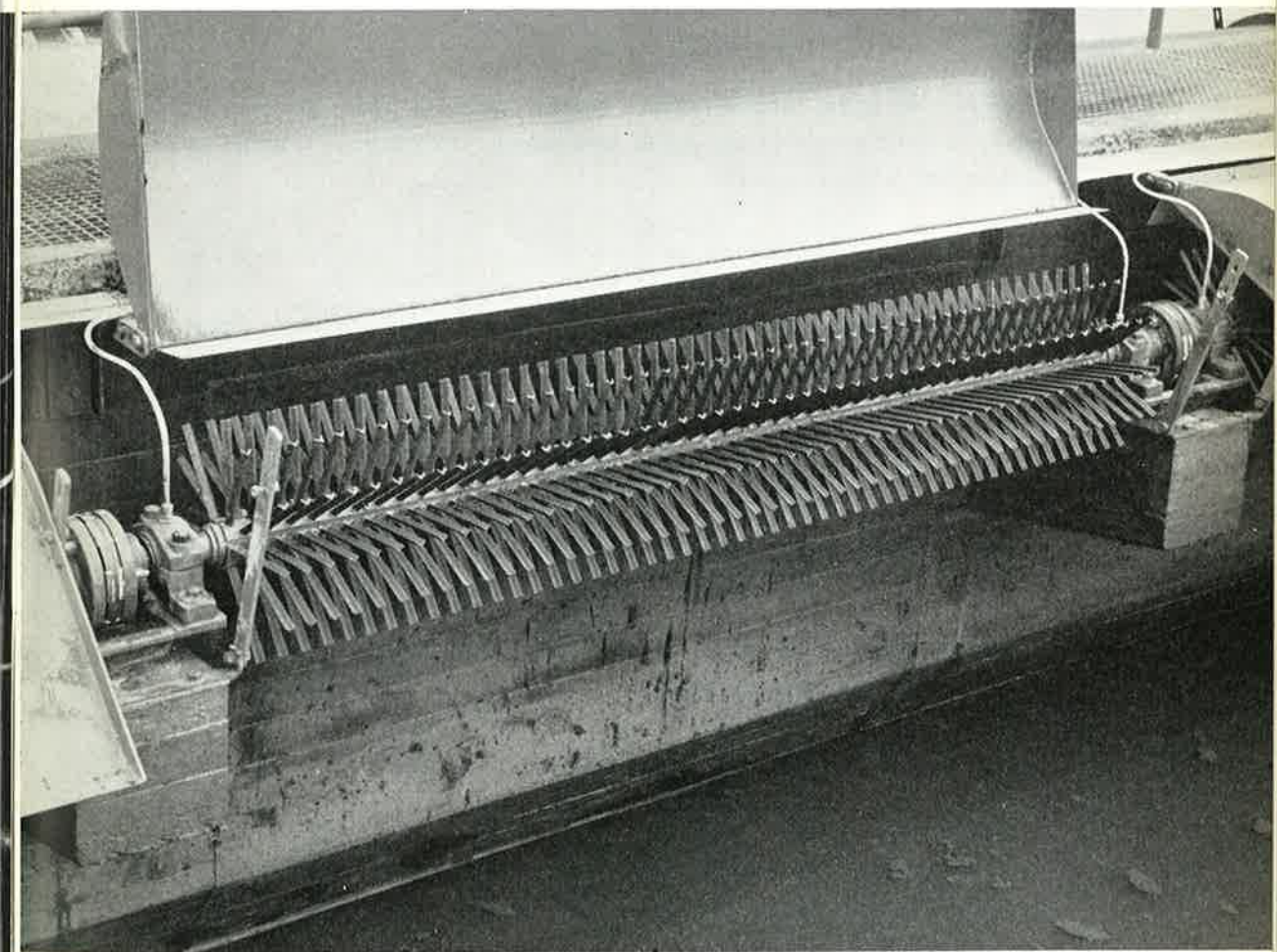
Beneden 100 omwentelingen zal er noodzakelijkerwijs nog een maximum geweest moeten zijn. Wanneer de rotor stilstaat is uiteraard de waarde OC/N nul.

Er zij hier gewezen op de gelijkenis van vorm tussen deze OC/N-curven en die van de Kessener rotor van 42 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1,5.

De draairichting $\nabla \downarrow$ bleek ten aanzien van het zuurstoftoevoervermogen ongeveer hetzelfde resultaat te geven als de klassieke Kessener borstel. De economie was evenwel iets beter, speciaal bij meer dan 150 toeren. Voor 7, 10 en 13 cm indompelingsdiepte zijn de OC-waarden hierbij ± 1200 , 1800 en 2400 g O_2 per m borstel.



7. Hoekijzerrotor, waarvan 2 rijen tanden op één support gelast zijn, welke op de as wordt geschroefd



8. Hoekijzerrotor in de zuiveringsinstallatie te Stuttgart,
met hoekijzers van 2 cm breedte en 2 cm tussenruimte

In de andere draairichting  is weliswaar de OC bij 13 cm indompeling hoger ten opzichte van de Kessener borstel en kan, beneden 140 toeren, de zuurstof economischer worden opgelost, doch bij hogere toerentallen daalt de economie zeer snel, in tegenstelling met de constant blijvende economiewaarde bij de draairichting .

Indien men dus bij een bepaald toerental de stand van de tanden en de draairichting op de juiste wijze kiest zijn met de hoekijzerrotor verbeteringen mogelijk ten opzichte van de Kessener borstel.

3.2.2. Hoekijzerrotor van 50 cm diameter

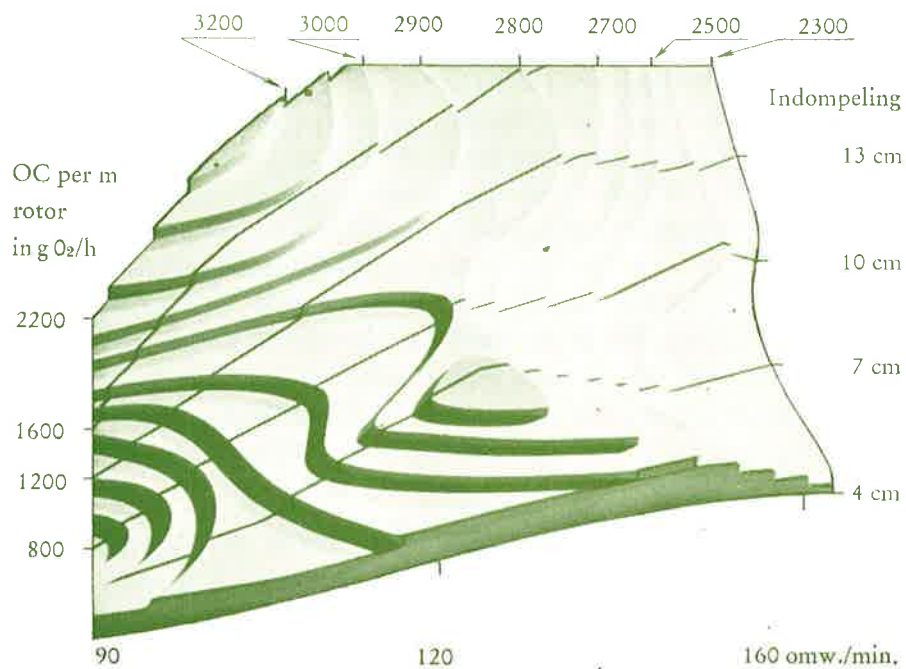
Hiervan stonden twee typen ter beschikking nl. met een verhouding tand : tussenruimte van 1 : 1 en een van 1 : 1,5. Door veranderen van draairichting en verstellen van de tanden konden vier wijzen, van aereren worden onderzocht. Daar met het type 1 : 1,5 zeer gunstige resultaten werden verkregen werd voor  het onderzoek uitgebreid verricht dan tot nu toe was geschied, nl. voor indompelingsdiepten van 7, 10, 13, 16 en 20 cm en toerentallen van 80 tot 160 per minuut.

In tegenstelling tot hetgeen werd geconstateerd bij de hoekijzerrotor van 42 cm diameter bleek in dit geval de draairichting  te preferen te zijn.

3.2.2.1 Hoekijzerrotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 : 1,5 (grafieken nrs. 6 en 7, tabel 1)

De verkregen OC-waarden liggen, overeenkomstig de verwachting, alle hoger dan die van de 42 cm hoekijzerrotor.

In Stuttgart werden 2 x 100 m rotor van dit type geïnstalleerd (foto 8). De resultaten verkregen in de proeftank zijn vastgelegd in grafiek nr. 7 en ook in een driedimensionaal model (foto 9). Wanneer men als coördinaten kiest het zuurstoftoevoervermogen, het toerental en de economie, kan uit de ruimtelijke figuur in een oogopslag worden gezien hoe een gewenste verhoging van de OC het best kan worden gerealiseerd: hetzij door vergroting van de indompelingsdiepte, hetzij door verhoging van het toerental.



9. De economie (OC/N) van de hoekijzerrotor van 50 cm diameter, ruimtelijk uitgezet

Tabel 1. Hoekijzerrotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussen-
ruimte 1:1,5 $\square^{\wedge}\wedge^{\square}$

Omw./min.	Ind.diepte	OC N		OC/N
		per m rotor		
89	4	270	0,108	2496
88,5	7	476	0,200	2381
87,5	10	768	0,340	2258
86,5	13	1087	0,450	2415
86	16	1369	0,520	2633
85,5	20	1812	0,610	2971
104,5	4	416	0,164	2537
103	7	772	0,305	2549
101,5	10	1237	0,465	2660
100,5	13	1641	0,595	2759
99,5	16	2250	0,710	3169
98,5	20	2767	0,835	3314
126,5	4	756	0,285	2654
125	7	1489	0,495	3007
123	10	1983	0,710	2793
121	13	2582	0,890	2901
119	16	3127	1,060	2950
115	20	3693	1,265	2919
147,5	4	1031	0,380	2713
144	7	1614	0,670	2409
140,5	10	2303	0,935	2463
137	13	3097	1,115	2777
132	16	3694	1,325	2788
162,5	4	1107	0,475	2331
158	7	1819	0,785	2317
153,5	10	2636	1,085	2430
148	13	3187	1,300	2452
141	16	3979	1,480	2688
170	10	2380	1,360	1750
160	13	3439	1,550	2218
150	16	3996	1,700	2351

3.2.2.2 Hoekijzerrotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1:1 (grafiek nr. 8)

Bij lage toerentallen (bv. 100) worden reeds zeer belangrijke OC-waarden gevonden; 2100 g O₂ per m rotor voor de draairichting , waarbij de economie ca. 3290 g O₂/kWh bedraagt. Voor de Kessener borstel van 50 cm diameter wordt onder dezelfde omstandigheden (100 omw./min. en 13 cm indompelingsdiepte) een OC van 1350 en een economie van nog geen 2800 gevonden. De OC-waarde 2100 wordt daar pas verkregen bij 122 toeren, waarbij dan nog dezelfde economie van ca. 2800 geldt. Bij hetzelfde toerental is de OC-waarde van de hoekijzerrotor, die dan een economie heeft van ruim 2900, reeds opgelopen tot 3000!

In de hoekijzerrotor van 50 cm diameter met een verhouding tand : tussenruimte 1:1 hebben wij dus een beluchtingsinstrument, dat economischer werkt dan de Kessener borstel en meer zuurstof in het water brengt.

Een verdere analyse der verkregen curven leert ons nog, dat men voor hoge OC-en economiewaarden bij lage toerentallen kleine tussenruimten en voor hoge toerentallen wat grotere tussenruimten kiezen moet bij gelijk blijvende tandvorm. Voor bepaalde omstandigheden met speciale eisen kan dan nog tussen $V_{\downarrow}$ of $\Delta_{\downarrow}$ worden gekozen in verband met de economie.

