

De fysisch technologische aspecten van de gasabsorptie in actief-slib installaties

Deel II De stofoverdrachtsnelheid

1. Inleiding

Het stoftransport tussen een gas en een vloeistof (absorptie of desorptie) wordt bepaald door drie factoren:

1. de mate van thermodynamisch evenwicht tussen de beide fasen, welke meestal wordt uitgedrukt in het verschil tussen de oplosbaarheid van het gas bij de heersende condities (c^*) en de werkelijke concentratie van het gas in de vloeistof (c);
2. het oppervlak van het grensvlak tussen beide fasen, dat meestal wordt opgegeven per volume-eenheid van het apparaat (A^*);
3. de stofoverdrachtscoëfficiënt (k), welke enigszins afhangt van de lokale hydrodynamische omstandigheden aan het grensvlak en van de diffusiecoëfficiënt van het over te dragen gas.

De oplosbaarheid van matig tot slecht oplosbare gassen (zuurstof, stikstof, e.a.) is recht evenredig met de partiëlespanning (P) van het gas:

$$c^* = m \frac{P}{RT} \quad (1)$$

De evenredigheidsconstante m wordt de verdelingscoëfficiënt genoemd. Hij is afhankelijk van de temperatuur. Voor O_2 , N_2 en CO_2 is m respectievelijk 0,049; 0,023; 1,69 bij $0^\circ C$ en 0,033; 0,016 en 0,92 bij $20^\circ C$.

Heersen nu in een apparaat (volume V) één temperatuur, één druk en één concentratie van het gas in de vloeistof, dan is de massa gas die per tijdseenheid in de vloeistof komt, gelijk aan:

$$\Phi_m = k A^* V (c^* - c) \quad (2)$$

De symbolen hierin stellen de reeds genoemde fysische grootheden voor, welke in het kg-m-s-stelsel de volgende eenheid dragen: Φ_m [kg/s], A^* [m^2/m^3], V [m^3], c^* en c [kg/m^3].

In een voordracht gehouden op de 20e Vakantiecursus in Drinkwatervoorziening (Delft, 4 en 5 januari 1968) ben ik uitgebreid ingegaan op de fysische achtergronden van de stofoverdracht [1]. Daarin heb ik zowel de theoretische als de experimentele gegevens over k en A^* voor verschillende apparaten aangedragen. Daar de publikaties van deze cursus goed toegankelijk zijn en daar ons nu verder strekkende problemen bezig houden, zal ik hier volstaan met een korte relevante recapitulatie van de toen gepresenteerde resultaten (zie paragraaf 2). In § 2 zal ik tevens bespreken in welke mate toevoegingen aan het water de oplosbaarheid van gassen in water beïnvloeden.

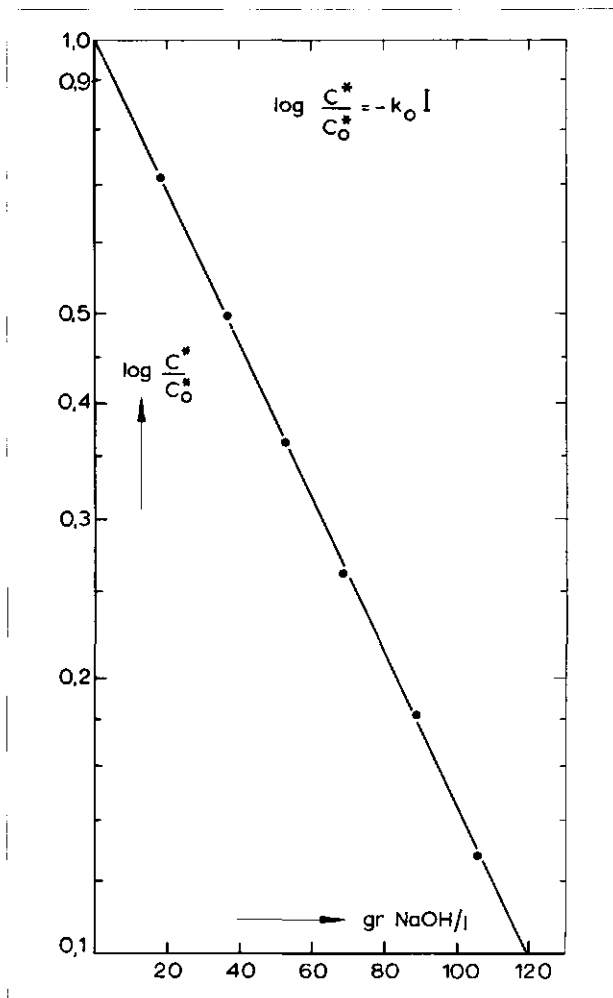
Vervolgens zal ik, mede in verband met de voordracht van ir. S. Sweeris, enige opmerkingen maken over de bepaling van het zuurstoftoevoervermogen (OC), dat in mijn jargon gelijk blijkt te zijn aan het produkt kA^*c^* (paragraaf 3). In deze paragraaf zal bv. blijken dat het

toevoegen van sulfiet aan het water om de oorspronkelijk aanwezige zuurstof weg te nemen in aanzienlijke mate invloed heeft op de belgrootte en daarmee op het grensvlak dat zich tussen de beide fasen instelt. Dit betekent dat OC-waarden gemeten in een sulfiet-oplossing aanzienlijk kunnen verschillen van OC-waarden gemeten in zuiver water.

