

Ingezonden: 'De invloed van de temperatuur op de zuurstofoverdracht in schoon water bij puntbeluchting'

In H₂O van december 1975 is onder de bovenstaande titel een bijdrage verschenen die in het nu volgend artikel van enige kanttekeningen wordt voorzien. Het stoftransport, i.c. de absorptie van zuurstof, tussen de lucht- en waterfase in een apparaat is, per tijdseenheid, van de onderstaande factoren afhankelijk:

- de temperaturen van de beide fasen. De verdelingscoëff. m is temperatuurafhankelijk;
- de verhouding lucht en water en de



IR. W. A. J. ROEFS
Gemeentebedrijven Eindhoven

- de grootte van de stofoverdrachtscoëfficiënt.
- de grootte van het grensvlak;
- de grootte van de stofoverdrachtscoëfficiënt.

De stofoverdrachtscoëff. (sluitpost) kan worden gecorreleerd aan fysische grootheden, die de stroming beschrijven en die op hun beurt deels apparaat-gebonden zijn en deels van het medium afhangen, waaronder de viscositeit. De coëfficiënt is dus afhankelijk van de temperatuur. In belangrijke mate is overigens de diffusiecoëfficiënt van het gas in de vloeistof bepalend voor de stofoverdrachtscoëff. [1]. De temperatuurafhankelijkheid van de diffusiecoëff. is bekend.

De zin van de 'de hoedanigheid van het te beluchten water', waarmee in bovenbedoeld artikel de van belang zijnde factoren worden uitgebreid, is bezwaarlijk in te zien. En moet in deze onder 'de opgeloste zuurstof' de beginconcentratie worden verstaan? Het is mogelijk van belang te memoreren, dat voor het stoftransport het nog te overbruggen concentratieverschil de drijvende kracht is. In de formules is opgenomen het relatieve concentratieverschil. De effectiviteit van de beluchter is immers constant — de overgedragen hoeveelheid stof is afnemend naarmate de evenwichtsconcentratie meer wordt benaderd.

De partiële zuurstofdruk is, aldus de auteurs, medebepalend voor de zuurstofadsorptie. In het experiment komt deze factor echter niet ter sprake, terwijl het aannemelijk is, dat deze kan afnemen met oplopende temperatuur van het water.

Van de factoren die van belang zijn voor het stoftransport is de temperatuur-

afhankelijkheid gegeven, behoudens van de in het proces betrokken hoeveelheid lucht en van het grensvlak. Beide factoren zijn type gebonden. De hoeveelheid lucht en/of de uitputting van de lucht zou in een goed gekozen proefopstelling meetbaar zijn, waardoor de invloed van de temperatuur op het grensvlak resteert.

Evenwichten

Volgens de wet van Henry is bij een bepaalde temperatuur het volume van het gas, dat in een bepaalde hoeveelheid vloeistof oplost, evenredig met de partiële druk van het gas: $p_i = H \cdot c_i$. Met vrij grote nauwkeurigheid kan deze wet worden gehanteerd bij inerte gassen in lagere concentraties. De constante H wordt meestal vervangen door de verdelingscoëff. m , gedefinieerd als het aantal liters van een gas (0 °C en 1 atm) dat oplost in één liter vloeistof van dezelfde temperatuur en een partiële druk van het gas van 1 atm.

$$m = \frac{V_o \cdot n \cdot 22,39}{V_L \cdot V_L} \quad (1)$$

Met n de hoeveelheid (mol) gas: n/V_L is de molariteit M van de oplossing. Dus:

$$M_i = \frac{m_i \cdot p_i}{22,30 \times (1 \text{ atm})} \text{ mol/l} \quad (2)$$

Omgerekend naar zuurstof ontstaat voor de evenwichtsconcentraties C_s :

$$C_s = 1429 m \cdot p \text{ mg/l} \quad (3)$$

De verdelingscoëff. m is bij lagere temperaturen bekend en de evenwichtsconcentratie voor zuurstof in water kan dus bij elke temperatuur worden berekend, mits de partiële zuurstofspanning p in de aflucht,

of in de in het proces betrokken lucht, bekend is. Een fout kan schuilen in het temperatuurverschil tussen de lucht en het water. De dampdruk in de luchtfase zal zal oplopen met stijgende temperaturen en langere contacttijden.

In tabel I zijn enige gegevens bijeengebracht. De evenwichtsconcentratie C_s is berekend bij een r.v. van 80 %; voor gegevens over k_L wordt verwezen naar [1].

TABEL I.