3.2.2.3 W-profielrotor van 50 cm diameter

Men behoeft zich uiteraard niet te beperken tot enkelvoudige hoekijzers, doch men kan ook denken aan een tand die meerdere hoeken vertoont, dus bv. een W-vorm heeft. De tanden worden dan in totaal breder (bv. 45 mm). Onderzocht werd een model waarbij de afstand tussen de tanden 35 mm bedroeg. Ook hier konden door de speciale constructie van de proefrotor de bladen op de as worden verschoven, waardoor de tanden verspringend of achter elkaar konden worden opgesteld.

Bij lage toerentallen (100 omw./min.) en 13 cm indompelingsdiepte was de OC-waarde 200 g hoger dan bij de hoekijzerrotor , verhouding 1:1. De economie hierbij was 3350 g O₂/kWh, een hoge waarde, die echter vermindert bij hogere toerentallen. De indruk werd verkregen, dat de verhouding tand : tussenruimte hierop van invloed zou kunnen zijn.

3.3 Andere rotortypen

Vervolgens werden onderzocht 'volle' platen van 1 m lengte - dus als het ware kammen zonder tussenruimte. Als andere uiterste werden daarna kammen met zeer veel tussenruimte (in dit geval van kippegaas) in het onderzoek betrokken.

3.3.1 *Plaatrotor van 50 cm diameter*

De 12 'kammen' van deze rotor bestonden uit platen zwaar blik van 100 x 21,5 cm. Hiermede werd een rotor van 50 cm diameter opgebouwd. Er kon bij 120 toeren een hoge OC-waarde (2450 g O₂ per m rotor) worden bereikt. Bij groter toerental steeg deze waarde niet zoals gebruikelijk, doch nam iets af (2380 bij 150 toeren). De economie vermindert van 2660 g O₂/kWh bij 100 toeren zelfs tot 1550 bij 150 toeren.

3.3.2 *Gaasrotor van 50 cm diameter*

Ofschoon men bij het gebruik van gaas als aeratie-materiaal nauwelijks van 'kammen' kan spreken en de benaming 'bladen' wellicht beter ware, willen wij per analogie toch maar de term kammen blijven voeren.

De kammen bestonden dus uit stroken gaas van 100 x 21,5 cm met een maaswijdte van 15 x 15 mm en een draaddikte van 2,1 mm. Bij het roteren wordt zéér weinig water opgeworpen, in tegenstelling tot de platenrotor. Het energieverbruik is bijzonder gering. De OC is zeer laag en stijgt maar heel weinig bij toenemend toerental. De OC/N is eveneens laag (ca. 1800 voor 100 à 200 toeren). De eerste indruk is, dat het water te gemakkelijk om de ronde draden heenstroomt zonder dat veel turbulentie optreedt.

3.3.3 *Gaasrotor van 42 cm diameter*

Vrijwel dezelfde resultaten werden verkregen met een gaasrotor van 42 cm diameter. Bij de beide rotortypen vertonen zich in de OC/N-waarden twee maxima. Het grootste maximum bij lagere, en een kleiner maximum bij hogere toerentallen. Eenzelfde verschijnsel werd geconstateerd bij een ander type rotor van 42 cm, nl. een type dat 12 kammen had met 6 mm dikke ronde ijzeren staven. Daarbij waren maxima van 2600 g O₂/kWh beneden de 120 omw./min. en van 2200 g O₂/kWh boven de 190 omw./min. Daar tussen in ligt bij 160 omwentelingen voor alle indompelingsdiepten een minimum van 2100 g O₂/kWh.

Terwijl in het geval van de plaatrotor (waar dus de tussenruimten ontbreken) de OC sterke afwijkingen vertoont die zich niet voordoen in de economiecurve, treden in het geval van de gaasrotor onregelmatigheden in de economielijnen op, waarbij nu het OC-verloop ongestoord is.

3.4 **Analyse van de met de rotortypen 3.1 t/m 3.3 bereikte resultaten**

Wanneer men de resultaten van de tot dusver onderzochte rotoren van gelijke diameter en gelijke verhouding tand : tussenruimte bij eenzelfde toerental en indompelingsdiepte vergelijkt, dan blijkt dat de OC-waarden hoger liggen, naarmate de

tand breder is. Voor de onderzochte Kessener borstel van 50 cm diameter bv. draagt de OC per m bij 100 omw., 13 cm indompeling en een verhouding tand : tussenruimte 1 : 1, 1335 g O₂ per m. Bij de hoekijzerrotoren met tanden en tussenruimten van 2 cm breed (1 : 1) onder bepaalde omstandigheden 2100 g, terwijl de nog bredere tanden met W-profiel 2300 gr zuurstof per m rotor in het water kunnen brengen. Hieruit kan de OC per tand worden berekend:

klassieke tand met spitse punt	1,7 gram
hoekijzertand	7,0 gram
tand van W-vorm	15,3 gram

Op grond van deze resultaten was het voor de hand liggend de invloed van:

1. vorm en breedte der tanden,
2. afmetingen van de tussenruimten,
3. het toerental

verder na te gaan.

3.5 Rotoren van 50 cm diameter met plaatvormige tanden⁸

3.5.1 Rotor met rechthoekige tanden

3.5.1.1 Rotor met tanden van 3 cm breedte (grafiek nr. 9)

	ruimte tussen de tanden	verhouding tand : tussenruimte	aantal tanden
a	1,5 cm	1 : 0,5	264
b	3 cm	1 : 1	204
c	4,5 cm	1 : 1,5	162

Uit de OC-curven blijkt dat bij lage toerentallen (beneden ca. 100 omw./min.) de hoogste waarden bij de kleinste tussenruimten worden bereikt; bij hogere toerentalen daarentegen in het algemeen bij de grootste tussenruimten. De maxima in de OC/N liggen bij lage toerentallen (beneden de 90 omw./min), met uitzondering van de hoge maximumwaarde van ± 3700 g O₂/kWh voor de rotor met de breedste tussenruimte, die bij 120 omw./min. wordt bereikt.

Hiervoor kan geen verklaring worden gegeven. Herhaling van de proef leverde dezelfde waarde op.

⁸ T.N.O.: Borstel voor het inbrengen van gassen in vloeistoffen. Ned. Octrooi nr. 88.767, dd. 17 juli 1958.

3.5.1.2 Rotor met tanden van 4,5 cm breedte (grafiek nr. 10)

Hierbij is alleen de verhouding 1 : 1 onderzocht bij een indompeling van 13 cm.

De economiecurve ligt gunstig, daar deze slechts een langzame daling bij grotere omwentelingssnelheden te zien geeft.

3.5.1.3 Rotor met tanden van 5 cm breedte (grafiek nr. 10)

	<i>ruimte tussen de tanden</i>	<i>verhouding tand : tussenruimte</i>	<i>aantal tanden</i>
a	3 cm	1 : 0,6	150
b	5 cm	1 : 1	120
c	7,5 cm	1 : 1,5	96

Opmerkelijk is hier, dat de energiewaarden bij lagere omwentelingssnelheden alle hoger zijn dan de overeenkomstige bij de rotor met 3 cm brede tanden, doch dat zij bij hogere toerentallen op ongeveer hetzelfde niveau komen te liggen. De OC-curven verlopen steiler, vooral voor de verhouding 1 : 0,6 en 1 : 1. De maxima in OC/N liggen ongeveer bij 100 omw./min. Bij de verhouding 1 : 1 wordt de hoge OC/N-waarde van ± 3700 bereikt bij een OC van ± 2800 g. Bij 18 cm indompeling en ± 160 omw./min. (niet in de grafiek weergegeven) werd met een verhouding van 1 : 1 de tot nu toe hoogste OC van ± 5200 per m rotor bereikt; de economie is daarbij echter slechts ± 1800 g O₂/kWh.

3.5.1.4 Rotor met tanden van 7 cm breedte (grafiek nr. 11)

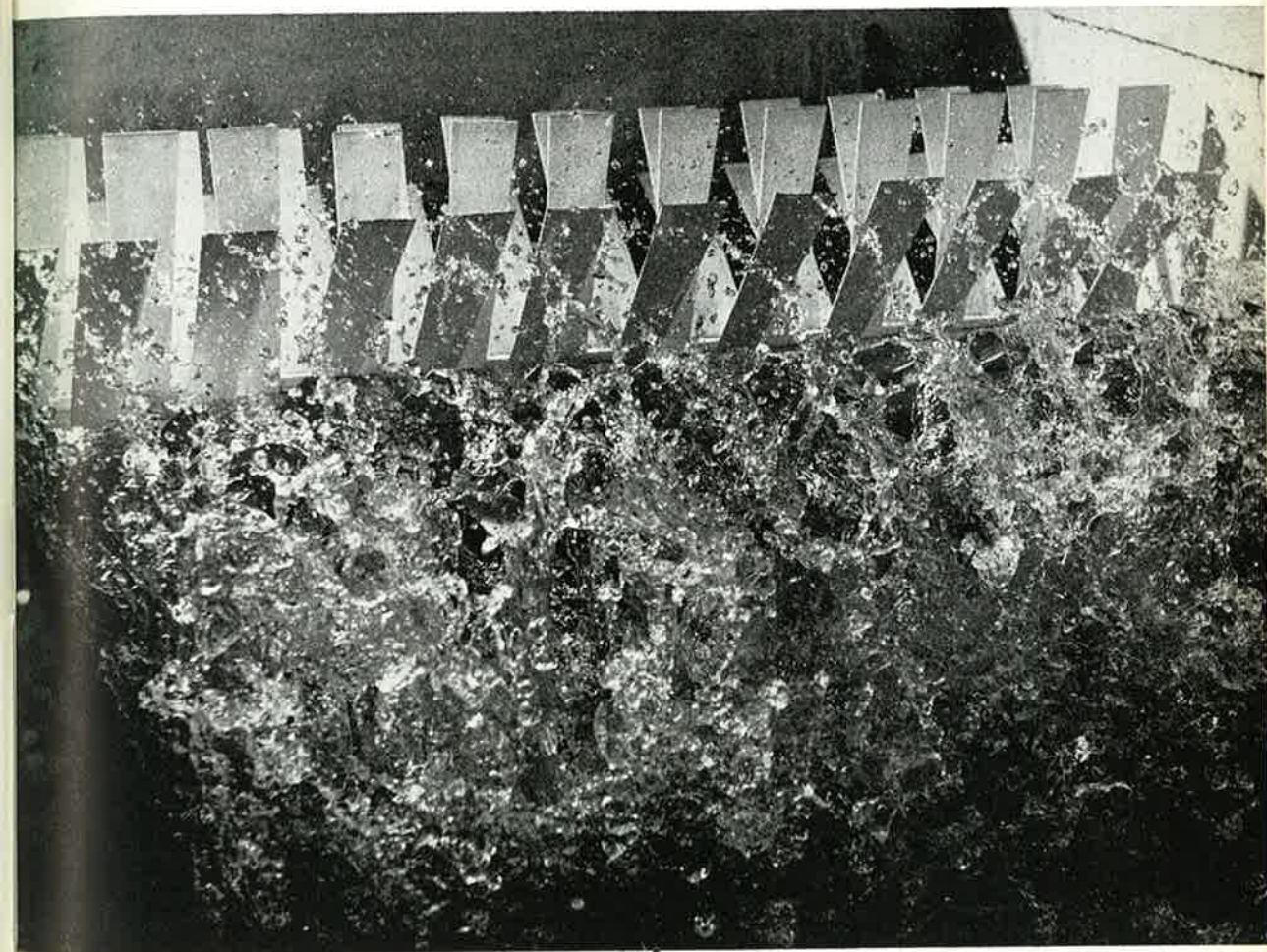
	<i>ruimte tussen de tanden</i>	<i>verhouding tand : tussenruimte</i>	<i>aantal tanden</i>
a	3 cm	1 : 0,43	120
b	4,2 cm	1 : 0,6	108
c	7 cm	1 : 1	84

De energiewaarden zijn bij lage toerentallen iets hoger dan bij de 5 cm brede tanden; bij hogere toerentallen zijn zij echter nagenoeg gelijk. De OC-curven zijn echter lager en vooral tengevolge hiervan de economiewaarden eveneens.