In paragraaf 4 wordt besproken hoe het dimensieloze (ken-)getal „OC-load” een goede maat is waarmee de hoofdafmetingen (het volume) van de actief-slib installatie bepaald kan worden.

Daar zowel k , A^* als c^* in de actief-slib installatie zullen verschillen van de waarden welke hiervoor in zuiver water worden gemeten en daar het vaak vrijwel ondoenlijk is om in een proefinstallatie met het te behandelen slib te experimenteren om alsnog daarin k , A^* en c^* te bepalen, zal in paragraaf 5 besproken worden in welke

Afb. 1 - De oplosbaarheid, c^* , van O_2 in NaOH-oplossingen.



mate actief-slib en detergenten het produkt $k \cdot A^* \cdot c^*$ kunnen beïnvloeden. Tot slot bevat § 6 de conclusies van deze voordracht.

2. Zakelijke gegevens over c^* , k en A^* voor het systeem lucht-water (of waterige oplossingen) in verschillende apparaten

a. De oplosbaarheid

De oplosbaarheid van gasen in water wordt niet beïnvloed door de aanwezigheid van vaste stof, maar wel door opgeloste stof, waaronder vooral stoffen die in water ioniseren en polaire stoffen (bv. alcoholen). Vooral de invloed van elektrolyten op de oplosbaarheid in water is uitvoerig onderzocht [2]. In het algemeen kan men zeggen dat de verhouding van de oplosbaarheid in de elektrolytoplossing, c^* , en de oplosbaarheid in zuiver water, c_0^* , een eenduidige functie is van de ionensterkte I ($= \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2$, waarin c_i de molaire concentratie van het i -de ion is en z_i zijn waardigheid). Vaak kan men schrijven:

$$10 \log \frac{c^*}{c_0^*} = -k_0 I. \quad (3)$$

De waarde van k_0 is enigszins, maar niet sterk afhankelijk van de temperatuur van de oplossing. Voor zuurstof in oplossingen van NaOH en KOH is $k_0 \approx 0,3 \text{ m}^3/\text{kmol}$ (bij 20°C) en voor CO_2 in deze oplossingen is $k_0 \approx 0,13 \text{ m}^3/\text{kmol}$ (bij 20°C). Dit betekent bijvoorbeeld dat de oplosbaarheid van zuurstof in een waterige oplossing, die 100 gr/l NaOH bevat ($\approx 2,5 \text{ kmolion/m}^3$), ongeveer 6 x zo gering is als op oplosbaarheid van zuiver water!

Van Krevelen en Hofstijzer [2] hebben aangetoond, dat voor een aantal oplossingen de coëfficiënt k_0 kan worden beschouwd als de som van een aantal onafhankelijke incrementen, die karakteristiek zijn voor het opgeloste gas en voor de positieve en negatieve ionen in de oplossing. Op grond van dit resultaat berekende ik voor de absorptie van O_2 in Na-sulfiet(sulfaat)-oplossingen een waarde van $k_0 \approx 0,2 \text{ m}^3/\text{kmol}$ (bij 20°C). Dat betekent dat bij een toevoeging van 10 gr $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{l}$ de oplosbaarheid van zuurstof een factor 3 afneemt! Daar het zuurstoftoevoervermogen (de „OC”) recht evenredig zal blijken te zijn met de oplosbaarheid, zal uit het voorgaande duidelijk zijn, dat men:

- bij modelproeven met water, waarbij men Na-sulfiet of Fe-hydroxide toevoegt om oorspronkelijk aanwezige zuurstof weg te nemen, moet corrigeren voor de verandering in oplosbaarheid t.g.v. de toevoeging en
- de ionische verontreinigingen en hun concentraties in afvalwater moet kennen om enigszins te weten welke oplosbaarheid men kan verwachten.

Een mooi voorbeeld van wat men kan verwachten is een studie over de oplosbaarheid van O_2 in viscose [3]. Viscose bestaat uit cellulose vezeltjes, die na in NaOH gedrenkt te zijn, werden gesulfideerd en vervolgens werden opgelost in een NaOH-oplossing. Het resultaat is een zeer viskeuze vloeistof, waaruit rayon wordt gesponnen. De zeer fijn verdeelde cellulose vormt de vaste fase (te vergelijken met het slib) en de NaOH het bestanddeel dat werkelijk in het water oplost. Daar de concentratie lucht in de viscose laag moet zijn (om geen luchtbelletjes bij het spinnen in de rayondraad te vormen) is de oplosbaarheid van O_2 in viscose onderzocht. Het resultaat was,

dat de concentratie cellulose (vaste stof, slib) geen enkele invloed op de oplosbaarheid had en dat de invloed van de concentratie NaOH op de oplosbaarheid van O_2 voor viscose en water dezelfde was; dit ondanks het feit dat viscose ruim 1000 x zo viskeus is als water (bij 20°C). Bovendien bleek dat de diffusiecoëfficiënt van O_2 in viscose gelijk was aan die welke gevonden wordt in water van dezelfde temperatuur.