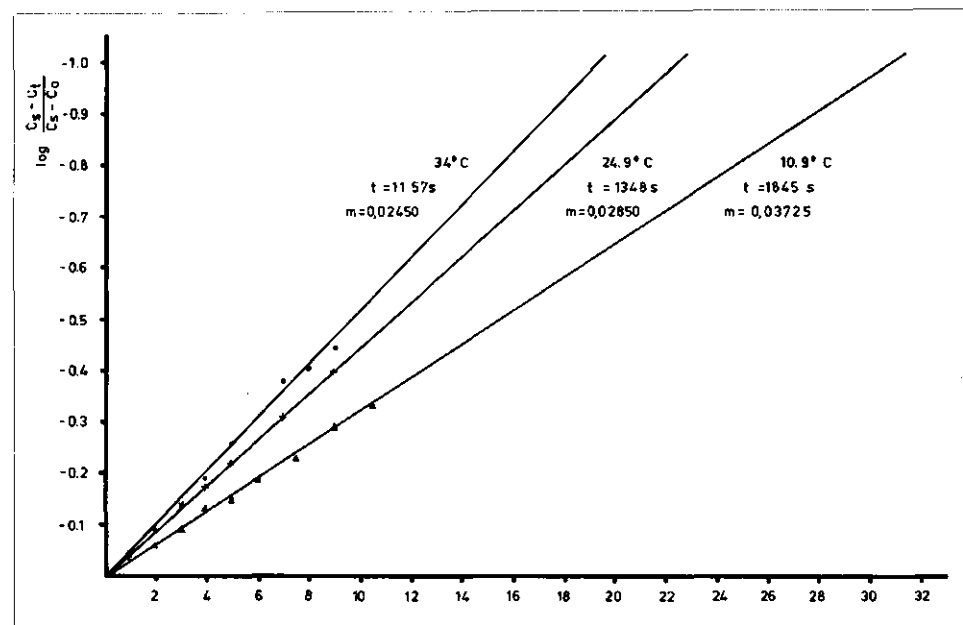
°C	pH ₂ O (at)	pO ₂ (at)	m	C _s (mg/l)	k _L · 10 ⁻⁴ (m/s)
0	0,006	0,208	0,0489	14,54	1,1
10	0,012	0,207	0,0380	11,25	1,3
20	0,023	0,206	0,0310	9,13	1,5
30	0,042	0,204	0,0261	7,61	1,7
40	0,073	0,200	0,0231	6,61	1,9

Van de bij de stofoverdracht van belang zijnde factoren, k_L , $A \cdot q_L/q_w$, m en C_s is de invloed van de temperatuur bekend behoudens van k_L , A en q_L/q_w . A is het specifiek grensvlak lucht - water en q_L en q_w de volume stroom lucht respectievelijk water. De beide factoren A en q_L/q_w zijn systeemgebonden en indien beide factoren eniger mate van de temperatuur afhankelijk zijn, mag worden geconcludeerd, dat voor elk type beluchter een afzonderlijke correctieformule zal ontstaan. Zie o.a. [2].

In tabel I is k_L voor de onderscheiden temperaturen berekend via de diffusiecoëfficiënt.

De invloed van de verdelingscoëfficiënt m op de absorptie vereist nog enige toelichting. Uit de massabalans voor een apparaat, waarin evenwicht ontstaat tussen een luchtstroom q_L met ingangconcentratie C_L en

Afb. 1.



uitgangconcentratie C_t/m en een waterstroom q_w met beginconcentratie C_0 en eindconcentratie C_t wordt, voor de absorptie, afgeleid:

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = \frac{m}{R + m} \quad (4)$$

met $R = q_L/q_w$ en $C_s = m \cdot C_L$.

Uit de formule (4) volgt dat R/m een indicatie geeft over de mogelijke uitputting van de lucht en ingeval sprake is van een beperkte luchtstroom ten opzichte van de waterstroom is $R/(R+m)$ een directe maat voor het bereikbare (na oneindig lange tijd) evenwicht. Bijv. met $R=4$ m ligt het evenwicht op 80 % of C_t is 0,8 C_s . Een andere betekenis hiervan is, dat met oplopende temperatuur (m is afnemend) en constante R de overmaat lucht toeneemt. Of m.a.w. met afnemende oplosbaarheid voor de zuurstof neemt de overmaat lucht toe. Een voorbeeld moge dit verduidelijken: $R/m = 1$ bij 0 °C wordt $R/m = 2$ bij 40 °C: de bereikbare evenwichten zijn resp. 50 % en 67 % en de bereikbare concentraties zuurstof 7,27 en 4,4 mg/l.

