

Torenbeluchting I

Elk deelproces van de beluchting van water vereist een bepaalde verhouding in de hoeveelheid lucht (q_L) en water (q_w) om het gestelde doel te bereiken. Voor de zuurstofopneming is $q_L/q_w = 0,3$ voldoende; de CO_2 -verwijdering vraagt een aanzienlijk grotere hoeveelheid lucht $q_L/q_w = 10$.

Dit is bepaald door de verdelingscoëfficiënt van de beide gassen. Een overmaat lucht versnelt alleen dan het proces als het contactoppervlak en de vernieuwing daarvan wordt beïnvloed (1).

Met alle typen beluchters is q_L/q_w voor de zuurstof-toevoer gemakkelijk te bereiken, voor de koolzuurverwijdering zijn de watervalbeluchters in het voordeel. Bellenbeluchters met geforceerde luchtpassage bereiken eveneens een goede ontzuring. Het energieverbruik ligt echter hoger.

Aeratievergelijkingen

Voor de aeratie van water gelden o.a. de volgende vergelijkingen (1):

$$O_2\text{-opneming} \quad -k_L \frac{O}{V} \cdot t = -k_A \cdot t = \log \frac{c_s - c_t}{c_s - c_o} \quad (1)$$

De omrekeningsfactor van de natuurlijke naar Briggse logaritme is opgenomen in de aeratieconstante k_L .

$$CO_2\text{-verwijdering:} \quad -k_L \frac{O}{V} \cdot t = -k_A \cdot t = \log \frac{c_t - c_s}{c_o - c_s} \quad (2)$$

- k_L = aeratieconstante ($k_A = k_L \cdot O/V$) (m/sec)
- t = beluchtingstijd (sec)
- c_o = concentratie bij $t = 0$ (mg/l)
- c_s = evenwichtsconcentratie met lucht (mg/l)
- c_t = concentratie op tijdstip t (mg/l)
- O = contactoppervlak lucht — water (m²)
- V = volume van het water (m³)

O/V is onbepaald en wordt in de aeratieconstante k_L opgenomen.

Met de verdelingscoëfficiënt m , voor zuurstof 0,038 en voor koolzuur 1,3, beide bij 10° C, wordt de evenwichtsconcentratie c_s berekend:

c_s mg/l zuurstof 11,4 koolzuur 0,8

Uit de massabalans (2) voor een apparaat waarin evenwicht ontstaat tussen een luchtstroom q_L met ingangconcentratie c_L en uitgangconcentratie c_t/m en een waterstroom q_w met ingangconcentratie c_o en uitgangconcentratie c_t wordt afgeleid voor de:

$$O_2\text{-absorptie} \quad q_L(c_L - c_t/m) = q_w(c_t - c_o)$$

$$CO_2\text{-desorptie} \quad q_L(c_t/m - c_L) = q_w(c_o - c_t)$$

Met $q_L/q_w = R$ en $c_s = m \cdot c_L$ ontstaat:

$$O_2\text{-absorptie} \quad \frac{c_t - c_o}{c_s - c_o} = \frac{R}{R + m} \quad CO_2\text{-desorptie} \quad \frac{c_o - c_t}{c_o - c_s} = \frac{R}{R + m} \quad (3)$$

$$\frac{c_s - c_t}{c_s - c_o} = \frac{m}{R + m} \quad \frac{c_t - c_s}{c_o - c_s} = \frac{m}{R + m} \quad (4)$$

De werkingsgraad A (3) van een beluchter wordt gegeven door $A_{O_2} = \frac{c_t - c_o}{c_s - c_o}$, en is enkel bij evenwicht

$$\text{gelijk aan} \quad \frac{R}{R + m}$$

Absorptie en desorptie verlopen in gelijke mate als de concentratieverandering wordt uitgezet tegen R/m (zie afb. 1).