b. De stofoverdrachtscoëfficiënt

De stofoverdrachtscoëfficiënt, k , voor overdracht tussen een gas en water, is voor de meest uiteenlopende apparaten, opvallend gelijk [1]:

$$\text{watervalbeluchters (20}^\circ \text{C): } k = 0,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{belbeluchters (20}^\circ \text{C) : } k = 1,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

De redenen hiervoor zijn, dat:

- de diffusiecoëfficiënten voor de meeste gasen (bij één temperatuur) zo weinig verschillen (orde van grootte bij 20°C : $D = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$);
- de stofoverdrachtscoëfficiënt in het gebied van voor ons praktische betekenis zo weinig met de bel- of druppelgrootte varieert (zie [1]) en
- de lokale hydrodynamica aan het grensvlak, die voor de verschillende apparaten zeer verschillend kan zijn, zulk een relatief geringe invloed op de stofoverdrachtscoëfficiënt heeft.

Daar toevoegingen (slib, ionen, detergenten, etc.) wel de lokale hydrodynamica veranderen en daarmee de bel- of druppelgrootte, maar de diffusiecoëfficiënt van het gas in de vloeistof nagenoeg niet beïnvloeden, is mijn conclusie dat de stofoverdrachtscoëfficiënten gemeten in één apparaat met water dan wel met actief slib niet zullen verschillen.

c. Het specifiek grensvlak

Gegevens over de grootte van het specifiek grensvlak tussen een gas en zuiver water in verschillende apparaten zijn gegeven in tabel I en afb. 2, welke beide aan [1] zijn ontleend. Het blijkt dat het specifiek grensvlak, dat in de verschillende apparaten te behalen is, nogal uiteen kan lopen (factor 10^2). Aangezien het zuurstoftoevoervermogen (de „OC”) met het specifiek grensvlak evenredig is (zie de volgende paragraaf), zal ook de „OC” van de verschillende apparaten veel kunnen verschillen. Dit verschil in OC komt vrijwel uitsluitend voort uit het verschil in grensvlak (A^*) tussen de apparaten, immers alle gegevens uit tabel I en afb. 2 zijn aan metingen met zuiver water ontleend (dwz. ze zijn verricht bij dezelfde oplosbaarheid) en de waarden van de stofoverdrachtscoëfficiënt, k , lopen zoals we reeds zagen niet veel uiteen. Het zal daarom nuttig zijn na te gaan in welke mate toevoegingen (vaste stof, elektrolyt, detergenten) het

*) De stofoverdrachtscoëfficiënt van bellen en druppels is evenredig met de wortel uit de diffusiecoëfficiënt, D . Daar het produkt $D\eta/T$ voor iedere combinatie van gas en vloeistof nagenoeg constant is (η is de dynamische viscositeit van de vloeistof en T de absolute temperatuur), kan op basis van deze gegevens de stofoverdrachtscoëfficiënt bij iedere gewenste temperatuur worden berekend: $k \div \sqrt{T/\eta}$.

TABEL 1

Waarden van $A^* [m^2/m^3]$, $k_L A^* [1/s]$ en $GC (= k_L A^* m C_g) [g/m^3h]$

A. Watervalbeluchters

	$A^* [m^2/m^3]$	$k_L A^* [1/s]$	$OC [g/m^3h]$
$(k_L \approx 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s})$			
— sproeitorens	200	$1,4 \cdot 10^{-2}$	510
— cokesbedden (schotels)	100	$0,7 \cdot 10^{-2}$	255
— cascade trap (overloop)			
(1 x 1 m ² , 1 m onder elkaar)	20	$0,15 \cdot 10^{-2}$	54

B. Belbeluchters (alle A^* -waarden bij een verbruik van 500 W/m³)

B1. niet-mech. injectie

	$A^* [m^2/m^3]$	$k_L A^* [1/s]$	$OC [g/m^3h]$
$(k_L = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s})$			
— put, venturi	150	$2,25 \cdot 10^{-2}$	815
— bellenzuil (geperf. plaat)	250	$3,75 \cdot 10^{-2}$	1350
— bellenbak	50	$0,75 \cdot 10^{-2}$	270
plaatselijke injectie		(+ 20 %)	(+ 20 %)

B2. mech. injectie

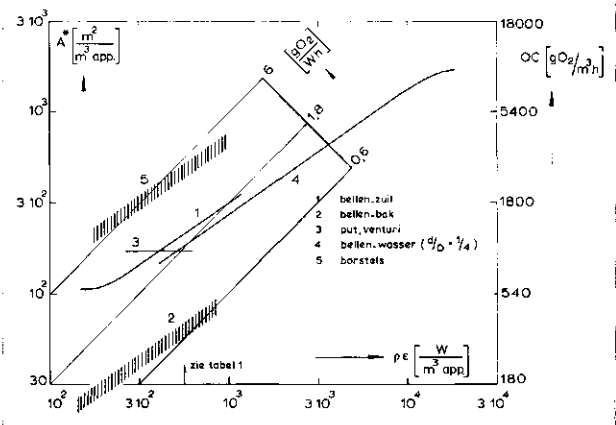
— bellenwasser ($k_L = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s) (aanzuigende roerder)	200	$3,0 \cdot 10^{-2}$	1080
— borstels ($k_L = 10^{-4}$ m/s) [3]	400	$4,0 \cdot 10^{-2}$	1440

specifiek grensvlak kunnen beïnvloeden. Ik kom daarop terug in § 5.