Een apparaat, dat een bepaalde hoeveelheid water voortdurend in contact brengt met een zich verversende hoeveelheid lucht, kan van een evenwichtsbepaling door q_L/q_w geen sprake zijn — het eindpunt wordt bepaald door $m \cdot C_L$ met $t = \infty$.

In de formulering van de gasabsorptie of desorptie zal, in het algemeen, de verhouding lucht water moeten worden opgenomen en wel met de voorwaarde, dat bij evenwicht de tijd nadert tot oneindig.

$$-k_L \cdot A \cdot t = \frac{R}{R + m} \log \left(\frac{R + m}{R} \cdot \frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} - \frac{m}{R} \right) \quad (5)$$

Bij evenwicht is de factor achter het log-teken gelijk aan nul dus $t = \infty$. Indien met de gegeven R 90 % verzadiging is bereikt, ontstaat:

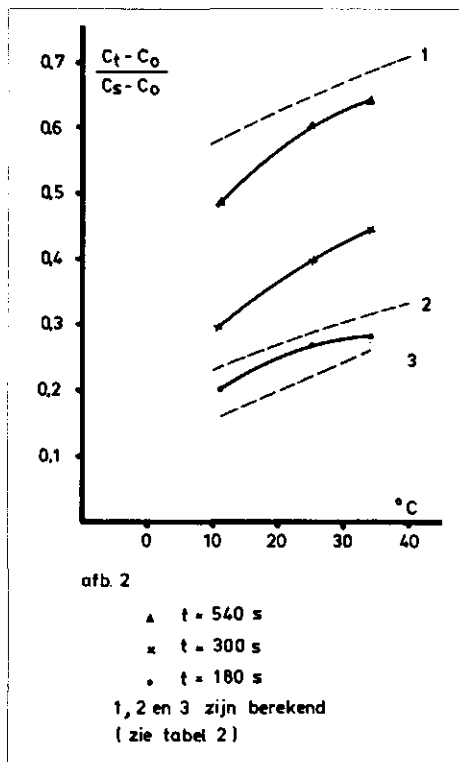
$$k_L \cdot A \cdot t = \frac{R}{R + m} \quad \text{mits } C_0 = 0, \quad (6)$$

hetgeen betekent, dat uit de meting van de tijdspanne tussen zuurstofloosheid en 90 % verzadiging de invloed van de temperatuur op k_L , A en q_L/q_w gezamenlijk, kan worden bepaald; m is bij elke temperatuur bekend. Desgewenst kan $k_L \cdot A$ worden geschreven als één factor k_A . Voor grotere waarden van R nadert de factor $R/(R+m)^{-1}$ tot 1 en wordt de invloed van de temperatuur via m verwaarloosbaar.

In het geval sprake is van grote, effectief in het proces betrokken hoeveelheden lucht ($R/m > 50$) geldt dus $k_L \cdot A \cdot t \approx 1$. Voor de effectiviteit van de beluchters vormt dit een

TABEL II.

temp.	C_t/C_s $t = 600$ s $R = 0,5$ $A = 5$ m ⁻¹	C_t/C_s $t = 200$ s $R = 0,075$ $A = 5$ m ⁻¹	temp.	A	C_t/C_s $t = 200$ s $R = 0,1$
10	0,58	0,24	10,9	3,03	0,16
20	0,63	0,27	24,9	3,57	0,22
30	0,67	0,30	34,0	3,85	0,26
40	0,71	0,33			



Afb. 2.

vrij strak keurslijf. De evenredigheidsconstante is ondanks toepassingen van diverse energiedichtheden betrekkelijk constant (bij één bepaalde temperatuur). Hieruit volgt, dat $A \cdot t$ vrij constant is oftewel de beluchtingstijd is omgekeerd evenredig met de grootte van het grensvlak. Ook weer bij een bepaalde temperatuur. Voor kleinere waarden van R mag de invloed van de temperatuur via m niet worden verwaarloosd. Gelet op de zeer trage toeneming van het gehalte aan zuurstof moet met deze mogelijkheid rekening worden gehouden. In vele gevallen zijn R en A onbekend en zullen beide in de formules opgenomen moeten zijn.