Met $c_o = 0$ en $R = q_L/q_w$ ontstaat de formule gegeven door prof. Beek, 20e Vakantiecursus:

$$c_t = \frac{m \cdot c_L}{1 + \frac{m \cdot q_w}{q_L}} \quad (5)$$

Uit de combinatie van de formules (1) en (2) met resp. (3) en (4) volgt dat t toeneemt met toenemende R en wel omdat het evenwicht op een hoger niveau ligt. In een watervalbeluchter zal O/V in het algemeen onafhankelijk zijn van R , i.t.t. een bellenbeluchter waar (O/V) wel afhankelijk is van R [4]. Volgens $k_A = k_L (O/V)$ met $k_L = 10^{-4}$ zal k_A eveneens onafhankelijk zijn van R . De aeratie vraagt zowel voor de koolzuurverwijdering als voor de zuurstofopneming een hoeveelheid lucht ten opzichte van water in de orde van grootte van 8 m. Voor O_2 is dan $q_L/q_w = 0,3$ en voor $CO_2 = 10$. Het evenwicht ligt dan bij $\frac{8}{9}$ of 88,88 %.

Niet-evenwichtsomstandigheden

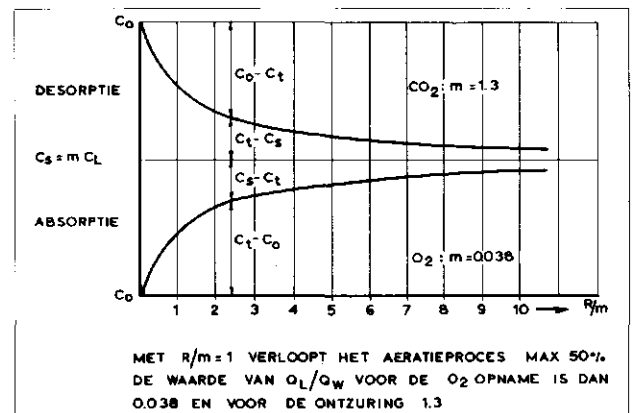
Voor een apparaat waarin lucht in een bepaalde verhouding met water in contact wordt gebracht volgt uit de massabalans:

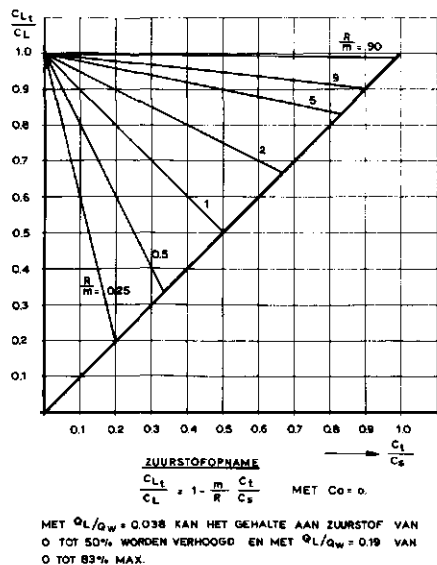


c_{Lt} = concentratie in de uitgaande lucht.

$$q_L \cdot c_L - q_L \cdot c_{Lt} = q_w \cdot c_t - q_w \cdot c_o$$

Afb. 1 - Gasabsorptie en desorptie.





Afb. 2 - Absorptie.

$$c_{L,t} = c_L - \frac{c_t - c_o}{R} \quad R = \frac{q_L}{q_w}$$

met $m \cdot c_L = c_s$ ontstaat voor de:

$$\text{absorptie} \quad \frac{c_{L,t}}{c_L} = 1 - \frac{m}{R} \frac{c_t - c_o}{c_s} \quad (6)$$

$$\text{desorptie} \quad \frac{c_{L,t}}{c_L} = 1 + \frac{m}{R} \frac{c_t - c_o}{c_s} \quad (7)$$

Bij evenwicht geldt $\frac{c_{L,t}}{c_L} = \frac{c_t}{c_s}$

De lijnen in afb. 2 en 3 vanuit $\frac{c_{L,t}}{c_L} = 1$ naar de evenwichtslijn geven het concentratieverloop in de lucht tot evenwicht is bereikt, resp. formule (6) en (7). Parameter R/m .