Daar afb. 2 het specifiek grensvlak geeft bij een relatief hoog vermogensverbruik per eenheid van volume, is afb. 3 samengesteld, welke bij een relatief laag vermogensverbruik het specifiek grensvlak als functie van het specifiek vermogen geeft. Deze afb. is ontleend aan Möller [4] en aangevuld met gegevens van anderen [5, 6, 7]. De afb. 2 en 3 zijn te combineren tot één afb. waaruit als belangrijkste conclusie het volgende zou kunnen worden afgelezen: voor de meeste apparaten neemt het specifiek grensvlak toe met de 2/3 à 1ste macht van het vermogen, dat per eenheid van volume wordt toegevoerd. Dit betekent dat de verhouding van OC en toegevoerd specifiek vermogen, voor de meeste apparaten in het vermogensbereik waarin ze optimaal worden gebruikt vrijwel een apparaatconstante is, die echter voor de verschillende typen apparaten nogal uiteen kan lopen. Dit is ook geïllustreerd in de afb. 2 en 3, waarin lijnen zijn getrokken voor een constante verhouding „OC/specifiek vermogen”. Deze verhouding is vanzelfsprekend een belangrijk economisch gegeven voor het ontwerp. Het blijkt dat de apparaten met een relatief hoog vermogensverbruik per eenheid van volume (afb. 2) dezelfde spreiding in „OC/specifiek vermogen” vertonen als die met een relatief laag specifiek vermogensverbruik (afb. 3), nl. van 0,3 tot 3,0 [gO₂/Wh]. M.a.w. naast de gebruikelijke apparaten van de afvalwaterzuivering (laag specifiek vermogen, afb. 3) is een apparaat aan te wijzen uit de chemische industrie (hoog specifiek vermogen, afb. 2), waarin een eenheid van grensvlak (een eenheid OC) evenveel kost. De keuze van dit laatste apparaat kan dan voordeliger zijn (geringer benodigd volume, geringere investering). Bovendien zal het in een apparaat met hoger specifiek vermogensverbruik beter lukken de vlok in suspensie te houden; op dit onderwerp wil ik echter hier niet verder ingaan.

3. Het zuurstoftoevoervermogen (de „OC”)

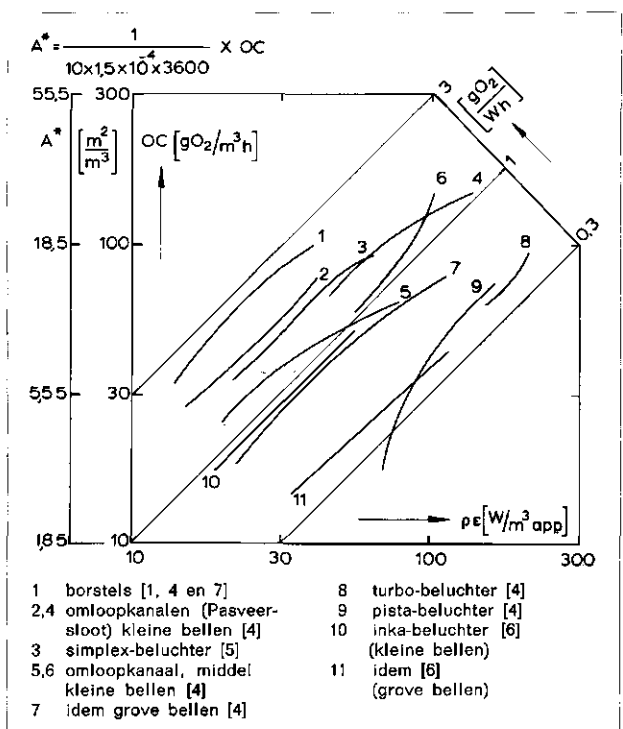
Indien men de concentratieverandering van O₂ in een



Afb. 2 - De specifieke grensvlakken in gasbelbeluchters als functie van het vermogensverbruik per m³.

apparaat meet als functie van de tijd, beginnend met een zuurstofconcentratie $c = 0$ op $t = 0$, kan men hieruit het produkt kA^*c^* (= OC) berekenen. Het is dan wel nodig enige vooronderstellingen te doen, bv. dat de concentraties O₂ in de vloeistof én in de luchtbelleten uniform zijn. Dit laatste is meestal juist, omdat de belleten tijdens hun passage door de vloeistof meestal zo weinig O₂ afstaan, dat men mag aannemen dat alle belleten (vrijwel) de samenstelling van de omgevingslucht hebben. Worden geen belleten maar druppels gevormd (dus gebruikt men geen belletenbeluchters, maar watervalbeluchters), dan zal ook de concentratie O₂ in de nu continue gasfase niet noemenswaard van plaats tot plaats verschillen, t.g.v. menging (stroming) en diffusie. Dit ligt anders in de vloeistoffase, waarin een goede menging moet optreden, voordat men een uniforme zuurstofconcentratie in het water mag aannemen. De vereffening