3.5.1.5 Rotor met tanden van 10 cm breedte (grafiek nr. 11)

Hier is slechts de verhouding 1 : 0,33 onderzocht; het totaal aantal tanden bedroeg 90 per m rotor.

Ook hier heeft de energiecurve een vlak verloop; de OC/N blijft wegens te lage OC-waarden eveneens laag.



10. Deltarotor met trapeziumvormige tanden

3.5.2 Rotor met deltavormige tanden (grafiek nr. 12)

	<i>ruimte tussen de tanden¹</i>	<i>verhouding tand : tussenruimte¹</i>	<i>aantal tanden</i>
a	0,6 cm	1 : 0,12	216
b	1,3 cm	1 : 0,26	186
c	3 cm	1 : 0,6	150
d	7,5 cm	1 : 1,5	96

Constructiedetails: totale rotordiameter 50 cm, asdiameter 7 cm, afmetingen van de kammen 100 x 21,5 cm, tandbreedte 5 cm aan de top en 3 cm aan de basis.

De keuze van deze bijzondere tandvorm is als volgt te verklaren. Op grond van visuele en fotografische waarnemingen kon worden geconcludeerd dat de turbulentie hoofdzakelijk aan het uiteinde van de tanden optreedt, waaruit de veronderstelling mocht volgen dat een versmalling van de tanden in de buurt van de as geen OC-verlies van betekenis teweegbrengt, terwijl een gunstiger energieverbruik verwacht mag worden (zie foto 10).

Bij vergelijking van de grafieken voor 150 rechthoekige tanden (grafiek nr. 10, verhouding 1 : 0,6) met die voor 150 trapeziumvormige tanden blijkt inderdaad dat de energiewaarden voor de deltatanden over het gehele verloop iets lager zijn. Hetzelfde geldt voor de OC-waarden, echter nu slechts in het gebied beneden 110 omwentelingen. Dit verklaart ook het iets lagere maximum (bij ca. 95 omwentelingen) in de economiecurve, waartegenover het voordeel staat dat de curve na dit maximum een minder sterke daling te zien geeft. Hier zij nog vermeld dat bij 18 cm indompelingsdiepte en ± 120 omw./min, een OC van niet minder dan ± 4700 g per m rotor werd bereikt! Evenwel bedroeg de economie hierbij slechts ± 2800 g O_2 /kWh.

3.6 Analyse van de met de rotortypen 3.5.1 t/m 3.5.2 bereikte resultaten

In de reeks van de rotortypen met rechthoekige tanden neemt de OC per tand toe met groter wordende tandbreedte, doch doordat het totale aantal tanden bij toenemende breedte steeds kleiner wordt blijft de OC per m rotor toch betrekkelijk laag, behalve bij de rotoren met tanden van 5 cm topbreedte (zie tabel nr. 2, waarin ter vergelijking ook sommige der onder 3.1 t/m 3.3 besproken rotoren zijn opgenomen). Niet alleen dat de OC-waarden belangrijk hoger zijn, vergeleken bij die van de tot nu toe onderzochte rotortypen, doch ook de economiewaarden liggen onder vergelijkbare omstandigheden aanzienlijk gunstiger.

¹ gemeten aan de uiteinden van de tanden.

Tabel 2. Rotoren van 50 cm diameter. OC per tand bij 100 omw. /min.

Type	tand- breedte in cm	tussen- ruimte in cm	aantal tanden	OC per m rotor	OC per tand
				in g O ₂	
1. Kessener	1	1	792	1350	1,7
2. 	2	2	300	2100	7,0
3. 	2	3	240	2700	8,3
4. 	3	3	198	2500	12,6
5. 	4,5	3,5	150	2300	15,3
6. 	5	3	150	2900	19,3
7. 	4,5	4,5	132	2600	19,7
8. 	5	5	120	3200	26,6
9. 	7	7	84	2350	28,0
10. 	100	—	12	2220	185,0

Voorts is het een gunstige factor dat het OC/N-maximum bij een lager toerental dan voorheen optreedt.

Opmerkelijk is de veranderende samenhang tussen de bereikte OC-waarden en de tussenruimten der tanden. Bij de smalste rechthoekige tanden (3 cm) werden bij lage toerentallen des te hogere waarden bereikt naarmate de tussenruimten smaller waren; bij hogere toerentallen daarentegen bij wat bredere tussenruimten. Voor de 5 cm brede tanden geldt dit nog slechts ten dele. Bij de tanden van 7 cm daarentegen stijgt de OC-waarde voor alle onderzochte toerentallen naarmate de tussenruimten nauwer worden.

Bij de deltarotor ligt het energieverbruik van het type met de grootste ruimte tussen de tanden, nl. 3 cm, het laagst. Dit geldt bij alle toerentallen. De daarbij behorende OC-lijn snijdt die van de typen met 0,6 en 1,3 cm tussenruimte in het gebied van 100-130 toeren. Het blijkt dan ook dat de economie voor de tand met 3 cm tussenruimte het gunstigst is. Zij bedraagt in het gebied van 100 tot 120 toeren/min. meer dan 3400 g O₂/kWh!

Tabel 3. Zuurstoftoevoervermogen en economie van de onderzochte rotortypen in gra

	diameter	verhouding tand : tussenruimte
1. Klassieke Kessener borstel	42 cm	1 : 1
2. Rotor met spitse tanden	42 cm	1 : 1,5
3. Rotor met klassieke tandvorm	50 cm	1 : 1
4. Hoekijzerrotor	42 cm	1 : 1,5
Hoekijzerrotor	42 cm	1 : 1,5
Hoekijzerrotor	42 cm	1 : 1,5
Hoekijzerrotor	42 cm	1 : 1,5
5. Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1,5
Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1,5
Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1,5
Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1,5
6. Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1
Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1
Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1
Hoekijzerrotor	50 cm	1 : 1
7. Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 1,5
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 1
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 0,5
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 1,5
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 1
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 0,6
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 1
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 1
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 0,6
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 0,4
Rotor met rechthoekige tanden	50 cm	1 : 0,33
8. Rotor met deltatanden	50 cm	1 : 0,12
Rotor met deltatanden	50 cm	1 : 0,26
Rotor met deltatanden	50 cm	1 : 0,6
9. Kooirotor 75 omw./min., 16 cm indompeling	70 cm	1 : 1
Kooirotor 75 omw./min., 16 cm indompeling	70 cm	1 : 1

zuurstof per m rotor per uur, bij 13 cm indompeling en 120 omwentelingen per minuut.

tandbreedte		OC	OC/N
		1400	2650
		1000	2300
		2000	2750
2 cm		1200	2450
2 cm		1400	2350
2 cm		1400	2900
2 cm		1700	2950
2 cm		1800	2400
2 cm		2150	2500
2 cm		1950	2600
2 cm		2600	2850
2 cm		2350	2700
2 cm		2750	2700
2 cm		2600	2850
2 cm		2950	2950
3 cm		3750	3700
3 cm		3500	3050
3 cm		3100	2600
5 cm		3150	2750
5 cm		> 4200	± 3400
5 cm		3800	2950
4,5 cm		3650	3100
7 cm		± 2650	± 2500
7 cm		± 2950	± 2600
7 cm		± 3100	± 2650
10 cm		2960	2640
5 cm		3500	2900
5 cm		3750	3150
5 cm		3800	3400
		3100	3510
		4210	3200

De resultaten kunnen als volgt worden samengevat:

1. Bij gebruik van rechthoekige en deltatanden kunnen bij toerentallen van ± 120 soms belangrijk hogere OC- en OC/N-waarden worden bereikt dan bij de overige tot dusver onderzochte borsteltypen mogelijk was.
 2. Bij de rotoren met rechthoekige tanden blijkt de verhouding tand : tussenruimte 1 : 1 belangrijk gunstiger resultaten te geven dan de overige onderzochte verhoudingen, terwijl bij rotoren met deltatanden de verhouding 1 : 0,6 is te prefereren.
- Teneinde een globaal overzicht te verkrijgen over alle tot nu toe bereikte resultaten zijn deze in tabel 3 tezamengevat, allen voor dezelfde omstandigheden nl. 13 cm indompeling en ± 120 toeren per minuut. Onder 9. zijn ook de cijfers gegeven voor de in 3.7 nog te beschrijven zg. kooirotor. De hierbij gevonden waarden zijn echter bepaald bij 75 omw./min. en 16 cm indompelingsdiepte.

3.7 Kooirotor van 70 cm diameter, met plaatvormige rechthoekige tanden⁹ (grafieken nrs. 13 en 14)

De argumenten om ook een rotor van dit type in het onderzoek te betrekken zijn:

- a. bij de voorgaande onderzoeken is overduidelijk gebleken dat een rotor van grotere diameter bij eenzelfde toerental meer zuurstof in het water kan brengen dan een van kleinere diameter;
- b. uit de praktijk komt de vraag naar rotoren van grotere diameter, teneinde de kans op nat worden van de rotorlagers en de daaraan verbonden bezwaren te verminderen, hetgeen in het bijzonder van belang is wanneer het toezicht op de installatie tot een minimum is beperkt, wat bv. het geval is in het door Dr. Ir. A. Pasveer ontwikkelde zeer eenvoudige afvalwaterzuiveringssysteem¹⁰.

De kooirotor bestaat uit een al of niet doorlopende as, waarop twee grote flenzen van 70 cm diameter zijn gemonteerd. Tussen deze flenzen bevinden zich een 12-tal steunlijsten evenwijdig aan de as, zodat een soort cilinder of kooi ontstaat (foto 11). Het zal duidelijk zijn dat, wanneer de constructie stevig genoeg is en de afwerking der lijsten nauwkeurig, de centrale as tussen de flenzen eigenlijk overbodig is. Eenvoudigheidshalve geven de constructeurs echter veelal de voorkeur aan een doorlopende as. Op de steunlijsten worden plaatjes van 5 x 15 cm geschroefd of gelast en wel zodanig dat zij niet buiten de flenzen uitsteken, zodat ook de diameter van de totale constructie 70 cm bedraagt. Voor de plaatjes werd de rechthoekige vorm gekozen in verband met de gunstige resultaten die met rotoren met rechthoekige tanden (zie hoofdstuk 3.5.1) werden verkregen.

9 T.N.O.: Roterende beluchtingsinrichting voor het inbrengen van zuurstof in water. Octrooiaanvraag 218.889 Nederland.

10 Dr. Ir. A. Pasveer: Eenvoudige afvalwaterzuivering. Rapport nr. 26 van het Instituut voor Gezondheidstechniek T.N.O., 1958.