Voorwaarde voor formule (1) is de ongelimiteerde hoeveelheid lucht t.o.v. water; de formule beschrijft daarmee de maximale sorptiesnelheid. In praktijk zal vrijwel altijd een beperkte hoeveelheid lucht in het proces betrokken zijn. Een bezwaar van de formule is dus de onafhankelijkheid van de betrokken hoeveelheid lucht. Het resultaat van de extra toevoer van lucht komt niet tot uiting omdat zowel de absorptie als de desorptie procentueel over het gehele traject ($c_s - c_o$) resp. ($c_o - c_s$) constant zijn. De tijd t in formule (1) nadert tot oneindig als c_t nadert tot c_s , d.i. $c_t = m \cdot c_L$. Echter, voor elk evenwicht, behorende bij een beperkte hoeveelheid lucht, zal t naderen tot oneindig, $c_t = m \cdot c_{L,t}$. De met formule (1) berekende waarden voor $k_A \cdot t$ zullen dus i.h.a. te laag zijn.

In voornoemde bezwaren kan worden voorzien:

$$\frac{1}{O} \frac{dw}{dt} = k'_L (m \cdot c_{L,t} - c) \quad k'_L = \frac{k_L}{\log e} \quad (8)$$

$$\frac{1}{O} \frac{dw}{dt} = k'_L \frac{O}{V} (m \cdot c_{L,t} - c) \quad (9)$$

$\frac{dw}{V}$ is de concentratieverandering en gelijk aan dc , ($m \cdot c_{L,t} - c$) is het op elk moment nog te overbruggen concentratieverschil. Bij evenwicht op tijdstip t is $m \cdot c_{L,t} = c$.

Uit de massabalans voor de gasabsorptie volgt:

$$c_{L,t} = c_L - \frac{c_t - c_o}{R} \quad \text{of} \quad (10)$$

$$m \cdot c_{L,t} = m \cdot c_L - \frac{m}{R} (c_t - c_o) \quad m \cdot c_L = c_s \quad (11)$$

De combinatie van (9) en (11) levert:

$$\int_{c_o}^{c_t} \frac{-dc}{c_s + \frac{m}{R} c_o - (\frac{m}{R} + 1) c} = -k'_L \cdot \frac{O}{V} \int_0^t dt \quad (12)$$

Na integratie en uitwerking, waarbij tevens de Briggse logarithme wordt ingevoerd ($k'_L = 2,3026 k_L$) ontstaat:

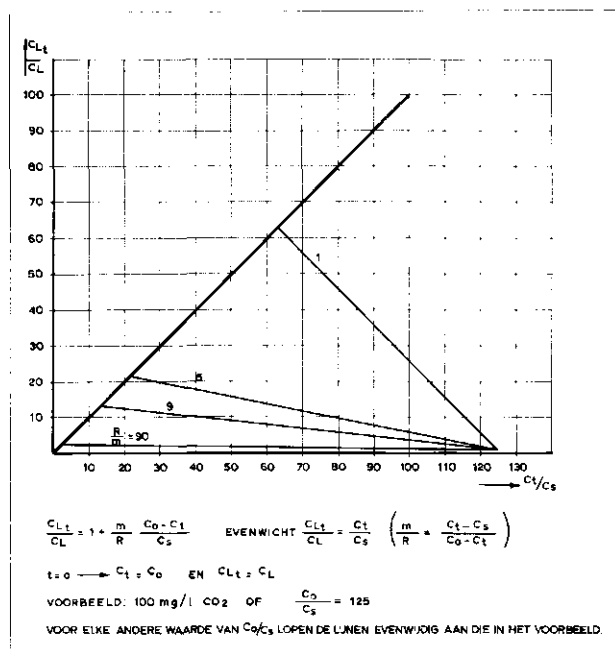
$$\text{Absorptie} - k_L \cdot \frac{O}{V} t = -k_A \cdot t = \frac{R}{R+m} \log \left\{ \left(\frac{m}{R} + 1 \right) \frac{c_s - c_t}{c_s - c_o} - \frac{m}{R} \right\} \quad (13)$$

of met $c_o = 0$

$$-k_A \cdot t = \frac{R}{R+m} \log \left\{ 1 - \left(\frac{m}{R} + 1 \right) \frac{c_t}{c_s} \right\} \quad (14)$$

Onder evenwichtsomstandigheden is $\frac{c_t}{c_s} = \frac{R}{R+m}$ zodat $k_A \cdot t$ nadert tot oneindig voor elk evenwicht, afbeelding 4.