Afb. 3 - De specifieke grensvlakken in beluchters met relatief laag specifiek vermogen als functie van het vermogensverbruik per m³.



van concentratieverschillen door diffusie in de vloeistof is langzaam en circulatiestromen (met een circulatietijd welke veel kleiner is dan de procestijd) moeten aanwezig zijn, voordat het gerechtvaardigd is een uniforme O_2 -concentratie in de vloeistof aan te nemen en opdat men resultaten kan verkrijgen die onafhankelijk zijn van de plaats waar men de O_2 -concentratie meet.

Indien aan de voorwaarden voor een uniforme concentratie in beide fasen is voldaan luidt de massabalans voor de zuurstof als volgt: de ophoping van zuurstof (in het vloeistofvolume V_L) per tijdseenheid ($= V_L dc/dt$) is gelijk aan wat er per tijdseenheid door het grensvlak wordt overgedragen ($= kA^*V(c^* - c)$, vgl. (2)):

$$V_L \frac{dc}{dt} = kA^*V(c^* - c). \quad (4)$$

Is de beginconcentratie O_2 gelijk aan c_0 ($c = c_0$ op $t = 0$) dan volgt uit de massabalans (4) het verloop van de concentratie zuurstof in de vloeistof met de tijd:

$$2,3 \log \frac{c^* - c}{c^* - c_0} = - \frac{kA^*Vt}{V_L}. \quad (5)$$

Nu wordt voor deze apparaten (indien $c_0 = 0$) het zuurstoftoevoervermogen (OC) als volgt gedefinieerd:

$$OC = 2,3 \frac{c^*}{t} \log \frac{c^*}{c^* - c(t)}. \quad (6)$$

Uit de relaties (5) en (6) volgt:

$$OC = kA^*c^* \frac{V}{V_L} \approx kA^*c^*, \quad (7)$$

want de bellen nemen in de apparatuur die tot dusver wordt gebruikt zulk een gering volume in (tot ong. 4% van het totale volume V) dat $V \approx V_L$.

Uit deze afleiding valt het volgende te leren:

- daar de oplosbaarheid c^* van de temperatuur afhangt (zie ook § 1) en daar bovendien k (via de diffusiecoëfficiënt; zie § 2) en A^* (via de stofconstanten als viscositeit, oppervlaktenspanning etc.) enigszins van de temperatuur afhangen, zal de OC temperatuurafhankelijk zijn; de meting van de OC moet dus gestandaardiseerd zijn, zeg bij 20° C;
- daar de oplosbaarheid afhangt van de partiëlespanning O_2 in de lucht (zie vgl. (1)), moet deze voor nauwkeurige metingen bekend zijn; in dat geval moet de barometerstand bij de metingen worden vermeld;
- daar de waarde van kA^* uit iedere niet-stationaire absorptieproef is te verkrijgen, ongeacht de beginconcentratie zuurstof in de vloeistof, door de logarithme van de drijvende kracht ($c^* - c$) uit te zetten tegen de tijd (zie vgl. (5)), is het niet noodzakelijk de proef te starten met zuurstofvrij water; wel zal de meting van de OC het nauwkeurigst zijn indien de verandering in drijvende kracht per tijdseenheid groot is, dus bij lage concentraties O_2 in de vloeistof (zie vgl. (4)).

4. Het begrip „OC/load”

Hierbij wordt aangesloten aan hetgeen prof. Kossen Y behandelde. We stellen dat de micro-organismen Y'

massaeenheden O_2 nodig hebben om één massaeenheid verontreinigingen om te zetten. Stellen we verder de volumestroom afvalwater door het apparaat Φ [m^3/s] met een ingangconcentratie verontreinigingen c_{v_i} en een uitgangconcentratie c_v (beide in [kg/m^3]), dan is er in het apparaat per tijdseenheid een toevoer van O_2 nodig

welke gelijk is aan: $\frac{Y}{Y'} \Phi_V (c_{v_i} - c_v) +$ enkele andere

(kleine?) bijdragen, waaronder het zuurstofverbruik per tijdseenheid voor de verbranding van gestorven micro-organismen. Deze ongespecificeerde bijdragen noemen we R_{oz} [kg/s]. Nemen we aan dat de vloeistof goed gemengd is, dan mogen we met vgl. (2) voor de per tijdseenheid toegevoerde massa O_2 schrijven: $kA^*V(c^* - c)$. De zuurstofbalans over het totale apparaat luidt dus:

$$kA^*V(c^* - c) = \frac{Y}{Y'} \Phi_V (c_{v_i} - c_v) + R_{oz}. \quad (8)$$

Hieruit volgt:

$$\frac{kA^*c^*}{\Phi_V Y c_{v_i}} = \frac{\left(1 - \frac{c_v}{c_{v_i}}\right)}{\left(1 - \frac{c}{c^*}\right)} + \frac{R_{oz}}{\Phi_V \frac{Y}{Y'} c_{v_i} \left(1 - \frac{c}{c^*}\right)}. \quad (9)$$