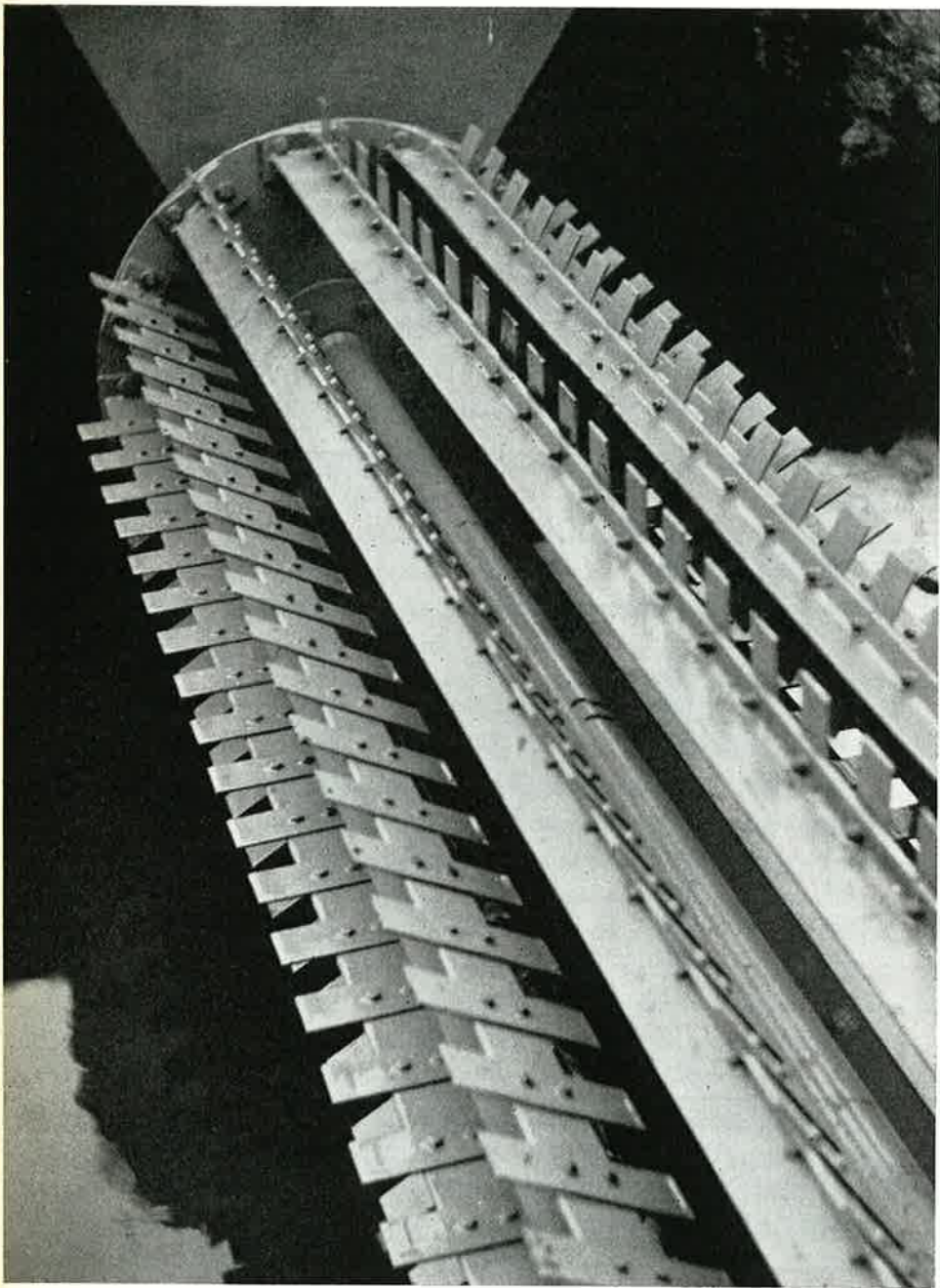
Bij het onderzochte model zijn voor de steunlijsten hoekijzers gebruikt. Aangezien uit de proefnemingen met de hoekijzerrotoren (zie hoofdstuk 3.2) reeds bleek dat het verschil maakt of de hoekijzers zich met de open dan wel met de gesloten zijde naar voren door het water bewegen, zijn ook in dit geval, temeer daar er bij bepaalde zuiveringsschema's wel gebruik wordt gemaakt van rotoren, die nu eens in de ene, dan weer in de andere richting moeten kunnen draaien, beide mogelijkheden nagegaan en vastgelegd in de tabellen 4 en 5.

Aangezien de kooirotor van groot belang is voor het in het bovenstaande reeds genoemde eenvoudige afvalwaterzuiveringssysteem is dit onderzoek breder opgezet en wel voor indompelingsdiepten van 8, 16, 24 en 30 cm.

Tabel 4. Kooirotor van 70 cm diameter, draairichting (Δ $\bigcirc$

Omw./min.	Ind. diepte	OC		N	OC/N
		per m rotor			
72,5	8	1690		0,510	3320
81	8	2360		0,630	3750
96	8	2540		0,860	2950
67,5	16	3360		1,000	3360
75	16	4210		1,210	3510
84	16	4460		1,550	2880
105	16	4025		2,100	1920
120	16	4480		3,000	1490
64,5	24	4070		1,250	3250
82,5	24	6080		2,060	2950
101	24	6480		3,390	1910
113	24	7150		4,300	1660
81	30	6510		2,425	2690
97,5	30	7740		4,000	1930
110	30	8870		5,600	1580

Daar het van belang kan zijn onder bijzondere omstandigheden, bv. wanneer water met een zeer hoge BOD moet worden gezuiverd, een zeer grote hoeveelheid zuurstof in het water te brengen, is ook bij 110 omw./min. en 30 cm indompelingsdiepte de OC bepaald. Deze bedroeg per m rotor niet minder dan 8870 g O₂ per uur! De economiewaarde was echter laag en de zuurstoftoevoer onder deze omstandigheden is dus wel kostbaar; bv. 2 x zo duur als bij 65 toeren en 24 cm indompeling! (2 x 4070 g O₂ voor 2 . 1250 Watt in plaats van 1 x 8870 g O₂ voor 5600 Watt!)



11. Kooirotor van 70 cm diameter

Tabel 5. Kooirotor van 70 cm diameter, draairichting 

Omw./min.	Ind. diepte	per m rotor		OC/N
		OC	N	
73,5	8	1935	0,435	3020
86	8	1835	0,660	2780
100	8	2230	0,950	2345
69	16	2770	0,815	3400
77,5	16	3250	1,060	3055
99	16	4220	1,860	2270
66	24	3610	1,170	3090
85	24	5000	2,270	2200
97	24	5489	3,500	1570
64,5	30	3560	1,325	2690
84	30	5360	2,460	2180

Wanneer wij de plaatjes van de steunlijsten demonteren en zodoende een rotor overhouden, alléén bestaande uit hoekijzers, evenwijdig aan de as gemonteerd, blijkt bij deze zg. spantenrotor nog eens duidelijk de invloed van de draairichting.

Tabel 6. Spantenrotor met hoekijzers.

Omw./min.	Ind. diepte	per m rotor		OC/N	Draairichting
		OC	N		
90	16	3060	1,290	2375	
98	16	1940	0,810	2390	

Door vergelijking van de in de tabellen 4, 5 en 6 voorkomende gegevens kan worden geconcludeerd dat voor een optimale werking de kooirotor met hoekijzersteunlijsten steeds zodanig moet draaien, dat de steunlijsten met de open zijde het eerst het wateroppervlak treffen.

4 Samenvatting

Aanleiding tot het onderzoek was de vraag of het oplossen van zuurstof in water intensiever en wellicht ook economischer zou kunnen geschieden dan met de zg. Kessener borstel mogelijk is.

Een vergelijkend onderzoek vond plaats met verschillende typen rotoren van een meter lengte in een aeratietank als weergegeven in figuur 1 onder dezelfde proefomstandigheden.

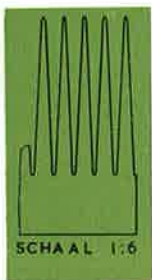
Als kenmerkende grootheden zijn te beschouwen het zuurstoftoevoervermogen, uitgedrukt in g O₂ per meter rotor, en de economie van deze toevoer, uitgedrukt in g O₂ per kWh. Voor de Kessener borstel bedragen deze bij 13 cm indompeling en ca. 120 omwentelingen per minuut resp. 1400 en 2650.

Aangetoond wordt dat het onder dezelfde proefomstandigheden mogelijk is deze prestatie aanzienlijk op te voeren door het gebruik van andere typen rotoren.

Tijdens het onderzoek kwam het volgende vast te staan:

1. Hoekijzerrotoren kunnen bij nagenoeg dezelfde economie ten naaste bij de dubbele hoeveelheid zuurstof in het water brengen, hetgeen belangrijke besparingen op de installatiekosten van zuiveringsinrichtingen kan geven.
2. Met sommige typen plaatrotoren van 50 cm diameter kan 2½-maal zoveel zuurstof in het water worden gebracht met een ca. 25% betere economie.
3. Het is mogelijk ook met rotoren van grotere diameter (bv. de kooirotor van 70 cm diameter) dezelfde als onder 2. genoemde resultaten te verkrijgen. Voor bepaalde soorten afvalwater en bepaalde systemen van zuivering kan dit van veel voordeel zijn.

Tenslotte mag hier niet onvermeld blijven de intensieve samenwerking met de firma Passavant, zonder welke dit onderzoek niet tot stand zou hebben kunnen komen.



KESSENER BORSTEL

TECHNISCHE GEGEVENS

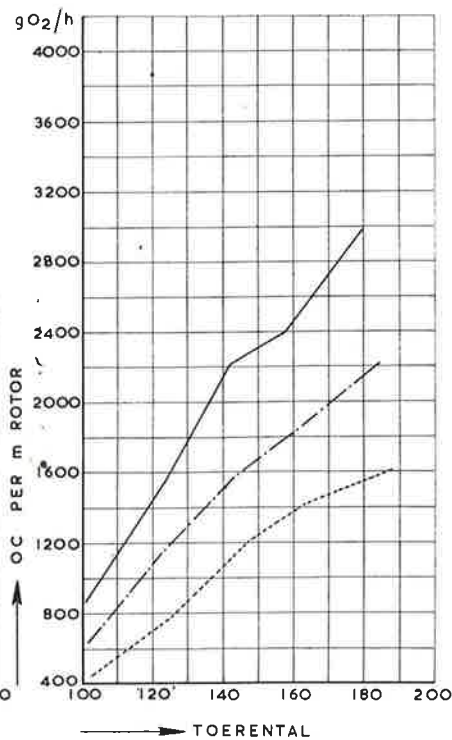
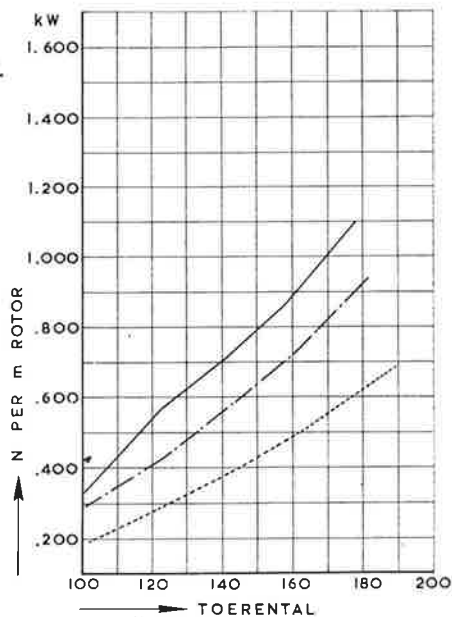
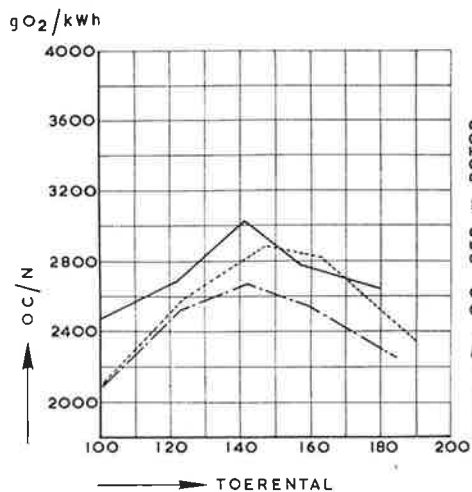
BORSTELDIAMETER 42 cm
 TANDVORM KLASSIEK
 OPPERVLAK TAND : TUSSENRUIMTE 1 : 1
 STAND DER TANDEN IN ÉÉN LUN

INDOMPELINGSDIEPTEN

7 cm = (dotted line)

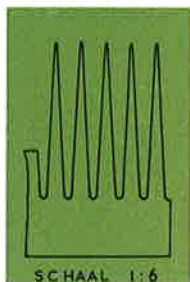
10 cm = - - - - - (dashed line)

13 cm = ————— (solid line)



I.G. - T.N.O.