Afb. 3 - Desorptie.



Door log $\left(1 - \frac{c_t}{c_s} \frac{R+m}{R}\right)$ uit te zetten tegen $k_A \cdot t$ ontstaan rechte lijnen, afb. 5. De waarde -1 op de ordinaat wordt bereikt als de aeratie bij de gegeven R voor 90% van het maximale is verlopen. Dan is $k_A \cdot t = \frac{R}{R+m}$.

Voor de ontzuring of desorptie kan analoog worden afgeleid:

$$\text{Desorptie} - k_L \cdot \frac{O}{V} \cdot t = -k_A \cdot t = \frac{R}{R+m} \log \left\{ \left(\frac{m}{R} + 1\right) \frac{c_t - c_s}{c_0 - c_s} - \frac{m}{R} \right\} \quad (15)$$

Het quotiënt achter het log-teken nadert bij evenwicht eveneens tot 0 en dus $k_A \cdot t$ tot oneindig, zie afb. 6.

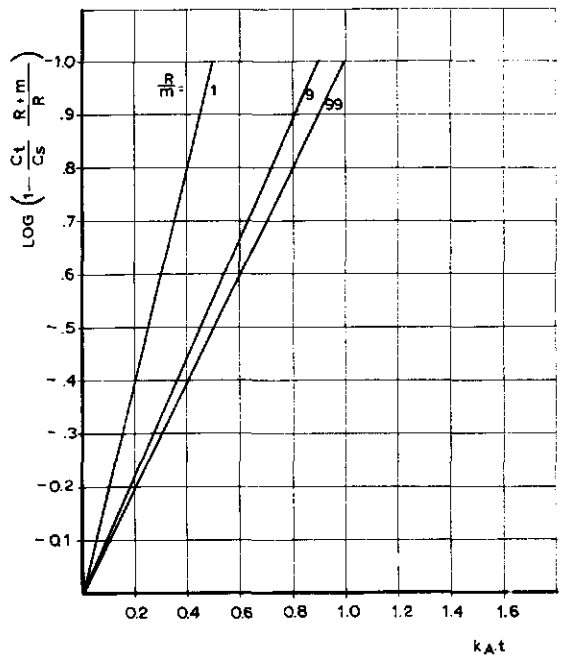
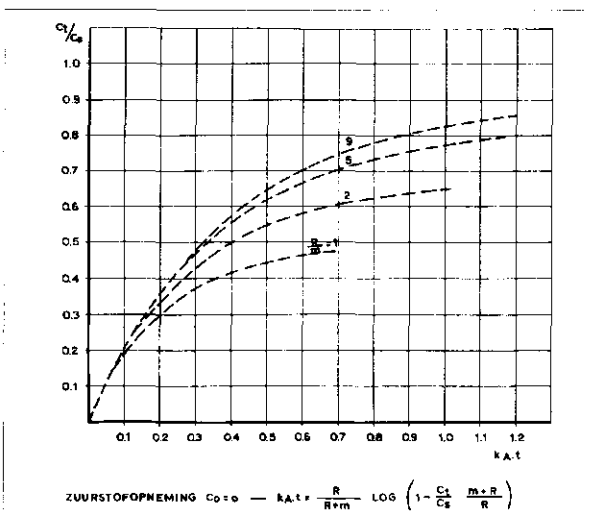
In een apparaat met de lucht in tegenstroom met het water is de situatie geheel anders. In onderstaande tabel I is, om het verschillend uitgangspunt, resp. geen uitputting v. d. lucht en een beperkte hoeveelheid lucht, te illustreren, een vergelijk gemaakt tussen de formules (1) en (14). Enkele waarden voor R/m en c_t/c_s voor de O_2 -absorptie met $C_0 = 0$ zijn willekeurig gekozen. $k_A \cdot t$ neemt volgens formule (14) sterker toe en nadert tot oneindig bij evenwicht. Constante $k_A \cdot t$ en oplopende waarden voor R/m heeft tot gevolg, dat c_t/c_s oploopt oftewel het aeratieproces verloopt vollediger. De invloed van een verviervoudiging van de hoeveelheid lucht is echter niet groot, c_t/c_s neemt toe van 0,5 tot 0,57 of voor zuurstof neemt de concentratie toe van 5,7 tot 6,5 mg/l.