Hierin stelt $\frac{Y}{Y'} c_{v_i}$ het aantal $kg O_2$ voor dat de gegeven Y'

micro-organismen nodig hebben om alle aanwezige verontreinigingen om te zetten. Gemakshalve stelt men dit wel gelijk met de BOD_5 , hetgeen niet zo ernstig fout is, indien de BOD -bepaling maar is gedaan met dezelfde microben en dezelfde concentratie aan microben (tenminste gemiddeld) als in de zuiveringinstallatie voorkomen en indien de verontreinigingen na de bepaling (na 5 dagen) vrijwel

geheel waren verdwenen. Stelt men $\frac{Y}{Y'} c_{v_i}$ gelijk aan de Y'

BOD_5 , dan wordt het linkerlid van vgl. (9) de „OC/load” genoemd, welke — als we naar het rechterlid van vgl. (9) kijken — in de grootte-orde van 1 à 2 moet liggen. Immers stellen we $c_v/c_{v_i} \approx 0,1$ (90% reductie in slibgehalte) en $c/c^* = 0,2$ (aeroob milieu, dwz. minstens 2 mg O_2/l in het water bij 20° C) dan is volgens vgl. (9):

$$\frac{\text{„OC”}}{\text{load}} = \frac{kA^*c^*}{\Phi_V (BOD_5)} = \frac{0,9}{0,8} + \text{correctie} = 1,1 + \text{correctie}. \quad (10)$$

Stelt men nu als ontwerpgegeven „OC/load” $\approx 1,5$, dan is voor een gegeven belasting ($= \Phi_V \cdot (BOD_5)$) het benodigde volume van de installatie te berekenen, zodra de OC ($= kA^*c^*$) van de installatie bij het werken met actief slib bekend is. Over moeilijkheden welke optreden om op basis van OC-bepalingen voor zuiver water OC-voorspellingen voor slib te doen, handelt paragraaf 5.

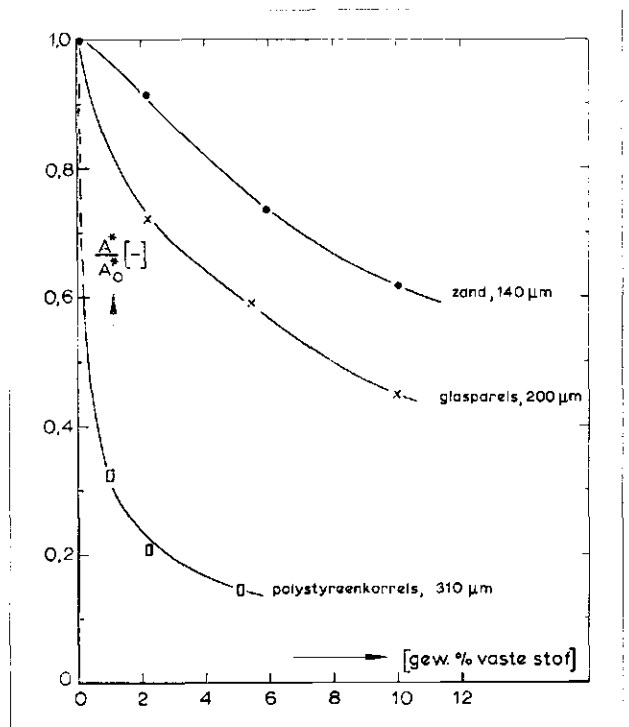
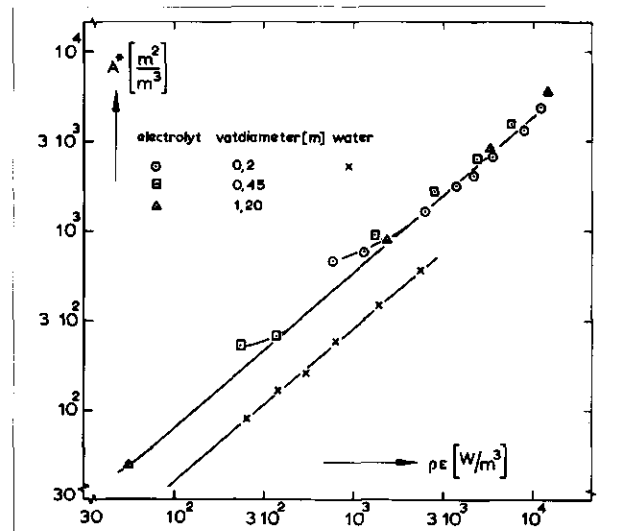
5. De invloed van de aanwezigheid van actief slib op de OC