grafiek 1



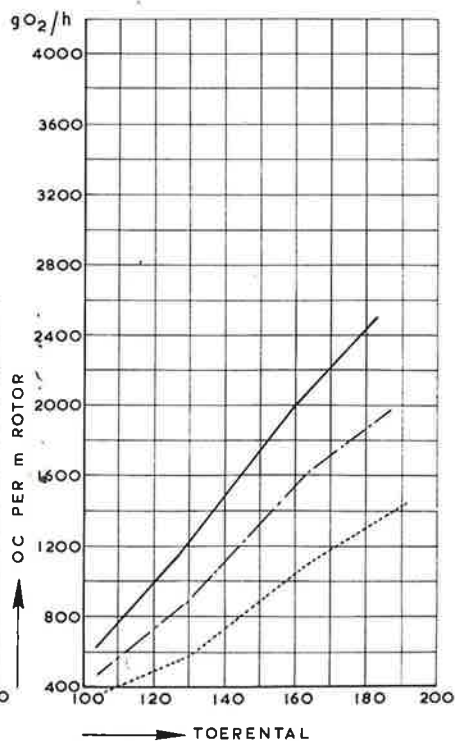
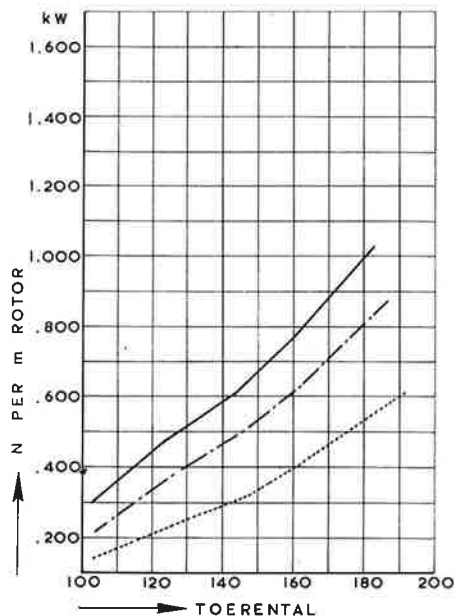
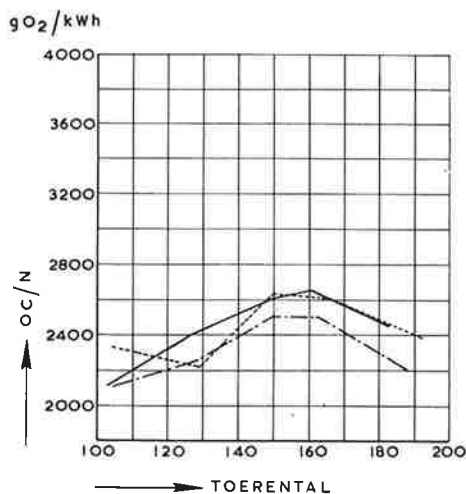
ROTOR MET SPITSTE TANDEN

TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 42 cm
TANDVORM SPITS
OPPERVLAK TAND : TUSSENRUIMTE 1 : 1,5
STAND DER TANDEN IN ÉÉN LYN

INDOMPELINGSDIEPTEN

7 cm =
10 cm = - - - - -
13 cm = —————



I.G. - T.N.O.

grafiek 2



ROTOR MET
KLASSIEKE TANDVORM

TECHNISCHE GEGEVENS

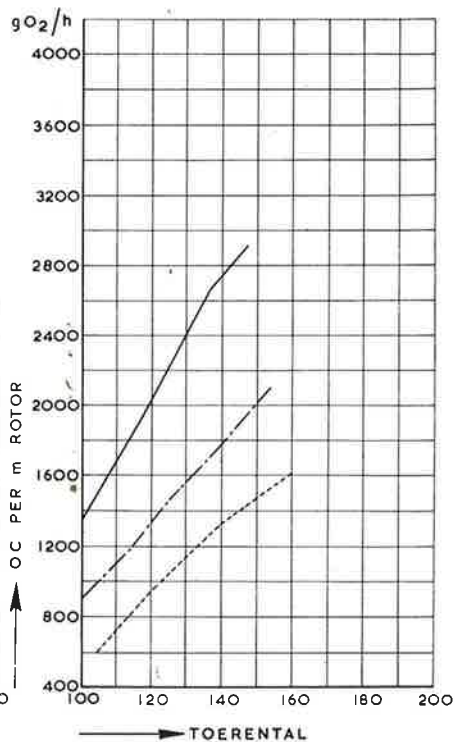
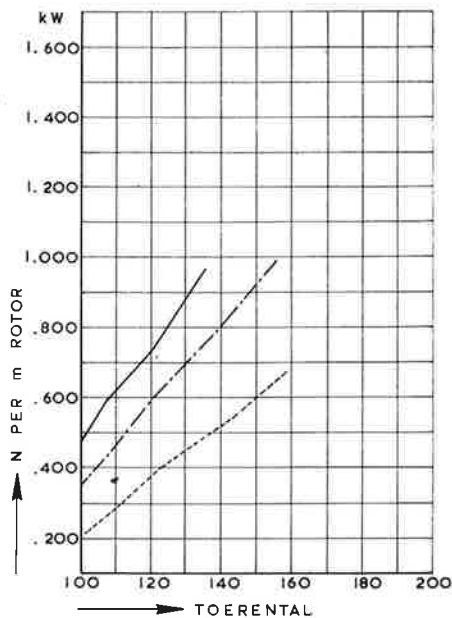
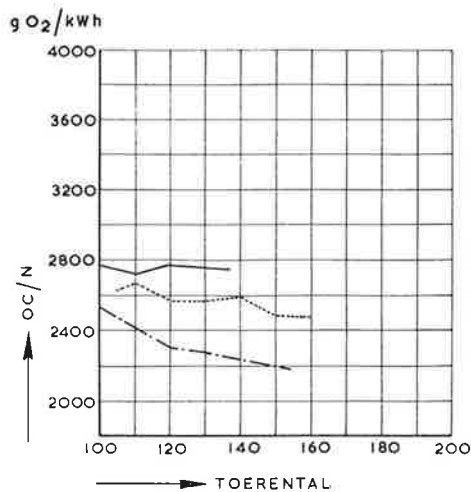
ROTOR DIAMETER 50 cm
TANDVORM KLASSIEK
OPPERVLAK TAND : TUSSENRUIMTE 1 : 1
STAND DER TANDEN IN ÉÉN LYN

INDOMPELINGSDIEPTEN

7 cm =- - - - -

10 cm = - . - . - . - . - . -

13 cm = - - - - -



I. G. - T. N. O.

grafiek 3



ROTOR MET HOEKJUZERS



TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 42 cm
TANDVORM 2 cm HOEKJUZER
OPPERVLAK TAND:TUSSENRUIMTE 1:1,5
STAND DER TANDEN IN ÉÉN LUN

DRAAIRICHTING :



INDOMPELINGSDIEPTEN

7 cm = (dotted line)

10 cm = - - - - - (dashed line)

13 cm = - . - . - (dash-dot line)

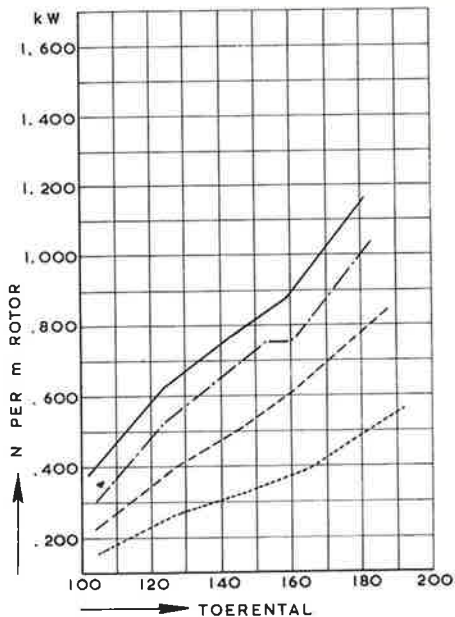
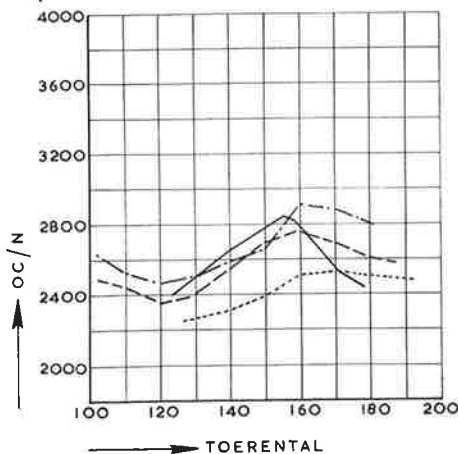
DRAAIRICHTING :



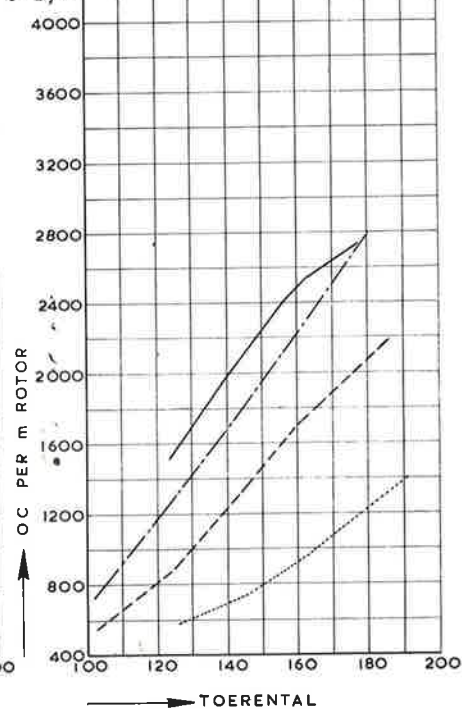
INDOMPELINGSDIEPTE

13 cm = ————— (solid line)

$g O_2 / kWh$



$g O_2 / h$



I.G. - T.N. O.

grafiek 4



ROTOR MET HOEKJZERS



TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 42 cm
TANDVORM 2 cm HOEKJZER
OPPERVLAK TAND:TUSSENRUIMTE 1:1.5
STAND DER TANDEN VERSPRINGEND

DRAAIRICHTING:



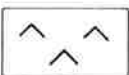
INDOMPELINGSDIEPTEN

7 cm =

10 cm = - - - - -

13 cm = - . - . - .

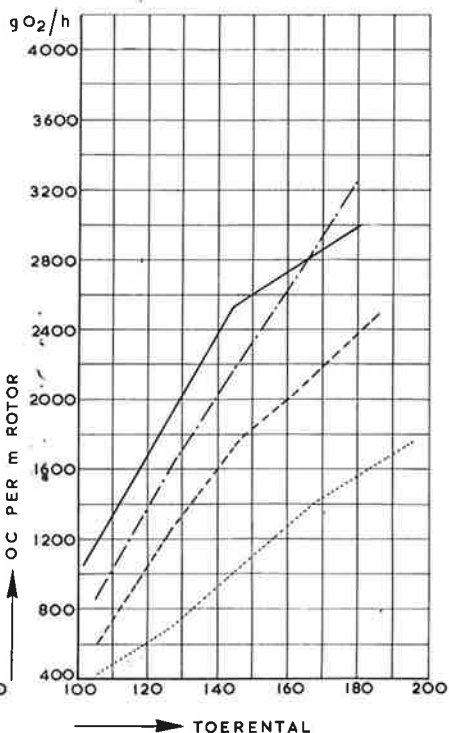
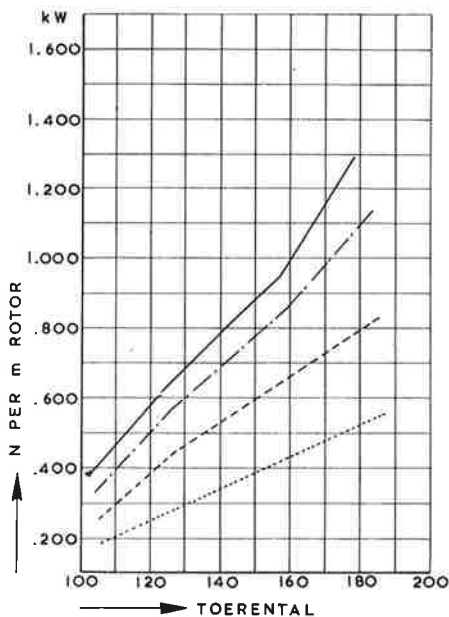
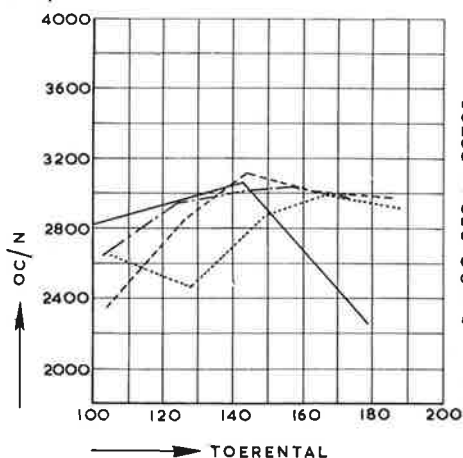
DRAAIRICHTING:



INDOMPELINGSDIEPTE

13 cm = - - - - -

g_{O_2}/kWh

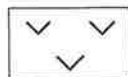


I.G. - T.N. O.

grafiek 5



ROTOR MET HOEKJUZERS

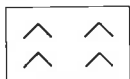


TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 50 cm
TANDVORM 2 cm HOEKJUZER
OPPERVLAK TAND : TUSSENRUIMTE 1:1.5
INDOMPELINGSDIEPTE 13 cm
STAND DER TANDEN EN DRAAIRICHTING



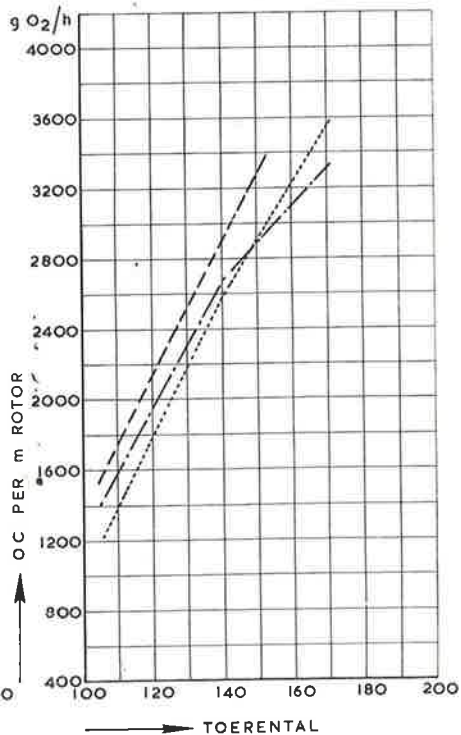
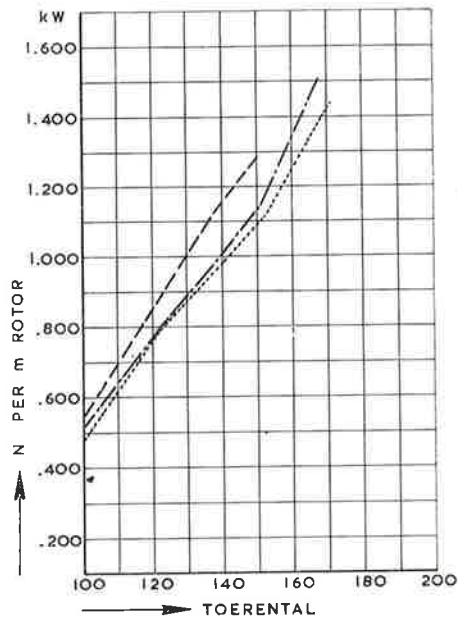
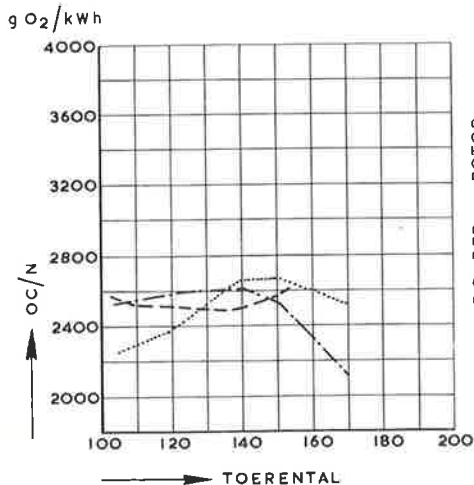
= (dotted line)



= ---- (dashed line)



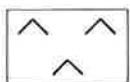
= - - - (dash-dot line)



I.G. - T.N.O.



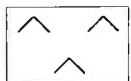
ROTOR MET
HOEKJUZERS
UITVOERIG ONDERZOEK



TECHNISCHE GEGEVENS

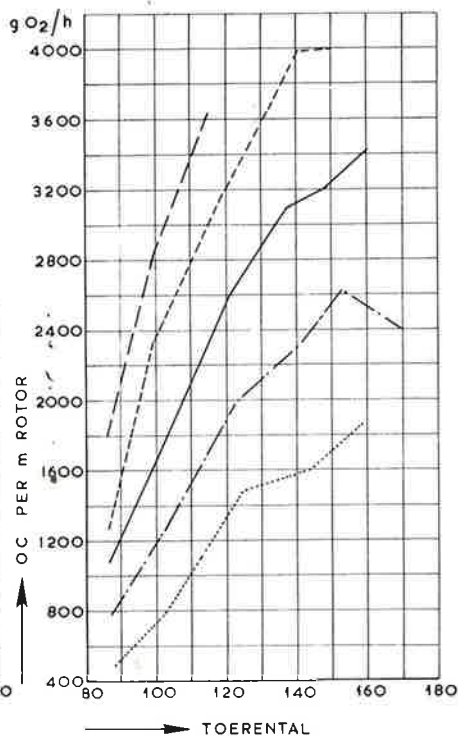
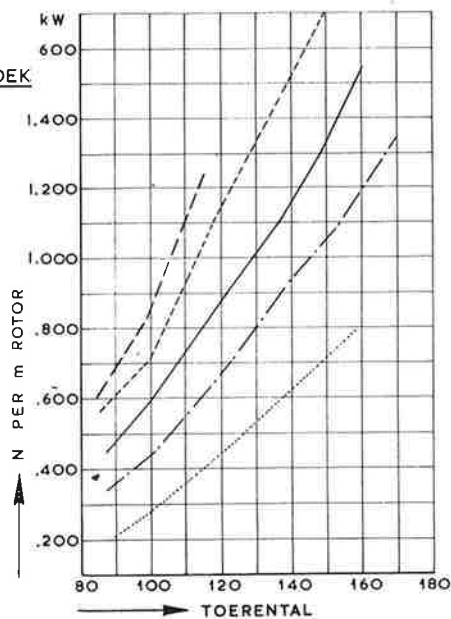
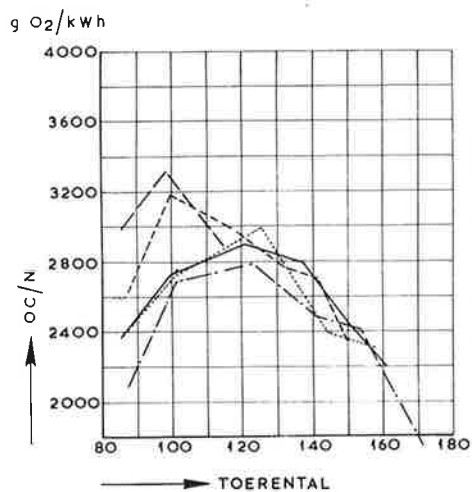
ROTOR DIAMETER 50 cm
TANDVORM 2 cm HOEKJUZER
OPPERVLAK TAND: TUSSENRUIMTE 1:1,5
STAND DER TANDEN VERSPRINGEND

DRAAIRICHTING :



INDOMPSELINGSDIEPTEN

7 cm =
10 cm = - - - - -
13 cm = ————
16 cm = - - - - -
20 cm = - - - - -



I.G. - T. N. O.

grafiek 7



ROTOR MET HOEKJUZERS



EN

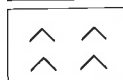


TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 50 cm
TANDVORM 2 cm HOEKJUZER
OPPERVLAK TAND : TUSSENRUIMTE 1 : 1
INDOMPELINGSDIEPTE 13 cm
STAND DER TANDEN EN DRAAIRICHTING :



=



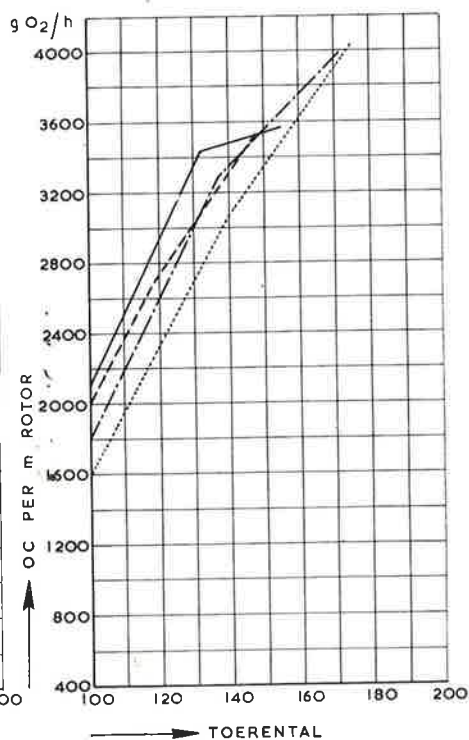
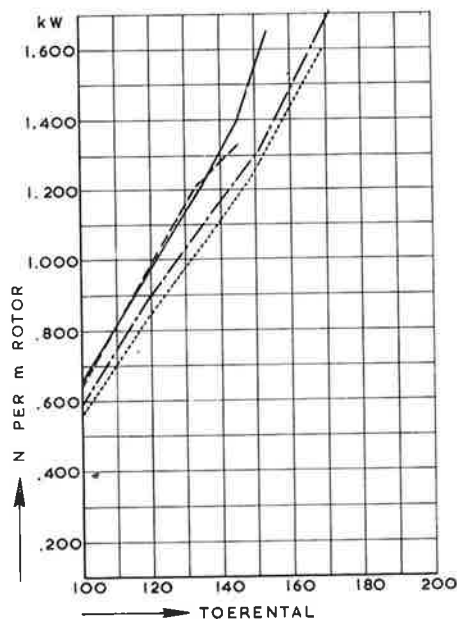
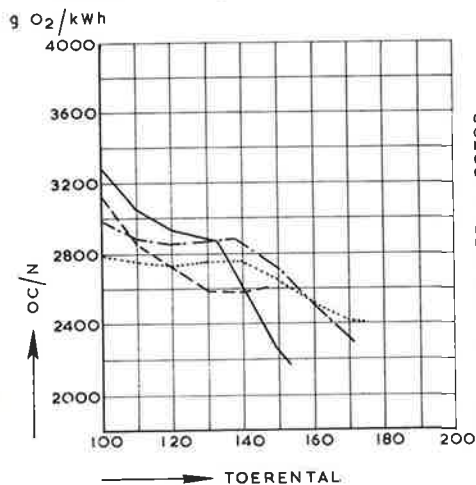
=



=



=

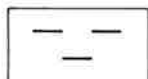


I.G. - T.N.O.