De ontzuring zal eveneens gestegen zijn van 50 naar 57%. Het effect van tweemaal een gelijke hoeveelheid lucht toevoeren wordt in het laatste deel van de tabel gegeven, zie afb. 7.

Het beluchtingsresultaat stijgt van 75 naar 81%. Dit effect stijgt naarmate met eenmalige beluchting meer het evenwicht zou zijn bereikt.

In de formules (14) en (15) kan de werkingsgraad A worden ingevoerd (slechts bij evenwicht).

Afb. 4



Afb. 5

TABEL I

R/m	c_t/c_s	$k_A \cdot t$ (I)	$k_A \cdot t$ (II)
0,25	0,05	0,022	0,025
	0,18	0,086	0,200
	0,20	0,097	∞
1	0,20	0,097	0,111
	0,45	0,360	0,500
	0,50	0,301	∞
5	0,20	0,097	0,093
	0,50	0,301	0,361
	0,75	0,602	0,834
	0,834	0,780	∞
2	0,50		0,400
4	0,55		0,400
8	0,57		0,400
5	0,75	0,602	0,834
2 x 5	0,75	0,602	
2 x 5	0,815		0,834

Voor de koolzuurverwijdering is $A = \frac{c_0 - c_t}{c_0 - c_s}$ of

$$1 - A = \frac{c_t - c_s}{c_0 - c_s} \text{ en wordt formule (15) als volgt:}$$

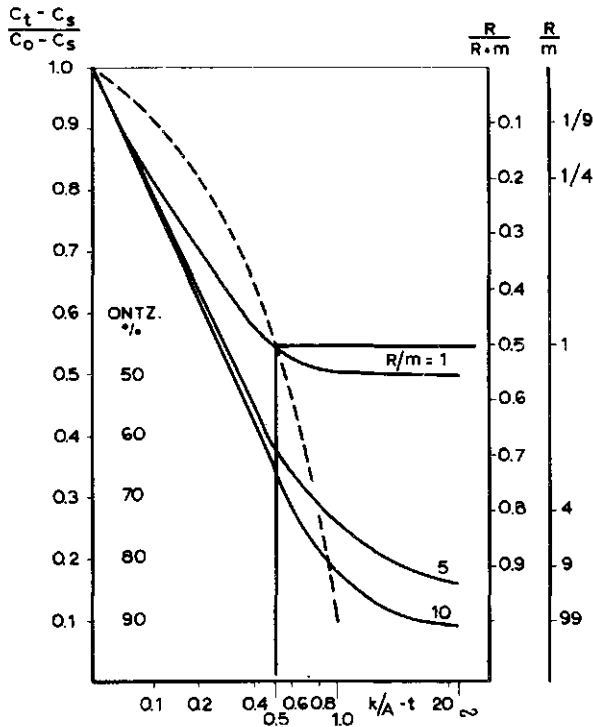
$$-k_A \cdot t = \frac{R}{R+m} \log \left\{ 1 - A \left(\frac{m}{R} + 1\right) \right\} \quad (16)$$

Uit de halfwaardetijd kan met constante k_A de waarde van q_L/q_w niet worden bepaald. Wel zien we dat, als de hoeveelheid lucht, de tijd en O/V van een beluchter constant blijven met een wisselende aanvangsconcentratie de eindconcentratie kan worden berekend met A .

In [5] wordt voor de ontzurende werking van een rekenbeluchter opgegeven: over de bovenhelft van 55 naar 20 en over de benedenhelft van 20 naar 14 mg/l kool-

zuur. Indien $\left(\frac{O}{V}, t, -\right)$ voor beide delen gelijk zijn mag

met A het eindresultaat worden berekend.