We hebben reeds gezien dat de aanwezigheid van toevoeringen de stofoverdrachtscoëfficiënten, k , nauwelijks beïnvloedt. Opgeloste stoffen (ionen, alcoholen, maar

niet bv. detergents) kunnen de oplosbaarheid van het gas beïnvloeden; een geringe toevoeging van 4 gr NaOH/l (met een ionensterkte van 0.1 molion/l) doet de oplosbaarheid van O₂ reeds 10 % dalen (zie afb. 1). Daarmee daalt ook de OC, die met de oplosbaarheid recht evenredig is. De daling van de OC t.g.v. toevoegingen is echter niet gelijk aan de daling van de oplosbaarheid, omdat het specifiek grensvlak, A*, waarmee de OC ook evenredig is, meestal ook verandert t.g.v. de toevoegingen. In welke mate dit het geval is, valt zonder aanvullend onderzoek moeilijk te voorspellen. Ik wil slechts twee voorbeelden uit eigen ervaring geven om aan te tonen wat men kan verwachten. Het eerste voorbeeld behandelt de invloed van elektrolyten op het specifiek grensvlak in een geroerde gasbelwasser [1, 8], het tweede voorbeeld de invloed van de aanwezigheid van vaste stof op A* in een geroerde gasbelwasser [9].

Voegt men aan de inhoud (zuiver water) van een geroerde gasbelwasser een weinig elektrolyt toe zonder het toerental of de gasbelasting te veranderen, dan ziet men dat de bel diameter kleiner wordt (van ongeveer 3 mm tot ongeveer 1,5 mm), terwijl de volumefractie gas nauwelijks verandert. Dit betekent dat het specifiek grensvlak A* na toevoeging van het elektrolyt een factor $3/1,5 = 2$ is toegenomen. Dit verschijnsel, dat berust op de negatieve absorptie van ionen aan het grensvlak en de invloed daarvan op de grensvlakspanning zullen we hier niet verklaren; zie hiervoor bv. [10]. Evenmin zullen we hier nader ingaan op de meetmethoden welke beschikbaar zijn voor het meten van grensvlak, zie hiervoor [8]. Het verschijnsel is zo treffend dat het nog eens geïllustreerd wordt in afb. 4, waarin voor zuiver water en een elektrolytoplossing (100 gr Na₂SO₃/l) het specifiek grensvlak A* in een geroerde gasbelwasser is uitgezet tegen het specifieke vermogen. Detergents hebben op het grensvlak dezelfde invloed als ionen. Ze belemmeren het coalesceren van bellen, zodat deze worden afgebroken tot de kleinst mogelijke diameter welke bij het heersende stromingspatroon stabiel is. Derhalve zal de gemiddelde bel diameter bij toevoeging van ionen of detergents kleiner zijn dan in zuiver water en het specifiek grensvlak groter. Het effect kan zeker een factor 2 in het grensvlak en dus in de OC bedragen.

Afb. 4 - Het specifiek grensvlak A* in geroerde gasbelwassers als functie van het specifiek vermogen voor elektrolytoplossingen (100 g Na₂SO₃/l) en voor water; gasbelasting $4,7 \cdot 10^{-2}$ [nm³/m²s].



Afb. 5 - De verhouding tussen het grensvlak in een gasbelwasser bij aanwezigheid (A*) en afwezigheid van vaste stof; toerental 15 [s⁻¹], gasbelasting $6 \cdot 10^{-2}$ [nm³/m²s].

Toevoegingen van vaste stof doen het specifiek grensvlak onder overigens gelijke omstandigheden (toerental en gasbelasting) afnemen. Dit is geïllustreerd in afb. 5, waarin voor toevoegingen van enkele stoffen de verhouding van het grensvlak, A*, in een geroerde gasbelwasser en het grensvlak voor zuiver water, A₀* in die gasbelwasser, is uitgezet als functie van het gewichtspercentage vaste stof. Ook hier is het effect dramatisch. Het grensvlak neemt 40 % af bij 10 gewichtsprocenten vaste stof van 100 μm en 55 % bij 10 gewichtsprocenten vaste stof van 200 μm. In de regel is bij een gegeven gewichtspercentage de invloed van de vaste stof op A* des te groter naarmate de stofdeeltjes grover zijn. De conclusie is dat de invloed van het slib op A* (en daarmee op de OC) evenmin veronachtzaamd mag worden als de invloed van ionen, detergents, etc. op de OC. Slib doet A* (en de OC) afnemen, maar ionen en detergents doen A* (en daarmee de OC) toenemen, terwijl ionen (e.a.) de oplosbaarheid (en daarmee de OC) doen afnemen. De verschillende, vaak tegengestelde, beïnvloedingen van de OC door slib, ionen en detergents zijn voor ieder effect vaak zo groot, dat men moet vrezen dat OC-bepalingen gedaan in zuiver water niet met enige kans op goede engineering accuracy te gebruiken zijn voor het ontwerpen van installaties voor afvalwaterzuivering.

6. Conclusions

A 1. De OC is het product van de stofoverdrachtscoëfficiënt k, het specifiek grensvlak A* en de oplosbaarheid c*. Daar deze drie factoren alle van de temperatuur afhangen en de oplosbaarheid tevens van de druk afhangt, dienen temperatuur en druk bij iedere OC-bepaling te worden opgegeven.