grafiek 8



ROTOR MET RECHT-
HOEKIGE TANDEN

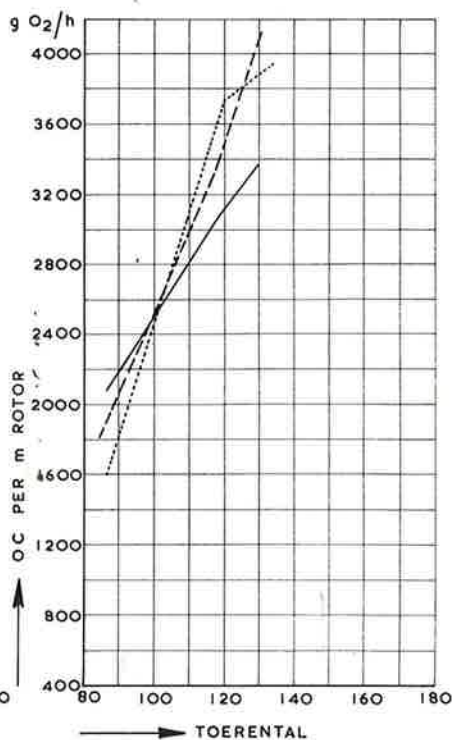
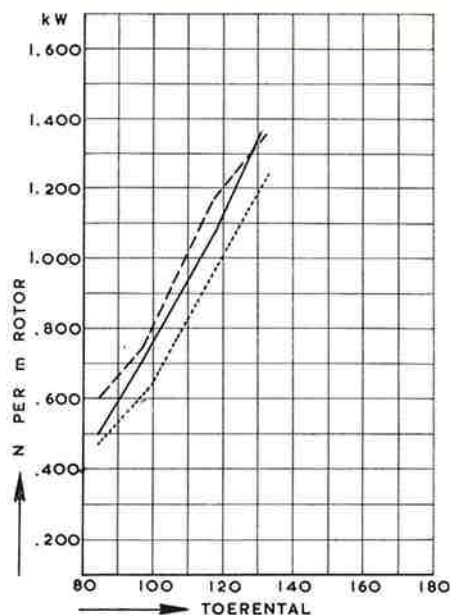
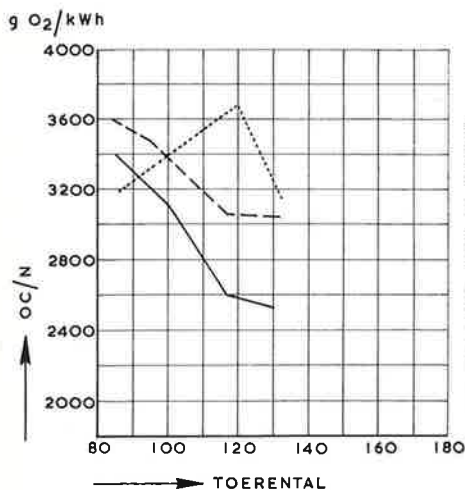


TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER	50 cm
INDOMPELINGSDIEPTE	13 cm
TANDVORM	RECHTHOEKIG
BREEDTE TAND	3 cm
STAND DER TANDEN	VERSPRINGEND

VERHOUDING TAND : TUSSENRUIMTE

1 : 1,5 =	
1 : 1 =	-----
1 : 0,5 =	—————

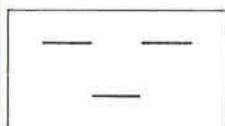


I.G. - T.N.O.

grafiek 9



ROTOR MET RECHT-
HOEKIGE TANDEN



TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 50 cm

INDOMPELINGSDIEPTE 13 cm

TANDVORM RECHTHOEKIG

STAND DER TANDEN VERSPRINGEND

1) BREEDTE TAND 5 cm

VERHOUDING TAND : TUSSENRUIMTE

1 : 4,5 = (dotted line)

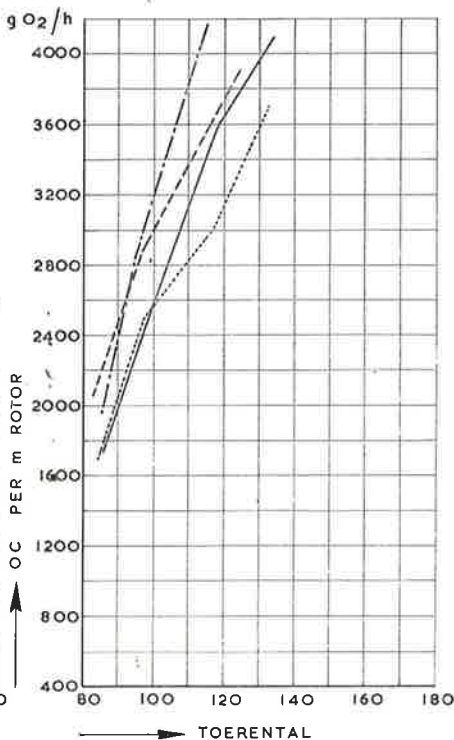
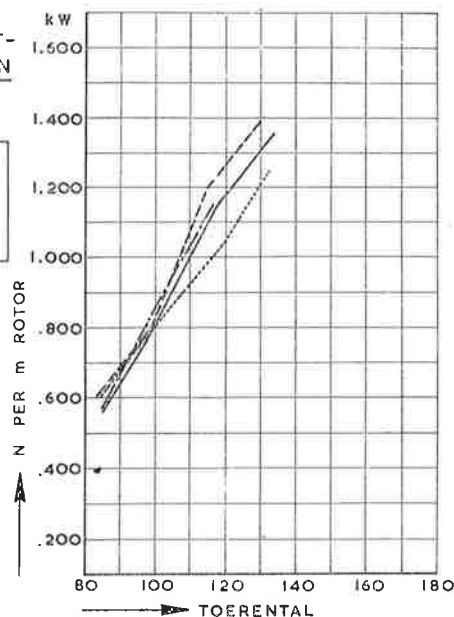
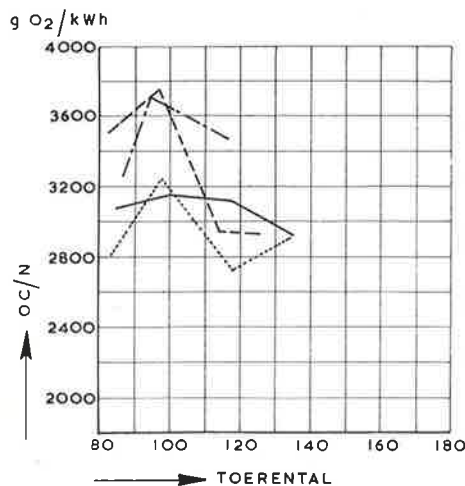
1 : 1 = ————— (solid line)

1 : 0,6 = - - - - - (dashed line)

2) BREEDTE TAND 4,5 cm

VERHOUDING TAND : TUSSENRUIMTE

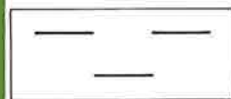
1 : 1 = ————— (solid line)



I.G. - T.N.O.



ROTOR MET RECHT-
HOEKIGE TANDEN



TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 50 cm

INDOMPELINGSDIEPTE 13 cm

TANDVORM RECHTHOEKIG

STAND DER TANDEN VERSPRINGEND

1) BREEDTE TAND 7 cm

VERHOUDING TAND : TUSSENRUIMTE

1 : 1 = (dotted line)

1 : 0,6 = (long dashed line)

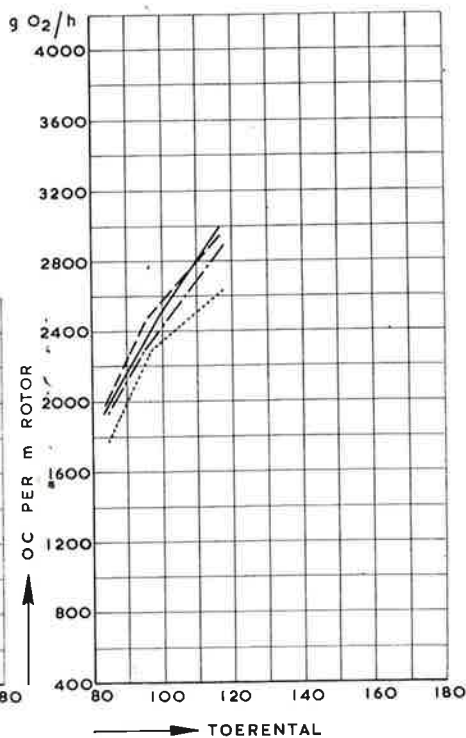
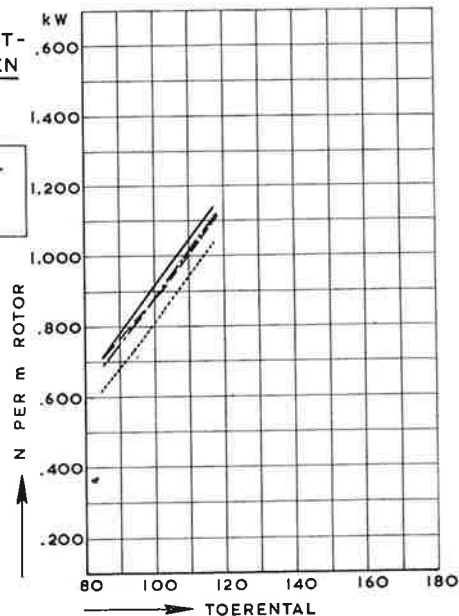
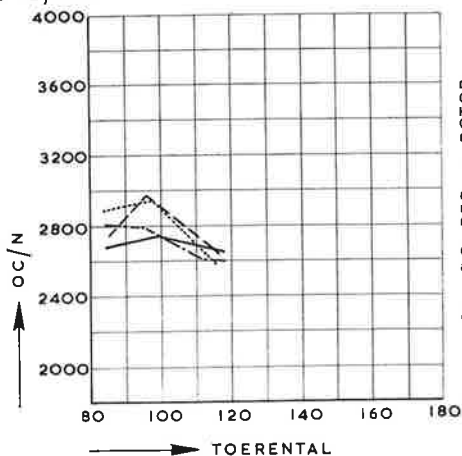
1 : 0,4 = (solid line)

2) BREEDTE TAND 10 cm

VERHOUDING TAND : TUSSENRUIMTE

1 : 0,33 = (dashed line)

g_{O_2}/kWh



I.G. - T.N.O.



ROTOR MET DELTA TANDEN



TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 50 cm
 INDOMPELINGSDIEPTE 13 cm
 TANDVORM DELTA
 STAND DER TANDEN VERSPRINGEND

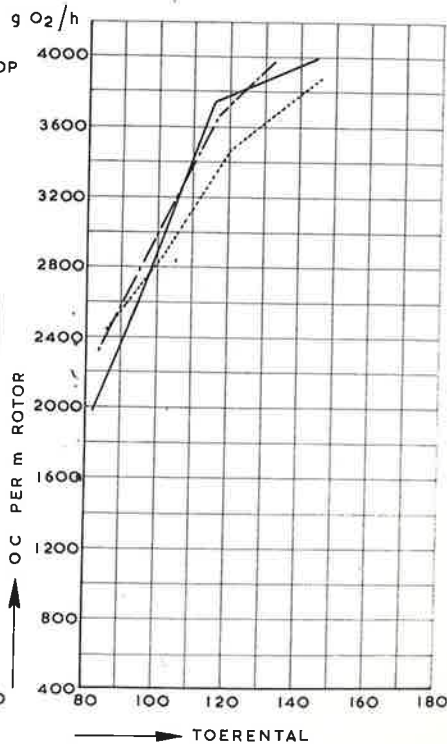
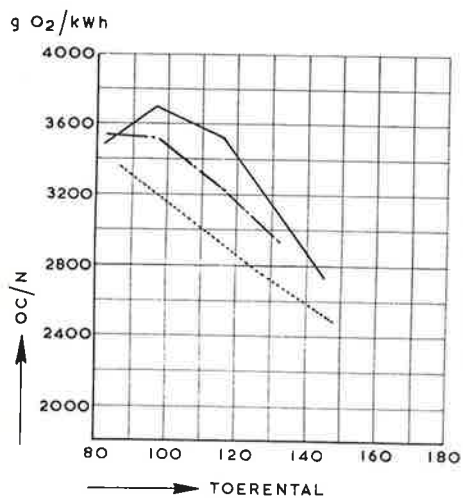
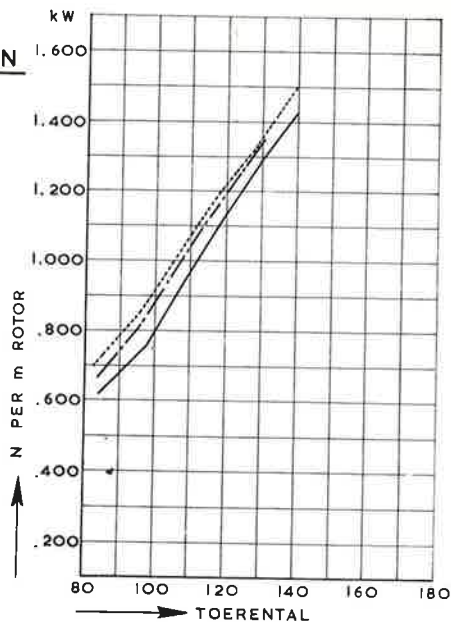
BREEDTE TAND { AAN DE TOP 5 cm
 AAN DE VOET 3 cm

VERHOUDING TAND:TUSSENRUIMTE AAN DE TOP

1 : 0,12 = (dotted line)

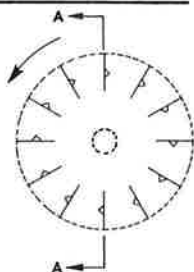
1 : 0,26 = - - - - - (dashed line)

1 : 0,6 = ————— (solid line)



I.G. - T.N. O.