DE ORDINAAT HEEFT EEN HYPERBOLISCHE SCHAAL MET KONSTANTE 0,5
DE ONDERBROKEN L'N VERBINDT DE PUNTEN WAAR DE ONTZURING VOOR 90% V.H. MAXIMALE IS VERLOPEN

Afb. 6 - Ontzuring.

$$A = \frac{55 - 20}{54,2} = \frac{20 - c_{t2}}{19,2}, c_{t2} = 7,8$$

De tweede beluchter is dus beduidend minder effectief dan de eerste. Dit zou moeten worden toegeschreven aan de kleinere waarde van O/V .

De invloed van de temperatuur op het beluchtingsresultaat

Enerzijds is het beluchtingsresultaat volgens de formules (13) en (15) via de verdelingscoëfficiënt afhankelijk van de temperatuur en anderzijds is de aeratieconstante via de diffusiecoëfficiënt D afhankelijk van de temperatuur. Deze effecten werken beide verhogend op de ontzuring.

De formule van Einstein — von Smoluchowsky

$$D = \frac{RT}{6 \pi \eta r N} \quad (17)$$

toont dat $D\eta/T$ vrijwel onafhankelijk is van de temperatuur en kan D voor elke temperatuur worden berekend, D is gegeven bij 20° C.

Met formule (18) [2], waarin t_m de tijd weergeeft die een grensvlak maximaal kan bestaan, wordt de aeratieconstante bij de diverse temperaturen berekend, uitgaande van een aangenomen waarde van bijv. $k_A \cdot t = 0,400$ bij 10° C.

$$k_L = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t_m}} \quad (18)$$

Aan het Handbook of Chemistry and Physics is de viscositeit η en de verdelingscoëfficiënt bij de gegeven temperaturen en aan [2] de diffusie coëfficiënt bij 20° C ontleend.

De koolzuur desorptie of ontzuring is in tabel II berekend voor $q_L/q_w = 4$.

TABEL II

temp. °C	m	η cp	$D \times 10^5$ cm/sec ²	$k_A \cdot t$	$\frac{c_t - c_s}{c_o - c_s}$	ontzuring %
0	1,713	1,7921	0,878	0,336	0,532	46,8
10	1,194	1,3077	1,247	0,400	0,470	53,0
15	1,019	1,1404	1,455	0,432	0,432	56,8
20	0,878	1,0050	1,680	0,464	0,403	59,7
25	0,759	0,8937	1,915	0,496	0,376	62,4

De ontzuring neemt over dit praktische, maar kleine temp. traject, vrijwel lineair toe met ca. 0,6% per °C. Zie afb. 8.

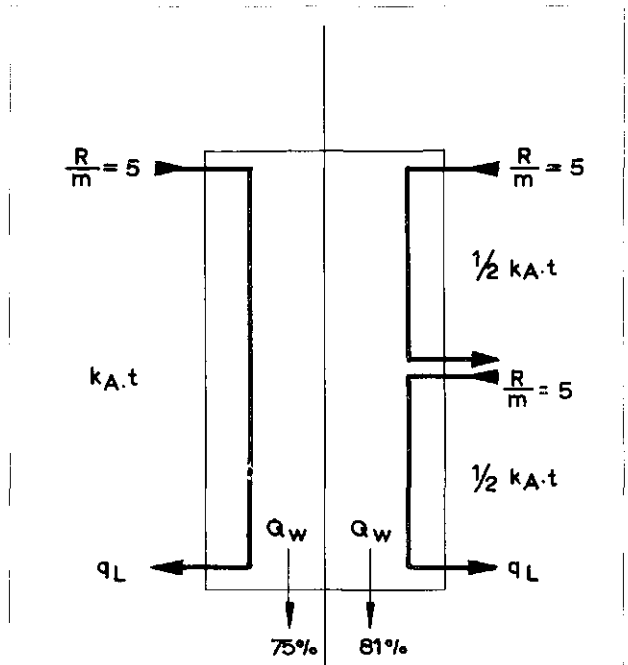
Kostenaspect van de beluchting

De totale valtijd in een watervalbeluchter met N schotels en valhoogte H is $\frac{1}{2} \sqrt{N}$ maal de tijd die de straal van een fontein nodig heeft om te stijgen en te vallen van hoogte H [1]. In een watervalbeluchter met rekken i.p.v. schotels zal de totale valtijd korter zijn omdat een deel v.h. water de rekken ongehinderd kan passeren.