2. Kleine hoeveelheden toevoegingen, zoals Na-sulfiet en Fe-hydroxide, beïnvloeden zowel de oplosbaarheid als ook het specifiek grensvlak niet onaanzienlijk. Hierop moet men bedacht zijn, zowel bij een OC-bepaling als bij het gebruik van gerapporteerde OC-waarden.
3. De stofoverdrachtscoëfficiënt is bij een gegeven temperatuur vrijwel onafhankelijk van het type beluchter en van de operationele omstandigheden. Een goede vuistregel is: voor beluchtters $k = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s, voor watervalbeluchtters $k = 0,7 \cdot 10^{-4}$ m/s.
4. Het specifiek grensvlak is voor diverse apparaten een vrijwel eenduidige functie van het toegevoerde vermogen per volume-eenheid van het apparaat; dit geldt tot vrij hoge waarden van het specifiek vermogen: zie afb. 2 en 3. De grootte van het specifiek grensvlak verschilt echter aanzienlijk voor de diverse apparaten. Dit verschil in specifiek grensvlak is de voornaamste oorzaak voor het verschil in OC tussen verschillende typen beluchtters.
- B 5. Het voornaamste kental voor het ontwerp van een installatie voor afvalwaterzuivering is de „OC/load”. Dit kental, dat ligt tussen 1,1 en 2, bepaalt het volume van de installatie.
6. Het is gevaarlijk OC-waarden, welke werden gerapporteerd voor zuiver water, te gebruiken voor het ontwerp van actief slib-installaties. Opgeloste stof (elektrolyten, alcoholen, etc.) verlagen de oplosbaarheid niet onaanzienlijk (zie afb. 1). Bovendien hebben elektrolyten en detergents een grote invloed op het specifiek grensvlak; ze gaan het coalesceren van bellen tegen, zodat deze klein blijven en dientengevolge is bij aanwezigheid van deze stoffen het specifiek grensvlak groter dan bij afwezigheid van deze stoffen (zie afb. 4). Daarentegen verlaagt de aanwezigheid van vaste stof (slib) het specifiek grensvlak (zie afb. 5).

Y/Y'	aantal kg O ₂ nodig om één kg verontreiniging om te zetten	[—]
z_i	waardigheid ion	[—]
OC	(=kA*c*) zuurstoftoevoer- vermogen	[kg/m ³ s]
OC/load	(=Y'kA*c*/Φ _v Y _{cv})	[—]
Φ _v	volumestroom afvalwater	[m ³ /s]
ρ _e	specifiek vermogen (vermogen toegevoerd per volume-eenheid apparaat)	[W/m ³]

Literatuur

1. Beek, W. J., *Fysisch-technologische aspecten van de gas-absorptie*. 20e Vakantiecursus in Drinkwatervoorziening. Delft, 4 en 5 januari 1968.
2. Long, F. A., McDevit, W. F., Chem. Revs. 51 (1952) 119. Krevelen, D. W. van, Hofstijzer, P. J., Chim. Ind., XXIe Congrès Int. Chim. Ind. (1948) 168.
3. Beek, W. J., Faserforschung und Textiltechnik 17, 11 (1966) 492.
4. Möller, U., Kommunalwirtschaft 9 (1962) 372.
5. Emde, W. von der, GWF (Wasser-Abwasser 705) 106, 48 (dec. 1965) 1337.
6. Horvath, I., *Proceedings 3d Int. Conference on Water Pollution Research*, section 11, paper 10 (München 1966).
7. Baars, J. K., Muskat, J., *Zuurstoftoevoer aan water met behulp van roterende lichamen*. Inst. voor Gezondheidstechniek TNO, rapport no. 28, april 1959.
8. Reith, T., *Physical aspects of bubble dispersions in liquids*, diss. Delft 1968.
9. Berg, H. van de, (Unilever Research Lab., Vlaardingen), privé mededeling.
10. Marucci, G. en Nicodemo, I., Chem. Engng. Sci. 22 (1967) 1257.

Symbolenlijst

A*	specifiek grensvlak	[m ² /m ³]
A ₀ *	specifiek grensvlak in zuiver water	[m ² /m ³]
c*	oplosbaarheid	[kg/m ³]
c ₀ *	oplosbaarheid in zuiver water	[kg/m ³]
c	concentratie in vloeistof	[kg/m ³]
c _v	concentratie verontreiniging in afvalwater	[kg/m ³]
c _{vj}	ingangconcentratie verontreiniging in afvalwater	[kg/m ³]
c _i	ionenconcentratie	[kmol/m ³]
I	(=½Σc _i z _i ²) ionensterkte	[kmol/m ³]
k	stofoverdrachtscoëfficiënt	[m/s]
k ₀	factor in vgl. (3)	[m ³ /kmol]
m	verdelingscoëfficiënt	[—]
P	(partiële) druk	[N/m ²]
R	gasconstante	[I/kmol°K]
R _{0z}	extra zuurstofverbruik (onafhankelijk van de omzetting van verontreinigingen)	[kg/s]
T	(absolute) temperatuur	[°K]
V	volume van de gas-vloeistof dispersie	[m ³]
V _L	vloeistofvolume van de dispersie	[m ³]