ROTOR MET RECHTHOEKIGE PLATEN



TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 70 cm
TANDVORM RECHTHOEKIGE
PLAATJES 5 x 15 cm
TUSSENRUIMTE 5 cm
STAND DER PLAATJES VERSPRINGEND

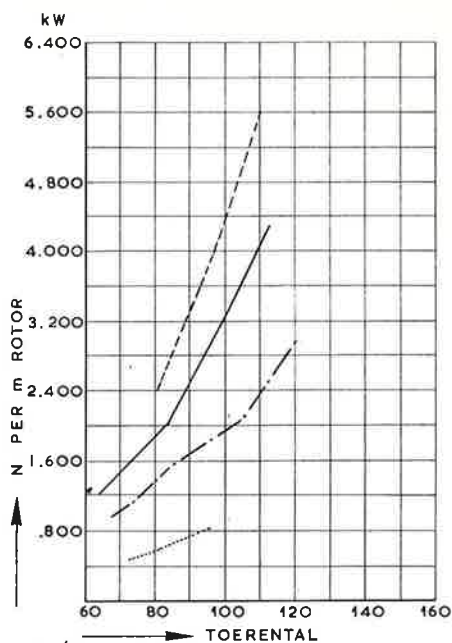
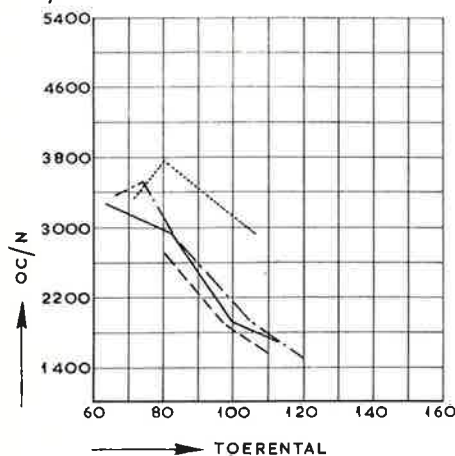
DRAAIRICHTING :



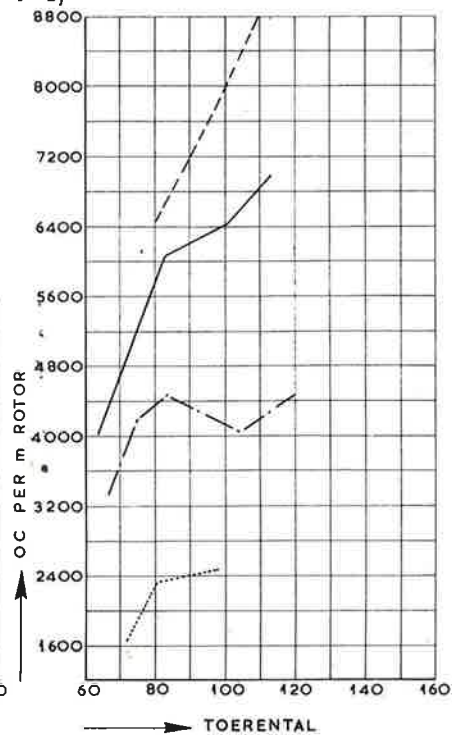
INDOMPELINGSDIEPTEN

8 cm =
16 cm =
24 cm =
30 cm =

$g\ O_2/kWh$

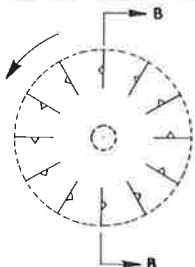


$g\ O_2/h$



I.G. - T.N.O.

ROTOR MET RECHTHOEKIGE PLATEN



TECHNISCHE GEGEVENS

ROTOR DIAMETER 70 cm
TANDVORM RECHTHOEKIGE
PLAATJES 5 x 15 cm
TUSSENRUIMTE 5 cm
STAND DER PLAATJES VERSPRINGEND

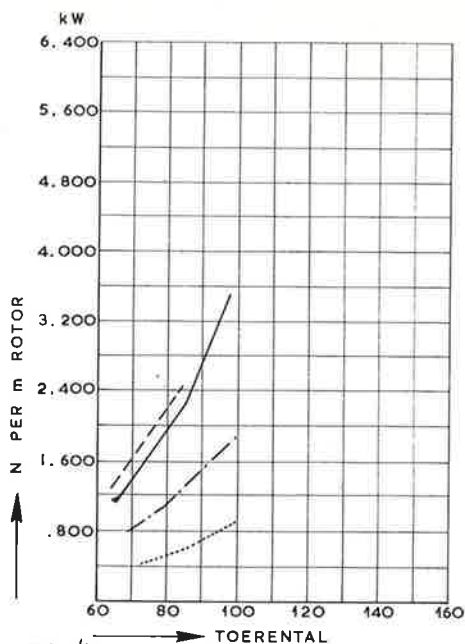
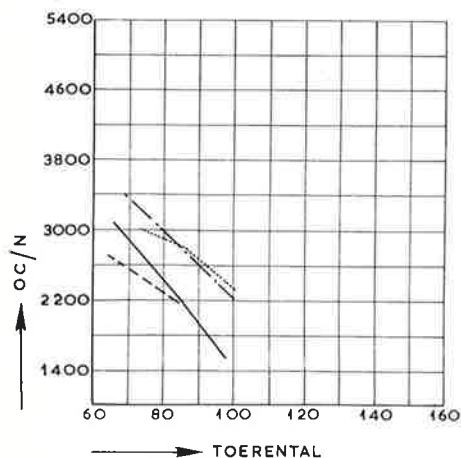
DRAAIRICHTING :



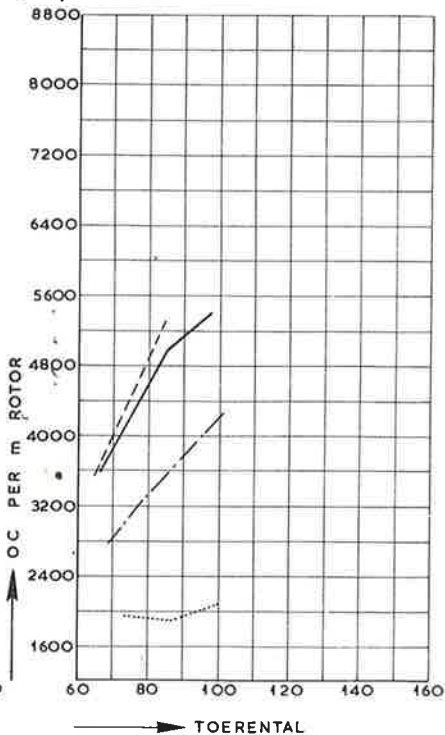
INDOMPELINGSDIEPTEN

8 cm =
16 cm =
24 cm =
30 cm =

g_{O_2}/kWh



g_{O_2}/h



I.G.- T.N.O.

Tabellen, grafieken en afbeeldingen

Tabellen

	pag.
1. Hoekijzerrotor van 50 cm diameter, verhouding tand : tussenruimte 1 :	
1,5 	26
2. Rotoren van 50 cm diameter. OC per tand bij 100 omw./min.	33
3. Zuurstoftoevoervermogen en economie van de onderzochte rotortypen in	
gram zuurstof per m rotor per uur, bij 13 cm indompeling en 120 omw./	
min	34
4. Kooirotor van 70 cm diameter, draairichting (	37
5. Kooirotor van 70 cm diameter, draairichting (	39
6. Spantenrotor met hoekijzers	39

Grafieken betreffende OC, N en OC/N

1. Kessener borstel	42 cm ϕ , 1 : 1,5	
2. Rotor met spitse tanden	42 cm ϕ , 1 : 1,5	
3. Rotor met klassieke tandvorm	50 cm ϕ , 1 : 1	
4. Rotor met hoekijzers	42 cm ϕ , 1 : 1,5	tanden in één lijn
5. Rotor met hoekijzers	42 cm ϕ , 1 : 1,5	tanden verspringend
6. Rotor met hoekijzers	50 cm ϕ , 1 : 1,5	tanden in één lijn en verspringend
7. Rotor met hoekijzers	50 cm ϕ , 1 : 1,5	tanden verspringend uitvoerig onderzoek)
8. Rotor met hoekijzers	50 cm ϕ , 1 : 1	tanden in één lijn en verspringend
9. Rotor met rechthoekige tanden	50 cm ϕ , tand 3 cm	verspringend
10. Rotor met rechthoekige tanden	50 cm ϕ , tand 4,5 en 5 cm	verspringend
11. Rotor met rechthoekige tanden	50 cm ϕ , tand 7 en 10 cm	verspringend
12. Rotor met deltatanden	50 cm ϕ , tand 5-3 cm	verspringend
13. Rotor met rechthoekige platen	70 cm ϕ , tand 5 cm	verspringend
14. Rotor met rechthoekige platen	70 cm ϕ , tand 5 cm	verspringend, andere draairichting dan 13

Foto's

	pag.
1. Aeratiewals met piassave borstels	4
2. Kessener borstelas met ingefraaide groeven	9
3. Kessener borstels in de zuiveringinstallatie te Tilburg	12
4. Detail van Kessener borstel (42 cm ϕ) met elastische koppeling	16
5. Kessener borstel (36 cm ϕ) in bedrijf (IJsselmonde)	19
6. Rotor met gemakkelijk te monteren bladen	20
7. Hoekijzerrotor, waarvan 2 rijen tanden op één support gelast zijn, welke op de as wordt geschroefd	22
8. Hoekijzerrotor in de zuiveringsinstallatie te Stuttgart, met hoekijzers van 2 cm breedte en 2 cm tussenruimte	23
9. De economie (OC/N) van de hoekijzerrotor van 50 cm diameter, ruimtelijk uitgezet	25
10. Deltarotor met trapeziumvormige tanden	31
11. Kooirotor van 70 cm diameter	38

Figuren

1. Doorsnede van de proeftank	10
---	----

Voor nadere inlichtingen over de werkzaamheden en verschenen publikaties kunt U zich wenden tot het INSTITUUT VOOR GEZONDHEIDSTECHNIEK T.N.O.,
Koningskade 12, postbus 297, tel. 070-77.60.90

centrale organisatie

nationale raad voor
landbouwkundig onderzoek

organisatiecommissie
voor de visserijen

nijverheidsorganisatie

voedingsorganisatie

rijksverdedigingsorganisatie

gezondheidsorganisatie

gecoördineerde
onderzoekingsprojecten

commissie voor arbeids-
geneeskundig onderzoek

medisch-fysische afdeling

radiobiologische afdeling

centraal proefdierenbedrijf

instituut voor

gezondheidstechniek

afdeling industriële
luchtverontreiniging

afdeling geluid en licht

afdeling binnenklimaat

bouwkundige groep

psychologische
en medische groep

afdeling water,
bodem en lucht

GEZONDHEIDSORGANISATIE T.N.O.