De valtijd of beluchtingstijd over valhoogte H met N schotels, of hoogte tussen de schotels h , (de schotels zijn regelmatig verdeeld) wordt gegeven door:

$$t = \left(\frac{2HN}{g} \right)^{1/2} = \left\{ \frac{2H}{gh} (H-h) \right\}^{1/2} \quad (19)$$

Afb. 7



TWEEMAAL DE TOEVOER VAN EEN HOEVEELHEID LUCHT - ZIE LIT.(4) p.36-37 VOOR CO₂ IS IN DIT VOORBEELD $q_L/q_w = 6,5$

en kan met de combinatie van formule (15) en (19)

$$-k_A \left(\frac{2HN}{g} \right)^{1/2} = \frac{R}{R+m} \log \left\{ \left(\frac{m}{R} + 1 \right) \frac{c_i - c_s}{c_o - c_s} - \frac{m}{R} \right\}$$

de marginale hoogte, voor wat de variabele kosten betreft, worden berekend.

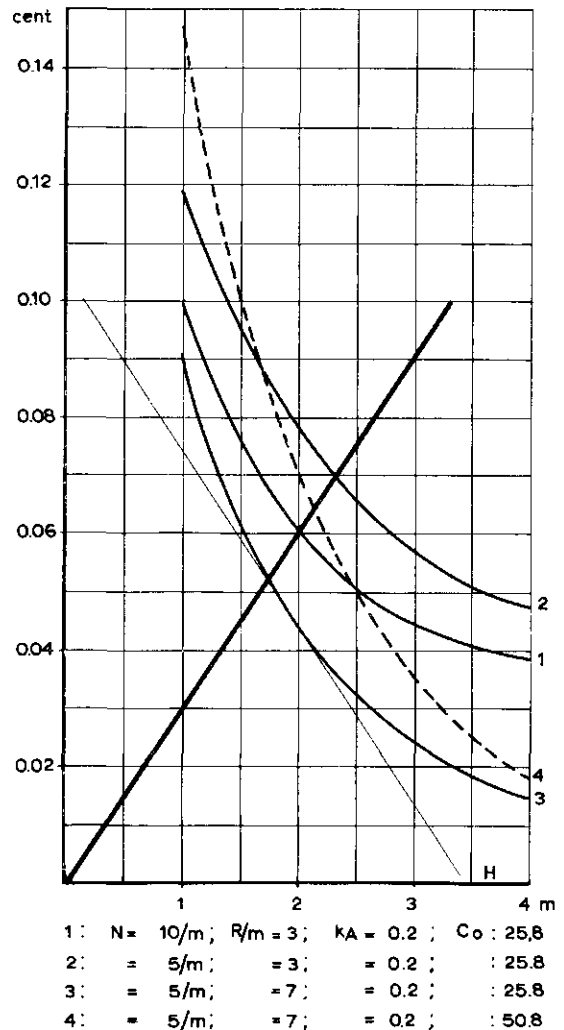
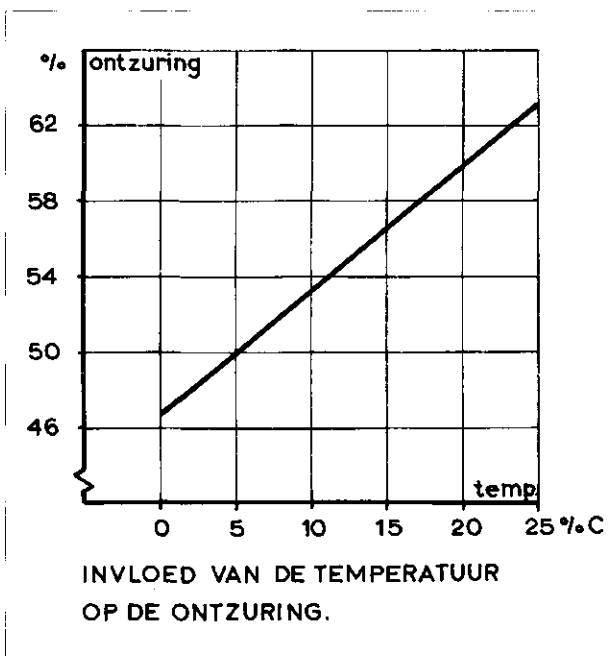
Er wordt aangenomen dat k_A constant blijft met oplopende H en N . De energiekosten per m^3 en per meter opvoerhoogte zijn gesteld op 0,03 cent en de prijs van de kalk op f 100,—/ton.