Experimenten

Wij hebben gezien, dat bij 90 % verzadiging

$$k_L \cdot A \cdot t = R/(R + m)^{-1} \quad \text{of} \quad \frac{1}{A} = \frac{R + m}{R}$$

$$k_L \cdot t \left(\frac{m}{R} + 1 \right).$$

Met $k_L = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-4}$ bij 20 °C neemt de formule in het experiment bij de onderscheiden temperaturen de volgende waarden aan:

$$34 \text{ °C} \quad \frac{1}{A} = \frac{1}{R} = 0,5 \cdot 10^{-2} + 0,21 \quad (7a)$$

$$24,9 \text{ °C} \quad \frac{1}{A} = \frac{1}{R} = 0,6 \cdot 10^{-2} + 0,22 \quad (7b)$$

$$10,9 \text{ °C} \quad \frac{1}{A} = \frac{1}{R} = 0,9 \cdot 10^{-2} + 0,24 \quad (7c)$$

In het algemeen, maar onder voorbehoud, en met $k_L \cdot t \approx 0,2$ ($k_L \cdot t$ zou dan constant zijn over het onderhavige temperatuurs-traject) ontstaat:

$$\frac{1}{A} \approx 0,2 \left(\frac{m}{R} + 1 \right) \quad (7)$$

Het zal duidelijk zijn, dat de gekozen waarde van k_L in deze belangrijk is voor de grootte van $A \cdot k_L$ is in het experiment onbekend en de uitkomsten zijn dus slechts indicatief. Temeer omdat de proeven niet zijn voortgezet tot 90 % verzadiging en t is verkregen door middel van de berekening van de regressiecoëfficiënt (zie ook tabel I).

Berekening van de temperatuursinvloed

Eenzijds is het beluchtingsresultaat volgens formule 5 via de verdelingscoëfficiënt m afhankelijk van de temperatuur en anderzijds is de evenredigheidsconstante k_L via o.a. de diffusiecoëfficiënt afhankelijk van de temperatuur.

De berekening van de geabsorbeerde hoeveelheid zuurstof (tabel II) is uitgevoerd met R is constant over het temperatuurtraject; met A is constant en variabel volgens de bovenstaande experimenten; $t = 600$ en 200 s; m en C_s zijn gegeven in tabel I en $C_0 = 0$.

In afb. 2 is de berekende zuurstofverzadiging in beeld gebracht met daarnaast de in het experiment gemeten verzadiging na 3, 5 en 9 min.

Constant houden van A en R heeft tot gevolg, dat de invloed van de temperatuur minder sterk is dan in het experiment tevoor-

schijn komt. De aansluiting bij de experimentele waarde is evenmin beter, indien rekening wordt gehouden met de afhankelijkheid van A van de temperatuur volgens de bovenstaande vergelijkingen 7a, b en c. Nu wordt het verloop met de temperatuur vrijwel lineair (curve 3 in afb. 2) indien R is constant. Opgemerkt moet worden, dat de zuurstofabsorptie is berekend met een vaste verhouding van lucht en water en dus met uitputting van de lucht. Voor de relatief lage gehalten aan zuurstof is deze invloed echter vrij klein.

Conclusie

Uit de beschouwingen over de stofoverdracht volgt, dat de variabelen, waarvan de temperatuurafhankelijkheid niet bekend is, apparaat-gebonden zijn en het dus zeer waarschijnlijk geacht mag worden, dat de formules voor de temperatuurcorrectie geen algemene geldigheid bezitten. Het experiment in de boven geciteerde bijdrage bevat te veel onnauwkeurigheden om tot algemene uitspraken te komen. Onnauwkeurigheden schuilen in o.a. m (verschil in temperatuur tussen de lucht en de waterfase) en in het ontbreken van metingen van de partiële zuurstofdruk bij de verschillende temperaturen. Uit het experiment zou kunnen volgen, dat $k_{La} \cdot t$ over het onderhavige temperatuurtraject vrij constant is. Met de gevonden tijden voor 90 % verzadiging, genoemd in afb. 1 en formule (16) uit het artikel van de beide auteurs, vinden we voor $k_{La} \cdot A \cdot t$ bij 34, 24,9 en 10,9 °C resp. 1,02; 0,99 en 0,94. Dank is verschuldigd aan het Ingenieursbureau Dwars, Heederik en Verhey voor het ter beschikking stellen van de meetgegevens.

Literatuur

1. Bleek, W. J.: *Fysisch-technologische aspecten van de gasabsorptie*. H₂O 1, 19 (1968) 436-445.
2. Imhoff, von K. R. und Albrecht, D.: *Zum Einfluss von Temperatur und Turbulenz auf den Sauerstoffeintrag in Wasser*. GWF 113, 6 (1972) 264-268.

Naschrift van de auteurs

Wij maken graag gebruik van de door de redactie van H₂O geboden gelegenheid om op de kanttekeningen van de heer Roefs bij ons artikel te reageren.

Met de eerste alinea van de conclusies zijn wij het eens. In ons artikel [1] hebben wij ook met nadruk op het apparaatgebonden karakter van de proefresultaten gewezen. Onze proeven werden uitgevoerd in een bassin met een bekende hoeveelheid water, die met behulp van een puntbeluchter in contact werd gebracht met een onbekende hoeveelheid lucht.

De andere conclusies van de kanttekeningen zijn voornamelijk gebaseerd op formule (5)*.

Uit vergelijking met een vroegere publicatie van de heer Roefs [2] blijkt, dat de formules (4) en (5) zijn afgeleid voor een gasvloeistof contactapparaat, waar de gas- en vloeistofstroom in gelijkstroom doorheen worden gevoerd.

In een dergelijk apparaat kan de verandering van de zuurstof partiëlespanning zo groot zijn, dat de drijvende kracht voor de stofoverdracht er significant door wordt beïnvloed. Dit is o.a. afhankelijk van de verhouding tussen de hoeveelheden lucht en water, die met elkaar in contact worden gebracht; de factor R.

Wij hebben onze experimenten echter niet uitgevoerd in een gelijkstroomapparaat, maar in een open bassin met een kleine puntbeluchter. Er was dus sprake van een onbegrensde hoeveelheid lucht, die in contact werd gebracht met een begrensde hoeveelheid water. In dat geval lijkt het niet erg waarschijnlijk dat de opgetreden stofoverdracht een significante invloed heeft op de zuurstofpartiëlespanning. Het stofoverdrachtsproces moet dus met een ander model, dan in de kanttekeningen naar voren is gebracht, worden beschreven. De door de heer Roefs genoemde onnauwkeurigheden hebben vooral betrekking op het ontbreken van metingen, die hij voor het model van een gelijkstroomproces nodig heeft. Met dit deel van de conclusies zijn wij het dan ook niet eens.

Verder willen we erop wijzen, dat formule (5) door substitutie van $C_t = 0,9 \cdot C_s$ (90 % verzadiging). Dit kan alleen als bovendien geldt $R \gg m$.

Dit houdt in dat formule (6) moet worden geschreven als:

$$k_{La} \cdot t = 1.$$

In de toelichting bij formule (6) wordt overigens ook al aangegeven, dat de invloed van de temperatuur via m verwaarloosbaar is, wanneer de zuurstofpartiëlespanning niet significant wordt beïnvloed door de stofoverdracht. Dat uit de bereke-

ningen van de heer Roefs voor $k_{La} \cdot t$ steeds een waarde van ongeveer 1 volgt, is dan ook niet verrassend. Integendeel, het zou zelfs als een bevestiging van de door ons gedane aanname kunnen worden opgevat. Namelijk dat de zuurstofpartiëlespanning in een bassin met een puntbeluchter niet significant wordt verlaagd door de stofoverdracht.

Tenslotte danken wij de heer Roefs voor zijn kritische opmerkingen die ons ertoe hebben aangezet om nog eens diep in te gaan op de theoretische achtergrond van onze proefnemingen.

J. W. van Sluis
K. Bakker

Literatuur

1. Bakker, K., Sluis, J. W. van, *De invloed van de temperatuur op de zuurstofoverdracht in schoon water bij puntbeluchting*. H₂O 8 (26) 537-42 (1975).
2. Roefs, W. A. J., *Torenbeluchting I*, H₂O 4 (4) 74-8 (1971).

* Verwezen wordt naar formules uit de kanttekeningen.



Koelwateronderzoek in Nederland

Op verzoek van de Algemene Beraadsgroep koelwater, die het koelwateroverleg, dat in diverse commissies en werkgroepen plaatsvindt, op nationaal niveau coördineert, heeft de onder haar ressorterende Commissie Koelwaternormen (CKN) een nota 'Koelwateronderzoek in Nederland' samengesteld. Deze nota geeft een overzicht van het afgesloten en lopende hydrobiologische onderzoek en bevat een opsomming van het naar het oordeel van de commissie nog uit te voeren onderzoek. De bijlage van de nota verschaft korte informatie over de resultaten van het tot nu toe uitgevoerde onderzoek.

De CKN heeft het voornemen elk jaar een aan de nieuwste ontwikkelingen aangepaste versie van de nota te vervaardigen.

De nota is als nr. WH 76-12 verkrijgbaar bij het secretariaat van de CKN, Hoofdkade 1 te 's-Gravenhage.