In afb. 9 zijn de volgende variabelen toegepast: $k_A = 0,2$; $N = 5$ en 10 per meter en $R/m = 3$ en 7 . Zie ook het onderschrift van afb. 9. Met een beginconcentratie $c_o = 25,8$ mg/l CO_2 en $1,8$ meq. HCO_3' . De evenwichtsconcentratie met HCO_3' (Tillmans) is 2 mg/l CO_2 ; t.g.v. de toevoeging van kalk stijgt de evenwichtsconcentratie in dit gebied slechts in geringe mate ca. $1,0$ mg/l en is voor de kurven 1 t/m 3 rekening gehouden met 3 mg/l CO_2 . Curve 4 hoort bij een aanvangsconcentratie van $50,8$ mg/l CO_2 en een bicarbonaatconcentratie 3 meq/l. Bij deze concentratie HCO_3' is rekening gehouden met de verschuiving van de Tillmanse evenwichtsconcentratie t.g.v. de toevoeging van kalk.

De marginale hoogte wordt bepaald door de ligging van het minimum van de sommatiecurve van kosten van opvoerhoogte en chemisch ontzuren. Dit wordt in afb. 9 gegeven door het raakpunt van de krommen 1 t/m 4 en een rechte met helling gelijk, maar negatief, aan die van de kosten van opvoerhoogte.

Bij gelijke aanvangsconcentratie is de invloed van de gekozen variabelen op de marginale hoogte (ca. 2 m) te verwaarlozen; de invloed op het chemicaliënverbruik is duidelijk aanwezig. Verlaging van de verhouding waterlucht van $9,1$ naar $3,9$ heeft tot gevolg dat het kalkverbruik met 60% toeneemt.

Afb. 8



Afb. 9 - Marginale hoogte van de beluchter.

Hogere beginconcentraties koolzuur gepaard gaande met hogere bicarbonaatconcentraties vragen meer opvoerhoogte ($2,7$ m). De totale kosten behoeven t.g.v. de hogere Tillmanse evenwichtsconcentratie niet groter te zijn.

Met kalk geneutraliseerd neemt de hardheid van het water toe met $0,64^\circ d$ per 10 mg koolzuur. Om kwalitatieve redenen kan een intensievere aeratie, dan overeenkomt met de marginale hoogte, wenselijk zijn.

Dank is verschuldigd aan prof. L. Huisman voor zijn kritische opmerkingen t.a.v. rentabiliteit van de beluchter.

Literatuur

1. Haney, P. D. *Theoretical principles of aeration*. JAWWA 46 (1954) 353-376.
2. Beek, W. J. *Fysisch-technologische aspecten van de gasabsorptie*. 20e Vakantiecursus, Delft 1968.
3. Huisman, L. *Praktijk van de aeratie*. 20 Vakantiecursus, Delft 1968.
4. Schäfer, W. *Untersuchungen zur Entsäuerung durch Belüftung*. Vom Wasser (1967) 443-458.
5. Sybrandi, J. C. *Ontzuring d.m.v. cascades*. H_2O 3 (1970) 32-39.

• wordt vervolgd